

Integrated Truck Scheduling and Internal Operations in a Multi-Door Cross-Dock with Reconfigurable Process Machines

Mohammad Hosein Tavakkoli¹, Reza Tavakkoli-Moghaddam², Behdin Vahedi-Nouri³

¹ M.Sc. Student, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

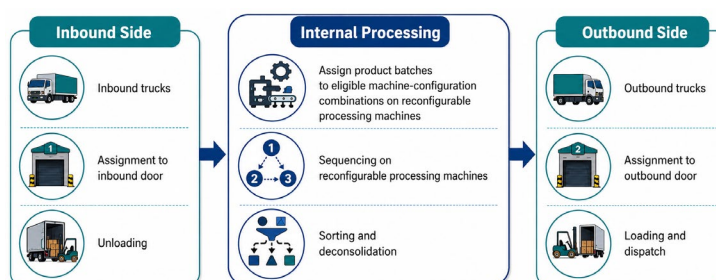
² Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Joint optimization of door assignment, truck scheduling, and internal processing
- Reconfigurability enhanced terminal flexibility in handling multiple product types
- Identification of processing time as the primary operational bottleneck of the system
- The necessity of balancing dock capacity and internal processing capacity for optimal terminal performance

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 1 June 2026

Revised: 9 July 2026

Accepted: 18 July 2026

Available online: 20 July 2026

*Correspondence: tavakkoli@ut.ac.ir

How to cite this article:

Tavakkoli, M. H., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Vahedi-Nouri, B. (2026). Integrated truck scheduling and internal operations in a multi-door cross-dock with reconfigurable process machines. *System Engineering and Productivity*, 6 (4), 313-342.

Keywords:

Cross-docking

Truck scheduling

Dock-door assignment

Reconfigurable process machines

Mixed-integer linear programming

ABSTRACT

Cross-docking terminals play an important role in improving logistics efficiency by reducing inventory holding and shortening delivery lead times. In a cross-docking terminal, products are generally moved directly from an incoming truck to an outgoing truck without entering long-term storage. While there have been several studies on truck scheduling decisions at cross-docking terminals, most emphasize door assignments, truck sequencing, and temporary storage. The internal processing operations that take place between unloading and loading are often simplified or assumed to be continuously available. To help address this limitation, a new mixed-integer linear programming (MILP) model is proposed for a multiple-door cross-docking terminal equipped with reconfigurable processing machines. In the proposed cross-docking system, products should first undergo internal operations (e.g., labeling, repacking, and inspection) to be configured for the machine, and then be transferred to the appropriate door for loading onto an outgoing truck. The results indicate that integrated coordination among dock-door assignment, truck scheduling, and internal processing is essential for reducing the tardiness penalty of outbound trucks. The sensitivity analysis shows that internal processing time is the most critical operational bottleneck in the system, while increasing the number of dock doors has only a limited marginal effect beyond a certain level. In addition, reconfigurable machines can improve terminal performance by increasing flexibility in assigning product batches to processing resources. It was also shown that when processing machines are modeled as simple non-reconfigurable machines, they impose, on average, 34% higher cost on the model compared with the case in which reconfigurable processing machines are considered.

1. Introduction

In recent decades, competitive pressures from global supply chains with multiple options; an increase in the types of products offered (i.e., a wide variety); shorter lead times for product delivery; and increasingly high expectations for an organization's logistics service levels have led companies to implement more flexible logistics services, and logistics has become one of the widely applied topics in this field (Noushi & Sabouhi, 2026; Chargui et al., 2022; Coindreau et al., 2021; Sayed et al., 2020). As a result, cross-docking has become a popular method of minimizing product dwell time, reducing inventory costs, and accelerating the flow of materials through a distribution system. In a cross-dock terminal, inbound shipments are unloaded, sorted, or consolidated according to their destinations, and then loaded onto outbound trucks with little or no long-term storage (Yu & Egbelu, 2008). By eliminating, or at least reducing, storage and retrieval operations, cross-docking can shorten order turnaround time, decrease inventory-related costs, and improve the flow of products through the supply chain (Boysen, 2010).

Although Cross-Docking (CD) can provide many advantages, the efficient operation of a cross-dock terminal requires careful operational decision-making. One of the most fundamental decisions is assigning inbound and outbound trucks to the appropriate dock doors. One of the most important decisions made by facility managers is which inbound and outbound trucks are assigned to which dock doors, because these decisions influence internal transportation distances of material between docks, material handling costs, congestion at resource locations, and labor productivity (Bartholdi III & Gue, 2000). Consequently, the dock-door assignment problem has been widely studied as a core and challenging optimization problem in cross-docking, where the main objective is to assign trucks or destinations to inbound and outbound doors to minimize internal handling costs (Guemri et al., 2019). Moreover, the layout and service policy of dock doors may significantly influence terminal performance. For instance, mixed door-layout policies can provide additional flexibility, although they may also lead to more ambiguous material flows and higher internal congestion (Stephan & Boysen, 2011).

In addition to dock-door assignment, truck scheduling plays a crucial role in cross-docking operations. In this problem, the decision-maker must determine when and where each truck should be processed while maintaining synchronization among inbound unloading, internal transfer, and outbound loading activities (Boysen, 2010). Poor coordination among these decisions may increase the total completion time, truck waiting time, temporary inventory, and shipment delays (Yu & Egbelu, 2008). For this reason, recent studies have

emphasized that solving dock-door assignment and truck scheduling separately often yields suboptimal or even infeasible solutions, because spatial and temporal decisions in cross-dock terminals are strongly interdependent (Rijal et al., 2019).

Nevertheless, a considerable part of the cross-docking literature still simplifies internal terminal operations. In many models, the transfer of products from inbound to outbound doors is represented by a fixed travel time or handling cost. In real-world terminals, however, products may require inspection, sorting, repacking, labeling, consolidation, temporary storage, or additional internal processing (Fanti et al., 2014). Logistics environments suggest that cross-dock terminals should no longer be viewed merely as transshipment points, but rather as multi-stage operational systems with limited internal resources and diverse processing activities. Thus, the minimization of tardiness for cross-dock operations is very important, since a high tardiness increases the length of time that products remain in the cross-dock, increases operational costs, and decreases service performance (Nogueira et al., 2020). In addition, reducing double-handling is critical in some cross-dock settings, as unnecessary repeated movements consume labor, equipment, and internal handling capacity (Maknoon et al., 2016). Consequently, models that can adequately coordinate product flows, truck schedules, assign doors to trucks, and coordinate internal activities would be highly valuable tools for bridging the gap between simplified theoretical models and practical operations at cross-dock facilities.

Despite the aforementioned advances, there is still room for a more integrated modeling framework. Most cross-docking studies have focused either on dock-door assignment, truck scheduling, or the limited incorporation of internal operations and temporary inventory into the model. However, the reviewed studies have rarely brought these components together within a single integrated modeling framework. More specifically, few studies have examined a multi-door, multi-product cross-docking terminal in which truck-to-door assignment, inbound and outbound truck scheduling, product-batch assignment to internal processing resources, processing sequences, and setup or reconfiguration times are all considered simultaneously.

Accordingly, this study aims to address part of this gap by developing an integrated framework for planning and assignment in a multi-door, multi-product cross-docking terminal. The main objective of the proposed model is to minimize the tardiness penalty of outbound trucks by coordinating decisions related to dock doors, trucks, product flows, and internal processing resources. To this end, a mixed-integer linear programming model is first proposed. Then, the performance of the model is thoroughly evaluated using generated instances of

different sizes and through parameter sensitivity analyses. Real-world examples of reconfigurability in cross-docking environments may include modular sortation systems, programmable conveyors, reassignable chutes, mobile robots with interchangeable modules, flexible palletizing robots, and modular packaging or labeling stations. Practical implementations of such technologies can be observed in solutions offered by companies such as ABB, Swislog, Honeywell, and other providers of automated logistics and warehouse systems.

2. Methodology

This study proposes an integrated optimization framework for a multiple-door cross-docking terminal equipped with reconfigurable process machines. The considered system includes inbound trucks, outbound trucks, inbound and outbound doors, product types, and reconfigurable machines. After unloading at inbound doors, product batches must be processed by eligible machines under compatible configurations and then transferred to outbound trucks for loading. Since changing the configuration of a machine requires setup time, the model simultaneously considers truck scheduling, dock-door assignment, product-to-machine assignment, configuration selection, and processing sequence decisions.

A mixed-integer linear programming model is first developed to formulate the problem. The objective is to minimize the cost of tardiness. The constraints ensure that each truck is assigned to an appropriate door, a feasible machine-configuration combination processes each product batch, and no two operations overlap on the same door or machine. The model also enforces precedence relations among unloading, internal processing, reconfiguration, and outbound loading operations. Accordingly, an outbound truck can depart only after all its required products have been unloaded, processed, and loaded.

The model coordinates seven groups of decisions:

- Assignment of inbound trucks to inbound doors;
- Assignment of outbound trucks to outbound doors;
- Sequencing of trucks at inbound and outbound doors;
- Assignment of product batches to eligible reconfigurable machines;
- Selection of the appropriate machine configuration for each product batch;
- Sequencing of product batches on each reconfigurable machine;
- Determination of unloading, processing, reconfiguration, and loading start and completion times.

To evaluate the proposed models, a set of test instances with gradually increasing dimensions is generated. The instances vary in terms of the number of trucks, doors, machines, and product types, while

scalar parameters are kept fixed and the number of configurations for each machine is set to three. Finally, a sensitivity analysis is conducted on processing time, reconfiguration time, number of configurations, and number of doors to identify the main operational bottlenecks and provide managerial insights for capacity planning in cross-docking terminals.

3. Results and Discussion

The proposed MILP model was evaluated using generated instances with different problem sizes. The instances vary in terms of the number of inbound and outbound trucks, dock doors, reconfigurable process machines, and product types. This design allows the computational behavior of the model to be examined as the operational complexity of the terminal increases. The results show that the model can coordinate the main decisions of the cross-docking terminal in an integrated manner, including truck-to-door assignment, truck sequencing, product-batch assignment to eligible machines, configuration selection, and batch sequencing on reconfigurable process machines. For small-sized instances, the model obtained optimal solutions within a reasonable computational time. However, as the problem size increased, the solution time and optimality gap also increased. This behavior is expected, since the model combines several interdependent decisions that are often treated separately in the cross-docking literature.

A key observation is that explicitly modeling internal processing operations makes the problem more realistic, but also more computationally challenging. In the proposed system, product batches must be processed on eligible reconfigurable machines before being transferred to outbound trucks. This structure reflects terminals in which products require value-added operations such as labeling, inspection, repacking, or sorting before shipment. However, it also requires the coordination of truck schedules, dock-door availability, machine capacity, configuration feasibility, and processing sequences. The sensitivity analysis indicates that internal processing time has the strongest effect on the objective value. Longer processing times delay the availability of product batches for outbound loading and may increase the tardiness penalties of outbound trucks. This suggests that the processing stage can become the main bottleneck in cross-docking terminals with internal operations. Therefore, improving processing efficiency may be more effective than focusing only on dock-door capacity. Reconfiguration time shows a more moderate effect in the tested instances, but it remains relevant when product variety is high or configuration changes occur frequently. Reconfigurable machines provide useful flexibility by allowing different product types to be processed under different configurations. Nevertheless, this flexibility should be managed carefully, since poor

sequencing decisions may lead to unnecessary reconfigurations and reduce the benefits of reconfigurable resources.

The results also show that increasing the number of available machine configurations can improve system performance by expanding the feasible assignment options for product batches. Similarly, increasing the number of dock doors can reduce congestion in unloading and loading operations. However, the benefit of adding more doors decreases after a certain point because the bottleneck may shift from the dock area to internal processing. This highlights the need for a balanced capacity strategy that considers dock capacity, processing capacity, and machine flexibility together.

Overall, the findings show that the performance of a cross-docking terminal with internal processing operations depends on the joint coordination of spatial, temporal, and processing-related decisions. Treating dock-door assignment, truck scheduling, and internal processing separately may lead to inefficient schedules or may simply transfer congestion from one part of the terminal to another. The proposed model can therefore support decision-makers in evaluating how processing time, reconfiguration capability, and dock capacity affect outbound truck tardiness and terminal performance.

4. Conclusions

This study proposed an integrated MILP model for planning and scheduling operations in a multi-door, multi-product cross-docking terminal equipped with reconfigurable process machines. The model jointly coordinates truck-to-door assignment, inbound and outbound truck sequencing, product-batch assignment to eligible processing machines, configuration selection, batch sequencing, and sequence-dependent reconfiguration decisions. By explicitly incorporating internal processing operations, the proposed framework extends conventional cross-docking models in which internal activities are often represented only through simplified transfer times or temporary storage assumptions.

The main contribution of this study is the development of an integrated modeling framework that links dock operations, truck scheduling, product flows, and reconfigurable internal processing resources within a single decision structure. This integration is important because operational decisions in cross-docking terminals are highly interdependent. A schedule that appears efficient from the perspective of dock-door assignment may become inefficient once processing capacity, machine eligibility, and configuration changes are considered. Therefore, the proposed model provides a more realistic representation of cross-docking terminals in which products require value-added operations before outbound shipment.

From a managerial perspective, the findings suggest that improving terminal performance requires a

balanced view of dock capacity, internal processing capacity, and resource flexibility. Expanding the number of dock doors alone may not be sufficient if internal processing resources remain limited. Similarly, the benefits of reconfigurable machines depend on how well product batches are assigned and sequenced. The proposed model can therefore support managers in evaluating alternative capacity-expansion strategies, comparing investments in dock doors and processing resources, and determining an appropriate level of reconfigurability for the terminal.

This study also has several limitations. The numerical experiments were based on generated instances, and future studies can strengthen the practical validity of the model by applying it to real data from an actual cross-docking terminal. Moreover, the current formulation is deterministic, while real terminal operations are often affected by uncertainty in truck arrival times, processing times, reconfiguration times, and outbound demand. Future research can therefore extend the proposed framework using stochastic, robust, or data-driven optimization approaches. In addition, practical constraints such as limited labor availability, material-handling equipment capacity, temporary storage capacity, and internal congestion can be incorporated. Finally, because the MILP model becomes computationally challenging for large-scale instances, developing efficient heuristic, metaheuristic, matheuristic, or constraint-programming-based solution methods is a promising direction for further research.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

Mohammad Hosein Tavakkoli: Conceptual research model, Literature review and theoretical background, Data analysis, Statistical analysis draft, Drafting the manuscript, Preliminary review of the report, Research methodology development, Text revision; **Reza Tavakkoli-Moghaddam:** Supervision, Text revision; **Behdin Vahedi-Nouri:** Supervision, Text revision.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

References

Bartholdi III, J. J., & Gue, K. R. (2000). Reducing labor costs in an LTL crossdocking

- terminal. *Operations Research*, 48(6), 823-832.
<https://doi.org/10.1287/opre.48.6.823.12397>
- Boysen, N. (2010). Truck scheduling at zero-inventory cross docking terminals. *Computers & Operations Research*, 37(1), 32-41.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.03.010>
- Chargui, T., Bekrar, A., Reghioi, M., & Trentesaux, D. (2022). Scheduling trucks and storage operations in a multiple-door cross-docking terminal considering multiple storage zones. *International Journal of Production Research*, 60(4), 1153-1177.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1853843>
- Coindreau, M. A., Gallay, O., Zufferey, N., & Laporte, G. (2021). Inbound and outbound flow integration for cross-docking operations. *European Journal of Operational Research*, 294(3), 1153-1163.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.02.031>
- Fanti, M. P., Stecco, G., & Ukovich, W. (2014). Scheduling internal operations in post-distribution cross docking systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(1), 296-312.
<https://doi.org/10.1109/TASE.2014.2350031>
- Guemri, O., Nduwayo, P., Todosijević, R., Hanafi, S., & Glover, F. (2019). Probabilistic tabu search for the cross-docking assignment problem. *European Journal of Operational Research*, 277(3), 875-885.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.03.030>
- Maknoon, M. Y., Soumis, F., & Baptiste, P. (2016). Optimizing transshipment workloads in less-than-truckload cross-docks. *International Journal of Production Economics*, 179, 90-100.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.05.015>
- Nogueira, T. H., Coutinho, F. P., Ribeiro, R. P., & Ravetti, M. G. (2020). Parallel-machine scheduling methodology for a multi-dock truck sequencing problem in a cross-docking center. *Computers & Industrial Engineering*, 143, 106391.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106391>
- Noushi, K., & Sabouhi, F. (2026). Resilient Wheat Supply Chain Design Considering Circular Economy Principles. *System Engineering and Productivity*, 6(1), 227-249.
<https://doi.org/10.22034/sep.2026.2079220.1441>
- Rijal, A., Bijvank, M., & de Koster, R. (2019). Integrated scheduling and assignment of trucks at unit-load cross-dock terminals with mixed service mode dock doors. *European Journal of Operational Research*, 278(3), 752-771.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.04.028>
- Sayed, S. I., Contreras, I., Diaz, J. A., & Luna, D. E. (2020). Integrated cross-dock door assignment and truck scheduling with handling times. *Top*, 28(3), 705-727.
<https://doi.org/10.1007/s11750-020-00556-z>
- Stephan, K., & Boysen, N. (2011). Vis-à-vis vs. mixed dock door assignment: A comparison of different cross dock layouts. *Operations Management Research*, 4(3), 150-163.
<https://doi.org/10.1007/s12063-011-0057-3>
- Yu, W., & Egbelu, P. J. (2008). Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage. *European Journal of Operational Research*, 184(1), 377-396.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.047>
- Zheng, F., Pang, Y., & Xu, Y. (2022). Heuristics for cross-docking scheduling of truck arrivals, truck departures and shop-floor operations. *Journal of Combinatorial Optimization*, 43(5), 1571-1601.
<https://doi.org/10.1007/s10878-021-00707-3>

