



Analyzing and Improving Production Line Efficiency Using Simulation in the Auto Parts Industry

Ehsan Poorali Malabad^{ID}
Nasser Motahari Farimani^{ID}
Azam Modares^{ID}
Kimia Abdari^{ID}

Extended Abstract

Introduction: Paying attention to the production and productivity of industries can accelerate industrial growth and development while guiding it on a correct and sustainable path. Evaluating production efficiency and striving to improve it play a crucial role in the progress and advancement of industries. This study proposes an innovative approach to evaluate and improve the efficiency of a production line using simulation as the primary tool and also addresses the reengineering of production line processes. The main objectives of this research include identifying bottlenecks in the production process, analyzing production cycle times, evaluating buffer capacities within specified time intervals, and determining the optimal resource capacities required in the factory.

Methods: This research examines and models a fully automated production line and provides a systematic framework based on discrete-event simulation. The modeling process was conducted in two stages. In the first stage, rework and separation activities were excluded from consideration, while in the second stage, these details were incorporated into the model. In this phase, real data collected from a case study were applied to the model. To ensure the accuracy of the designed model, the logic of the modeled process was continuously reviewed, and the model's outputs were compared with actual system data. After identifying the factors contributing to reduced production line efficiency, four improvement scenarios were proposed and analyzed using the simulation model. Arena software was utilized to evaluate the scenarios and conduct sensitivity analyses.

Received: Feb. 17, 2024; Revised: Oct. 21, 2024; Accepted: Nov. 24, 2024; Published Online: Nov. 30, 2024.

* MSc, Department of Management, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

** Associate Professor, Department of Management, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Corresponding Author: n.motahari@um.ac.ir

*** PhD, Department of Management, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

**** MSc Student, Department of Management, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.



Results and discussion: The results reveal that incorporating details such as operator break times and downtimes into the simulation model—bringing it closer to reality—reduced the production line efficiency from 80% to 57%. Rework and separation activities also significantly impacted the efficiency. Four improvement scenarios were designed and evaluated within the optimized model. In the first scenario, changes in resource capacities related to the main processes were thoroughly examined, leading to a significant reduction in waiting times in process queues and overall process duration. In the second scenario, reducing the percentage of parts sent to rework and separation resulted in a considerable improvement in production efficiency. The third scenario focused on minimizing process time by determining optimal control variable values, while the fourth scenario aimed to maximize efficiency by optimizing resource capacities. In all scenarios, increasing resources at bottleneck activities, through logical and balanced combinations, significantly enhanced process efficiency. Sensitivity analysis confirmed the practical applicability of the improvement scenarios in real-world conditions.

Conclusion: The findings indicate that discrete-event simulation is an effective tool for managers, enabling them to make informed decisions about improving production efficiency without incurring irreversible costs. Additionally, the results align closely with prior studies that have utilized discrete-event simulation to optimize various organizational processes, further confirming the positive impact of this approach on improving process performance.

Keywords: Production Efficiency; Simulation; Assembly Line; Productivity; Automotive Industry.

How to Cite: Poorali Malabad, Ehsan; Motahari Farimani, Nasser; Modares, Azam; Abdari, Kimia (2024). Analyzing and Improving Production Line Efficiency using Simulation in the Auto Parts Industry. *Ind. Manag. Persp.*, 14(4), 68-97 (In Persian).



تجزیه و تحلیل و بهبود بازده خط تولید با استفاده از شبیه‌سازی در صنعت قطعات خودرو

احسان پورعلی مال آباد^{ID}

ناصر مطهری فریمانی^{ID}

اعظم مدرس^{ID}

کیمیا آبداری^{ID}

چکیده گسترده

مقدمه و اهداف: توجه به تولید و افزایش بهره‌وری صنایع می‌تواند ضمن تسریع در رشد و توسعه صنعتی، این روند را در مسیری اصولی و پایدار هدایت کند. ارزیابی بازده تولید و تلاش برای بهبود آن نقش کلیدی در پیشرفت و توسعه صنایع ایفا می‌کند. در این پژوهش، رویکردی نوآورانه برای ارزیابی و بهبود بازده تولید یک خط تولید ارائه شده است که از شبیه‌سازی به عنوان ابزار اصلی استفاده می‌کند. این رویکرد همچنین به بازمهندسی فرآیندهای خط تولید می‌پردازد. اهداف اصلی این تحقیق شامل شناسایی گلوگاه‌های موجود در فرآیند تولید، تحلیل مدت‌زمان چرخه تولید، ارزیابی ظرفیت بافرهای سیستم در بازه‌های زمانی مشخص، و تعیین ظرفیت بهینه منابع مورد نیاز کارخانه است.

روش: این مقاله به بررسی و مدل‌سازی یک خط تولید تمام اتوماتیک می‌پردازد و چارچوبی نظام‌مند بر پایه شبیه‌سازی گسسته پیشامد ارائه می‌دهد. فرآیند مدل‌سازی در دو مرحله انجام شده است: در مرحله اول، مدل‌سازی بدون در نظر گرفتن فعالیت‌های دوباره‌کاری و جداسازی صورت گرفته، و در مرحله دوم این جزئیات به مدل اضافه شده‌اند. در این مرحله، داده‌های واقعی جمع‌آوری شده از مطالعه موردی در مدل اعمال شده‌اند. برای اطمینان از صحت مدل طراحی شده، منطبق فرآیند مدل‌سازی به صورت مداوم ارزیابی شده و نتایج مدل با داده‌های واقعی سیستم مقایسه شده‌اند. پس از شناسایی عوامل کاهش‌دهنده بازده خط تولید، چهار سناریوی پیشنهادی برای بهبود بازده خط تولید طراحی و در مدل شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین، تحلیل حساسیت سناریوها و ارزیابی اثرات آن‌ها با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار ارنا انجام شده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰.

* کارشناسی ارشد، گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

** دانشیار، گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

نویسنده مسئول: n.motahari@um.ac.ir

*** دکتری، گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

**** دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

نوع مقاله: پژوهشی

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن جزئیاتی مانند زمان استراحت اپراتورها و زمان‌های خرابی به مدل، که موجب واقعی‌تر شدن شبیه‌سازی می‌شود، بازده خط تولید را از ۸۰ درصد به ۵۷ درصد کاهش داده است. همچنین، فعالیت‌های دوباره‌کاری و جداسازی نقش قابل‌توجهی در کاهش بازده ایفا کرده‌اند. در مدل بهینه، چهار سناریوی بهبود مورد بررسی قرار گرفت. در سناریوی اول، تغییر ظرفیت منابع مربوط به فعالیت‌های اصلی در یک مدل ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفت. این تغییرات به کاهش چشمگیر زمان انتظار موجودیت‌ها در صف فعالیت‌ها و همچنین کاهش زمان فرآیند منجر شد. در سناریوی دوم، با کاهش درصد قطعاتی که به دوباره‌کاری و جداسازی نیاز دارند، بازده خط تولید به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. سناریوی سوم با هدف کمینه‌سازی زمان فرآیند از طریق تعیین مقادیر بهینه متغیرهای کنترلی تدوین شد و در نهایت، سناریوی چهارم با تمرکز بر بیشینه‌سازی بازده از طریق تعیین ظرفیت بهینه منابع انجام شد. در تمامی سناریوها، مشخص شد که افزایش تعداد منابع در فعالیت‌هایی که به‌عنوان گلوگاه شناسایی شده‌اند، با ترکیب‌های منطقی و بهینه، موجب افزایش بازده فرآیند می‌شود. علاوه بر این، تحلیل حساسیت مدل نشان داد که نتایج سناریوهای بهبود با واقعیت سیستم هم‌راستا بوده و قابلیت اجرا دارند.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان دادند که استفاده از روش شبیه‌سازی گسسته پیشامد می‌تواند ابزاری مؤثر برای مدیران باشد تا بدون تحمل هزینه‌های جبران‌ناپذیر، تصمیمات آگاهانه‌تری در زمینه بهبود بازده تولید اتخاذ کنند. نتایج این تحقیق همچنین همخوانی قابل‌توجهی با پژوهش‌های پیشین دارد که از شبیه‌سازی گسسته پیشامد برای بهینه‌سازی فرآیندهای مختلف سازمانی استفاده کرده‌اند و تأثیر مثبت این رویکرد را بر بهبود عملکرد فرآیندها تأیید می‌کنند.

کلید واژه‌ها: بازده تولید؛ شبیه‌سازی؛ خط تولید؛ بهره‌وری؛ خودروسازی.

استناددهی: پورعلی مال‌آباد، احسان؛ مطهری فریمانی، ناصر؛ مدرس، اعظم؛ آبداری، کیمیا (۱۴۰۳). تجزیه و تحلیل و بهبود بازده خط تولید با استفاده از شبیه‌سازی در صنعت قطعات خودرو. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴(۴)، ۶۸-۹۷.



۱. مقدمه

توجه به نقش مهمی که صنعت خودروسازی در میزان تولید ملی، اشتغال و درآمد دارد، نشان می‌دهد که ارزیابی و بهبود کارایی و بازده این صنعت از اهمیت زیادی برخوردار است. بهبود کارایی و افزایش تولید در این صنعت می‌تواند تاثیر زیادی در رشد اقتصادی کشور داشته باشد [۵۹]. بهینه‌سازی بازده و کارایی از مسائل مهمی است که در قرن اخیر بسیار عنوان شده است [۴۲]. یکی از شاخص‌های تاثیرگذار بر تصمیم‌گیری‌های مدیران تولید، بازده تولید است. بالابودن بازده تولید بدین معنی است که خط تولید بیشترین میزان تولید را با استفاده از حداکثر ظرفیت خود داشته باشد و با کمترین منابع، کمترین هزینه واحد و ضایعات حداقلی، کالا و محصولات را تولید کند [۱۵، ۶]. به حداکثر رساندن استفاده از ظرفیت منابع و حداقل کردن هزینه و همچنین ایجاد تعادل میان این دو با حفظ کیفیت محصولات، باعث افزایش درآمد و در نتیجه حصول منافع مالی خواهد شد. افزایش درآمد و حصول منافع مالی از اهداف مدیران تولید بوده و رسیدن به این امر نیازمند بررسی توانمندی‌های سازمان و منابع و ارائه روش‌ها و برنامه‌های بهبود استفاده از این ظرفیت‌ها می‌باشد [۳۲، ۳۸، ۵۴].

بازده تولید رابطه مستقیمی با درجه توسعه یافتگی صنایع دارد. این موضوع، اهمیت توجه به بهینه‌سازی الگوی مصرفی منابع و امکانات تولید در رشد و توسعه صنایع را نشان می‌دهد [۳۶، ۲۱]. برای بالابردن بازده خط، نیازمند طراحی خط تولیدی هستیم که خروجی و بازده آن بالا باشد و تجزیه و تحلیل خط، مدیران را در رسیدن به این هدف کمک می‌کند. در تجزیه و تحلیل خط یا جریان باید عوامل تاثیرگذار بر خط تولید را شناسایی کرد و به کنترل و اصلاح آن‌ها پرداخت [۱۸]. از جمله عواملی که بر نرخ تولید تاثیرگذار هستند، می‌توان به تعداد منابع، اعم از ماشین‌آلات و نیروی انسانی، زمان‌های خدمت‌دهی، میزان خرابی‌ها، زمان‌های حمل و نقل، زمان‌های استراحت و توقف خط تولید، اشاره نمود [۵۵]. عواملی که توسط نیروی انسانی انجام می‌شوند، مانند زمان آماده‌سازی و تنظیم تجهیزات تولید، زمان عملیات و نرخ تعمیر و همچنین نرخ خرابی‌های ماشین‌آلات و توقف خط، نشان‌دهنده تصادفی بودن داده‌های سیستم هستند که در نتیجه آن‌ها، نرخ بهره‌برداری از ماشین‌آلات و کل فرآیند تولید نیز از داده‌های غیرقطعی پیروی خواهند کرد [۵۸].

تحلیل عوامل تاثیرگذار بر سیستم می‌تواند با استفاده از روش‌های آزمون و خطا و همچنین روش‌های تحلیل ریاضی صورت پذیرد. روش‌های آزمون و خطا، از روش‌های مرسوم برای بهبود خط تولید بوده است که استفاده از آن، بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. روش‌های تحلیل ریاضی نیز از دیگر روش‌های مرسوم می‌باشد که نتایج تولیدی این روش‌ها از دقت صددرصدی برخوردار است. این روش‌ها معمولاً در زمانی که رفتار سیستم به دلیل تطابق با واقعیت، رفتاری پیچیده تولید می‌کند، کاربرد کمتری دارد. تحلیل این گونه از سیستم‌ها با استفاده از تکنیک‌های شبیه‌سازی، مشکلات روش‌های پیشین را تا حدودی برطرف می‌سازد [۱۰، ۲۵، ۳۱].

بررسی سناریوهای بهبود بازده تولید از طریق اعمال آن‌ها در سیستم و در دنیای واقعی، علاوه بر اینکه منجر به توقف خط تولید می‌شود، زمان‌بر بوده و هزینه‌های زیادی را به همراه دارد. شبیه‌سازی، روشی کامپیوتری است که با مدل کردن خط تولید و اعمال سناریوهای مختلف، به بررسی چگونگی رفتار سیستم در صورت پیاده‌سازی برنامه‌های بهبود می‌پردازد و مشکلاتی که تصمیم‌گیری‌های اشتباه برای کارشناسان و مدیران به همراه دارند را تا حدودی کاهش می‌دهد [۱۹، ۳۴، ۳۶]. تغییر پارامترهای تاثیرگذار بر بازده تولید و بررسی تاثیر تغییر آن‌ها بر بازده با استفاده از شبیه‌سازی، منجر به شناسایی و انتخاب استراتژی مناسب به جهت بهبود کیفیت محصولات توأم با کاهش هزینه‌ها می‌شود و حتی در طراحی خط تولید محصولات جدید نیز کاربرد دارد [۳۹، ۶۲].

از عواملی که بر کاهش بازده تولید بسیار تاثیرگذار هستند، توقفات خط تولید می‌باشد که شامل توقفات برنامه‌ریزی شده و توقفات برنامه‌ریزی نشده یا اتفاقی می‌شود. بروز این توقفات باعث کاهش بازده خط شده و هزینه‌های زیادی را به سازمان تحمیل می‌کند و حتی می‌تواند باعث تاخیر در تحویل محصول و بی‌اعتباری سازمان شود. این توقفات می‌تواند به دلیل نبود امکانات مورد نیاز تولید و بروز مشکل در امکانات اتفاق بیفتد. در زمان راه‌اندازی دستگاه‌ها و توقفات مجاز اپراتورها نیز خط تولید نمی‌تواند به تولید خود ادامه دهد و خروجی داشته باشد. از دیگر عوامل تاثیرگذار، دوباره‌کاری‌هایی است که باید در جهت اصلاح خروجی‌های معیوب صورت پذیرد که آن هم زمان‌بر بوده و بازده خط را پایین می‌آورد [۴۳].

