Business Intelligence Management Studies
Vol. 12, No.46, Winter 2024; P 259-296
ims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/ims.2023.73405.2319

ATU PRESS

Multi-Agent Production Control Integrated with ERP: A Methodology Development

Payam Faghihi
Ph.D. Student in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Mehrdad Kazerooni *
Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Accelerating the agility of production control systems in today's dynamic production environment is one of the challenges that many types of research have been conducted using multi-agent systems to improve it. The current models of these systems have shortcomings such as limited predictability, low reliability in the decision-making process, poor ability to understand and interpret the current state of the system, control with many limitations, and generally the existence of error-prone systems. In order to solve these problems, the current research presents a new methodology for multi-agent production control based on integration with ERP, which improves the capabilities of the system in the face of the above deficiencies. The research method employed in this study is qualitative, and developmental-applicative, aiming to enhance the integration of multi-agent production control systems with ERP. The objective is to improve the flow of material, production, and the quality of semi-finished products on the production line by considering the parameters that influence them. The key accomplishment of this research is the development of a reliable production control methodology that encompasses three components: a data exchange framework, tools, and implementation. These components are derived from existing ERP information systems that are functionally mature and designed based on best practices with a focus on maintenance, modification, and performance, aiming to minimize errors. The developed methodology offers a practical

* Corresponding Author: kazerooni@ kntu.ac.ir
How to Cite: Faghihi, P., Kazerooni, M. (2024). Multi-Agent Production Control Integrated with ERP: A Methodology Development, *Journal of Business Intelligence Management Studies*, 12(46), 259-296.

ISSN: 2821-0964 eISSN: 2821-0816 Received: 17 October 2023 Revised: 13 June 2023 Accepted: 17 October 2023 Original Research

and agile solution for enhancing production control using an ERP system, with a lower implementation cost than the implementation of a commercial ERP system with a separate multi-agent system.

1. Introduction

Accelerating the agility of production control systems in today's dynamic production environment is one of the challenges that many types of research have been conducted using multi-agent systems to improve it. The current models of these systems have shortcomings such as limited predictability, low reliability in the decision-making process, poor ability to understand and interpret the current state of the system, control with many limitations, and generally the existence of error-prone systems. In order to solve these problems, the presented research introduces a versatile methodology developed to enhance the efficiency of data and material flow control within a production system. The methodology emphasizes the role of data flow in regulating material flow, making it agile and autonomous.

The innovation lies in elevating the role of ERP modules from process flow reporting to that of decision-making software agents, aligning with the common nature of both systems. Consequently, higher levels of data integration between the production system and the Multi-Agent Production Control System (MAPCS) integrated with ERP are achieved, leveraging agent technology and best practices from ERP modules.

This approach enables real-time responsiveness to changes in the production system, establishing an agile production control methodology capable of managing material flow dynamics. Furthermore, it represents a step toward addressing current MAPCS limitations.

2. Literature Review

The advent of affordable computer technology marks a pivotal moment in the adoption of advanced IT-based production control systems (Karrer, 2012). Leveraging technologies that continually monitor and gather information concerning the real-time status of production systems, such as machines equipped with sensors actively participating in the production process and offering virtual representations of the production system's state, enhances data

integrity for improved decision-making in production control (Huang, 2022).

Over the last decade of the 20th century, agent technology emerged, giving rise to agent-based production planning and control models and extensive research into technology development based on these principles (Bär, 2022; Groß et al., 2021).

Agent-based systems represent the next generation of software, capable of dynamic adaptation to the evolving business environment and addressing a wide array of production system challenges (Mesbahi et al., 2014). However, they do present ongoing challenges, including limitations in system state comprehension, restricted control, reduced decision-making reliability, and a generally increased risk of errors in design and implementation (De la Prieta et al., 2019; Balaji & Srinivasan, 2010).

Concurrently, Enterprise Resource Planning (ERP) systems emerged as IT-based solutions in the final decade of the 20th century, witnessing rapid expansion in research and implementation across various organizations (Scharf et al., 2022; De Brabander et al., 2022; Febrianto & Soediantono, 2022; Senaya et al., 2022).

The integration of agents with ERP systems holds the promise of enhancing ERP intelligence, allowing them to autonomously interact with their environment and execute self-directed actions while collaborating with other systems (Faghihi & Kazerooni, 2023).

This paper introduces a novel solution: the development of a Multi-Agent Production Control Methodology (MAPCM) integrated with ERP system that encompasses three components: data exchange framework, tools, and implementation.

3. Methodology

In this study, a developmental-applicative research method has been employed with the goal of building upon the findings of prior fundamental research. The objective is to enhance and refine various aspects, including behaviors, methods, tools, devices, structures, and patterns. This iterative process aims to address the practical needs of the society's industries.

Additionally, to gather the desired data, a qualitative research method has been employed. This approach is particularly useful for tackling complex problems and deriving meaningful, easily

comprehensible conclusions accessible to a wide audience.

4. Results

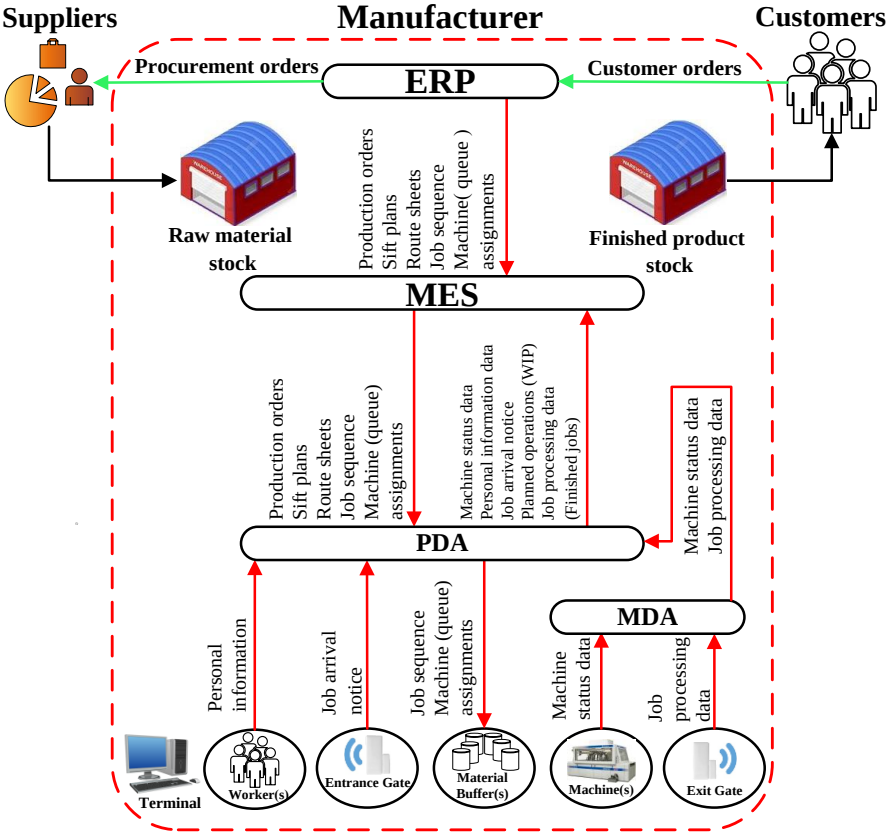
4.1. Data exchange framework

The development of the Final MAPCM integrated with ERP framework proceeded in a systematic four-layer approach. To enhance comprehension of the progress in each stage and the data exchange within these layers, we represent the first layer's data in black, while the data from the second and third layers are depicted in blue and red, respectively.

4.1.1. Layer 1: A Framework for streamlining production control data exchange

Figure 1, illustrates an exemplary data-exchange framework for production control, which serves as the foundation for the proposed framework (Frazzon et al., 2018). This framework leverages a Manufacturing Execution System (MES) as the central data hub, facilitating seamless data exchange to bridge the physical manufacturing and production system with a multi-agent system.

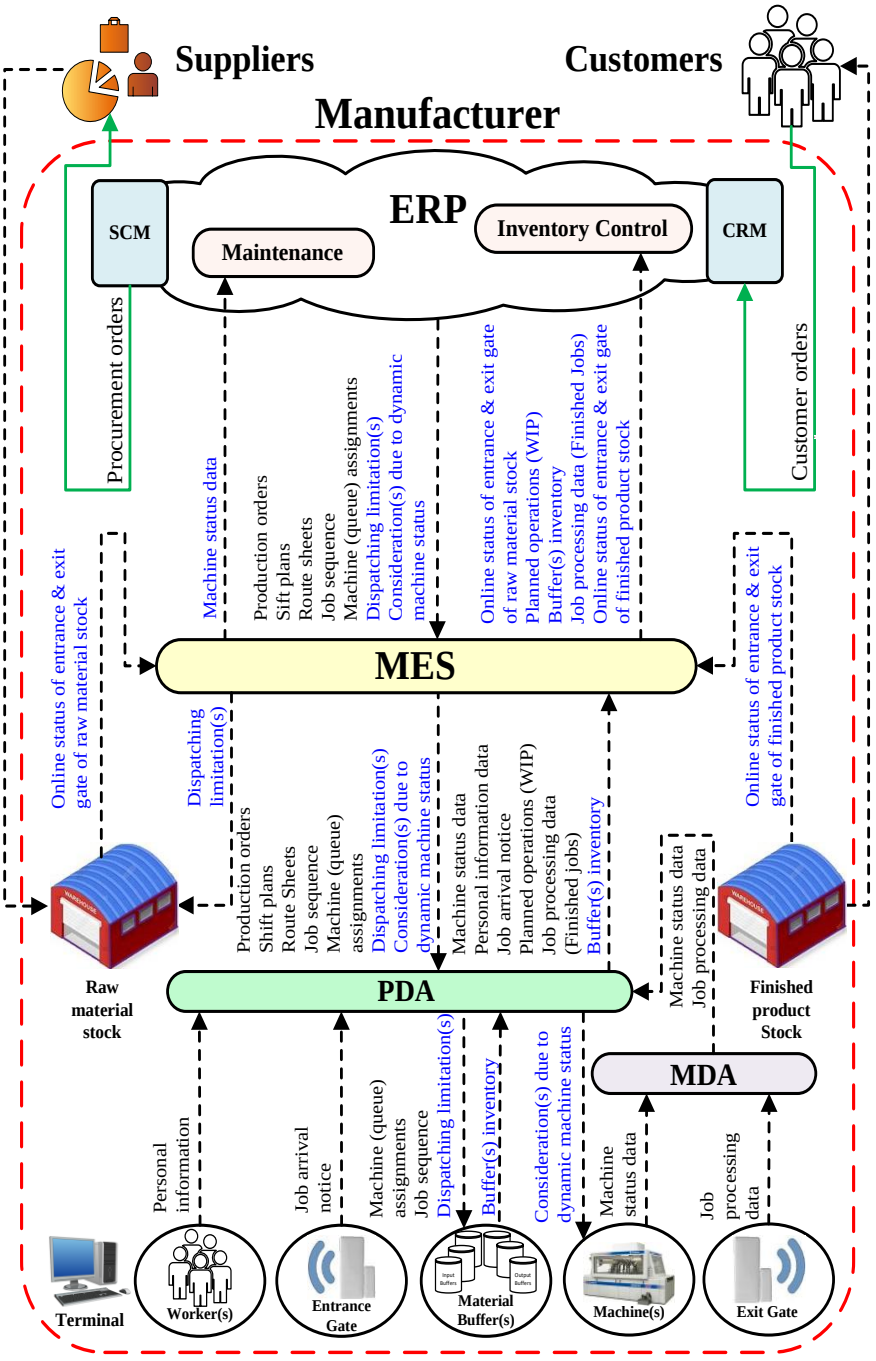
Figure 1. A Data Exchange Framework Schema for Production Control



4.1.2. Layer 2: MAPCM integrated with ERP – based on material flow control framework

The data-exchange framework, depicted in Figure 2, emphasizes the implementation of real-time inventory distribution, dispatching limitations, and delivery constraints throughout the production process. Also, effectively addresses the dynamic handling of inventory distribution and delivery constraints in response to unplanned and unscheduled maintenance operations. This capability is achieved through the collaborative efforts of the inventory control and the maintenance modules of the ERP system.