زمان‌بندی یکپارچه کامیون‌ها و عملیات داخلی در انبار متقاطع چند درب با ماشین‌های فرایندی بازیگرپذیری

محمد حسین توکلی^۱، رضا توکلی مقدم^۲، بهدین واحدی نوری^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

برجسته‌ها

- بهینه‌سازی هم‌زمان تخصیص درب، زمان‌بندی کامیون و پردازش داخلی
- افزایش انعطاف‌پذیری پایانه به کمک قابلیت بازیگرپذیری در پردازش انواع محصولات مختلف
- شناسایی زمان پردازش به‌عنوان گلوگاه اصلی عملیاتی سیستم
- ضرورت توازن میان ظرفیت درب‌ها و ظرفیت پردازش داخلی پایانه

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷

ارائه برخط: ۱۴۰۵/۰۴/۲۹

*نویسنده مسئول:

tavakoli@ut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

انبار متقاطع
زمان‌بندی کامیون‌ها
تخصیص درب
ماشین‌های با قابلیت بازیگرپذیری
برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط

چکیده

پایانه‌های انبار متقاطع از طریق کاهش نگهداری موجودی و کوتاه‌سازی زمان تحویل، نقش مهمی در بهبود کارایی لجستیکی ایفا می‌کنند. در یک پایانه انبار متقاطع، محصولات معمولاً بدون ورود به فرایند ذخیره‌سازی بلندمدت، به‌طور مستقیم از کامیون ورودی به کامیون خروجی منتقل می‌شوند. اگرچه مطالعات متعددی درباره تسمیم‌های زمان‌بندی کامیون‌ها در پایانه‌های انبار متقاطع انجام شده است، بیشتر این مطالعات بر تخصیص درب‌ها، توالی‌دهی کامیون‌ها و ذخیره‌سازی موقت تمرکز داشته‌اند. در مقابل، عملیات پردازش داخلی که میان مراحل تخلیه و بارگیری انجام می‌شود، غالباً ساده‌سازی شده یا به‌صورت منبعی همواره در دسترس فرض شده است. برای کمک به رفع این محدودیت، در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط جدید برای یک پایانه انبار متقاطع چند درب مجهز به تجهیزات پردازشی بازیگرپذیری پذیر پیشنهاد می‌شود. در سیستم انبار متقاطع پیشنهادی، محصولات ابتدا باید یک عملیات داخلی (برچسب‌گذاری، بازپسته بندی، بازرسی و ...) را طی کنند تا متناسب با پیکربندی مناسب ماشین مربوطه پردازش شوند؛ سپس برای بارگیری در کامیون خروجی، به درب خروجی مناسب منتقل می‌گردند. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است وابستگی متقابل میان تخصیص درب، زمان‌بندی کامیون‌ها، تخصیص دسته‌های محصول به ماشین‌های پردازشی و تصمیمات پیکربندی را به‌صورت یکپارچه نمایش دهد. نتایج نشان می‌دهد که هماهنگی یکپارچه میان تخصیص درب، زمان‌بندی کامیون‌ها و پردازش داخلی برای کاهش جریمه دیرکرد کامیون‌های خروجی ضروری است. تحلیل حساسیت بیانگر آن است که زمان پردازش داخلی مهم‌ترین گلوگاه عملیاتی سیستم است و افزایش تعداد درب‌ها، پس از یک سطح مشخص، اثر کاهشی محدودی دارد. همچنین، ماشین‌های بازیگرپذیری پذیر با افزایش انعطاف در تخصیص دسته‌های محصول به منابع پردازشی، می‌توانند عملکرد پایانه را بهبود دهند. همچنین بیان شد که در حالتی که ماشین‌های پردازش به شکل ساده در مدل آورده شوند به نسبت حالتی که ماشین‌ها قابلیت بازیگرپذیری داشته باشند به طور میانگین ۳۴٪ هزینه بیشتری را به مدل تحمیل می‌کنند.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش رقابت در زنجیره‌های تأمین، رشد تنوع محصولات، کوتاه‌تر شدن زمان تحویل و افزایش حساسیت مشتریان نسبت به زمان پاسخ‌گویی، شرکت‌ها را به سمت به‌کارگیری راهبردهای لجستیکی چابک‌تر سوق داده است و مبحث لجستیک به یکی از مسائل پر کاربرد در این حوزه بدل شده است. در چنین محیطی، انبار متقاطع به‌عنوان یکی از رویکردهای مؤثر برای کاهش زمان ماندگاری کالا، کاهش هزینه‌های نگهداری موجودی و افزایش سرعت جریان مواد در شبکه‌های توزیع مطرح شده است. در یک پایانه انبار متقاطع، کالاها از کامیون‌های ورودی تخلیه شده، بر اساس مقصد یا نوع سفارش تفکیک و تجمیع می‌شوند و سپس با حداقل ذخیره‌سازی یا بدون ذخیره‌سازی بلندمدت در کامیون‌های خروجی بارگیری می‌گردند (Noushi & Sabouhi, 2026; Yu & Egbeu, 2008). بنابراین، مزیت اصلی این سیستم تنها در کاهش موجودی نیست، بلکه در توانایی آن برای هماهنگ‌سازی جریان‌های ورودی و خروجی، کاهش عملیات غیرضروری انبارداری و بهبود بهره‌وری حمل‌ونقل نهفته است (Boysen, 2010). با وجود مزایای بالقوه انبار متقاطع، بهره‌برداری کارآمد از آن مستلزم تصمیم‌گیری دقیق در سطح عملیاتی است. یکی از نخستین تصمیمات کلیدی در این زمینه، تخصیص کامیون‌های ورودی و خروجی به درهای مناسب است؛ تصمیمی که به‌طور مستقیم بر فاصله جابه‌جایی کالا، هزینه حمل داخلی، ازدحام منابع و بهره‌وری نیروی کار اثر می‌گذارد (Bartholdi III & Gue, 2000). در همین راستا، مسئله تخصیص درب به‌عنوان یکی از مسائل پایه‌ای و دشوار در ادبیات انبار متقاطع مطرح شده است؛ زیرا هدف آن تعیین محل مناسب برای کامیون‌ها یا مقاصد در درهای ورودی و خروجی به‌گونه‌ای است که هزینه انتقال داخلی کالا حداقل شود (Guemri et al., 2019). از سوی دیگر، چیدمان و نحوه استفاده از درها نیز می‌تواند بر عملکرد پایانه اثرگذار باشد؛ به‌طوری‌که سیاست‌های چیدمان مختلط ممکن است انعطاف‌پذیری بیشتری ایجاد کنند، هرچند می‌تواند ابهام در جریان مواد و ازدحام داخلی را افزایش دهند (Stephan & Boysen, 2011).

در کنار تخصیص درب، زمان‌بندی کامیون‌ها نقش اساسی در عملکرد انبار متقاطع دارد. در این مسئله، تصمیم‌گیرنده باید مشخص کند هر کامیون چه زمانی و در کدام در خدمت‌دهی شود، به‌گونه‌ای که هماهنگی میان تخلیه محموله‌های ورودی، انتقال داخلی کالا و بارگیری کامیون‌های خروجی حفظ شود (Boysen & Fliedner, 2010). عدم هماهنگی در این تصمیمات می‌تواند باعث افزایش زمان تکمیل عملیات، انتظار کامیون‌ها، موجودی موقت و تأخیر در ارسال کالا شود (Yu & Egbeu, 2008). به همین دلیل، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که بررسی جداگانه تخصیص درب و زمان‌بندی کامیون‌ها اغلب منجر به جواب‌های زیربهبوده یا حتی غیرقابل اجرا می‌شود؛ زیرا تصمیمات مکانی و زمانی در پایانه‌های انبار متقاطع به‌شدت به یکدیگر وابسته‌اند (Rijal et al., 2019). ساید و همکاران (Sayed et al., 2020) نیز تأکید کردند که یکپارچه‌سازی تخصیص درب و زمان‌بندی کامیون‌ها، به‌ویژه با لحاظ زمان‌های تخلیه، انتقال و بارگیری، می‌تواند نمایش واقع‌بینانه‌تری از عملیات پایانه ارائه دهد.

با این حال، بخش مهمی از ادبیات انبار متقاطع همچنان عملیات داخلی پایانه را به‌صورت ساده‌شده در نظر گرفته است. در بسیاری از مدل‌ها، انتقال کالا از درهای ورودی به درهای خروجی تنها با یک زمان یا هزینه ثابت نمایش داده می‌شود؛ در حالی که در محیط‌های واقعی، کالاها ممکن است نیازمند بازرسی، مرتب‌سازی، بسته‌بندی مجدد، برچسب‌گذاری، تجمیع، ذخیره‌سازی موقت یا پردازش داخلی باشند. برای نمونه، چارگوی و همکاران (Chargui et al., 2022) مسئله زمان‌بندی کامیون‌ها و عملیات ذخیره‌سازی را در یک پایانه چند در با چند ناحیه ذخیره‌سازی بررسی کردند و نشان دادند که مدیریت جریان کالا میان درها و نواحی ذخیره‌سازی، خود بخشی مهم از تصمیمات عملیاتی است. همچنین، کویندرا و همکاران (Coindreau et al., 2021) در یک مطالعه صنعتی نشان دادند که یکپارچه‌سازی تصمیمات مربوط به جریان ورودی، جریان خروجی و زمان بارگیری می‌تواند موجودی موقت و عدم تعادل کاری را کاهش دهد. در زنجیره سرد نیز، ژنگ و همکاران (Zheng et al., 2022) نشان دادند که وجود محصولات مختلف با نیازهای دمایی

متفاوت، ضرورت توجه هم‌زمان به زمان‌بندی کامیون‌ها، عملیات داخلی و ذخیره‌سازی موقت را افزایش می‌دهد. افزون بر این، پیچیدگی محیط‌های لجستیکی جدید موجب شده است که پایانه‌های انبار متقاطع تنها به‌عنوان نقاط عبور کالا در نظر گرفته نشوند، بلکه به‌عنوان سیستم‌های عملیاتی چندمرحله‌ای با منابع داخلی محدود و فعالیت‌های پردازشی متنوع دیده شوند. در چنین محیط‌هایی، کاهش میزان تاخیر اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا افزایش تاخیر به معنای افزایش زمان توقف کالا در پایانه، رشد هزینه‌های عملیاتی و کاهش سطح خدمت است (Nogueira et al., 2020). از طرف دیگر، در برخی محیط‌ها، کاهش دوباره‌کاری^۱ و جابه‌جایی مضاعف محصولات نیز اهمیت زیادی دارد، زیرا دوباره‌کاری مصرف منابع، نیروی کار و تجهیزات داخلی را افزایش می‌دهد (Maknoon et al., 2016). بنابراین، توسعه مدل‌هایی که بتوانند هم‌زمان جریان کالا، زمان‌بندی کامیون‌ها، تخصیص درب‌ها و فعالیت‌های داخلی را مدیریت کنند، برای نزدیک‌تر کردن مدل‌های نظری به واقعیت عملیاتی ضروری است.

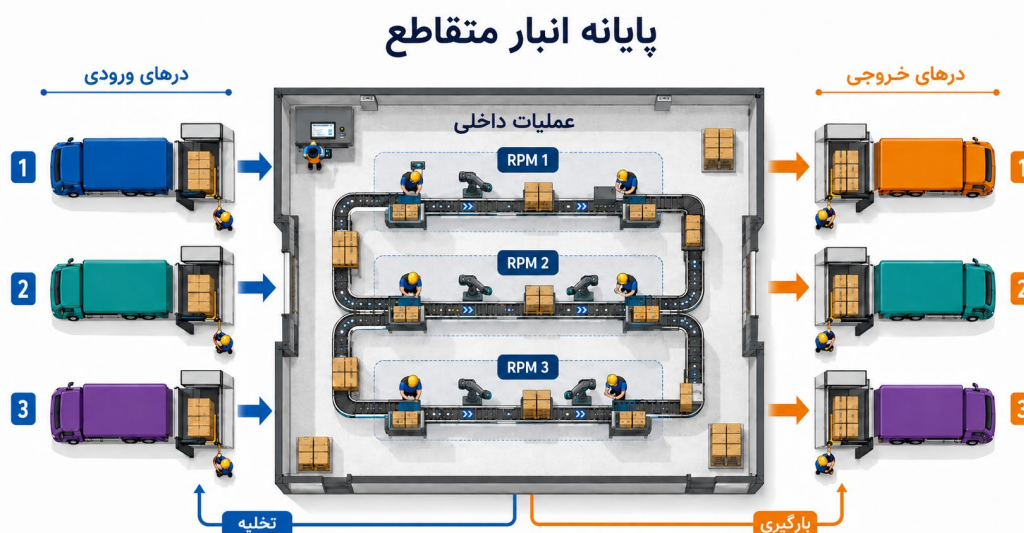
با وجود پیشرفت‌های یادشده، هنوز شکاف مهمی در ادبیات مشاهده می‌شود. بیشتر مطالعات انبار متقاطع یا بر تخصیص درب تمرکز کرده‌اند، یا زمان‌بندی کامیون‌ها را بررسی کرده‌اند، یا عملیات داخلی و موجودی موقت را به‌صورت محدود وارد مدل کرده‌اند. در مقابل، در مطالعات بررسی‌شده، ترکیب هم‌زمان این مؤلفه‌ها به‌صورت یک مدل یکپارچه کمتر مورد توجه قرار گرفته است و یک پایانه انبار متقاطع چند در و چندمحصولی را به‌گونه‌ای مدل کرده است (شکل ۱) که در آن تخصیص کامیون‌ها به درها، زمان‌بندی کامیون‌های ورودی و خروجی، تخصیص دسته‌های محصول به منابع پردازشی داخلی، ترتیب پردازش و زمان‌های آماده‌سازی یا تغییر وضعیت منابع به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شود. بنابراین، این پژوهش با توسعه یک چارچوب یکپارچه برای برنامه‌ریزی و تخصیص درب یک پایانه انبار متقاطع چند در و چندمحصولی، تلاش می‌کند بخشی از این شکاف را پوشش دهد. هدف اصلی مدل پیشنهادی، کمینه‌سازی جریمه تاخیر کامیون‌های خروجی از طریق

هماهنگ‌سازی تصمیمات مربوط به درها، کامیون‌ها، جریان کالا و منابع داخلی است. برای این منظور، ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط ارائه می‌شود و سپس، به کمک نمونه‌های تولید شده در ابعاد مختلف و تحلیل حساسیت پارامترها عملکرد مدل مورد بررسی دقیق قرار می‌گیرد. نمونه‌های واقعی بازیگربندی در انبار متقاطع شامل مواردی همچون سیستم‌های تفکیک ماژولار، نوارنقاله‌های قابل برنامه‌ریزی، چوت‌های قابل تخصیص مجدد، ربات‌های متحرک با ماژول قابل تعویض، ربات‌های پالتایزر انعطاف‌پذیر و ایستگاه‌های بسته‌بندی یا برچسب‌زنی ماژولار است که نمونه‌های آن در دنیای واقعی مواردی همچون گروه ABB، سوئیس‌لاگ، هانی‌ول و ... می‌باشند.

۲- مرور ادبیات و پیشینه پژوهش

انبار متقاطع یکی از راهبردهای مهم در مدیریت لجستیک و زنجیره تأمین است که با هدف کاهش ذخیره‌سازی، افزایش سرعت جریان کالا و بهبود بهره‌وری حمل‌ونقل به کار گرفته می‌شود. در این سیستم، محموله‌ها پس از ورود به پایانه از کامیون‌های ورودی تخلیه شده، بر اساس مقصد تفکیک یا تجمع می‌شوند و سپس به کامیون‌های خروجی انتقال می‌یابند؛ بنابراین، برخلاف انبارهای سنتی، تمرکز اصلی بر نگهداری کالا نیست، بلکه بر هماهنگ‌سازی سریع جریان‌های ورودی و خروجی است. این رویکرد با حداقل‌سازی زمان توقف کالا در پایانه، هزینه‌های انبارداری را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و امکان تحویل سریع‌تر به مشتریان را فراهم می‌آورد. یکی از ویژگی‌های اساسی انبار متقاطع آن است که کالاهای معمولاً کمتر از ۲۴ ساعت در پایانه باقی می‌مانند و همین امر می‌تواند هزینه‌های نگهداری، فضای انبارش و عملیات برداشت را کاهش دهد (Yu & Egbe, 2008). با این حال، تحقق این مزایا به هماهنگی دقیق بین تخصیص درب‌ها، توالی خدمت‌دهی کامیون‌ها، جریان داخلی کالا و ظرفیت منابع عملیاتی وابسته است (Boysen, 2010). از این‌رو، ادبیات انبار متقاطع عمدتاً حول چند محور اصلی شامل تخصیص درب، زمان‌بندی کامیون‌ها، عملیات داخلی، موجودی موقت، عدم قطعیت و روش‌های حل توسعه یافته است (Sayed et al., 2020).