در پژوهش‌های پیشین، افزایش چشم‌گیر بهره‌وری و کاهش درصد خطاها به عنوان مزایای خطوط تمام اتوماتیک ذکر شده‌اند [۲، ۱۷]. این در حالی است که تمام خودکار بودن خط تولید نیز نمی‌تواند حداکثر بهره‌وری را تضمین کند. در تحقیق حاضر به بررسی بازده خط تولید پوسته پمپ هیدرولیک پرداخته می‌شود. این فرآیند متشکل از ماشین‌آلات تمام اتوماتیک با قابلیت تغییر ابزارهای تثبیت‌کننده^۱ آن به منظور تولید محصولات متفاوت است. در این تحقیق، عواملی که روی بازده تولید موثر هستند مشخص شده و سپس به ایجاد مدل شبیه‌سازی پرداخته شده است تا بتوان نتایج این مدل را با شرایط واقعی مقایسه کرد و عواملی که در کاهش بازده خط تولید نقش داشته‌اند، مورد بررسی و تحلیل قرار گیرند. فعالیت‌هایی که در خط تولید مورد بررسی قرار می‌گیرند، نیازمند تغییرات گسترده در تنظیمات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری توسط متخصصین تحقیق و توسعه می‌باشند و انجام این تغییرات منجر به توقف یک روزه خط تولید می‌شود. توقفات خط تولید از عوامل تاثیرگذار بر کاهش بازده تولید است. ضایعات و دوباره‌کاری‌ها نیز از دیگر دلایل کاهش بازده این خط هستند. پژوهش‌های زیادی در زمینه بررسی بازده و بهبود آن انجام شده است اما مستندات علمی اندک در این زمینه نشان‌دهنده ضرورت توجه به تجزیه و تحلیل و بهبود بازده یک خط تولید می‌باشد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

بازده تولید. بازده در فرهنگ واژگان فارسی به معنای سودآوری، مفید بودن و کامیابی آمده است. سازمان بین‌المللی کار از بازده با عبارت زیر یاد می‌کند: «بهبود بازده و تولید باید به عنوان یک اصل اساسی در خدمت رفاه انسان‌ها باشد». در رابطه با تعریف کاربردی بازده، تعریف پذیرفته‌شده‌ای که مورد توافق همگان باشد وجود ندارد، اما در اینجا به تعدادی از این تعاریف اشاره می‌شود: بازده به مفهوم نسبت بین خروجی تولید به واحد منابع مصرف‌شده است که با یک نسبت مشابه دوره پایه مقایسه می‌شود و به کار می‌رود [۶۳]. بازده برابر است با خارج قسمت خروجی (میزان تولید) بر عوامل تولید. بازده درجه استفاده مؤثر از هر یک از عوامل تولید است. بازده در درجه اول یک دیدگاه فکری است که همواره سعی دارد آنچه را که در حال حاضر موجود است، بهبود بخشد [۶۴]. بازده مبتنی بر این عقیده است که انسان می‌تواند کارها و وظایفش را هر روز بهتر از روز پیش به انجام رساند. علاوه بر آن، بازده مستلزم آن است که به طور پیوسته تلاش‌هایی در راه انطباق فعالیت‌های اقتصادی با شرایط دائمی در حال تغییر و همچنین تلاش‌هایی برای به کارگیری نظریه‌ها و روش جدید انجام گیرد. بازده عبارت است از رابطه بین ستاده حاصل از یک سیستم تولید با داده‌های به کاررفته (مانند نیروی کار، سرمایه و ...) به منظور تولید آن ستاده (سازمان بین‌المللی کار). منظور از سیستم تولیدی در تعریف فوق، هر سیستمی است که با تغییر ورودی‌ها، کالا یا خدمت تولید کند [۱، ۳، ۳۹]. بنابراین، بازده منحصر به سیستم‌های تولید کالا نیست؛ بلکه در رابطه با سیستم‌های تولیدکننده خدمات نیز کاربرد دارد. منظور از ستاده یا خروجی یا برون‌داد، حاصل عملیات سیستم تولیدی است که می‌تواند به صورت کالا یا خدمات عرضه شود. منظور از داده یا ورودی یا درون‌داد نیز، کلیه منابع مورد نیاز به منظور تولید کالا یا خدمت مورد نظر است [۳۵]. در مبحث بازده، داده یا منابع عبارتند از نیروی انسانی، سرمایه، ماشین‌آلات. با توجه به تعاریف بالا، نسبت بین ستاده و داده هر سیستم نشان‌دهنده سطح بازده آن سیستم یعنی میزان استفاده از منبع یا منابع موجود است [۱].

در مبانی نظری موضوع، اهمیت توجه به مقوله بازده و اندازه‌گیری آن در جهت تحقق اهداف توسعه، قابل مشاهده است.

کود و بروکل^۲ (۲۰۱۲) در مقاله‌ای به بررسی رابطه بین رشد بنگاه و رشد بازده در بنگاه‌های فرانسه پرداختند. الگوی مورد استفاده در این مطالعه روش خودرگرسیون برداری تابلویی^۳ برای بنگاه‌های فرانسه طی سال‌های ۲۰۰۴-۱۹۹۴ می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان داد که رشد استخدام نیروی کار با رشد بازده در بنگاه‌های مذکور رابطه منفی داشته است [۱۲]. کروس^۴ و همکاران (۲۰۱۲) در مقاله‌ای با عنوان «تأثیر ریسک سرمایه‌گذاری در رشد بازده شرکت‌های کارآفرین اروپا، اثر غربالگری یا ارزش افزوده» به بررسی تأثیر سرمایه‌گذاری با ریسک و بدون ریسک بر روی بازده شرکت‌های با تکنولوژی بالا در اروپا پرداخته‌اند. در این پژوهش با استفاده از روش داده‌های تابلویی و تخمین‌زننده گشتاورهای تعمیم‌یافته، برای دوره ۲۰۰۴-۱۹۸۴، به این نتیجه رسیدند که ارزش افزوده در بخش سرمایه‌گذاری ریسک‌پذیر بر سبب دارایی بنگاه‌ها تأثیرگذار است. همچنین نتایج برآورد الگو نشان داد که میان رشد بازده برای سرمایه‌گذاری‌های بدون ریسک و ریسک‌پذیر تفاوت معناداری وجود ندارد.

1. Fixture

2. Coad & Broekel

3. Panel vector auto regressive models

4. Croce

[۱۳]. کارسما^۱ و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی مقوله رشد بنگاه و بازده در کارخانجات خودروسازی بلاروس پرداختند. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های ۱۵۳ شرکت اتومبیل‌سازی کشور بلاروس طی دوره ۲۰۱۰-۲۰۰۵ به تخمین الگوی گشتاورهای تعمیم‌یافته به منظور آزمون قانون رشد گیبرات^۲ پرداختند. نتایج نشان داد که بین رشد بنگاه و رشد استخدام نیروی کار رابطه منفی برقرار است و بنابراین، قانون گیبرات تأیید شد. همچنین به‌منظور برآورد بازده این شرکت‌ها الگوی داده‌های تابلویی استفاده گردید. نتایج نشان داد که بازده صنعت اتومبیل‌سازی در بلاروس بر اساس نیروی کار است و بازده در بنگاه‌های اتومبیل‌سازی در بلاروس در بخش‌های غیردولتی بالاتر از بخش‌های مورد حمایت دولت است [۱۴]. دیاس^۳ و همکاران (۲۰۱۹) برای بهبود بازده، افزایش ظرفیت تولید و جلوگیری از هدررفت منابع خط تولید صنعت مونتاژ خودرو، تکنیک‌های تولید ناب از جمله بالانس خط را به کار بردند و توانستند ظرفیت خط تولید را به مقدار ۳۷ درصد افزایش داده و بهره‌وری کل تجهیزات را ۲۲ درصد افزایش دهند [۱۶]. پیرا^۴ و همکاران (۲۰۱۹) تکنیک حل مسئله A3 را برای بهبود بهره‌وری خط تولید کابل‌های ترمز اعمال کردند. آن‌ها با استفاده از روش A3 در این تحقیق، بهبود بهره‌وری، افزایش بهره‌وری کل تجهیزات خط تولید، تعریف اقدامات بهبود مختلف برای اجرا، دستیابی به هدف تعیین شده و اعتبارسنجی نتایج، اجرای آن را هدف قرار دادند. راه‌حل‌های پیاده‌سازی شده، بهره‌وری را ۴۹ درصد افزایش داد [۴۶]. بونگمین^۵ و همکاران (۲۰۲۰) با تکنیک‌های بالانس خط و مطالعه کار، به بررسی بازده و بهبود یک خط تولید پوشاک پرداختند و از تکنیک وزنی^۶ استفاده کردند تا بهره‌وری خط را افزایش دهند و همچنین تعداد ایستگاه‌های کاری را حداقل کنند [۹]. لو^۷ و همکاران (۲۰۲۱) برای اندازه‌گیری کارایی صنعت ساخت و ساز در سه منطقه چین، از یک مدل تحلیل پوششی داده‌های خروجی محور استفاده کردند. آن‌ها از این طریق یک روش غیر شعاعی تحلیل پوششی داده‌ها، به نام حداقل‌سازی اصطکاک فاصله (DFM) علل ناکارآمدی را شناسایی کرده و راه‌حل‌هایی برای بهبود بهره‌وری صنعت ساخت و ساز منطقه‌ای ارائه دادند [۴۰].

مرتضی و سولی^۸ (۲۰۲۳) با استفاده از ابزارهای تولید ناب، به‌ویژه رویکرد تعریف، اندازه‌گیری، تجزیه و تحلیل، بهبود و کنترل (DMAIC) و روش بالانس خط به اندازه‌گیری و بهبود کارایی خط تولیدی در صنعت سیم‌کشی پرداختند. آن‌ها پس از محاسبه زمان‌های ۱۷ ایستگاه کاری، با استفاده از روش ۵ چرا، به تحلیل وضعیت پرداختند و با ایجاد توازن بین ایستگاه‌های کاری، کارایی از ۷۸ درصد به ۹۵ درصد افزایش یافت [۳۶]. آلفارو و باوتیستا^۹ (۲۰۲۴) به بررسی در نظر گرفتن ارگونومی در طراحی خط تولید و تاثیر آن بر کارایی خط تولید پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن زمان، فضا و ارگونومی به ارزیابی این مسئله پرداختند. نتایج نشان داد که ارزیابی ارگونومی در طراحی خط به خطوط ایمن‌تر اما کم‌تر بهره‌ور منجر می‌شود که در نتیجه تعداد ایستگاه‌ها و هزینه‌ها افزایش می‌یابد [۵].

شبیه‌سازی. شبیه‌سازی کامپیوتری عبارت است از روش‌هایی برای مطالعه گسترده مدل‌هایی متنوع از سیستم‌های واقعی، با استفاده از ارزیابی-های عددی، که توسط نرم‌افزار، جهت کپی‌برداری و تقلید از عملیات و خصوصیات سیستم (اغلب) در طی زمان صورت می‌گیرد [۲۲، ۵۲]. از نقطه نظر عملی، شبیه‌سازی، فرآیند طراحی و ایجاد مدل‌های کامپیوتری از سیستم واقعی یا پیشنهادی می‌باشد که برای اجرای آزمایشات عددی جهت درک بهتر سیستم در شرایط مختلف استفاده می‌گردد [۶۰]. اگرچه این تکنیک برای مطالعه سیستم‌های ساده نیز قابل استفاده می‌باشد، اما قدرت اصلی آن هنگام مطالعه سیستم‌های پیچیده آشکار می‌شود. دلیل اصلی محبوبیت شبیه‌سازی به قابلیت آن در حل کردن مدل‌ها و سیستم‌های پیچیده برمی‌گردد [۵۷]. این امر، شبیه‌سازی را به یک ابزار قدرتمند و همه‌کاره تبدیل می‌کند. دلیل دیگر رشد چشمگیر محبوبیت شبیه‌سازی، کاهش نسبت عملکرد به قیمت برای سخت‌افزار کامپیوترها است، که باعث می‌شود شبیه‌سازی مقرون‌به‌صرفه‌تر از سال‌های گذشته امکان‌پذیر باشد [۳۷]. شبیه‌سازی مجموعه‌ای از تکنیک‌ها، متدها و ابزارها برای مدل‌سازی یک سیستم و استفاده این مدل برای مطالعه سیستم

1. Cuaresma

2. Gibrat's Law

3. Dias

4. Pereira

5. Bongomin

6. Ranked positional weight technique

7. Luo

8. Mortada & Soulhi

9. Alfaro-Pozo Bautista-Valhondo

می‌باشد و در جایی که رویکردهای تحلیلی برای مدلسازی بی‌فایده است، بهترین روش شبیه‌سازی است که یک تکنیک قدرتمند در حل مسئله می‌باشد و منشأ آن تئوری نمونه‌گیری آماری و تحلیل سیستم‌های فیزیکی احتمالی پیچیده می‌باشد [۷].

مطالعات شبیه‌سازی، کاربردهای زیادی در مهندسی صنایع و علوم دیگر پیدا کرده است و به عنوان ابزاری در جهت افزایش ظرفیت تولید و منافع یک کارخانه می‌باشد [۹]. مطالعات شبیه‌سازی تنها به فهمیدن و درک فرآیندها کمک نمی‌کند، بلکه مدل کردن گرافیکی در محیط ارنا کمکی به بهبود تصمیمات مدیران در عرصه کار خود می‌باشد [۷]. مدل‌های شبیه‌سازی در فرآیندهای تولیدی از اهمیت خاصی برخوردار هستند زیرا در دنیای واقعی هرگونه تغییر در شرایط خط مونتاژ نیازمند هزینه‌های زیاد بوده و باعث توقف خط می‌گردد؛ ولی بعد از مدل کردن سیستم، به راحتی و بدون هزینه‌های اضافی، مهندس‌ها و کارشناسان می‌توانند تغییرات مد نظر خود را اعمال نمایند [۱۹].

کاخلمی و همکاران (۲۰۱۴) شبیه‌سازی گسسته پیشامد^۱ را برای بررسی استراتژی‌ها و سناریوهای تغییر در اورژانس بیمارستان قائم مشهد اجرا کردند. در این مطالعه، ابتدا معیارهای عملکردی کلیدی سیستم شناسایی شد و سپس این سیستم به کمک نرم‌افزار ارنا مدلسازی و شبیه‌سازی گردید. در پایان، به کمک روش رتبه‌بندی پرامتی^۲ سناریوها رتبه‌بندی شده و بهترین سناریو برای اعمال مشخص شد [۳۱]. خاتمی و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقی به شناخت الگوهای رفتاری مشتریان بانک و خوشه‌بندی آن‌ها پرداختند و یک مدل چندهدفه تخصیص خدمات بانک به هر یک از خوشه‌ها را طراحی کردند. اهداف مدل طراحی شده افزایش میزان رضایت مشتریان، کاهش هزینه‌ها و کاهش ریسک تخصیص خدمات بود که با توجه به این که مسئله دارای یک راه‌حل بهینه نبود و هر یک از ویژگی‌های مشتری دارای یک تابع توزیع احتمالی بودند، برای حل مسئله از شبیه‌سازی استفاده شد [۳۳]. هو^۳ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای از رویکرد شبیه‌سازی گسسته پیشامد برای ارزیابی نحوه اثرگذاری ظرفیت باتری بر عملکرد یک برنامه به اشتراک‌گذاری اتومبیل استفاده کردند. نتایج نشان داد که ظرفیت محدود باتری، رضایت کاربر و بهره‌وری خودرو را کاهش داده است. افزایش سرعت شارژ، بیشینه‌سازی برد، و نسبت خودرو به سفر به کاهش این اثرات منفی کمک می‌کند [۲۴]. عطایی و همکاران (۲۰۱۹) مدلی برای مدیریت فرآیند کسب‌وکار ارائه کردند. این مدل با بهره‌مندی از شبیه‌سازی گسسته پیشامد در سطح فرآیندی و شبیه‌سازی عامل‌بنیان در سطح عامل‌ها و رفتارهای آن‌ها، عملیات شبیه‌سازی ترکیبی فرآیند ارائه و در یکی از بانک‌های خصوصی ایران اجرا شد [۸]. جاوید موید و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی عوامل مختلف تاثیرگذار بر میزان رضایت یا نارضایتی مشتریان بازار تلفن همراه و تاثیر آن‌ها بر یکدیگر پرداختند. در این پژوهش، از رویکرد گسسته پیشامد در سطح میانی و رویکرد پویایی‌شناسی سیستم در سطح راهبردی استفاده شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از مدل ترکیبی پیشنهادی، کارایی بیشتری نسبت به استفاده از رویکردهای شبیه‌سازی به تنهایی دارد [۲۷]. ملمان^۴ و همکاران (۲۰۲۱) برای ارزیابی استراتژی‌های تخصیص منابع بیمارستان به بیماران مبتلا به کرونا و بیماران که مبتلا به کرونا نیستند، یک مدل شبیه‌سازی وقایع گسسته پیشامد ارائه کردند. مدل پیشنهادی نشان داد که چگونه آماده‌سازی به موقع بیمارستان و دسترسی به موقع به کارکنان در میزان درمان بیماران در طول یک همه‌گیری تاثیر دارد [۴۱].

شکور^۵ و همکاران (۲۰۲۱) مدلی بر روی نرم‌افزار شبیه‌سازی ارنا برای بررسی استراتژی‌های مختلف مدیریت در یک مرکز مراقبت‌های بهداشتی خصوصی ارائه دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد که استراتژی پیشنهادی، مراکز مراقبت‌های بهداشتی را قادر می‌سازد تا همه بیماران را در یک روز پس از ورود، بدون هیچ گونه مراجعه مجددی درمان کند. این مطالعه همچنین نشان داد که چگونه می‌توان از نرم‌افزار شبیه‌سازی ارنا برای ارزیابی اثربخشی فرآیند تصمیم‌گیری مدیریت استفاده کرد [۵۰]. شاکرین و همکاران (۲۰۲۱) برای بهبود مدت زمان فرآیند صدور بیمه‌نامه، افزایش رضایت مشتریان و افزایش میزان بهره‌وری خدمت‌دهندگان، از شبیه‌سازی گسسته پیشامد استفاده کردند و پس از تدوین مدل در محیط نرم‌افزاری به تحلیل نتایج و اجرای سناریوهای بهبود پرداختند [۵۱]. حاجیان و میرزاعلیان (۲۰۲۲) در پژوهش خود، تاب‌آوری یک زنجیره تأمین سنگ ساختمانی در یک کارخانه را با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار ارنا اجرا کردند. پس از اعتبارسنجی مدل از طریق مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اطلاعات واقعی کارخانه، سناریوهای مختلف برای مدیریت اختلال و نشان‌دادن تاب‌آوری سیستم ایجاد و آزمایش شدند و بر اساس

1. Discrete-Event Simulation
2. PROMETHEE
3. Hu
4. Melman
5. Shakoore

معیارهای در نظر گرفته شده، عملکرد هر یک از سناریوها ارزیابی و در نهایت سناریو منتخب برای اجرا در دنیای واقعی انتخاب شد [۲۳]. مسیب مطلق و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی خطوط تولید چند محصولی با چیدمان ترکیبی (سری-موازی) با احتمال خرابی ماشین‌آلات در هر ایستگاه کاری پرداختند. هدف آن‌ها توسعه یک مدل ریاضی چندهدفه شامل بیشینه‌سازی نرخ تولید و کمینه‌سازی هزینه‌های ناشی از کاهش زمان پردازش ایستگاه‌های کاری بود. آن‌ها به منظور بررسی تغییرات نرخ خروجی سیستم تولید، به دلیل هزینه و زمان زیاد، از تکنیک شبیه‌سازی به منظور بهینه‌سازی خط تولید استفاده کردند [۴۵].