Figure 2. MAPCM integrated with ERP – based on material flow control framework



4.1.3. Layer 3: MAPCM integrated with ERP – based on quality control framework

After upgrading the ERP quality control module to a software agent, it conducts three-phase quality checks utilizing data from both human and cyber-physical systems. (Figure 3):

- Phase 1:

This phase is dedicated to assessing the quality of raw materials and consists of two sections:

- The quality of incoming warehouse inventory
- The quality of warehouse inventory during storage periods

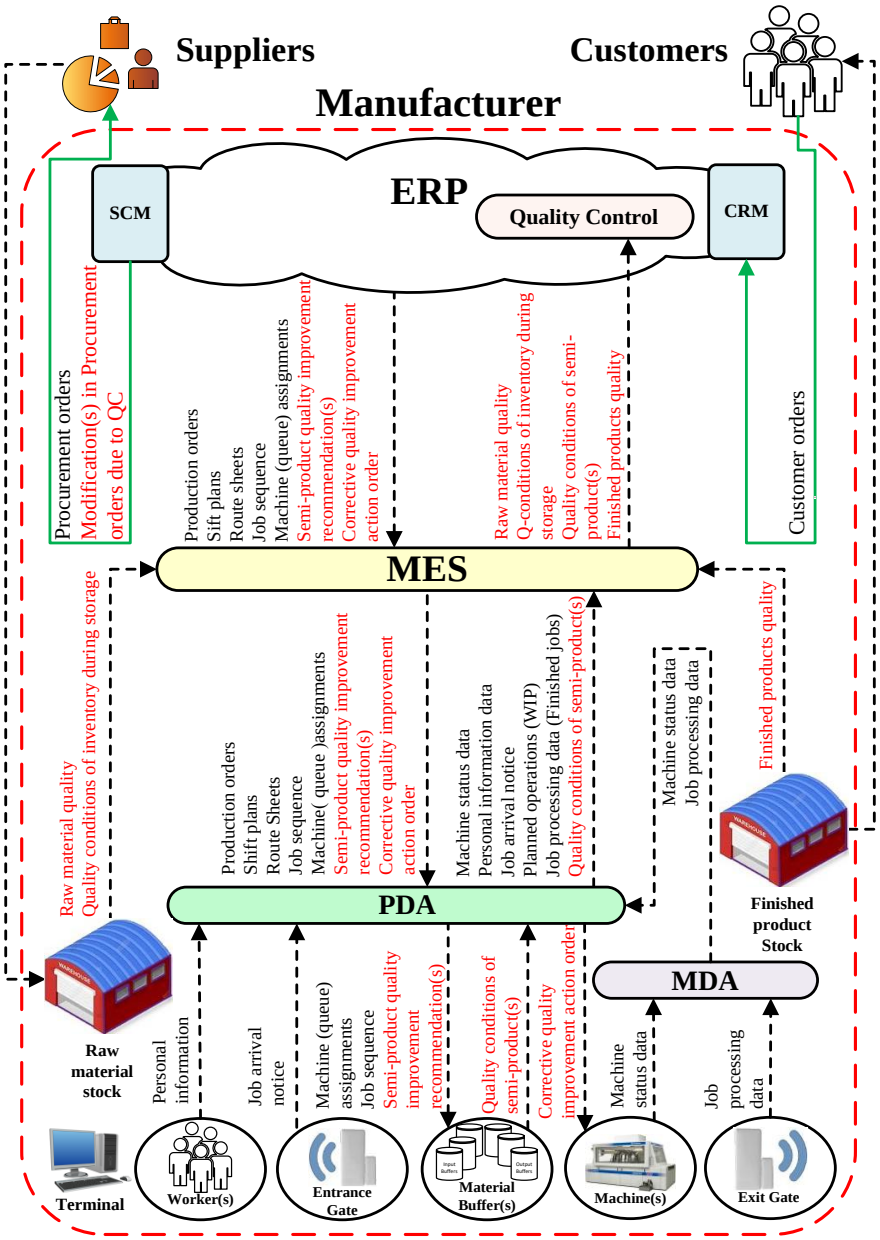
- Phase 2:

Semi-product quality control during the manufacturing process

- Phase 3:

Quality of finished products

Figure 3. MAPCM integrated with ERP – based on quality control framework

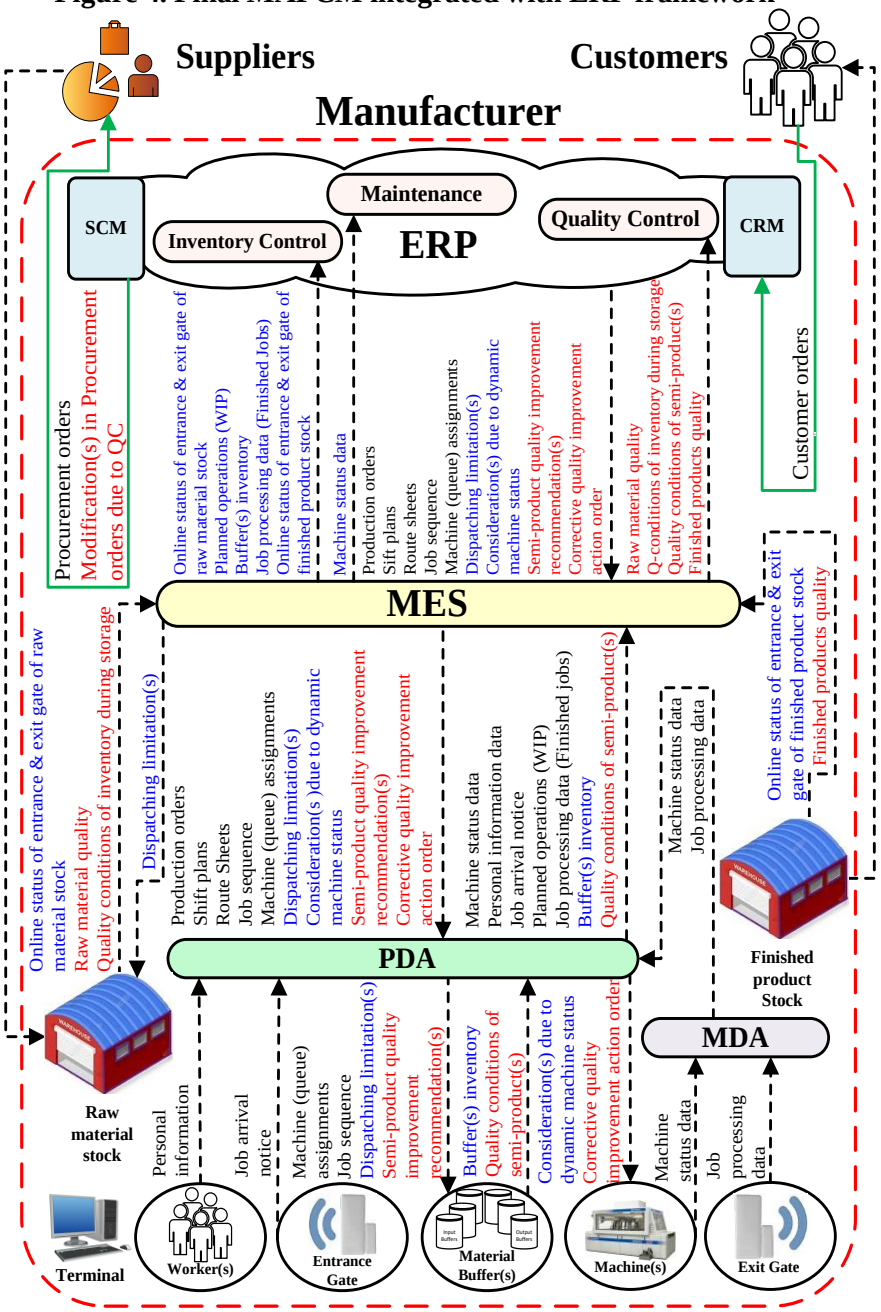


4.1.4. Layer 4: Final MAPCM integrated with ERP framework

The final MAPCM integrated with ERP framework (Figure 4) was developed through concurrent implementation and application of the

preceding layers.

Figure 4. Final MAPCM integrated with ERP framework



4.2. Tools
Cyber-physical systems offer rich sensory data. A network of sensors continuously monitors the condition of machine tools on the shop floor and tracks the work-in-progress status in the production system.

4.3. Implementation
While constructing complex software agents from the ground up using Agent-Oriented Programming (AOP) languages can be challenging due to the skills and knowledge required, readily accessible agent-building toolkits like JAFMAS, JATLite, ZEUS, and Sodabot provide valuable alternatives.

5. Discussion
Agent-based approaches are essential for future production control systems due to their decentralized decision-making, flexibility, and complexity-reducing capabilities. Integrating ERP modules into software agents and enabling data exchange and direct interactions among these agents can enhance self-management and intelligence in production systems. This integration reduces implementation costs compared to using separate commercial ERP software and a multi-agent system. Furthermore, real-time soft sensors become more accessible and user-friendly due to the software-based nature of production control agents.

6. Conclusion
The developed methodology offers a practical, cost-effective, and agile solution to enhance production control through ERP integration. By harnessing the synergistic capabilities of agents and ERP modules for monitoring, decision-making, and control, the limitations of traditional MAPCS models have been resolved. This transition results in autonomous production control systems that reduce reliance on human intervention. This methodology leverages well-established ERP information systems, following best practices to minimize errors, and enhance maintenance, modification, and performance, ultimately striving for error reduction.

Keywords: Production control, Multi-agent, ERP, Integration, Agile.

