

Authors' contribution/
Wkład autorów:
A. Study design/
Zaplanowanie badań
B. Data collection/
Zebranie danych
C. Statistical analysis/
Analiza statystyczna
D. Data interpretation/
Interpretacja danych/
E. Manuscript preparation/
Przygotowanie tekstu
F. Literature search/
Opracowanie
piśmiennictwa
G. Funds collection/
Pozyskanie funduszy

ORIGINAL ARTICLE

JEL code: C63, C61, M11,
L23

Submitted:
August, 2025
Accepted:
October, 2025

Tables: 3
Figures: 6
References: 22

ORYGINALNY ARTYKUŁ
NAUKOWY

Klasyfikacja JEL: C63,
C61, M11, L23

Zgłoszony:
sierpień, 2025
Zaakceptowany:
październik, 2025

Tabele: 3
Rysunki: 6
Literatura: 22

**THE USE OF SIMULATION MODELING IN OPTIMIZING
WAREHOUSE INVENTORY DISTRIBUTION**

**ZASTOSOWANIE MODELOWANIA SYMULACYJNEGO
W OPTYMALIZACJI ROZMIESZCZENIA ZAPASÓW
MAGAZYNOWYCH**

Zbigniew Wiśniewski^{1,A-B,D-F}, Beniamin Zwoliński^{1,A-B,D-F}

¹Faculty of Organization and Management, Lodz University of Technology, Poland
¹Wydział Organizacji i Zarządzania, Politechnika Łódzka, Polska

Citation: Zbigniew Wiśniewski, Beniamin Zwoliński, (2026). The use of simulation modeling in optimizing warehouse inventory distribution / Zastosowanie modelowania symulacyjnego w optymalizacji rozmieszczenia zapasów magazynowych, *Economic and Regional Studies / Studia Ekonomiczne i Regionalne* 19(1), 109-133 <https://doi.org/10.2478/ers-2026-0006>

Abstract

Subject and purpose of work: The article examines the use of simulation modelling as an effective research method supporting decision-making in logistics process management. The study focuses on a branch of an international logistics company in Poland facing inefficient inventory distribution and extended order-fulfilment times.

Materials and methods: A computer simulation based on discrete-event modelling (DEM) was developed to reflect the real warehouse layout and picking processes. Using the FlexSim environment, 15 variants of product placement were tested, including ABC classification, assortment-group organisation, and random allocation.

Results: The findings indicate that applying the ABC method – particularly based on picking frequency – reduces average order-fulfilment time by up to 17 seconds compared to the existing layout, generating significant operational savings at high order volumes. The simulation also identified process bottlenecks and improved forklift routing.

Conclusions: Simulation modelling proved effective in enhancing the analysed logistics process and offers a robust foundation for further optimisation in comparable warehouse environments.

Keywords: warehouse management, order picking, simulation modeling, discrete event modeling, process optimization

Streszczenie

Przedmiot i cel pracy: Celem artykułu jest przedstawienie zastosowania modelowania symulacyjnego jako skutecznej metody badawczej wspierającej podejmowanie decyzji w zarządzaniu procesami logistycznymi. Przedmiotem analizy było międzynarodowe przedsiębiorstwo logistyczne, zmagające się z nieefektywnym rozmieszczeniem zapasów i długim czasem kompletacji.

Materiały i metody: W artykule zaprojektowano i przeprowadzono badanie w formie symulacji komputerowej opartej na modelowaniu zdarzeń dyskretnych (DES), odwzorowującej rzeczywisty układ magazynowy oraz procesy kompletacyjne.

Address for correspondence / Adres korespondencyjny: Zbigniew Wiśniewski Faculty of Organization and Management, Lodz University of Technology, Polska; (email: zbigniew.wisniewski@p.lodz.pl) ORCID 0000-0003-0066-9321

Journal included in: AgEcon Search; AGRO; Arianta; Baidu Scholar; BazEkon; Cabell's Journalytics; CABI; CNKI Scholar; CNPIEC – cnpLINKer; Dimensions; DOAJ; EBSCO; ERIH PLUS; ExLibris; Google Scholar; Index Copernicus International; J-Gate; JournalTOCS; KESLI-NDSL; MIAR; MyScienceWork; Naver Academic; Naviga (Softweco); Polish Ministry of Science and Higher Education; QOAM; ReadCube, Research Papers in Economics (RePEc); SCILIT; Scite; SCOPUS, Semantic Scholar; Sherpa/RoMEO; TDNet; Ulrich's PeriodicalsDirectory/ulrichsweb; WanFang Data; WorldCat (OCLC); X-MOL

Copyright: © 2025, The Autors. John Paul II University in Biała Podlaska, Poland.

Do analizy wykorzystano środowisko symulacyjne FlexSim, w którym przetestowano 15 wariantów rozmieszczenia towarów z wykorzystaniem klasyfikacji ABC, grup asortymentowych oraz rozmieszczenia losowego.

Wyniki: Rezultaty wskazują jednoznacznie, że zastosowanie metody ABC, szczególnie według ilości kompletacji, pozwala na skrócenie średniego czasu realizacji zamówień nawet o 17 sekund w stosunku do obecnie stosowanego rozwiązania, co przy dużej liczbie zleceń przekłada się na wymierne oszczędności operacyjne. Dodatkowo, symulacja umożliwiła identyfikację wąskich gardeł oraz optymalizację pracy wózków widłowych.

