University of Qom
Engineering Management and Soft Computing
JEMSC.QOM
Online ISSN: 2538-2675

Simulating the line balance to provide an improvement plan for optimal production and costing in petrochemical industries

Asghar Hemmati[1], Farshad Kaveh[2], Milad Abolghasemian[3] and Adel Pourghader chobar[4]

1. Corresponding Author, Assistance prof. Department of Industrial Engineering, Abhar Branch, Islamic Azad University, Abhar, Iran, Email: Hemati.asghar@iau.ir
2. Phd student, Department of Industrial Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, Email: Farshadkaveh@gmail.com
3. Phd. Department of Industrial Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran, Email: m.abolghasemian.bt@gmail.com
4. Phd. Department of Industrial Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran, Email: apourghader@qiau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 16 Aug 2024
Received in revised form 4 Sep 2024
Accepted 15 Sep 2024
Published online 21 Sep 2024

Keywords:
Costing,
production line balance,
Simulation.

ABSTRACT

This research examines the influential factors and theoretical principles of queuing in balancing production lines. It is classified as an applied study in terms of its objectives. The methods of data collection in this research are survey-based. The statistical population of this study consists of the production line of products in a petrochemical company in Iran. The required information, including the number of active machines on the production line, the level of station idleness, and the waiting time for parts to receive services, has been quantitatively gathered through on-site observations and interviews with managers and supervisors. Additionally, recorded data from the planning unit and time-tracking processes from the company's engineering department have been utilized. Process modeling has been developed using the ARENA simulation software version 13, which can identify the current status of tank and heavy product production in terms of queuing and line balance criteria, and its results are analyzed and described. The findings of this research indicate that the addition of a forklift increases costs from 65,902 monetary units to 80,577, equivalent to a 22% increase. However, this change results in a doubling of production compared to the current state; therefore, the extra expenditure due to increased production is satisfactory for the managers of this organization. The significance of this production increase aligns with enhanced productivity, especially considering the greater emphasis placed on production targets. Thus, the 22% increase in costs can be overlooked, leading to the conclusion that the results obtained aim to pursue increased productivity.

Cite this article: Hemmati, A. & others (2024). Simulating the line balance to provide an improvement plan for optimal production and costing in petrochemical industries. *Enginiiring Management and Soft Computing, 10* (1). 190-212. **DOI**: https://doi.org/10.22091/jemsc.2024.11189.1198

© The Author(s)
DOI: https://doi.org/10.22091/jemsc.2024.11189.1198
Publisher: University of Qom

JEMSC.QOM
شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۵-۲۵۳۸
مدیریت مهندسی و رایانش نرم
دانشگاه قم

شبیه‌سازی بالانس خط تولید برای ارائه طرح بهبود در مقدار تولیدات بهینه و هزینه‌یابی در صنایع پتروشیمی

اصغر همتی[۱]، فرشاد کاوه[۲]، میلاد ابوالقاسمیان[۳] و عادل پورقادر چوبر[۴]

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد ابهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ابهر، ایران، رایانامه: Hemati.asghar@iau.ir
۲. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، رایانامه: Farshadkaveh@gmail.com
۳. دانش‌آموخته دکتری مهندسی صنایع، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران، رایانامه: m.abolghasemian.bt@gmail.com
۴. دانش‌آموخته دکتری مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران، رایانامه: apourghader@qiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

کلیدواژه‌ها:
بالانس خط تولید،
شبیه‌سازی،
هزینه‌یابی.

چکیده

در این تحقیق، به بررسی عوامل موثر و اصول نظری صف در متوازن‌سازی خط تولید پرداخته می‌شود. این پژوهش از لحاظ هدف به‌عنوان تحقیقی کاربردی شناخته می‌شود و روش‌های جمع‌آوری اطلاعات به‌صورت پیمایشی است. جامعه آماری این پژوهش، خط تولید محصولات در یک شرکت پتروشیمی ایران می‌باشد. اطلاعات موردنیاز شامل تعداد دستگاه‌های فعال در خط تولید، میزان بیکاری ایستگاه‌ها و زمان انتظار قطعات برای دریافت خدمات، به‌صورت کمی از طریق حضور در خط تولید و مصاحبه با مدیران و سرپرستان جمع‌آوری شده‌است. همچنین اطلاعات ثبت‌شده در واحد برنامه‌ریزی و فرآیندهای کاری و نیز زمان‌سنجی از واحد مهندسی شرکت مورداستفاده قرار گرفته‌است. مدل‌سازی فرآیندها با کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی ARENA نسخه ۱۳ توسعه داده شده‌است که قادر است وضعیت کنونی تولید مخازن و مصنوعات سنگین از نظر معیارهای صف و توازن خط را مشخص کند و نتایج آن را تحلیل و توصیف نماید. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که با اضافه‌شدن یک دستگاه لیفتراک، هزینه‌ها از ۶۵.۹۰۲ واحد پولی به ۸۰.۵۷۷ افزایش می‌یابد که معادل ۲۲ درصد افزایش است. این تغییر منجر به دوبرابرشدن تولیدات نسبت به وضعیت کنونی می‌شود لذا صرف هزینه بیشتر به‌دلیل افزایش میزان تولید برای مدیران این مجموعه رضایت‌بخش بوده‌است. چراکه افزایش تولید و وزن بیشتری که به هدف تولیدات داده شده، در راستای افزایش بهره‌وری قابل توجه است. بنابراین می‌توان افزایش ۲۲ درصدی هزینه‌ها را نادیده گرفت و نتیجه‌گیری کرد که با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده، به دنبال افزایش بهره‌وری خواهیم بود.

استناد: همتی، اصغر؛ کاوه، فرشاد؛ ابوالقاسمیان، میلاد؛ پورقادر جوبر، عادل. (۱۴۰۳). «شبیه‌سازی بالانس خط تولید برای ارائه طرح بهبود در مقدار تولیدات بهینه و هزینه‌یابی در صنایع پتروشیمی». *مدیریت مهندسی و رایانش نرم*، دوره ۱۰ (۱). صص: ۲۱۲-۱۹۰.
https://doi.org/10.22091/jemsc.2024.11189.1198

ناشر: دانشگاه قم

© نویسندگان.

۱) مقدمه

در دنیای امروز با توجه به پیشرفت تکنولوژی، سازمان‌ها در تلاش هستند که از رقبا پیشی بگیرند و این جز با برنامه‌ریزی دقیق و بکارگیری صحیح منابع و امکانات، امکان‌پذیر نیست. بنابراین مدیران با توجه به پیچیدگی سیستم‌ها، باید با استفاده از ابزارهای مناسب مانند برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی اعداد صحیح، شبیه‌سازی، تئوری صف و غیره که برای تحلیل سیستم‌ها وجود دارد، برنامه‌ریزی صحیحی انجام داده و از هدررفتن منابع جلوگیری کنند (لیو و همکاران، ۲۰۲۴). صف یک خط انتظار است مانند انتظار مشتریان پشت کانترهای سوپرمارکت. تئوری صف یک تئوری ریاضی برای خطوط انتظار می‌باشد. بطورکلی تئوری صف به دنبال استفاده از مدل‌سازی ریاضی و تجزیه‌وتحلیل سیستمی است که بتواند به نحو مطلوب به تقاضاهای تصادفی خدمت‌رسانی کند (آفولائو و همکاران، ۲۰۲۱). هنر تئوری صف در این است که ابتدا یک مدل ساده بسازد و سپس با استفاده از تجزیه‌وتحلیل‌های ریاضی نتایج به‌دست‌آمده را با نتایج واقعی مقایسه کند و با افزودن جزئیات لازم به مدل، مدل ساخته‌شده را با سیستم واقعی هماهنگ کند (سامولویوف و همکاران، ۲۰۱۶). بالانس خطوط تولید در صنایع مختلف مانند صنعت نفت، خودروسازی، فولاد، پوشاک و غیره نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش راندمان و بهره‌وری تولید ایفا می‌کند. صرفه‌جویی در زمان و هزینه با ارائه یک چیدمان مناسب، حذف گلوگاه‌ها و افزایش سرعت پاسخگویی، از نتایج بالانس بخش‌های مختلف خط تولید می‌باشد (اوربان و چیانگ، ۲۰۱۶). یک خط مونتاژ شامل تعداد ایستگاه‌های متوالی است که محصول خاص یا خانواده‌ای از محصول را مونتاژ می‌کنند. پردازش اجزا با توجه به مجموعه‌ای از فعالیت‌ها انجام می‌شود. این پردازش در هر ایستگاه با توجه به یک زمان ثابت موسوم به زمان سیکل، انجام می‌شود. اگر مجموع زمان فعالیت‌های انجام‌شده در هر ایستگاه کاری با ایستگاه‌های دیگر خط، متعادل نباشد درصد بیکاری در بعضی از ایستگاه‌ها زیاد شده و در بعضی از ایستگاه‌ها ایجاد گلوگاه می‌شود. برای رفع این نواقص باید اقدام به متعادل‌کردن این ایستگاه‌ها با توجه به زمان سیکل کرد (ابوالقاسمیان و همکاران، ۲۰۲۲). موضوع تخصیص فعالیت‌ها به ایستگاه‌ها درصورتیکه یک یا تعداد بیشتری از اهداف با توجه به تعداد مشخصی از محدودیت‌ها بهینه شوند، مسئله بالانس خط مونتاژ نامیده می‌شود. هدف اصلی در مسئله بالانس خط مونتاژ تخصیص فعالیت‌های یک خط مونتاژ به ایستگاه‌های کاری است بطوریکه تعداد ایستگاه‌های کاری و زمان بیکاری هر ایستگاه، روابط پیش‌نیازی فعالیت‌های خط مونتاژ را تامین کند و خط مونتاژ بتواند خروجی لازم را که براساس تصمیمات مدیران ارشد سازمان اتخاذ می‌شود، برآورده کند. درنتیجه از فرآیند بالانس خط مونتاژ انتظار می‌رود که بهترین ترکیب بین نیروی انسانی، تجهیزات و تسهیلات به‌منظور برآورده‌کردن نیازمندی‌های یک سیستم به‌دست‌آید. راه‌های متعادل‌سازی خط تولید شامل: ایجاد انبار نیمه‌ساخته بعد از هر ایستگاه کاری که کندتر کار می‌کند، افزایش تعداد کارگران ایستگاه‌های کندتر و یا استفاده از کارگران ایستگاه‌های تندتر در طول خط ایستگاه کندتر، بررسی و اصلاح عملیات در ایستگاه‌های کندتر، آموزش و جابجایی فعالیت‌ها در ایستگاه‌ها درصورت امکان می‌باشد که با توجه به اقتضاء مدیریت می‌تواند از آنها بهره گیرد. مشکلات ناشی از عدم بالانس خط تولید سبب افزایش هزینه‌های تولید، تخصیص ناعادلانه کار، بیکاری اپراتورها، کارآیی و تولید پایین، وجود گلوگاه در سیستم ولی ایجاد بالانس خط تولید سبب تولید انبوه، پیوسته‌بودن تولید، متعادل‌بودن عملیات می‌شود (دامچی، ۲۰۲۲).