^۱ Double-handling



شکل ۱. نمای کلی یک انبار متقاطع شامل عملیات‌های داخلی.

Figure 1. Overview of a cross-dock terminal including internal operations.

تخصیص درب، کران‌های پایین و مدل‌های تجزیه‌شده‌ای ارائه کردند که موجب بهبود کارایی حل نمونه‌های بزرگ شد.

در سال‌های اخیر نیز رویکردهای داده‌محور و یادگیری‌محور وارد این حوزه شده‌اند؛ برای مثال، لی و همکاران (Li et al., 2024) یک فرمول‌بندی جریان‌محور و رویکرد نوسان راهبردی مبتنی بر یادگیری تقویتی ارائه کردند، و لو و همکاران (Lu et al., 2026) از الگوریتم تکاملی مبتنی بر استخراج الگوهای پرتکرار برای هدایت جست‌وجو استفاده کردند. با وجود اهمیت تخصیص درب، این تصمیم به‌تنهایی برای مدیریت عملیات انبار متقاطع کافی نیست؛ زیرا کامیون‌های ورودی و خروجی در زمان‌های مختلف وارد یا آماده خروج می‌شوند و خدمت‌دهی به آن‌ها باید با ظرفیت درها، ترتیب پردازش و وابستگی محموله‌ها هماهنگ شود. از این رو، مطالعات زمان‌بندی کامیون‌ها نیز نقش مهمی در تکمیل ادبیات تخصیص درب دارند. بویسن و همکاران (Boysen & Fliedner, 2010) یک مدل پایه برای زمان‌بندی کامیون‌های ورودی و خروجی ارائه کردند و بر ضرورت هماهنگی زمانی جریان‌های ورودی و خروجی تأکید نمودند. یو و اگبلو (Yu & Egbe, 2008) نیز توالی‌دهی هم‌زمان کامیون‌های ورودی و خروجی را با در نظرگیری موجودی موقت بررسی کردند و در مدل آن‌ها تخصیص محصولات به کامیون‌های خروجی و توالی استقرار کامیون‌ها به‌صورت هم‌زمان تعیین شد.

۲-۱- تخصیص درب

در سطح عملیاتی، تخصیص درب یکی از مسائل پایه‌ای انبار متقاطع است که با هدف تعیین محل استقرار کامیون‌های ورودی و خروجی و کاهش هزینه حمل داخلی، فاصله جابه‌جایی و هزینه انتقال کالا انجام می‌شود. بارتولد و گو (Bartholdi & Gue, 2000) نشان دادند که نحوه تخصیص تریلرها به درها در پایانه‌های LTL بر هزینه نیروی کار و ازدحام داخلی اثر مستقیم دارد و تخصیص مناسب می‌تواند بهره‌وری عملیاتی را بهبود دهد. در ادامه، استفان و بویسن (Stephan & Boysen, 2011) با مقایسه دو سیاست چیدمان روبه‌رو و مختلط نشان دادند که چیدمان مختلط به دلیل انعطاف بیشتر در بسیاری از شرایط عملکرد بهتری دارد، هرچند ممکن است باعث افزایش ابهام در جریان مواد و ازدحام داخلی شود. در مطالعات بعدی، مسئله تخصیص درب بیشتر از منظر مدل‌سازی ریاضی و روش‌های حل پیشرفته بررسی شد. گومری و همکاران (Guemri et al., 2019) این مسئله را به‌عنوان یک مسئله NP-hard مطرح کردند و با ارائه الگوریتم‌های جست‌وجوی ممنوعه احتمالی، جواب‌های باکیفیتی برای نمونه‌های معیار به دست آوردند. اسغیر و همکاران (Essghaier et al., 2021) نیز تخصیص کامیون به در را در محیط انبار متقاطع مشترک و تحت عدم قطعیت زمان انتقال بررسی کرده و از برنامه‌ریزی اتفاقی فازی استفاده کردند. همچنین، اسکودرو و همکاران (Escudero et al., 2024) با تمرکز بر مدل درجه دوم

۲-۲- زمان‌بندی کامیون‌ها

در ادامه این مسیر، برخی پژوهش‌ها مسئله زمان‌بندی کامیون‌ها را با ساختارهای چند در و قیود عملیاتی گسترده‌تر بررسی کردند. نوگیرا و همکاران (Nogueira et al., 2020) مسئله توالی‌دهی کامیون‌ها در یک مرکز انبار متقاطع چنددر را از منظر زمان‌بندی ماشین‌های موازی مدل کردند. آن‌ها نشان دادند که نگاه ماشین‌های موازی می‌تواند جایگزین مناسبی برای نگاه جریان‌کارگاهی سنتی باشد و برای کاهش زمان تکمیل کل، کران‌ها و جواب‌های ابتکاری مناسبی ایجاد کند. موناکو و سامارا (Monaco & Sammarra, 2023) نیز مسئله زمان‌بندی کامیون و انتقال محموله را در پایانه‌ای با یک در ورودی و یک در خروجی بررسی کردند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عددصالح و رویکرد لاگرانژی همراه با روش تنظیم ضرایب ارائه دادند تا زمان کل فرایند تخلیه، انتقال و بارگیری کمینه شود. مکنون و همکاران (Maknoon et al., 2016) مسئله زمان‌بندی را از منظر کاهش حجم دوباره‌کاری بررسی کردند. در این پژوهش، زمان‌بندی کامیون‌ها به‌گونه‌ای انجام شد که تعداد محصولاتی که نیاز به جابه‌جایی دوباره دارند کاهش یابد و نتایج نشان دادند که انعطاف‌پذیری مناسب در زمان‌بندی می‌تواند حجم کار انتقال را به‌طور معنادار کاهش دهد.

گروه دیگری از پژوهش‌ها به یکپارچه‌سازی تخصیص درب و زمان‌بندی کامیون‌ها پرداخته‌اند. این یکپارچه‌سازی از آن جهت اهمیت دارد که تخصیص مکانی کامیون‌ها و زمان‌بندی خدمت‌دهی آن‌ها مستقل از یکدیگر نیستند. ریجال و همکاران (Rijal et al., 2019) نشان دادند که حل ترتیبی مسئله، یعنی ابتدا زمان‌بندی و سپس تخصیص یا برعکس، می‌تواند به جواب‌های زیربهبوده یا حتی ناشدنی منجر شود. آن‌ها مسئله یکپارچه زمان‌بندی و تخصیص کامیون‌ها را در پایانه‌های بار واحد با درهای دارای حالت خدمت مختلط بررسی کردند و با الگوریتم جست‌وجوی همسایگی بزرگ تطبیقی نشان دادند که رویکرد یکپارچه نسبت به رویکرد ترتیبی کاهش هزینه قابل توجهی ایجاد می‌کند. ساید و همکاران (Sayed et al., 2020) نیز مسئله یکپارچه تخصیص درب و زمان‌بندی کامیون‌ها را با لحاظ زمان‌های جابه‌جایی و زمان‌های تخلیه و بارگیری وابسته به کامیون و در بررسی کردند. در این پژوهش، هدف

کمینه‌سازی زمان کل پردازش تمام کامیون‌ها بود و دو مدل برنامه‌ریزی ریاضی همراه با دو فراابتکاری ترکیبی ارائه شد.

اهمیت یکپارچه‌سازی در مطالعات جدیدتر نیز برجسته‌تر شده است. مونمی و همکاران (Monemi et al., 2023) مسئله تخصیص درب و زمان‌بندی کامیون‌ها را در افق برنامه‌ریزی روزانه بررسی کردند و یک چارچوب شاخه-برش-بندرز مبتنی بر یادگیری ماشین ارائه دادند. در این پژوهش، از طبقه‌بندی برای انتخاب توابع هدف جایگزین در فرایند تولید برش‌های بندرز استفاده شد تا از اشباع مسئله اصلی با برش‌های کم‌اثر جلوگیری شود. مونمی و همکاران در سال ۲۰۲۴ (Monemi et al., 2024) نیز یک رویکرد شاخه-قیمت شبکه عصبی برای مسئله زمان‌بندی کامیون‌ها در انبار متقاطع ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از بازفرمول‌بندی دنتزیک-ولف و یادگیری تقلیدی نشان دادند که مسائل تکرارشونده روزانه در پایانه‌های انبار متقاطع می‌توانند بستری مناسب برای روش‌های یادگیری برای بهینه‌سازی باشند. این مطالعات بیانگر آن هستند که حل مسائل عملیاتی انبار متقاطع در مقیاس واقعی نیازمند ترکیب مدل‌سازی ریاضی، تجزیه و یادگیری ماشین است.

۲-۳- موجودی موقت

در کنار تخصیص و زمان‌بندی، موجودی موقت نیز بخشی مهم از واقعیت عملیاتی انبار متقاطع است. اگرچه فلسفه اصلی انبار متقاطع بر حذف یا کاهش ذخیره‌سازی استوار است، در بسیاری از شرایط، هماهنگی کامل بین ورود و خروج کالا ممکن نیست و بخشی از کالا باید برای مدت کوتاه در پایانه نگهداری شود. واناچاکوماری و همکاران (Vanajakumari et al., 2022) مفهوم انبار متقاطع ترکیبی را در یک زنجیره تأمین نفت و گاز بررسی کردند. در این نوع سیستم، برخلاف انبار متقاطع خالص، امکان نگهداری موجودی برای چند دوره وجود دارد و تصمیمات حمل‌ونقل و موجودی باید به‌صورت هم‌زمان برنامه‌ریزی شوند. لی و همکاران (Lee et al., 2025) نیز در زمینه زنجیره تأمین انبار متقاطع ترکیبی، تصمیمات ارسال، همکاری و برون‌سپاری را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از انبار متقاطع ترکیبی زمانی مقرون‌به‌صرفه است که هزینه نگهداری در پایانه نسبت به هزینه حمل

روش‌های جست‌وجوی تصادفی، جست‌وجوی ممنوعه و شبیه‌سازی تبرید استفاده کردند. ژنگ و همکاران (Zheng et al., 2022) نیز مسئله زمان‌بندی ورود کامیون‌ها، خروج کامیون‌ها و عملیات داخلی را توسعه دادند و برای آن الگوریتم حریصانه سه‌مرحله‌ای و الگوریتم ژنتیک ارائه کردند. تمرکز آن‌ها بر کاهش تعداد کامیون‌های ورودی خارج از پنجره‌های زمانی قراردادی و هماهنگ‌سازی عملیات داخلی با برنامه کامیون‌ها بود. این مطالعات نشان می‌دهند که عملیات داخلی باید به‌صورت هم‌زمان با تصمیمات تخصیص و زمان‌بندی مدل شود، زیرا ساده‌سازی آن می‌تواند به برنامه‌هایی منجر شود که از نظر اجرایی قابل اتکا نیستند (Zheng et al., 2022).

برخی پژوهش‌ها به نقش منابع داخلی و تجهیزات حمل مواد در عملکرد انبار متقاطع پرداخته‌اند. قمی و همکاران (Ghomi et al., 2023) با تمرکز بر بهره‌برداری از لیفتراک و کنترل ازدحام، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط برای مسئله تخصیص کامیون به در ارائه کردند. در این پژوهش، هدف تنها کاهش هزینه انتقال نبود، بلکه استفاده مناسب از لیفتراک‌ها، کاهش ازدحام و کنترل تعداد تجهیزات فعال نیز در نظر گرفته شد. ایتی و همکاران (Eti et al., 2025) مسئله زمان‌بندی انبار متقاطع چند در را در سه حالت درهای جداگانه، درهای مختلط و تخصیص منابع حمل مواد بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که فرض نامحدود بودن تجهیزات حمل مواد می‌تواند موجب تولید برنامه‌های غیرواقعی شود و افزودن محدودیت لیفتراک‌ها بر تأخیر کامیون‌های خروجی اثر قابل توجهی دارد. بنابراین، ادبیات جدید به‌تدریج از مدل‌های مبتنی بر جریان ساده به سمت مدل‌هایی حرکت کرده است که منابع داخلی، ازدحام و قابلیت اجرای برنامه را نیز در نظر می‌گیرند (Eti et al., 2025).

۲-۵- انعطاف‌پذیری و سیستم‌های با قابلیت بازپیکربندی

موضوع انعطاف‌پذیری عملیاتی در سال‌های اخیر به یکی از محورهای مهم ادبیات انبار متقاطع تبدیل شده است. در حالی‌که در بسیاری از مدل‌های کلاسیک، درها به‌صورت اختصاصی برای عملیات ورودی یا خروجی

ورودی کم باشد یا تقاضای پایین‌دستی پایین باشد. کوپندرو و همکاران (Coindreau et al., 2021) نیز در مطالعه‌ای صنعتی برای یک خودروساز اروپایی، یکپارچه‌سازی جریان ورودی و خروجی را بررسی کردند و نشان دادند که تصمیم هم‌زمان درباره محموله کامیون‌ها، محموله کانتینرها و زمان بارگیری کانتینرها می‌تواند جریمه موجودی موقت را کاهش دهد.

۲-۴- عملیات‌های داخلی

عملیات داخلی انبار متقاطع بخش دیگری از ادبیات است که به‌طور مستقیم با واقع‌گرایی مدل‌های عملیاتی ارتباط دارد. در مدل‌های ساده، انتقال کالا از در ورودی به در خروجی معمولاً با یک زمان ثابت یا هزینه ثابت نمایش داده می‌شود، درحالی‌که در محیط واقعی عملیات داخلی شامل تخلیه، بارزسی، مرتب‌سازی، بسته‌بندی مجدد، تجمع، ذخیره موقت و انتقال با تجهیزات حمل مواد است. فانتی و همکاران (Fanti et al., 2014) مسئله زمان‌بندی عملیات داخلی در سیستم‌های انبار متقاطع پساتوزیعی را بررسی کردند. آن‌ها عملیات بازکردن محموله‌های ورودی، مرتب‌سازی محصولات بر اساس سفارش مشتری و تجمع محموله‌های خروجی را مدل کردند و نشان دادند که مسئله حاصل NP-hard است. سرانو و همکاران (Serrano et al., 2017) نیز در یک مطالعه صنعتی در شبکه لجستیکی Renault، زمان‌بندی ورود کامیون‌ها، عملیات کف کارگاه و خروج کامیون‌ها را با در نظرگیری ظرفیت نواحی ذخیره‌سازی موقت و کارگاه بسته‌بندی مجدد مدل کردند. این پژوهش نشان داد که در برخی صنایع، مانند خودروسازی، عملیات داخلی و بسته‌بندی مجدد می‌تواند گلوگاه اصلی پایانه باشد.

ادبیات عملیات داخلی سپس به مسائل چند در و چندناحیه‌ای گسترش یافت. چارگوی و همکاران (Chargui et al., 2022) مسئله زمان‌بندی کامیون‌ها و عملیات ذخیره‌سازی را در یک پایانه چند در با چند ناحیه ذخیره‌سازی موقت بررسی کردند. آن‌ها مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط^۱ را برای تخصیص، تعیین توالی، زمان‌بندی کامیون‌ها و مدیریت جریان کالا بین نواحی ذخیره‌سازی توسعه دادند و برای حل نمونه‌های بزرگ از

^۱ Mixed-Integer Linear Programming (MILP)

تعریف می‌شوند، برخی پایانه‌ها در عمل از درهای مختلط استفاده می‌کنند تا یک در بتواند در زمان‌های مختلف برای تخلیه یا بارگیری به کار رود. در همین راستا، نواک و پولادی (Nowak & Puladi, 2025) دو نوع انعطاف‌پذیری شامل خدمت ترکیبی درها و پیش‌پردازش در عملیات کامیون‌ها را بررسی کردند و نشان دادند که نبود خدمت مختلط و نبود پیش‌دستی می‌تواند زمان تکمیل عملیات را به ترتیب حدود ۵۰ و ۳۰ درصد افزایش دهد. در کنار انعطاف‌پذیری، موضوع پایداری و انتشار کربن نیز به تدریج وارد ادبیات انبار متقاطع شده است. موگل و همکاران (Mogale et al., 2023) یک مدل دوهدفه MILP برای تخصیص محصولات به ناوگان ناهمگن کامیون‌ها در صنعت غذا و نوشیدنی ارائه کردند که هم‌زمان هزینه کل سیستم و انتشار کربن را کمینه می‌کند.

