



"Research Article"



10.71737/jpm.2025.3093598

Enhancing Sustainable Manufacturing in Industry 4.0: A Zero-Defect Approach Leveraging Effective Dynamic Quality Factors

Ahmad Ebrahimi¹, Roohollah Khahpour², Seyed Mohammad Seyed Hoseyni³

(Received:2024.09.19 - Accepted:2025.01.05)

Abstract

his paper presents a stepwise approach to achieving zero-defect production. In addition to eliminating waste in manufacturing resources, it also evaluates the impact of these improvements on sustainability. The proposed method is grounded in a literature review on zero-defect manufacturing (ZDM), examining the effective dynamic factors that influence product quality during production. It integrates ZDM strategies with Industry 4.0 technologies, including the Internet of Things (IoT) and machine learning, to enhance manufacturing efficiency and precision. It goes beyond the conventional approaches including process oriented, product oriented, and emerging human oriented ZDM, and identifies the effective dynamic factors on product quality. It then, implements predict-prevent strategies to anticipate the timing of defect occurrence during production and prevents its occurrence accordingly. This research identifies, explains, and measures criteria for environmental, social, and economic pillars of sustainability affected by defects. The proposed approach is implemented in a real life industrial case, where, the outcomes prove its remarkable applicability and capability in avoiding defective products, increasing productivity of production resources, and improving the sustainability of manufacturing processes.

Key Words: zero defect manufacturing, sustainability, machine learning, quality improvement

-
1. Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
 2. Assistant Professor, Department of Industrial Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
 - *. Corresponding Author: ahmad.ebrahimi@srbiau.ac.ir
 3. Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran

Introduction

Achieving sustainability in manufacturing requires an extended view on its' environmental, economic, and social pillars, coined as triple bottom line (TBL) (Elkington, 1998). One of the important factors that affects TBL sustainability in manufacturing firms is defect (Goyal, Agrawal, & Saha, 2019), where the issues such as scrap generation (Lindström et al., 2019), costs of consumption/waste of resources (Grobler-Dębska, Kucharska, & Baranowski, 2022), and customer satisfaction level (Mourtzis, Angelopoulos, & Panopoulos, 2021) are examples of sustainability criteria which are affected by defects. Hence, quality management is employed to reduce defects using quality improvement (QI) methods for achieving sustainability in manufacturing companies. Psarommatis, Sousa, Mendonça, and Kiritsis (2022) define zero-defect manufacturing (ZDM) as "a holistic approach for ensuring both process and product quality by reducing defects through corrective, preventive, and predictive techniques, using mainly data-driven technologies and guaranteeing that no defective products leave the production site and reach the customer, aiming at higher manufacturing sustainability". ZDM employs four strategies consisting of detect, predict, repair, and prevent. When a defect is detected, it can be repaired (detect-repair). Moreover, the gathered data from defect detection can be used in two ways: to prevent defect occurrence in the future (detect-prevent) and to design algorithms for predicting when a defect may occur in the future, hence, to prevent defects before they arise (predict-prevent). The current work aims to present the development of ZDM by focusing on dynamic factors affecting product quality in order to improve sustainability in manufacturing processes in the era of industry 4.0.

Utilizing ZDM philosophy along with technological advances in cyber physical systems (CPS) such as IoT, big data, and advanced data analytics creates remarkable challenges and opportunities to develop new methodologies in continuous improvement of process efficiency and product quality (Leitão, Barbosa, Geraldés, & Coelho, 2018). Martínez, Al-Hussein, and Ahmad (2022) propose a framework integrating cyber physical production system (CPPS) and ZDM for quality prediction and

operation control where the CPPS is used to facilitate data management and to extend data analysis towards ZDM goals. Leitão et al. (2018) apply multi-agent system (MAS) infrastructure, which combines with data analysis, provides early and real time detection of deviations, prevents defects occurrence and their propagation to downstream processes, and finally enables the system to be predictive by early detection of defects and to be proactive through self-adaptation with different situations.

Magnanini, Colledani, and Caputo (2020) propose applying the manufacturing execution system (MES) for real time data gathering and data analysis to be exploited in ZDM strategies. In the era of industry 4.0, one of the applicable and developing tools to achieve ZDM is digital twin (DT) that incorporates the IoT, big data, artificial intelligence (AI) and ML (Psarommatis & May, 2022). Mourtzis et al. (2021) focus on ZDM by equipment design optimization and propose an approach relying on the integration of DT for simulation of new design based on historical data gathered from already installed similar machines and production environment.

Overall, the outcomes of this paper's literature review reveal that:

- a) Developing an approach to identify and analyze the effective root causes of product quality that enhances the insights and efficiency of ZDM to achieve zero defect products is still an overlooked area.
- b) The ZDM literature lacks papers that demonstrate the ZDM impacts on all three pillars of sustainability, that is, environmental, economic, and social.

Methodology

This research presents a method to assess the sustainability of manufacturing processes throughout the value stream. The approach is grounded in effective dynamic factors of product quality and ZDM strategies. The methodology follows these steps:

Step 1: Analysing effective dynamic factors of product quality

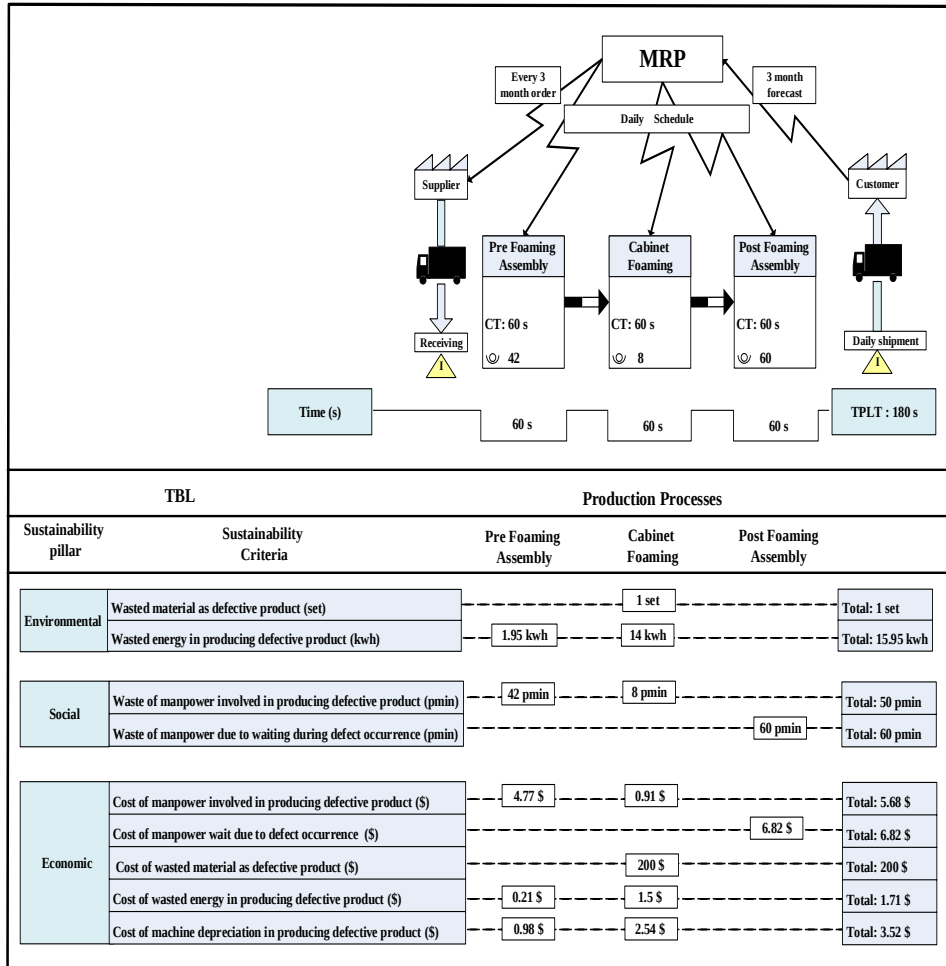
Step2: Evaluating Triple Bottom Line (TBL) criteria

Step 3: Measuring current sustainability state

Step 4: Implementing ZDM strategies

Step 5: Measuring improvements in sustainability

Results



Effects of Single Unit Defective Product on TBL Sustainability State in Value Stream

Summary of current sustainability state

Product model	Daily schedule (set)	Defective product rate (%)	Number of defective products (set)	Environmental sustainability State	Social sustainability state	Economic sustainability state
Refrigerator	480 set	3%	15	Wasted material: 15 set Wasted energy: 239.25 kwh	Waste of manpower: 1650 pmin	Wasted costs: 3265.65 \$

Future TBL sustainability state

Product model	Daily schedule (set)	Defective product rate (%)	Number of defective products (set)	Environmental sustainability state	Social sustainability state	Economic sustainability state
Refrigerator	480 set	0.2%	1	Wasted material: 1 set Wasted energy: 15.95 kwh	Waste of manpower: 110 pmin	Wasted costs: 217.71 \$

Discussion and conclusion

Implementing the proposed approach aimed at achieving zero-defect products and enhancing TBL sustainability as its ultimate goal has provided valuable insights for practitioners and tangible improvements in the case study of this research. In this section, the proposed approach is discussed in light of existing approaches and the relevant challenges. Finally, the conclusion and directions for future research are presented. Several papers have focused on the ZDM approach to demonstrate its capability to achieve zero defect product. However, the applied approaches are mainly product-oriented and process-oriented which concentrate on machine health to ensure product quality. Regarding the other effective parameters of product quality, focusing on machine health is not enough to guarantee the quality of the output product. Hence, the proposed method in this research builds upon the conventional ZDM approaches since it provides an extended view on the effective root

causes that influence product quality. It further explains how these factors can affect the product quality.

Going through the papers that consider sustainability aspects in ZDM reveals that the ZDM literature lacks papers that address the ZDM impacts on all three pillars of sustainability, that is, environmental, economic, and social. To fill this gap, this paper identifies an extended range of TBL criteria that are affected by defects and improved through ZDM implementation, which presents a quantitative assessment of TBL criteria relevant to the case study. The recommended method is implemented in a real-life manufacturing case study in this paper. The results prove the practicality of the method. The case study reports remarkable improvement in reducing defect occurrence as well as enhancing TBL sustainability state. The empirical insights, drawn from the real-life case study of this research, indicate the challenges and complexities that arise in the path of achieving zero defect product and sustainability improvement. The extended view on effective root causes of product quality and the focus on improving TBL sustainability criteria in this research as well as its analytical approach offer practitioners valuable insights for improving their ZDM approaches in a more comprehensive way. Future research could explore the application of this method across additional levels of supply chain management.