در ادامه، به تحقیقاتی که از شبیه‌سازی برای بررسی و تجزیه و تحلیل خط تولید استفاده کرده‌اند، پرداخته شده است.

آرئولا^۱ و همکاران (۲۰۱۱) از الگوریتم هیوریستیک برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سیستم‌های تولیدی موجودی احتمالی استفاده کردند و نتایج را در صنایع نفت و گاز به کار برده‌اند که منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌ها شده است [۷]. کایاسا و هرمان^۲ (۲۰۱۲) به ارزیابی سیستم‌های تولیدی انتخابی و تطبیقی توسط شبیه‌سازی و ارائه یک ساختار نوآورانه و بهینه برای آن‌ها پرداخته‌اند که منجر به افزایش ۶ درصدی نرخ مونتاژ و کاهش ۶ برابری هزینه‌های ماشین‌آلات تولیدی می‌شود [۳۰]. سروش^۳ و همکاران (۲۰۱۴) با کمینه کردن زمان چرخه فرآیند مونتاژ محصولات یک خط تولید، از نرم‌افزار ارنا^۴ استفاده کرده و مشکلات خط تولید مورد نظر را شناسایی کردند. برای حل این مشکلات، مدیریت سازمان راه‌حل‌های پیشنهادی خود را با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود ارائه کرد که با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار ارنا به تحلیل این راه‌حل‌ها پرداخته شد [۵۳]. عالم تبریز و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی خط تولید دینام خودروی ۴۰۵ در شرکتی پرداختند و درباره تاثیر اجرای روش درام-بافر-روپ^۵ در خط تولید و تاثیر آن‌ها بر شاخص‌های عملکردی کار در جریان ساخت، زمان انتظار، زمان تحویل و توان عملیاتی در مقایسه با خط تولید فعلی مطالعه کردند [۴]. کمپا^۶ و همکاران (۲۰۱۷) برای بررسی امکان استفاده از ربات‌ها به جای نیروی انسانی در خط تولید، از روش شبیه‌سازی گسسته پیشامد استفاده کردند. آن‌ها ابتدا خط تولید را همراه با نیروی انسانی با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی ED شبیه‌سازی کرده و سپس اپراتورهای خط تولید را با ربات‌ها جایگزین و خط را شبیه‌سازی کردند. نتایج، مزیت استفاده از خط تولید رباتیک را در مقایسه با خط تولید دستی تأیید کرد [۲۹].

یاسر و محمد^۷ (۲۰۱۸) با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز Witness به تجزیه و تحلیل عملکرد خط تولید یک شرکت اتوموبیل‌سازی در مالزی پرداختند. در این تحقیق، بهره‌وری و کارایی هر اپراتور به صورت جداگانه اندازه‌گیری شد تا زمان بیکاری و زمان فعالیت هر اپراتور تعیین شود و عملکرد فعالیت‌های تولید را بهبود دهند [۶۱]. سردا و دیگالوار^۸ (۲۰۱۸) در راستای بهینه‌سازی خط مونتاژ کارخانه خودروسازی در هند، به شبیه‌سازی خط مونتاژ با استفاده از ماژول‌های نرم‌افزار ارنا پرداختند. آن‌ها با استفاده از تحلیل واریانس، پارامترهایی که بیشترین تاثیر را در خروجی خط داشتند شناسایی کردند و همچنین بر تاثیرات مثبتی که استفاده از شبیه‌سازی در تصمیم‌گیری‌های مدیریت دارد تاکید داشتند [۴۸]. غالب^۹ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی خط تولید کیسه‌های سیمان با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی ارنا و ترکیب آن با روش ANFIS^{۱۰} پرداختند. آن‌ها به وسیله این روش، ایستگاه‌هایی که موجب توقف خط تولید شده و باعث هدر رفت زمان می‌شدند را شناسایی کرده و اثربخشی تجهیزات را افزایش دادند [۲۰]. سرور ماسوله و عزیززی (۲۰۲۱) به مدل‌سازی فرآیند لجستیک و تجاری‌سازی خودرو در گروه خودروسازی سایپا با هدف تعیین تعداد بهینه ایستگاه کاری و نیروی کار در هر ایستگاه پرداختند. آن‌ها تمام ایستگاه‌های فرآیند را شناسایی و مدل را در نرم‌افزار ارنا پیاده‌سازی کردند و پس از شناسایی ایستگاه‌های گلوگاه، با استفاده از قابلیت OPTQUEST در نرم‌افزار ارنا، دو سناریوی بهینه‌سازی اجرا کردند. نتایج این پژوهش نشان از کاهش ۲۱ درصدی نیروی انسانی و افزایش ۱۰ درصدی توان لجستیکی داشت [۴۹]. اتکو^{۱۱} (۲۰۲۳) به بررسی تاخیر تولید در یک خط

1. Arreola-Risa

2. Kayasa & Herrmann

3. Soroush

4. ARENA

5. DBR

6. Kampa

7. Yasir & Mohamed

8. Sarda & Digalwar

9. Ghaleb

10. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

11. Utku

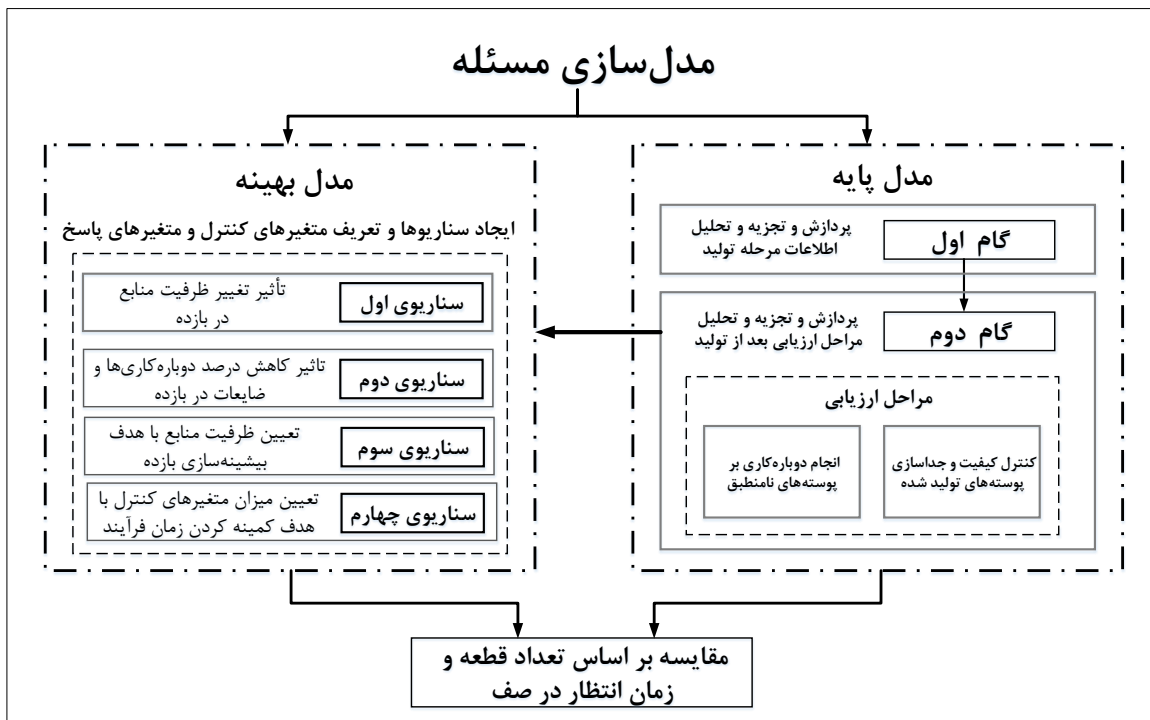
تولید پرداخته است و مشکلاتی که منجر به تاخیر در تولید شده است را بررسی نموده و پس از بررسی رویکردهای بهینه‌سازی تولید، یک مدل ریاضی برای به حداقل رساندن تاخیرها ارائه کرده است. همچنین مدل شبیه‌سازی شده‌ای با استفاده از نرم‌افزار ارنا برای شناسایی گلوگاه‌ها ایجاد کرده تا با یک طرح چیدمان جایگزین برای خط تولید، بازده را بهبود دهد [۵۶].

جمع‌بندی پیشینه

موضوعات مرتبط با بازده و بهره‌وری خط تولید در بسیاری از مقالات مطرح شده‌اند و به طور کلی بر افزایش بهره‌وری نیز تمرکز داشته‌اند [۵، ۱۱، ۱۴، ۱۶، ۴۴، ۴۶، ۵۳، ۶۱]. نکته کلیدی پژوهش حاضر، رویکرد متفاوت آن در بهبود بهره‌وری است که در آن از شبیه‌سازی گسسته پیشامد برای بازمهندسی خط تولید قطعات خودرو استفاده شده است؛ روشی که نسبت به سایر روش‌ها به ندرت در صنعت به کار گرفته می‌شود، اما می‌تواند به نتایج عملی و قابل توجهی منجر شود. با توجه به خودکار بودن ماشین‌آلات در خطوط تولید مورد بررسی، شاید این تصور ایجاد شود که عملکرد خط تولید به وضعیت بهینه نزدیک است و نیازی به شبیه‌سازی و یا تحلیل فنی بیشتری نیست [۲، ۱۷]. با این حال، پژوهش‌های اخیر تاکید دارند که حتی خطوط کاملاً اتوماتیک نیز نیاز به ارزیابی و بهینه‌سازی دارند. زیرا تغییرات کوچک در تخصیص منابع یا جریان کار می‌تواند بهره‌وری کلی را به شکل معناداری تغییر دهد [۲۶، ۲۸، ۴۷]. این تحقیق با پیاده‌سازی نظام‌مند پژوهشی مبتنی شبیه‌سازی که به طور هدایت شده و گام به گام ساختاری برای استفاده از روش شبیه‌سازی گسسته پیشامد را ارائه می‌دهد که می‌تواند برای دیگر پژوهشگران و مخاطبان برای کاربردهای مختلف صنعتی با فرآیندهای مشابه الهام‌بخش باشد. یافته‌های این تحقیق تاکید می‌کند که شبیه‌سازی گسسته پیشامد می‌تواند روش موثری برای شناسایی و رفع محدودیت‌ها باشد.

۳. روش شناسی پژوهش

هدف این پژوهش، بررسی و تحلیل بازده خط تولید با استفاده از شبیه‌سازی است. برای این منظور، مدلی از عوامل مؤثر بر بازده و خروجی‌های مرتبط تشکیل شد تا نتایج شبیه‌سازی دقیق‌تر و منطبق بر شرایط واقعی باشد. پس از مدل‌سازی، داده‌های زمان‌بندی خط تولید در مدل اجرا و نتایج آن با شرایط واقعی مقایسه شدند تا عوامل کاهش بازده شناسایی شوند. این مطالعه در دو مدل پایه و بهینه به بررسی و بهبود بازده تولید پرداخته است. در مدل اول که مدل پایه می‌باشد، به تجزیه و تحلیل بازده خط در دو گام پرداخته شده است. در گام اول این مدل، اطلاعات فرآیند اصلی تولید بدون در نظر گرفتن تغییرات در میزان دسترسی منابع مورد بررسی قرار گرفت. در گام دوم نیز علاوه بر بررسی فرآیند اصلی تولید، مفروضات جدید به مدل اضافه شدند و تغییرات در دسترسی منابع نیز در نظر گرفته شد. در مدل دوم که مدل بهینه نام دارد، به ایجاد و ارائه سناریوهایی در جهت بهبود عملکرد و بازده تولید پرداخته شده است. در سناریوهای تعریف شده برای مدل، به تعیین و بهینه‌سازی تعداد منابع اپراتورها و ماشین‌آلات، بررسی تاثیر کاهش درصد ضایعات و بررسی مدل با هدف کم کردن زمان کل فرآیند پرداخته شد. پس از تعریف سناریوها برای مدل شبیه‌سازی شده، اقدامات مختلفی در راستای آن انجام شد. تحلیل حساسیت سناریوها نیز با استفاده از قابلیت Process Analyzer انجام شد. برای اندازه‌گیری عملکرد از معیارهای زمان انتظار در صف‌ها و تعداد قطعات در صف‌ها در مدل بهینه استفاده شد. شکل ۱ مراحل تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مراحل مدل‌سازی مسئله

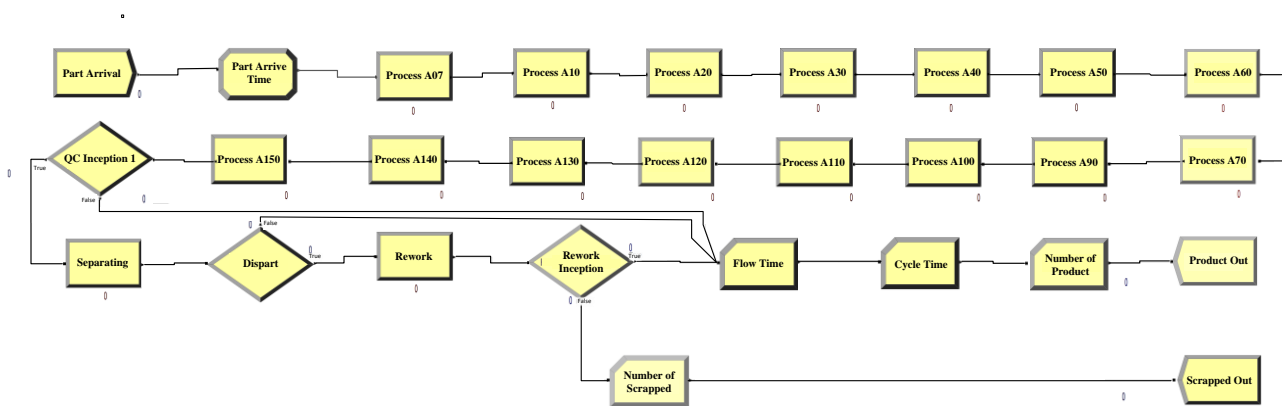
مطالعه موردی. در تحقیق حاضر به بررسی بازده خط تولید پوسته پمپ هیدرولیک یک گروه تولید قطعات خودرو با ۳۰ سال سابقه فعالیت پرداخته می‌شود. این فرآیند مشکل از ماشین‌آلات تمام اتوماتیک با قابلیت تغییر فیکسچرهای آن به منظور تولید محصولات متفاوت است. فرآیند خط تولید پوسته، از ۱۴ فعالیت متوالی تشکیل شده است. فعالیت‌هایی که در خط تولید مورد بررسی انجام می‌شوند، نیازمند تغییرات گسترده در تنظیمات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری توسط متخصصین تحقیق و توسعه می‌باشند و انجام این تغییرات منجر به توقف یک روزه خط تولید می‌شود. توقف خط تولید به صورت روزانه هزینه‌ای بالغ بر ۲۰۰ میلیون تومان را به سازمان تحمیل می‌نماید و می‌تواند تعهدات سازمان را در برابر مشتریان به خطر بیندازد.