رجب زاده و موسوی (Rajabzadeh & Mousavi, 2023) نیز طراحی شبکه حمل‌ونقل پایدار با انبارهای متقاطع ظرفیت‌دار را بررسی کردند و هزینه‌های حمل، موجودی، احداث انبار متقاطع و انتشار کربن را در مدل خود در نظر گرفتند. این مطالعات نشان می‌دهند که تصمیمات عملیاتی و شبکه‌ای انبار متقاطع می‌توانند علاوه بر هزینه و زمان، بر عملکرد زیست‌محیطی زنجیره تأمین نیز اثرگذار باشند.

از سوی دیگر، سیستم‌های تولیدی بازپیکربندی‌پذیر از منظر انعطاف‌پذیری منابع و زمان‌بندی با مسئله حاضر ارتباط مفهومی دارند. برتولینی و همکاران (Bortolini et al., 2018) نشان دادند که این سیستم‌ها برای پاسخ به تنوع محصول، سفارشی‌سازی، نوسان تقاضا و چرخه عمر کوتاه محصول توسعه یافته‌اند و ویژگی‌هایی مانند ماژولار بودن، یکپارچه‌پذیری، تبدیل‌پذیری، مقیاس‌پذیری، تشخیص‌پذیری و سفارشی‌سازی را به عنوان ویژگی‌های کلیدی آن‌ها معرفی کردند. یلز-شاوش و همکاران (Yelles-Chaouche et al., 2021) نیز از منظر بهینه‌سازی نشان دادند که برنامه‌ریزی فرایند، زمان‌بندی، طراحی چیدمان و بالانس خطوط از مهم‌ترین حوزه‌های تصمیم‌گیری در RMS هستند. محمودجانلو و همکاران (Mahmoodjanloo et al., 2020) با بررسی زمان‌بندی کارگاه انعطاف‌پذیر مجهز به ماشین‌های بازپیکربندی‌پذیر نشان دادند که لحاظ زمان‌های آماده‌سازی وابسته به پیکربندی، مسئله زمان‌بندی را پیچیده‌تر می‌کند.

مطالعات جدیدتر، مفهوم بازپیکربندی را به حوزه‌هایی مانند همکاری انسان-ربات، تصمیم‌گیری آنلاین و سیستم‌های چندعامله گسترش داده‌اند. واحدی-نوری و همکاران (Vahedi-Nouri et al., 2024) مسئله زمان‌بندی تولید در سیستم تولیدی بازپیکربندی‌پذیر با همکاری انسان و ربات را بررسی کردند و نشان دادند که مدل برنامه‌ریزی محدودیت در نمونه‌های بزرگ‌تر عملکرد محاسباتی بهتری نسبت به MILP دارد. دانگ و همکاران (Dang et al., 2026) بازپیکربندی را در چارچوب شبکه‌های چندعامله و تاب‌آوری بررسی کرده و بر اهمیت جایگزینی عملکردی، دسترسی به منابع و تحمل بار مأموریت تأکید کردند. هوانگ و همکاران (Huang et al., 2026) نیز با استفاده از دوقلوی دیجیتال و یادگیری تقویتی چندعامله، بهینه‌سازی آنلاین سیستم‌های تولیدی بازپیکربندی‌پذیر هوشمند را بررسی کردند. اگرچه این مطالعات مستقیماً در حوزه انبار متقاطع قرار نمی‌گیرند، اما نشان می‌دهند که انعطاف‌پذیری منابع و تصمیمات پیکربندی می‌تواند در سیستم‌های عملیاتی پیچیده نقش مهمی ایفا کنند. از نظر روش‌های حل، ادبیات انبار متقاطع طیف گسترده‌ای از روش‌ها را به کار گرفته است. مدل‌های MILP برای مدل‌سازی دقیق تصمیمات تخصیص، زمان‌بندی و جریان کالا به‌طور گسترده استفاده شده‌اند، اما پیچیدگی ترکیبیاتی این مسائل باعث شده است که حل دقیق فقط برای نمونه‌های کوچک یا متوسط امکان‌پذیر باشد (Serrano et al., 2017). برای غلبه بر این مشکل، مطالعات مختلف از روش‌های فراابتکاری مانند جست‌وجوی ممنوعه، شبیه‌سازی تبرید، الگوریتم ژنتیک، جست‌وجوی همسایگی متغیر و جست‌وجوی همسایگی بزرگ تطبیقی استفاده کرده‌اند (Chargui et al., 2022; Guemri et al., 2019; Rijal et al., 2019). برخی پژوهش‌ها از روش‌های تجزیه مانند لاگرانژ، Benders و Dantzig-Wolfe استفاده کرده‌اند تا ساختار مسئله بهتر بهره‌برداری شود (Monaco & Sammarra, 2023). در سال‌های اخیر نیز یادگیری ماشین و یادگیری تقویتی برای هدایت فرایند جست‌وجو، انتخاب برش‌ها یا یادگیری سیاست‌های تصمیم‌گیری به کار گرفته شده‌اند (Monemi et al., 2024; Li et al., 2024).

۲-۶- شکاف ادبیات

با جمع‌بندی ادبیات می‌توان گفت مطالعات موجود هر یک بخشی از پیچیدگی انبار متقاطع را بررسی کرده‌اند. بخشی از مطالعات بر تخصیص درب و کاهش هزینه انتقال متمرکز بوده‌اند و معمولاً عملیات داخلی یا زمان‌بندی دقیق را ساده‌سازی کرده‌اند. بخشی دیگر زمان‌بندی کامیون‌ها، زمان تکمیل، تأخیر و پنجره‌های زمانی را بررسی کرده‌اند، اما اغلب منابع داخلی یا پردازش‌های عملیاتی را به شکل محدود وارد مدل کرده‌اند. گروه دیگر موجودی موقت، نواحی ذخیره‌سازی و عملیات داخلی مانند بسته‌بندی مجدد و تجمیع را وارد مدل کرده‌اند، اما معمولاً تصمیمات مربوط به منابع پردازشی داخلی را با جزئیات محدودتری بررسی کرده‌اند. همچنین، مطالعات بازپیکربندی عمدتاً در محیط تولیدی توسعه یافته‌اند و کمتر به پایانه‌های لجستیکی و انبار متقاطع منتقل شده‌اند. بر این اساس، شکاف اصلی ادبیات در نبود یک مدل یکپارچه است که تخصیص درب، زمان‌بندی کامیون‌های ورودی و خروجی، مدیریت جریان چندمحصولی، موجودی موقت، عملیات داخلی و انعطاف‌پذیری منابع پردازشی را هم‌زمان در نظر بگیرد. جدول مرور ادبیات (جدول ۱ و ۲) نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌ها فقط بخشی از این ابعاد را پوشش داده‌اند؛ برای مثال برخی مطالعات فقط تخصیص درب را بررسی کرده‌اند، برخی بر زمان‌بندی و موجودی موقت متمرکز بوده‌اند، برخی عملیات داخلی را وارد مدل کرده‌اند و تعداد محدودی از مطالعات به منابع داخلی یا انعطاف‌پذیری عملیاتی پرداخته‌اند. بنابراین، جایگاه پژوهش حاضر در توسعه یک رویکرد یکپارچه برای مسئله برنامه‌ریزی و تخصیص انبار متقاطع چنددر و چندمحصولی قرار می‌گیرد؛ رویکردی که بتواند هم‌زمان تصمیمات مربوط به درها، کامیون‌ها، جریان کالا، عملیات داخلی و منابع پردازشی را در یک چارچوب ریاضی منسجم ادغام کند.

۳- بیان مسئله

استفاده از ماشین‌های پردازشی بازپیکربندی‌پذیر^۱ در این پژوهش با هدف نمایش انعطاف‌پذیری منابع داخلی در پایانه‌های انبار متقاطع انجام شده است. اگرچه

مفهوم RPM عمدتاً در ادبیات سیستم‌های تولیدی بازپیکربندی‌پذیر توسعه یافته است، منطق آن می‌تواند برای برخی عملیات ارزش‌افزوده کوتاه‌مدت در پایانه‌های لجستیکی نیز کاربرد داشته باشد. در چنین پایانه‌هایی، کالاها ممکن است پیش از ارسال خروجی نیازمند برچسب‌گذاری مقصد، بسته‌بندی مجدد، بازرسی، تفکیک، تجمیع یا آماده‌سازی سفارش باشند. این فعالیت‌ها می‌توانند با تجهیزات یا ایستگاه‌های ماژولار انجام شوند که بسته به نوع محصول، پیکربندی عملیاتی متفاوتی نیاز دارند. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌نمایید، RPM به‌عنوان نمایش انتزاعی چنین منابع پردازشی انعطاف‌پذیری در نظر گرفته شده است؛ منابعی که می‌توانند با تغییر پیکربندی، انواع مختلفی از دسته‌های محصول را پردازش کنند، اما تغییر پیکربندی آن‌ها زمان آماده‌سازی یا بازپیکربندی به سیستم تحمیل می‌کند.

مسئله مورد بررسی، یک افق برنامه‌ریزی قطعی را برای یک پایانه انبار متقاطع در نظر می‌گیرد. در مسئله حاضر، کامیون‌های ورودی بر اساس زمان‌های ورود از پیش تعیین‌شده و با مقادیر مشخصی از محموله وارد پایانه انبار متقاطع می‌شوند. هر کامیون ورودی ممکن است چندین نوع محصول را حمل کند. پس از تخصیص کامیون به یک درب ورودی و انجام عملیات تخلیه، تمامی واحدهای متعلق به یک نوع محصول که از یک کامیون مشخص منشأ گرفته‌اند، به‌عنوان یک دسته واحد در نظر گرفته شده و به یک ترکیب مناسب از ماشین و پیکربندی تخصیص می‌یابند. همچنین، بین هر دو کامیونی که به‌صورت متوالی به یک درب مشترک تخصیص داده می‌شوند، زمان تعویض کامیون لحاظ می‌گردد. زمان‌های جابه‌جایی بین درب‌ها و ماشین‌ها در مسیرهای مختلف متفاوت بوده و مستقل از تعداد محصولات موجود در هر دسته فرض می‌شوند. بر اساس مجموعه ترکیب‌های امکان‌پذیر، مدل تخصیص محصولات به ماشین‌ها را تعیین کرده، پیکربندی‌های مناسب را انتخاب می‌کند و توالی بهینه پردازش را مشخص می‌سازد. در صورتی که بین دو دسته محصول متوالی، پیکربندی ماشین تغییر کند، زمان بازپیکربندی به سیستم تحمیل می‌شود؛ از این‌رو، مدل تلاش می‌کند تا حد امکان محصولات را که به پیکربندی یکسان نیاز دارند، به‌صورت متوالی به ماشین‌ها تخصیص دهد.

^۱ Reconfigurable Process Machines (RPM)

جدول ۱. مروری بر مهمترین مقالات بررسی شده در این حوزه (جزئیات)

Table 1. A review of the most important articles related to this study (details)

مرجع	تخصیص درب	زمان‌بندی	موجودی موقت	عملیات داخلی	چند محصولی	قابلیت بازیگربندی
Guemri et al., 2019	✓	-	-	-	-	-
Essghaier et al., 2021	✓	-	-	-	-	-
Serrano et al., 2017	-	✓	✓	-	✓	-
Zheng et al., 2022	-	✓	✓	✓	✓	-
Vanajakumari et al., 2022	-	✓	✓	-	✓	-
Gallo et al., 2022	✓	✓	✓	-	✓	-
Monaco & Sammarra, 2023	-	✓	-	-	✓	-
Ghomi et al., 2023	✓	-	-	-	-	-
Rajabzadeh & Mousavi, 2023	✓	✓	✓	-	✓	-
Monemi et al., 2023	✓	✓	-	-	-	-
Escudero et al., 2024	✓	-	-	-	-	-
Li et al., 2024	✓	-	-	-	-	-
Monemi et al., 2024	✓	✓	✓	-	✓	-
Eti et al., 2025	✓	✓	✓	✓	✓	-
Nowak & Puladi, 2025	✓	✓	✓	-	✓	-
Zheng et al., 2026	✓	✓	✓	✓	✓	-
Lu et al., 2026	✓	-	-	-	-	-
پژوهش حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	✓

جدول ۲. مروری بر مهمترین مقالات بررسی شده در این حوزه (روش‌شناسی)

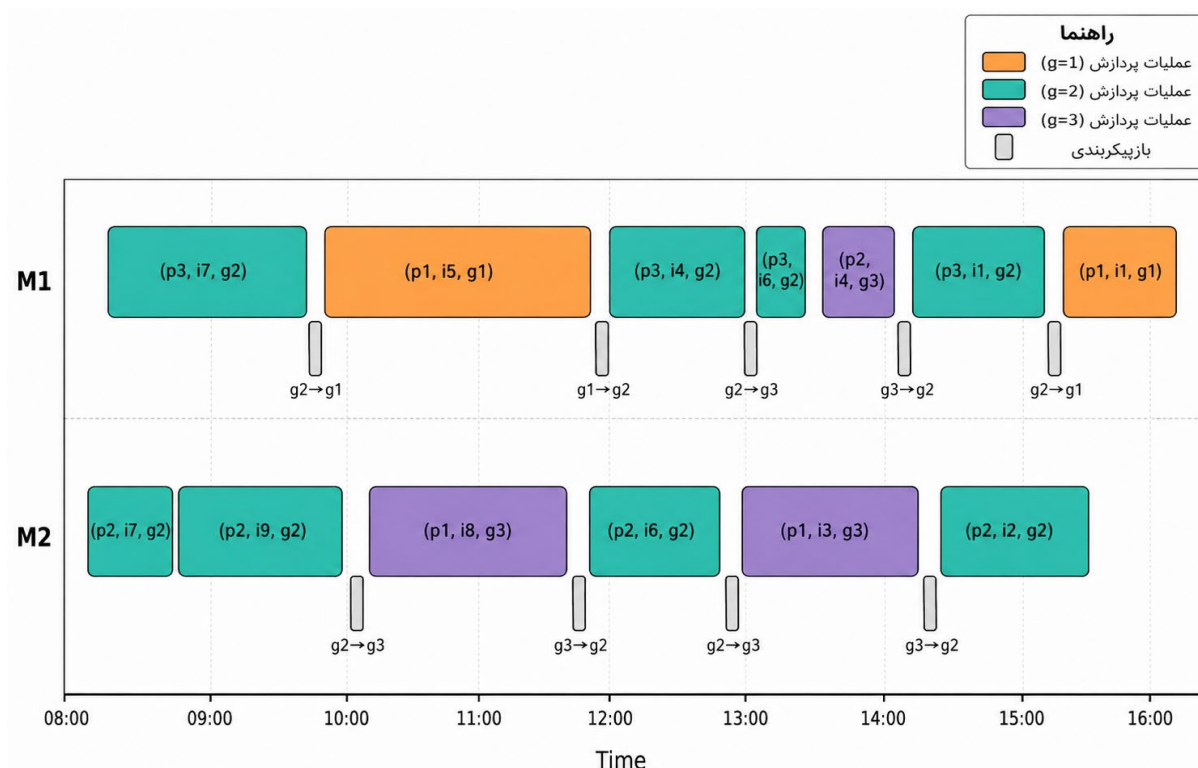
Table 2. A review of the most important articles related to this study (methodology)

مرجع	تابع هدف	مدل	رویکرد حل
Guemri et al., 2019	هزینه مدیریت مواد اولیه	برنامه‌ریزی مختلط عددصحیح	روش نوین ابتکاری جستجوی احتمالی ممنوعه
Essghaier et al., 2021	هزینه کل	برنامه‌ریزی مختلط عددصحیح	برنامه‌ریزی اتفاقی فازی
Serrano et al., 2017	هزینه کل	برنامه‌ریزی مختلط عددصحیح خطی	سیپلکس
Zheng et al., 2022	تعداد کامیون‌های ورودی که با تاخیر وارد شده‌اند	برنامه‌ریزی مختلط عددصحیح خطی	الگوریتم سه مرحله‌ای حریصانه
Vanajakumari et al., 2022	هزینه عملیاتی کل	برنامه‌ریزی مختلط عددصحیح	روش ابتکاری بسته‌بندی جعبه
Gallo et al., 2022	جمع هزینه‌ها	برنامه‌ریزی احتمالی مختلط عددصحیح	الگوریتم احتمالی ژنتیک
Monaco & Sammarra, 2023	زمان کل	برنامه‌ریزی مختلط عددصحیح	روش ابتکاری لاگرانژ
Ghomi et al., 2023	هزینه انتقال کالا	برنامه‌ریزی مختلط عددصحیح غیرخطی	جستجوی ممنوعه و رویکرد پابنده بهترین نقطه محلی
Rajabzadeh & Mousavi, 2023	هزینه کل	برنامه‌ریزی مختلط عددصحیح خطی	روش‌های محدودیت اپسیلون و وزن‌دهی
Monemi et al., 2023	هزینه زمان انتظار برای کامیون‌ها	برنامه‌ریزی مختلط عددصحیح	روش شاخه و برش بر پایه یادگیری ماشین

ادامه جدول ۲.

Table 2 continued.