Conflict of interest: none



10.71737/jpm.2025.3093598



(مقاله پژوهشی)

توسعه رویکرد تولید بدون عیب با تمرکز بر عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول جهت بهبود پایداری در فرآیندهای تولید در عصر انقلاب صنعتی چهارم

روح اله خاک پور^۱، احمد ابراهیمی^{۲*}، سیدمحمد سیدحسینی^۳
(دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹ - پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶)

چکیده

این تحقیق روشی گام به گام جهت دستیابی به محصولات بدون عیب ارائه می دهد و ضمن حذف اتلافات منابع تولید، تأثیرات آن را بر پایداری فرآیندهای تولید ارزیابی می نماید. روش پیشنهادی مبتنی بر مرور ادبیات در حوزه تولید بدون عیب^۴ (ZDM)، بررسی عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول در حین تولید و استفاده از استراتژی های ZDM همراه با به کار گیری تکنولوژی های انقلاب صنعتی چهارم شامل اینترنت اشیاء و یادگیری ماشین می باشد. این تحقیق از رویکردهای مرسوم فرآیند (ماشین) محور، محصول محور و رویکرد نوظهور انسان محور در حوزه ZDM فراتر می رود و عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول در حین تولید را شناسایی می کند. در ادامه با پیاده سازی استراتژی های پیش بینی - پیشگیری، زمان وقوع عیب را در حین تولید پیش بینی نموده و نسبت به پیشگیری از وقوع عیب اقدام می نماید. این تحقیق معیارهای پایداری زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی را که متأثر از عیب می باشند شناسایی، تشریح و اندازه گیری می نماید. رویکرد پیشنهادی در این تحقیق در یک مطالعه موردی واقعی در صنعت پیاده سازی شده که نتایج حاصله، اجرایی بودن و توانمندی قابل توجه روش پیشنهادی را جهت جلوگیری از محصولات معیوب، افزایش بهره وری منابع تولید و بهبود پایداری فرآیندهای تولید نشان می دهد.

واژه های کلیدی: تولید بدون عیب، پایداری، یادگیری ماشین، بهبود کیفیت

۱. دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران rouhollah.khakpour@srbiau.ac.ir

۲. استادیار گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*. نویسنده مسؤول: ahmad.ebrahimi@srbiau.ac.ir

۳. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران seyedhosseini@iust.ac.ir

4. Zero defect manufacturing

مقدمه

دستیابی به پایداری در تولید، نیازمند نگاه گسترده‌ای به ستونهای زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی می‌باشد که تحت عنوان TBL شناخته می‌شود (الکینگتون،^۱ ۱۹۹۸). بنا به تعریف دپارتمان تجاری آمریکا^۲ (۲۰۱۰) تولید پایدار^۳ عبارتست از خلق محصولات ساخته شده که از فرآیندهایی استفاده می‌کنند که آن فرآیندها تأثیرات محیطی منفی را به حداقل می‌رسانند، انرژی و منابع طبیعی را ذخیره می‌کنند، برای کارکنان و افراد جامعه ایمن هستند و همچنین به لحاظ اقتصادی نیز به صرفه هستند. در این راستا، ابزارهای نقشه برداری فرآیند مانند نقشه برداری جریان ارزش^۴ (VSM) (رادر و شوک،^۵ ۲۰۰۳) به عنوان یکی از ابزارهای شناخته شده تولید ناب، در بسیاری از تحقیقات جهت تجزیه و تحلیل وضعیت پایداری فرآیند های تولید مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از نتایج منفی حائز اهمیت انحرافات فرآیند که بر پایداری TBL در سازمانهای تولیدی اثر می‌گذارد، عیب (نقص) است (گویال^۶ و همکاران، ۲۰۱۹) و موضوعاتی مانند تولید ضایعات (لیندستروم^۷ و همکاران، ۲۰۱۹)، هزینه های مصرف و اتلاف منابع (دبسکا^۸ و همکاران، ۲۰۲۲) و سطح رضایت‌مندی مشتریان (مورتزیز^۹ و همکاران، ۲۰۲۱) مثالهایی از معیارهای پایداری هستند که تحت تأثیر عیب می‌باشند. بنابراین، جهت کاهش عیوب، مدیریت کیفیت به کار گرفته می‌شود که در آن از روشهای بهبود کیفیت برای افزایش بهره‌وری منابع تولید و دستیابی به پایداری در شرکتهای تولیدی استفاده می‌گردد. با وجود روشهای بهبود کیفیت نظیر شش سیگما، تولید ناب، ناب شش سیگما و تئوری محدودیت ها، تولید بدون عیب^{۱۰} (ZDM) به عنوان روشی سودمند ظهور کرده که هدفش "انجام درست کارها در بار اول" (هالپین،^{۱۱} ۱۹۶۶) می‌باشد. بنا به تعریف ساروماتیس^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۲)، "تولید بدون عیب (ZDM) رویکردی همه جانبه جهت تضمین کیفیت فرآیند و محصول می‌باشد که با کاهش عیب از طریق تکنیکهای اصلاحی، پیشگیرانه و پیش بینانه، با استفاده از تکنولوژی های

-
1. Elkington
 2. US department of commerce
 3. Sustainable manufacturing
 4. Value stream mapping
 5. Rother & Shook
 6. Goyal, et al
 7. Lindström, et al
 8. Debska, et al
 9. Mourtzis, et al
 10. Zero defect manufacturing
 11. Halpin
 12. Psarommatitis, et al

داده محور محقق می‌گردد و تضمین می‌نماید که هیچ محصول معیوبی از سطح سالن تولید خارج نشده و بدست مشتری نمی‌رسد. هدف نهایی این رویکرد ارتقای سطح پایداری فرآیندهای تولید و سازمان تولیدی می‌باشد^۱.

ZDM از چهار استراتژی تشکیل شده است که عبارتند از: تشخیص^۱، پیش بینی^۲، تعمیر^۳ و پیشگیری^۴. این چهار استراتژی به دو گروه تقسیم می‌گردند که عبارتند از: استراتژی های تحریک^۵ و استراتژی های اقدام^۶ (ساروماتیس^۷ و همکاران، ۲۰۲۰). استراتژی های ZDM می‌باید همواره به صورت جفت به کار گرفته شوند یعنی یک استراتژی تحریک و یک استراتژی اقدام. با این عمل، استراتژی های ZDM به صورت تشخیص-تعمیر، تشخیص-پیشگیری و پیش بینی-پیشگیری شکل می‌گیرند (ساروماتیس^۸ و همکاران، ۲۰۲۲). تشخیص-تعمیر، رویکردی اصلاحی است در زمانی که یک عیب ایجاد می‌گردد و نیاز به اصلاح می‌باشد. تشخیص-پیشگیری، رویکردی پیشگیرانه است که در آن از داده های تولید جهت جلوگیری از عیوب در آینده استفاده می‌شود. پیش بینی-پیشگیری، یک مفهوم نسبتاً جدیدی است که متکی به رویکردهای داده محور پیشرفته است جهت پیش بینی اینکه چه زمانی در آینده یک ایراد ایجاد خواهد شد، بنابراین پیشگیری گردد قبل از اینکه رخ دهد.

در طول سالهای اخیر، پیاده سازی ZDM در صنایع مختلفی مانند خودرو سازی (لیندستروم^۹ و همکاران، ۲۰۱۹)، مونتاژ اسکلت فلزی (مارتینز^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۲)، پوشش رنگ پودری (دبسکا^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۲)، نیمه هادی (ساروماتیس^{۱۲} و کیریتسیس، ۲۰۲۲)، ماشین آلات آزمایشگاهی (مورتزیس^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۱) گزارش شده است و رویکردهای مختلفی جهت گسترش مفهوم ZDM و پیاده سازی آن در سازمانهای تولیدی صورت گرفته است.

-
1. Detect
 2. Predict
 3. Repair
 4. Prevent
 5. Triggering strategies
 6. Action strategies
 7. Psarommatis, et al
 8. Psarommatis, et al
 9. Lindström, et al
 10. Martinez, et al
 11. Debska, et al
 12. Psarommatis & Kiritsis
 13. Mourtzis, et al

استفاده از فلسفه ZDM همراه با تکنولوژی‌های پیشرفته در سیستم‌های سایبر فیزیکی^۱ (CPS) مانند اینترنت اشیا^۲ (IoT)، کلان داده^۳ و تحلیل داده پیشرفته، چالش‌ها و فرصت‌های قابل توجهی جهت توسعه متدولوژی‌های جدید در زمینه بهبود مستمر بهره‌وری فرآیند و کیفیت محصول ایجاد می‌نمایند (لیتائو^۴ و همکاران، ۲۰۱۸). مارتینز^۵ و همکاران (۲۰۲۲) چارچوبی با یکپارچگی سیستم تولیدی سایبر فیزیکی^۶ (CPPS) و ZDM پیشنهاد می‌نمایند که در آن از CPPS جهت تسهیل مدیریت داده و گسترش تحلیل داده در جهت اهداف ZDM استفاده می‌گردد. این چارچوب پیشنهادی با هدف پیش‌بینی کیفیت و کنترل عملیات در ساخت اسکلت فلزی ارائه می‌گردد و مبتنی بر IoT، یادگیری ماشین^۷ (ML) و تکنولوژی‌های شبیه‌سازی است. لیتائو و همکاران (۲۰۱۸) اصول اصلی CPS چند عامله را با هدف به‌کاربری ZDM در سیستم‌های تولیدی چند عامله معرفی می‌نمایند. لذا، معماری سیستم چند عاملی^۸ (MAS) از طریق آنالیز نقش‌ها و کارکردهای هر عامل، روشی که این عامل‌ها در طول دولاویه توزیع شده‌اند، نقش‌های آنالیز داده‌ها در هر لایه، و نهایتاً روشی که کل سیستم از اثر متقابل بین عامل‌های مفرد ظهور می‌کند، معرفی می‌گردد. در اینجا دو مثال از الگوهای اثر متقابل در راستای پیاده‌سازی استراتژی‌های ZDM نمایش داده می‌شود، یکی اثر متقابل بین عوامل قرار گرفته در سطح لبه^۹ برای تشخیص زود هنگام عیوب و دیگری اثر متقابل بین عوامل واقع شده در سطوح لبه و ابری^{۱۰} برای تولید دانش. زیر ساخت MAS با تجزیه و تحلیل داده‌ها ترکیب شده، شناسایی زود هنگام و در زمان واقعی انحرافات را فراهم می‌آورد که باعث پیشگیری از وقوع عیوب در یک مرحله و انتشار آن به فرآیندهای پایین دست می‌شود که نهایتاً کل سیستم را قادر می‌سازد تا با تشخیص زود هنگام عیوب پیش‌بینانه باشد و با تطابق خودش با شرایط مختلف فعالانه عمل کند. مگنانینی و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۰) استفاده از ماژول نرم افزاری مرکزی سیستم‌های اجرایی تولید^{۱۲} (MES) را جهت کاربری استراتژی‌های