در این خط تولید، پوسته‌های خام دریافتی از مرحله قبلی (خط تولید دایکست)، فعالیت‌ها را طی می‌کنند و در هر مرحله ماشین‌کاری‌های لازم بر پوسته خام انجام می‌شود. در هر مرحله نیز ارزش افزوده‌ای به آن اضافه می‌شود. بعد از اتمام فرآیند تولید، واحد کیفیت به بررسی تصادفی پوسته‌ها از نظر استانداردهای کیفی می‌پردازد و تایید یا عدم تایید آن را به واحد تولید اعلام می‌نماید. در صورت عدم تایید محصولات، جداسازی پوسته‌های سالم و ناسالم انجام شده و فرآیند دوباره‌کاری روی پوسته‌هایی که با استانداردها مطابقت نداشته‌اند، انجام می‌شود. در آخر نیز، واحد کیفیت مجدداً به بررسی پوسته‌های دوباره‌کاری شده می‌پردازد و در این مرحله پوسته‌های سالم و ضایعات را از یک‌دیگر جدا کرده و به واحد تولید اعلام می‌نماید. پس از آن نیز اقدامات لازم جهت رسیدن محصولات و ضایعات به انبار انجام می‌شود. مراحل خط تولید پوسته EFV و همچنین نحوه تخصیص نیروها به هر ایستگاه در جدول ۱ نمایش داده شده است:

جدول ۱. مراحل خط تولید پوسته EFV

ردیف	کد فعالیت تولیدی	اپراتور	ردیف	کد فعالیت تولیدی	اپراتور
۱	A۷۰	A۷۰	۸	A۷۰	A۷۰
۲	A۹۰	A۷۰	۹	A۱۰	A۱۰
۳	A۱۰۰	A۷۰	۱۰	A۲۰	A۱۰
۴	A۱۱۰	A۷۰	۱۱	A۳۰	A۳۰
۵	A۱۲۰	A۱۲۰	۱۲	A۴۰	A۳۰
۶	A۱۳۰	A۱۲۰	۱۳	A۵۰	A۵۰
۷	A۱۴۰	A۱۲۰	۱۴	A۶۰	A۵۰

نمودار فرآیند خط تولید پوسته EFV در نرم افزار ارنا، در شکل ۲ نشان داده شده است.

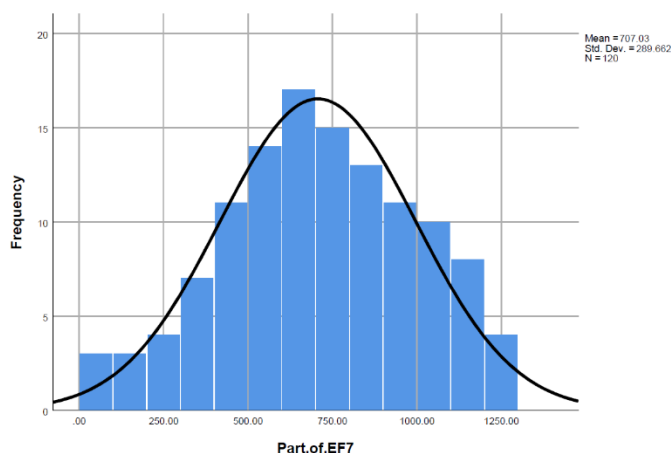


شکل ۲. نمودار فرآیند خط تولید پوسته EFV

داده‌ها. داده‌های مورد استفاده در این مدل به دو دسته داده‌های تولید و داده‌های زمان بندی و فرآیندی تقسیم می‌شود. در ادامه هر کدام از داده‌ها بیشتر توضیح داده می‌شود.

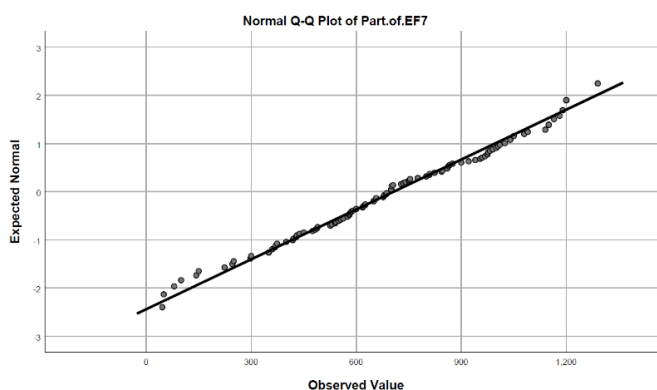
داده‌های تولید. داده‌های تولید شامل سه دسته مواد اولیه ورودی به خط، محصولات و ضایعات خروجی از خط می‌باشد. با توجه به تحلیل آماری که بر روی داده‌های فوق انجام شد، داده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. از آنجا که مجموع مواد اولیه ورودی به خط به ازای ۱۲۰ روز برابر با ۸۴۸۴۴ قطعه می‌باشد، می‌توان توزیع نرمال با میانگین ۷۰۷ و انحراف معیار ۲۹۰ برای آن‌ها در نظر گرفت. براساس تحلیل آماری انجام شده، تابع هیستوگرام داده‌ها به صورت نرمال بوده که فرضیه نرمال بودن داده‌ها را نیز تصدیق می‌کند. شکل ۳ تابع هیستوگرام داده‌ها را نشان می‌دهد.

Graph



شکل ۳. نمودار هیستوگرام توزیع داده‌ها

براساس نمودار Q-Q PLOT رسم شده برای داده‌های ذکر شده، غالب داده‌ها در محدوده خط رسم شده می‌باشد که این امر نرمال بودن داده‌ها را نیز تایید می‌نماید. شکل ۴ نمودار Q-Q PLOT داده‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمودار Q-Q PLOT توزیع داده‌ها

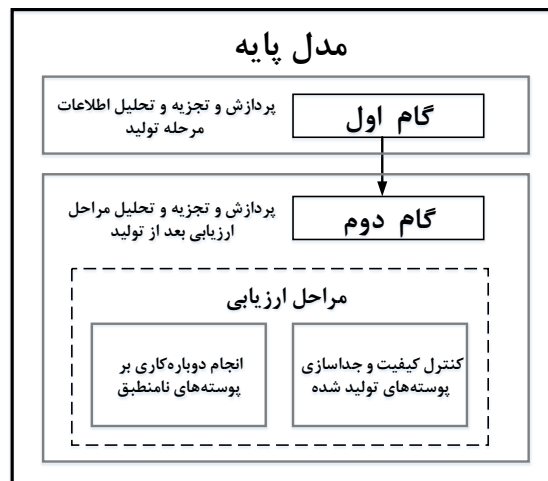
داده‌های زمان‌بندی و فرآیندی. با توجه به این که در سیستم تولیدی این شرکت، زمان فرآیند تولید تا حدودی تحت تاثیر عملکرد اپراتورها است، اطلاعات مربوط به زمان‌بندی ماشین‌آلات و زمان صرف شده در خصوص انجام عملیات توسط اپراتور آورده شده است که می‌توان از آن به عنوان زمان فرآیندها با توزیع ثابت استفاده کرد. همچنین به دلیل اپراتورمحور بودن فعالیت‌ها، به منظور واقعی‌تر شدن شرایط، می‌توان دامنه تغییرات ۱۰ درصدی نسبت به زمان فرآیند هر یک از ایستگاه‌ها در نظر گرفت. به‌ازای هر ۴ ایستگاه، یک اپراتور در نظر گرفته شده است و در هر شیفت کاری نیز ۴ اپراتور قرار دارد. چیدمان ایستگاه‌ها و ماشین‌آلات به صورت خطی بوده و ترتیب آن براساس پیشبرد محصول در خط می‌باشد و جریان مواد بین ایستگاه‌ها توسط اپراتور انجام می‌شود. همچنین اپراتور وظیفه روشن و خاموش کردن مجدد ماشین‌آلات را بر عهده دارد. روشن کردن برخی از دستگاه‌ها به صورت مجموعه‌ای انجام می‌شود. برای مثال در ایستگاه A30، دو قطعه به صورت همزمان در دستگاه قرار می‌گیرد و عملیات ماشین‌کاری بر روی آن انجام می‌شود. سایر اطلاعات مشابه مربوط به دیگر دستگاه‌ها در طراحی فرآیند تولید در نرم‌افزار ارنا در نظر گرفته شده است. مجموع زمان‌های نگهداری و تعمیرات هر ایستگاه نیز در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. داده‌های مربوط به زمان‌های نگهداری و تعمیرات

کد دستگاه	مدت زمان تعمیر - دقیقه
A10	۱۶۰
A20	۱۰۳۵
A30	۱۱۲۵
A40	۹۰۵
A50	۲۶۵
A60	۱۲۹۵

به منظور وارد کردن داده‌های فوق در مدل، ابتدا مدل را بدون در نظر گرفتن توقفات اجرا کرده و بعد از مشخص شدن زمان مشغولیت هر ایستگاه، توقفات را به عنوان درصدی از زمان استفاده شده برای هر ایستگاه در نظر می‌گیریم. همچنین هر ۲۰ روز به منظور بررسی‌های دوره‌ای و تعویض روغن دستگاه‌ها، از ساعت ۷ الی ۱۲ ظهر، کل خط تولید متوقف می‌شود. ضایعات تولیدی توسط هر ایستگاه نیز محاسبه شده و به عنوان خروجی معیوب و براساس درصدی از قطعات عبوری از هر ایستگاه، از فرآیند تولیدی خارج می‌شود و به مراحل بعدی منتقل نمی‌شود. به منظور وارد کردن داده‌های فوق در نرم‌افزار ارنا، ابتدا مدل را بدون در نظر گرفتن ضایعات اجرا کرده و بعد از مشخص شدن میزان خروجی هر ایستگاه، ضایعات را به عنوان درصدی از خروجی برای هر ایستگاه در نظر می‌گیریم. از آن جا که داده‌های مربوط به ضایعات از کمیت کافی برخوردار نیست و تعیین توزیع احتمال برای آن ممکن نیست، با توجه به زمان میزان تولید هر یک از محصولات BFV، توزیع ثابتی از ضایعات در نظر گرفته می‌شود.

مدلسازی مسئله. مدلسازی تحقیق در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول مدل پایه و در مرحله دوم مدل بهینه ارائه شده است. **مدل پایه.** در این مرحله به بررسی و تجزیه و تحلیل خط تولید در دو گام پرداخته می‌شود. در گام اول، به پردازش و تجزیه و تحلیل اطلاعات فرآیند اصلی تولید و تعیین خروجی‌های ممکن بدون تغییر بار کاری پرداخته شده است. در گام دوم نیز، مراحل بعد از تولید شامل فعالیت‌های مربوط به ارزیابی محصولات نهایی در نظر گرفته شدند. شکل ۵ مراحل مدل پایه را نشان می‌دهد.



شکل ۵. مراحل مدل پایه

گام ۱: پردازش و تجزیه و تحلیل اطلاعات مرحله تولید. در این گام، بدون تغییرات در مراحل کاری، به تجزیه و تحلیل مدل اصلی و واقعی در صنعت مورد بررسی پرداخته شده است. در این مدل، دامنه تغییرات ۱۰ درصد برای زمان فعالیت‌های هر ایستگاه به دلیل دخالت نیروی انسانی

و واقعی‌تر شدن مدل در نظر گرفته شد؛ اما فعالیت‌های ارزیابی استانداردهای کیفی توسط واحد کیفیت شامل تعیین وضعیت پوسته‌های تولیدی از طریق فعالیت جداسازی و فعالیت دوباره‌کاری در این مدل در نظر گرفته نشده است. همچنین زمان خرابی، زمان راه‌اندازی دستگاه‌ها و زمان توقفات مجاز اپراتورها از جمله زمان صبحانه و استراحت در این گام در نظر گرفته نشده است و بازه زمانی انجام فعالیت خط تولید در دو شیفت ۱۲ ساعته بدون در نظر گرفتن توقفات می‌باشد. خروجی‌های مدل، محصول هستند. برای هر فعالیت، دو منبع اپراتور و ماشین در نظر گرفته شده است که منبع ماشین برای تمامی ایستگاه‌ها و منبع اپراتور براساس تخصیص اپراتور به ایستگاه‌های مختلف در نظر گرفته شده است. تمامی ایستگاه‌های تولیدی منجر به ایجاد ارزش افزوده برای قطعه خواهد شد.

گام ۲: پردازش و تجزیه و تحلیل مراحل ارزیابی بعد از تولید محصول. فعالیت‌های گام اول، مربوط به بخش تولید محصول نهایی می‌شود؛ این در حالی است که بعد از اتمام فرآیند ماشین‌کاری، به‌منظور تعیین وضعیت پوسته‌های تولید شده، فعالیت‌های جداسازی و دوباره‌کاری انجام می‌شود. در گام دوم، مراحل ارزیابی بعد از تولید محصول و همچنین محدودیت‌های سیستم به مدل اضافه گردیده است. فعالیت‌های ارزیابی استانداردهای کیفی توسط واحد کیفیت، تعیین وضعیت پوسته‌های تولیدی از طریق فعالیت جداسازی و فعالیت دوباره‌کاری در این مدل در نظر گرفته شده است. برای فعالیت‌های جداسازی و دوباره‌کاری، یک منبع اپراتور تعریف گردیده است. خروجی‌های مدل به دو دسته ضایعات و محصول تقسیم شدند. زمانی جهت خرابی، زمان راه‌اندازی دستگاه‌ها و زمان توقفات مجاز اپراتورها از جمله زمان صبحانه و ناهار در این مدل در نظر گرفته شده است. بازه زمانی انجام فعالیت خط تولید در دو شیفت ۱۲ ساعته با در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم می‌باشد.

مدل بهینه. این مدل با هدف ایجاد بهبود در خروجی‌های گام دوم مدل پایه انجام می‌شود و برای رسیدن به این هدف، به تغییر متغیرهای مدل با استفاده از قابلیت‌هایی که نرم‌افزار ارنا برای بررسی سناریوها وجود دارد، پرداخته شده است. شکل ۶ مراحل مدل بهینه را نشان می‌دهد.



شکل ۶ مراحل مدل بهینه

ارنا برای بررسی سناریوهای مختلف از دو قابلیت خوب به نام‌های Process Analyzer و OptQuest برخوردار است که کاربر می‌تواند به جای ایجاد مدل‌های متعدد و بررسی آن‌ها که امری وقت‌گیر است، از این دو قابلیت استفاده کند. با استفاده از Process Analyzer می‌توان متغیرهای کنترل و پاسخ را انتخاب کرد و با تغییر مقادیر متغیرهای کنترل انتخابی به بررسی سناریوهای مختلف پرداخت. مقدار متغیرهای انتخابی در هر سناریو تغییر داده شده و خروجی‌های آن در هر سناریو مشاهده می‌شود و می‌توان به مقایسه سناریوها و انتخاب بهترین آن‌ها پرداخت. همچنین با استفاده از OptQuest می‌توان متغیرهایی که قصد بهینه‌سازی آن‌ها توسط مدل داریم را انتخاب و با ایجاد محدودیت‌ها و تابع هدف، امکان بررسی مدل و ایجاد جواب بهینه را برای خود فراهم کنیم. در این حالت، می‌توانیم با ایجاد سناریوهای مختلف، نتایج حاصل از تغییر

متغیرهای کنترل را با یکدیگر مقایسه کنیم. برای این منظور، می‌بایست متغیرهای کنترل را برای هر سناریو تعریف نمود. سپس با تعیین متغیرهای پاسخ، نتایج حاصل از تغییر متغیرهای کنترل را بر متغیرهای پاسخ در هر سناریو مشاهده و بررسی کنیم.

در این پژوهش، بهبود بازده خط تولید از طریق طراحی و اجرای چهار سناریو در مدل بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. در سناریوی اول، چهار حالت مختلف با متغیر در نظر گرفتن ظرفیت منابع طراحی و اجرا شدند و پس از مقایسه نتایج، بهترین حالت به‌عنوان سناریوی اول انتخاب شد. در سناریوی دوم، تاثیر کاهش درصد قطعاتی که به فرآیندهای جداسازی و دوباره‌کاری منتقل می‌شوند، بر بازده مفید سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. سناریوی سوم به بررسی و تعیین تعداد بهینه منابع با هدف بیشینه‌سازی بازده خط تولید پرداخته است. در نهایت، سناریوی چهارم با هدف کاهش زمان کل فرآیند طراحی و تحلیل شده است. متغیرهای کنترل و پاسخ هر سناریو مشخص شده و در آخر نیز نتایج هر سناریو با مدل پایه مقایسه می‌شود.

راستی آزمایی و اعتبارسنجی مدل. برای حصول اطمینان از این که مدل، نمایشی از سیستم واقعی است، فرآیند شبیه‌سازی شده و انیمیشن آن به‌طور مداوم از لحاظ منطقی بررسی و مشاهده می‌شود و همچنین از قابلیت debug در نرم‌افزار ارنا نیز می‌توان برای پیدا کردن خطاها استفاده نمود. پس از اجرای گام دوم مدل پایه و تصدیق تطابق نتایج آن با واقعیت، متغیرهای کلیدی و تاثیرگذار بر بازده شناسایی شده و برای بررسی و اطمینان از تاثیرگذاری آن‌ها بر بازده خط تولید، از تحلیل حساسیت استفاده خواهد شد. تحلیل حساسیت روشی است که با تغییر در مقدار ورودی‌ها و پارامترها، به بررسی تاثیر آن‌ها بر خروجی‌های مدل می‌پردازد. بدین جهت با استفاده از Process Analyzer، برای بررسی تاثیر تغییرات در بازده تولید بررسی شد. همچنین از این قابلیت برای بررسی تاثیر تغییرات همزمان چند متغیر تاثیرگذار بر بازده، در سناریوی بهبود اول نیز استفاده شده است.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش ابتدا به نتایجی که از مدل پایه به‌دست آمده است، به‌طور جداگانه پرداخته می‌شود. در ادامه نیز نتایج حاصل از بررسی مدل‌های بهینه آورده شده است.