مرجع	تابع هدف	مدل	رویکرد حل
Escudero et al., 2024	هزینه کل	برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح غیرخطی	روش شتاب‌دهنده لاگرانژی
Li et al., 2024	هزینه کل انتقال پالت‌ها	برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح غیرخطی	مدل‌سازی جریان محور و رویکرد ابتکاری یادگیری تقویتی
Monemi et al., 2024	زمان کل	برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح خطی	بازفرمول بندی دانتزیگ-ولف
Eti et al., 2025	تاخیر کل کامیون‌های خروجی	برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح خطی	شبیه‌سازی مبتنی بر جمعیت یکپارچه
Nowak & Puladi, 2025	زمان کل	برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح خطی	الگوریتم ژنتیک و جستجوی همسایگی متغیر
Zheng et al., 2026	هزینه عملیاتی کل	برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای	جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی مبتنی بر افق غلطان
Lu et al., 2026	هزینه کل انتقال پالت‌ها	برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح / فرمول‌بندی تخصیص درجه دوم	الگوریتم تکاملی مبتنی بر استخراج الگوهای پرتکرار
پژوهش حاضر	جریمه تاخیر	برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح خطی	سیپلکس



شکل ۲. گانت چارت و نمونه‌ای از عملیات‌های در حال انجام بین ماشین‌های پردازش.

Figure 2. Gantt chart and an example of ongoing operations among processing RPMs.

می‌یابند که هنوز محموله‌های موردنیاز خود را به‌طور کامل دریافت نکرده‌اند. برای هر کامیون خروجی، زمان خروج از پیش تعیین‌شده‌ای در نظر گرفته می‌شود و هرگونه نقض این زمان که منجر به خروج با تأخیر شود، موجب تحمیل جریمه دیرکرد به آن کامیون خواهد شد.

پس از تکمیل پردازش یک دسته محصول روی یک ماشین، تعداد مشخصی از محصولات، بسته به کامیون‌های خروجی موجود برای بارگیری، تفکیک شده و مطابق تصمیم‌های مدل به مقصدهای موردنظر هدایت می‌شوند. سپس این محصولات به کامیون‌های خروجی‌ای تخصیص

در ادامه به شرح تصمیمات اصلی مدل و همچنین مفروضات مسئله مذکور می‌پردازیم.

۳-۱- تصمیمات اصلی مدل

در پایانه مورد مطالعه، تصمیمات عملیاتی تنها به تعیین درب کامیون‌ها محدود نیست؛ زیرا پس از تخلیه، محصولات باید از طریق منابع داخلی پردازش و سپس برای بارگیری در کامیون‌های خروجی آماده شوند. بنابراین تصمیمات مکانی، زمانی و پردازشی به یکدیگر وابسته‌اند. برای مثال، انتخاب درب ورودی بر زمان انتقال محصول به ماشین اثر می‌گذارد؛ انتخاب ماشین و پیکربندی بر زمان آماده‌شدن محصول اثر دارد؛ و زمان آماده‌شدن محصول، زودترین زمان ممکن برای شروع بارگیری کامیون خروجی را تعیین می‌کند. به همین دلیل، مدل پیشنهادی تصمیمات زیر را به صورت هم‌زمان در نظر می‌گیرد تا از ایجاد برنامه‌های بهینه محلی اما ناسازگار در سطح کل پایانه جلوگیری شود. تصمیمات مدل به شرح زیر می‌باشند:

- تخصیص کامیون‌های ورودی به درب‌های ورودی و تعیین توالی خدمت‌دهی آن‌ها.
- تخصیص کامیون‌های خروجی به درب‌های خروجی و تعیین توالی بارگیری آن‌ها.
- تخصیص هر دسته محصول به یک ماشین فرایندی بازپیکربندی‌پذیر مجاز و انتخاب پیکربندی سازگار.
- تعیین توالی دسته‌های محصول روی هر ماشین با لحاظ زمان بازپیکربندی وابسته به توالی.
- تعیین زمان آماده‌شدن محصول، زمان بارگیری و زمان خروج کامیون‌های مقصد.

۳-۲- مفروضات اصلی مدل

مفروضات مدل با هدف تمرکز بر تعامل میان زمان‌بندی کامیون‌ها، تخصیص درب‌ها و عملیات داخلی بازپیکربندی‌پذیر تنظیم شده‌اند. برخی جنبه‌های عملیاتی مانند عدم قطعیت زمان ورود، خرابی تجهیزات و هزینه سرمایه‌گذاری ماشین‌ها خارج از دامنه مدل حاضر قرار گرفته‌اند تا ساختار پایه مسئله و اثر تصمیمات پردازشی بر دیرکرد خروجی‌ها به صورت شفاف تحلیل شود. با این

حال، مفروضات به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که با منطق عملیاتی انبار متقاطع سازگار باشند؛ یعنی محصولات برای نگهداری بلندمدت وارد سیستم نمی‌شوند و تمرکز مدل بر هماهنگی جریان سریع کالا از ورودی به خروجی است.

- افق برنامه‌ریزی برابر با یک روز کاری است و کامیون‌ها در طول زمان و در زمان‌های متفاوت وارد بارانداز متقاطع می‌شوند و برای هر کامیون، زمان ورود از پیش تعیین شده است.
- همه‌ی کامیون‌ها قابلیت تخصیص به هر درب را دارند و از این نظر محدودیتی از پیش بر آن‌ها تحمیل نشده است.
- بین هر دو کامیون متوالی که از یک درب مشترک استفاده می‌کنند، زمان تعویض کامیون در نظر گرفته می‌شود.
- زمان‌های جابه‌جایی بین درب‌ها و ماشین‌های فرایندی، و نیز بین ماشین‌ها و درب‌ها، مستقل از مقدار محصول در نظر گرفته می‌شوند؛ با این حال، زمان انتقال بین هر درب و هر ماشین می‌تواند متفاوت باشد. همچنین فرض می‌شود پس از اتمام تخلیه‌ی یک کامیون ورودی، همه‌ی محصولات آن از طریق نوار نقاله به سمت ماشین‌های متناظر خود حرکت می‌کنند.
- هر نوع محصول موجود در یک کامیون ورودی به صورت یک دسته جابه‌جا می‌شود و پس از اتمام عملیات روی ماشین، از یکدیگر تفکیک شده و به درب تخصیص‌یافته به کامیون خروجی تعیین شده ارسال می‌شود.
- در هر لحظه، روی هر ماشین فرایندی بازپیکربندی‌پذیر، حداکثر یک دسته قابل پردازش است.
- هر نوع محصول می‌تواند روی بیش از یک پیکربندی مجاز از هر ماشین پردازش شود و این ترکیب‌ها با عنوان ترکیب‌های مجاز ماشین-پیکربندی شناخته می‌شوند.
- پس از شروع پردازش یک دسته، عملیات آن بدون وقفه ادامه می‌یابد و در طول پردازش، هیچ محصولی را نمی‌توان به آن افزود یا از آن جدا کرد.

- زمان پردازش هر محصول قطعی بوده و به ترکیب تخصیص یافته‌ی ماشین-پیکربندی وابسته است و در زمان بازپیکربندی، ماشین مربوطه برای انجام عملیات پردازش در دسترس نیست.
- ذخیره‌سازی موقت در داخل بارانداز متقاطع مجاز است.
- زودترین زمانی که یک کامیون خروجی می‌تواند به بارانداز تخصیص یابد، زمانی است که همه‌ی محصولات موردنیاز آن در درب خروجی قابل دسترس باشند.
- عملیات بارگیری و تخلیه غیرقابل وقفه است؛ بنابراین هر کامیون فقط زمانی مجاز به ترک درب خواهد بود که تمامی محصولات تخصیص یافته به آن به‌طور کامل تخلیه یا بارگیری شده باشند.

۳-۳- مدل سازی مسئله

در ادامه پس از بررسی مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله، به شرح مدل ریاضی و محدودیت‌های مسئله مذکور می‌پردازیم. متغیرها به شرح زیر هستند:

مجموعه‌ها	
I	مجموعه کامیون‌های ورودی، $i \in I$
K	مجموعه کامیون‌های خروجی، $k \in K$
J	مجموعه درهای قسمت ورودی انبار متقاطع، $j \in J$
L	مجموعه درهای قسمت خروجی انبار متقاطع، $l \in L$
P	مجموعه محصولات، $p \in P$
M	مجموعه ماشین‌های با قابلیت بازپیکربندی، $m \in M$
G	مجموعه پیکربندی‌های هر ماشین، $g \in G$
پارامترها	
ar_i	زمان رسیدن کامیون ورودی i به انبار متقاطع
ao_k	زمان رسیدن کامیون خروجی k به انبار متقاطع
hi_{pi}	تعداد محصول از نوع p که توسط کامیون ورودی i وارد انبار متقاطع می‌شود
h_{pk}	تعداد محصول از نوع p که توسط کامیون خروجی k قرار است از انبار متقاطع خارج شود
t_{jm}	زمان جابه‌جایی بین در ورودی j تا ماشین پردازش m
tl_{ml}	زمان جابه‌جایی بین ماشین پردازش m تا در خروجی l
tc	زمان موردنیاز جهت جابه‌جایی بین دو کامیون متوالی روی یک در
tu	زمان موردنیاز جهت تخلیه یک عدد محصول
tl	زمان موردنیاز جهت بارگیری یک عدد محصول
dd_k	آخرین زمان مجاز برای خروج کامیون خروجی k
pr_{pmg}	زمان پردازش محصول نوع p روی ماشین m با پیکربندی g
b_l	گنجایش درب خروجی l برای محصولاتی که به صورت موقت در آن منتظر بارگیری توسط کامیون خروجی مربوط به خود هستند
o_{pmg}	برابر یک است اگر محصول p بتواند با پیکربندی g روی ماشین m پردازش شود؛ در غیر این صورت صفر
st_{g1g2m}	زمان موردنیاز برای تغییر پیکربندی از حالت $g1$ به حالت $g2$ ($g2 \neq g1$) روی ماشین m
c_k	هزینه هر یک واحد زمانی تاخیر برای کامیون خروجی k
M_{big}	یک عدد مثبت بسیار بزرگ

متغیرهای تصمیم	
X_{ij}	برابر یک است اگر کامیون ورودی i به در ورودی j تخصیص داده شود؛ در غیر این صورت صفر
Y_{kl}	برابر یک است اگر کامیون خروجی k به در خروجی l تخصیص داده شود؛ در غیر این صورت صفر
Z_{pimk}	برابر یک است اگر محصول p از کامیون ورودی i به ماشین m تخصیص داده شده و قرار است به کامیون خروجی k برود؛ در غیر این صورت صفر
$W_{ii'j}$	برابر یک است اگر کامیون ورودی i قبل از کامیون ورودی i' به در ورودی j تخصیص داده شود؛ در غیر این صورت صفر
$Q_{kk'l}$	برابر یک است اگر کامیون خروجی k قبل از کامیون خروجی k' به در خروجی l تخصیص داده شود؛ در غیر این صورت صفر
R_{pimg}	برابر یک است اگر محصول p از کامیون ورودی i به ماشین m با پیکربندی g تخصیص داده شود؛ در غیر این صورت صفر
$U_{pip'i'm}$	برابر یک محصول p از کامیون ورودی i قبل از محصول p' از کامیون ورودی i' به ماشین m تخصیص داده شود؛ در غیر این صورت صفر
A_{ij}	زمان تخصیص کامیون ورودی i به در ورودی j
AT_{kl}	زمان تخصیص کامیون خروجی k به در خروجی l
λ_{pimk}	زمان شروع ارسال محصول p از کامیون ورودی i ، از مبدا ماشین m به مقصد کامیون خروجی k
μ_{pim}	زمان شروع پردازش محصول نوع p از کامیون ورودی i بر روی ماشین m
N_{pim}	تعداد محصولات نوع p که از کامیون ورودی i به ماشین m رفته اند
V_{pimk}	تعداد محصولات نوع p که از کامیون ورودی i به ماشین m رفته اند و پس از آن قرار است به سمت کامیون خروجی k بروند
D_{kl}	زمان خروج کامیون خروجی k از در خروجی l

معادلات به شرح روابط (۱) تا (۳۴) هستند.

$$\min \sum_k c_k Tard_k \quad (۱)$$

s.t.

$$\sum_j X_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (۲)$$

$$\sum_j W_{i'ij} + \sum_j W_{iij'} \leq \frac{(X_{ij} + X_{i'j})}{2} \quad \forall j \in J, \forall i \neq i' \in I \quad (۳)$$

$$W_{i'ij} + W_{iij'} \geq X_{ij} + X_{i'j} + 1 \quad \forall j \in J, \forall i \neq i' \in I \quad (۴)$$

$$W_{i'ij} + W_{iij'} \geq X_{ij} + X_{i'j} + 1 \quad \forall j \in J, \forall i \neq i' \in I \quad (۴)$$

$$A_{ij} \geq ar_i \times X_{ij} \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (۵)$$

$$A_{i'j} \geq A_{ij} + \sum_p (hi_{pi} \times tu) + tc - M_{big}(1 - W_{iij'}) \quad \forall j \in J, \forall i \neq i' \in I \quad (۶)$$

$$\sum_m N_{pim} = hi_{pi} \quad \forall p \in P, \forall i \in I \quad (۷)$$

$$R_{pimg} \leq o_{pmg} \quad \forall p \in P, \forall i \in I, \forall m \in M, \forall g \in G \quad (۸)$$

$$\sum_m \sum_g R_{pimg} = 0 \quad \begin{array}{l} \text{If } h_{ipi} = 0 \\ \forall p \in P, \forall i \in I \end{array} \quad (9)$$

$$\sum_m \sum_g R_{pimg} = 1 \quad \begin{array}{l} \text{If } h_{ipi} \neq 0 \\ \forall p \in P, \forall i \in I \end{array} \quad (10)$$

$$\mu_{pim} \geq \sum_j A_{ij} + h_{ipi} \times tu + \sum_j (X_{ij} \times t_{jm}) - M_{big} \times \left(1 - \sum_g R_{pimg}\right) \quad \begin{array}{l} \text{If } h_{ipi} \neq 0 \\ \forall p \in P, \forall i \in I, \forall m \in M \end{array} \quad (11)$$

$$U_{pip'i'm} + U_{p'i'pim} \leq \frac{(\sum_g R_{pimg} + R_{p'i'mg})}{2} \quad \begin{array}{l} \text{If } h_{ipi} \neq 0 \text{ or } h_{ip'i'} \neq 0 \\ \text{If } i \neq i' \text{ or } p \neq p' \\ \forall p, p' \in P, \forall i, i' \in I, \\ \forall m \in M \end{array} \quad (12)$$

$$U_{pip'i'm} + U_{p'i'pim} \geq \left(\sum_g R_{pimg} + R_{p'i'mg}\right) - 1 \quad \begin{array}{l} \text{If } h_{ipi} \neq 0 \text{ or } h_{ip'i'} \neq 0 \\ \text{If } i \neq i' \text{ or } p \neq p' \\ \forall p, p' \in P, \forall i, i' \in I, \\ \forall m \in M \end{array} \quad (13)$$

$$\mu_{p'i'm} > \mu_{pim} - M_{big}(1 - U_{pip'i'm}) \quad \begin{array}{l} \text{If } h_{ipi} \neq 0 \text{ or } h_{ip'i'} \neq 0 \\ \text{If } i \neq i' \text{ or } p \neq p' \\ \forall p \in P, \forall i \in I, \forall p' \in P, \\ \forall i' \in I, \forall m \in M \end{array} \quad (14)$$

$$\mu_{p'i'm} \geq \mu_{pim} + N_{pim} \times pr_{pmg} + st_{gg'm} - M_{big}(3 - R_{pimg} - R_{p'i'mg'} - U_{pip'i'm}) \quad \begin{array}{l} \text{If } h_{ipi} \neq 0 \text{ or } h_{ip'i'} \neq 0 \\ \text{If } i \neq i' \text{ or } p \neq p' \\ \forall g, g' \in G \\ \forall p, p' \in P, \forall i, i' \in I, \\ \forall m \in M \end{array} \quad (15)$$

$$\sum_l Y_{kl} = 1 \quad \forall k \in K \quad (16)$$

$$Q_{k'kl} + Q_{kk'l} \leq \frac{(Y_{kl} + Y_{k'l})}{2} \quad \begin{array}{l} \text{If } k \neq k' \\ \forall k, k' \in K, \forall l \in L \end{array} \quad (17)$$

$$Q_{k'kl} + Q_{kk'l} \geq Y_{kl} + Y_{k'l} - 1 \quad \begin{array}{l} \text{If } k \neq k' \\ \forall k, k' \in K, \forall l \in L \end{array} \quad (18)$$

$$AT_{k'l} \geq AT_{kl} + tc + tl \left(\sum_p h_{pk} \right) - M_{big}(1 - Q_{kk'l}) \quad \begin{array}{l} \text{If } k \neq k' \\ \forall k, k' \in K, \forall l \in L \end{array} \quad (19)$$

$$Z_{pimk} \leq \sum_g R_{pimg} \quad \begin{array}{l} \forall p \in P, \forall i \in I, \\ \forall m \in M, \forall k \in K \end{array} \quad (20)$$

$$\sum_k V_{pimk} = N_{pim} \quad \forall p \in P, \forall i \in I, \forall m \in M \quad (21)$$