مزایای بالانس خط تولید نیز سبب افزایش بهره‌وری تولید و کاهش زمان تحویل محصول به مشتری، افزایش سود تولید و کاهش اضافه‌کاری‌های بیهوده، استفاده بهینه از ظرفیت اپراتورهای یک خط و تخصیص اپراتور به تعداد موردنیاز برای یک خط تولید یا مونتاژ، حداقل‌کردن زمان سیکل یا تعداد ایستگاه‌های کاری، ایجاد بهترین ترکیب بین نیروی انسانی و تجهیزات در خط تولید یا مونتاژ، حداقل‌کردن سایز انبارهای بین ایستگاه‌ها، بهبود بهره‌وری به‌منظور افزایش حجم تولید می‌شود (بولاس و همکاران، ۲۰۲۳).

تمامی روش‌های فوق به جز شبیه‌سازی، سعی در ساده‌سازی سیستم دارند و قادر نیستند بسیاری از روابط پیچیده و عوامل تصادفی سیستم واقعی را درنظر بگیرند و دقت تحلیل سیستم را پایین می‌آورند و نیز مدل‌سازی به روش‌های فوق بسیار مشکل است. بنابراین شبیه‌سازی را می‌توان یکی از پرقدرت‌ترین ابزارهای تحلیل موجود برای افراد مسئول طراحی و بهره‌برداری از فرآیندها دانست. شبیه‌سازی، امکان شناسایی نقاط ضعف و بهینه‌سازی فرآیندها را فراهم می‌کند که می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری تولید شود. با استفاده از بهینه‌سازی و طراحی عملکرد خط تولید، هزینه‌های ناشی از هدررفت منابع و زمان کاهش می‌یابد که برای صنایع پتروشیمی با هزینه‌های بالای تولید بسیار حیاتی است. همچنین شبیه‌سازی می‌تواند به مدیران کمک کند تا به سرعت به تغییرات بازار و نیازهای مشتریان پاسخ دهند و تولید را براساس شرایط جدید تنظیم کنند. مدیریت باید درمورد نوع تجهیزات مورد لزوم، میزان خروجی قابل قبول، استفاده از انواع مواد بین ایستگاه‌ها، ثابت یا انعطاف‌پذیربودن خط تصمیم‌گیری نماید. با استفاده از شبیه‌سازی در برنامه‌ریزی تولید می‌توان مدیران و سازمان‌ها را در دسترسی به اهداف ازپیش‌تعیین‌شده یاری نمود. از این رو دغدغه فکری محقق را بر آن داشت که عوامل موثر و اصول تئوری صف در بالانس خط تولید در شرکت پتروشیمی پارس را بررسی کند.

بنابراین مشارکت اصلی این پژوهش را می‌توان در پنج نکته زیر خلاصه کرد:

۱- تعیین افزایش میزان تولید با استفاده از تغییرات در خط تولید

۲- تعیین افزایش میزان بهره‌وری با استفاده از تغییرات در خط تولید

۳- تعیین مدل مناسب در خط تولید با استفاده از چیدمان دستگاه‌ها و استقرار ماشین‌آلات

۴- تعیین گلوگاه‌های خط تولیدی فرآیند و کاهش آنها

۵- دستیابی به مناسب‌ترین پارامترهای تصمیم، جهت برنامه‌ریزی تولید و حداکثر بهره‌برداری از ظرفیت ماشین‌آلات با طراحی مدل شبیه‌سازی براساس تئوری صف.

در بخش بعدی به مبانی نظری و پیشینه تحقیق پرداخته خواهد شد سپس روش تحقیق و مراحل اجرایی تحقیق بیان خواهد شد. بعد از آن نتایج بکارگیری روش پیشنهادی در یک مطالعه موردی، ارائه خواهد شد. سرانجام یک نتیجه‌گیری کلی به‌همراه پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه خواهد شد.

۲) پیشینه تحقیق

هوریون (۱۹۹۷) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی یک الگوریتم بهینه‌سازی ابتکاری برای حل مسائل غیرقطعی ارائه داد. دنگیز و آکبای (۲۰۰۰) یک شبه‌مدل رگرسیون به‌منظور تعیین اندازه بهینه دسته‌های تولیدی در واحد مونتاژ برای

سیستم برنامه‌ریزی مواد و احتیاجات و JIT[1] ارائه داده‌اند. کلاینن و سارژنت (۲۰۰۰) با استفاده از طرح عامل کسری دو سطحی، به برآورد یک شبه‌مدل مرتبه اول به‌منظور تجزیه‌وتحلیل و بهینه‌سازی فرآیند تولید در یک شرکت لوله‌های فلزی پرداختند. مکشیمر و همکاران (۲۰۰۱) یک روش برای بهینه‌سازی مسائل چندهدفه با استفاده از روش RSM ارائه کردند که در آن از روش طرح ابرمکعب‌لاتین برای نمونه‌گیری و از روش GA[2] برای بهینه‌سازی استفاده شده‌است. دنگیز و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از روش RSM یک سیستم پشتیان تصمیم‌گیری (DSS)[3] به‌منظور پیش‌بینی تعداد ماشین‌آلات و تعداد کارگران توسعه دادند. دنگیز (۲۰۰۹) با استفاده از روش طراحی تاگوچی به بهینه‌سازی و شبیه‌سازی خط تولید مدار الکتریکی در یک شرکت الکترونیکی پرداخت. یالچینکایا و بایحان (۲۰۰۹) یک رویکرد بهینه‌سازی شبیه‌سازی شبه‌مدل محور با استفاده از متدولوژی سطح پاسخ برای بهینه‌سازی میانگین زمان سفر مسافران در یک متروی شهری ارائه دادند. احمد و الخمیس (۲۰۰۹) یک رویکرد بهینه‌سازی شبیه‌سازی در جهت طراحی یک ابزار تصمیم‌گیری برای عملیات موجود در یک بخش اورژانس در یک بیمارستان دولتی کویت پیشنهاد دادند. زینالی و همکاران (۲۰۱۵)، یک رویکرد مبتنی بر شبیه‌سازی و طراحی آزمایش برای کنترل ترکیب بهینه منابع در یک بخش اورژانس در بیمارستان مدرس تهران ارائه کردند. در این مطالعه طبق برآورد مدت زمان پذیرش بیماران در بخش اورژانس از طریق شبکه عصبی مصنوعی، پس از محاسبه ترکیب بهینه توانستند ۴۸ درصد بهبود در مدت زمان پذیرش بیماران مراجعه‌کننده در راستای بهبود بهره‌وری ایجاد نمایند. دنگیز و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل کنترل تولید را به کمک روش RSM ارائه دادند که قادر است نرخ عملیاتی کارگاه نقاشی را بر طبق پارامترهای کنترلی در تولیدات روزانه یک کارخانه اتوبوس‌سازی در کشور ترکیه بهبود ببخشد. ابوالقاسمیان و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه خود به تعیین مقدار بهینه تجهیزات جابجایی در فرآیند استخراج سنگ سولفید با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی شبه‌مدل محور پرداخته‌اند. در مرحله بهینه‌سازی، مدل رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم برازش‌شده که از راه شناسایی متغیرهای اثرگذار در سیستم با استفاده از طراحی آزمایش‌ها تقریب زده شده‌است، حل می‌شود. شبه‌مدل تقریب‌زده‌شده به‌خوبی قادر است نتایج شبیه‌سازی را تخمین بزند. بنابراین می‌توان اعتبار آن را نتیجه گرفت. یافته‌های این رویکرد بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی نتایج قابل قبولی را برای طراحی مجدد و کنترل فرآیند استخراج به‌منظور افزایش بهره‌وری دراختیار مدیران مجتمع معدن مس سرچشمه قرار می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که با استقرار ترکیب بهینه پیشنهادی می‌توان سطح میزان تولید در فرآیند استخراج را حفظ کرد و علاوه بر آن ۸ درصد در هزینه‌های موجود کاهش ایجاد کرد. ابوالقاسمیان و همکاران (۲۰۲۰)، یک بهینه‌سازی دوفازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای سیستم حمل‌ونقل در معدن روباز ارائه داده‌اند. بر طبق این مطالعه در فاز اول، یک مسئله فراابتکاری جهت تعیین مقدار بهینه تولید با استفاده از ®OptQuest حل شده‌است. در فاز دوم، مقدار بهینه تجهیزات جابجایی مثل مقدار شاول‌ها محاسبه شده‌است بطوریکه با استقرار ترکیب بهینه منابع بتوان به هدف فاز اول دست یافت. نتایج نشان می‌دهد با استفاده از این روش ۲۱ درصد در تولیدات افزایش ایجاد می‌شود. ابوالقاسمیان و همکاران (۲۰۲۲)، برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه استخراج یک نوع از سنگ‌های معدنی، یک روش

[1]Just in Time (JIT)
[2]Genetic Algorithm (GA)
[3]Decision Support System (DSS)

حل مسئله تکاملی ارائه دادند. آنها توانستند قابلیت بکارگیری الگوریتم پیشنهادی را در مواجهه با تعیین سطح استخراجات و مدت زمان جابجایی تجهیزات معدنی نشان دهند. جهانگیری و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه خود توانستند با استفاده از شبه‌مدل رگرسیون و بکارگیری بهینه‌سازی شبیه‌سازی مدت زمان انتظار بیماران مراجعه‌کننده به بخش اورژانس یک بیمارستان دولتی در ایران را در دوران پاندمی کاهش دهند. لیو و همکاران (۲۰۲۳) در این مطالعه یک مسئله زمان‌بندی کارگاه جریان ترکیبی را با درنظرگرفتن کارگران چندماهه و عوامل خستگی موردمطالعه قرار می‌دهد. یک سیستم شبیه‌سازی مبتنی بر عامل برای مقابله با عدم قطعیت‌ها در مدل خستگی کارگران ایجاد شده‌است. علاوه بر این، این مقاله یک چارچوب جدید بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی را پیشنهاد می‌کند که از الگوریتم ژنتیک برای رسیدگی به مسئله زمان‌بندی فروشگاه جریان ترکیبی استفاده می‌کند. عزیزی و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه خود با هدف داشتن شرایط عملیاتی بهینه در سیستم توربین‌های گازی، یک مدل با استفاده از روش سطح پاسخ، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری چندهدفه و چهار روش مختلف تصمیم‌گیری پیشنهاد داده‌اند. پیرمارینی و روما (۲۰۲۴) در این مطالعه یک مدل جدید برای مطالعه اثربخشی استراتژی‌های انحراف آمبولانس، براساس رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی معرفی کرده‌اند. برای این منظور، یک مسئله تخصیص بهینه منابع متشکل از یک مسئله بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی دوهدفه را فرموله و حل کرده‌اند که هدف آن به‌حداقل‌رساندن زمان بدون ارزش افزوده صرف‌شده توسط بیماران و هزینه کلی متحمل‌شده توسط شبکه است. در جدول (۱) پیشینه تحقیق برحسب نوع تابع هدف، نوع محدودیت، نوع شبه‌مدل، نوع روش طراحی آزمایش و روش بهینه‌سازی طبقه‌بندی شده‌است.