نتایج حاصل از اجرای گام ۱ (مدل پایه). نتایج حاصل از اجرای گام اول مدل پایه، به تفکیک اطلاعات مربوط به موجودیت‌ها، منابع، پردازش‌ها و صف‌ها ارائه شده است.

اطلاعات مربوط به موجودیت‌ها: نتایج حاکی از آن است که در طی ده روز، مجموعاً ۶۶۵۱ قطعه وارد مدل شده که ۵۲۴۵ عدد آن از مدل خارج و ۱۴۰۶ عدد در جریان مدل است که این نشان‌دهنده بازده ۸۰ درصدی فرآیند می‌باشد. براساس این گزارش، هر موجودیت به‌طور میانگین ۱۴۷۷ دقیقه در سیستم حضور داشته است که از این مقدار ۱۴۶۹ دقیقه آن در صف انتظار بوده و ۸.۵ دقیقه در حال دریافت خدمت در ایستگاه بوده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تقریباً ۹۹ درصد اوقات قطعه در انتظار پردازش در صف‌ها به سر می‌برد که نشان‌دهنده اهمیت بالای صف در سیستم می‌باشد. شکل ۷ اطلاعات مربوط به موجودیت‌ها را نشان می‌دهد.

Part EF7

Time	Average	Half Width	Minimum	Maximum
Total Time	1,477.59	(Correlated)	183.39	3,389.25
Wait Time	1,469.17	(Correlated)	174.84	3,380.92
VA Time	8.4182	0.003038545	8.0664	8.8129
Transfer Time	0.00	0.000000000	0.00	0.00
Other Time	0.00	0.000000000	0.00	0.00
NVA Time	0.00	0.000000000	0.00	0.00
Cost	Average	Half Width	Minimum	Maximum
Wait Cost	0.00	0.000000000	0.00	0.00
VA Cost	0.00	0.000000000	0.00	0.00
Transfer Cost	0.00	0.000000000	0.00	0.00
Total Cost	0.00	0.000000000	0.00	0.00
Other Cost	0.00	0.000000000	0.00	0.00
NVA Cost	0.00	0.000000000	0.00	0.00
Other	Value			
Number In	6,651			
Number Out	5,245			
WIP	646.05	(Correlated)	0.00	1,530.00

شکل ۷. خروجی مربوط به موجودیت‌ها (گام اول)

اطلاعات مربوط به منابع: همانطور که از شکل ۸ معلوم است، میزان بهره‌وری ماشین‌آلات تولیدی در هر ایستگاه، بین ۲ تا ۴۳ درصد می‌باشد که ماشین‌های A۹۰، A۷۰ و A۰۷ کمترین میزان بهره‌وری و بیشترین زمان بیکاری را دارند که می‌توان علت آن را به دلیل زمان پردازش کم آن‌ها دانست. همچنین ماشین‌آلات A۱۰ و A۵۰ بیشترین میزان بهره‌وری را به خود اختصاص داده‌اند که دستگاه A۵۰ بیشترین زمان پردازش را بین ماشین‌آلات دیگر به خود اختصاص می‌دهد و همچنین دستگاه A۱۰ شروع‌کننده فرآیند تولید می‌باشد. در میان اپراتورهای تولید، A۱۰، A۳۰ و A۵۰ به دلیل آن که مسئول دستگاه‌های با زمان پردازش بالاتری هستند، نسبت به بقیه اپراتورها از بهره‌وری بالاتری برخوردارند و تقریباً تنها در ۲۰ درصد مواقع بیکار بوده‌اند. در ستون پنجم نیز میزان قطعات پردازش شده توسط هر منبع نوشته شده است. همانطور که قابل مشاهده است، در بین ماشین‌آلات، هرچه به انتهای فرآیند تولید نزدیک می‌شویم، قطعات کمتری توسط ماشین‌آلات پردازش شده است که نشان‌دهنده وجود موجودی در جریان می‌باشد. همچنین اپراتور A۷۰ بیشترین تعداد پردازش را بر روی قطعات داشته است، ولی میزان بهره‌وری تقریباً پایینی دارد و می‌توان دلیل آن را دستگاه‌های با زمان پردازش پایین تخصیص داده شده به آن دانست و دلیل تعداد بالای قطعات پردازش شده توسط این اپراتور، این است که ۵ دستگاه به آن تخصیص داده شده است.

Replication 1	Start Time:	0.00	Stop Time:	14,400.00	Time Units: Minutes
----------------------	-------------	------	------------	-----------	---------------------

Resource Detail Summary

Usage

	<u>Inst Util</u>	<u>Num Busy</u>	<u>Num Sched</u>	<u>Num Seized</u>	<u>Sched Util</u>
Machine A07	0.09	0.09	1.00	6,332.00	0.09
Machine A10	0.43	0.43	1.00	6,245.00	0.43
Machine A100	0.18	0.18	1.00	5,246.00	0.18
Machine A110	0.00	0.00	1.00	5,245.00	0.00
Machine A120	0.10	0.10	1.00	5,245.00	0.10
Machine A130	0.22	0.22	1.00	5,245.00	0.22
Machine A140	0.18	0.18	1.00	5,245.00	0.18
Machine A20	0.39	0.39	1.00	5,633.00	0.39
Machine A30	0.38	0.38	1.00	5,605.00	0.38
Machine A40	0.34	0.34	1.00	5,549.00	0.34
Machine A50	0.43	0.43	1.00	5,337.00	0.43
Machine A60	0.42	0.42	1.00	5,249.00	0.42
Machine A70	0.04	0.04	1.00	5,246.00	0.04
Machine A90	0.02	0.02	1.00	5,246.00	0.02
Operator A10	0.82	0.82	1.00	11,878.00	0.82
Operator A120	0.50	0.50	1.00	15,735.00	0.50
Operator A30	0.72	0.72	1.00	11,154.00	0.72
Operator A50	0.85	0.85	1.00	10,586.00	0.85
Operator A70	0.34	0.34	1.00	27,315.00	0.34

شکل ۸. خروجی مربوط به منابع (کام اول)

اطلاعات مربوط به پردازش‌ها: به طور میانگین و به طور کلی، زمان مشغولیت هر فرآیند در سیستم آورده شده است که این زمان مشغولیت شامل زمان انتظار و زمان پردازش به ازای هر فرآیند می‌باشد. همانطور که قابل مشاهده است، ماشین‌آلاتی که بیشترین میزان بهره‌وری را داشتند، فرآیندهای مربوط به آن‌ها نیز از زمان مشغولیت بیشتری برخوردار است. همچنین پردازش‌های A۲۰ و A۱۰ بیشترین زمان مربوط به پردازش‌ها را به خود اختصاص داده‌اند که می‌تواند نشان‌دهنده گلوگاه بودن آن‌ها باشد، زیرا بیشترین صف‌ها و زمان انتظارها به آن‌ها اختصاص دارد. اطلاعات مربوط به صف‌ها: همانطور که در تصاویر بالا قابل مشاهده است، در این گزارش زمان صف‌ها و تعداد قطعات در صف به ازای هر پردازش نمایش داده شده است. همانطور که گفته شد، صف‌های مربوط به فرآیندهای A۱۰ و A۲۰ بیشترین تعداد را به خود اختصاص داده‌اند که نشان‌دهنده گلوگاه بودن آن نیز می‌باشد. شکل ۹ اطلاعات مربوط به صف را نشان می‌دهد.

Replication 1	Start Time:	0.00	Stop Time:	14,400.00	Time Units: Minutes
----------------------	-------------	------	------------	-----------	---------------------

Queue Detail Summary

Time

	<u>Waiting Time</u>
Process A07.Queue	31.85
Process A10.Queue	424.79
Process A100.Queue	0.93
Process A110.Queue	0.93
Process A120.Queue	3.25
Process A130.Queue	4.43
Process A140.Queue	4.75
Process A20.Queue	589.35
Process A30.Queue	129.21
Process A40.Queue	151.21
Process A50.Queue	102.80
Process A60.Queue	116.59
Process A70.Queue	3.22
Process A90.Queue	0.41

شکل ۹. خروجی مربوط به صف‌ها (کام اول)

نتایج حاصل از اجرای گام ۲ (مدل پایه). نتایج حاصل از اجرای گام اول مدل پایه به تفکیک اطلاعات مربوط به موجودیت‌ها، منابع، پردازش‌ها و صف‌ها ارائه شده است.

اطلاعات مربوط به موجودیت‌ها: نتایج نشان می‌دهد که در مدت اجرای ۱۰ روز، تعداد ۸۵۳۴ قطعه وارد مدل شده است که از این تعداد ۴۸۳۲ عدد از سیستم خارج شده‌اند که تعداد ۶۵۱ عدد آن ضایعات و تعداد ۴۱۸۱ عدد محصول سیستم می‌باشد و تعداد ۳۸۳۳ عدد آن در جریان می‌باشد. به عبارت دیگر، سیستم با بازده ۵۷ درصدی فعالیت داشته که دارای ۱۳.۵ درصد ضایعات می‌باشد. همچنین میانگین زمان حضور هر قطعه در سیستم ۳۰۳۰ دقیقه می‌باشد که از این زمان ۳۰۱۹ دقیقه را در حال انتظار در صف‌ها به سر می‌برده و ۱۱ دقیقه در حال پردازش بوده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تقریباً ۰.۹۹ درصد اوقات قطعه در انتظار پردازش در صف‌ها به سر می‌برد که نشان‌دهنده اهمیت بالای صف در سیستم می‌باشد.

اطلاعات مربوط به منابع: نتایج نشان داد که بهره‌وری منابع در مقایسه با تلاش اول کاهش یافته است که می‌تواند ناشی از عواملی مانند زمان‌های استراحت اپراتورها و زمان‌های خرابی و تنظیمات باشد. با این وجود، اپراتورهای A10، A50 و A40 همچنان بالاترین میزان بهره‌وری را داشته‌اند. در بین ماشین‌آلات نیز، ماشین‌های A10، A50 و A60 بیشترین بهره‌وری را نشان دادند. اپراتور A70 به دلیل مشغول بودن در پنج ایستگاه، بالاترین تعداد پردازش قطعات را (تقریباً سه برابر سایر منابع) دارد؛ با این حال، بهره‌وری آن برابر با ۷۱ درصد است که به زمان کوتاه پردازش‌های آن مرتبط می‌شود. بهره‌وری بالای اپراتورها را می‌توان به دلیل مشارکت آن‌ها در فعالیت‌های مختلف در نظر گرفت. ماشین A50 در ۱.۲۵ درصد اوقات در حال تنظیمات، در ۴۰.۸۳ درصد اوقات در حال پردازش و در ۵۵.۹۲ درصد اوقات در حالت بیکاری بوده است که در نتیجه، بهره‌وری آن تنها ۰.۴۰ درصد است. همچنین اپراتور A10 در ۸۸.۸۴ درصد اوقات در حال پردازش، در ۰.۷۴ درصد اوقات بیکار و در ۱۰.۴۲ درصد اوقات در حال استراحت بوده است که منجر به بهره‌وری ۸۹ درصدی آن می‌شود. اطلاعات تفصیلی منابع در شکل ۱۰ ارائه شده است.

Replication 1					
Start Time:	0.00	Stop Time:	14,400.00	Time Units:	Minutes
Resource Detail Summary					
Usage					
	Inst Util	Num Busy	Num Sched	Num Seized	Sched Util
Machine A07	0.12	0.12	1.00	8,534.00	0.12
Machine A10	0.50	0.50	1.00	7,340.00	0.50
Machine A100	0.18	0.18	1.00	5,311.00	0.18
Machine A110	0.00	0.00	1.00	5,301.00	0.00
Machine A120	0.10	0.10	1.00	5,197.00	0.10
Machine A130	0.21	0.21	1.00	5,133.00	0.21
Machine A140	0.17	0.17	1.00	4,899.00	0.17
Machine A20	0.39	0.39	1.00	5,576.00	0.39
Machine A30	0.37	0.37	1.00	5,449.00	0.37
Machine A40	0.33	0.33	1.00	5,368.00	0.33
Machine A50	0.43	0.43	1.00	5,363.00	0.43
Machine A60	0.43	0.43	1.00	5,359.00	0.43
Machine A70	0.05	0.05	1.00	5,336.00	0.05
Machine A90	0.02	0.02	1.00	5,321.00	0.02
Operator A10	0.89	0.89	0.89	12,916.00	0.99
Operator A120	0.87	0.87	0.89	17,067.00	0.98
Operator A30	0.70	0.70	0.89	10,817.00	0.78
Operator A50	0.86	0.86	0.89	10,722.00	0.96
Operator A70	0.79	0.79	0.89	33,741.00	0.88
QC Operator	0.04	0.04	1.00	4,899.00	0.04

شکل ۱۰. خروجی مربوط به منابع (گام دوم)

اطلاعات مربوط به پردازش‌ها نشان داد که با مقایسه زمان پردازش ایستگاه‌ها در این گام نسبت به گام قبلی (مطابق با اطلاعات شکل ۹)، زمان پردازش در ایستگاه‌های A120، A130 و A140 به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. علت این افزایش را می‌توان به درگیر شدن اپراتور A120 در فعالیت‌های دوباره‌کاری قطعات مرتبط دانست که منجر به افزایش زمان انتظار در صف ایستگاه‌های مذکور شده است. مشابه گام قبلی، ایستگاه‌های A10 و A20 بیشترین زمان پردازش و توقف را دارند و می‌توان آن‌ها را به‌عنوان گلوگاه‌های سیستم در نظر گرفت. کاهش زمان انتظار در صف‌ها می‌تواند تغییرات قابل توجهی در زمان انتظار قطعات پشت ایستگاه‌ها ایجاد کند که به کاهش زمان پردازش و افزایش بازده

سیستم منجر می شود. نتایج نشان داد که حدود ۸۱ درصد قطعات خروجی از سیستم نیاز به جداسازی داشته اند و ۴۸ درصد آن ها تحت دوباره کاری قرار گرفته اند. این میزان دوباره کاری برای یک سیستم تولیدی با زمان های بالای پردازش دوباره کاری، رقم بالایی محسوب می شود. اطلاعات مربوط به صف ها نیز تأیید می کند که ماشین های A10 و A20 بیشترین میزان زمان انتظار و تعداد قطعه در صف را دارند. این یافته ها مجدداً نشان می دهند که این دو ایستگاه گلوگاه های اصلی سیستم هستند. اطلاعات کامل تر مربوط به صف ها در شکل ۱۱ ارائه شده است.

Replication 1	Start Time: 0.00	Stop Time: 14,400.00	Time Units: Minutes
----------------------	------------------	----------------------	---------------------

Queue Detail Summary

Time	Waiting Time	Number Waiting
Process A07.Queue	86.27	51.13
Process A10.Queue	993.12	623.85
Process A100.Queue	31.50	11.65
Process A110.Queue	27.72	10.23
Process A120.Queue	172.09	63.78
Process A130.Queue	179.50	65.09
Process A140.Queue	178.85	65.67
Process A150.Queue	0.00	0.00
Process A20.Queue	956.53	553.42
Process A30.Queue	145.40	55.71
Process A40.Queue	161.22	60.52
Process A50.Queue	251.56	93.69
Process A60.Queue	267.07	99.39
Process A70.Queue	46.86	17.40
Process A90.Queue	36.67	13.60
Rework.Queue	172.65	22.72
Separating.Queue	56.60	15.49

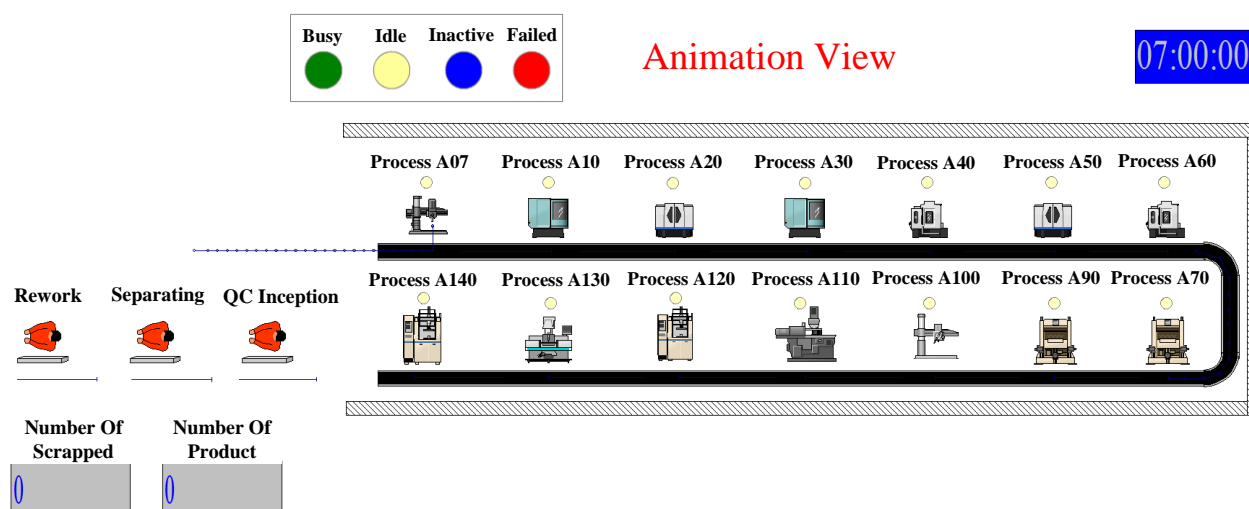
شکل ۱۱. خروجی مربوط به صف ها (گام دوم)

اعتبارسنجی مدل با مقایسه با دنیای واقعی. برای بررسی میزان تطابق مدل طراحی شده با سیستم واقعی، خروجی های مدل برای ۱۰ روز شامل تعداد محصولات و ضایعات تولید شده در خط با خروجی های سیستم واقعی، مقایسه شدند.