مقاله پژوهشی
تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵
ISSN: 2821-0964 eISSN: 2821-0816

مطالعات مدیریت کسب و کار هوشمند
سال دوازدهم، شماره ۴۶، زمستان ۱۴۰۲، ص ۲۵۹ تا ۲۹۶
ims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/ims.2023.73405.2319

توسعه متدولوژی کنترل تولید چندعاملی یکپارچه با ERP

پیام فقیهی دانشجوی دکتری رشته مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

مهرداد کازرونی * استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

تسریع در چابکی سیستم‌های کنترل تولید در محیط تولید پویا امروزی یکی از چالش‌هایی است که برای سرعت بخشیدن به آن تحقیقات زیادی با استفاده از سیستم‌های چندعاملی انجام شده است. مدل‌های فعلی این سیستم‌ها کاستی‌هایی نظیر پیش‌بینی‌پذیری محدود، قابلیت اطمینان پایین در تصمیم‌گیری، قابلیت محدود فهم‌پذیری وضعیت موجود سیستم و کنترل محدود و به طور کلی وجود سیستم‌های مستعد خطا در طراحی و پیاده‌سازی دارند. به منظور حل این مشکلات، پژوهش حاضر متدولوژی جدیدی برای کنترل تولید چندعاملی مبتنی بر ادغام با چند ماژول در قلب ERP ارائه می‌کند که قابلیت‌های سیستم در مواجهه با کاستی‌های فوق را بهبود می‌بخشد. روش تحقیق به کار گرفته‌شده در این مطالعه کیفی، با تمرکز بر ماهیت داده‌ها و توسعه ای-کاربردی، با هدف افزایش ادغام سیستم‌های کنترل تولید چندعاملی با ERP است. هدف بهبود جریان تولید مواد و کیفیت محصولات و نیمه‌ساخته‌ها در خط تولید با در نظر گرفتن پارامترهایی است که بر آن‌ها تأثیر می‌گذارد. دستاورد کلیدی این تحقیق، توسعه یک متدولوژی کنترل تولید قابل‌اعتماد است که شامل سه جزء می‌باشد: چارچوب تبادل داده، ابزارها و پیاده‌سازی. این مؤلفه‌ها از سیستم‌های اطلاعاتی ERP موجود مشتق شده‌اند که از نظر عملکردی بالغ هستند و با تمرکز بر نگهداری، اصلاح و عملکرد بر اساس تجارب برتر طراحی شده‌اند و هدف آن به حداقل رساندن خطاها است. متدولوژی توسعه‌یافته، راه‌حلی در دسترس و چابک برای ارتقا کنترل تولید با استفاده از سیستم ERP ارائه می‌دهد که هزینه پیاده‌سازی آن کمتر از پیاده‌سازی سیستم ERP تجاری به همراه یک سیستم چندعاملی مجزا است.

کلیدواژه‌ها: کنترل تولید، چندعاملی، برنامه‌ریزی منابع سازمان، یکپارچه‌سازی، چابک.

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است.

* نویسنده مسئول : kazerooni@ kntu.ac.ir

مقدمه

هدف از کنترل تولید، آشکارسازی ویژگی‌های اساسی سیستم‌های تولیدی و استفاده از آن‌ها برای تجزیه‌وتحلیل و بهبود مستمر در اجرای سیستم است که با جریان مواد و قطعات در داخل یک سیستم تولید سروکار دارد (Oluyisola et al., 2022). این پژوهش سعی در توسعه یک متدولوژی با عمومیت کامل و قدرتمند[1] دارد که با تغییر پارامترها از اعتبار ساقط نشود. متدولوژی توسعه‌یافته در کار حاضر یک سیستم کنترل جریان مواد و اطلاعات چابک و خودگردان را هدف قرار داده است و بیشتر بر روی جریان اطلاعاتی تمرکز دارد که کنترل‌کننده جریان مواد در سیستم تولید هستند.

نوآوری بارز این پژوهش کاربرد پنج ماژول ERP شامل ماژول‌های مدیریت زنجیره تأمین، کنترل موجودی، نگهداری و تعمیرات، کنترل کیفیت و مدیریت ارتباط با مشتریان می‌باشد که پس از توسعه نرم‌افزاری با مدل یکپارچگی ارائه‌شده، در نقش عامل‌های نرم‌افزاری عمل خواهند کرد. توسعه نرم‌افزاری ماژول‌های ERP به عامل‌های نرم‌افزاری با توجه به ماهیت مشترک نرم‌افزاری هر دوی آن‌ها امکان‌پذیر است. در سیستم‌های ERP تجاری موجود، هرکدام از ماژول‌های فوق معمولاً دارای ویژگی‌های اطلاعاتی منحصربه‌فرد مبتنی بر تجربیات برتر می‌باشند.

در متدولوژی توسعه‌یافته در این پژوهش، هدف آن است که نقش ماژول‌های ERP، از گردش فرایند با تعامل و کاربری و در بهترین حالت، کمک به تصمیم‌سازی مدیران، به نقش تصمیم‌گیرنده ارتقا یابد که منجر به توسعه یک سیستم کنترل تولید چابک برای کنترل دینامیک جریان مواد می‌شود. این تصمیم‌گیری‌ها توسط ماژول‌های ERP که پس از توسعه نرم‌افزاری، در نقش عامل‌های نرم‌افزاری عمل خواهند کرد انجام می‌گیرد؛ بنابراین سطح بالاتری از یکپارچه‌سازی داده مابین سیستم تولید واقعی و سیستم کنترل تولید چندعاملی و ERP ایجاد می‌شود که منجر به بهره‌گیری از مزایای تکنولوژی عامل و سیستم‌های چندعاملی و همچنین تجربیات برتر مورداستفاده در ماژول‌های ERP است.

---

1. Robust

درنتیجه، عکس‌العمل به تغییرات سیستم تولید به‌صورت بی‌درنگ امکان‌پذیر شده و توسعه یک متدولوژی کنترل تولید چابک انجام می‌گیرد.

شایان ذکر است که بهره‌گیری از ویژگی یکپارچه‌سازی[1] فراگیر در میان قسمت‌های مختلف فیزیکی سیستم تولید (و حتی در صورت امکان کل سازمان) با استفاده از فناوری انتقال بی‌درنگ[2] اطلاعات از ویژگی‌های برجسته متدولوژی ارائه شده است. توسعه این متدولوژی منجر به بهبود جریان مواد، بهینه‌سازی موجودی در جریان ساخت[3] (WIP) و تسریع در بهبود کنترل جریان تولید می‌شود. همچنین بررسی دقیق‌تر و ارتقا کیفیت مواد اولیه، نیمه‌ساخته‌ها و محصولات نهایی از بدو ورود به انبار مواد اولیه و در بازه زمانی نگهداری آن‌ها در انبار، در حین پردازش در سیستم تولید تا انبار محصولات نهایی و صدور دستورات اصلاحی مقتضی سفارش مواد یا ارتقا کیفیت امکان‌پذیر است. دستاورد این یکپارچه‌سازی علاوه بر تسری هوشمندسازی و چابک‌سازی سیستم تولید، به برطرف کردن اشکالات مدل‌های برنامه‌ریزی و کنترل تولید قبلی نظیر مدل‌های سلسله مراتبی کمک خواهد کرد و همچنین گامی در راستای برطرف نمودن کاستی‌های سیستم‌های کنترل تولید چندعاملی فعلی نظیر قابلیت محدود فهم‌پذیری وضعیت موجود سیستم و کنترل محدود، پیش‌بینی‌پذیری محدود، قابلیت اطمینان پایین در تصمیم‌گیری می‌باشد که منجر به دستیابی به یک سیستم کنترل تولید مستقل و خودران، قابل‌اطمینان و با دقت بالا در تصمیم‌گیری می‌شود. سایر ویژگی‌ها و مزایای سیستم‌های برنامه‌ریزی و کنترل تولید مبتنی بر عامل‌ها نظیر قابلیت دید، قابلیت شمارش، قابلیت ردیابی، قابلیت رهگیری و همچنین ویژگی‌های هوشمندی، خودگردانی و قابلیت همکاری در محیطی پویا از دیگر دستاوردهای این پژوهش است.

1. Integration
2. Real Time
3. Work In Process

پیشینه پژوهش

تلاش برای جستجوی راهبردهای کنترل تولید کارآمد سابقه طولانی در تولید صنعتی دارد (Brecher & Weck, 2022). تحقیقات گسترده در این زمینه، منجر به نوآوری‌های بسیاری در ارائه راهبردهای کنترل تولید و مدل‌های جریان مواد و اطلاعات شده است که سیستم‌های تولید امروزی را فعال می‌کند (Bartsch & Winkler,) (Schuh et al., 2022) 2022). در این میان، در دسترس بودن فناوری کامپیوتری مقرون‌به‌صرفه که منجر به معرفی سیستم‌های برنامه‌ریزی مبتنی بر فناوری اطلاعات شد، نقطه عطف مهمی در اجرای سیستم‌های پیشرفته کنترل تولید است (Karrer, 2012). بهره بردن از مزایای تکنولوژی‌هایی که دائماً قادر به رصد و دریافت اطلاعات مربوط به حالت جاری سیستم‌های تولید باشند، نظیر استفاده از ماشین‌های مجهز به سنسور مشارکت‌کننده در فرایند تولید و به‌روزرسانی و نمایش مجازی وضعیت سیستم تولید، منجر به افزایش یکپارچگی داده‌ها برای بهبود تصمیم‌گیری در کنترل تولید خواهد شد (Huang, 2022).

با پیدایش فناوری عامل[1] در دهه آخر قرن بیستم و تبدیل آن به یک موضوع قابل‌توجه در مراکز پژوهشی ژاپن و ایالات‌متحده، ارائه مدل‌های برنامه‌ریزی و کنترل تولید مبتنی بر عامل، در دستور کار پژوهشگران قرار گرفت و تحقیقات گسترده‌ای در توسعه فناوری‌های بر اساس آن در حال انجام است (Bär, 2022, Groß et al., 2021).

تاکنون تعاریف متنوع و گسترده‌ای برای مفاهیم عامل، سیستم چندعاملی و عامل نرم‌افزاری توسط پژوهشگران این حیطه ارائه شده است. اگرچه یک توافق کلی درخصوص اینکه عامل چیست وجود ندارد، می‌توان تعاریف ذیل را برای این مفاهیم در نظر گرفت: «عامل» هر چیزی است که بتواند محیط خود را از طریق حسگرها درک کند و از طریق کنشگرها بر روی آن محیط تأثیر بگذارد (Russell & Norvig, 1995) و «سیستم چندعاملی[2] (MAS)»، شبکه‌ای از عامل‌های نرم‌افزاری به‌هم‌پیوسته است که برای حل

1. Agent Technology
2. Multi-Agent System (MAS)

مشکلاتی که فراتر از ظرفیت یا دانش هر یک از حل‌کننده‌های مشکل است، تعامل دارند (Papazoglou, 2001) (Oroojlooy & Hajinezhad, 2022) و «عامل نرم‌افزاری» یک ماژول نرم‌افزاری مستقل و خودمختار است که وظایف محول شده از کاربر انسانی را انجام می‌دهد و با برنامه‌های کاربردی دیگر و سایر عوامل نرم‌افزاری در پلتفرم‌های مختلف برای تکمیل وظایف تعامل/ارتباط دارد (Namiot et al., 2016) (Zdravković et al., 2022). سیستم‌های مبتنی‌برعامل نرم‌افزارهای نسل بعدی هستند که قادر به تطبیق پویا با محیط کسب‌وکار در حال تغییر و حل طیف گسترده‌ای از مشکلات تجاری در زمینه‌هایی مانند مدیریت زنجیره تأمین، مراقبت‌های بهداشتی و نظارت بر بیمار، برنامه‌های کاربردی کنترل فرآیند و کشف دانش می‌باشند (Mesbahi et al., 2014). دستیابی به چابکی سیستم‌های کنترل تولید در محیط تولید پویا امروزی یکی از چالش‌هایی است که برای تسهیل آن تحقیقات زیادی با استفاده از سیستم‌های چندعاملی انجام شده است (Pulikottil et al., 2021; Barenji & Li, 2019; Vatankhah Barenji & Vatankhah Barenji, 2017). درحالی‌که همچنان چالش‌هایی نظیر محدودیت در قابلیت فهم‌پذیری وضعیت موجود سیستم و کنترل محدود، قابلیت اطمینان پایین در تصمیم‌گیری، پیش‌بینی پذیری محدود و به‌طورکلی دستیابی به سیستم‌های مستعد خطا در طراحی و پیاده‌سازی دارند (De la Prieta et al., 2019; Balaji & Srinivasan, 2010).