-
1. Cyber-physical systems
 2. Internet of things
 3. Big data
 4. Leitão, et al
 5. Martinez, et al
 6. Cyber-physical production system
 7. Machine learning
 8. Multi-agent system
 9. Edge level
 8. Edge and cloud levels
 9. Magnanini, et al
 10. Manufacturing execution systems

ZDM با هدف دستیابی به کیفیت تولید بهبود یافته در سطح صنعت پیشنهاد می‌دهند. استراتژی های ZDM مبتنی بر جمع آوری داده های کیفی و تولیدی از منابع مختلف و یکپارچگی آنها با اطلاعات سطوح مختلف کارخانه می‌باشد. با استفاده از MES داده های زمان واقعی که از طریق شبکه‌ای از چندین سنسور و منبع جمع آوری شده ، تجزیه و تحلیل می‌گردد و جهت ساخت مدل‌های سطح سیستم و سطح فرآیند باهدف طراحی استراتژی های ZDM استفاده می‌گردد .

مرور ادبیاتی که توسط ساروماتیس و می^۱ (۲۰۲۲) در خصوص دوقلوهای دیجیتال^۲ (DTs) انجام شده بیانگر این است که با پیشرفت تکنولوژی های انقلاب صنعتی چهارم در کارخانجات هوشمند، یکی از رویکردهای در حال رشد سریع و کاربردی در بحث ZDM استفاده از DT است که با IoT ، کلان داده، هوش مصنوعی^۳ (AI) و ML ترکیب شده است و می‌تواند در بهبود کیفیت محصول نهایی در محیط تولید نقش داشته باشد. مورتزیس^۴ و همکاران (۲۰۲۱) در طول فاز طراحی خطوط تولیدی جدید چارچوبی را جهت در نظر گرفتن نیازهای مشتریان، طراحی و توسعه می‌دهند. رویکرد پیشنهادی متکی بر یکپارچگی DT برای شبیه سازی یک طراحی جدید بر مبنای داده های تاریخی جمع آوری شده از ماشین های مشابه که قبلاً نصب شده و محیط کاری تولید است. بنا به عقیده آنها، با توجه به اینکه شرکتهای تولیدی مدرن در تلاش جهت گذر به مدل‌های کسب و کار تولید پایدار و هوشمند می‌باشند، به ZDM گرایش پیدا می‌کنند زیرا در این گرایش به ZDM منافی نظیر کاهش هزینه، کاهش مصرف انرژی، کاهش اتلافات مواد، افزایش سرعت تحویل دهی، مانیتورینگ بهتر وضعیت تولید، توانایی برنامه ریزی با دقت بالاتر و افزایش کیفیت خروجی وجود دارد. بنا به تعریف ساروماتیس^۵ و همکاران (۲۰۲۲) و مجید^۶ و همکاران (۲۰۲۱) هدف نهایی از به کارگیری ZDM ، ارتقای سطح پایداری در فرآیندهای تولید و سازمانهای تولیدی می‌باشد. با این حال، مرور ادبیات ZDM بیانگر این است که در بسیاری از تحقیقات، به تعدادی از معیارهای پایداری در قالب چارچوب مفهومی و یا در بخش مرور ادبیات اشاره شده است. در این میان، مقالات محدودی به ارزیابی کمی تعدادی از معیارهای پایداری در قالب یک یا دو ستون پایداری TBL پرداخته‌اند به گونه‌ای که عمدتاً بر معیارهای اقتصادی متمرکز بوده‌اند. در این راستا، میزان توجه مقالات ZDM به مباحث پایداری در قالب جدول ۱ نشان داده شده است که در آن معیارهای شناسایی شده پایداری TBL و نوع تمرکز مقالات بر مفاهیم پایداری مشخص گردیده است.

-
1. Psarommatis & May
 2. Digital twins
 3. Artificial intelligence
 4. Mourtzis, et al
 5. Psarommatis, et al
 6. Majeed, et al

جدول ۱: خلاصه مرور ادبیات در خصوص ارزیابی کمی پایداری TBL در مقالات ZDM
 Table 1: Summary of literature review on quantitative assessment of TBL sustainability in ZDM articles

نویسنده	TBL			مطالعه موردی
	جنبه زیست محیطی	جنبه اقتصادی	جنبه اجتماعی	
ساروماتیس (۲۰۲۱)	ممنوعه در محیط محصول	هزینه مواد اولیه، هزینه عملیاتی، هزینه محصول نهایی، هزینه بازرسی، هزینه تعمیرات، هزینه تشخیص- پیشگیری، هزینه پیش بینی- پیشگیری، هزینه برنامه ریزی مجدد، زمان عملیات، زمان تعمیرات، زمان بازرسی، زمان برنامه ریزی مجدد، میزان تأخیر در اتمام سفارش، افت کیفی، هزینه تأخیرات، هزینه نیروی انسانی، هزینه قطعات یدکی	هزینه مواد اولیه، هزینه عملیاتی، هزینه تأخیرات، هزینه واحد محصول، هزینه ضایعات، هزینه تعمیرات، هزینه بازرسی، زمان پردازش، زمان تأخیرات	(صنعت نیمه هادی)
ساروماتیس و کیریتسیس (۲۰۲۲)		زمان طراحی و بهینه سازی طراحی ماشین	زمان طراحی و بهینه سازی طراحی ماشین	(صنعت نیمه هادی)
مورتزس و همکاران (۲۰۲۱)		هزینه عملیات روی هر ماشین، زمان پردازش در ماشین	هزینه تعمیرات، هزینه تأخیرات، زمان تعمیرات	(ماشین آلات آزمایشگاهی)
ساروماتیس و همکاران (۲۰۲۰)		هزینه تعمیرات، هزینه تأخیرات، زمان تعمیرات	هزینه تعمیرات، هزینه تأخیرات، زمان تعمیرات	(صنعت نیمه هادی)
ساروماتیس و همکاران (۲۰۲۱)				(صنعت فلزات سخت)

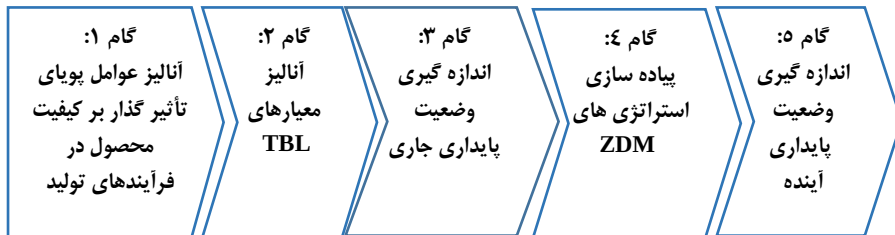
باتوجه به مرور ادبیات انجام شده در حوزه ZDM موارد زیر به عنوان شکاف تحقیقاتی شناسایی می‌گردد:

- علی‌رغم تحقیقات موجود و پیشرفت در به‌کارگیری از تکنولوژی‌های داده‌محور (مارتینز و همکاران، ۲۰۲۲؛ لیتائو و همکاران، ۲۰۱۸؛ مگنانینی و همکاران، ۲۰۲۰) در پیش‌بینی عیوب قبل از وقوع، ارائه رویکرد جامعی از ZDM که بتواند عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول در حین تولید را در نظر بگیرد همچنان مغفول مانده است.
- با توجه به محدود بودن تعداد مقالات ZDM متمرکز بر ارزیابی کمی پایداری در فرآیندهای تولید (ساروماتیس، ۲۰۲۱؛ ساروماتیس و کیریتسیس، ۲۰۲۲؛ مورتزس و

همکاران، ۲۰۲۱) که بندرت فراتر از ارزیابی اقتصادی می‌روند، ارائه رویکردی که بتواند تأثیرات پیاده‌سازی ZDM بر هر سه ستون زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی را ارزیابی نماید، مغفول مانده و به آن پرداخته نشده است. لذا در این تحقیق سعی گردیده با در نظر گرفتن عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول در حین تولید، رویکرد جدیدی جهت پیاده‌سازی ZDM در نظر گرفته شود و با به‌کارگیری تکنولوژی‌های انقلاب صنعتی چهارم شامل IoT و ML، تأثیرات این رویکرد در ارتقای سطح پایداری در فرآیندهای تولید اندازه‌گیری گردد.

ابزار و روش

این تحقیق روشی جهت ارزیابی وضعیت پایداری فرآیندهای تولید در جریان ارزش پیشنهاد می‌نماید که مبتنی بر عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول و استراتژی‌های ZDM می‌باشد. جهت تشریح روش پیشنهادی در این تحقیق، جزئیات آنالیز و گامهای بهبود به طور کامل توضیح داده می‌شوند. همچنین گامهای این روش در شکل ۱ خلاصه شده است.