$$\sum_i \sum_m V_{pimk} = h_{pk} \quad \forall p \in P, \forall k \in K \quad (22)$$

$$V_{pimk} \leq M_{big} \times Z_{pimk} \quad \begin{array}{l} \forall p \in P, \forall i \in I, \\ \forall m \in M, \forall k \in K \end{array} \quad (23)$$

$$\lambda_{pimk} \geq \mu_{pim} + N_{pim} \times pr_{pmg} + \left(\sum_l Y_{kl} \times tl_{ml} \right) - M_{big} \times (2 - R_{pimg} - Z_{pimk})$$

$$\forall p \in P, \forall i \in I, \forall m \in M, \forall g \in G, \forall k \in K \quad (24)$$

$$\lambda_{pimk} \leq M_{big}(Z_{pimk})$$

$$\forall p \in P, \forall i \in I, \forall m \in M, \forall k \in K \quad (25)$$

$$\lambda_k^{max_{pimk}}$$

$$\forall p \in P, \forall i \in I, \forall m \in M, \forall k \in K \quad (26)$$

$$AT_{kl} \geq \lambda_k^{max_{big}(1-Y_{kl})}$$

$$\forall k \in K, \forall l \in L \quad (27)$$

$$AT_{kl} \geq Y_{kl} \times \alpha o_k$$

$$\forall k \in K, \forall l \in L \quad (28)$$

$$D_{kl} \geq AT_{kl} + tl \left(\sum_p h_{pk} \right) - M_{big} \times (1 - Y_{kl})$$

$$\forall k \in K, \forall l \in L \quad (29)$$

$$D_{kl} \leq M_{big} \times (Y_{kl})$$

$$\forall k \in K, \forall l \in L \quad (30)$$

$$Tard_k \geq \sum_l D_{kl} - dd_k$$

$$\forall k \in K \quad (31)$$

$$\sum_p \sum_i \sum_m V_{pimk} \leq b_l + M_{big}(1 - Y_{kl})$$

$$\forall k \in K, \forall l \in L \quad (32)$$

$$A_{ij}, N_{pim}, \mu_{pim}, AT_{kl}, V_{pimk0}, \lambda_{pimk}, \lambda_k^{max_{klk}}$$

$$\forall p, i, m, k, j, l \quad (33)$$

$$X_{ij}, Y_{kl}, Z_{pimk}, W_{it'j}, Q_{kk'l}, R_{pimg}, U_{pip'i'}, \in \{0,1\}$$

$$\forall p, i, m, k, j, l \quad (34)$$

متناظر آن‌ها را کنترل می‌کنند. محدودیت (۷) تضمین می‌کند که مقدار محصول تخصیص‌یافته از یک کامیون ورودی به ماشین‌ها از مقدار موجود آن محصول در همان کامیون بیشتر نباشد. محدودیت (۸) سازگاری میان ماشین و پیکربندی را اعمال می‌کند؛ به این صورت که پردازش یک محصول روی یک پیکربندی مشخص از ماشین فرایندی بازپیکربندی‌پذیر تنها زمانی مجاز است که پارامتر سازگاری متناظر برابر با یک باشد. محدودیت (۹) از تخصیص ماشین یا پیکربندی به نوع محصولی که در کامیون ورودی وجود ندارد جلوگیری می‌کند. محدودیت (۱۰) نیز تضمین می‌کند که هر دسته محصول موجود، دقیقاً به یک ماشین فرایندی بازپیکربندی‌پذیر و یک پیکربندی سازگار تخصیص یابد.

محدودیت‌های (۱۱) تا (۱۵) زمان‌بندی و توالی پردازش محصولات روی ماشین‌های فرایندی بازپیکربندی‌پذیر را توصیف می‌کنند. محدودیت (۱۱) زمان رسیدن یک دسته محصول به ماشین فرایندی بازپیکربندی‌پذیر را به زمان تکمیل عملیات تخلیه در درب ورودی متناظر مرتبط می‌سازد و زمان جابه‌جایی لازم برای انتقال آن دسته محصول از درب ورودی به ماشین منتخب را نیز به آن اضافه می‌کند. محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳) ترتیب نسبی

معادله (۱) مدل با هدف کمینه‌سازی هزینه جریمه ناشی از دیرکرد در خروج کامیون‌های خروجی تعریف شده است. محدودیت‌های (۲) تا (۶) تخصیص و توالی‌دهی کامیون‌های ورودی در درب‌های ورودی بارانداز را تعیین می‌کنند. محدودیت (۲) هر کامیون ورودی را دقیقاً به یک درب ورودی تخصیص می‌دهد. محدودیت‌های (۳) و (۴) ترتیب نسبی خدمت‌دهی میان هر زوج از کامیون‌های ورودی تخصیص‌یافته به یک درب ورودی مشترک را مشخص می‌کنند؛ به گونه‌ای که اگر دو کامیون ورودی از یک درب مشترک استفاده کنند، الزاماً یکی از آن‌ها باید پیش از دیگری خدمت دریافت کند. محدودیت (۵) تضمین می‌کند که زمان آغاز خدمت‌دهی به یک کامیون ورودی نمی‌تواند زودتر از زمان ورود آن باشد. در نهایت، محدودیت (۶) اطمینان می‌دهد که دو کامیون ورودی به‌طور هم‌زمان از یک درب ورودی مشترک خدمت دریافت نکنند؛ بدین معنا که خدمت‌دهی به کامیون ورودی دوم تنها زمانی می‌تواند آغاز شود که عملیات تخلیه کامیون اول تکمیل شده و زمان لازم برای تعویض کامیون نیز سپری شده باشد.

محدودیت‌های (۷) تا (۱۰) تخصیص دسته‌های محصول به ماشین‌های فرایندی بازپیکربندی‌پذیر و پیکربندی‌های

طریق متغیر دودویی مسیریابی متناظر برقرار شود؛ تغییری که مسیر مشخص حرکت محصول از ماشین فرایندی بازپیکربندی‌پذیر به کامیون خروجی را تعیین می‌کند.

محدودیت‌های (۲۴) تا (۲۸) زمان در دسترس قرار گرفتن محصولات پردازش‌شده و زمان آغاز بارگیری کامیون‌های خروجی را تعیین می‌کنند. در این راستا، محدودیت (۲۴) زودترین زمانی را محاسبه می‌کند که یک محصول پردازش‌شده برای تحویل خروجی در دسترس خواهد بود. این محاسبه با در نظر گرفتن زمان پردازش موردنیاز روی هر ماشین فرایندی بازپیکربندی‌پذیر منتخب و همچنین زمان جابه‌جایی از آن ماشین به درب خروجی تخصیص‌یافته انجام می‌شود. محدودیت (۲۵) تضمین می‌کند که متغیر زمان دسترسی، در صورتی که مسیر متناظر محصول انتخاب نشده باشد، برابر صفر شود. محدودیت (۲۶) نیز دیرترین زمان ممکن را تعیین می‌کند که در آن، یک کامیون خروجی می‌تواند تمامی محصولات پردازش‌شده موردنیاز خود را دریافت کند.

محدودیت‌های (۲۹) تا (۳۱) زمان خروج کامیون‌های خروجی و میزان دیرکرد آن‌ها را تعریف می‌کنند. محدودیت (۲۹) زمان خروج یک کامیون خروجی را به‌صورت مجموع زمان آغاز بارگیری و کل زمان لازم برای بارگیری محصولات موردنیاز آن محاسبه می‌کند. محدودیت (۳۰) متغیر زمان خروج را تنها برای درب خروجی منتخب فعال می‌سازد. محدودیت (۳۱) دیرکرد هر کامیون خروجی را به‌عنوان اختلاف میان زمان خروج آن و موعد مقرر متناظر تعریف می‌کند. محدودیت (۳۲) نیز مربوط به ظرفیت گنجایش درهای خروجی جهت نگهداری محصولات است. در نهایت، مجموعه محدودیت‌های (۳۳) و (۳۴) نوع متغیرهای تصمیم و متغیرهای کمکی مدل را مشخص می‌کنند.

۴- نتایج محاسباتی

این بخش به بررسی اعتبارسنجی مدل پیشنهادی از طریق حل آن بر روی ۱۰ مثال عددی به وسیله حل‌کننده CPLEX و بررسی خروجی آن پرداختیم. پیچیدگی مسئله‌ی حاضر از آن ناشی می‌شود که چند سطح تصمیم‌گیری باید هم‌زمان اتخاذ شوند: تخصیص

دو دسته محصولی را که روی یک ماشین فرایندی بازپیکربندی‌پذیر پردازش می‌شوند، تعیین می‌کنند. محدودیت (۱۴) نیز با مرتبط ساختن متغیر دودویی تقدم با زمان‌های شروع پردازش متناظر هر یک از دسته‌ها، این منطق توالی‌دهی را تکمیل می‌کند. محدودیت (۱۵) از پردازش هم‌زمان دو دسته محصول روی یک ماشین فرایندی بازپیکربندی‌پذیر جلوگیری کرده و در صورت تغییر پیکربندی ماشین از یک حالت به حالت دیگر، زمان بازپیکربندی وابسته به توالی را نیز در نظر می‌گیرد.

محدودیت‌های (۱۶) تا (۱۹) تخصیص و توالی‌دهی کامیون‌های خروجی در درب‌های خروجی را تعریف می‌کنند. محدودیت (۱۶) هر کامیون خروجی را دقیقاً به یک درب خروجی تخصیص می‌دهد. محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) ترتیب خدمت‌دهی را برای هر زوج از کامیون‌های خروجی تخصیص‌یافته به یک درب خروجی مشترک مشخص می‌کنند. محدودیت (۱۹) تضمین می‌کند که دو کامیون خروجی به‌طور هم‌زمان در یک درب خروجی بارگیری نشوند؛ بنابراین، کامیون خروجی بعدی تنها زمانی می‌تواند عملیات بارگیری را آغاز کند که کامیون قبلی بارگیری خود را تکمیل کرده و زمان تعویض موردنیاز نیز سپری شده باشد.

جریان محصولات از کامیون‌های ورودی به کامیون‌های خروجی، مطابق محدودیت‌های مرتبط با ماشین‌های فرایندی بازپیکربندی‌پذیر و همان‌گونه که در محدودیت‌های (۲۰) تا (۲۳) تشریح شده است، کنترل می‌شود. بر اساس محدودیت (۲۰)، هیچ دسته محصولی نمی‌تواند از یک ماشین فرایندی بازپیکربندی‌پذیر به یک کامیون خروجی منتقل شود، مگر آنکه آن دسته محصول پیش‌تر به همان ماشین تخصیص یافته باشد. محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲) در کنار یکدیگر، بقای جریان را در سطح ماشین تضمین می‌کنند. محدودیت (۲۱) همچنین بیان می‌کند که کل مقدار تخصیص‌یافته به ماشین‌های فرایندی بازپیکربندی‌پذیر باید به‌طور کامل میان مسیرهای مربوط تخصیص داده شود. مطابق محدودیت (۲۲)، تمامی کامیون‌های خروجی باید مقدار کافی از هر نوع محصول را برای برآورده‌سازی نیازهای تحویلی خود دریافت کنند. محدودیت (۲۳) نیز تضمین می‌کند که هر جریان پیوسته محصول از یک ماشین فرایندی بازپیکربندی‌پذیر به یک کامیون خروجی، تنها از

کامیون‌ها به درب‌ها، تعیین توالی خدمت‌دهی روی درب‌ها، تخصیص دسته‌های محصول به ماشین‌ها، انتخاب پیکربندی مناسب ماشین‌ها، و زمان‌بندی پردازش روی هر ماشین. این ساختار موجب می‌شود که مسئله از جنس مسائل کلاسیک تخصیص یا زمان‌بندی صرف خارج شود و به یک مسئله ترکیبی، زمان‌محور و توالی‌محور بدل گردد. هدف این فصل فقط گزارش خروجی‌های عددی نیست، بلکه تفسیر آن‌ها در چارچوب تصمیم‌گیری عملیاتی انبار متقاطع است. بر همین اساس، ابتدا عملکرد کلی مدل بررسی می‌شود؛ سپس نتایج تحلیل حساسیت ارائه می‌شود. عملیات حل بر روی یک لپ‌تاپ با پردازنده Intel Core i7-1165G7 و نسخه ۶۴ بیتی ویندوز ۱۰ انجام شد.

۴-۱- تولید نمونه و عملکرد مدل

نمونه‌ها از حالت کوچک با ۳ کامیون ورودی، ۴۵ کامیون خروجی، یک درب ورودی، یک درب خروجی، یک ماشین و دو نوع محصول آغاز شدند و به تدریج از نظر تعداد کامیون‌ها، درب‌ها، ماشین‌ها و انواع محصول توسعه یافتند. در تمام نمونه‌ها، پارامترهای اسکالر ثابت در نظر گرفته شدند و تعداد پیکربندی‌های هر ماشین نیز برابر با سه بود؛ بنابراین، تغییرات نتایج عمدتاً ناشی از افزایش ابعاد مسئله و پیچیدگی تصمیمات تخصیص، زمان‌بندی و بازیکربندی است.

نتایج طبق جدول ۳ نشان داد که مدل برای نمونه‌های کوچک عملکرد بسیار مناسبی دارد و توانست چهار نمونه

جدول ۳. نتایج عددی ده نمونه حل شده به وسیله CPLEX

Table 3. Numerical results of ten examples solved by CPLEX

نمونه	ابعاد نمونه	زمان حل (ثانیه)	شکاف بهینگی (%)	تعداد شاخه‌ها	بهترین حد پایین	مقدار تابع هدف
۱	I:3, K:5, J&L:1, P:2, M:1	۰/۰۶	۰	۵۹۰	۸۱۸۰	۸۱۸۰
۲	I:4, K:6, J&L:1, P:2, M:2	۸/۵۲	۰	۱۰۵۱۱۲	۶۶۷۰	۶۶۷۰
۳	I:5, K:8, J&L:1, P:3, M:2	۱۵	۰	۷۰۹۳۸۷	۹۰۹۰	۹۰۹۰
۴	I:6, K:9, J&L:2, P:3, M:2	۶۷	۰	۱۱۰۲۴۸۴	۶۷۱۰	۶۷۱۰
۵	I:8, K:12, J&L:2, P:3, M:3	۱۸۰۰	۱۳/۲	۴۵۰۶۲۹	۳۴۸۹	۴۰۲۰
۶	I:10, K:15, J&L:2, P:4, M:3	۱۵۶۳	۳۵/۵۴	۱۹۴۳۲۹	۳۵۰۰	۵۴۲۹
۷	I:12, K:18, J&L:3, P:4, M:3	۱۷۸۹	۷۱/۶۱	۱۱۱۴۲۳	۲۴۸۹	۸۷۷۰
۸	I:14, K:21, J&L:3, P:4, M:4	۱۸۰۰	۱۰۰	۸۵۷۰۶	۰	۶۴۹۰
۹	I:16, K:24, J&L:4, P:5, M:4	۱۴۴۰	۱۰۰	۶۴۱۶۰	۰	۷۳۵۰
۱۰	I:18, K:27, J&L:4, P:5, M:4	۱۷۳۰	۱۰۰	۷۴۱۳۰	۰	۸۰۲۰

اول را با شکاف بهینگی صفر حل کند. با افزایش ابعاد مسئله، به‌ویژه از نمونه پنجم به بعد، زمان حل به سقف تعیین‌شده رسید و حل‌کننده نتوانست بهینگی را اثبات کند. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش هم‌زمان تعداد کامیون‌ها، محصولات، ماشین‌ها و درب‌ها باعث رشد شدید فضای جست‌وجو می‌شود. به‌خصوص افزایش تنوع محصول و تعداد ماشین‌های بازیکربندی‌پذیر، تعداد حالت‌های ممکن برای تخصیص محصول به ماشین، انتخاب پیکربندی و تعیین توالی پردازش را افزایش داده و پیچیدگی محاسباتی مدل را به‌طور محسوسی بیشتر می‌کند.

از دیدگاه مدیریتی، نتایج بیانگر آن است که افزایش ظرفیت فیزیکی پایانه، مانند افزایش تعداد درب‌ها و ماشین‌ها، می‌تواند به کاهش ازدحام و بهبود عملکرد عملیاتی کمک کند؛ اما این اثر زمانی قابل توجه است که با رشد تعداد کامیون‌ها و تنوع محصول متناسب باشد. در غیر این صورت، گلوگاه سیستم از سطح درب‌ها به سطح پردازش داخلی و زمان‌بندی پیکربندی ماشین‌ها منتقل می‌شود. بنابراین، مدل پیشنهادی برای تحلیل دقیق مسائل کوچک و متوسط بسیار مناسب است، اما برای نمونه‌های بزرگ‌تر بهتر است نتایج به‌عنوان بهترین جواب شدنی در محدودیت زمانی گزارش شوند و در کنار مدل ریاضی از روش‌های حل سریع‌تر مانند برنامه‌ریزی محدودیت، الگوریتم‌های ابتکاری یا فراابتکاری استفاده شود.