Wnioski: Modelowanie symulacyjne przyniosło wymierne efekty w analizowanym procesie i daje podstawy rozwoju tej metodyki optymalizacji procesów logistycznych w podobnych procesach.

Słowa kluczowe: gospodarka magazynowa, kompletacja, modelowanie symulacyjne, modelowanie zdarzeń dyskretnych, optymalizacja procesów

1. Introduction

The modern economy, shaped by the dynamic processes of globalisation and digital transformation, presents companies with numerous challenges related to the effective management of logistics processes. One of the key areas directly affecting the operational efficiency of an organisation is warehouse management, whose role has significantly increased in an era of growing customer expectations and intense competition in international markets. Therefore, the issue of optimising warehouse processes, and in particular order picking, which has a direct impact on order fulfilment time and customer service levels, is of particular importance.

In the era of ubiquitous digitisation and the development of tools supporting logistics operations management, the use of simulation modelling as a method to support operational, tactical, and strategic decision-making is becoming increasingly popular. This method allows complex warehouse processes to be mapped in a virtual environment, enabling the analysis of various scenarios and the identification of optimal solutions without interfering with the actual system.

The aim of this article is to present the possibilities and effectiveness of using simulation modelling in the context of optimising warehouse inventory distribution and order picking process organisation. The analysis is based on a case study of an international logistics company with a branch located in Łódź, specialising in, among other things, value-added services (VAS), e-commerce services, and procurement process support. Due to the wide range of services offered and the large number of warehouse units, the company encounters difficulties in the effective

1. Wstęp

Współczesna gospodarka, kształtowana przez dynamiczne procesy globalizacji i transformacji cyfrowej, stawia przed przedsiębiorstwami liczne wyzwania związane z efektywnym zarządzaniem procesami logistycznymi. Jednym z kluczowych obszarów wpływających bezpośrednio na sprawność operacyjną organizacji jest gospodarka magazynowa, której rola znacząco wzrosła w dobie rosnących oczekiwań klientów oraz wzmożonej konkurencji na rynkach międzynarodowych. Szczególnego znaczenia nabiera zatem kwestia optymalizacji procesów magazynowych, a w szczególności – kompletacji zamówień, która ma bezpośredni wpływ na czas realizacji zleceń oraz poziom obsługi klienta.

W dobie wszechobecnej cyfryzacji i rozwoju narzędzi wspierających zarządzanie operacjami logistycznymi, coraz większą popularnością cieszy się wykorzystanie modelowania symulacyjnego jako metody wspomagającej podejmowanie decyzji operacyjnych, taktycznych i strategicznych. Metoda ta umożliwia odwzorowanie złożonych procesów magazynowych w środowisku wirtualnym, co pozwala na analizę różnych scenariuszy działania oraz identyfikację optymalnych rozwiązań bez ingerencji w rzeczywisty system.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie możliwości i skuteczności zastosowania metody modelowania symulacyjnego w kontekście optymalizacji rozmieszczenia zapasów magazynowych oraz organizacji procesu kompletacji zamówień. Analiza opiera się na studium przypadku międzynarodowego przedsiębiorstwa z branży usług logistycznych, którego oddział zlokalizowany w Łodzi, specjalizującego się m.in. w świadczeniu usług wartości dodanej

management of warehouse space and work organisation.

The article presents an approach based on the use of a low-abstraction simulation model that allows for detailed mapping of the operational processes taking place in the warehouse. Particular emphasis was placed on analysing the impact of goods placement and forklift traffic organisation on order picking time. The simulation results are presented in the form of 3D visualisations, interactive dashboards, and tabular comparisons of results for selected scenarios. This approach allows for the identification of optimal operational solutions that can be implemented in the analysed company, contributing to an increase in its operational efficiency and market competitiveness.

2. Literature review

In the era of digital transformation, inventory and warehouse process management is becoming one of the key areas determining a company's competitiveness. Globalisation, market unpredictability, and growing customer demands are forcing organisations to implement tools that enable flexible and precise planning and control of material flows. In this context, modern analytical and simulation methods that enable the modelling and optimisation of operational processes, including order picking in the warehouse, are of particular importance.

Inventories are a fundamental component of logistics systems and serve as a buffer that compensates for differences between supply and demand (Dudziński and Kizera, 2002). The classification of inventory includes various types, such as standard, reserve, available, and seasonal inventory. Proper management of inventory is essential to ensure continuity of production and customer service (Zimon, 2012). Inventories should be analysed in terms of their quantity, economic value, and the risk associated with their expiration or excessive accumulation

(VAS), obsłudze e-commerce oraz wsparciu procesów zaopatrzeniowych. Ze względu na szeroką gamę oferowanych usług oraz dużą liczbę jednostek magazynowych, przedsiębiorstwo napotyka trudności w efektywnym zarządzaniu przestrzenią magazynową i organizacją pracy.