شکل ۱: گامهای اصلی روش پیشنهادی این تحقیق

Figure 1: Main steps of the proposed method in this study

گام ۱: آنالیز عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول در فرآیندهای تولید

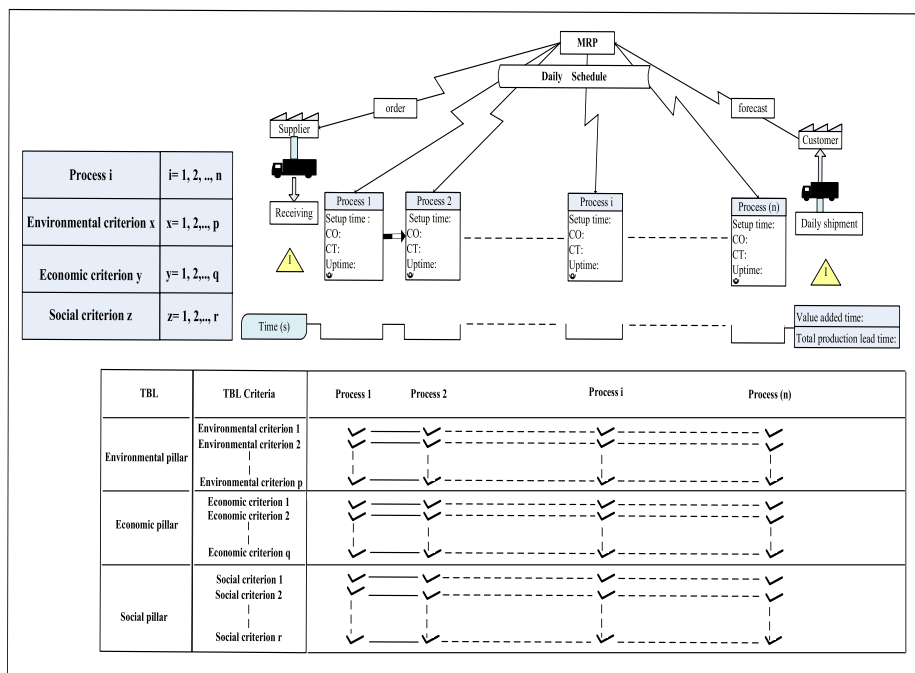
انجام آنالیز دقیق عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول در فرآیندهای تولید به محققان کمک می‌نماید تا بتوانند مؤثرترین اقدامات را جهت جلوگیری از وقوع عیب بیابند.

گام ۲: آنالیز معیارهای TBL

با توجه به مطالعه موردی، باید مشخص گردد کدام یک از معیارهای TBL برای آن کاربردی است، چراکه هر مطالعه موردی ممکن است بعضی از آن معیارها را در بر گیرد.

گام ۳: اندازه‌گیری وضعیت پایداری جاری

در این مرحله، معیارهای TBL تعیین شده که تحت تأثیر وقوع عیب هستند روی خط زمانی جریان ارزش در فرآیندهای تولید اندازه‌گیری می‌شوند (همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است). بسته به سیستم تولیدی، یک محصول معیوب در یک فرآیند تولید می‌تواند بر ارزیابی پایداری TBL در کل فرآیندهای تولید یک شرکت تأثیر بگذارد. با توجه به آن، اندازه‌گیری نیاز به آنالیز مناسبی دارد و نباید با عجله و سهل‌گیرانه انجام شود.



شکل ۲: اندازه‌گیری پایداری TBL در جریان ارزش

Figure 2: Measuring TBL sustainability in the value stream

گام ۴: پیاده‌سازی استراتژی های ZDM

با توجه به آنالیز عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول و تأثیرات محصولات معیوب بر وضعیت پایداری TBL و توانایی استفاده از تکنولوژی های داده محور مانند الگوریتمهای ML برای پیش‌بینی زمان وقوع عیب با استفاده از داده های آنلاین گزارش شده از سنسورهای IoT، جفت استراتژی‌های پیش‌بینی-پیشگیری جهت دستیابی به محصول بدون عیب به کارگیری می شوند. به عنوان مثال، جهت پیش‌بینی عمر مفید باقی مانده^۱ (RUL) (تراینی^۲ و همکاران، ۲۰۲۱) یک فرآیند ماشین محور، مانیتور کردن وضعیت (ژانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۶) پارامترهای ماشین در فرآیند تولید یک فاکتور حیاتی است و معمولاً از طریق سنسورهای IoT انجام می‌شود و RUL از طریق یک الگوریتم ML مناسب مانند مدل‌های رگرسیون پیش‌بینی می‌گردد تا نسبت به پیشگیری از وقوع عیب اقدام گردد.

گام ۵: اندازه گیری وضعیت پایداری بهبود یافته

در این مرحله، بهبود پایداری منتج از پیاده‌سازی استراتژی های ZDM از طریق اندازه گیری معیارهای TBL بهبود یافته، به عنوان وضعیت پایداری آینده ارائه می‌گردد.

یافته ها

این تحقیق سعی می‌نماید تا رویکرد پیشنهادی را در فرآیند تزریق فوم کابین در یک کارخانه تولید یخچال که در حوزه صنایع لوازم خانگی می‌باشد پیاده‌سازی نماید. بنابراین، ابتدا مقدمه مختصری از فرآیند تزریق فوم کابین ارائه می‌گردد و سپس به فازهای پیاده‌سازی روش پیشنهادی پرداخته می‌شود. فرآیند تزریق فوم کابین بین دو فرآیند مونتاژ قرار گرفته است که عبارتند از: مونتاژ پیش از تزریق فوم به عنوان فرآیند بالادست و مونتاژ پس از تزریق فوم به عنوان فرآیند پایین دست. در فرآیند تزریق فوم کابین، فوم تزریقی از نوع فوم پلی یورتان سخت می‌باشد که از دو ماده اصلی شامل پلیول (Poly) و متیلن دی فنیل دی ایزوسیانات (MDI) تشکیل شده است که در مخازن مربوطه نگهداری می‌شوند. ماشین تزریق فوم از سه بخش تشکیل شده است که عبارتند از: محیط پیش گرم، تجهیزات تزریق فوم و محیط خنک کاری. ابتدا، کابینت وارد محیط پیش گرم می‌شود تا به‌طور مناسب گرم شده و آماده تزریق فوم گردد. سپس وارد قسمت تزریق فوم شده که شامل

1. Remaining useful life

2. Traini, et al

3. Zhang, et al

فیکسچر، قالب و هد تزریق به عنوان اجزای اصلی می‌باشد. در این مطالعه موردی، ماشین تزریق فوم از هفت تجهیز تزریق فوم موازی تشکیل شده است تا سایکل تایم این مرحله با پیش مونتاژ و پس مونتاژ بالانس شود. در ادامه، پس از تثبیت موقعیت کابینت از طریق قالب و فیکسچر، فوم در فضای بین دیواره داخلی و خارجی کابینت تزریق می‌گردد و سپس فوم شروع به بالا آمدن و پخت می‌کند. قالب درون کابینت قرار می‌گیرد و به بدنه پلیمری داخلی کابینت فیکس می‌شود و فیکسچر نیز از بیرون بدنه فلزی بیرونی کابینت را مهار می‌نماید تا از دفرمگی آن در مقابل فشار دینامیکی بالا آمدن فوم در زمان پخت جلوگیری نماید و به توزیع همگن فوم در فضای بین دو دیواره کابینت کمک می‌نماید. پس از اتمام زمان پخت فوم، کابینت از بخش تزریق آزاد شده و به بخش خنک کاری می‌رود تا با خنک کردن کابینت از ادامه بالا آمدن فوم و دفرمگی بدنه کابینت جلوگیری نماید. با پیروی از رویه تعریف شده، گامهای ذکر شده آن در فرآیند تزریق فوم کابینت در ادامه پیاده‌سازی می‌گردند.

پیاده‌سازی گام ۱: آنالیز عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول در فرآیندهای تولید

بررسی داده های تاریخی کیفی محصول در فرآیند تزریق فوم کابینت بیانگر این است که درمیان عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول در فرآیند تزریق فوم کابینت، افزایش دما بیشترین سهم را در ایجاد محصول معیوب دارد.

- افزایش دما در فرآیند تزریق فوم که فشار دینامیکی بالا آمدن فوم را افزایش داده و منجر به دفرمگی محصول خروجی می‌گردد. به بیان دقیق‌تر، یک سری از الزامات دمایی می‌باید رعایت گردد تا کیفیت محصول در محدوده قابل قبول بماند و تجاوز از این محدوده باعث ایجاد عیب در محصول می‌شود. از طرفی دیگر، همانطور که در بالا گفته شد، فرآیند تزریق فوم یک واکنش گرمازا است که باعث افزایش دمای محیط اطراف خود مانند فیکسچر کابینت، قالب کابینت و غیره می‌شود. الزامات دمایی در جدول ۲ نشان داده شده اند.

جدول ۲: الزامات دمایی در فرآیند تزریق فوم کابینت

Table 2: Temperature requirements in the cabinet foam injection process

دمای آیت‌های مؤثر	محدوده دمایی تعریف شده (درجه سلسیوس)
دمای Poly در تانک	16-19
دمای MDI در تانک	16-19
دمای کابینت در خروجی محیط پیش گرم	28-32
دمای فیکسچر و قالب کابینت	42-50
دمای محیط تزریق فوم کابینت	$20 < t < 50$

پیاده‌سازی گام ۲: آنالیز معیارهای TBL

در این گام معیارهای مرتبط با این مطالعه موردی که متأثر از تولید محصول معیوب می‌باشند شناسایی شده و در جدول ۳ نمایش داده می‌شوند.