جدول ۱. طبقه‌بندی ادبیات

نام نویسنده	سال انتشار	تابع هدف		محدودیت		شبه‌مدل		روش طراحی آزمایش			روش بهینه‌سازی	
		تک‌هدفه	چندهدفه	نامقید	مقید	رگرسیون	کرایگینگ	شبکه عصبی	CCD	2^k	LHS	دقیق	متاهیورستیک
هوریون و همکاران	۱۹۹۷	*		*		*			*			*	
مکشیمیر و همکاران	۲۰۰۱	*		*		*					*		*
دنگیز و آکبای	۲۰۰۵	*			*	*							*
دنگیز و همکاران	۲۰۰۶	*			*	*				*		*	
دنگیز	۲۰۰۹	*		*		*	*						
احمد و الخمیس	۲۰۰۹	*			*								*
زینالی و همکاران	۲۰۱۵		*		*	*				*		*	
دنگیز و همکاران	۲۰۱۶		*		*			*			*		*
ابوالقاسمیان و همکاران	۲۰۱۸		*		*	*			*			*	

نام نویسنده	سال انتشار	تابع هدف		محدودیت		شبه‌مدل		روش طراحی آزمایش			روش بهینه‌سازی	
		تک‌هدفه	چندهدفه	نامقید	مقید	رگرسیون	کرایگینگ	شبکه عصبی	CCD	2^k	LHS	دقیق	متاهیورستیک
ابوالقاسمیان و همکاران	۲۰۲۰	*			*	*			*			*	
ابوالقاسمیان و همکاران	۲۰۲۲		*		*	*			*			*	
جهانگیری و همکاران	۲۰۲۳		*		*	*			*			*	
لیو و همکاران	۲۰۲۳		*	*		*			*				*
پیرمارینی و روما	۲۰۲۴		*	*		*			*			*	*
عزیزی و همکاران	۲۰۲۴			*	*		*		*			*	*
این تحقیق	۲۰۲۴		*	*	*	*				*	*	*	

با توجه به موارد اشاره‌شده در بالا، در صنعت پتروشیمی بهینه‌سازی خط تولید و افزایش کارآیی از اهمیت بالایی برخوردار است. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در تکنیک‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، هنوز بسیاری از صنایع پتروشیمی از مدل‌های قدیمی و ناکارآمد برای بالانس خط تولید استفاده می‌کنند. این موضوع منجر به عدم بهره‌وری و افزایش هزینه‌ها می‌شود. در این راستا، شکاف تحقیقاتی قابل توجهی در شناسایی و توسعه مدل‌های شبیه‌سازی پیشرفته وجود دارد که می‌تواند به بهبود بالانس خط تولید و افزایش کارآیی در این صنعت کمک کند. تحقیقات باید به بررسی عوامل تاثیرگذار بر بالانس خط تولید، شناسایی نقاط ضعف موجود در خطوط تولید فعلی و ارائه راهکارهای مبتنی بر شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی تولید و کاهش هزینه‌ها بپردازند. همچنین بررسی تجربیات موفق در دیگر صنایع می‌تواند به‌عنوان الگویی برای بهبود فرآیندها در صنایع پتروشیمی مورداستفاده، قرار گیرد. این شکاف تحقیقاتی نیازمند توجه و تحقیقات بیشتر برای ایجاد مدل‌های کاربردی و قابل اجرا در محیط‌های واقعی تولید است. زیرا بسیاری از واحدهای تولیدی هنوز از روش‌های سنتی و غیرموثر برای مدیریت و بهینه‌سازی فرآیندهای خود استفاده می‌کنند. این مسئله نیاز به شبیه‌سازی بالانس خط تولید را به‌وضوح نشان می‌دهد. شکاف تحقیق در این زمینه به این صورت است که با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در تکنولوژی‌های شبیه‌سازی و تحلیل داده‌ها، هنوز تحقیقات کافی درخصوص پیاده‌سازی این تکنیک‌ها برای بهینه‌سازی تولیدات و هزینه‌ها در صنایع پتروشیمی انجام نشده‌است. به‌ویژه مطالعات قبلی به بررسی جزئیات و ابعاد خاصی از فرآیند تولید پرداخته‌اند اما به چالش‌های کلی و متنوعی که در بالانس خطوط تولید وجود دارد، توجه کافی نشده‌است. این شکاف تحقیق می‌تواند به‌عنوان فرصتی برای بررسی و توسعه مدل‌های شبیه‌سازی بالانس خط تولید مطرح شود که با استفاده از داده‌های واقعی و تحلیل‌های پیشرفته، به بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌ها در صنایع پتروشیمی منجر گردد. این مطالعه می‌تواند به شناسایی نقاط ضعف و قوت موجود در فرآیندهای تولید کمک کند و راهکارهای موثری برای

بهینه‌سازی تولیدات و هزینه‌یابی ارائه دهد. درنهایت نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک مرجع برای تصمیم‌گیرندگان در صنایع پتروشیمی به‌منظور اتخاذ تصمیمات بهتر و افزایش بهره‌وری مورداستفاده قرار گیرد.

۳) روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، تحقیقی کاربردی می‌باشد چراکه نتایج حاصل از این پژوهش به‌منظور اصلاح فرآیندها و ساختار فعلی ساخت تولیدات استفاده می‌گردد. همچنین این تحقیق از نظر روش‌های جمع‌آوری اطلاعات، تحقیق پیمایشی است چون در این پژوهش با حضور در پتروشیمی پارس به جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز شبیه‌سازی مدل براساس تئوری صف پرداخته شده‌است. این پژوهش از نظر روش‌های تحلیل اطلاعات، تحقیقی توصیفی است زیرا وضعیت جاری بطور دقیق مشخص شده و بعد از مدل‌سازی فرآیندها به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی ARENA وضعیت جاری تولید مخازن و مصنوعات سنگین از لحاظ معیارهای صف و بالانس خط مشخص می‌شود و نتایج آن مورد توصیف و تحلیل قرار می‌گیرند. روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبه‌مدل[۴] پیشنهاد شدکه به‌دلایل مختلفی توجیه می‌شود. این روش به‌ویژه در مسائلی که تابع هدف با محدودیت‌های محاسباتی پرهزینه‌ای سروکار دارند، می‌تواند با استفاده از مدل‌های تقریبی، هزینه محاسباتی را بطور قابل توجهی کاهش دهد. با استفاده از شبه‌مدل‌ها، زمان موردنیاز برای ارزیابی گزینه‌ها کاهش می‌یابد و به این ترتیب فرآیند بهینه‌سازی سریع‌تر انجام می‌شود. استفاده از شبه‌مدل‌ها نیاز به ارزیابی‌های مکرر را کاهش می‌دهد که به‌ویژه در مسائل پیچیده‌ای که ارزیابی هر گزینه زمان‌بر است، مزیت بزرگی محسوب می‌شود. شبه‌مدل‌ها می‌توانند به‌خوبی رفتار غیرخطی و پیچیده سیستم‌ها را شبیه‌سازی کنند و به بهینه‌سازی در چنین سیستم‌هایی کمک کنند. این روش به محققان این امکان را می‌دهد که تعادلی بین دقت مدل و کارآیی محاسبات برقرار کنند و درمواردیکه دقت کامل ضروری نیست، از مدل‌های تقریبی استفاده کنند. شبه‌مدل‌ها می‌توانند به‌راحتی با داده‌های جدید به‌روزرسانی شوند و این امکان را فراهم آورند که بهینه‌سازی در شرایط متغیر به‌راحتی انجام شود. همچنین این روش قادر است بطور همزمان چندین هدف را در فرآیند بهینه‌سازی درنظر بگیرد و راه‌حل‌های بهینه را در این زمینه ارائه دهد. این دلایل موجب می‌شود که روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبه‌مدل به‌عنوان یک ابزار موثر در حل مسائل پیچیده و بهینه‌سازی در صنایع مختلف موردتوجه قرار گیرد.

روش گردآوری اطلاعات در این تحقیق به‌صورت کتابخانه‌ای انجام می‌گیرد و به‌ندرت با افراد خاص برای جمع‌آوری مستقیم اطلاعات سروکار دارد. در طول تحقیق همواره اجراکنندگان ملزم به اجرای قانون و اخلاق حرفه‌ای در برابر اسناد طبقه‌بندی‌شده هستند. علاوه بر این، گردآوری کتابخانه‌ای از مطالعه میان منابع تئوریک داخلی و خارجی اعم از مقالات مجله‌ای معتبر سال‌های اخیر، مقالات کنفرانسی، رساله‌های انجام‌شده در سایر دانشگاه‌ها و کتاب‌های حوزه شبیه‌سازی انجام می‌گیرد. جامعه آماری این پژوهش، خط تولید محصولات در شرکت پتروشیمی پارس می‌باشد به این صورت که اطلاعات موردنیاز (تعداد دستگاه‌های کاری در خط تولید مورد بررسی، میزان بیکاری ایستگاه‌ها و نیز میزان انتظار در صف قطعات برای دریافت سرویس، بررسی گلوگاه‌ها و غیره) که به‌صورت کمی بوده، از طریق حضور در خط تولید و مصاحبه با مدیران و سرپرستان شرکت و اطلاعات ثبت‌شده در واحد برنامه‌ریزی شرکت و فرآیندهای کاری

[4]Surrogate (Meta-mdoel)-based optimization

و زمان‌سنجی از واحد مهندسی شرکت جمع‌آوری شد. الگوی کلی مراحل پژوهش حاضر در شکل (۱) ارائه شده‌است. هریک از مراحل اجرای پژوهش در ادامه تشریح شده‌است.