W artykule zaprezentowano podejście oparte na wykorzystaniu modelu symulacyjnego o niskim poziomie abstrakcji, umożliwiającego szczegółowe odwzorowanie procesów operacyjnych zachodzących w magazynie. Szczególny nacisk położono na analizę wpływu rozmieszczenia towarów oraz organizacji ruchu wózków widłowych na czas kompletacji zamówień. Rezultaty symulacji przedstawiano w formie wizualizacji 3D, interaktywnych dashboardów oraz tabelarycznego porównania wyników dla wybranych scenariuszy. Podejście to umożliwia identyfikację optymalnych rozwiązań operacyjnych, które mogą zostać wdrożone w analizowanym przedsiębiorstwie, przyczyniając się do zwiększenia jego efektywności operacyjnej i konkurencyjności na rynku.

2. Przegląd literatury

W dobie transformacji cyfrowej zarządzanie zapasami oraz procesami magazynowymi staje się jednym z kluczowych obszarów decydujących o konkurencyjności przedsiębiorstwa. Globalizacja, nieprzewidywalność rynków oraz rosnące wymagania klientów wymuszają na organizacjach wdrażanie narzędzi pozwalających na elastyczne i precyzyjne planowanie oraz kontrolę przepływów materiałowych. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabierają nowoczesne metody analityczne i symulacyjne, umożliwiające modelowanie i optymalizację procesów operacyjnych, w tym kompletacji zamówień w magazynie.

Zapasy stanowią podstawowy komponent systemów logistycznych i pełnią funkcję bufora, który umożliwia kompensowanie różnic między popytem a podażą (Dudziński i Kizera, 2002). Klasyfikacja zapasów obejmuje różne ich rodzaje, m.in. zapasy normatywne, rezerwowe, dyspozycyjne czy sezonowe. Ich prawidłowe zarządzanie jest niezbędne dla zapewnienia ciągłości produkcji i obsługi klienta (Zimon, 2012). Zapasy powinny być analizowane zarówno pod kątem ich ilości, wartości ekonomicznej, jak i ryzyka związanego z ich przeterminowaniem

(Serman, 2000). Inventory management is defined by APICS as an area of business management that focuses on planning, controlling, and monitoring inventory levels (Toomey, 2000). One of the most important challenges in this area is demand forecasting, which is inherently fraught with a high degree of uncertainty. Inventory management models, such as the reorder point system or the review system, assume different replenishment strategies based on historical data, seasonality, and demand variability (Skowronek and Sarjusz-Wolski, 1995).

Nowadays, inventory management increasingly uses analyses based on ABC/XYZ classifications, which enable the segmentation of the product range according to turnover value and demand predictability (Staniec and Stajuda, 2012). This approach allows the inventory level to be adjusted to the importance of a given product from the point of view of logistics strategy. ABC classification is based on the Pareto principle, indicating that a small part of the assortment accounts for most of the warehouse value. XYZ classification, on the other hand, takes into account the variability of demand – from stable, predictable class X goods to goods with high consumption uncertainty (class Z). Combining both classifications in an ABC/XYZ matrix allows for more effective inventory control and selection of appropriate forecasting and replenishment methods (Kaczorowska et al., 2019). One of the key aspects of warehouse management is the organisation of the order picking process. High operational complexity, a large number of SKUs (Stock Keeping Units), and time pressure require continuous improvement of warehouse space organisation and goods movement. The efficiency of this process directly affects the level of customer service, order fulfilment time, and operating costs (Tarczyński, 2016). Warehouse processes, such as goods receipt, storage, picking, and release, should be planned in an integrated and optimal manner using modern data management tools and technical infrastructure (Bartosiewicz, 2017; Szymonik and Chudzik, 2018).

Modern logistics management requires tools that allow different operational scenarios to be tested without risk to the functioning

lub nadmiernym gromadzeniem (Serman, 2000). Zarządzanie zapasami definiowane jest przez APICS jako obszar zarządzania biznesowego skupiający się na planowaniu, kontroli i monitorowaniu poziomu zapasów (Toomey, 2000). Jednym z najważniejszych wyzwań w tym zakresie jest prognozowanie popytu, które z natury obarczone jest dużym stopniem niepewności. Modele zarządzania zapasami, takie jak system punktu zamawiania czy system przeglądowy, zakładają różne strategie uzupełniania zapasów w oparciu o dane historyczne, sezonowość oraz zmienność popytu (Skowronek i Sarjusz-Wolski, 1995).