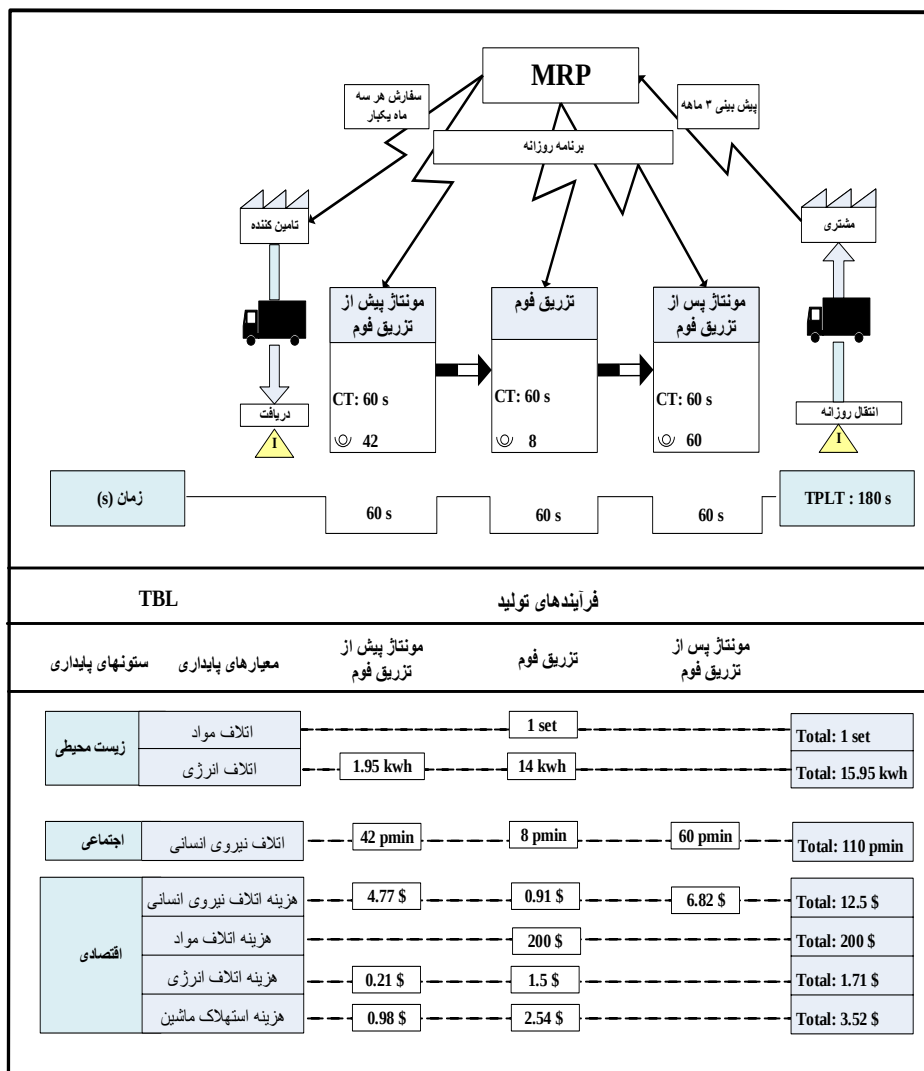
جدول ۳: معیارهای TBL شناسایی شده در ادبیات، مرتبط با مطالعه موردی

Table 3: Extracted TBL criteria from the literature, relevant to the case study

TBL	معیارهای پایداری	نویسنده
زیست محیطی	اتلاف مواد (set)	سینگ و مادان (۲۰۱۶)، تیواری و همکاران (۲۰۲۰)
	اتلاف انرژی (kwh)	ماریمین و همکاران (۲۰۱۸)، چرافی و همکاران (۲۰۱۹)
اجتماعی	اتلاف نیروی انسانی (pmin)	ابراهیمی و همکاران (۲۰۲۳)
اقتصادی	هزینه اتلاف نیروی انسانی (\$)	ساروماتیس (۲۰۲۱)، ابراهیمی و همکاران (۲۰۲۳)
	هزینه اتلاف مواد (\$)	هوانگ و بادوردین (۲۰۱۸)، تیواری و همکاران (۲۰۲۰)
	هزینه اتلاف انرژی (\$)	خاکپور و همکاران (۲۰۲۳)
	هزینه استهلاك ماشین (\$)	هلنو و همکاران (۲۰۱۷)، خاکپور و همکاران (۲۰۲۳)

پیاده‌سازی گام ۳: اندازه‌گیری وضعیت پایداری جاری

با توجه به مطالعه موردی این تحقیق، به‌منظور اندازه‌گیری وضعیت پایداری جاری، ابتدا تأثیرات یک واحد محصول معیوب بر پایداری TBL در فرآیند تزریق فوم کابین اندازه‌گیری شده و همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است در جریان ارزش ترسیم می‌گردد. بسته به سیستم تولید، یک محصول معیوب در یک فرآیند تولید می‌تواند بر پایداری TBL در فرآیندهای بالادست و پایین‌دست تأثیر بگذارد. به‌عنوان مثال، در این مطالعه موردی، محصول معیوب در تزریق فوم کابینت باعث اتلاف نیروی انسانی در پیش‌مونتاز و پس‌مونتاز می‌شود و بر ستونهای اجتماعی و اقتصادی در هر سه فرآیند تأثیر می‌گذارد.



شکل ۳: تأثیرات یک واحد محصول معیوب بر وضعیت پایداری TBL در جریان ارزش
 Figure 3: The effects of single unit defective product on TBL sustainability state in value stream

سپس، با توجه به داده های ثبت شده مربوط به نرخ متوسط محصولات معیوب در فرآیند تزریق فوم کابینت و برنامه تولید روزانه محصول یخچال، نتایج وضعیت پایداری جاری در جدول ۴ خلاصه شده است.

جدول ۴: خلاصه وضعیت پایداری جاری

Table 4: Summary of current sustainability state

وضعیت پایداری اقتصادی	وضعیت پایداری اجتماعی	وضعیت پایداری زیست محیطی	تعداد محصولات معیوب (set)	نرخ محصولات معیوب (%)	برنامه روزانه: مدل محصول (set)	وضعیت پایداری
اتلاف هزینه ها:	اتلاف نیروی انسانی:	اتلاف مواد:	15 set	3%	480 set	یخچال
\$ 3265.65		15 set				
	1650 pmin	اتلاف انرژی:				
		239.25 kwh				

پیاده سازی گام ۴: پیاده سازی استراتژی های ZDM

به منظور انتخاب مؤثرترین استراتژی ZDM که متناسب با مطالعه موردی باشد، می باید آنالیز دقیقی از عوامل پویای شناسایی شده مؤثر بر کیفیت محصول صورت گیرد. در فرآیند تزریق فوم کابینت، افزایش دما با توجه به گرمازا بودن واکنش در فرآیند تزریق فوم، به عنوان علت اصلی عیب در محصول شناخته شده است و گامهای پیاده سازی استراتژی های پیش بینی-پیشگیری در ادامه تشریح می گردد.

همانطور که در گام ۱ توضیح داده شد، یک سری الزامات دمایی می باید رعایت گردد تا کیفیت محصول در محدوده قابل قبول حفظ ماند و تجاوز از این محدوده باعث بروز عیب در محصول می گردد. از طرف دیگر، با در نظر گرفتن بازه دمایی تعریف شده (جدول ۲)، با توجه به تنوع شرایط دمایی در زمان راه اندازی در فرآیند تزریق فوم کابینت، نرخ افزایش دما که متأثر از گرمازایی واکنش تشکیل فوم می باشد متغیر خواهد بود. بنابراین، تمرکز ناکافی بر این موضوع منجر به افزایش دمایی فراتر از محدوده تعریف شده می گردد و نهایتاً باعث ایجاد محصول معیوب می شود. از آنجایی که، هفت تجهیز تزریق فوم به طور موازی با هم کار می کنند، اولین مشاهده عیب برابر با هفت محصول معیوب می باشد. این موضوع ضرورت به کارگیری جفت استراتژی پیش بینی-پیشگیری را جهت پیش بینی زمان وقوع عیب و نتیجتاً پیشگیری از آن برجسته می نماید. در این راستا، جهت اجرای استراتژی پیش بینی در این تحقیق، از سنسورهای IoT جهت گزارش آنلاین دما به سیستم نرم

افزاری استفاده شده است و از داده های جمع آوری شده در الگوریتم ML مشخص شده استفاده می گردد تا زمان وقوع عیب را پیش بینی نماید. با توجه به آن، به عنوان جایگزین عبارت "زمان وقوع عیب"، این تحقیق از عبارتی تحت عنوان "اجرای قابل قبول باقی مانده (RAR)"^۱ استفاده می کند که به معنی تعداد تزریق فوم قابل انجام است به شرط اینکه از الزامات دمایی (جدول ۲) قابل قبول و تعریف شده برای تضمین کیفیت محصول فراتر نرود.

در این مقاله سعی گردیده که به دلیل پیوسته بودن متغیر پاسخ، از رگرسیون خطی چندگانه به منظور برازش داده ها و همچنین پیش بینی مقادیر پاسخ استفاده شود. در این مقاله، از رگرسیون به عنوان یکی از روشهای اصلی در یادگیری نظارت شده (Supervised Learning) سعی گردیده تا در ابتدا یک مدل کامل (Full Model) از رابطه بین متغیرهای پیش بینی کننده یا مستقل متشکل از دمای پلیول^۲ (PT)، دمای ایزوسانات^۳ (MDIT)، دمای کابینت^۴ (CT)، دمای قالب و فیکسچر^۵ (FDT)، دمای اتاق تزریق فوم^۶ (FRT) و دمای محیط خنک کاری^۷ (CZT) و همچنین اثرات متقابل دوطرفه آنها با متغیر پاسخ (RAR) ایجاد شود. خلاصه توضیحات مجموعه داده ها در جدول ۵ ارائه شده است. از آنجایی که داده ها در ۵۳۷ اجرا ثبت شده است، مجموع سیگنالهای دمایی ثبت شده برابر ۳۲۲۲ می باشد.