جدول ۳. مقایسه خروجی ها در مدل و سیستم واقعی

خروجی ها (برای ۱۰ روز)	سیستم واقعی	مدل شبیه سازی شده
تعداد محصولات تولیدی	۴۹۸۱	۴۸۳۲
تعداد ضایعات تولیدی	۷۲۸	۶۵۱

جدول ۳ نشان می دهد که نتایج مدل شبیه سازی شده، نزدیک به واقعیت است. همچنین منطق فرآیند مدل و انیمیشن آن به کمک قابلیت تعریف متغیرها در ارنا مرتباً مورد بررسی قرار گرفت و شکل ۱۲ انیمیشن فرآیند را نشان می دهد.



شکل ۱۲. انیمیشن خط تولید

نتایج حاصل از اجرای مدل بهینه. در این قسمت به منظور اجرای مدل بهینه با استفاده از سناریوهایی به بررسی بازده تولید و منابع پرداخته شد. بدین منظور ۴ سناریو اجرا شد که به توضیح آن‌ها به ترتیب پرداخته می‌شود.

سناریوی اول. برای ارائه اولین سناریو به تحلیل اینکه تغییر تعداد منابع چه تاثیری در خروجی‌های مدل دارد پرداخته می‌شود و بدین منظور ۵ سناریو (۱ سناریو پایه و ۴ سناریو حاصل از تغییر ظرفیت منابع) بررسی می‌شود. فعالیت‌های جداسازی و دوباره‌کاری به دلیل داشتن منبع مشترک و همچنین زمان پردازش بالا دارای صف‌های طولانی می‌باشند. همچنین فعالیت‌های A10 و A50 بیشترین میزان زمان انتظار در بین ماشین‌آلات را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین، متغیرهای کنترل در اینجا شامل ظرفیت منابع A10، A50، A60 و منبع اپراتور جداسازی و دوباره‌کاری هستند که با تغییر مقدار آن‌ها به شناسایی بهترین سناریو می‌پردازیم. متغیرهای پاسخ که قصد داریم نتایج حاصل از تغییر متغیرهای کنترل را در آن‌ها دنبال کنیم، شامل تعداد ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم (خروجی‌ها فارغ از محصول یا ضایعات می‌باشد)، میزان زمان توقف فعالیت‌های A10، A50، A60 و فعالیت جداسازی و دوباره‌کاری و همچنین زمان فرآیند و چرخه هستند. در این گام، برای بررسی سناریوهای متفاوت و انتخاب بهترین سناریو، از Process Analyzer استفاده شد. ظرفیت این منابع در مدل پایه برابر با ۱ بوده است. در اینجا بیشترین میزان برای هر منبع، ۳ عدد و کمترین میزان نیز ۱ عدد معرفی شد. ظرفیت تعریف شده برای هر منبع در سناریوهای مورد بررسی در جدول ۴ ذکر شده است.

جدول ۴. ظرفیت منابع در سناریوهای مورد بررسی

سناریو	منبع A10	منبع A50	منبع A60	اپراتور جداسازی و دوباره‌کاری
مدل پایه	۱	۱	۱	۱
سناریو اول	۲	۱	۱	۲
سناریو دوم	۲	۱	۲	۳
سناریو سوم	۳	۲	۱	۲
سناریو چهارم	۳	۲	۱	۳

نتایج نشان داد که با افزایش تعداد منابع فرآیندهایی که صف‌های طولانی داشته‌اند، از زمان انتظار موجودیت در صف آن‌ها به طرز قابل توجهی کاسته شده و همچنین منجر به کاهش زمان فرآیند می‌شود. در جدول ۵، بازده تولید برای هر یک سناریوهای جدول ۴، ارائه شده است.

جدول ۵. بازده سناریوهای مورد بررسی در مدل بهینه اول

سناریو	بازده کل	بازده مفید (محصول)	زمان فرآیند (دقیقه)
مدل پایه	۰.۸۵۱	۰.۷۴۹	۲۵۷۰.۸۴۴
سناریو اول	۰.۹۷۶	۰.۸۳۹	۳۲۴.۹۸۸
سناریو دوم	۱	۰.۸۶۴	۳۷۳.۴۸۹
سناریو سوم	۰.۹۷۴	۰.۸۳۳	۳۶۰.۸۶۸
سناریو چهارم	۰.۹۳۵	۰.۸۰۸	۵۰۴.۱۳۰

با توجه به جدول ۵، در سناریو دوم با تعداد ۲ عدد از منبع A_{10} ، ۱ عدد از منبع A_{50} ، ۲ عدد از منبع A_{60} و ۳ عدد از منبع اپراتور جداسازی و دوباره‌کاری، تمامی قطعات ورودی به سیستم، از سیستم خارج شده‌اند که نشان‌دهنده بازده ۱۰۰ درصد مدل می‌باشد. همچنین این سناریو دارای بازده مفید ۸۶.۴ درصد به ازای محصولات سالم نیز می‌باشد. زمان فرآیند بسته به تعداد ورودی‌های سیستم می‌تواند متفاوت باشد، زیرا تعداد ورودی‌های سیستم در صورت زیاد بودن می‌تواند منجر به وجود آمدن صف‌های طولانی‌تر نسبت به حالت عادی شوند.

سناریوی دوم. در این سناریو به بررسی تاثیر کاهش درصد قطعاتی که به جداسازی و دوباره‌کاری می‌روند بر روی بازده مفید سیستم پرداخته شده است. در مدل پایه، ۸۰ درصد قطعاتی که به جداسازی می‌روند و ۵۰ درصد از قطعات جداسازی شده نیاز به دوباره‌کاری دارند و ۶۵ درصد از قطعات دوباره‌کاری شده ضایعات می‌شوند. در مدل پایه، بازده مفید برابر با ۷۴.۹ درصد می‌باشد. با کاهش درصد قطعاتی که به جداسازی می‌روند از ۸۰ به ۵۰ درصد و درصد قطعاتی که نیاز به دوباره‌کاری دارند را از ۵۰ به ۳۰ و درصد قطعاتی که بعد از دوباره‌کاری ضایعات می‌شوند از ۶۵ به ۴۰ درصد، بازده مفید سیستم از ۷۴.۹ درصد به ۸۸.۲ درصد افزایش داشته است که مقدار قابل توجهی است.

سناریوی سوم. در این سناریو بررسی شد که اگر تابع هدف به دنبال ماکسیمم‌سازی بازده (نسبت خروجی‌ها به ورودی‌ها) باشد، تعداد بهینه منابع به چه صورت خواهد بود. بدین منظور از قابلیت OptQuest در ارنا استفاده شده است. ابتدا منابع مورد نظری که باید تعداد آن‌ها بهینه شود، انتخاب شده است. همچنین می‌بایست برای آن‌ها مقدار کمینه، مقدار بیشینه و مقدار پیشنهادی انتخاب شود. از آن‌جا که در مدل پایه (تعداد منبع به ازای هر ایستگاه برابر با یک) فعالیت‌های A_{10} ، A_{50} ، جداسازی و دوباره‌کاری دارای بیشترین زمان انتظار در صف‌ها می‌باشند، به همین دلیل منابع مربوط به آن‌ها به عنوان متغیر کنترل انتخاب می‌شود تا توسط مدل بهینه شود. برای تمامی این متغیرها مقدار کمینه برابر با ۱، مقدار بیشینه برابر با ۳ و مقدار پیشنهادی نیز برابر با ۱ نوع متغیر، عدد صحیح در نظر گرفته شده است. متغیرهای پاسخ تعداد ورودی و خروجی مدل، مجموع زمان انتظار فرآیندهای A_{10} ، A_{50} ، دوباره‌کاری و جداسازی، تعداد قطعات و زمان انتظار در صف فرآیندهای A_{10} ، A_{50} ، دوباره‌کاری و جداسازی، بهره‌وری تمامی منابع و زمان فرآیند هستند. محدودیت‌های سیستم به شرح زیر هستند:

۱. محدودیت تعداد منابع: برای اولین محدودیت مدل می‌توان در نظر گرفت که تعداد منابع در نظر گرفته شده برای سه منبع A_{10} ، A_{50} و اپراتور مربوط به فعالیت‌های دوباره‌کاری و جداسازی باید کوچکتر یا مساوی با ۶ باشد.
۲. محدودیت در تعداد قطعات در صف: مجموع تعداد قطعات در صف پشت ۴ ایستگاه A_{10} ، A_{50} ، دوباره‌کاری و جداسازی نمی‌تواند بیشتر از ۵۰۰ واحد باشد.

تابع هدف براساس بالاترین میزان بازده تولید یعنی بالاترین حد نسبت خروجی‌های مدل به ورودی‌ها در نظر گرفته شده است. با بررسی راه‌حل‌های پیشنهادی توسط ارنا، نتایج نشان داد که تعداد منابع پیشنهادی با توجه به در نظر گرفتن محدودیت‌های مدل برابر با منبع A_{10} برابر با ۱ عدد، منبع A_{50} برابر با ۳ عدد و منبع A_{60} برابر با ۲ عدد می‌باشد. براین اساس، زمان فرآیند از ۲۵۷۰ به ۵۲۶ دقیقه کاهش یافته است، همچنین بازده مدل از ۸۵ به ۹۹ درصد افزایش داشته است. زمان انتظار و تعداد قطعات در صف پشت ایستگاه‌های A_{10} ، A_{50} ، دوباره‌کاری و جداسازی نیز در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶. مقایسه زمان انتظار و تعداد قطعه در صف در مدل پایه و بهینه در سناریو ۳

فعالیت	تعداد قطعه در صف		زمان انتظار در صف (دقیقه)	
	مدل پایه	مدل بهینه	مدل پایه	مدل بهینه
A1۰	۱۸۰	۱۹۷	۲۶۰۲۱۳۹	۲۸۳۴۴۱۳
A۵۰	۹۱	۰.۲۹	۱۳۱۳۰۷۶	۴۲۵۹
دوباره کاری	۳۶۴	۶	۴۶۲۶۲۶۷	۷۹۸۰۱
جداسازی	۷۷۳	۱۰	۱۰۹۴۴۴۱۵	۱۵۷۰۳۷

همچنین نتایج نشان داد به جز فعالیت A1۰، تعداد قطعات در صف و زمان انتظار در صف برای سایر فعالیت‌ها بهبود چشم‌گیری داشته است که منجر به کاهش زمان فرآیند شده است. دلیل تغییر نکردن فعالیت A1۰ را نیز می‌توان عدم تغییر در تعداد منبع آن دانست. به دلیل افزایش در تعداد منابع فعالیت‌های ذکر شده، بهره‌وری آن‌ها نیز ممکن است کاهش پیدا کرده باشد.

سناریوی چهارم. هدف در آخرین سناریو، رسیدن به کمترین میزان زمان فرآیند سیستم است و برای دستیابی به این هدف به بررسی چگونگی بهینه‌سازی متغیرهای کنترل و پاسخ هستیم. تمامی تنظیمات این مدل بهینه‌سازی همانند سناریوی سوم می‌باشد با این تفاوت که در سناریوی چهارم، محدودیت مربوط به تعداد قطعات در صف در نظر گرفته نمی‌شود، زیرا در دل تابع هدف، کاهش زمان انتظار هر فعالیت و در نتیجه تعداد قطعات در صف نیز می‌باشد. نتایج نشان داد میزان زمان فرآیند برابر با ۳۴۶ دقیقه می‌باشد که نسبت به مقدار ۲۵۷۰ دقیقه، بهبود قابل توجهی پیدا کرده است. تعداد منبع A1۰ برابر ۲ عدد، تعداد منبع A۵۰ برابر ۱ عدد و تعداد منبع مربوط به دوباره کاری و جداسازی نیز برابر با ۳ عدد می‌باشد. بازده کلی مدل برابر با ۹۵ درصد می‌باشد که نسبت به بازده ۸۵ درصدی در مدل پایه افزایش یافته است. جدول ۷ مقایسه زمان انتظار و تعداد قطعه در صف در مدل پایه و بهینه در سناریو ۴ را نشان می‌دهد.

جدول ۷. مقایسه زمان انتظار و تعداد قطعه در صف در مدل پایه و بهینه در سناریو ۴

فعالیت	تعداد قطعه در صف		زمان انتظار در صف (دقیقه)	
	مدل پایه	مدل بهینه	مدل پایه	مدل بهینه
A1۰	۱۸۰	۳۲	۲۶۰۲۱۳۹	۴۶۰۶۹۰
A۵۰	۹۱	۴۰	۱۳۱۳۰۷۶	۵۴۹۹۷۵
دوباره کاری	۳۶۴	۰.۰۲	۴۶۲۶۲۶۷	۳۳۳
جداسازی	۷۷۳	۰.۰۵	۱۰۹۴۴۴۱۵	۷۲۱

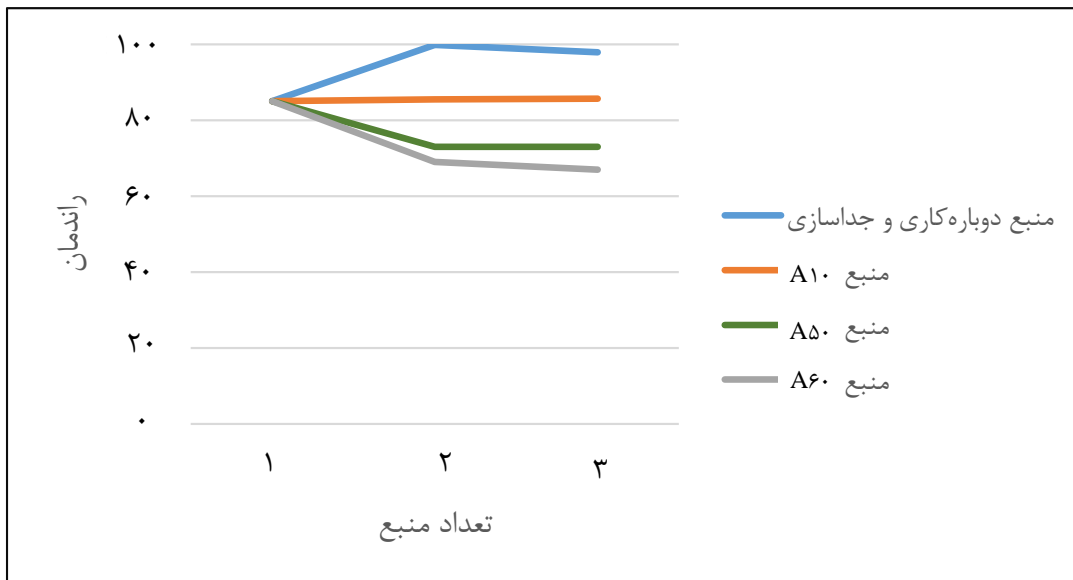
نتایج نشان داد که زمان انتظار در صف و تعداد قطعات در صف به طرز قابل توجهی برای چهار فعالیتی که تعیین‌کنندگان اصلی زمان فرآیند بوده‌اند، کاهش یافته است. به دلیل افزایش در تعداد منابع فعالیت‌های ذکر شده، بهره‌وری آن‌ها نیز ممکن است کاهش پیدا کرده باشد. برای مثال، بهره‌وری منبع مربوط به دوباره کاری و جداسازی از ۱۰۰ درصد به ۴۰ درصد کاهش پیدا کرده است، زیرا تعداد آن از ۱ به ۳ عدد افزایش یافته است که منجر به کاهش بار کاری بر روی این منبع است.