Współcześnie, coraz częściej w zarządzaniu zapasami wykorzystuje się analizy oparte na klasyfikacjach ABC/XYZ, które umożliwiają segmentację asortymentu według wartości obrotu oraz przewidywalności zapotrzebowania (Staniec i Stajuda, 2012). Podejście to pozwala na dostosowanie poziomu zapasów do istotności danego produktu z punktu widzenia strategii logistycznej. Klasyfikacja ABC bazuje na zasadzie Pareto, wskazując, że niewielka część asortymentu odpowiada za większość wartości magazynowej. Klasyfikacja XYZ natomiast uwzględnia zmienność popytu – od stabilnych, przewidywalnych dóbr klasy X po towary o dużej niepewności zużycia (klasa Z). Połączenie obu klasyfikacji w macierz ABC/XYZ pozwala na skuteczniejsze sterowanie zapasami i dobór właściwych metod prognozowania i uzupełniania (Kaczorowska i in., 2019). Jednym z kluczowych aspektów gospodarki magazynowej jest organizacja procesu kompletacji zamówień. Wysoka złożoność operacyjna, duża liczba SKU (Stock Keeping Units) oraz presja czasowa wymagają ciągłego doskonalenia organizacji przestrzeni magazynowej oraz przemieszczania towarów. Efektywność tego procesu wpływa bezpośrednio na poziom obsługi klienta, czas realizacji zamówień oraz koszty operacyjne (Tarczyński, 2016). Procesy magazynowe, takie jak przyjęcie towaru, jego składowanie, kompletacja i wydanie, powinny być planowane w sposób zintegrowany i optymalny z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi zarządzania danymi oraz infrastruktury technicznej (Bartosiewicz, 2017; Szymonik i Chudzik, 2018).

Nowoczesne zarządzanie logistyczne wymaga narzędzi, które pozwalają na testowanie różnych scenariuszy operacyjnych bez ryzyka dla

system. Simulation modelling makes it possible to map real processes in a digital environment and conduct experiments to identify optimal solutions (ten Hompel and Schmidt, 2007). Simulations based on discrete event models (DES) allow for detailed analysis of operational processes, including the detection of bottlenecks, assessment of the impact of organisational changes, and testing of resource allocation variants (Šaderová et al., 2018). The advantages of simulation modelling are particularly evident in complex warehouse systems, where not only the spatial location of inventory is important but also the paths of forklifts, the time required to complete individual operations, and the interactions between different elements of the system. Models of this type can take into account real data, such as order distribution, warehouse configuration, and the number of operators. Importantly, simulation results can be presented in graphical form (e.g. 3D visualisations), KPIs (Key Performance Indicators), and comparative scenario reports, which supports managerial decision-making (Halusiak and Uciński, 2013).

Dynamic changes in the environment, such as the COVID-19 pandemic, wars, cyberattacks, and volatility in Asian markets, have exposed the limitations of traditional inventory management concepts, including the just-in-time philosophy (Davis and Inajima, 2021; Ivanov et al., 2017). Companies were forced to change their strategies and diversify their sources of supply and create safety stocks. The need to adapt and respond quickly to changing conditions has made simulation modelling increasingly important as a tool for predicting the effects of operational decisions in an unstable environment (Shih, 2020).

In light of the literature presented, the use of simulation modelling in the analysis and optimisation of warehouse processes is justified. This approach is particularly valuable for companies operating in multiple markets, offering a wide range of services and having a complex logistics structure. Simulation not only enables the optimisation of warehouse operations but also provides a foundation for further automation and digitisation of management processes.

funkcjonującego systemu. Modelowanie symulacyjne umożliwia odwzorowanie rzeczywistych procesów w środowisku cyfrowym i przeprowadzanie eksperymentów w celu identyfikacji optymalnych rozwiązań (ten Hompel i Schmidt, 2007). Symulacje oparte na modelach zdarzeń dyskretnych (DES) pozwalają na szczegółową analizę procesów operacyjnych, w tym wykrywanie wąskich gardeł, ocenę wpływu zmian organizacyjnych i testowanie wariantów rozmieszczenia zasobów (Šaderová i in., 2018). Zalety modelowania symulacyjnego są szczególnie widoczne w złożonych systemach magazynowych, w których istotna jest nie tylko przestrzenna lokalizacja zapasów, ale również ścieżki przemieszczania się wózków, czas realizacji poszczególnych operacji oraz interakcje między różnymi elementami systemu. Modele tego typu mogą uwzględniać dane rzeczywiste, takie jak rozkład zamówień, konfiguracja magazynu czy liczba operatorów. Co istotne, wyniki symulacji mogą być prezentowane w formie graficznej (np. wizualizacje 3D), wskaźników KPI (Key Performance Indicators) oraz raportów porównawczych scenariuszy, co wspomaga podejmowanie decyzji menedżerskich (Halusiak i Uciński, 2013).

Dynamiczne zmiany otoczenia, takie jak pandemia COVID-19, wojny, ataki cybernetyczne czy zmienność rynków azjatyckich, obnażyły ograniczenia tradycyjnych koncepcji zarządzania zapasami, w tym filozofii just-in-time (Davis i Inajima, 2021; Ivanov i in., 2017). Przedsiębiorstwa zmuszone były do zmiany strategii i większej dywersyfikacji źródeł dostaw oraz tworzenia zapasów bezpieczeństwa. Konieczność adaptacji i szybkiego reagowania na zmienne warunki sprawiła, że modelowanie symulacyjne zyskało na znaczeniu jako narzędzie umożliwiające przewidywanie skutków decyzji operacyjnych w niestabilnym otoczeniu (Ations i Shih, 2020).

W świetle przedstawionej literatury uzasadnione jest zastosowanie metody modelowania symulacyjnego w analizie i optymalizacji procesów magazynowych. Jest to podejście szczególnie wartościowe w przypadku przedsiębiorstw działających na wielu rynkach, posiadających szeroki zakres usług i złożoną strukturę logistyczną. Symulacja umożliwia nie tylko optymalizację pracy magazynu, ale również stanowi fundament dla dalszej automatyzacji i cyfryzacji procesów zarządczych.