نمودار ۱. مراحل انجام پژوهش

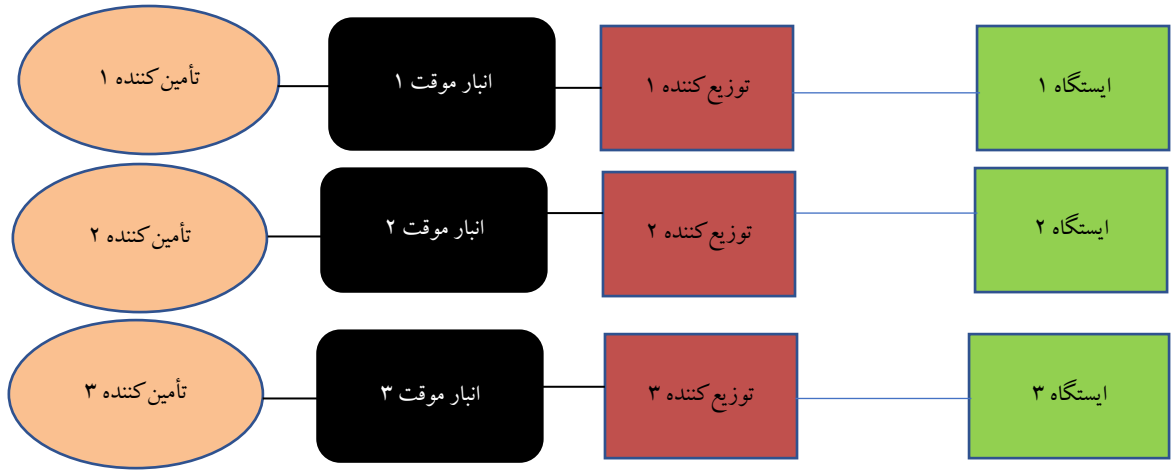
۴) یافته‌ها

در این تحقیق یک سیستم تولید که دارای سه مرحله تولید است و به‌صورت متوالی با تقاضای تصادفی و درنظرگرفتن ظرفیت تولید می‌باشد، موردبحث قرار گرفته‌است. سیستم تولید در این تحقیق به‌صورت یک زنجیره مارکوف زمان گسسته از نوع، M/G/1 مدل شده‌است. شرایط لازم و کافی و یک وضعیت پایدار که تحت تاثیر آن سیستم دارای توزیع حالت پایدار است، درنظر گرفته شده‌است و سپس با استفاده از شبیه‌سازی گسسته پیشامد در نرم‌افزار ARENA® مدل‌سازی گرافیکی انجام شده‌است. سپس با بررسی دقیق مدل براساس خصوصیاتی که از سیستم جمع‌آوری شده‌است نسبت به تحلیل و بررسی آن اقدام شده‌است. در تحقیق موردنظر، سیستم تولید به‌صورت یک زنجیره مارکوف زمان گسسته از نوع M/G/1 مدل شده‌است. در این مدل، M به تعداد محدودیت‌های ورودی (محدودیت‌های ورودی)، G به توزیع عمومی خدمت‌دهی و ۱ به تعداد تجهیزات خدمت‌دهنده اشاره دارد.

برای ایجاد وضعیت پایدار در سیستم، شرایط لازم و کافی باید برقرار باشند. این شرایط ممکن است شامل تعادل بین ورودی و خروجی، عدم افزایش بی‌پایان صف و عدم افزایش بی‌پایان زمان انتظار مشتریان باشد. ورود و خروج به ایستگاه‌های کاری و نرخ ورود و سرویس‌دهی ایستگاه‌ها براساس نیازهای سیستم و تعداد محصولات و خدمات موردنیاز تعیین می‌شود. صف در سیستم زمانی ایجاد می‌شود که تعداد محصولات یا مشتریان ورودی به سیستم بیشتر از ظرفیت خدمت‌دهی سیستم باشد. این موضوع می‌تواند به‌دلیل نرخ ورود بالا، نرخ خروج پایین یا تعداد محصولات متوقف‌شده در سیستم باشد.

۴-۱) تشریح سیستم

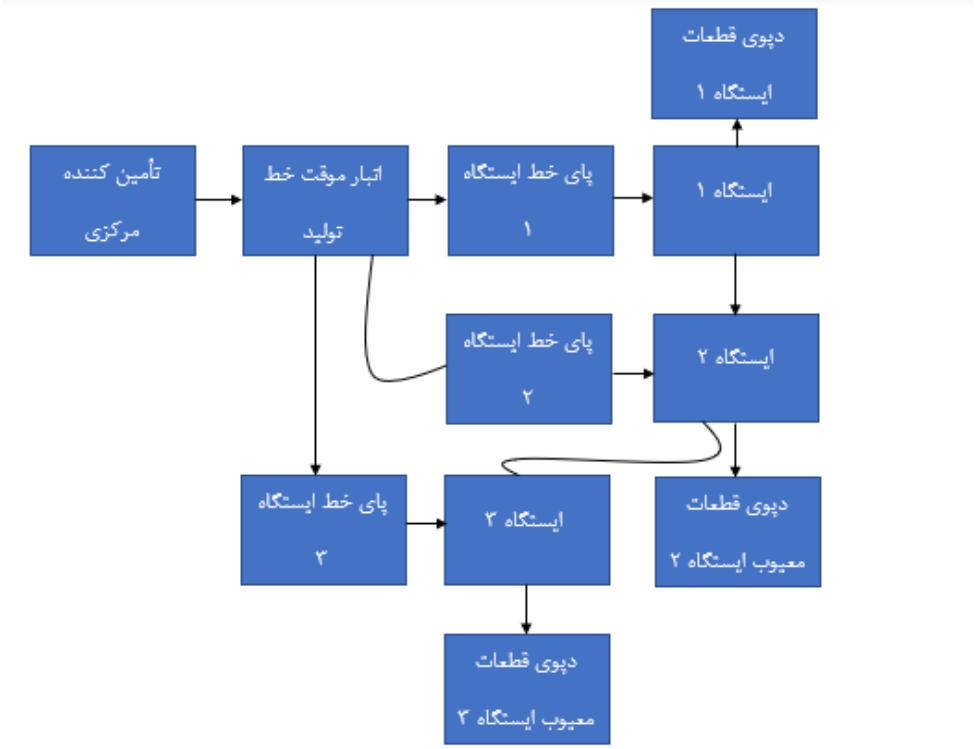
طرح شماتیک مفهوم سیستم تولید که در این تحقیق موردبحث قرار گرفته‌است، در شکل (۲) نشان داده شده‌است. از بالادست به پایین‌دست، مراحل از مرحله ۱ تا مرحله m شماره‌گذاری می‌شوند و در هر مرحله از دو نوع فعالیت خروج محصول و سفارش تولید استفاده می‌شود. زمان تحویل قطعات، تعداد فعالیت‌های سفارش‌دهنده تولید و تعداد خروج محصولات در مرحله i به‌ترتیب L_i،M_i و N_i نشان داده شده‌است. فرض شده که ظرفیت برابر یک است. فرمول زمان گسسته بصورتیکه مشخص شده، درنظر گرفته می‌شود. چرخه برداشت ثابت، به‌عنوان یک دوره تنظیم می‌شود و دوره n به‌عنوان فاصله زمانی از n تا بلافاصله قبل از زمان $n + 1$ تنظیم می‌شود. برای هر تقاضای مشتری که در دوره n وارد می‌شود، درصورت موجودی محصولات، یک واحد محصول در ابتدای دوره $n + 1$ عرضه می‌شود. درصورت عدم موجودی محصولات، تقاضای مشتری عقب‌افتاده محسوب می‌شود (یعنی یک تقاضای عقب‌افتاده به‌وجود می‌آید). محصولات جداشده مربوط به قطعات مصرف‌شده در مرحله اول در دوره n اجازه می‌دهد تا قطعات یک تامین‌کننده خارجی در مرحله اول $n + L_1 + 1$ به مرحله ۱ تحویل داده شود. برای $i \geq 2$، مقدار قطعات مصرف‌شده در مرحله i در دوره n به مرحله i از مرحله $(i-1)$ در آغاز دوره $n + L_i + 1$ یا بعد از آن بسته به حالت بالادست در آغاز دوره nتحویل داده می‌شود. فرض بر این است که ظرفیت‌های تولید و تقاضای مشتری در هر دوره متغیرهای تصادفی مستقل هستند. همچنین کل تقاضاهای معوقه و تعداد کانبان‌های سفارش‌شده در مرحله سفارش تولید، برای هر ماه محاسبه می‌شوند.



نمودار ۲. فلوچارت مفهومی سیستم

بطورکلی براساس شکل (۲) قطعات تامین‌شده از تامین‌کننده مرکزی، تامین می‌شود. کل قطعات درخواستی را به سالن تولید مخازن مصنوعات سنگین براساس سفارش‌گذاری انجام‌شده در هر شیفت کاری، به انبار موقت سالن تولید ارسال می‌کنند. در این بخش، با استفاده از لیفتراک، قطعات به پای خطوط تولید ۱، ۲ و ۳ ارسال می‌شوند. توجه شود که ارسال و جابجایی قطعات از انبار موقت به ایستگاه‌های سه‌گانه تولید، بطور مکرر در هر شیفت کاری از طریق لیفتراک انجام می‌شود. به این صورت که لیفتراک‌ها از طریق رفت‌وآمد و مشاهده وضعیت موجودی پای خط تولید، قطعات را از انبار موقت هر ایستگاه کاری (اول، دوم و سوم) به پای خط تولید انتقال می‌دهند. نحوه سفارش‌گذاری در انتهای هر شیفت

کاری، کارشناسان اقدام به سرشماری میزان موجودی قطعات در پای خط و در انبار موقت می‌کنند که براساس تفاضل بین موجودی و نیاز در هر شیفت، اقدام به سفارش‌گذاری می‌کنند. سفارشات براساس نوع قطعات انجام می‌گیرد. بطور کلی، هدف در این مسئله، شناسایی نقاط گلوگاهی است که باعث بروز ایجاد هرچه بیشتر محصول نیمه‌ساخته می‌شود و خروجی خط در آن نقطه از فرآیند تولید، به شدت کاهش می‌یابد. در شکل (۳)، جزئیات انتقال هر موجودیت در مدل شبیه‌سازی، نشان داده شده‌است.



نمودار ۳. جزئیات جابجایی موجودیت‌ها در سیستم درنظر گرفته‌شده

۴-۲) مفروضات مدل‌سازی

برای طراحی مدل سیستم مذکور، مفروضات اشاره‌شده در ذیل درنظر گرفته شده‌است.

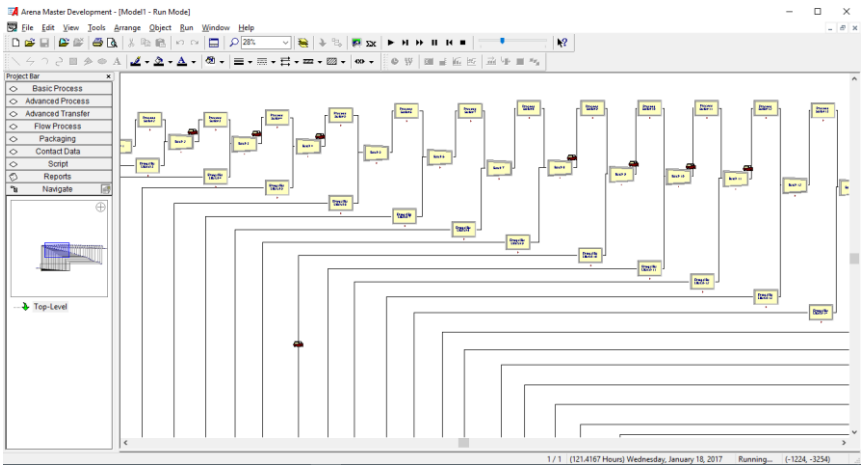
- در انتهای هر شیفت کاری اقدام به سرشماری اقلام موجودی در پای خط و در انبار موقت سالن تولید می‌شود.
- سه شیفت کاری ۲۴۰ تایی، ۲۴۰ تاییو ۲۲۰ تایی از محصول وجود دارد.
- در شیفت ۲۴۰ تایی هر ۱۲۰ ثانیه یک محصول تولید می‌شود.
- نحوه فرآیند سفارش‌گذاری به‌صورتی است که در هر شیفت کاری سفارش‌گذاری انجام می‌شود و سفارش‌های انجام‌شده، درحقیقت برای تامین نیاز شیفت کاری بعدی تحویل داده می‌شود.
- کل قطعات معرفی‌شده برای تولید محصول شامل ۳۰ قطعه است.