جدول ۵: خلاصه توضیحات مجموعه داده ها

Table 5: Summary of dataset descriptions

	PT	MDIT	CT	FDT	FRT	CZT	RAR
Count	537.00	537.00	537.00	537.00	537.00	537.00	537.00
Mean	17.61	17.55	30.55	47.46	33.98	24.43	56.47
Std	0.90	0.91	1.25	2.01	7.52	1.54	39.96
Min	16.00	16.00	28.00	42.00	20.00	20.00	0.00
25%	16.80	16.80	29.70	46.40	28.00	24.10	20.00
50%	17.70	17.60	30.70	47.70	35.00	24.90	54.00
75%	18.40	18.40	31.40	48.80	40.00	25.40	87.00
Max	19.00	19.00	34	52.5	46.00	28.20	149.00

1. Remaining acceptable run (RAR)
2. Polyol tank temperature (PT)
3. MDI temperature (MDIT)
4. Cabinet temperature (CT)
5. Fixture and die temperature (FDT)
6. Foaming room temperature (FRT)
7. Cooling zone temperature (CZT)

سپس با بهره گیری از روش رو به عقب برای انتخاب متغیرها (Backward Selection)، نسبت به ایجاد یک مدل تعدیل یافته (Reduced Model) و با حذف عبارات غیر معنی دار با لحاظ کردن شرط توقف $p\text{-value} \leq 0.05$ اقدام گردید. در مدل تعدیل یافته، علاوه بر وجود شش متغیر اصلی پیش‌بینی کننده، برخی از اثرات متقابل دو طرفه (Two-Way Interactions) نیز معنی دار می‌باشند. جدول ۶ وضعیت عبارات معنی دار را در مدل تعدیل شده اولیه نشان می‌دهد:

جدول ۶: وضعیت عبارات معنی دار را در مدل تعدیل شده اولیه

Table 6: Status of significant terms in the Initially developed model

Effect Summary			
Source	Logworth		PValue
PT*MDIT	82.358		0.00000
FDT*CZT	53.328		0.00000
CT	41.744		0.00000
CZT	39.625		0.00000 ^
CT*CZT	38.150		0.00000
CT*FDT	36.691		0.00000
PT	35.826		0.00000 ^
MDIT	33.810		0.00000 ^
FDT	33.285		0.00000 ^
CT*FRT	32.042		0.00000
PT*FRT	21.244		0.00000
MDIT*CZT	11.649		0.00000
FRT	0.305		0.49540 ^

سپس به بررسی هم خطی چندگانه (Multicollinearity) در مدل رگرسیون اولیه تعدیل شده پرداخته شده است. چرا که ممکن است بین عبارات موجود در مدل فعلی، همبستگی وجود داشته باشد که این مهم باعث متورم شدن خطای استاندارد برای ضرائب مدل رگرسیون خواهد شد. بر این اساس با محاسبه شاخص عامل تورم واریانس (Variance Inflation Factor- VIF) برای هر یک از عبارات مدل و منظور کردن سقف توقف $VIF \leq 0.10$ ، نسبت به حذف عبارات با VIF بالای ۰,۱۰ اقدام گردید. جدول ۷ عبارات مدل نهایی تعدیل شده را نشان می‌دهد.

جدول ۷: عبارات مدل نهایی تعدیل شده

Table 7: Terms of the final modified model

Parameter Estimates					
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	VIF
Intercept	793.89709	4.166242	190.55	<.0001*	.
PT	-20.97671	1.765612	-11.88	<.0001*	337.57987
MDIT	-18.76837	1.747701	-10.74	<.0001*	334.18842
CT	-0.486193	0.279119	-1.74	0.0821	16.347444
FDT	0.1052795	0.099567	1.06	0.2908	5.2805095
FRT	-0.857902	0.026783	-32.03	<.0001*	5.334187
(PT-17.6156)*(MDIT-17.559)	-2.547842	0.163067	-15.62	<.0001*	1.8472082
(PT-17.6156)*(FRT-33.9814)	0.7584984	0.031615	23.99	<.0001*	5.9628002
(CT-30.5512)*(FDT-47.4561)	0.3260925	0.067456	4.83	<.0001*	6.6216844

لازم به توضیح است که در جدول ۷، برخی از عبارات همچنان دارای VIF بالای ۱۰٪ می باشند ولی به دلیل اینکه این عبارات در اثرات متقابل نقش دارند، حذف نشده‌اند.

مدل نهایی رگرسیون خطی چندگانه به صورت معادله زیر استخراج و برازش شده است:

Prediction Expression
793.89708859
+ -20.97670576 • PT
+ -18.76837414 • MDIT
+ -0.486192991 • CT
+ 0.1052795434 • FDT
+ -0.857901711 • FRT
+ (PT - 17.615642458) • ((MDIT - 17.559031657) • -2.547841963)
+ (PT - 17.615642458) • ((FRT - 33.981378026) • 0.758498418)
+ (CT - 30.551210428) • ((FDT - 47.456052142) • 0.3260925174)

در این مرحله باید قبل از تفسیر و پذیرش مدل رگرسیونی فوق نسبت به بررسی مفروضات مورد نظر در رگرسیون خطی اقدام می‌گردید و بر این اساس تمامی مفروضات تأیید گردید. مواردی چون: بررسی کفایت رابطه خطی در مدل، بررسی همسانی واریانس عناصر خطا یا باقیمانده‌ها (residuals)، بررسی نرمال بودن عناصر خطا، عدم وجود همبستگی بین عناصر خطا (autocorrelation)، و عدم وجود داده‌های دورافتاده در مدل از طریق رسم نمودارهای باقیمانده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت که به دلیل بالارفتن تعداد صفحات مقاله، از آوردن نمودارها و تحلیل‌های مربوطه اجتناب گردیده است.

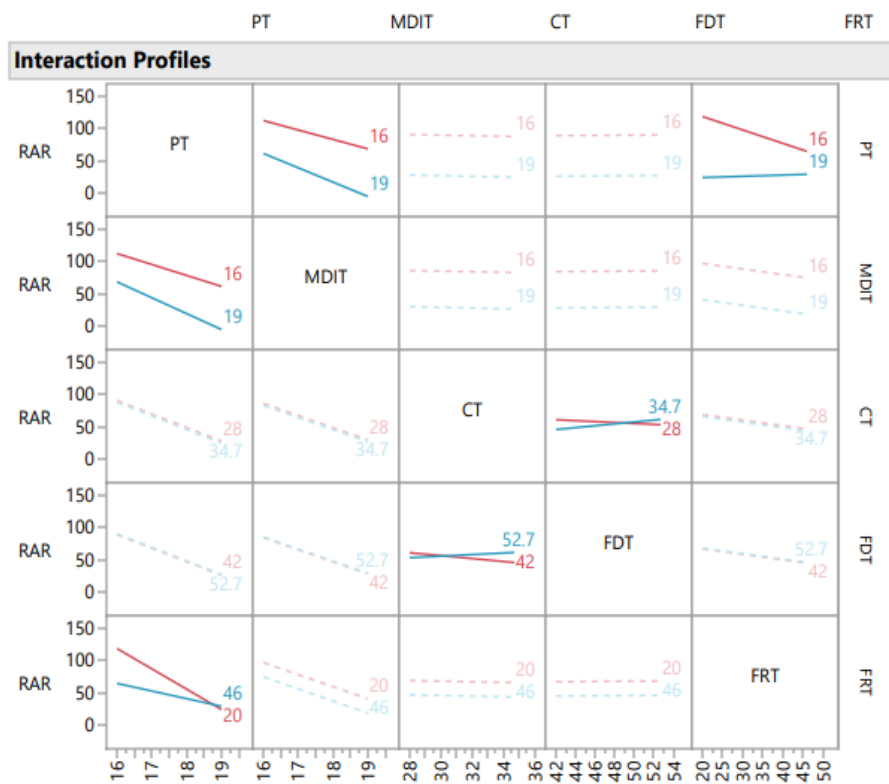
حال که مفروضات مدل رگرسیون تأمین شده‌اند، نوبت به بررسی معنی‌دار بودن کل مدل می‌رسد. نتایج جدول تحلیل واریانس (جدول ۸) معنی‌داری کل مدل رگرسیون برازش شده را نشان می‌دهد. با توجه به بزرگ بودن مقدار آماره نسبت F ، و کوچک بودن p -value مشخص می‌شود که مدل رگرسیون به صورت کلی معنی‌دار می‌باشد.

جدول ۸: تحلیل واریانس

Table 8: Analysis of variance

Analysis of Variance				
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	8	853864.50	106733	26171.44
Error	528	2153.30	4.078227	Prob > F
C. Total	536	856017.80		<.0001*

پیشتر هم ضرائب مدل رگرسیون برازش شده، طبق جدول تخمین پارامترها، معنی‌دار شناسایی شده‌اند. ضمناً، مشخص گردید که فقط سه اثر متقابل دوطرفه شامل $(PT*MDTI)$ ، $(PT*FRT)$ ، و $(CT*FDT)$ معنی‌دار بوده و این مهم در پروفایل اثرات متقابل (شکل ۴) هم نشان داده شده است.



شکل ۴: پروفایل اثرات متقابل متغیرهای مستقل

Figure 4: Interaction profile of independent variables

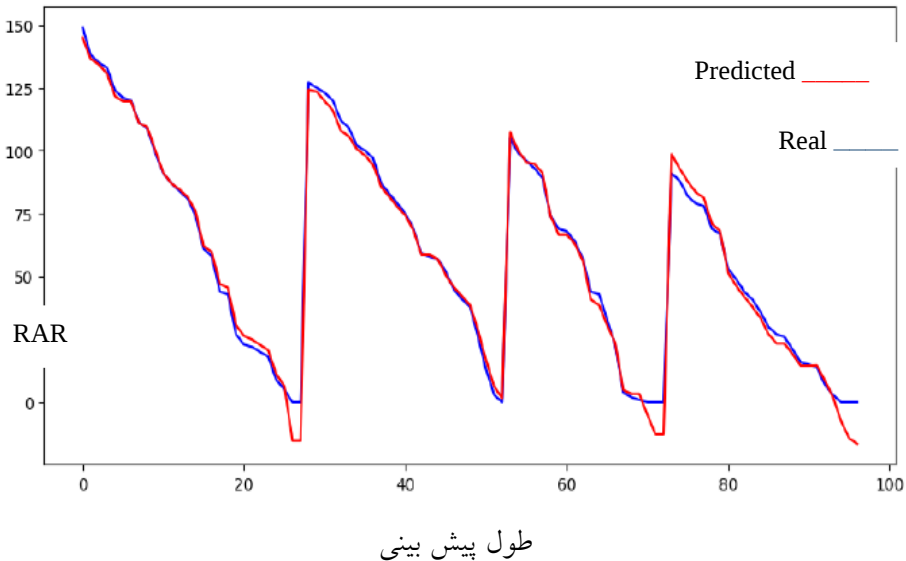
شایان ذکر است به‌منظور ارزیابی مدل، مدل از طریق ۸۰ درصد داده‌ها یاد می‌گیرد و ۲۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده تست جهت ارزیابی عملکرد مدل استفاده می‌شوند. جدول ۹ گزارشی از نتایج بدست آمده از ارزیابی الگوریتم ارائه می‌دهد.