3. Research methodology

The subject of the research was the optimisation of inventory distribution in an international supply chain support company. The research objective was to examine the possibilities of improving order picking times, improving the use of transport resources, and reducing the workload of employees based on a warehouse simulation model. Emphasis was placed on material flow and inventory structure in order to examine the processes actually taking place in the company and to propose rational ways of inventory management.

The study used methodological triangulation, employing three complementary research methods: literature analysis and critique, case study, and computer simulation. The use of these methods made it possible to examine the topic from a theoretical perspective, learn about the company's case, and achieve the research objective.

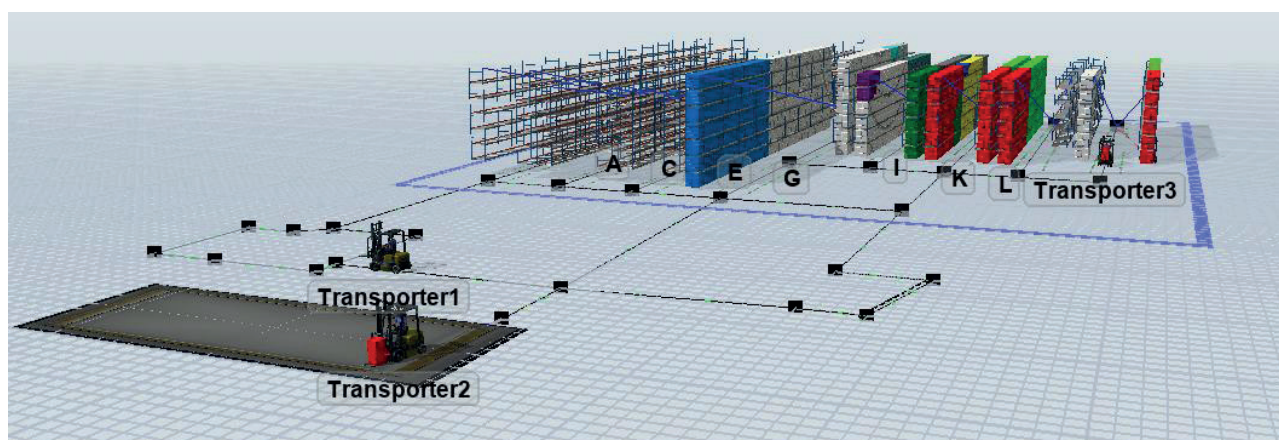
Due to the need to accurately map warehouse space and inventory management processes, a low level of abstraction was used, focusing on a narrow scope in the most accurate way possible. The discrete event modelling method was used, which made it possible to focus on the process flow, the impact of individual activities on the operation of the system, and the identification of system bottlenecks.

3. Metodyka badań

Przedmiotem badań była optymalizacja rozmieszczenia zapasów w międzynarodowym przedsiębiorstwie zajmującym się wspomaganie łańcucha dostaw. Celem badawczym było zbadanie możliwości poprawy czasów kompletacji, poprawa wykorzystania zasobów transportowych oraz zmniejszenie obciążenia pracą pracowników w oparciu o model symulacyjny magazynu. Położono nacisk na przepływ materiałów i strukturę zapasów, aby zbadać procesy realnie zachodzące w przedsiębiorstwie oraz zaproponować racjonalizujące sposoby zarządzania zasobami.

W pracy zastosowano triangulację metodologiczną, wykorzystując trzy komplementarne metody badawcze: analizę i krytykę piśmiennictwa, indywidualny przypadek (case study) oraz symulację komputerową. Wykorzystanie tych metod umożliwiło zbadanie tematu od strony teoretycznej, poznanie przypadku przedsiębiorstwa oraz realizację założonego celu badawczego.

Ze względu na potrzebę dokładnego odwzorowania przestrzeni magazynowych oraz procesów zarządzania zasobami wykorzystano niski poziom abstrakcji, skupiający się na wąskim zakresie w maksymalnie dokładny sposób. Zastosowano metodę modelowania zdarzeń dyskretnych, co umożliwiło skupienie na przebiegu procesu, wpływie pojedynczych czynności na działanie systemu oraz identyfikację wąskich gardeł systemu.



Rysunek 1. Widok modelu w trakcie realizacji zleceń kompletacyjnych

Figure 1. View of the model during the execution of picking orders

Source: own study.

Źródło: opracowanie własne.

The simulation model was built using FlexSim, a dedicated environment for modelling logistics, warehousing, and production processes. The following were modelled: the initial location of goods in the warehouse, the movement of forklifts within the warehouse, and the picking of goods based on picking lists created on the basis of sales orders. The input data for the model included: warehouse stocks, actual picking lists, the number and dimensions of racks, transport route lengths, the number of forklifts, and the time required for loading and unloading goods.

4. Research results

As part of the research objective, 15 simulation scenarios were defined and carried out, differing in the way goods were placed in the warehouse. Each scenario was configured with identical input parameters to ensure comparability of results.