۴-۲- تحلیل حساسیت

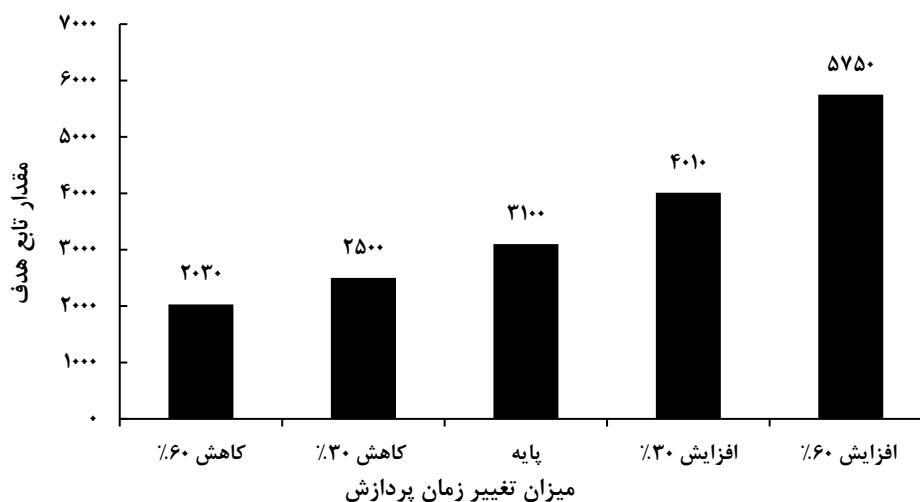
برای بررسی حساسیت مدل پیشنهادی، اثر چهار پارامتر کلیدی شامل زمان پردازش محصولات، زمان تغییر پیکربندی، تعداد پیکربندی‌های قابل استفاده برای ماشین‌ها و تعداد درب‌های پایانه ارزیابی شد. هدف از این تحلیل، شناسایی پارامترهایی است که بیشترین اثر را بر مقدار تابع هدف و عملکرد عملیاتی پایانه انبار متقاطع دارند. با توجه به ماهیت مسئله، مقدار تابع هدف به‌طور مستقیم تحت تأثیر هماهنگی میان عملیات تخلیه، پردازش داخلی، تغییر پیکربندی ماشین‌ها و بارگیری کامیون‌های خروجی قرار دارد. بنابراین، هر تغییری که باعث ایجاد تأخیر در یکی از این مراحل شود، می‌تواند زمان تکمیل کل عملیات و تاخیر در زمان خروج کامیون‌ها را افزایش دهد.

نتایج مربوط به زمان پردازش محصولات در شکل ۳ نشان می‌دهد که این پارامتر اثر قابل‌توجهی بر مقدار تابع هدف دارد. کاهش زمان پردازش باعث بهبود محسوس عملکرد سیستم و کاهش مقدار تابع هدف شده است، در حالی که افزایش زمان پردازش موجب رشد شدید مقدار تابع هدف می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که در سیستم مورد بررسی، بخش پردازش داخلی یکی از گلوگاه‌های اصلی پایانه است. به بیان دیگر، حتی اگر عملیات تخلیه و بارگیری در درب‌ها به‌خوبی زمان‌بندی شود، طولانی شدن زمان پردازش محصولات می‌تواند جریان داخلی کالا را کند کرده و باعث انتظار کامیون‌های خروجی شود. بنابراین، بهبود فناوری پردازش، افزایش سرعت ماشین‌ها،

استانداردسازی عملیات و کاهش زمان‌های غیرضروری در مرحله پردازش می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد کل سیستم داشته باشد.

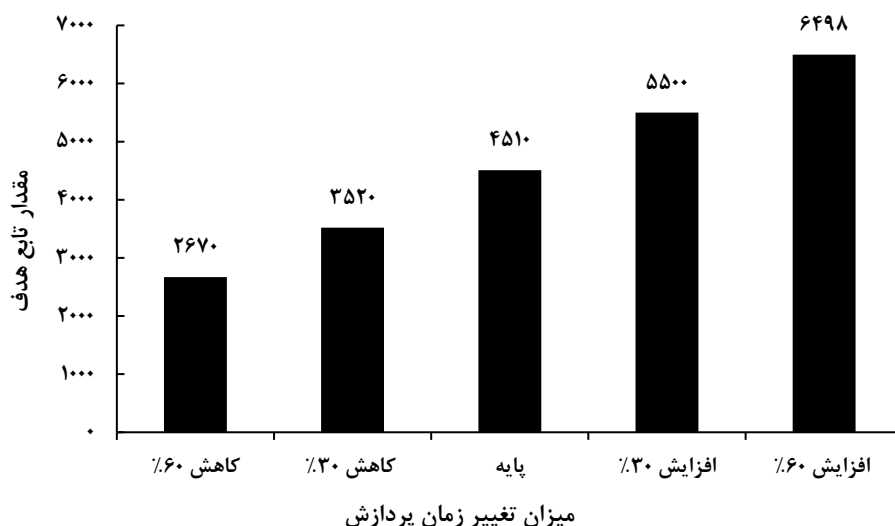
همانطور که در شکل ۴ مشخص است مقدار تابع هدف در حالتی که ماشین‌ها قابلیت بازپیکربندی ندارند، نسبت به حالتی که از این قابلیت برخوردار هستند به طور میانگین ۳۴٪ مقدار تابع هدفشان (میزان جریمه دیرکرد) کمتر است و این نشان می‌دهد قابلیت بازپیکربندی به عنوان ضربه‌گیر عملیاتی سیستم باعث افزایش انعطاف پذیری قابل توجه در مسئله ما شده است.

بر اساس شکل ۵، زمان تغییر پیکربندی نسبت به زمان پردازش اثر ملایم‌تری بر مقدار تابع هدف دارد و تغییرات آن تنها باعث نوسان محدود در پاسخ مدل شده است. این موضوع نشان می‌دهد که در نمونه‌های بررسی‌شده، سهم اصلی زمان تکمیل عملیات بیشتر از زمان پردازش محصولات ناشی می‌شود تا از زمان آماده‌سازی و تغییر پیکربندی. با این حال، این نتیجه به معنای بی‌اهمیت بودن زمان بازپیکربندی نیست. در محیط‌هایی با تنوع محصول بالا یا زمانی که ماشین‌ها مجبور باشند به‌دفعات میان پیکربندی‌های مختلف تغییر وضعیت دهند، زمان بازپیکربندی می‌تواند اثر بیشتری بر عملکرد سیستم داشته باشد. بنابراین، اگرچه در این تحلیل اثر مستقیم زمان بازپیکربندی محدود بوده است، اما کنترل آن همچنان برای جلوگیری از ایجاد صف‌های پردازشی و کاهش وقفه‌های عملیاتی اهمیت دارد.



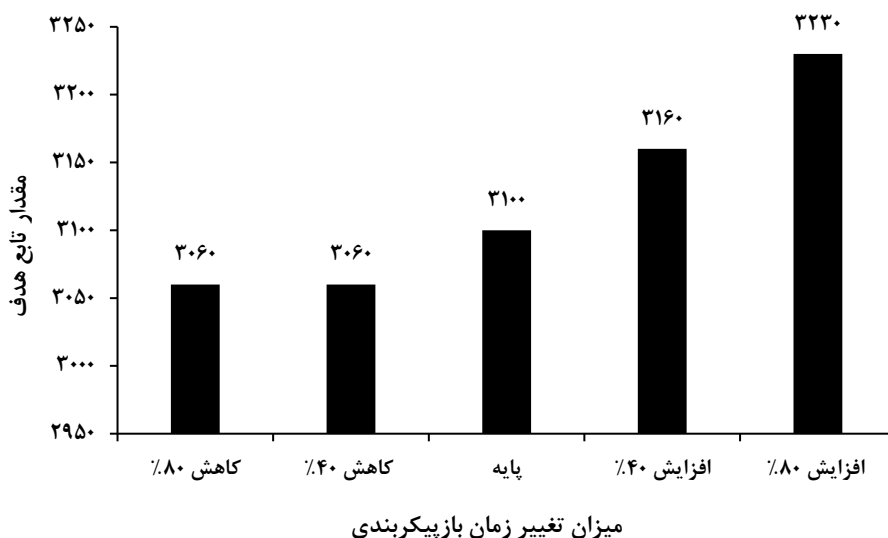
شکل ۳. مقادیر تابع هدف متناسب با تغییرات در پارامتر زمان پردازش.

Figure 3. Impact of processing time variations on the objective function.



شکل ۴. مقادیر تابع هدف متناسب با تغییرات در پارامتر زمان پردازش بدون قابلیت بازپیکربندی ماشین‌ها.

Figure 4. Impact of processing time variations on the objective function when the machines are reconfigurable.



شکل ۵. مقادیر تابع هدف متناسب با تغییرات در پارامتر زمان پردازش.

Figure 5. Impact of reconfigurable time variations on the objective function.

خود قابلیت بازپیکربندی از طریق افزایش گزینه‌های عملیاتی و انعطاف‌پذیرتر کردن سیستم اثر قابل‌توجهی بر بهبود عملکرد داشته است. بنابراین، مزیت اصلی ماشین‌های بازپیکربندی‌پذیر صرفاً در کوتاه بودن زمان تغییر وضعیت نیست، بلکه در توانایی آن‌ها برای پردازش انواع مختلف محصولات تحت پیکربندی‌های متفاوت و کاهش محدودیت‌های تخصیص نهفته است.

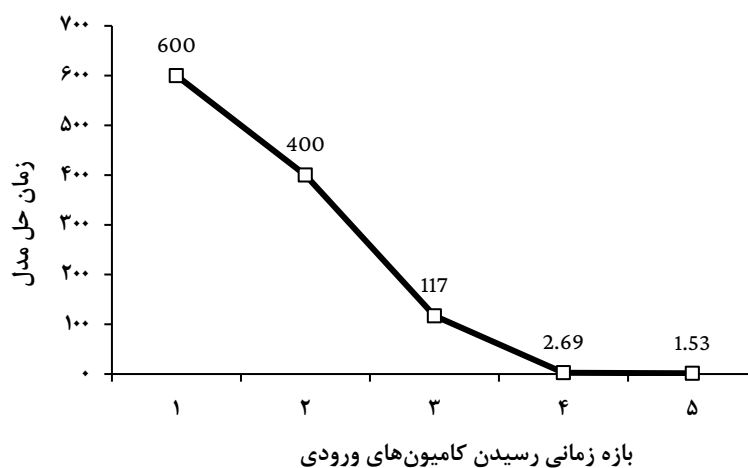
شکل ۶ نشان می‌دهد با تغییر بازه زمانی رسیدن و خصوصاً محدود کردن و فشردن زمان ورود کامیون‌ها پیچیدگی مدل به صورت تصاعدی افزایش

نتایج مربوط به تعداد پیکربندی‌ها در شکل ۵ نشان می‌دهد که افزایش قابلیت بازپیکربندی ماشین‌ها موجب بهبود قابل‌توجه عملکرد سیستم می‌شود. با افزایش تعداد پیکربندی‌ها از ۱ به ۳، مقدار تابع هدف به‌طور محسوسی کاهش یافته است. این نتیجه بیانگر آن است که انعطاف‌پذیری بیشتر ماشین‌ها امکان تخصیص مناسب‌تر محصولات به ماشین‌ها، کاهش انتظار محصولات برای پردازش و استفاده بهتر از ظرفیت داخلی پایانه را فراهم می‌کند. نکته مهم این است که اگرچه تغییر در مقدار زمان بازپیکربندی اثر شدیدی بر تابع هدف نداشته، اما

اما اثر آن پس از یک سطح مشخص کاهش می‌یابد. در واقع، اضافه کردن درب‌های بیشتر در ابتدا می‌تواند ازدحام کامیون‌ها در مرحله تخلیه و بارگیری را کاهش دهد و زمان انتظار آن‌ها را کم کند. با این حال، پس از آنکه ظرفیت درب‌ها از یک حد معین عبور می‌کند، گلوگاه اصلی سیستم از درب‌ها به بخش پردازش داخلی و ماشین‌های بازپیکربندی‌پذیر منتقل می‌شود. در چنین شرایطی، افزایش بیشتر تعداد درب‌ها نمی‌تواند به همان نسبت عملکرد سیستم را بهبود دهد، زیرا محصولات همچنان باید از مرحله پردازش عبور کنند و محدودیت ظرفیت ماشین‌ها باقی می‌ماند. این نتیجه نشان می‌دهد که توسعه ظرفیت فیزیکی پایانه باید به صورت متوازن انجام شود و افزایش تعداد درب‌ها بدون تقویت ظرفیت پردازش داخلی، بازده محدودی خواهد داشت.

می‌باشد. این نکته همچنین بیان می‌کند هماهنگی در زمان رسیدن کامیون‌ها می‌تواند به بهبود عملکرد محاسباتی مدل کمک کند و از طرف دیگر باعث جلوگیری از ایجاد صف و ازدحام شود. به عنوان نمونه با تعیین بازه زمانی یک ساعته برای رسیدن کامیون‌های ورودی به انبار متقاطع، مدل در محدودیت زمانی تعیین شده قادر به اثبات جواب بهینگی نیست و پاسخی با شکاف بهینگی ۷۲٪ به ما ارائه می‌دهد. این یافته نشان می‌دهد که تغییرات بازه زمانی رسیدن کامیون‌های ورودی، علاوه بر تغییراتی که بر مقدار نهایی تابع هدف ایجاد می‌کند فضای ترکیبی مسئله را به شدت بزرگ می‌کند و فرایند یافتن و اثبات جواب بهینه را دشوارتر می‌سازد.

از سوی دیگر، نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد که افزایش تعداد درب‌ها نیز موجب کاهش مقدار تابع هدف می‌شود،



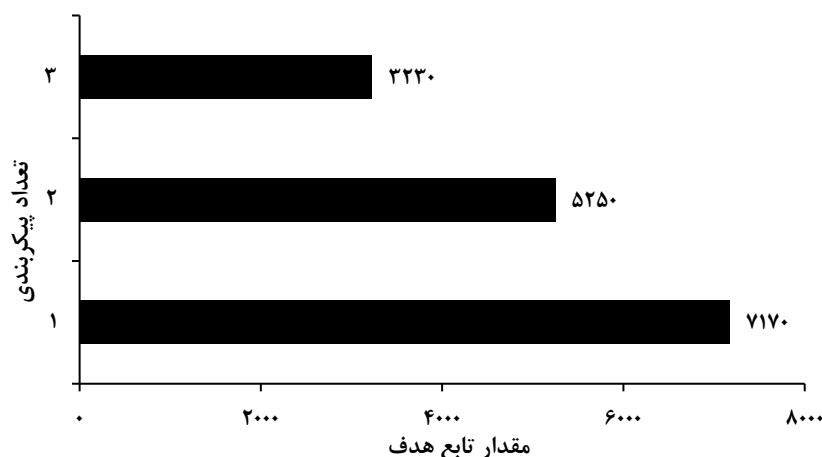
شکل ۶. مقادیر زمان حل مدل متناسب با تغییرات بازه زمانی رسیدن کامیون‌های ورودی.

Figure 6. Impact of reconfigurable time variations on the objective function.



شکل ۷. اثر تغییر تعداد در بر روی مقدار تابع هدف.

Figure 7. Impact of the number of door variations on the objective function.



شکل ۸. مقادیر تابع هدف متناسب با تغییرات در تعداد پیکربندی ماشین‌های پردازش.

Figure 8. Impact of the number of configurations of each process machine on the objective function.

دسته‌ها روی هر ماشین و لحاظ زمان بازیگربندی وابسته به توالی را در نظر می‌گیرد. برخلاف بسیاری از مدل‌های رایج در ادبیات انبار متقاطع که عملیات داخلی را به‌صورت زمان انتقال ثابت، هزینه حمل داخلی یا ذخیره‌سازی موقت ساده‌سازی می‌کنند، چارچوب پیشنهادی این پژوهش عملیات پردازش داخلی میان مرحله تخلیه و بارگیری خروجی را به‌صورت صریح وارد مدل می‌کند.

نتایج محاسباتی نشان داد که مدل پیشنهادی می‌تواند وابستگی متقابل میان ظرفیت درب‌ها، زمان‌بندی کامیون‌ها، ظرفیت پردازش داخلی و انعطاف‌پذیری ماشین‌های بازیگربندی‌پذیر را به‌خوبی نمایش دهد. مدل برای نمونه‌های کوچک قادر به دستیابی به جواب‌های بهینه بود، اما با افزایش اندازه مسئله، پیچیدگی محاسباتی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. این موضوع ناشی از ماهیت ترکیبی مسئله و تصمیمات هم‌زمانی است که در مدل لحاظ شده‌اند؛ زیرا تخصیص درب، زمان‌بندی کامیون‌ها، تخصیص دسته محصول به ماشین، انتخاب پیکربندی و توالی پردازش همگی به‌صورت متقابل بر یکدیگر اثر می‌گذارند. بنابراین، مدل پیشنهادی برای تحلیل دقیق نمونه‌های کوچک و متوسط مناسب است، اما برای کاربردهای عملی در ابعاد بزرگ‌تر، توسعه روش‌های حل سریع‌تر مانند الگوریتم‌های ابتکاری، فراابتکاری یا رویکردهای ترکیبی ضروری به نظر می‌رسد.