جدول ۹: ارزیابی مدل ML

Table 9: ML model evaluation

Performance indicator	Result
Mean absolute error (MAE)	2.96
Mean square error (MSE)	13.68
Prediction accuracy (R ²)	0.99
(R ² -Adj)	0.99
Root mean square error (RMSE)	2.02
Mean of Response	56.47

مقایسه بین داده های واقعی و داده های پیش بینی شده توسط مدل رگرسیون خطی چند گانه برای RAR در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: مقایسه بین RAR و RAR

Figure 5: RAR vs RAR

همانطور که در گام اول توضیح داده شد، افزایش دما مستقیماً بر فشار دینامیکی بالا آمدن فوم تأثیر می گذارد، بنابراین اگر زمان پخت در فرآیند تزریق فوم افزایش یابد، با توجه به فیکس بودن کابینت بین قالب از داخل و فیکسچر از بیرون از دفرمگی جلوگیری می گردد. با توجه به ارزیابی متخصصان و رویه تعریف شده، زمانی که RAR پیش بینی شده به ۱۴ می رسد، زمان پخت در همه تجهیزات تزریق فوم می باید ۳۵ ثانیه افزایش یابد تا از وقوع عیب پیشگیری گردد. با توجه به هفت تجهیز تزریق فوم موازی، این تغییر منجر به افزایش سایکل تایم از ۶۰ ثانیه به ۶۵ ثانیه می شود و این تنظیمات جدید زمان پخت می باید تا اولین زمان استراحت (به عنوان مثال، زمان صرف صبحانه یا زمان صرف ناهار) در شیفت کاری ادامه یابد، زیرا با توجه به توقف ماشین در این بازه های زمانی، فرصتی فراهم می شود تا دما کاهش یافته و به شرایط نرمال جهت ادامه تولید بازگردد و لذا زمان پخت می باید مجدداً به تنظیمات اصلی تغییر یابد.

پیاده‌سازی گام ۵: اندازه گیری وضعیت پایداری آینده

براساس بهبودهای ایجاد شده ناشی از پیاده‌سازی استراتژی های ZDM در گام ۴ که اجرای آن بمدت دوماه به طول انجامید، تغییرات در معیارهای پایداری TBL اندازه گیری می‌گردد. در این راستا، با توجه به داده های ثبت شده از نرخ متوسط محصولات معیوب در فرآیند تزریق فوم کابینت و برنامه تولید روزانه یخچال، وضعیت بهبود یافته پایداری TBL در جدول ۱۰ خلاصه شده است.

جدول ۱۰: خلاصه وضعیت پایداری آینده

Table 10: Summary of future sustainability state

وضعیت پایداری اقتصادی	وضعیت پایداری اجتماعی	وضعیت پایداری زیست محیطی	تعداد محصولات معیوب (set)	نرخ محصولات معیوب (%)	برنامه روزانه (set)	مدل محصول
اتلاف هزینه ها: 217.71 \$	اتلاف نیروی انسانی: 110 pmin	اتلاف مواد: 1 set	1 set	0.2 %	480 set	یخچال
اتلاف انرژی: 15.95 kwh						

نتایج پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی در قالب بهبود وضعیت پایداری مطالعه موردی ارائه شده است. کاهش محصولات معیوب از ۳ درصد به ۰٫۲ درصد مستقیماً بر اتلاف مواد، اتلاف انرژی، اتلاف نیروی انسانی و اتلافات هزینه‌ای تأثیرگذار بوده و نتیجتاً ۹۳٫۳۳ درصد بهبود در وضعیت پایداری TBL حاصل شده است.

با در نظر گرفتن بهبود های ایجاد شده در معیارهای TBL، کاهش اتلاف مواد و انرژی از فلسفه استفاده احتیاطی منابع طبیعی و تجدیدناپذیر جهت تضمین پایداری زیست محیطی پیروی می‌کند (فالکنر و بادوردین، ۲۰۱۴). تأثیرات منفی اتلاف نیروی انسانی روی سطح رضایت‌مندی و بهره‌وری، اهمیت تمرکز بر این معیار را در ستون اجتماعی پایداری توجیه می‌نماید (خاکپور و همکاران، ۲۰۲۳). شایان ذکر است که افزایش هزینه‌های ناشی از اتلاف منابع تولید نظیر نیروی انسانی، انرژی، مواد و ماشین در تولید محصولات معیوب بر کارایی عملیاتی آنها تأثیر می‌گذارد و باید مدیریت گردد (هلنو و همکاران، ۲۰۱۷) تا پایداری اقتصادی بهبود یابد.

بحث و نتیجه گیری

پیاده سازی رویکرد پیشنهادی این تحقیق در راستای تحقق محصولات بدون عیب و بهبود پایداری TBL به عنوان هدف نهایی، منتج به گسترش بینش محققان و بهبودهای ملموسی در مطالعه موردی این تحقیق گردید. در این بخش، ابتدا رویکرد پیشنهادی با رویکردهای موجود در زمینه ZDM مقایسه می گردد. در ادامه چالش های مرتبط با پیاده سازی آن در این تحقیق توضیح داده می شود. در نهایت، به نتیجه گیری و پیشنهاد جهت تحقیقات آتی پرداخته خواهد شد.

مقایسه رویکرد پیشنهادی با تحقیقات موجود

مقالات مختلفی بر رویکرد ZDM متمرکز شده اند تا توانایی این رویکرد را جهت دستیابی به محصول بدون عیب نشان دهند. با این حال، رویکردهای به کار رفته عمدتاً محصول محور و فرآیند محور هستند و مقالات محدودی وجود دارند که به معرفی رویکرد نوظهور انسان محور در ZDM پرداخته اند. در حالی که جهت دستیابی به محصولات بدون عیب فاکتورهای مختلفی درگیر هستند. بنابراین، نظارت بر کیفیت محصول در انتهای فرآیند (در رویکرد محصول محور) بسیار دیر است زیرا اگر عیبی در محصول ایجاد شده باشد، بسته به نوع فرآیند (مثلاً یک ماشین پرسکاری چهار مرحله ای) ممکن است حتی بیش از یک محصول معیوب به وجود بیاید. از طرفی دیگر، بازرسی ماشین (در رویکرد فرآیند محور) جهت گارانتی کیفیت محصول خروجی کافی نیست و این به دلیل وجود عوامل پویای مؤثری است که بر کیفیت محصول تأثیر می گذارند. با توجه به موارد مطروحه در تحقیقات موجود، این تحقیق بر عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول در حین تولید متمرکز می باشد و با پیاده سازی رویکرد پیشنهادی در یک مطالعه موردی واقعی، تشریح می نماید که این عوامل پویا چه تأثیر قابل توجهی بر کیفیت محصول در حین تولید دارند. همچنین، بررسی تحقیقاتی که معیارهای پایداری را در ZDM در نظر گرفته اند بیانگر این است که تحقیقات بسیار محدودی وجود دارند که ارزیابی کمی از TBL ارائه داده باشند و ادبیات ZDM دچار فقدان تحقیقاتی است که تأثیرات ZDM را بر هر سه ستون پایداری یعنی زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی اندازه گیری نماید. به منظور پر کردن این خلأ تحقیقاتی، این تحقیق معیارهای TBL مرتبط با مطالعه موردی را که تحت تأثیر پیاده سازی ZDM هستند شناسایی نموده و ارزیابی کمی از این معیارهای TBL ارائه می دهد.

چالشهای مرتبط با پیاده سازی

رویکرد پیشنهادی با شناسایی، ارزیابی و بهبود معیارهای TBL، متعهد به کاربرد گسترده آن در تولید می باشد. با وجود کاربرد تشریح شده در این تحقیق، چالشهایی در پیاده سازی آن برای مدیران وجود دارد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

اولین چالش مربوط به جمع‌آوری داده در تولید می‌باشد؛ چرا که ممکن است ناقص بوده و یا در فرمت‌های مختلف و یا در جاهای مختلفی ثبت و ذخیره گردد. دقت پیش‌بینی در الگوریتم‌های ML قویاً به کامل بودن داده‌ها وابسته است. مشاهدات ناقص یا داده‌های غلط می‌تواند به نتایج غلط منجر گردد؛ چراکه مدل ML به‌خوبی یاد نمی‌گیرد و پیش‌بینی با خروجی واقعی مطابقت نخواهد داشت. برای این منظور، استفاده از تکنولوژی IoT برای جمع‌آوری دقیق داده‌های آنالاین و گزارش آن به سیستم نرم‌افزاری ضروری است.

دومین چالش مربوط به هزینه اتوماسیون است. با وجود امتیازات و مزایای جمع‌آوری اتوماتیک داده‌ها و سیستم‌های آنالیز داده، استفاده از سنسورهای IoT و یک نرم‌افزار پردازش داده مناسب هزینه بر است. بنابراین، ابتدا می‌باید تخمین دقیقی از الزامات صورت گیرد و با توجه به منافع هزینه‌ای به‌دست آمده، نرخ بازگشت سرمایه‌گذاری در این حوزه می‌باید محاسبه گردد. سومین چالش این است که پیاده‌سازی این رویکرد، نیازمند مشارکت و پشتیبانی دپارتمانهای مختلف سازمان می‌باشد. در این راستا، مدیران می‌باید رویکرد پیشنهادی را در قالب یک هدف استراتژیک برای همه سطوح کارکنان توضیح دهند. فهمیدن فلسفه و منافع رویکرد پیشنهادی برای همه ضروری است تا نسبت پیاده‌سازی مدیریت کیفیت ترغیب گردند و مشارکت نمایند. آخرین چالش این است که پیاده‌سازی این رویکرد نیاز به یک تیم متخصص دارد تا عوامل پویای مؤثر بر کیفیت محصول را شناسایی نمایند، معیارهای TBL متأثر از عیب را تعریف نمایند، روشی مناسب برای جمع‌آوری داده و آنالیز آنها طراحی نمایند و مناسب‌ترین استراتژی‌های ZDM را برای مطالعه موردی مورد نظر اجرا نموده تا به محصولات بدون عیب دست یافته و وضعیت پایداری TBL را بهبود بخشند.