The model's parameter assumptions included: continuous warehouse operation, forklift operation without breakdowns or interruptions, a constant forklift speed of 2 km/h, a loading time of 15 seconds, unloading time of 10 seconds, forklifting speed of 0.62 m/s, and maximum transport capacity of the forklift of 16 boxes. Stocks were generated during the first 180 seconds of the simulation at a frequency of 10 seconds, and the first picking order appeared at 1,800 seconds with subsequent orders every 100 seconds.

Model symulacyjny został zbudowany z wykorzystaniem programu FlexSim, dedykowanego środowiska do modelowania procesów logistycznych, magazynowych i produkcyjnych. Modelowaniu poddano: ulokowanie początkowe towarów w magazynie, ruch wózków widłowych po terenie magazynu oraz kompletację towaru na podstawie list kompletacyjnych tworzonych w oparciu o zamówienia sprzedażowe. Danymi wejściowymi do modelu były: zapasy magazynowe, rzeczywiste listy kompletacyjne, liczba oraz wymiary regałów, długości dróg transportowych, liczba wózków oraz czas realizacji załadunku i rozładunku towarów.

4. Wyniki badań

W ramach realizacji celu badawczego wyznaczono i przeprowadzono 15 scenariuszy symulacyjnych, różniących się sposobem rozmieszczenia towarów w magazynie. Każdy scenariusz został skonfigurowany z identycznymi parametrami wejściowymi, zapewniającymi porównywalność wyników.

Założenia parametryczne modelu obejmowały: ciągły charakter pracy magazynu, pracę wózków bez awarii i przerw, stałą prędkość jazdy wózków wynoszącą 2 km/h, czas załadunku towaru 15 sekund, czas rozładunku 10 sekund, prędkość unoszenia wideł 0,62 m/s oraz maksymalną pojemność transportową wózka 16 pudełek. Zapasy generowane były przez pierwsze 180 sekund symulacji z częstotliwością 10 sekund, a pierwsze zlecenie kompletacyjne pojawiało się w 1800 sekundzie z kolejnymi zleceniami co 100 sekund.

Table 1. Matrix of average order picking time [s]

Tabela 1. Macierz średniego czasu realizacji zleceń kompletacyjnych [s]

Posortowano według: Sorted by:	Brak None	Losowo Random	Grupa zapasu (obecny system) Stock group (current system)	ABC wg wielkości kompletacji ABC by order size	ABC wg ilości kompletacji ABC by order quantity
Grupa zapasu Stock group	268	303	—	270	253
ABC1 ABC1	262	350	270	—	—
Brak None	251	343,	254	276	251

Source: own study.

Źródło: opracowanie własne.

The 15 scenarios designed differed in terms of the logic of stock placement. Their impact on the average picking time, minimum and maximum order fulfilment time, as well as resource utilisation (in particular forklifts) was assessed. The stability of the system, understood as fluctuations in fulfilment times and standard deviations, was also analysed. The experiments used ABC classification according to the frequency of occurrence of a given product in picking lists, classification by product groups, random placement, and hybrid solutions (e.g. ABC with priority for specific groups).

Based on the data presented in Tables 1-3, there are significant differences in the effectiveness of different placement strategies. The scenario based on ABC classification according to the number of pickings was characterised by the lowest average order fulfilment time – 251 seconds – and a relatively low standard deviation. This means high predictability and repeatability of the process, which is crucial from the point of view of operational logistics. Compared to random placement, the average time was reduced by almost 100 seconds, which, with 530 orders, results in a total savings of over 14 hours of work.

It is also worth noting the scenario currently being implemented by the company – based on manual placement by operators. Here, a result of 268 seconds was achieved, which also proved to be better than the baseline placement but still less effective than the scenarios planned by the system using ABC rules. This means that the intuitive practice of employees does not ensure maximum efficiency, even though it is not based solely on randomness.

Equally important from the point of view of work organisation are the maximum values and variability of completion times. In the random scenario, the highest maximum time (over 1,500 seconds) was observed, which is more than three times higher than the values recorded in the best scenarios. In practice, this may mean congestion, excessive movement of trucks, and operational inefficiency at peak times. In contrast, in the ABC scenarios, the maximum values do not exceed 470 seconds, which indicates much better warehouse space planning and more efficient work organisation.

Zaprojektowane 15 scenariuszy różniło się logiką rozmieszczenia zapasów. Oceniano ich wpływ na średni czas kompletacji, minimalny i maksymalny czas realizacji zlecenia, a także obciążenie zasobów (w szczególności wózków widłowych). Analizie poddano również stabilność systemu, rozumianą jako wahania czasów realizacji oraz odchylenia standardowe. W ramach eksperymentów zastosowano klasyfikację ABC według częstości występowania danego towaru w listach kompletacyjnych, klasyfikację według grup asortymentowych, rozmieszczenie losowe, a także rozwiązania hybrydowe (np. ABC z priorytetem dla określonych grup).

Na podstawie danych przedstawionych w tabelach 1-3 zauważalne są znaczące różnice w efektywności różnych strategii rozmieszczenia. Scenariusz oparty na klasyfikacji ABC według ilości kompletacji charakteryzował się najniższym średnim czasem realizacji zlecenia – 251 sekund – oraz relatywnie niskim odchyleniem standardowym. Oznacza to wysoką przewidywalność i powtarzalność procesu, co z punktu widzenia logistyki operacyjnej ma kluczowe znaczenie. W porównaniu do losowego rozmieszczenia uzyskano redukcję średniego czasu o niemal 100 sekund, co przy 530 zleceniach daje łącznie oszczędność ponad 14 godzin pracy.