- احتمال معیوب‌بودن قطعات در هر ایستگاه، از توزیع احتمالی [0.01, 0.1] است.

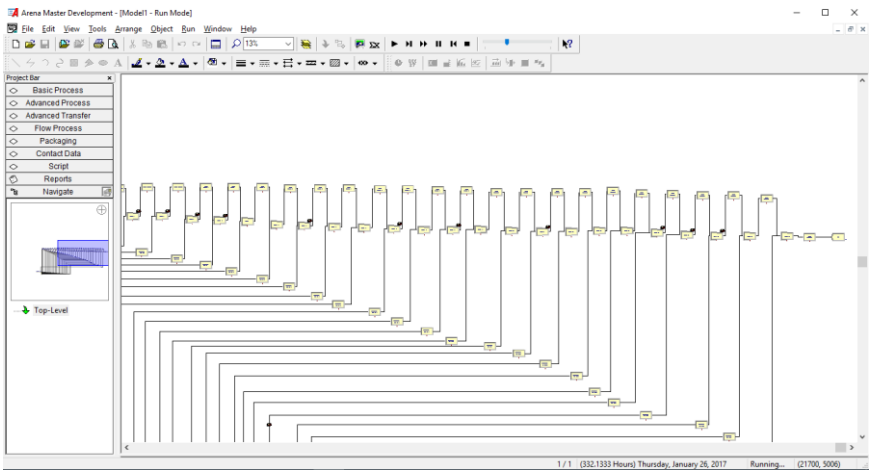
۴-۳) ساخت مدل شبیه‌سازی

در این بخش مستندات لازم درخصوص توسعه مدل شبیه‌سازی سیستم تولیدی چندمرحله مخازن مصنوعات سنگین نشان داده شده‌است. در شکل (۴) و (۵) محیط نرم‌افزاری مربوط به توسعه مدل در نرم‌افزار ARENA نشان داده شده‌است. این مدل براساس تنظیماتی که مربوط به حالت پایداری آن است و در زیر مشخص شده‌است، به اجرا درآمده‌است.

- Warm-up period: 4 hour
- Number of replication: 10 times
- Replication Length: 30 days
- Hours per day: 24



نمودار ٤-الف. محیط نرم‌افزاری مدل

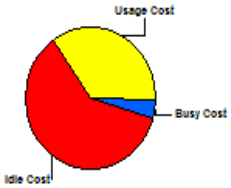
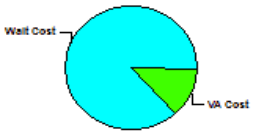


نمودار ٤-ب. محیط نرم‌افزاری مدل

۴-۴) تحلیل نتایج اولیه مدل شبیه‌سازی

براساس تنظیمات مربوطه، مدل شبیه‌سازی گسسته پیشامد در نرم‌افزار ARENA به اجرا درآمده‌است. خروجی کلی این سیستم برابر با ۱۹۰ و میانگین هزینه کل برابر با ۱۳۴۶۱۶ می‌باشد. علاوه بر آن، در جدول (۲) نتایج کلی به ازای تمامی منابع و تمامی موجودیت‌ها گزارش شده‌است.

جدول ۲- گزارش نتایج کلی برای تمام منابع و موجودیت‌ها

عامل	شاخص	مقدار	نمودار گرافیکی
منابع	میانگین هزینه مشغول‌بودن منابع	۱۵۹۷	
	میانگین هزینه بیکاری منابع	۲۱۴۴۳	
	میانگین هزینه بکار بردن منابع	۱۲۴۶۰	
	میانگین هزینه کل	۳۵۴۹۹	
موجودیت‌ها	میانگین هزینه ارزش افزوده	۱۴۸۵۶	
	میانگین هزینه انتظار قطعات	۹۸۳۱۷	
	کل هزینه	۱۱۳۱۷۳	

در ادامه با بررسی دقیق‌تر به تفکیک مدت زمان کل و زمان انتظار هر موجودیت در سیستم می‌پردازیم. در جدول (۳) ریز جزئیات مربوط به بررسی منابع موثر نشان داده شده‌است. در میان تمامی منابع، نقاله و لیفتراک موثرترین عواملی هستند که بر روی هزینه و تولید تاثیر می‌گذارند.

جدول ۳- جزئیات مربوط به تحلیل مدل شبیه‌سازی‌شده

منبع	زمان انتظار	زمان کل	هزینه منابع استفاده‌شده	هزینه بیکار بودن	هزینه مشغول‌بودن
انتقال با نقاله	۴۹.۲۶۰	۵۰.۰۴۳	۸۷۵	۳۴.۶۴۶	۶۸۴.۶۳۰
انتقال با لیفتراک	۲۵۶.۵۲۰	۲۷۶.۶۷۰	۵۸۰۱	۰.۷۸۳	۷۱۹.۲۱۰

۴-۵) طرح بهبود فرآیند

برای این منظور ابتدا باید هدفی برای ایجاد بهبود درنظر بگیریم. یک هدف ممکن است براساس سازوکار یک سیستم و عناصر درونی آن تعریف گردد. در این تحقیق برای سیستم مذکور درنظر داریم در راستای افزایش بهره‌وری، مقدار تولید را افزایش دهیم و نیز هزینه‌های کل را کاهش دهیم. این کار را می‌خواهیم از طریق بررسی منابعی که بیشترین تاثیر را بر روی تولیدات و هزینه کل دارند، انجام دهیم. برای این کار لازم است سناریوهایی در قالب آزمایش انجام شود تا با برآورد مدل ریاضی و بهینه‌سازی آن، مقدار بهینه متغیرها محاسبه شود و سپس با اعمال مقدار بهینه منابع، مقدار تولید و مقدار هزینه را شبیه‌سازی نماییم. پرواضح است با برآورد هزینه کل مربوط به انتقال با نقاله و لیفتراک که به‌ترتیب برابر با ۵۱.۲۲۷ واحد پولی و ۱۴.۶۷۵ واحد پولی شبیه‌سازی شده‌است، تابع هزینه کل برای این هدف به‌صورت $\sum_{i=1}^{2} c_i x_i = c_1 x_1 + c_2 x_2 =$ $51.227x_1 + 14.675x_2$ نوشته خواهد شد. اما آنچه که برای ما مبهم است و نسبت به برآورد آن لازم است اقدام نماییم،

تابع هدف اول به‌عنوان ماکزیم‌سازی مقدار تولیدات است که در ادامه به برآورد آن خواهیم پرداخت. برای این منظور ابتدا لازم است یک طرح آزمایش از طریق متغیرهای اثرگذار شناسایی نماییم.

۴-۵-۱) طراحی آزمایش

با استفاده از طراحی آزمایش‌ها، نسبت به طراحی سناریو اقدام می‌نماییم. برای انجام این کار، ابتدا لازم است ضمن معرفی متغیرهای اثرگذار، برای متغیرهای درنظر گرفته‌شده، محدوده‌ای درنظر بگیریم. محدوده‌های درنظر گرفته‌شده برای متغیرها عبارتنداز:

x_1: تعداد منابع نقاله با کمترین مقدار ۱ و بیشترین مقدار ۳،

x_2: تعداد منابع لیفتراک با کمترین مقدار ۱ و بیشترین مقدار ۲،

با استفاده از طرح آزمایش 2^K که در آن k تعداد متغیرها (تعداد منابع) است ۴ سناریو به شرح زیر که در جدول (۴) نشان داده شده‌است، طراحی می گردد.

جدول ٤- طراحی سناریوها

شماره سناریو	x_1	x_2	میزان تولید
سناریو ۱	۳	۱	۱۹۰
سناریو ۲	۳	۲	۳۸۹
سناریو ۳	۱	۱	۱۹۰
سناریو ٤	۱	۲	۳۸۸

با توجه به جدول (۳) براساس سناریو اول، درصورتیکه تعداد نقاله برابر ۳ و تعداد لیفتراک برابر ۱ اختیار شود، تعداد کل تولید برابر با ۱۹۰ محاسبه می‌شود. بدین ترتیب با اجرای سناریوهای دوم، سوم و چهارم میزان تولیدات به‌ترتیب برابر است با ۳۸۹، ۱۹۰ و ۳۸۸. براساس نتایج به‌دست‌آمده برای سطح پاسخ تعداد کل تولیدات، مشاهده می‌شود که تحت سناریو اول و سوم یعنی با درنظرگرفتن نقاله به تعداد ۳ و لیفتراک به تعداد ۱ و همچنین تعداد نقاله ۱ و لیفتراک هم ۱، میزان تعداد تولید کمترین مقدار در میان سناریوهای درنظر گرفته‌شده، به‌دست می‌آید که در مقایسه با وضعیت موجود که برابر با ۱۹۰ است تغییر ایجاد نمی‌شود. این سناریو درحقیقت بیان می کند: علی‌رغم اینکه بهبودی حاصل نمی کند اما باعث بدترشدن وضعیت هم نمی‌شود. بنابراین فقط سیستم را در وضعیت موجود خود نگه می‌دارد. لذا به همین دلیل که باعث بدترشدن در میزان تولیدات نمی‌شود، از آن به‌عنوان سناریو بهبود استفاده می‌نماییم. اما در سناریو دوم و چهارم در وضعیت سیستم، بهبود مشاهده می‌شود زیرا میزان تولیدات نسبت به وضعیت موجود بیشتر شده‌است. بنابراین با تشکیل سطح پاسخ ایجادشده نسبت به برآورد مدل ریاضی اقدام می‌نماییم. منظور از برآورد مدل، محاسبه ضرایب یک مدل به‌صورت $y = \beta + \beta_1 \sum_{i=1}^{2} x_i + \beta_2 \sum_{i>j} x_i x_j$ که در آن β به‌عنوان ضریب ثابت، β_1 ضریب متغیرهای اصلی و β_2 ضریب اثر متقابل بین متغیرهاست. محاسبه ضرایب با استفاده از تکنیک‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار *Design expert 13* قابل محاسبه خواهد بود.

در جدول (۵) تحلیل آماری مربوط به شناسایی متغیرهای اثرگذار در مدل نشان داده شده‌است. با توجه به اینکه، مقدار آماره R^2 برابر با ۹۷.۸ درصد برای مدل برآورد شده‌است و از لحاظ آماری درصورتیکه مقدار آماره از ۰.۷ بیشتر باشد مدل معنی‌دار است، پس مدل رگرسیون غیرخطی با دو اثر متقابل برای سطح پاسخ درنظر گرفته‌شده، از دقت مطلوبی برخوردار است. علاوه بر این، با توجه به جدول (۳)، مقدار آماره p برای تمامی جملات مدل معنی‌دار است. زیرا مقدار این آماره برای تمامی جملات مدل کمتر از ۰.۰۵ گزارش شده‌است. درصورتیکه اگر مقدار آماره p بیشتر از ۰.۰۵ به‌دست می‌آمد، اثر آن جمله از مدل حذف می‌گردید.