نتایج تحلیل حساسیت. متغیرهایی که بیشترین تاثیر را در بازده مدل دارند، ظرفیت منابع فعالیت‌های A1۰، A۵۰، A۶۰ و دوباره کاری و جداسازی هستند. دلیل انتخاب این متغیرها، بالا بودن زمان انتظار و تعداد قطعات در صف این فعالیت‌ها است. در این بخش بررسی شد که اگر ظرفیت منابع این فعالیت‌ها افزایش یابد، چه تاثیری بر بازده (خروجی به ورودی) مدل خواهد داشت. برای انجام این تحلیل از قابلیت Process Analyzer در ارنا استفاده شد. بدین منظور ۹ سناریو تعریف شد که سناریوی اول، سناریوی پایه بوده و تغییری در تعداد منابع داده نشده است. در ۸ سناریوی بعدی، برای هر منبع دو سناریوی افزایش تعریف شده است که در آن‌ها به ترتیب یک و دو واحد به ظرفیت منبع اضافه شده در حالی که ظرفیت منابع دیگر ثابت است. جدول ۸ تغییرات در ظرفیت منابع و تاثیرات آن بر خروجی مدل را نشان داده است.

جدول ۸. تغییرات در ظرفیت منابع و بررسی تأثیر آن‌ها در بازده

ردیف	ظرفیت منابع در هر سناریو (متغیرهای کنترل)				بازده (خروجی/ورودی)
	A1+	A5+	A6+	دوباره‌کاری و جداسازی	
۱	۱	۱	۱	۱	۰.۸۵۱
۲	۲	۱	۱	۱	۰.۸۵۵
۳	۳	۱	۱	۱	۰.۸۵۶
۴	۱	۲	۱	۱	۰.۷۳۰
۵	۱	۳	۱	۱	۰.۷۳۰
۶	۱	۱	۲	۱	۰.۶۹۰
۷	۱	۱	۳	۱	۰.۶۷۳
۸	۱	۱	۱	۲	۰.۹۹۷
۹	۱	۱	۱	۳	۰.۹۹۹

شکل ۱۳ روند تغییر بازده با افزایش تعداد منبع را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. تغییر بازده با تغییر مقدار منبع

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییر ظرفیت منابع در سناریوهای مختلف نتایج متفاوتی را به همراه داشته است؛ برخی سناریوها منجر به کاهش و برخی دیگر موجب افزایش بازده شده‌اند. برای مثال، افزایش ظرفیت منبع A5+ در سناریوهای ۴ و ۵ به کاهش بازده منجر شده است، در حالی که افزایش نیروی انسانی درگیر در فعالیتهای دوباره‌کاری و جداسازی در سناریوهای ۸ و ۹ باعث افزایش بازده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که صرفاً تغییر ظرفیت یک منبع به‌تنهایی نمی‌تواند تضمینی برای بهبود بازده باشد و حتی ممکن است به کاهش بازده خط تولید منجر شود. بنابراین، برای اطمینان از بهبود بازده، نیاز است که سناریوهای مختلف با ترکیب‌های متنوع از متغیرها بررسی شوند تا بهترین ترکیب شناسایی و اجرا شود. بررسی چنین سناریوهایی در شرایط واقعی اغلب ناشدنی و غیرممکن است، زیرا این فرآیند می‌تواند هزینه‌های زیادی را به سازمان تحمیل کند. در نتیجه، می‌توان گفت که نتایج تحلیل با روش شبیه‌سازی استفاده‌شده در این تحقیق هم‌راستا بوده و ارزش استفاده از آن را تأیید می‌کند.

ارزیابی مالی و اقتصادی. برنامه‌ریزی در خصوص فرآیندهای تولیدی در خط تولید مورد بررسی از اهمیت زیادی برخوردار است. توقف خط تولید هزینه‌های زیادی را به سازمان تحمیل می‌نماید و همچنین می‌تواند تعهدات سازمان را در برابر مشتریان به خطر بیندازد. با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده، خروجی خط تولید پمپ هیدرولیک در سال ۱۲۵۶۵۷ قطعه محصول بوده و میزان ضایعات نیز ۲۲۱۹۸ قطعه می‌باشد. با توجه به پیش‌بینی انجام شده در مورد تقاضای محصول در سال آتی که عبارت از ۱۴۰ هزار واحد محصول می‌باشد، بازده خط تولید برای رسیدن به این نیاز پایین بوده و نیاز به برنامه‌ریزی و بهبود خط تولید دارد. به‌کارگیری روش شبیه‌سازی گسسته پیشامد و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای بررسی وضعیت موجود در جهت شناسایی نقاط گلوگاهی و تعیین متغیرهای کلیدی تاثیرگذار بر بازده می‌تواند از هزینه‌های غیرمنطقی که سازمان ممکن است برای افزایش خروجی خط تولید خود بپردازد، جلوگیری کند. مزیت دیگر استفاده از این روش، امکان بررسی سناریوهای بهبود است که به جای آزمون و خطا در دنیای واقعی می‌توان تغییرات را در مدل طراحی شده پیاده‌سازی کرد و پس از انتخاب بهترین سناریو، در جهت اجرای آن اقدام کرد.

نتایج سناریوهای پیشنهادی در این تحقیق بیان کردند که سازمان برای بهبود عملکرد خود باید تعداد منابع برخی از فعالیت‌های خود را افزایش دهد. دلیل این پیشنهاد نیز بالا بودن زمان انتظار و تعداد قطعات در صف بود که این متغیرها به عنوان متغیرهای تاثیرگذار بر عملکرد خط شناسایی شده بودند. به‌کارگیری نیروی جدید و یا راه‌اندازی منبع جدیدی برای فعالیت ممکن است در کوتاه مدت باعث افزایش هزینه‌های تولیدی سازمان شود. اما در بلندمدت با کاهش زمان انتظار در صف، زمان چرخه تولید نیز کاهش یافته و باعث افزایش سرعت تولید و در نتیجه افزایش خروجی‌ها خواهد شد که این امر اثربخشی سازمان را در بلندمدت بهبود می‌دهد. همچنین از هزینه‌هایی نظیر از دست دادن مشتری به دلیل برطرف نکردن به موقع تقاضا نیز جلوگیری می‌شود.

تحلیل نتایج

در مطالعات پیشین، تمرکز اصلی بر بهبود بهره‌وری و بازده خطوط تولید با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی سنتی بوده است، به طوری که اغلب از تکنیک‌هایی مانند تحلیل آماری و بهینه‌سازی پارامترهای تولید استفاده شده است [۵، ۱۱، ۱۴، ۱۶، ۴۴، ۴۶، ۵۳، ۶۱]. این روش‌ها هرچند برای بهبودهای جزئی مؤثر بوده‌اند، اما با چالش‌هایی از جمله محدودیت در شناسایی و بهینه‌سازی موانع غیر قابل مشاهده یا غیرخطی در جریان تولید روبرو هستند. در مقابل، تحقیق حاضر از شبیه‌سازی گسسته پیشامد برای بازمهندسی خط تولید استفاده کرده که رویکردی جامع‌تر و کارآمدتر را ارائه می‌دهد. این شبیه‌سازی امکان بررسی دقیق‌تر و عمیق‌تر فرآیندها و تحلیل اجزای خط تولید را فراهم می‌آورد و نقاط گلوگاهی و ناکارآمدی‌ها را که در روش‌های پیشین کمتر دیده می‌شدند، به روشنی شناسایی می‌کند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که حتی در خطوط تولید تمام اتوماتیک نیز، اعمال تغییرات کوچک در تخصیص منابع یا جریان کار می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر بهره‌وری کلی داشته باشد. این یافته‌ها با تحقیقات اخیر هم‌سو است که نشان می‌دهند خطوط تولید خودکار نیز برای رسیدن به سطح بهینه به ارزیابی و بهبود مداوم نیاز دارند [۲، ۱۷، ۲۶، ۲۸، ۴۷]. به علاوه، در حالی که روش‌های آماری یا بهینه‌سازی پارامتری صرفاً به بهبودهای کوتاه‌مدت دست می‌یابند، شبیه‌سازی گسسته پیشامد به دلیل امکان بررسی سناریوهای مختلف، قابلیت ارائه راهکارهای بلندمدت و پایدار را دارد. تحقیق حاضر به‌صورت گام به گام، یک ساختار شبیه‌سازی جامع و عملی را معرفی کرده که می‌تواند به عنوان الگویی برای دیگر پژوهشگران و صنعتگران در بهبود فرآیندهای تولید صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

همچنین، این پژوهش تأکید دارد که شبیه‌سازی گسسته پیشامد یک ابزار مؤثر برای شناسایی و رفع محدودیت‌ها و گلوگاه‌های فرآیندی است و می‌تواند به بهبود بهره‌وری خطوط تولید صنعتی در مقیاس وسیع کمک کند. این رویکرد نه تنها در شناسایی مشکلات موجود در سیستم‌های پیچیده تولید مؤثر است، بلکه به‌عنوان یک ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری، قابلیت شبیه‌سازی و ارزیابی تغییرات مختلف در سیستم را به همراه دارد. در مجموع، تحقیق حاضر نسبت به مطالعات قبلی گامی نوآورانه و کاربردی‌تر برداشته و با تأکید بر کاربردهای عملی شبیه‌سازی در صنعت، ارزش افزوده‌ای برای بهبود بهره‌وری و بازده خطوط تولید ارائه کرده است. این یافته‌ها می‌تواند الهام‌بخش پژوهش‌های آینده در حوزه‌های مشابه باشد و به صنعتگران کمک کند تا با رویکردی سیستماتیک، بازدهی و کارایی خطوط تولید خود را بهینه‌سازی کنند.

یکی از مهم‌ترین نتایج این تحقیق، شناسایی میزان ضایعات در مرحله ارزیابی پس از تولید است که به‌عنوان یک عامل کلیدی در بهبود عملکرد سازمانی باید مورد توجه قرار گیرد. حدود ۱۳.۵ درصد از خروجی‌ها به‌عنوان ضایعات شناخته شده‌اند. این عدد نشان‌دهنده نیاز فوری به بازنگری در فرآیندهای تولید و بهینه‌سازی فعالیت‌های مربوط به جداسازی و دوباره‌کاری است. به‌عبارت دیگر، بهبود کیفیت و کاهش میزان ضایعات مستلزم شناسایی دقیق‌تر مشکلات و به‌کارگیری راه‌حل‌های مؤثر در فرآیند تولید است. نتایج حاصل از مدل‌های بهینه‌سازی نشان می‌دهد که تغییر در متغیرهای مختلف می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بر بازده سیستم تأثیر بگذارد. با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار ارنا، سناریوهای متعددی مورد بررسی قرار گرفت و بهترین سناریوها شناسایی شدند. در سناریوی اول، با در نظر گرفتن ظرفیت منابع، بهترین عملکرد مشاهده شد. این امر تأکید می‌کند که مدیریت منابع به‌طور مستقیم بر کیفیت و بازده تولید تأثیرگذار است. در سناریوهای بعدی نیز به بررسی تأثیر کاهش درصد قطعاتی که به جداسازی و دوباره‌کاری می‌روند، پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش این درصد می‌تواند به بهبود قابل‌توجه بازده سیستم منجر شود. به‌علاوه، شناسایی تعداد بهینه منابع و کاهش زمان فرآیند نیز به‌عنوان عوامل مؤثر در افزایش بازده شناسایی شدند. علاوه بر این، تحلیل‌های انجام‌شده با استفاده از نرم‌افزار ارنا نشان داد که به‌کارگیری تکنیک‌های شبیه‌سازی می‌تواند به سازمان‌ها در شناسایی نقاط ضعف و فرصت‌های بهبود کمک کند. فرآیند شبیه‌سازی به‌طور مداوم بررسی و از قابلیت‌های debug نرم‌افزار برای شناسایی خطاها استفاده شد. این امر نشان‌دهنده اهمیت اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی در تحقیقات صنعتی است، زیرا صحت نتایج به‌دست‌آمده از این مدل‌ها می‌تواند بر تصمیم‌گیری‌های مدیریتی تأثیر قابل‌توجهی بگذارد.

نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی کارآمدتر در زمینه بهینه‌سازی فرآیند تولید و کاهش هزینه‌های مرتبط با ضایعات و ناکارآمدی‌ها قرار گیرد. به‌علاوه، یافته‌های این مطالعه می‌تواند به سازمان‌ها کمک کند تا با بهبود فرآیندهای تولیدی و ارزیابی پس از آن، به افزایش کیفیت محصولات و خدمات خود دست یابند و در نهایت به رضایت مشتریان و تقویت موقعیت رقابتی خود در بازار کمک کند. بنابراین، بهینه‌سازی فرآیند تولید و ارزیابی باید به‌عنوان یک جزء اساسی در بهبود عملکرد سازمان‌ها در نظر گرفته شود.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بهبود بازده تولید یکی از عوامل مهم و اساسی در کاهش هزینه‌های یک سازمان است که می‌تواند در رشد و توسعه یک صنعت نقش بسزایی داشته باشد. بنابراین، ارزیابی آن از هر چیز حائز اهمیت‌تر است. به منظور تحلیل هر چه بهتر بازده تولید، می‌بایست عوامل تأثیرگذار بر این بازده را شناسایی کرد تا بتوان اصلاحات لازم را در جهت بهبود آن اعمال نمود. عواملی مانند زمان آماده‌سازی و تنظیم تجهیزات تولید، زمان عملیات، نرخ از کارافتادگی، نرخ تعمیر و در نتیجه نرخ بهره‌برداری از ماشین‌آلات و کل فرآیند تولید منشا تصادفی بودن داده‌های سیستم است. لذا به دلیل پیچیده شدن چنین سیستم‌هایی تحلیل آن‌ها مستلزم به‌کارگیری تکنیک‌های شبیه‌سازی است. در تحقیق حاضر به بررسی بازده خط تولید پمپ هیدرولیک پرداخته می‌شود. از آن‌جا که اطلاعات حداقلی موردنیاز جهت شبیه‌سازی این فرآیند تولید به صورت مستندات طبقه‌بندی شده در دسترس است، در این تحقیق سعی شده است که از طریق فرآیند شبیه‌سازی به بررسی و تحلیل آن پرداخته شود. این تحقیق به کاربرد شبیه‌سازی به‌عنوان ابزاری برای شناسایی، تجزیه و تحلیل و بهبود بازده تولید یک خط تولید می‌پردازد و با به اشتراک گذاشتن نتایج آن باعث ارتقای دانش سازمانی می‌شود. بنابراین، در این تحقیق پس از شناسایی عوامل، به ایجاد مدل شبیه‌سازی شده پرداخته شده است و نتایج آن را با شرایط واقعی مورد بررسی قرار گرفته شده تا عواملی که منجر به کاهش بازده خط تولید شده است مورد شناسایی قرار گیرد.

نتایج نشان داد که اضافه کردن فعالیت‌های ارزیابی و محدودیت‌های سیستم مانند زمان استراحت اپراتورها و زمان‌های خرابی و تنظیمات به سیستم منجر به کاهش بازده از ۸۰ درصد به ۵۷ درصد شده است. فعالیت‌های دوباره‌کاری و جداسازی تأثیر بسزایی در بازده مدل داشته است و همچنین خروجی ضایعات نیز به مدل اضافه شده است که بازده مفید مدل را کاهش می‌دهد. بنابراین، از عوامل مهمی که در کاهش بازده تولید نقش اساسی می‌تواند داشته باشد، توقفات خط تولید است که به دلیل خرابی تجهیزات و یا زمان راه‌اندازی دستگاه‌ها و زمان توقفات مجاز اپراتورها است. همچنین از دلایل دیگر کاهش بازده، افزایش ضایعات و دوباره‌کاری است. بنابراین، مدیران تولید در سازمان‌ها باید توجه داشته باشند که در سازمان راه‌حل‌ها و اقداماتی را انجام دهند تا زمان توقف ماشین‌آلات و ضایعات به کمترین حد ممکن خود برسد. به‌عنوان مثال در خصوص

سناریوی اول که به دنبال بهینه‌سازی تعداد منابع (اپراتورها و ماشین‌آلات) می‌باشد، پس از تعیین بهترین حالت تعداد منابع، می‌توان با زمان‌سنجی و کارسنجی مجدد فعالیت‌ها در شرایط واقعی، منابع را براساس راه‌حل پیشنهادی سازمان‌دهی کرد و یا در خصوص سناریوی دوم نیز می‌توان از طریق توانمندسازی اپراتورها از نظر ویژگی‌های کیفی محصول و یا به‌کارگیری کیفیت جامع فراگیر یا نگهداری جامع فراگیر به دنبال کاهش هر چه بیشتر عدم‌انطباق‌ها در سیستم شد.