نتیجه‌گیری

با تکیه بر بررسی گسترده ادبیات و تحقیقات در صنایع تولیدی، این تحقیق روشی گام به گام و عملی پیشنهاد می‌دهد که در آن از طریق تولید محصولات بدون عیب، معیارهای پایداری TBL را بهبود می‌دهد. روش پیشنهادی از مرزهای رویکردهای موجود در ZDM شامل فرآیند محور، محصول محور و رویکرد نوظهور انسان محور فراتر رفته و رویکرد مبتنی بر عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول را به کار می‌گیرد. سپس، از جفت استراتژی‌های پیش‌بینی-پیشگیری، با به‌کارگیری تکنولوژی‌های داده محور شامل IoT و الگوریتم‌های ML جهت پیش‌بینی اجرای قابل قبول باقی مانده (RAR) و پیشگیری از وقوع عیب، استفاده می‌نماید.

با توجه به خلأ روشهای موجود در ZDM جهت آنالیز و ارزیابی معیارهای پایداری، این تحقیق با شناسایی معیارهای پایداری که تحت تأثیر وقوع عیب هستند، تأثیرات اجرای استراتژی‌های ZDM را بر آنها، قبل و بعد از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی، ارزیابی می‌نماید. این تحقیق از مرزهای رویکردهای محدود موجود که یک یا دو ستون از پایداری (عمدتاً بر ستون اقتصادی متمرکز هستند) را اندازه‌گیری می‌کند فراتر رفته و با توجه به معیارهای شناسایی شده مرتبط با مطالعه موردی، هر سه ستون پایداری را در فرآیند تولید اندازه‌گیری می‌نماید. ترسیم فرآیندهای تولید مرتبط در جریان ارزش کمک می‌نماید تا تأثیرات محصول معیوب در یک فرآیند را بر پایداری TBL در کل فرآیندهای تولید ارزیابی نماید.

روش پیشنهادی در یک شرکت تولیدی به عنوان مطالعه موردی واقعی پیاده‌سازی شده است و نتایج حاصله، عملی بودن و کاربردی بودن آن را ثابت می‌نماید. در این روش جزئیات پیاده‌سازی استراتژی‌های ZDM توضیح داده می‌شود و همچنین پایداری زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی در فرآیند تولید اندازه‌گیری می‌شود. نتایج گزارش‌ها در این مطالعه موردی بیانگر ۹۳,۳۳ درصد بهبود در کاهش وقوع عیب و همچنین وضعیت پایداری TBL می‌باشد. بینش تجربی به‌دست آمده از پیاده‌سازی این رویکرد در مطالعه موردی این تحقیق، نشان‌دهنده چالش‌ها و پیچیدگی‌هایی است که در مسیر دستیابی به محصول بدون عیب و بهبود پایداری رخ می‌دهد و نگاه تحلیلی آن بر عوامل پویای تأثیرگذار بر کیفیت محصول و بهبود معیارهای پایداری TBL در این تحقیق، به محققان کمک می‌نماید تا رویکردهای ZDM شان را بروشی جامع‌تر بهبود بخشند. توسعه این روش خارج از خطوط تولید کارخانه و به‌کارگیری این مفهوم در سطوح بیشتری از مدیریت زنجیره تامین می‌تواند در مطالعات آتی در نظر گرفته شده و مطالعه گردد.

تعارض منابع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافع ندارند.

References

- Cherrafi, A., Elfezazi, S., Hurley, B., Garza-Reyes, J. A., Kumar, V., Anosike, A., & Batista, L. (2019). Green and lean: a Gemba-Kaizen model for sustainability enhancement. *Production Planning & Control*, 30(5-6), 385-399. doi:10.1080/09537287.2018.1501808
- Ebrahimi, A., Khakpour, R., & Saghiri, S. (2023). Sustainable setup stream mapping (3SM): a systematic approach to lean sustainable manufacturing. *Production Planning & Control*, 34(4), 311-329. doi:10.1080/09537287.2021.1916637
- Elkington, J. (1998). *Cannibals with forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Businesses*, Gabriola Island, BC Canada: New Society Publishers. 1-428.
- Goyal, A., Agrawal, R., & Saha, C. R. (2019). Quality management for sustainable manufacturing: Moving from number to impact of defects. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118348. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118348
- Grobler-Dębska, K., Kucharska, E., & Baranowski, J. (2022). Formal scheduling method for zero-defect manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(11), 4139-4159. doi:10.1007/s00170-021-08104-0
- Halpin, J. F. (1966). *Zero defects: a new dimension in quality assurance*: Martin Company. 1-228.
- Helleno, A. L., de Moraes, A. J. I., & Simon, A. T. (2017). Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: Application case studies in Brazilian industry. *Journal of Cleaner Production*, 153, 405-416. doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.072
- Huang, A., & Badurdeen, F. (2018). Metrics-based approach to evaluate sustainable manufacturing performance at the production line and plant levels. *Journal of Cleaner Production*, 192, 462-476. doi:10.1016/j.jclepro.2018.04.234
- Khakpour, R., Ebrahimi, A., & Saghiri, S. (2023). How to assess and improve the triple bottom line (TBL) in manufacturing processes: a real case in home appliance manufacturing. *International Journal of Lean Six*

- Sigma, ahead-of-print(ahead-of-print). 14 (7), 1456-1491.
doi:10.1108/IJLSS-09-2022-0202
- Leitão, P., Barbosa, J., Geraldles, C. A. S., & Coelho, J. P. (2018). Multi-agent System Architecture for Zero Defect Multi-stage Manufacturing. In T. Borangiu, D. Trentesaux, A. Thomas, & O. Cardin (Eds.), *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing: Proceedings of SOHOMA 2017* (pp. 13-26). Cham: Springer International Publishing.
- Lindström, J., Lejon, E., Kyösti, P., Mecella, M., Heutelbeck, D., Hemmje, M., . . . Gunnarsson, B. (2019). Towards intelligent and sustainable production systems with a zero-defect manufacturing approach in an Industry4.0 context. *Procedia CIRP*, 81, 880-885.
doi:10.1016/j.procir.2019.03.218
- Magnanini, M. C., Colledani, M., & Caputo, D. (2020). Reference architecture for the industrial implementation of Zero-Defect Manufacturing strategies. *Procedia CIRP*, 93, 646-651.
doi:10.1016/j.procir.2020.05.154
- Majeed, A., Zhang, Y., Ren, S., Lv, J., Peng, T., Waqar, S., & Yin, E. (2021). A big data-driven framework for sustainable and smart additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67, 102026. **doi:10.1016/j.rcim.2020.102026**
- Marimin, Darmawan, M. A., Widhiarti, R. P., & Teniwut, Y. K. (2018). Green productivity improvement and sustainability assessment of the motorcycle tire production process: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 191, 273-282. **doi:10.1016/j.jclepro.2018.04.228**
- Martinez, P., Al-Hussein, M., & Ahmad, R. (2022). A cyber-physical system approach to zero-defect manufacturing in light-gauge steel frame assemblies. *Procedia Computer Science*, 200, 924-933.
doi:10.1016/j.procs.2022.01.290
- Mourtzis, D., Angelopoulos, J., & Panopoulos, N. (2021). Equipment Design Optimization Based on Digital Twin Under the Framework of Zero-Defect Manufacturing. *Procedia Computer Science*, 180, 525-533.
doi:10.1016/j.procs.2021.01.271
- Psarommatis, F. (2021). A generic methodology and a digital twin for zero defect manufacturing (ZDM) performance mapping towards design for

- ZDM. Journal of Manufacturing Systems, 59, 507-521. doi:10.1016/j.jmsy.2021.03.021
- Psarommatis, F., & Kiritsis, D. (2022). A hybrid Decision Support System for automating decision making in the event of defects in the era of Zero Defect Manufacturing. Journal of Industrial Information Integration, 26(2), 100263. doi:10.1016/j.jii.2021.100263
- Psarommatis, F., & May, G. (2022). A literature review and design methodology for digital twins in the era of zero defect manufacturing. International journal of production research, 61(5), 1-21. doi:10.1080/00207543.2022.2101960
- Psarommatis, F., May, G., Dreyfus, P.-A., & Kiritsis, D. (2020). Zero defect manufacturing: state-of-the-art review, shortcomings and future directions in research. International journal of production research, 58(1), 1-17. doi:10.1080/00207543.2019.1605228
- Psarommatis, F., May, G., & Kiritsis, D. (2021). Predictive maintenance key control parameters for achieving efficient Zero Defect Manufacturing. Procedia CIRP, 104, 80-84. doi:10.1016/j.procir.2021.11.014
- Psarommatis, F., Sousa, J., Mendonça, J. P., & Kiritsis, D. (2022). Zero-defect manufacturing the approach for higher manufacturing sustainability in the era of industry 4.0: a position paper. International journal of production research, 60(1), 73-91. doi:10.1080/00207543.2021.1987551
- Psarommatis, F., Vuichard, M., & Kiritsis, D. (2020). Improved heuristics algorithms for re-scheduling flexible job shops in the era of Zero Defect manufacturing. Procedia Manufacturing, 51, 1485-1490. doi:10.1016/j.promfg.2020.10.206
- Rother, M., & Shook, J. (2003). Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate muda: Lean enterprise institute. 1-102.
- Singh, P. P., & Madan, J. (2016). A computer-aided system for sustainability assessment for the die-casting process planning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87(5), 1283-1298. doi:10.1007/s00170-013-5232-2
- Tiwari, P., Sadeghi, J. K., & Eseonu, C. (2020). A sustainable lean production framework with a case implementation: Practice-based view theory.

Journal of Cleaner Production, 277, 123078.
doi:10.1016/j.jclepro.2020.123078

Traini, E., Bruno, G., & Lombardi, F. (2021). Tool condition monitoring framework for predictive maintenance: a case study on milling process. *International journal of production research*, 59(23), 7179-7193.
doi:10.1080/00207543.2020.1836419

Zhang, C., Yao, X., Zhang, J., & Jin, H. (2016). Tool Condition Monitoring and Remaining Useful Life Prognostic Based on a Wireless Sensor in Dry Milling Operations. *Sensors*, 16(6), 795. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/6/795>

US Department of Commerce (2010), "The international trade administration and the U.S. department of commerce's definition for sustainable manufacturing", available at: www.trade.gov/competitiveness/sustainablemanufacturing/how_doc_defines_SM.asp (accessed 25 August 2011).