از سوی دیگر، برنامه‌ریزی منابع سازمان[1] (ERP) به عنوان یک راه‌حل مبتنی بر فناوری اطلاعات از دهه آخر قرن بیستم ظهور یافت و پژوهش و کاربرد آن به سرعت در سازمان‌های مختلف گسترش پیدا کرد. همچنین تحقیق و توسعه بر روی مفاهیم و گسترش کاربرد آن به‌صورت روزافزون در حال انجام است (De Scharf et al., 2022; Brabander et al., 2022; Febrianto & Soediantono, 2022; Senaya et al., 2022).

سیستم‌های ERP برنامه‌های نرم‌افزاری بسته‌بندی‌شده‌ای هستند که بیشتر نیازهای اطلاعاتی یک شرکت را در داخل و در سراسر حوزه‌های عملکردی یک سازمان پشتیبانی

1. Enterprise Resource Planning

می‌کنند (Kumar & van Hillegersberg, 2000). در ERP بر اساس ساختار نرم‌افزار ماژولار و پایگاه داده متمرکز، جریان اطلاعات در تولید، مالی، فروش، توزیع و همچنین فرآیندهای منابع انسانی با توانایی یکپارچه‌سازی بی‌درنگ برقرار می‌شود (Lin et al., 2006).

کاربرد عامل‌ها می‌تواند ERP را هوشمندتر کند. آن‌ها قابلیت‌هایی را برای تعامل مستقل با محیط اطراف خود و انجام اقدامات مستقل در حین همکاری با سایر سیستم‌ها فراهم می‌کنند (Faghihi & Kazerooni, 2023).

بر اساس مطالعات نویسندگان این مقاله، تکنیک‌های نظارتی موجود در مواجه با چالش‌های فوق، نیازمند توسعه و بهبود هستند. در این مقاله، راه‌حل پیشنهادی، توسعه یک متدولوژی کنترل تولید چندعاملی[1] (MAPCM) یکپارچه با ERP است.

روش

روش پژوهش توسعه‌ای-کاربردی از نظر هدف در این مطالعه بکار برده شده است که با استفاده از نتایج تحقیقات بنیادی پیشین به منظور بهبود و به کمال رساندن رفتارها، روش‌ها، ابزارها، وسایل، ساختارها و الگوهای مورداستفاده و نهایتاً با هدف پاسخ‌دهی به یک نیاز صنعتی در جامعه انجام می‌شود. همچنین روش پژوهش کیفی از نظر ماهیت داده مورد نظر می‌باشد، در این روش از جمع‌آوری و تجزیه‌وتحلیل داده‌های غیر عددی برای درک مفاهیم، نظرات یا تجربیات استفاده شده است و در جهت حل مسائل پیچیده از طریق تجزیه به استنتاج‌های معنادار که به راحتی برای همه قابل‌خواندن و درک است، اقدم می‌شود. به بیان دقیق‌تر، در این روش، افزایش یکپارچه‌سازی سیستم کنترل تولید چندعاملی و ERP بر اساس پارامترهای مؤثر بر جریان تولید مواد و کیفیت مواد اولیه و نیمه ساخته‌ها در خط تولید موردتوجه قرار گرفته است که به طور هم‌زمان از سیستم‌های اطلاعاتی ERP فعلی که از نقطه‌نظر عملکردی بالغ هستند و از دیدگاه نگهداری، اصلاح و

1. Multi-Agent Production Control Methodology (MAPCM)

عملکرد بر اساس تجارب برتر با حداقل خطا هستند، بهره می‌برد.

عامل به عنوان یک سیستم محاسباتی واقع در محیطی که می‌تواند به طور مستقل برای دستیابی به اهداف طراحی خود در آن محیط عمل کند، می‌باشد. قابلیت همکاری سیستم‌های چندعاملی نشان می‌دهد که هر عامل می‌تواند تحت تأثیر عامل‌ها یا انسان‌های دیگر قرار گیرد تا وظایف را مطابق با اهدافش برآورده سازد و به‌صورت خودران انجام دهد (Redjimi & Redjimi, 2022)(Tanajura et al., 2015)(Kim et al., 2020). عامل‌های نرم‌افزاری سیستم‌های کنترل تولید چندعاملی به‌صورت بسته‌های نرم‌افزاری با ماهیتی نرم‌افزاری توسط توسعه‌دهندگان ارائه می‌شوند (Wan Humayun et al., 2022 ; et al., 2022; Palanca et al., 2022; Ricardo Rodríguez et al., 2022).

از سوی دیگر ماژول‌های ERP نیز دارای ماهیت نرم‌افزای می‌باشند که با استفاده از تجربیات برتر در زمینه برنامه‌ریزی منابع سازمان توسط توسعه‌دهندگان تولید و به صورت محصولات ERP تجاری در بازار ارائه می‌شوند (Sravan Medicherla Abunadi, 2019 ; & Archana, 2022; Sukhavasi et al., 2021).

بر اساس روش پیشنهادی، با در نظرگرفتن ماهیت نرم‌افزاری مشترک ماژول‌های ERP با عامل‌های نرم‌افزاری سیستم‌های کنترل تولید چندعاملی، توسعه نرم‌افزاری می‌یابند. این امر در بخش پیاده‌سازی به صورت مشروح موردبررسی قرار گرفته است. در نتیجه توسعه نرم‌افزاری، قابلیت‌های ماژول‌های ERP به عامل‌های نرم‌افزاری ارتقا پیدا می‌کنند؛ بنابراین امکان عملکرد به‌صورت زیر برای MAPCM یکپارچه با ERP ایجاد می‌شود:

۱) تبادل داده مستقیم و بی‌درنگ عامل‌های نرم‌افزاری (ماژول‌های ERP) با حسگرها و اجزای گردآورنده داده که در سیستم تولید فیزیکی به نحو مقتضی در نظر گرفته شده‌اند.

۲) تصمیم‌گیری مستقل توسط هرکدام از عامل‌های نرم‌افزاری و یا –در صورت نیاز– تبادل داده عامل‌ها با یکدیگر به منظور استفاده از داده‌های بی‌درنگ سایر عامل‌ها و یا به‌کارگیری تجربیات برتر آن‌ها در تصمیم‌گیری.

۳) تبادل داده عامل‌های تصمیم‌گیرنده ERP از طریق سیستم اجرایی ساخت[1] (MES) با عملگرها که به نحو مقتضی در کف کارگاه و موقعیت مناسب در سیستم تولید جای گرفته‌اند و وظایف مشخص و از پیش تعریف‌شده‌ای را دنبال می‌کنند.

قابل ذکر است که افزودن ماژول‌های نرم‌افزاری کوچک‌تر به‌عنوان عامل‌های نرم‌افزاری به سیستم‌های اطلاعاتی موجود نیازی به سرمایه‌گذاری مالی قابل‌توجهی نخواهد داشت درنتیجه هزینه پیاده‌سازی متدولوژی توسعه‌یافته می‌تواند کمتر از پیاده‌سازی نرم‌افزار ERP تجاری به همراه یک سیستم چندعاملی مجزا باشد، این امر با توجه به هزینه‌بر بودن پیاده‌سازی صفر تا صد یک سیستم کنترل تولید چندعاملی با در نظر گرفتن زیرساخت‌های نرم‌افزاری و زیرساخت‌های ارتباطی با سیستم فیزیکی تولید اهمیت بالایی دارد.

بر این اساس، پنج ماژول مدیریت زنجیره تأمین، کنترل موجودی، نگهداری و تعمیرات، کنترل کیفیت و مدیریت ارتباط با مشتریان ERP از ماژول‌های فرآیند اصلی سازمان‌های تولیدی در نقش عامل نرم‌افزاری در لایه‌های مختلف چارچوب تبادل داده مورداستفاده قرار می‌گیرند تا با توجه به بلوغ عملکردی و حداقل خطا از نظر اصلاح و عملکرد بر اساس تجارب برتر آن‌ها، کاستی‌های پیش‌گفته مدل‌های فعلی سیستم‌های کنترل تولید چندعاملی را برطرف نمایند، سایر مزایا همچون کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی، عملکرد با دقت بالا در سیستم خودران کنترل تولید حاصل می‌شود.

درنتیجه سطح بالاتری از یکپارچگی بین سیستم کنترل تولید چندعاملی و ERP ایجاد می‌شود و متدولوژی توسعه‌یافته حاضر با بهره‌مندی هم‌زمان از مزایای سیستم‌های چندعاملی به همراه تجارب برتر ERP، راه‌حلی در دسترس و چابک برای ارتقا یک سیستم کنترل تولید مستقل و خودران در تصمیم‌گیری و با دقت بالا ارائه می‌دهد.

برای این منظور ابتدا توسعه چارچوب تبادل داده MAPCM یکپارچه با ERP انجام شده است. در گام بعدی، ابزارها و اجزای گردآورنده داده مناسب به منظور استفاده در چارچوب تبادل داده توسعه‌یافته مطرح و موردبررسی قرار می‌گیرد و در گام آخر نیز

1. Manufacturing Execution System (MES)

پیاده‌سازی متدولوژی کنترل تولید توسعه‌یافته موردبررسی قرار می‌گیرد.

یافته‌ها

در این بخش توسعه چارچوب تبادل داده کنترل تولید چندعاملی یکپارچه با ERP نهایی (شکل ۴) به‌صورت گام‌به‌گام در چهار لایه انجام گرفته است. به منظور تسهیل درک توسعه‌های انجام‌گرفته در هر مرحله و تبادل داده صورت گرفته در این لایه‌ها، داده‌های لایه اول با رنگ مشکی، داده‌های ناشی از توسعه لایه دوم با رنگ آبی، داده‌های ناشی از توسعه لایه سوم با رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند و در چهارچوب نهایی (لایه چهارم) که از ترکیب سه لایه قبلی به دست آمده است، داده‌ها با رعایت الگوی رنگی لایه‌های قبلی نمایش داده شده‌اند.

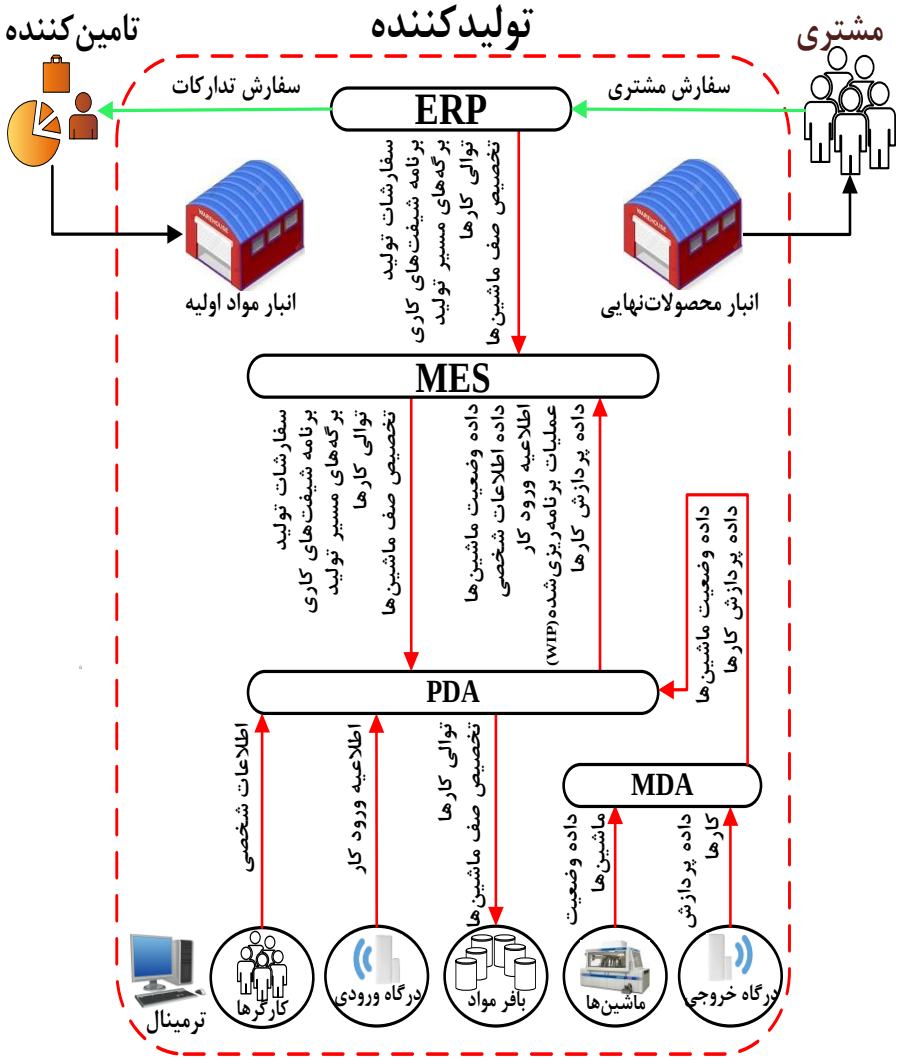
- **لایه اول: چارچوب تبادل داده اولیه کنترل تولید**