جدول ۵- تحلیل آماری

منبع	مجموع مجذورات	درجه آزادی	میانگین مجذورات	ضریب برآورد شده	مقدار p	وضعیت
مقدار ثابت	۳۹۴۰۲.۷۵	۳	۱۳۱۳۴.۲۵	-۷.۵	۰.۰۴	قابل قبول
x_1	۰.۲۵	۱	۰.۲۵	-۰.۵	۰.۰۳	قابل قبول
x_2	۳۹۴۰۲.۲۵	۱	۳۹۴۰۲.۲۵	۱۹۷.۵	۰.۰۱	قابل قبول
x_1x_2	۰.۲۵	۱	۰.۲۵	۰.۵	۰.۰۵	قابل قبول

بنابراین با توجه به معنی‌داربودن تمامی اثرات، مدل برآوردشده به‌صورت رابطه (۱) برآورد می‌شود.

$$y = -7.5 - 0.5x_1 + 197.5x_2 + 0.5x_1x_2 \quad (۱)$$

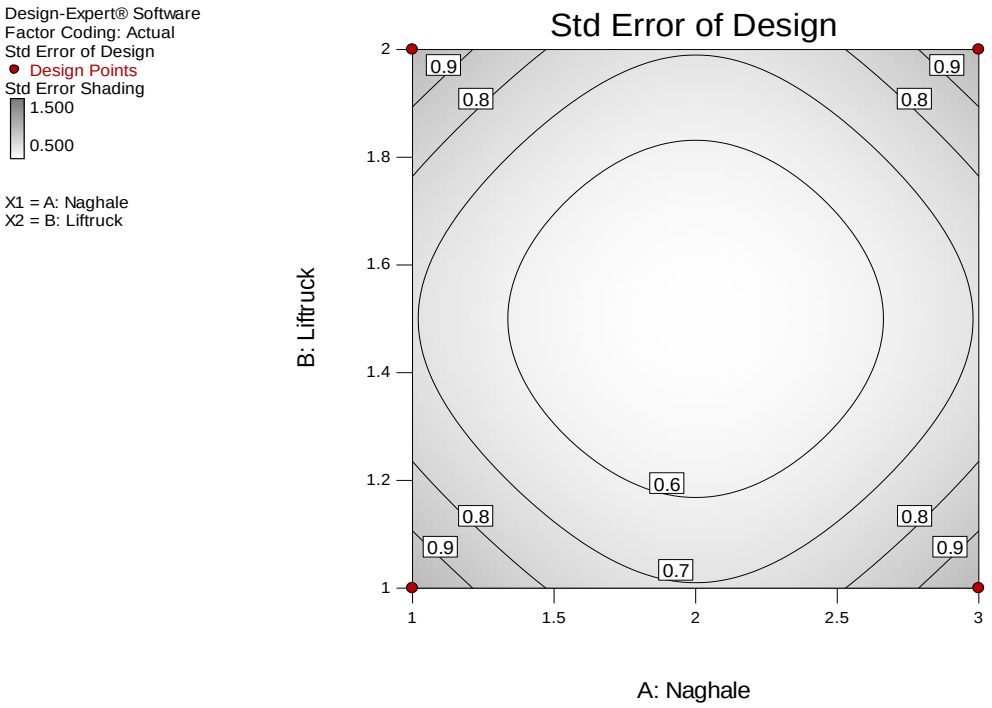
به‌منظور بررسی کفایت مدل پیشنهاد شده، آماره‌های VIF، Power و Leverage مورد بررسی قرار گرفته‌است. در جدول (۶)، مقدار هریک از این آماره‌ها نشان داده شده‌است. مقدار ایده‌آل برای VIF برابر با یک است که در مدل پیشنهادشده به ازای تمامی جملات اصلی ۰.۹۸ محاسبه شده‌است. همچنین تابع توان برابر با ۰.۸۷ محاسبه شده‌است که بطور تجربی توان بالاتر از ۰.۸ قابل قبول است. سرانجام مقدار Leverage بایستی کمتر از ۰.۱ محاسبه شود که در تمامی جملات مقدار قابل قبول محاسبه شده‌است. R^2 پیش بینی شده در مدل پیشنهادی مثبت گزارش شده‌است و برابر ۰.۹۱ محاسبه شده‌است. بنابراین مدل از درجات بالاتر برای توجیه سطح پاسخ نیاز ندارد چون تنها درصورتیکه این آماره منفی به‌دست بیاید، مدل از درجات بالاتر لازم است بررسی شود.

جدول ٦- تحلیل آماری

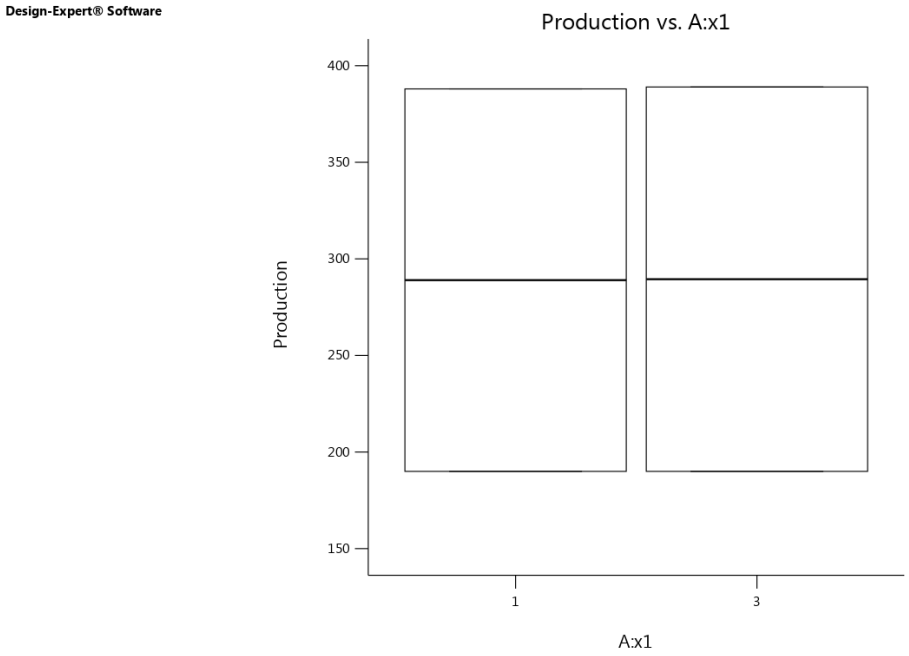
منبع	VIF	Power	Leverage	وضعیت
مقدار ثابت	۰.۹۸	۰.۸۷	۰.۲۵	قابل قبول
x_1	۰.۹۸	۰.۸۷	۰.۲۵	قابل قبول
x_2	۰.۹۸	۰.۸۷	۰.۲۵	قابل قبول
x_1x_2	۰.۹۸	۰.۸۷	۰.۲۵	قابل قبول

بنابراین با لحاظ‌کردن محدودیت‌های سیستمی درنظر گرفته‌شده با تشکیل مسئله برنامه‌ریزی ریاضی با حل مسئله تشکیل‌شده، می‌توان مقدار بهینه متغیرها را به‌گونه‌ای تعیین کرد که میزان تولیدات را ماکزیمم کرد و هزینه را کاهش داد.

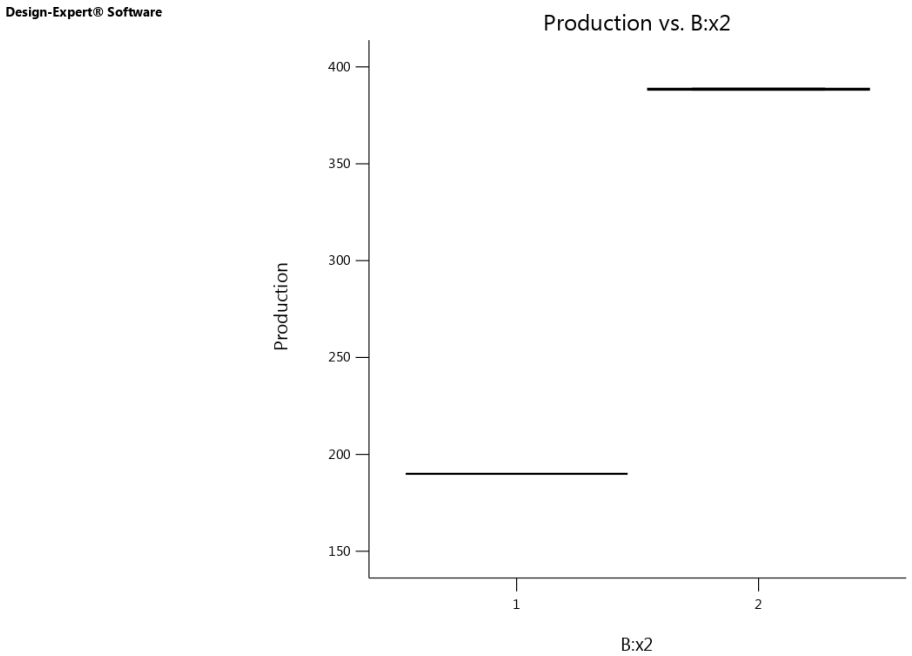
در شکل (۵)، نمودار کانتور مربوط به انحراف‌معیار میزان تولیدات نشان داده شده‌است. براساس نمودار رسم‌شده، هرچه مقدار نقاله و لیفتراک در حد وسط بازه درنظر گرفته‌شده قرار بگیرند، مقدار انحراف‌استاندارد کمتر می‌شود. همچنین در شکل‌های (۶) و (۷)، نمودار جعبه‌ای مربوط به ازای هر سطح از هر فاکتور و مقدار تولید آنها ارائه شده‌است. با توجه به شکل (۶)، درصورتیکه فاکتور نقاله در سطح کم و زیاد خود قرار بگیرد، میزان تولید تغییر نخواهد کرد. پس درصورتیکه فاکتور نقاله در سطح بالا انتخاب شود، هزینه‌کرد اضافی بر روی سیستم تولیدی اعمال خواهد کرد زیرا تغییری در سطح تولید ایجاد نخواهد کرد. پس در طرح بهبود، پیشنهاد می‌شود که فاکتور نقاله در سطح پایین قرار بگیرد. علاوه بر این، در شکل (۷) ارتباط فاکتور لیفتراک و سطح پاسخ ارائه شده‌است. درصورتیکه فاکتور لیفتراک در سطح پایین قرار بگیرد، سطح تولید کاهش می یابد اما اگر در سطح بالا قرار بگیرد، سطح تولید افزایش می‌یابد. در شکل (۸)، نموار سه‌بعدی سطح نشان داده شده‌است. طبق نمودار سطح سه‌بعدی، درصورتیکه در کران بالا یا پایین آن قرار بگیرد، مقدار انحراف‌استاندارد از لحاظ آماری افزایش پیدا می کند.