Warto również zwrócić uwagę na scenariusz obecnie wdrażany przez firmę – oparty na ręcznym lokowaniu przez operatorów. Uzyskano tu wynik 268 sekund, który także okazał się lepszy od bazowego rozmieszczenia, jednak nadal mniej efektywny niż scenariusze planowane systemowo z wykorzystaniem reguł ABC. Oznacza to, że intuicyjna praktyka pracowników nie zapewnia maksymalnej efektywności, mimo że nie opiera się wyłącznie na losowości.

Równie istotne z punktu widzenia organizacji pracy są wartości maksymalne i zmienność czasów kompletacji. W scenariuszu losowym zaobserwowano najwyższy maksymalny czas (ponad 1500 sekund), który ponad trzykrotnie przekracza wartości notowane w najlepszych scenariuszach. W praktyce może to oznaczać występowanie zatorów, nadmiernego przemieszczania się wózków oraz niewydolności operacyjnej w szczytowych momentach. Z kolei w scenariuszach ABC maksymalne wartości nie przekraczają 470 sekund, co świadczy o znacznie lepszym planowaniu przestrzeni magazynowej i skuteczniejszej organizacji pracy.

Table 2. Minimum order fulfilment time matrix [s]**Tabela 2.** Macierz minimalnego czasu realizacji zamówień [s]

Posortowano według: Sorted by:	Brak None	Losowo Random	Grupa zapasu (obecny system) Stock group (current system)	ABC wg wielkości kompletacji ABC by picking size	ABC wg ilości kompletacji ABC by picking quantity
Grupa zapasu Stock group	203	176	—	206	183
ABC1 ABC1	188	178	206	—	—
Brak None	178	177	178	238	178

Source: own study.

Źródło: opracowanie własne.

For the minimum order fulfilment time, the shortest picking time was achieved in the variant of random placement of goods divided into groups (176 s). This means that when the goods are well located, and there is not a large amount of goods to pick, random placement can be helpful, especially in the case of urgent goods. The worst minimum picking time (238 s) was achieved in the variant of sorting goods by ABC category according to picking volume.

Dla minimalnego czasu realizacji zlecenia najkrótszy czas kompletacji został zrealizowany w wariacie losowego rozmieszczenia towaru w podziale na grupy (176 s). Oznacza to, że w sytuacji gdy towar zostanie dobrze ulokowany oraz nie ma dużej ilości towaru do pobrania, losowe rozmieszczenie może okazać się pomocne, szczególnie w przypadku pilnych towarów. Najgorszy minimalny czas kompletacji (238 s) został zrealizowany w wariacie sortowania towarów według kategorii ABC wg wielkości kompletacji.

Table 3. Matrix of maximum order picking time [s]**Tabela 3.** Macierz maksymalnego czasu realizacji kompletacji zamówień [s]

Posortowano według: Sorted by:	Brak None	Losowo Random	Grupa zapasu (obecny system) Stock group (current system)	ABC wg wielkości kompletacji ABC by picking volume	ABC wg ilości kompletacji ABC by picking quantity
Grupa zapasu Stock group	447	1284	—	469	434
ABC1 ABC1	451	1447	469	—	—
Brak None	427	1517	442	475	427

Source: own study.

Źródło: opracowanie własne.

The analysis of maximum order fulfilment times showed that the most stable configurations were those in which the average time was also the lowest. The longest picking time (1,517 s) was observed in the configuration with completely random storage location allocation. The results

Analiza maksymalnych czasów realizacji zleceń kompletacyjnych pokazała, że najbardziej stabilne okazały się konfiguracje, w których średni czas był również najniższy. Najwyższy czas kompletacji (1517 s) można było zaobserwować w konfiguracji całkowicie losowego przydziału

indicate that for large orders, close proximity between products is crucial for efficient picking.

The experiments showed that the current system of stock allocation by product group is inefficient. In none of the categories studied did it rank among the top 5 configurations. In the most important indicator for the company – average picking time – the currently implemented system ranked 7th among the 15 configurations studied.

The simulation model also provided information on resource utilisation. It was shown that some scenarios led to excessive operator workload, which could have a negative impact on productivity. Analysis of the paths and working time of the trucks showed that the distribution of inventory significantly affects their workload. In disordered scenarios, operators travelled longer distances, which not only increased picking time but also generated the risk of collisions and employee fatigue. In contrast, in the ABC scenario optimised for order frequency, the forklifts worked more evenly and with fewer empty runs. The results clearly indicate that the use of ABC classification based on the number of pickings ensures the highest operational efficiency.

The analysis showed that the optimal placement of goods in the warehouse according to ABC categories based on the number of pickings is 6% more efficient than the currently used system. Over the course of just 530 pickings, this would save 2.5 hours of work. Extrapolating the results on an annual basis (approximately 37,000 pickings), a different arrangement of goods would save almost 175 hours of work, which is more than one full-time position.