چارچوب تبادل داده ارائه‌شده توسط فرازون و همکاران[1] (۲۰۱۸) با اعمال تغییراتی در شکل ۱ ارائه شده است. این چارچوب به منظور تبادل داده ERP با قسمت‌های مختلف سیستم تولید شامل سیستم گردآوری داده‌های ماشین[2] (MDA)، سیستم گردآوری داده‌های تولید[3] (PDA) و MES تدوین شده است. روش مورداستفاده برای تبادل داده‌ها در این چارچوب استفاده از MES به عنوان هسته مرکزی داده برای اتصال سیستم تولید فیزیکی و سیستم کنترل تولید چندعاملی است. MES به‌روزرسانی‌های پیوسته داده‌های برنامه‌ریزی‌شده شامل سفارش‌های تولید، برنامه شیفت‌های کاری، برگه‌های مسیر تولید[4] برای محصولات مختلف را از ERP دریافت می‌کند و داده‌هایی نظیر داده‌های پردازش کار، اطلاعات شخصی، وضعیت ماشین و وضعیت جاری عملیات برنامه‌ریزی‌شده را از سیستم PDA دریافت می‌کند (Frazzon et al., 2018).

1. Frazzon & et al
2. Machine Data Acquisition (MDA)
3. Production Data Acquisition (PDA)
4. Route sheets

شکل ۱. چارچوب تبادل داده اولیه کنترل تولید

(اقتباس: فرازون و همکاران، ۲۰۱۸)

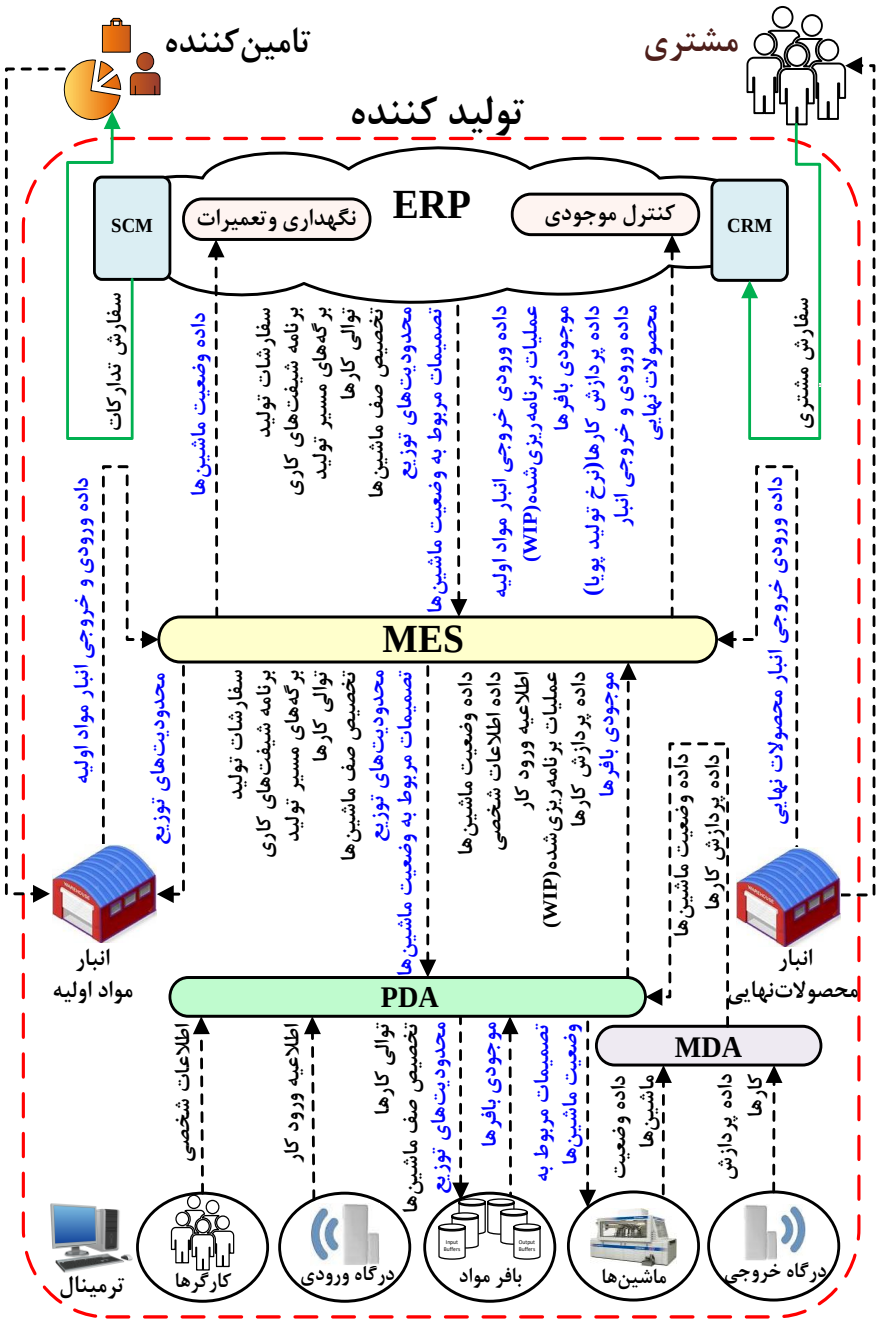


- **لایه دوم: چارچوب تبادل داده کنترل تولید چندعاملی یکپارچه با ERP – رویکرد کنترل جریان مواد**

به منظور توسعه MAPCM یکپارچه با ERP بر اساس اعمال محدودیت توزیع و ارسال بی‌درنگ موجودی در جریان ساخت، چارچوب تبادل داده نمایش داده شده در شکل ۲ توسعه یافته است. در چارچوب توسعه‌یافته اعمال محدودیت توزیع و ارسال بی‌درنگ موجودی در جریان ساخت بر مبنای دینامیک تولید و نگهداری و تعمیرات پیش‌بینی‌نشده با مشارکت ماژول کنترل موجودی و ماژول نگهداری و تعمیرات ERP انجام می‌گیرد. شکل ۲ همچنین جریان اطلاعات و چگونگی تبادل داده از فضای فیزیکی داخل سیستم تولید تا فضای نرم‌افزاری سیستم کنترل تولید چندعاملی یکپارچه با ERP را نمایش می‌دهد.

در این لایه از چارچوب تبادل داده، ماژول تعمیر و نگهداری و ماژول کنترل موجودی ERP در نقش عامل‌های نرم‌افزاری وظیفه تبادل و پردازش اطلاعات را به عهده می‌گیرند و جریان اطلاعات زیر با استفاده از داده‌های ناشی از حسگرهای موجود در اجزای سیستم تولید فیزیکی و داده‌های انسانی به‌صورت ارائه‌شده در شکل ۲ ایجاد می‌شود که در ادامه شرح داده شده است:

شکل ۲. چارچوب تبادل داده کنترل تولید چندعاملی یکپارچه با **ERP** - رویکرد کنترل جریان مواد



در این لایه، MES علاوه بر تبادل داده‌های لایه اول داده‌های زیر را نیز دریافت می‌کند:

- داده ورودی و خروجی انبار مواد اولیه
- موجودی بافرها در کف کارگاه از PDA
- داده ورودی و خروجی انبار محصولات نهایی

جریان تبادل داده بی‌درنگ ماژول کنترل موجودی ERP با MES منجر به دریافت داده‌های فوق می‌شود که با توسعه نرم‌افزاری این ماژول به عنوان عامل تصمیم‌گیرنده می‌تواند با تبادل داده به‌صورت خودگردان و بی‌درنگ با سایر ماژول‌های ERP که در این مدل در نقش عامل‌های نرم‌افزاری فعالیت می‌کنند به داده‌های زیر دسترسی یابد:

- داده نرخ تولید (داده‌های بی‌درنگ درگاه ورودی و درگاه خروجی کف کارگاه)،
- داده عملیات برنامه‌ریزی‌شده (موجودی در جریان ساخت)،
- داده پردازش کار (محصولات نهایی).

در همین زمان ماژول نگهداری و تعمیرات ERP داده‌های زیر را دریافت می‌کند:

- وضعیت ماشین‌ها از MES،

در چارچوب تبادل داده این داده‌ها از قسمت ماشین‌ها در کف کارگاه به سیستم PDA و از آن به MDA و در نهایت به MES ارسال می‌شوند.

با توجه به توسعه نرم‌افزاری و عملکردی ماژول‌های ERP و فعالیت آن‌ها در نقش عامل‌های نرم‌افزاری در متدولوژی پژوهش حاضر، داده‌های بی‌درنگ مربوط به نرخ تولید و همچنین اطلاعات ورودی و خروجی انبارها (انبار مواد اولیه و انبار محصولات نهایی) توسط عامل کنترل موجودی[1] به همراه داده‌های بی‌درنگ وضعیت ماشین‌ها در کف کارگاه توسط عامل نگهداری و تعمیرات[2] و داده‌های بی‌درنگ از بافر مواد[3] در کف کارگاه، داده‌های پردازش کار (محصولات نهایی)، داده‌های نرخ تولید، نیز دریافت

1. Inventory (WIP&BOM) Control
2. Maintenance
3. Material Buffer

می‌گردد. علاوه بر اطلاعات فوق سایر داده‌ها ناشی از تبادل داده مستقل و خودران عامل‌ها در تعامل با سایر ماژول‌های ERP و دسترسی به داده‌هایی نظیر اطلاعات نگهداری و تعمیرات برنامه‌ریزی‌شده، عملیات برنامه‌ریزی‌شده (موجودی در جریان ساخت) که در ERP موجود است به همراه تجربیات برتر موجود در ماژول‌ها، توانایی تصمیم‌گیری و اخذ تصمیمات بهینه در خصوص موارد زیر توسط MAPCM یکپارچه با ERP امکان‌پذیر است:

- تصمیم‌گیری بی‌درنگ در خصوص عملکرد و وضعیت ماشین‌ها در لحظه
- اعمال محدودیت در ارسال مواد اولیه و نیمه‌ساخته به کمک اطلاعات بی‌درنگ فوق
- توزیع و ارسال بی‌درنگ موجودی در جریان ساخت بر مبنای دینامیک تولید و نگهداری و تعمیرات پیش‌بینی‌نشده