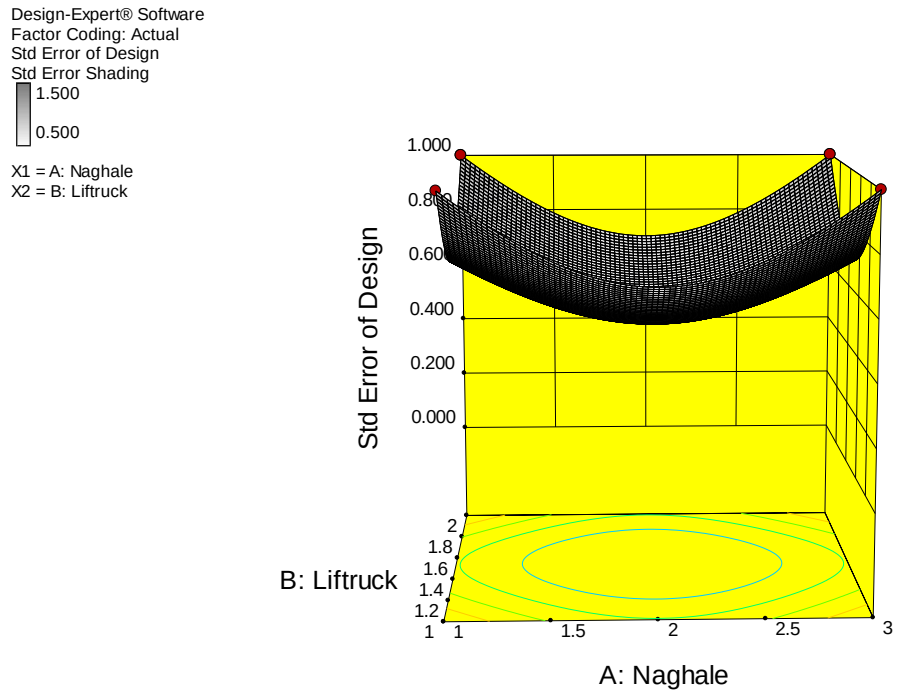
شکل ۵- نمودار کانتور خطای استاندارد طرح بین دو فاکتور نقاله و لیفتراک



شکل ٦- نمودار جعبه‌ای طرح بین فاکتور نقاله و سطح پاسخ



شکل ۷- نمودار جعبه‌ای طرح بین فاکتور لیفتراک و سطح پاسخ



شکل ۸- نمودار سه‌بعدی سطح پاسخ

اهمیت تشکیل مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی برای حل این نوع برنامه‌ریزی در اینجا مشخص می‌شود تا علاوه بر تعیین مقدار بهینه متغیرها، بطور دقیق مشخص نماییم که متغیرها چه مقداری به خود می‌گیرند.

۲-۵-۴) مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه

با استفاده از تابع هدف برآوردشده برای حداکثرسازی مقدار تولیدات و تابع هدف درنظر گرفته‌شده مربوط به هزینه کل، مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی، عدد صحیح چندهدفه به‌صورت مجموعه معادلات ۲ فرمول‌نویسی شده‌است.

(۲)

$$\min z = 51.227x_1 + 14.675x_2$$
$$\max y = -7.5 - 0.5x_1 + 197.5x_2 + 0.5x_1x_2$$
$$S.t$$
$$1 \le x_1 \le 3,$$
$$1 \le x_2 \le 2,$$
$$x_i \ge 0, \quad i = 1,2,$$
$$x_i \in integer, \quad i = 1,2,$$

در مجموعه معادلات ۲، تابع هدف z و y به‌ترتیب تابع هزینه کل و تولید کل در مجموعه خط تولید مخازن میعانات طبیعی است. محدودیت اول و دوم به‌عنوان محدودیت سیستمی تضمین می‌کنند که مقدار بهینه متغیرها از محدوده‌های تعریف‌شده تجاوز نکند. محدودیت سوم تضمین می‌کند که متغیرها همواره مقدار نامنفی بگیرند و همچنین محدودیت چهارم تضمین

می‌کند که مقدار بهینه متغیرها همواره صحیح باشد. برای تبدیل مسئله چندهدفه فوق، به یک مسئله تک‌هدفه از روش تابع هدف مجموع وزن‌دارشده استفاده می‌شود. براساس این روش، توابع باید هر دو از یک جنس باشند. برای این منظور جهت تبدیل به یکدیگر لازم است در یک علامت منفی ضرب شوند. سپس وزنی که براساس نظر خبرگان، برای توابع هدف جمع‌آوری شده‌است را در هریک از توابع ضرب و سپس دو تابع را با یکدیگر جمع می‌نماییم. وزن اختصاص‌یافته برای تابع هدف اول برابر با $w_1 = 0.4$ و وزن مربوط به تابع هدف دوم برابر با $w_2 = 0.6$ درنظر گرفته شده‌است. مسئله تبدیل‌یافته به یک مسئله تک‌هدفه در مجموعه معادلات ۳ نشان داده شده‌است.

(۳)

$$\min z = 0.4 \times (51.227x_1 + 14.675x_2) + 0.6 \times (7.5 + 0.5x_1 - 197.5x_2 - 0.5x_1x_2)$$
$$S.t$$
$$1 \le x_1 \le 3,$$
$$1 \le x_2 \le 2,$$
$$x_i \ge 0, \quad i = 1,2,$$
$$x_i \in integer, \quad i = 1,2,$$

مسئله غیرخطی عدد صحیح نشان داده‌شده در مجموعه معادلات ۳، با استفاده از نرم‌افزار Lingo حل گردید. جواب بهینه محلی مسئله غیرخطی بعد از ۲۵ تکرار طبق جدول (۷) به‌دست آمد.

جدول ۷- مقدار بهینه متغیرها

متغیر	مقدار بهینه	جواب بهینه
x_1	۱	-۲۰۰.۵۶۹
x_2	۲	

براساس مقادیر بهینه به‌دست‌آمده، با قراردادن این مقادیر در توابع هدف هریک، میزان تولیدات و مقدار هزینه در وضعیت بهینه قابل محاسبه است. در جدول (۸) مقایسه بین وضعیت مطلوب بهینه و جاری نشان داده شده‌است.

جدول ۸- مقایسه وضعیت جاری و بهینه

وضعیت	مقدار متغیر		مقدار هزینه	مقدار تولید
	x_1	x_2		
بهینه	۱	۲	۸۰.۵۷۷	۳۸۸
جاری	۱	۱	۶۵.۹۰۲	۱۹۰

با توجه به جدول (۵)، با اضافه‌شدن یک مقدار در تعداد لیفتراک‌ها، علی‌رغم اینکه مقدار هزینه‌ها از ۶۵.۹۰۲ واحد پولی به ۸۰.۵۷۷ افزایش می‌یابد و معادل ۲۲ درصد افزایش در مقدار هزینه‌هاست اما در مقابل باعث دوبرابرشدن میزان تولیدات نسبت به وضعیت موجود است. این رقم به‌دست‌آمده در میزان تولیدات، با توجه به اینکه از ابتدا هدف افزایش تولید به‌منظور افزایش بهره‌وری بود و در تعیین وزن نیز وزن بزرگتری به هدف مربوط به میزان تولیدات اعمال شده‌است لذا می‌توان افزایش ۲۲ درصدی در میزان هزینه‌ها را نادیده گرفت.

۴-۶) تحلیل حساسیت

در این بخش با تغییر بر روی پارامترهای مدل، تاثیر تغییرات آنها را بر روی مقدار بهینه توابع هدف مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای این منظور، ابتدا ضرایب وزنی (اهمیت) توابع هدف را تغییر می‌دهیم. مطابق با جدول (۹)، مقادیر مختلفی را برای اوزان w_1 و w_2 درنظر می‌گیریم. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، درحالتیکه وزن اختصاص‌یافته برای تابع هدف اول برابر با $w_1 = 0.4$ و وزن مربوط به تابع هدف دوم برابر با $w_2 = 0.6$ درنظر گرفته شود، کمترین مقدار تابع مجموع وزن‌دارشده محاسبه می‌شود. علاوه بر این، درصورتیکه اهمیت دو تابع با یکدیگر یکسان و برابر با ۰.۵ درنظر گرفته شود بیشترین مقدار مجموع وزن‌دارشده به‌دست می‌آید.

جدول ۹- اثر تغییرات اهمیت توابع هدف بر مقدار مجموع وزن‌دارشده

ردیف	w_1	w_2	مقدار تابع هدف
۱	۰.۱	۰.۹	-۱۵۹.۹۶۰
۲	۰.۲	۰.۸	-۱۷۹.۶۹۱
۳	۰.۳	۰.۷	-۱۶۰.۱٤۱
٤	۰.٤	۰.٦	**-۲۰۰.٥٦۹**
٥	۰.٥	۰.٥	-۱۰۸.٥۷۰
٦	۰.٦	۰.٤	-۱۲۸.۱٥۲
۷	۰۷	۰.۳	-۱۳٤.۹٥٤
۸	۰.۸	۰.۲	-۱٤۸.۳٦۹
۹	۰.۹	۰.۱	-۱٦۱.۲٤۷

علاوه بر تغییر فوق، در مقدار فاکتورهای کلیدی یعنی تعداد نقاله و لیفتراک نیز تغییراتی به وجود آمده‌است و تاثیر آن تغییرات بر روی مقدار تابع هدف و میزان تولیدات بررسی شده‌است. با توجه به نتایج حاصل‌شده، درصورتیکه مقدار متغیرها نسبت به وضعیت موجود افزایش نماید، ضمن افزایش در مقدار هزینه‌ها، مقدار تولید افزایش پیدا می‌کند اما مقدار تولید در مقایسه با وضعیت بهینه که برابر با ۳۸۸ به‌دست آمده‌است، تغییر محسوسی نموده و برابر با **۳۹۹** محاسبه شده‌است. بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که افزایش در مقدار متغیرها با توجه به افزایش در مقدار هزینه و تغییر محسوس در میزان تولید به صلاح نیست. درصورتیکه اگر مقدار متغیرها کاهش یابد، علی‌رغم اینکه هزینه‌ها کاهش می‌یابد اما افت بسیار شدیدی در مقدار تولید حاصل می‌شود.