در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی گسسته پیشامد به بررسی خط تولید تمام اتوماتی در صنعت خودروسازی و ارائه پیشنهاداتی برای بهبود عملکرد آن پرداخته شد. در ادبیات تحقیق نیز، پژوهشگران زیادی به بررسی عملکرد و بازده خط تولید پرداخته‌اند [۵، ۱۱، ۱۴، ۱۶، ۴۴، ۴۶، ۵۳، ۶۱]، اما تعداد کمی از مقالات به بررسی خط تولید با استفاده از روش شبیه‌سازی گسسته پیشامد و با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری پرداخته‌اند [۷، ۲۹، ۳۰، ۴۸، ۴۹، ۵۳، ۶۱]. هرچند که این روش منجر به نتایج عملی و کاربردی می‌شود اما نسبت به سایر روش‌ها به ندرت در صنعت به‌کارگرفته شده است. از طرفی مستندات علمی ارائه شده در بررسی خط تولید تمام تقریباً تمام اتومات با استفاده از شبیه‌سازی گسسته پیشامد در ادبیات و پیشینه موضوع اندک است. زیرا تمام اتومات بودن خطوط تولید ممکن است این تصور را ایجاد کند که نیازی به بهینه‌سازی این خطوط نیست. با این حال لازم به ذکر است نتایج مقالاتی که اخیراً در این زمینه کار کرده‌اند با پژوهش حاضر هم‌راستا بوده و معتقدند امکان بهبود بازده وجود داشته و استفاده از شبیه‌سازی گسسته پیشامد کمک زیادی به شناسایی نقاط بهبود کرده است [۲۶، ۲۸، ۴۷]. همچنین تحقیقاتی که از شبیه‌سازی برای ایجاد بهبود در سازمان خود استفاده کرده‌اند، بر کاربرد این روش در کاهش هزینه‌ها تأکید کرده‌اند. زیرا با به‌کارگیری این روش نیازی به آزمون و خطا و اعمال سناریوهای متفاوت در سیستم واقعی نیست.

از آنجا که عوامل زیادی در بازده تولید تأثیر دارند و در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، می‌توان با بررسی آن‌ها نیز دید جامع‌تری برای بررسی بازده تولید داشت. از آنجا که بهبود روحیه شغلی و انگیزش پرسنل با روش‌هایی چون پرداخت پاداش برای اضافه تولید (آکورد تولید) عامل بسیار مهمی جهت بالا بردن بهره‌وری و بازده تولید است، با این اقدام، می‌توان اثر آن عوامل را بر بهبود بازده تولید مورد بررسی قرار داد. همچنین بهبود وضعیت ارگونومی فعالیت‌های تولیدی این اقدام، باعث کاهش خستگی پرسنل و جلوگیری از کاهش بازده تولید در ساعات پایانی شیفت کاری می‌گردد. عواملی دیگر نیز در این مسئله نقش دارند که شامل بهبود شرایط محیطی کار مانند تهویه مناسب محیط، کاهش سروصدا و دیگر آلودگی‌ها است. بنابراین، می‌توان در تحقیقات آتی اثر این عوامل را نیز بر بازده تولید مورد بحث و بررسی قرار داد.

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 به‌عنوان شاهدهی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

منابع

1. Afshar Kazemi, M., Alborzi, M., Mahjoubraresh, S. (2012). Simulating the Production Line of Reinforcement Bars and Determining the nondominant Solutions for the Number of Cranes. *Future study Management*, 23(94-95), 13-26.
2. Ajiga, D., Okeleke, P. A., Folorunsho, S. O., Ezeigweneme, C. (2024). The role of software automation in improving industrial operations and efficiency, *International Journal of Engineering Research Updates*, 7(1), 022-035.
3. Akpinar, S., Bayhan, G. M. (2011). A hybrid genetic algorithm for mixed model assembly line balancing problem with parallel workstations and zoning constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(3), 449-457.
4. Alam-tabriz, A., Zandieh, M., Doostmohammadi, I. (2014). Evaluating the impact of applying the theory constraints on performance indicators of the production line with a simulation approach (case study: automobile alternator production line). *Industrial Management Studies*, 12(35), 7-25. (in Persian).
5. Alfaro-Pozo, R., Bautista-Valhondo, J. (2024). Impact of limiting the ergonomic risk on the economic and productive efficiency of an assembly line. *International Journal of Production Research*, 1-19.
6. Amjad, A., Shah, Z. A., Ramzan, I., Khan, S. (2022). Optimizing Production Efficiency in Pakistani Shoe Manufacturing: A Simulation-Based Analysis. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 31, 19-33.

7. Arreola-Risa, A., Giménez-García, V. M., Martínez-Parra, J. L. (2011). Optimizing stochastic production-inventory systems: A heuristic based on simulation and regression analysis. *European Journal of Operational Research*, 213(1), 107-118.
8. Ataee Gortolmesh, A., Toloie Eshlaghy, A., Pourebrahimi, A. (2020). Business Process Modeling through Hybrid Simulation Approach (Case Study: One of the Iranian Banks). *Industrial Management Journal*, 11(4), 600-620. (in Persian).
9. Banks, J. (2005). *Discrete event system simulation*. Pearson Education India.
10. Brazil, V., Purdy, E., Bajaj, K. (2023). Simulation as an improvement technique. *Elements of Improving Quality and Safety in Healthcare*.
11. Bongomin, O., Mwasiagi, J. I., Nganyi, E. O., Nibikora, I. (2020). Improvement of garment assembly line efficiency using line balancing technique. *Engineering Reports*, 2(4), e12157.
12. Coad, A., Broekel, T. (2012). Firm growth and productivity growth: evidence from a panel VAR. *Applied Economics*, 44(10), 1251-1269.
13. Croce, A., Martí, J., Murtinu, S. (2013). The impact of venture capital on the productivity growth of European entrepreneurial firms: 'Screening' or 'value added' effect?. *Journal of Business Venturing*, 28(4), 489-510.
14. Cuaresma, J. C., Oberhofer, H., Vincelette, G. A. (2014). Firm growth and productivity in Belarus: New empirical evidence from the machine building industry. *Journal of Comparative Economics*, 42(3), 726-738.
15. Deiranlou, M., Azadjou, F., Sajadi, S. M. (2022). A Simulation – Optimization Model of Network Failure Prone Manufacturing Systems with a Reliability-Based Maintenance and Revenue Sharing Approach. *Journal of Industrial Management Perspective*, 12(4), 131-158. (in Persian).
16. Dias, P., Silva, F. J. G., Campilho, R. D. S. G., Ferreira, L. P., Santos, T. (2019). Analysis and improvement of an assembly line in the automotive industry. *Procedia Manufacturing*, 38, 1444-1452.
17. Dinlersoz, E., Wolf, Z. (2024). Automation, labor share, and productivity: Plant-level evidence from US Manufacturing. *Economics of Innovation and New Technology*, 33(4), 604-626.
18. Duan, C., Kee, R., Zhu, H., Sullivan, N., Zhu, L., Bian, L., ... O'Hayre, R. (2019). Highly efficient reversible protonic ceramic electrochemical cells for power generation and fuel production. *Nature Energy*, 4(3), 230-240.
19. Fadaei, M., Heydari Ghare Bagh, H., Reisi, S. (2015). Enhancing Efficiency and Organizational Knowledge in Assembly Lines Using Discrete-event Simulation Techniques. *Roshd-e-Fanavari*, 2(42), 1.
20. Ghaleb, A., Heshmat, M., El-Sharief, M. A., El-Sebaie, M. G. (2019, April). Using fuzzy logic and discrete event simulation to enhance production lines performance: case study. In *2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, 653-657. IEEE.
21. Gualtieri, L., Palomba, I., Merati, F. A., Rauch, E., Vidoni, R. (2020). Design of human-centered collaborative assembly workstations for the improvement of operators' physical ergonomics and production efficiency: A case study. *Sustainability*, 12(9), 3606.
22. Gunasegaram, D. R., Farnsworth, D. J., Nguyen, T. T. (2009). Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments. *Journal of materials processing technology*, 209(3), 1209-1219.
23. Hajian Heidary, M., Mirzaaliyan, M. (2022). Supply Chain Resilience Analysis Considering Disruption in the Natural Stone Industry Using a Discrete-Event Simulation Approach. *Journal of Industrial Management Perspective*, 12(4), 97-129. (in Persian).
24. Hu, S., Chen, P., Xin, F., Xie, C. (2019). Exploring the effect of battery capacity on electric vehicle sharing programs using a simulation approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 164-177.
25. (17.) Jahangiri, S., Abolghasemian, M., Ghasemi, P., Chobar, A. P. (2023). Simulation-based optimisation: analysis of the emergency department resources under COVID-19 conditions. *International journal of industrial and systems engineering*, 43(1), 1-19.
26. Janeková, J., Fabianová, J., Kádárová, J. (2023). Optimization of the Automated Production Process Using Software Simulation Tools. *Processes*, 11(2), 509.
27. Javidmoayed, M., Toloie Eshlaghy, A., Afshar Kazemi, M. A. (2020). Investigating the Factors Affecting Customer Satisfaction of Iranian Mobile Operators through Combined Simulation of System Dynamics - Discrete Event. *Industrial Management Journal*, 12(4), 672-696. (in Persian).
28. Kamal, T., Rahman, S. M. (2024). Productivity optimization in the electronics industry using simulation-based modeling approach. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 13(2), 104-115.
29. Kampa, A., Gołda, G., Paprocka, I. (2017). Discrete event simulation method as a tool for improvement of manufacturing systems. *Computers*, 6(1), 10.
30. Kayasa, M. J., Herrmann, C. (2012). A simulation-based evaluation of selective and adaptive production systems (SAPS) supported by quality strategy in production. *Procedia CIRP*, 3, 14-19.

31. Kazemi, M., Sibeveih, A., Ranjbar, M., Naji Azimi, Z., Karimi, R. (2014). Emergency Department Simulation and Ranking Its Improving Scenarios using AHP – PROMETHEE Method. *Journal of Industrial Management Perspective*, 3(4), 137-164. (in Persian).
32. Khan, S., Naushad, M., Iqbal, J., Bathula, C., Sharma, G. (2022). Production and harvesting of microalgae and an efficient operational approach to biofuel production for a sustainable environment. *Fuel*, 311, 122543.
33. Khatami Firouzabadi, S. M. A., Taghavi Fard, S. M. T., Sajjadi, S. K., Bamdad Soufi, J. (2018). Multi-Objective Problem of Services Assignment to Bank Clustered Customers. *Journal of Industrial Management Perspective*, 8(2), 85-110. (in Persian).
34. Kim, K., Lee, J., Lee, C. (2023). Which innovation type is better for production efficiency? A comparison between product/service, process, organisational and marketing innovations using stochastic frontier and meta-frontier analysis. *Technology Analysis & Strategic Management*, 35(1), 59-72.
35. Kondratiev, D. V., Osipov, A. K., Gainutdinova, E. A., Abasheva, O. V., Ostaev, G. Y. (2022). Criteria and indicators of synergistic efficiency of food industry enterprise management. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 949(1), 012080. IOP Publishing.
36. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K. (2023). A state of the art on simulation and modelling methods in machining: future prospects and challenges. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(1), 161-189.
37. Kuo, R. J., Yang, C. Y. (2011). Simulation optimization using particle swarm optimization algorithm with application to assembly line design. *Applied Soft Computing*, 11(1), 605-613.
38. Liang, Y., Li, W., Wang, X., Zhou, R., Ding, H. (2022). TiO₂-ZnO/Au ternary heterojunction nanocomposite: excellent antibacterial property and visible-light photocatalytic hydrogen production efficiency. *Ceramics International*, 48(2), 2826-2832.
39. Lu, H., Qin, Z., Lin, S., Chen, X., Chen, B., He, B., ... Yuan, W. (2022). Large influence of atmospheric vapor pressure deficit on ecosystem production efficiency. *Nature communications*, 13(1), 1653.
40. Luo, M., Fan, H., Liu, G. (2021). A target-oriented DEA model for regional construction productive efficiency improvement in China. *Advanced Engineering Informatics*, 47, 101208.
41. Melman, G. J., Parlikad, A. K., Cameron, E. A. B. (2021). Balancing scarce hospital resources during the COVID-19 pandemic using discrete-event simulation. *Health Care Management Science*, 24(2), 356-374.
42. Mengistu, S. B. (2022). *Closing the yield gap: improving production efficiency in smallholder farms of Nile tilapia through selective breeding* (Publication No. .29877833) [Doctoral dissertation, Wageningen University and Research]. ProQuest Dissertations and Theses Global.
43. Morais, V. R., Sousa, S., Lopes, I. D. S. (2015). Implementation of a lean six sigma project in a production line, Proceedings of the World Congress on Engineering, 2.
44. Mortada, A., Soulhi, A. (2023). Improvement of assembly line efficiency by using Lean Manufacturing tools and line balancing techniques. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 17(4), 89-109.
45. Mosayeb motlagh, M., Azimi, P., Amiri, M. (2023). An Optimization of Multi-product Assembly Lines Using Simulation and Multi-Objective Programming Approach. *Industrial Management Studies*, 21(68), 75-120. (in Persian).
46. Pereira, J., Silva, F. J. G., Bastos, J. A., Ferreira, L. P., Matias, J. C. O. (2019). Application of the A3 methodology for the improvement of an assembly line. *Procedia Manufacturing*, 38, 745-754.
47. Ruane, P., Walsh, P., Cosgrove, J. (2023). Using simulation optimization to improve the performance of an automated manufacturing line. *Procedia Computer Science*, 217, 630-639.
48. Sarda, A., Digalwar, A. K. (2018). Performance analysis of vehicle assembly line using discrete event simulation modelling. *International Journal of Business Excellence*, 14(2), 240-255.
49. Sarvar Masouleh, M. Azizi, A. (2021). Simulation and optimization model of the Signoff units in order to increase the logistic productivity and reduce the production and quality costs: A Case Study in Saipa Automotive Company. *Journal of New Researches in Mathematics*, 4(7), 73-100. (in Persian).
50. Shakoor, M., Qureshi, M. R., Jadayil, W. A., Jaber, N., Al-Nasra, M. (2021). Application of discrete event simulation for performance evaluation in private healthcare: The case of a radiology department. *International Journal of Healthcare Management*, 14(4), 1303-1310.
51. Shakerin, R., Toloie Eshlaghy, A., Radfar, R. (2021). Analysis of the Service Process of Insurance Issuance System Life and Securing the Future with a Discrete Event Simulation Approach and Scenario Writing (Case study: Pasargad Insurance Company). *Management Research in Iran*, 24(4), 19-47. (in Persian).
52. Simkin, A. J., López-Calcano, P. E., Raines, C. A. (2019). Feeding the world: improving photosynthetic efficiency for sustainable crop production. *Journal of Experimental Botany*, 70(4), 1119-1140.
53. Soroush, H., Sajjadi, S. M., Arabzad, S. M. (2014). Efficiency analysis and optimisation of a multi-product assembly line using simulation. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 13(1), 89-104.

54. Tavan, F., Sajadi, S. M., Movahedi Sobhani, F., Azizi, A. (2023). A Model of Simulation-Data Envelopment Analysis in Network Failure Manufacturing Systems Considering Reliability Centered Maintenance and Return of Defective Items. *Journal of Industrial Management Perspective*, 13(2), 119-157. (in Persian).
55. Nižetić, S., Djilali, N., Papadopoulos, A., Rodrigues, J. J. (2019). Smart technologies for promotion of energy efficiency, utilization of sustainable resources and waste management. *Journal of cleaner production*, 231, 565-591.
56. Utku, D. H. (2023). The evaluation and improvement of the production processes of an automotive industry company via simulation and optimization. *Sustainability*, 15(3), 2331.
57. Vázquez-Serrano, J. I., Peimbert-García, R. E., Cárdenas-Barrón, L. E. (2021). Discrete-event simulation modeling in healthcare: A comprehensive review. *International journal of environmental research and public health*, 18(22), 12262.
58. Yaghoubi, F., Azar, A., Ahmadi, P. (2017). Simulation of the Continuous Production System in the Manufacturing Plant and Comparing it with the Traditional Production System (a case Study in Salamat Sharmaceutical Factory), *The Second International Conference On Industrial Management*. (in Persian).
59. Yang, H., Wu, Y., Li, G., Lin, Q., Hu, Q., Zhang, Q., ... He, C. (2019). Scalable production of efficient single-atom copper decorated carbon membranes for CO₂ electroreduction to methanol. *Journal of the American Chemical Society*, 141(32), 12717-12723.
60. Yang, Z. Y., Huang, K. X., Zhang, Y. R., Yang, L., Zhou, J. L., Yang, Q., Gao, F. (2023). Efficient microalgal lipid production driven by salt stress and phytohormones synergistically. *Bioresource Technology*, 367, 128270.
61. Yasir, A. S. H. M., Mohamed, N. M. Z. N. (2018, March). Assembly line efficiency improvement by using WITNESS simulation software. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 319 (1), 012004. IOP Publishing.
62. Zerwas, T., Jacobs, G., Kowalski, J., Husung, S., Gerhard, D., Rumpe, B., ... Höpfner, G. (2022). Model signatures for the integration of simulation models into system models. *Systems*, 10(6), 199.
63. Zandi, P., Rahmani, M., Azimi, P. (2021). Proposing a Model for Analyzing and Improving a Service System through Queue Theory and Simulation Approach (Case: Hamedan Power Company). *Journal of Industrial Management Perspective*, 11(2), 67-100. (in Persian).
64. Zülch, G., Brinkmeier, B. (1998). Simulation of activity costs for the reengineering of production systems. *International journal of production economics*, 56, 711-722.