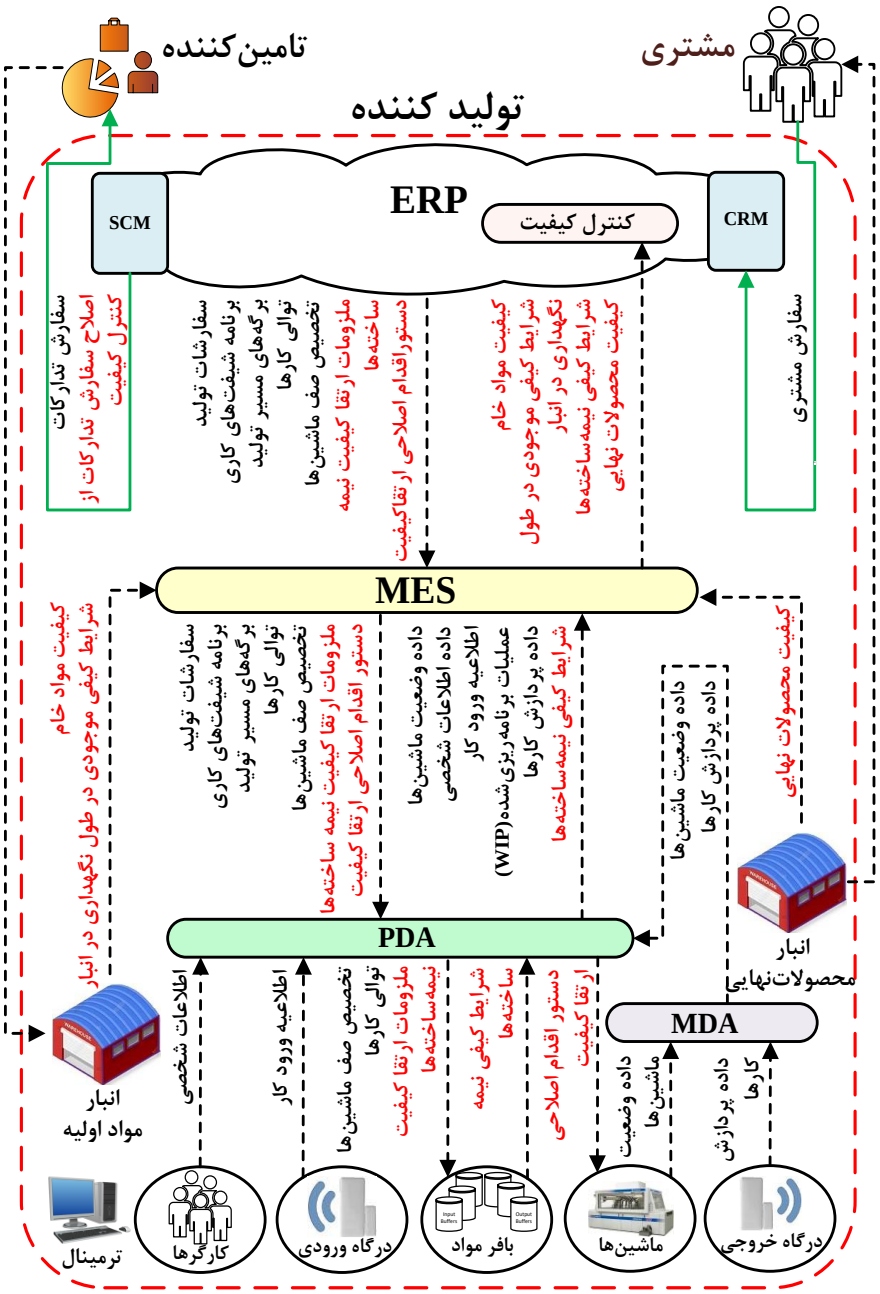
بنابراین دستورات اعمال محدودیت توزیع و تصمیمات مربوط به وضعیت پویای ماشین‌ها به‌صورت بی‌درنگ توسط ERP صادر و به MES ارسال می‌شود. MES دستور محدودیت توزیع را به انبار مواد اولیه و همچنین به PDA و از آنجا به قسمت بافر مواد در کف کارگاه ارسال می‌کند. دستورات مربوط به وضعیت پویای ماشین‌ها نیز که بر اساس شرایط نگهداری و تعمیرات پیش‌بینی‌نشده و با کمک تجربیات برتر ERP و تبادل داده در یک محیط چندعاملی صادرشده، توسط سیستم اجرایی ساخت به PDA و از آنجا به قسمت ماشین‌ها در کف کارگاه ارسال می‌شود. این عملکرد MAPCM یکپارچه با ERP منجر به بهبود در توابع هدف زمان‌بندی نظیر توابع هدف موجودی در جریان ساخت کل و حداکثر زمان بیکاری ماشین‌آلات نیز می‌گردد.

- **لایه سوم: چارچوب تبادل داده کنترل تولید چندعاملی یکپارچه با ERP – رویکرد کنترل کیفیت**

در چارچوب تبادل داده ارائه‌شده در شکل ۳ ماژول کنترل کیفیت ERP پس از توسعه به عامل نرم‌افزاری با استفاده از داده‌های انسانی، داده‌های سیستم سایبر–فیزیکال و ناشی از

حسگرهای موجود در سیستم تولید فیزیکی در سه فاز بررسی کیفیت را انجام می‌دهد:

شکل ۳. چارچوب تبادل داده کنترل تولید چندعاملی یکپارچه با ERP – رویکرد کنترل کیفیت



- فاز اول بررسی کیفیت مواد اولیه است که خود شامل دو قسمت می‌باشد:
  - ❖ کیفیت مواد اولیه در بدو ورود
  - ❖ کیفیت مواد اولیه در بازه زمانی نگهداری

که به‌روزرسانی داده‌های آنلاین مربوط به این فاز از انبار مواد اولیه به MES و از آنجا به ماژول (عامل) کنترل کیفیت ارسال می‌شود.

- فاز دوم کنترل کیفیت محصول در حین فرآیند ساخت است.

در این فاز داده‌های شرایط کیفیت نیمه ساخته‌ها از بافر (های) مواد در کف کارگاه به ترتیب به PDA، سپس MES و از آن به ماژول کنترل کیفیت ERP ارسال می‌شود.

- فاز سوم بررسی کیفیت محصولات نهایی است.

که به‌روزرسانی داده‌های کنترل کیفیت محصولات نهایی به‌صورت پیوسته و بی‌درنگ از انبار محصولات نهایی به MES و از آن به ماژول کنترل کیفیت ERP ارسال می‌شود.

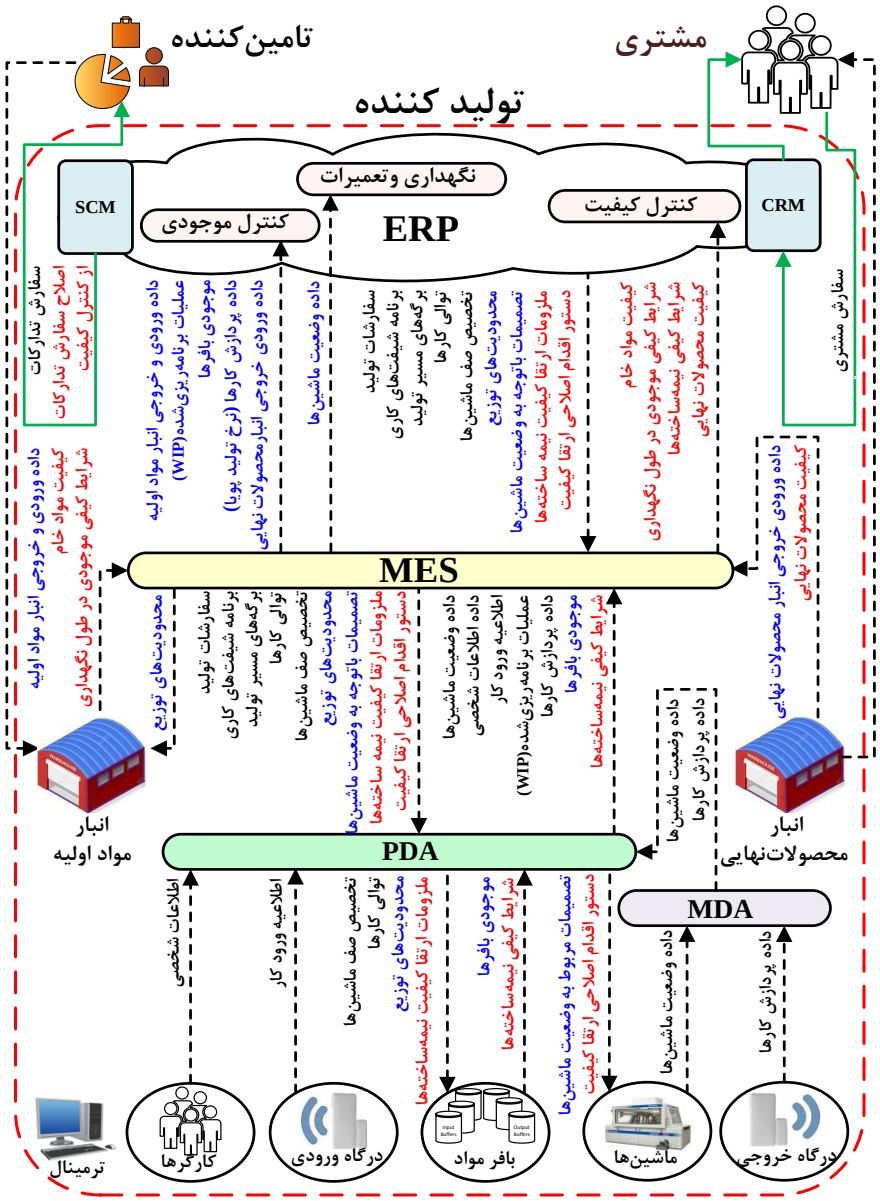
بنابراین ERP به عنوان سیستم کنترل تولید چندعاملی با ویژگی‌هایی نظیر خودگردانی، قابلیت دید و قابلیت همکاری در محیط پویا مابین ماژول‌های خود در نقش عامل‌های نرم‌افزاری و تبادل اطلاعات و داده‌هایی نظیر ویژگی‌ها و خصوصیات موردنیاز برای مواد اولیه و نیمه ساخته مربوط به هر شیفت طبق برنامه تولید و همچنین داده‌ها و اطلاعات عامل کنترل کیفیت که در بالا توضیح داده شد و دستورالعمل‌های مبتنی بر تجربیات برتر، دستور اصلاحات سفارش تدارکات را برای عامل مدیریت زنجیره تأمین ارسال می‌کند و اصلاحات جدید در سفارش تأمین مواد به تأمین‌کنندگان انعکاس می‌یابد، علاوه بر این دستورات ارتقا کیفیت نیمه‌ساخته‌ها و اقدام اصلاحی ارتقا کیفیت (مربوط به اصلاح فرآیند تولید) را به MES ارسال می‌کند که این دستورات از آنجا به PDA ارسال شده و توسط آن دستور ارتقا کیفیت نیمه‌ساخته‌ها به قسمت بافرهای مواد و دستور اقدام اصلاحی ارتقا کیفیت به قسمت ماشین‌ها در کف کارگاه ارسال می‌شود.