جدول ۱۰- تغییرات بر روی مقدار فاکتورها

وضعیت	مقدار فاکتور		مقدار هزینه	مقدار تولید
	نقاله	لیفتراک		
جاری	۱	۱	۶۵.۹۰۲	۱۹۰
افزایش‌یافته	۳	۳	۱۲۵.۶۵۸	۳۹۹
کاهش‌یافته	۱	۰	۳۲.۴۵۲	۸۰

وضعیت	مقدار فاکتور		مقدار هزینه	مقدار تولید
	نقاله	لیفتراک		
	۰	۱	۳۱.۲۵۹	۷۵

۵) نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش یک مدل از طریق شبیه‌سازی کامپیوتری به‌منظور بررسی وضعیت خط تولید مصنوعات سنگین در شرکت پتروشیمی پارس توسعه داده شده‌است. این مدل قادر است میزان تولیدات در زیر سیستم موردنظر را با توجه به متغیرهای اثرگذار در فرآیند تخمین بزند. در این پژوهش نشان داده شده‌است که چگونه یک تحلیل‌گر می‌تواند به سادگی با استفاده از روش بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی، مسئله موجود در یک سیستم پیچیده را حل نماید. با استفاده از متغیرهای اثرگذار در فرآیند، طراحی آزمایشات و همچنین تکنیک‌های آماری، یک مدل به‌عنوان تابع هدف مسئله تقریب زده شده‌است. این مدل قادر است به‌خوبی هدف موردنظر را پوشش دهد. فرآیند بهینه‌سازی به‌منظور تعیین نقطه نزدیک بهینه[5] منابع با درنظرگرفتن محدودیت سیستمی و سایر محدودیت‌ها در مجموعه معادلات (۳) بعد از تبدیل مسئله چندهدفه به یک مسئله تک‌هدفه با استفاده از روش مجموع وزن‌دارشده، به اجرا درآمد. از طریق حل مسئله ایجادشده ترکیب شدنی متغیرهای اصلی پیدا شده‌است که عبارتنداز: تعداد نقاله برابر با ۱ عدد و تعداد لیفتراک برابر با ۲ عدد. با توجه به نتایج حاصل‌شده و مقایسه با وضعیت موجود، با اضافه‌شدن یک مقدار در تعداد لیفتراک‌ها، علی‌رغم اینکه مقدار هزینه‌ها از ۶۵.۹۰۲ واحد پولی به ۸۰.۵۷۷ افزایش می‌یابد، معادل ۲۲ درصد افزایش در مقدار هزینه‌هاست اما در مقابل باعث دوبرابرشدن میزان تولیدات نسبت به وضعیت موجود می‌گردد. این رقم به‌دست‌آمده، در میزان تولیدات با توجه به اینکه از ابتدا هدف افزایش تولید به‌منظور افزایش بهره‌وری بیشتر حائز اهمیت است، در تعیین وزن نیز وزن بزرگتری به هدف مربوط به میزان تولیدات اعمال شده‌است لذا می‌توان افزایش ۲۲ درصدی در میزان هزینه‌ها را نادیده گرفت. بنابراین می‌توان بیان کرد با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده، درصدد افزایش بهره‌وری قدم برخواهیم داشت. باتوجه به کلیه نتایج حاصل‌شده، استفاده از شبیه‌سازی در توالی تولید محصولات مختلف به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که زمان توقف خط کاهش یابد و بهره‌وری افزایش یابد. شناسایی و تحلیل نقاط ضعف موجود در خط تولید می‌تواند به شناسایی نواحی نیازمند بهبود کمک کند و به بهینه‌سازی فرآیندها منجر شود. در این راستا، مدل‌سازی سناریوهای مختلف با ایجاد مدل‌های شبیه‌سازی می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر در مورد بهینه‌ترین روش‌های تولید کمک کند. استفاده از شبیه‌سازی برای تحلیل دقیق هزینه‌های تولید و شناسایی مناطق صرفه‌جویی می‌تواند به کاهش هزینه‌های کلی کمک کند. طراحی استراتژی‌های مبتنی بر داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها در فرآیند تولید نیز می‌تواند مفید واقع شود. پیشنهادات آتی این تحقیق به‌صورت زیر بیان می‌شود:

- استفاده از روش ارائه‌شده برای حل مسائل پیچیده دیگر دنیای واقعی برای تجزیه‌وتحلیل رفتار سیستم، به‌منظور تعیین ترکیب بهینه منابع در حوزه‌های خدماتی و یا صنعتی بکار گرفت.

[5] Near Optimum

- بکارگیری سایر مدل‌ها نظیر کرایگینگ، توابع شعاع مدار و به‌خصوص شبه‌مدل‌های شبکه عصبی به‌منظور مقایسه عملکرد آنها با یکدیگر می‌تواند مدنظر قرار گیرد.
- بکارگیری سایر روش‌های طرح آزمایشی جهت نمونه‌گیری برای سیستم موردنظر مانند تاگوچی، LHS، بخصوص ترتیبی و D-Optimal که کمتر موردتوجه تحلیل‌گران قرار گرفته‌است و مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج به‌دست‌آمده در این طرح می‌تواند مدنظر قرار گیرد.
- برای بهینه‌سازی سیستم بجای استفاده از بهینه‌سازی دقیق، از ابزای‌های فراابتکاری نظیر OptQuest موجود در نرم‌افزار Arena، ژنتیک، تبرید و یا Fast – PGA و غیره استفاده شود.
- درنظرگرفتن یک تابع چندهدفه برای این پژوهش بطوریکه قادر باشد هزینه کل را نیز همزمان کمینه نماید.

منابع

Abolghasemian, M., & Darabi, H. (2018). Simulation based optimization of haulage system of an open-pit mine: Meta modeling approach. *Organizational resources management researchs*, *8*(2), 1-17. http://dorl.net/dor/20.1001.1.22286977.1397.8.2.2.6

Abolghasemian, M., Ghane Kanafi, A., & Daneshmandmehr, M. (2020). A two-phase simulation-based optimization of hauling system in open-pit mine. *Iranian journal of management studies*, *13*(4), 705-732. https://doi.org/10.22059/ijms.2020.294809.673898

Abolghasemian, M., Kanafi, A. G., & Daneshmand-Mehr, M. (2022). Simulation-based multiobjective optimization of open-pit mine haulage system: a modified-NBI method and Meta modeling approach. *Complexity*, *2022*. https://doi.org/10.1155/2022/3540736

Afolalu, S. A., Ikumapayi, O. M., Abdulkareem, A., Emetere, M. E., & Adejumo, O. (2021). A short review on queuing theory as a deterministic tool in sustainable telecommunication system. Materials Today: Proceedings, 44, 2884-2888. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.092

Ahmed, M. A., Al – Khamis, T. M. (2009). Simulation Optimization for an Emergency Department Healthcare Unit in Kuwait, European Journal of Operational Research, 198, 936-942. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.10.025

Ala, A., Yazdani, M., Ahmadi, M., Poorianasab, A., & Attari, M. Y. N. (2023). An efficient healthcare chain design for resolving the patient scheduling problem: queuing theory and MILP-ASA optimization approach. Annals of Operations Research, 328(1), 3-33. https://doi.org/10.1007/s10479-023-05287-5

Azizi, S., Shakibi, H., Shokri, A., Chitsaz, A., & Yari, M. (2024). Multi-aspect analysis and RSM-based optimization of a novel dual-source electricity and cooling cogeneration system. *Applied Energy*, *332*, 120487. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120487

Barati, I., Ahari, R. M., & Asadpour, M. (2022). A queuing network and Markov chain approach for balancing assembly line: a case study. International Journal of Advanced Operations Management, 14(1), 56-73. https://doi.org/10.1504/IJAOM.2022.122699

Boulas, K. S., Dounias, G. D., & Papadopoulos, C. T. (2023). A hybrid evolutionary algorithm approach for estimating the throughput of short reliable approximately balanced production lines. Journal of Intelligent Manufacturing, 1-30. https://doi.org/10.1007/s10845-021-01828-6

Damci, A. (2022). Revisiting the concept of natural rhythm of production in line of balance scheduling. International Journal of Construction Management, 22(12), 2335-2344. https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1786764

Dengiz, B. (2009). Redesign of PCB Production Line with Simulation and Taguchi Design. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2197 – 2204. https://doi.org/10.1109/WSC.2009.5429646

Dengiz, B., & Akbay, K. S. (2000). Computer Simulation of a PCB Production Line: Meta – Modeling Approach. International Journal Production Economy. 63, 195 – 205. https://doi.org/10.1016/S0925-5273(99)00013-4

Dengiz, B., Bektas, T., Ultanir, A. E. (2006). Simulation Optimization Based DSS Application: A Diamond Tool Production Line in Industry, Simulation Model Practice Theory, 14(3), 296 – 312. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2005.07.001

Dengiz, B., İç, Y. T., & Belgin, O. (2016). A meta-model based simulation optimization using hybrid simulation-analytical modeling to increase the productivity in automotive industry. *Mathematics and Computers in Simulation*, *120*, 120-128. https://doi.org/10.1016/j.matcom.2015.07.005

Hurrion, R. (1997). An Example of Simulation Optimisation Using a Neural Network Metamodels: Finding the optimum number of Kanbans in a Manufacturing System, Journal of the Operational Research Society, 48(11), 1105 – 1112. https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600468

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. https://doi.org/10.1504/IJISE.2023.128399

Kleijnen, J. P. C., & Sargent, R. G. (2000). A Methodology for Fitting and Validating Metamodels in Simulation. European Journal of Operatioanal Research, 120, 14 – 29. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00392-0

Liu, Y., Shen, W., Zhang, C., & Sun, X. (2023). Agent-based simulation and optimization of hybrid flow shop considering multi-skilled workers and fatigue factors. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *80*, 102478. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102478

Mas, L., Vilaplana, J., Mateo, J., & Solsona, F. (2022). A queuing theory model for fog computing. The Journal of Supercomputing, 78(8), 11138-11155. https://doi.org/10.1007/s11227-022-04328-3

Meckesheimer, M., Barton, R. R., Simpson, T. W., & Booker, A. J. (2001, September). Computationally inexpensive metamodel assessment strategies. In *International design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference* (Vol. 80227, pp. 191-201). American Society of Mechanical Engineers. https://doi.org/10.1115/DETC2001/DAC-21028

Piermarini, C., & Roma, M. (2024). A Simulation--Based Optimization approach for analyzing the ambulance diversion phenomenon in an Emergency-Department network. *arXiv preprint arXiv:2309.00643*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.00643

Samouylov, K., Gaidamaka, Y., & Zaripova, E. (2016, September). Analysis of business process execution time with queueing theory models. In International Conference on Information Technologies and Mathematical Modelling (pp. 315-326). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44615-8_28

Urban, T. L., & Chiang, W. C. (2016). Designing energy-efficient serial production lines: The unpaced synchronous line-balancing problem. European Journal of Operational Research, 248(3), 789-801. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.015

Yalçınkaya, Ö., & Bayhan, G. M. (2009). Modelling and optimization of average travel time for a metro line by simulation and response surface methodology, European journal of operational research, 196(1), 225-233. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.03.010

Yang, Q., & Liu, W. (2022). Production line balance optimization design of S company. Manufacturing and Service Operations Management, 3(1), 57-71. https://dx.doi.org/10.23977/msom.2022.030109

Zeinali F., Mahootchi M., Sepehri M M. (2015). Resource Planning in the Emergency Department: A Simulation – Based Meta Modeling Approach, Simulation Modeling Practice and Theory, 53(2), 123-148. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.02.002