تحلیل حساسیت انجام‌شده در این پژوهش نشان داد که زمان پردازش داخلی یکی از اثرگذارترین عوامل بر مقدار

به‌طور کلی، تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد مدل، زمان پردازش محصولات و سطح انعطاف‌پذیری ماشین‌های بازیگربندی‌پذیر هستند. زمان پردازش به‌طور مستقیم بر سرعت جریان کالا در داخل پایانه اثر می‌گذارد، در حالی که طبق شکل ۸ تعداد پیکربندی‌ها انعطاف‌پذیری سیستم را در مواجهه با تنوع محصول افزایش می‌دهد. از دیدگاه مدیریتی، سرمایه‌گذاری بر کاهش زمان پردازش، انتخاب ماشین‌های کارتر، افزایش قابلیت پیکربندی و بهبود برنامه‌ریزی داخلی می‌تواند اثر بیشتری نسبت به افزایش صرف تعداد درب‌ها داشته باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که تصمیم‌گیرندگان باید میان ظرفیت درب‌ها، ظرفیت ماشین‌ها و سطح تنوع محصول تعادل برقرار کنند؛ زیرا در غیر این صورت، رفع یک گلوگاه ممکن است تنها باعث انتقال آن به بخش دیگری از سیستم شود.

۵- نتیجه‌گیری و بینش‌های مدیریتی

در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی یکپارچه عملیات در یک پایانه انبار متقاطع چنددرب و چندمحصولی مجهز به ماشین‌های پردازشی بازیگربندی‌پذیر ارائه شد. مدل پیشنهادی به‌صورت هم‌زمان تصمیمات مربوط به تخصیص کامیون‌های ورودی و خروجی به درب‌ها، تعیین توالی خدمت‌دهی به کامیون‌ها، تشکیل و تخصیص دسته‌های محصول به ماشین‌های پردازشی مجاز، انتخاب پیکربندی مناسب برای هر دسته، تعیین توالی پردازش

مربوط به تخصیص درب، زمان‌بندی کامیون‌ها، تخصیص دسته محصول به ماشین، انتخاب پیکربندی و توالی پردازش به‌شدت به یکدیگر وابسته هستند. بنابراین، مدیریت جداگانه این تصمیمات می‌تواند به برنامه‌های عملیاتی ناکارا یا حتی غیرقابل اجرا منجر شود؛ به‌ویژه در شرایطی که تنوع محصول، حجم کامیون‌ها و محدودیت منابع پردازشی افزایش می‌یابد. مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم برای ارزیابی سناریوهای مختلف توسعه پایانه، مقایسه سرمایه‌گذاری در درب‌های جدید با سرمایه‌گذاری در ماشین‌های پردازشی، و تعیین سطح مناسب بازپیکربندی منابع مورد استفاده قرار گیرد.

با وجود دستاوردهای پژوهش، این مطالعه دارای محدودیت‌هایی نیز هست. یکی از محدودیت‌های این پژوهش آن است که ارزیابی عددی مدل بر اساس نمونه‌های تولیدشده انجام شده و داده واقعی از یک پایانه صنعتی در دسترس نبوده است. بنابراین، اگرچه ساختار مدل با الهام از عملیات ارزش‌افزوده کوتاه‌مدت در پایانه‌های لجستیکی طراحی شده است، اعتبارسنجی آن با داده‌های واقعی و مقایسه عملکرد ماشین‌های پردازش با قابلیت بازپیکربندی با تجهیزات پردازشی ثابت در یک مطالعه موردی صنعتی می‌تواند مسیر مهمی برای پژوهش‌های آینده باشد دوم، مدل حاضر ماهیتی قطعی دارد، در حالی‌که در محیط‌های واقعی، زمان ورود کامیون‌ها، زمان پردازش، زمان بازپیکربندی و تقاضای کامیون‌های خروجی ممکن است با عدم قطعیت همراه باشند. از این رو، توسعه مدل‌های تصادفی، مقاوم یا داده‌محور می‌تواند مسیر مناسبی برای پژوهش‌های آینده باشد. افزون بر این، در مطالعات بعدی می‌توان محدودیت‌هایی مانند ظرفیت تجهیزات حمل داخلی، محدودیت نیروی انسانی، ظرفیت ناحیه انتظار موقت، ازدحام داخلی و سیاست‌های اولویت‌بندی کامیون‌ها را نیز وارد مدل کرد. در نهایت، با توجه به افزایش پیچیدگی محاسباتی مدل در نمونه‌های بزرگ، توسعه روش‌های حل کارآمدتر مانند الگوریتم‌های ابتکاری، فراابتکاری، ریاضی‌ابتکاری یا رویکردهای مبتنی بر برنامه‌ریزی محدودیت می‌تواند زمینه ارزشمندی برای ادامه این پژوهش فراهم کند.

تابع هدف است. از آنجا که محصولات پیش از ارسال به کامیون‌های خروجی باید مرحله پردازش داخلی را طی کنند، هرگونه افزایش در زمان پردازش می‌تواند باعث تأخیر در آماده‌سازی محموله‌های خروجی و در نتیجه افزایش مجموع جریمه دیرکرد شود. این یافته نشان می‌دهد که در پایانه‌های انبار متقاطع دارای عملیات داخلی، مرحله پردازش می‌تواند به گلوگاه اصلی سیستم تبدیل شود. در مقابل، اثر مستقیم زمان بازپیکربندی در نمونه‌های بررسی‌شده نسبتاً ملایم‌تر بود؛ با این حال، در محیط‌هایی که تنوع محصول زیاد است یا تغییرات مکرر میان پیکربندی‌های ماشین رخ می‌دهد، زمان بازپیکربندی همچنان می‌تواند نقش عملیاتی مهمی داشته باشد.

نتایج همچنین نشان داد که افزایش تعداد پیکربندی‌های قابل استفاده برای ماشین‌ها می‌تواند عملکرد سیستم را بهبود دهد. این موضوع به این دلیل است که افزایش انعطاف‌پذیری ماشین‌ها، گزینه‌های بیشتری برای تخصیص دسته‌های محصول به منابع پردازشی فراهم می‌کند و می‌تواند زمان انتظار دسته‌ها و کامیون‌های خروجی را کاهش دهد. با این حال، افزایش انعطاف‌پذیری باید همراه با مدیریت مناسب توالی پردازش و کنترل تعداد دفعات بازپیکربندی انجام شود؛ زیرا انعطاف‌پذیری بیشتر لزوماً به معنای عملکرد بهتر نیست، مگر آنکه تصمیمات تخصیص و زمان‌بندی نیز به‌صورت هماهنگ اتخاذ شوند.

از منظر مدیریتی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بهبود عملکرد پایانه انبار متقاطع نباید صرفاً به افزایش تعداد منابع محدود شود. اگرچه افزایش ظرفیت درب‌ها می‌تواند ازدحام در مراحل تخلیه و بارگیری را کاهش دهد، اما پس از یک سطح مشخص، اثر نهایی آن کاهش می‌یابد؛ زیرا گلوگاه سیستم از ناحیه درب‌ها به بخش پردازش داخلی منتقل می‌شود. بنابراین، مدیران پایانه باید ظرفیت درب‌ها، ظرفیت پردازش داخلی و سطح انعطاف‌پذیری ماشین‌ها را به‌صورت هم‌زمان ارزیابی کنند. سرمایه‌گذاری صرف در افزایش تعداد منابع، بدون تقویت منابع پردازشی داخلی، ممکن است تنها محل ایجاد ازدحام را از یک بخش پایانه به بخش دیگر منتقل کند. همچنین، نتایج این پژوهش بر اهمیت برنامه‌ریزی یکپارچه در پایانه‌های انبار متقاطع تأکید دارد. تصمیمات

- terminal considering multiple storage zones. *International Journal of Production Research*, 60(4), 1153-1177. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1853843>
- Coindreau, M. A., Gally, O., Zufferey, N., & Laporte, G. (2021). Inbound and outbound flow integration for cross-docking operations. *European Journal of Operational Research*, 294(3), 1153-1163. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.02.031>
- Dang, Y., Du, H., Wang, X., & Pan, X. (2026). Reconfigurable operation-loop network modeling and resilience optimization considering mission load. *Computers & Industrial Engineering*, 111836. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2026.111836>
- Escudero, L. F., Garín, M. A., & Unzueta, A. (2024). On solving the cross-dock door assignment problem. *International Journal of Production Research*, 62(4), 1262-1276. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2180307>
- Essghaier, F., Allaoui, H., & Goncalves, G. (2021). Truck to door assignment in a shared cross-dock under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 182, 114889. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114889>
- Eti, N. A., Ferrell Jr, W. G., & Huynh, N. (2025). Multi-door cross-dock scheduling under flexible doors mode and material handling resource restrictions. *Computers & Operations Research*, 183, 107183. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107183>
- Fanti, M. P., Stecco, G., & Ukovich, W. (2014). Scheduling internal operations in post-distribution cross docking systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(1), 296-312. <https://doi.org/10.1109/TASE.2014.2350031>
- Gallo, A., Accorsi, R., Akkerman, R., & Manzini, R. (2022). Scheduling cross-docking operations under uncertainty: A stochastic genetic algorithm based on scenarios tree. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 11, 100095. <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2022.100095>
- Ghomi, V., Ghazi Nezami, F., Shokoohyar, S., & Ghofrani Esfahani, M. (2023). An optimization model for forklift utilisation and congestion control in cross-docking terminals. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 10(1), 2142463. <https://doi.org/10.1080/23302674.2022.2142463>
- Guemri, O., Nduwayo, P., Todosijević, R., Hanafi, S., & Glover, F. (2019). Probabilistic tabu search for the cross-docking assignment problem. *European Journal of Operational*

مشارکت‌های نویسندگان

محمد حسین توکلی: تهیه پیش‌نویس خطی، بازنگری اولیه گزارش، روش‌شناسی پژوهش، مدل مفهومی پژوهش، بررسی ادبیات نظری و پیشینه مرتبط، تجزیه و تحلیل داده‌ها، پیش‌نویس تحلیل آماری، بازبینی متن؛ **رضا توکلی مقدم:** راهنمایی، بازبینی متن؛ **به‌دین واحدی نوری:** راهنمایی، بازبینی متن.

تأمین مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی خارجی دریافت نکرده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

قدردانی

نویسندگان صمیمانه از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری، داوران محترم و سایر افرادی که در بهبود کیفیت این مقاله همکاری داشته‌اند، قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- Bartholdi III, J. J., & Gue, K. R. (2000). Reducing labor costs in an LTL crossdocking terminal. *Operations Research*, 48(6), 823-832. <https://doi.org/10.1287/opre.48.6.823.12397>
- Bortolini, M., Galizia, F. G., & Mora, C. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend. *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 93-106. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.09.005>
- Boysen, N. (2010). Truck scheduling at zero-inventory cross docking terminals. *Computers & Operations Research*, 37(1), 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.03.010>
- Boysen, N., & Fliedner, M. (2010). Cross dock scheduling: Classification, literature review and research agenda. *Omega*, 38(6), 413-422. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2009.10.008>
- Chargui, T., Bekrar, A., Reghioui, M., & Trentesaux, D. (2022). Scheduling trucks and storage operations in a multiple-door cross-docking

- Monemi, R. N., Gelareh, S., Maculan, N., & Chen, W. K. (2024). A neural branch-and-price for truck scheduling in cross-docks. *Science China Mathematics*, 67(6), 1341-1358. <https://doi.org/10.1007/s11425-024-2301-9>
- Nogueira, T. H., Coutinho, F. P., Ribeiro, R. P., & Ravetti, M. G. (2020). Parallel-machine scheduling methodology for a multi-dock truck sequencing problem in a cross-docking center. *Computers & Industrial Engineering*, 143, 106391. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106391>
- Noushi, K., & Sabouhi, F. (2026). Resilient Wheat Supply Chain Design Considering Circular Economy Principles. *System Engineering and Productivity*, 6(1), 227-249. <https://doi.org/10.22034/sep.2026.2079220.1441>
- Nowak, M., & Puladi, S. (2025). Value of operational flexibility in cross-docking. *Computers & Industrial Engineering*, 209, 111423. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111423>
- Rajabzadeh, M., & Mousavi, S. M. (2023). Allocation of products to a heterogeneous fleet of trucks in a cross-docking center based on carbon emissions and costs in food and beverage industry: Novel uncertain solution approaches. *Journal of Environmental Management*, 332, 117071. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117071>
- Rijal, A., Bijvank, M., & de Koster, R. (2019). Integrated scheduling and assignment of trucks at unit-load cross-dock terminals with mixed service mode dock doors. *European Journal of Operational Research*, 278(3), 752-771. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.04.028>
- Sayed, S. I., Contreras, I., Diaz, J. A., & Luna, D. E. (2020). Integrated cross-dock door assignment and truck scheduling with handling times. *Top*, 28(3), 705-727. <https://doi.org/10.1007/s11750-020-00556-z>
- Serrano, C., Delorme, X., & Dolgui, A. (2017). Scheduling of truck arrivals, truck departures and shop-floor operation in a cross-dock platform, based on trucks loading plans. *International Journal of Production Economics*, 194, 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.09.008>
- Stephan, K., & Boysen, N. (2011). Vis-à-vis vs. mixed dock door assignment: A comparison of different cross dock layouts. *Operations Management Research*, 4(3), 150-163. <https://doi.org/10.1007/s12063-011-0057-3>
- Vahedi-Nouri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Hanzálek, Z., & Dolgui, A. (2024). Production scheduling in a reconfigurable manufacturing system benefiting from human-robot collaboration. *International Journal of Production Research*, 62(3), 767-783. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2037777>
- Research, 277(3), 875-885. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.03.030>
- Huang, M., Huang, S., Gao, L., Dong, W., Zhang, Y., Gu, X., & Gao, Z. (2026). Digital twin-driven multi-agent collaborative online optimization of production regulation for smart reconfigurable manufacturing systems with human-robot collaboration. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 101, 103322. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2026.103322>
- Lee, S., Angelus, A., Stauffer, J. M., & Sriskandarajah, C. (2025). Optimal shipping, collaboration, and outsourcing decisions in a hybrid cross-docking supply chain. *IIE Transactions*, 57(1), 1-15. <https://doi.org/10.1080/24725854.2023.2273373>
- Li, M., Hao, J. K., & Wu, Q. (2024). A flow based formulation and a reinforcement learning based strategic oscillation for cross-dock door assignment. *European Journal of Operational Research*, 312(2), 473-492. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.07.014>
- Lu, Y., Hao, J. K., Wu, Q., & Li, M. (2026). Frequent pattern mining driven evolutionary search for cross-dock door assignment. *Computers & Operations Research*, 189, 107393. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2026.107393>
- Mahmoodjanloo, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Baboli, A., & Bozorgi-Amiri, A. (2020). Flexible job shop scheduling problem with reconfigurable machine tools: An improved differential evolution algorithm. *Applied Soft Computing*, 94, 106416. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106416>
- Maknoon, M. Y., Soumis, F., & Baptiste, P. (2016). Optimizing transshipment workloads in less-than-truckload cross-docks. *International Journal of Production Economics*, 179, 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.05.015>
- Mogale, D. G., De, A., Ghadge, A., & Tiwari, M. K. (2023). Designing a sustainable freight transportation network with cross-docks. *International Journal of Production Research*, 61(5), 1455-1478. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2037777>
- Monaco, M. F., & Sammarra, M. (2023). A multiplier adjustment algorithm for a truck scheduling and transshipment problem at a cross-docking terminal. *Soft Computing*, 27(7), 4169-4193. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-06999-9>
- Monemi, R. N., Gelareh, S., & Maculan, N. (2023). A machine learning based branch-cut-and-Benders for dock assignment and truck scheduling problem in cross-docks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 178, 103263. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103263>

<https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2173503>

- Vanajakumari, M., Sun, H., Jones, A., & Srisankarajah, C. (2022). Supply chain planning: A case for Hybrid Cross-Docks. *Omega*, 108, 102585. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2021.102585>
- Yelles-Chaouche, A. R., Gurevsky, E., Brahimi, N., & Dolgui, A. (2021). Reconfigurable manufacturing systems from an optimisation perspective: a focused review of literature. *International Journal of Production Research*, 59(21), 6400-6418. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1813913>
- Yu, W., & Egbelu, P. J. (2008). Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage. *European Journal of Operational Research*, 184(1), 377-396. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.047>
- Zheng, F., Pang, Y., & Xu, Y. (2022). Heuristics for cross-docking scheduling of truck arrivals, truck departures and shop-floor operations. *Journal of combinatorial optimization*, 43(5), 1571-1601. <https://doi.org/10.1007/s10878-021-00707-3>
- Zheng, F., Yi, Y., Liu, M., & Qiu, H. (2026). Truck scheduling optimization at a cold chain cross-docking terminal considering uncertainties and the door-mixed service mode. *Expert Systems with Applications*, 298, 129849. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.129849>