- **چارچوب تبادل داده کنترل تولید چندعاملی یکپارچه با ERP – نهایی**

با پیاده‌سازی و کاربرد هم‌زمان لایه‌های تبادل داده کنترل تولید پیشین توسعه چارچوب

چندعاملی تبادل داده کنترل تولید یکپارچه با ERP نهایی مطابق با شکل ۴ انجام گرفته است.

شکل ۴. چارچوب تبادل داده کنترل تولید چندعاملی یکپارچه با ERP – نهایی



ابزارها

نظارت بخش مهمی از کنترل و مدیریت فرآیند تولید است و نقش اساسی در تضمین چابکی در سیستم تولید، استحکام فرآیند، پاسخگویی به خواسته‌های مشتری و دستیابی به محیط تولید پایدار دارد. پیشرفت‌های اخیر در سیستم‌های اطلاعاتی و فناوری رایانه، امکان اجرای فلسفه‌های جدیدی را فراهم می‌آورد که برنامه‌های نظارتی مختلف را در یک سیستم پیچیده متصل از طریق سیستم‌های فناوری اطلاعات در سطح شرکت و با سیستم‌هایی که در کل زنجیره تأمین کار می‌کنند، ادغام می‌نماید (Oborski, 2014) (Klos et al., 2022). یکی از مواردی که در سازمان و سیستم تولید دائماً کنترل می‌شود موجودی است، در این قسمت، برخی از ابزارها و اجزای گردآورنده داده مناسب که در MAPCM یکپارچه با ERP قابل به‌کاربردن هستند، معرفی شده‌اند.

شبکه سنسورها وضعیت ماشین‌ابزارها در کف کارگاه و همچنین وضعیت موجودی در سیستم تولید را نظارت می‌کند. به‌عنوان نمونه سنسورهای دما، سنسورهای لرزش، حسگرهای انرژی الکتریکی برای بررسی شرایط ابزار در ماشین ابزار استفاده می‌شوند (Setiawan et al., 2020). سیستم شناسایی فرکانس رادیویی[1] (RFID) برای بررسی وضعیت قطعه کار کاربرد دارد و می‌تواند تعیین کند که آیا کامل شده یا در حال انجام است و یا در بافر یا انبار پالت در انتظار است. در صورت استفاده از عامل یا عامل‌های مناسب در کنار ماژول‌های ERP که در متدولوژی وظیفه عامل‌های تصمیم‌گیرنده را بر عهده دارند. نظیر عامل سیار قلم کالا[2] (IMA) که بیانگر یک قلم کالای پیوست شده با برچسب RFID است و می‌تواند فناوری RFID را به منظور فراهم آوردن فعالیت‌های ساخت یک قلم کالا با توجه به زمان‌بندی عملیات برنامه‌ریزی‌شده و دستورالعمل‌های تولید به کارگیرد یا عامل منبع[3] (RA) که منبع تولید پیوست شده با برچسب RFID است و مسئول فرآهم‌آوری به‌موقع اطلاعات تولید منابع ساخت می‌باشد (Wang & Lin, 2009)

1. Radio Frequency Identification (RFID)
2. Item Mobile Agent (IMA)
3. Resource Agent (RA)

(Vogel-Heuser et al., 2020)، شبکه حسگر وضعیت ماشین ابزار و وضعیت موجودی را نظارت می‌کند و با توجه به زمان‌بندی عملیات کف کارگاه، وظایف عملیات را پردازش خواهد کرد. باید توجه داشت داده‌های سنسوری بیشتری می‌توانند توسط سیستم‌های سایبر-فیزیکال تأمین شوند.

پیاده‌سازی

یکی از چالش‌های اصلی پیاده‌سازی MAPCM یکپارچه با ERP، ارتقا ماژول‌های ERP به عامل‌های نرم‌افزاری می‌باشد، زبان‌های برنامه‌نویسی عامل‌گرا[1] (AOP) زبان‌های برنامه‌نویسی هستند که برای برنامه‌نویسی عامل‌ها توسعه یافته‌اند (Badjonski et al., 1999) برای این هدف بسیار کارآمد هستند. اگرچه به دلیل مهارت‌ها و دانش موردنیاز، ساخت عوامل نرم‌افزاری پیچیده از ابتدا دشوار است، می‌توان از بسته‌های ابزار[2] ساخت عامل که به‌طور گسترده در دسترس هستند استفاده کرد. به عنوان مثال:

- چارچوب عامل مبتنی بر جاوا برای سیستم‌های چندعاملی[3] که در دانشگاه سینسیناتی[4] توسعه یافته است، از پیاده‌سازی عامل‌های ارتباطی در جاوا پشتیبانی می‌کند و پشتیبانی ارتباطی، زبانی و هماهنگی را از طریق چندین کلاس جاوا فراهم می‌کند (Lillis, 2013).
- جات لیت[5] یک جعبه‌ابزار مبتنی بر جاوا می‌باشد که توسط دانشگاه استنفورد[6] توسعه یافته است. این جعبه‌ابزار زیرساختی فراهم می‌کند که در آن عامل‌ها با استفاده از یک نام و یک رمز عبور به همراه یک تسهیل‌کننده مسیریاب پیام عامل[7] ثبت‌نام می‌کنند، به اینترنت متصل یا قطع می‌شوند و ارسال و دریافت پیام، انتقال فایل‌ها و فراخوانی برنامه‌ها

1. Agent-Oriented Programming (AOP)
2. Toolkits
3. The Java-based agent framework for multi-agent systems (JAFMAS)
4. University of Cincinnati
5. Java Agent Template, Lite (JATLite)
6. Stanford University
7. Agent message router facilitator

یا اقدامات دیگر در رایانه‌های مختلف که در آن اجرا می‌شوند را انجام می‌دهند (Pal et al., 2020).

- زئوس[1] که توسط آزمایشگاه‌های مخابرات بریتانیا با استفاده از جاوا توسعه داده شده است، محیط سازنده‌ای است که کتابخانه‌ای از اجزا و ابزارهای نرم‌افزاری را ارائه می‌کند. این محیط طراحی، توسعه و استقرار سریع سیستم‌های عامل را تسهیل می‌کند (Samigulina et al., 2018).
- سودابوت[2]، یک پروژه تحقیقاتی آزمایشگاه هوش مصنوعی موسسه تکنولوژی ماساچوست[3] است که چارچوب محاسباتی جهانی برای ایجاد و استفاده از برنامه‌های کاربردی عامل ارائه می‌کند. این سیستم ساخت و محیط کاربرد عامل نرم‌افزاری، ساخت برنامه‌های عامل پیچیده با رابط کاربری گرافیکی را ساده‌تر می‌نماید (Satybaldiyeva et al., 2021).

بحث و نتیجه‌گیری

رویکردهای مبتنی بر عامل به دلیل عدم تمرکز تصمیم‌گیری، انعطاف‌پذیری و ویژگی کاهش‌دهنده پیچیدگی آن‌ها یکی از راه‌حل‌های اجتناب‌ناپذیر در سیستم‌های کنترل تولید آینده می‌باشند. توسعه نرم‌افزاری ماژول‌های مرتبط ERP و استفاده از اجزای سیستم‌های اطلاعاتی ERP که از نقطه‌نظر عملکردی بالغ هستند و از دیدگاه نگهداری، اصلاح و عملکرد بر اساس تجارب برتر با حداقل خطا هستند، در نقش عامل‌های نرم‌افزاری درکنار تبادل اطلاعات و تعاملات مستقیم بین عامل‌ها که به منظور دستیابی به سطح بالاتری از خودگردانی و هوشمندسازی برای سیستم‌های تولید استفاده‌کننده از MAPCM یکپارچه با ERP، علاوه بر اینکه می‌تواند منجر به کاهش هزینه پیاده‌سازی نسبت به پیاده‌سازی نرم‌افزاری ERP تجاری به همراه یک سیستم چندعاملی مجزا شود، همچنین منجر به

1. ZEUS
2. Sodabot
3. Massachusetts Institute of Technology (MIT)

ویژگی‌های منحصربه‌فرد ذیل خواهد شد:

- توسعه مستحکمی که با تغییر پارامترها از اعتبار ساقط نمی‌شود.
- به‌کارگیری ماژول‌های مرتبط در ERP به‌صورت عامل‌های نرم‌افزاری، تعاملات مستقیم بین عامل‌ها با یکدیگر و یکپارچه‌سازی آن‌ها
- استفاده از عامل‌های هوشمندتر نسبت به سیستم‌های کنترل تولید چندعاملی موجود به دلیل دسترسی عامل‌ها به ویژگی‌های اطلاعاتی ناشی از امکان استفاده از دانش و اطلاعات بر اساس تجربیات برتر ماژول‌های ERP برای تصمیم‌گیری

ویژگی‌های فوق زمینه‌ساز دستیابی به نتایج ذیل خواهند بود:

- استفاده از فناوری عامل منجر به دستیابی به تمام مزایای سیستم‌های چندعاملی نظیر قابلیت نظارت، قابلیت کنترل بر تعداد، قابلیت ردیابی/رهگیری و همچنین ویژگی‌های هوش، خودگردانی، قابلیت تحرک و همکاری خواهد بود.
- تعاملات دقیق و بی‌درنگ مابین عامل‌ها و ماژول‌های هماهنگ‌کننده و تصمیم‌گیری بر اساس مدل‌های تصمیم‌گیری متنوع، زمینه‌ساز کاهش بارهای کنترل، تصمیم‌گیری و همچنین خروج متدولوژی از پیچیدگی‌ها خواهد شد.
- در نتیجه توسعه و استفاده از قواعد خودگردانی و در صورت امکان هوشمندسازی مبتنی بر شرایط کنترل تولید قابل پیش‌بینی و تدوین برای عامل‌های نرم‌افزاری، درکنار استفاده از تجربیات برتر ماژول‌های ERP تصمیم‌گیری تا سطوح معینی از این که گزارش‌های مختلف قسمت‌های گوناگون سیستم تولید یا سازمان تولیدی توسط اشخاص دریافت و بررسی شود، بی‌نیاز می‌شود.
- سه مورد فوق منجر به چابک‌سازی سیستم‌های تولید استفاده‌کننده از متدولوژی توسعه‌یافته پیشنهادی خواهد شد که دستاورد ارزشمند دیگری برای این پژوهش محسوب می‌شود.

از سایر نقاط قوت متدولوژی توسعه‌یافته در پژوهش حاضر امکان‌پذیری کاربرد و

سهولت به‌کارگیری حسگرهای نرم‌افزاری بی‌درنگ[1] به دلیل ماهیت نرم‌افزاری عامل‌های کنترل تولید می‌باشد. این مسئله با توجه به کارایی روزافزون حسگرهای نرم‌افزای بی‌درنگ به‌عنوان جایگزین حسگرهای فیزیکی از اهمیت بالایی برخوردار است (Chen & Huang, 2022) (Bono et al., 2022) (Alassery, 2022). بخصوص در موارد ذیل:

- هزینه بالای تأمین اغلب حسگرهای فیزیکی
- سنجش پارامترهایی که مستقیماً حسگری برای سنجش آن‌ها وجود ندارد.
- اهمیت پارامتر موردسنجش به حدی زیاد است که لزوم حسگر افزونه[2] وجود دارد.
- در صورت خرابی و از کارافتادن حسگرهای فیزیکی تا زمان تعمیر می‌تواند به‌عنوان جایگزین[3] مورداستفاده قرار گیرد.

به بیان جامع‌تر با در نظر گرفتن قابلیت‌های متقابلی که عامل‌های هوشمند و ماژول‌های ERP در نظارت، تصمیم‌گیری و کنترل می‌توانند در اختیار سیستم کنترل تولید قرار دهند، کاستی‌های مدل‌های فعلی سیستم‌های کنترل تولید چندعاملی نظیر قابلیت درک و کنترل محدود، پیش‌بینی پذیری محدود، قابلیت اطمینان پایین در تصمیم‌گیری، برطرف شده و علاوه بر اینکه سیستم‌های کنترل تولید بی‌نیاز به تصمیمات انسانی توسعه مضاعف یافته و متحول می‌شوند، انتقال از سیستم کنترل تولید مستعد خطا به سیستم کنترل تولید با بهره‌گیری از اجزایی که از نقطه‌نظر عملکردی، بالغ و از دیدگاه نگهداری، اصلاح و عملکرد بر اساس تجارب برتر، با حداقل خطا است، انجام می‌گیرد.

مطالعات آتی

با توجه به وسعت عملیات، جامع و سازمان‌نگر بودن ERP و ماژول‌های آن، امکان توسعه و گسترش این متدولوژی فراتر از سیستم تولید برای تمامی بخش‌های مختلف تشکیل‌دهنده

1. Soft sensors
2. Redundant
3. By path

سازمان وجود خواهد داشت و بنابراین توسعه مدل تا حیطه‌های وسیع‌تر نظیر کل سازمان تولید، موضوع مناسبی برای پژوهش‌های بعدی است.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی ندارند.

ORCID

Payam Faghihi **http://orcid.org/0000-0002-6724-4531**

Mehrdad Kazerooni **http://orcid.org/0000-0003-0380-2685**

منابع

Abunadi, I. (2019). Enterprise architecture best practices in large corporations. *Information*, *10*(10), 293.

Alassery, F. (2022). Predictive maintenance for cyber physical systems using neural network based on deep soft sensor and industrial internet of things. *Computers and Electrical Engineering*, *101*, 108062.

Badjonski, M., Ivanović, M., & Budimac, Z. (1999). Agent oriented programming language LASS. *Object-Oriented Technology and Computing Systems Re-Engineering*, 111.

Balaji, P. G., & Srinivasan, D. (2010). An introduction to multi-agent systems. *Innovations in Multi-Agent Systems and Applications-1*, 1–27.

Bär, S. (2022). Integration into a Flexible Manufacturing System. In *Generic Multi-Agent Reinforcement Learning Approach for Flexible Job-Shop Scheduling* (pp. 117–133). Springer.

Barenji, A. V., & Li, Z. (2019). AN AGENT-BASED APPROACH TO DYNAMIC SCHEDULING AND CONTROL FOR A FLEXIBLE SYSTEM. *International Journal of Industrial Engineering*, *26*(3).

Bartsch, D., & Winkler, H. (2022). Smart order as a new instrument for production control. *Hamburg International Conference of Logistics (HICL) 2022*, 149–175.

Bono, F. M., Radicioni, L., Cinquemani, S., Conese, C., & Tarabini, M. (2022). Development of soft sensors based on neural networks for detection of anomaly working condition in automated machinery. *NDE 4.0, Predictive Maintenance, and Communication and Energy Systems in a Globally Networked World*, *12049*, 56–70.

Brecher, C., & Weck, M. (2022). Production Control Technology. In *Machine Tools Production Systems 3* (pp. 605–638). Springer.

Chen, H., & Huang, B. (2022). *Fault-tolerant Soft Sensors for Dynamic Systems*.

De Brabander, B., Van Looy, A., & Viaene, S. (2022). Toward Digital ERP: A Literature Review. *International Conference on Research Challenges in Information Science*, 685–693.

De la Prieta, F., Rodríguez-González, S., Chamoso, P., Corchado, J. M., & Bajo, J. (2019). Survey of agent-based cloud computing applications. *Future Generation Computer Systems*, *100*, 223–236.

Faghihi, P., & Kazerooni, M. (2023). Multi-Agent Enterprise Resource Planning Production Control (MAERPPC) Methodology Based on

Personnel Health Monitoring. *Scientia Iranica*.

Febrianto, T., & Soediantono, D. (2022). Enterprise Resource Planning (ERP) and Implementation Suggestion to the Defense Industry: A Literature Review. *Journal of Industrial Engineering & Management Research*, *3*(3), 1–16.

Frazzon, E. M., Kück, M., & Freitag, M. (2018). Data-driven production control for complex and dynamic manufacturing systems. *CIRP Annals*, *67*(1), 515–518.

Groß, S., Gerke, W., Plapper, P., & Vette-Steinkamp, M. (2021). Agile and Autonomous Production Control for Remanufacturing. *2021 9th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA)*, 231–236.

Huang, Q. (2022). Intelligent manufacturing. In *Understanding China's Manufacturing Industry* (pp. 111–127). Springer.

Humayun, M., Jhanjhi, N. Z., Almotilag, A., & Almufareh, M. F. (2022). Agent-based medical health monitoring system. *Sensors*, *22*(8), 2820.

Karrer, C. (2012). *Engineering production control strategies: A guide to tailor strategies that unite the merits of push and pull*. Springer Science & Business Media.

Kim, Y. G., Lee, S., Son, J., Bae, H., & Do Chung, B. (2020). Multi-agent system and reinforcement learning approach for distributed intelligence in a flexible smart manufacturing system. *Journal of Manufacturing Systems*, *57*, 440–450.

Klos, S., Patalas-Maliszewska, J., & Tront, D. (2022). A Model for the Intelligent Supervision of Production for Industry 4.0. *Journal of Physics: Conference Series*, *2198*(1), 12005.

Kumar, K., & van Hillegersberg, J. (2000). Enterprise resource planning: introduction. *Communications of the ACM*, *43*(4), 22–26.

Lillis, D. J. (2013). *Internalising interaction protocols as first-class programming elements in multi agent systems*. University College Dublin (Ireland).

Lin, H.-Y., Hsu, P.-Y., & Ting, P.-H. (2006). ERP systems success: An integration of IS success model and balanced scorecard. *Journal of Research and Practice in Information Technology*, *38*(3), 215–228.

Mesbahi, N., Kazar, O., Zoubeidi, M., & Benharzallah, S. (2014). An agent-based modeling for an enterprise resource planning (ERP). In *Studies in Computational Intelligence* (Vol. 551, pp. 225–234). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05503-9_22

Namiot, D., Sukhomlin, V., & Shargalin, S. (2016). On Software Agents in ERP Systems. *International Journal of Open Information*

Technologies, *4*(6), 49–54.

Oborski, P. (2014). Developments in integration of advanced monitoring systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *75*(9), 1613–1632.

Oluyisola, O. E., Bhalla, S., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. O. (2022). Designing and developing smart production planning and control systems in the industry 4.0 era: a methodology and case study. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *33*(1), 311–332.

Oroojlooy, A., & Hajinezhad, D. (2022). A review of cooperative multi-agent deep reinforcement learning. *Applied Intelligence*, 1–46.

Pal, C.-V., Leon, F., Paprzycki, M., & Ganzha, M. (2020). A review of platforms for the development of agent systems. *ArXiv Preprint ArXiv:2007.08961*.

Palanca, J., Rincon, J., Julian, V., Carrascosa, C., & Terrasa, A. (2022). Developing IoT Artifacts in a MAS Platform. *Electronics*, *11*(4), 655.

Papazoglou, M. P. (2001). Agent-oriented technology in support of e-business. *Communications of the ACM*, *44*(4), 71–77.

Pulikottil, T., Estrada-Jimenez, L. A., Rehman, H. U., Barata, J., Nikghadam-Hojjati, S., & Zarzycki, L. (2021). Multi-agent based manufacturing: current trends and challenges. *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1–7.

Redjimi, K., & Redjimi, M. (2022). A Multi-Agent System for Industrial Simulators Design. In *Advances in Deep Learning, Artificial Intelligence and Robotics* (pp. 129–140). Springer.

Ricardo Rodríguez, A. R., Benítez, I. F., González Yero, G., & Núñez Alvarez, J. R. (2022). Multi-agent system for steel manufacturing process. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, *12*(3), 2441–2453.

Russell, S., & Norvig, P. (1995). Artificial intelligence: A modern approach prentice-hall. *Englewood Cliffs*.

Samigulina, G. A., Nyusupov, A. T., & Shayakhmetova, A. S. (2018). Analytical review of software for multi-agent systems and their applications. *News of the National Academyof Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences.-3 (429)*, 173–181.

Satybaldiyeva, A., Ismailova, A., Moldasheva, R., Mukhanova, A., & Kadirkulov, K. (2021). ABSTRACT DATA TYPES FOR KNOWLEDGE REPRESENTATION AND SPECIFICATION OF MULTI-AGENT SYSTEMS. *Известия НАН РК. Серия Физика и*

Информационные Технологии., *2*, 48–55.

Scharf, F., Widmann, A., Bonmassar, C., & Wetzel, N. (2022). A tutorial on the use of temporal principal component analysis in developmental ERP research–Opportunities and challenges. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 101072.

Schuh, G., Gützlaff, A., Fulterer, J., & Hermann, A. (2022). Building Digital Shadows for Production Control. *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, 110–117.

Senaya, S. K., van der Poll, J. A., & Schoeman, M. (2022). Towards a Framework to Address Enterprise Resource Planning (ERP) Challenges. *Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology*, 57–71.

Setiawan, A., Silitonga, R. Y. H., Angela, D., & Sitepu, H. I. (2020). The Sensor Network for Multi-agent System Approach in Smart Factory of Industry 4.0. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, *17*(4), 8255–8264.

Sravan Medicherla, S., & Archana, M. (2022). Study on the erp implementation methodologies on sap, oracle netsuite, and microsoft dynamics 365: A review. *ArXiv E-Prints*, arXiv-2205.

Sukhavasi, S. B., Sukhavasi, S. B., Elleithy, K., Abuzneid, S., & Elleithy, A. (2021). Human body-related disease diagnosis systems using cmos image sensors: A systematic review. In *Sensors* (Vol. 21, Issue 6). https://doi.org/10.3390/s21062098

Tanajura, A. P. M., Oliveira, V. L. C., & Lepikson, H. (2015). A Multi-agent Approach for Production Management. In *Industrial Engineering, Management Science and Applications 2015* (pp. 65–75). Springer.

Vatankhah Barenji, A., & Vatankhah Barenji, R. (2017). Improving multi-agent manufacturing control system by indirect communication based on ant agents. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, *231*(6), 447–458.

Vogel-Heuser, B., Seitz, M., Salazar, L. A. C., Gehlhoff, F., Dogan, A., & Fay, A. (2020). Multi-agent systems to enable Industry 4.0. *At-Automatisierungstechnik*, *68*(6), 445–458.

Wan, G., Dong, X., Dong, Q., He, Y., & Zeng, P. (2022). Design and implementation of agent-based robotic system for agile manufacturing: A case study of ARIAC 2021. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *77*, 102349.

Wang, L.-C., & Lin, S.-K. (2009). A multi-agent based agile manufacturing planning and control system. *Computers & Industrial Engineering*, *57*(2), 620–640.

Zdravković, M., Panetto, H., & Weichhart, G. (2022). AI-enabled enterprise information systems for manufacturing. *Enterprise Information Systems*, *16*(4), 668–720.

استناد به این مقاله: فقیهی، پیام.، کازرونی، مهرداد. (۱۴۰۲). توسعه متدولوژی کنترل تولید چندعاملی یکپارچه با ERP، *مطالعات مدیریت کسب وکار هوشمند*، ۱۲(۴۶)، ۲۵۹-۲۹۶.

DOI: 10.22054/ims.2023.73405.2319

Journal of Business Intelligence Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License..