5. Discussion of results

The conclusions drawn from the study are practical and applicable. First of all, it should be noted that the implementation of a goods placement strategy based on ABC classification according to the number of pickings brings the greatest time benefits. This type of approach can be easily implemented using WMS tools and historical

mięsc składowania. Wyniki wskazują, że przy dużych zleceniach bliska odległość pomiędzy produktami jest kluczowa dla sprawnej kompletacji.

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że obecny system rozmieszczenia zapasów według grup produktowych jest nieefektywny. W żadnej z badanych kategorii nie znalazł się wśród 5 najlepszych konfiguracji. W najważniejszym dla firmy wskaźniku - średnim czasie kompletacji - obecnie wdrażany system uplasował się na 7 miejscu wśród 15 badanych konfiguracji.

Model symulacyjny dostarczył również informacji o wykorzystaniu zasobów. Wykazano, że niektóre scenariusze prowadziły do nadmiernego obciążenia operatorów, co mogło wpływać na spadek wydajności. Analiza ścieżek i czasu pracy wózków wykazała, że rozmieszczenie zapasów znacząco wpływa na intensywność ich pracy. W scenariuszach nieuporządkowanych operatorzy pokonywali dłuższe dystanse, co nie tylko zwiększało czas kompletacji, ale również generowało ryzyko kolizji i zmęczenia pracowników. Z kolei w scenariuszu ABC zoptymalizowanym pod kątem częstości zleceń wózki pracowały w sposób bardziej równomierny i z mniejszą liczbą pustych przebiegów. Wyniki wskazują jednoznacznie, że zastosowanie klasyfikacji ABC według ilości kompletacji zapewnia najwyższą efektywność operacyjną.

Analiza wykazała, że optymalne rozmieszczenie towarów w magazynie według kategorii ABC ze względu na ilość kompletacji jest o 6% bardziej efektywne niż obecnie stosowany system. Na przestrzeni zaledwie 530 kompletacji pozwoliłoby to zaoszczędzić 2,5 godziny pracy. Ekstrapolując wyniki na skalę roczną (około 37 tysięcy kompletacji), inne rozmieszczenie towaru umożliwiłoby zaoszczędzenie prawie 175 godzin pracy, co stanowi ponad jeden miesięczny etat.

5. Dyskusja wyników

Wnioski wynikające z badania mają charakter praktyczny i aplikacyjny. W pierwszej kolejności należy zauważyć, że wdrożenie strategii rozmieszczenia towarów opartej na klasyfikacji ABC według ilości kompletacji przynosi największe korzyści czasowe. Tego typu podejście może być łatwo implementowane z wykorzystaniem

order analysis. It is also worth noting that simulation allows solutions to be tested before their physical implementation, which reduces the risk of failure and allows for early detection of system bottlenecks.

The results of the study confirm the importance of strategic inventory placement in the warehouse for the efficiency of picking processes. The demonstrated 6% improvement in efficiency through the use of ABC classification according to picking frequency is consistent with classic warehouse management principles, where high-turnover products should be placed in the most easily accessible areas. The research results are consistent with the concepts of Bartosiewicz (2017), who points out that uncontrolled placement of goods generates operational chaos and increases picking costs. The use of ABC classification – commonly recommended in inventory management (Staniec & Stajuda, 2012) – has been empirically confirmed as an effective optimisation tool.

Another interesting finding was that random distribution can generate short times for small orders, which is consistent with Ivanov's (2017) observation that resilient systems must allow for flexibility in unusual situations.

It is particularly important to note that random placement of goods leads to a dramatic increase in maximum picking times (up to 1,517 seconds), confirming the crucial importance of a systematic approach to warehouse space organisation. This result is consistent with the theoretical foundations of warehouse management, where organisational chaos directly translates into reduced productivity. Additionally, it is worth considering the use of dynamic forklift route planning and operator support through location systems. The results clearly indicate that seemingly minor changes in warehouse spatial organisation can lead to significant savings in time and operating costs.

However, the limitations of the study should be taken into account. The model omits important aspects of actual warehouse operations, such as: goods receipt, intra-warehouse movements, production line operation, time constraints on order fulfilment, possible equipment failures, and the human factor. In addition, changing the layout of goods may negatively affect the work of

narzędzi WMS oraz analiz historycznych zamówień. Warto również podkreślić, że symulacja umożliwia testowanie rozwiązań przed ich fizycznym wdrożeniem, co ogranicza ryzyko niepowodzeń oraz pozwala na wcześniejsze wykrycie wąskich gardeł systemu.

Uzyskane wyniki badań potwierdzają znaczenie strategicznego rozmieszczenia zapasów w magazynie dla efektywności procesów kompletacji. Wykazana 6% poprawa efektywności poprzez zastosowanie klasyfikacji ABC zgodnie z częstotliwością kompletacji pozostaje w zgodzie z klasycznymi zasadami zarządzania magazynem, gdzie produkty o wysokiej rotacji powinny być umieszczane w strefach o najłatwiejszym dostępie. Wyniki badań są spójne z koncepcjami Bartosiewicza (2017), który wskazuje, że niekontrolowane rozmieszczenie towaru generuje chaos operacyjny i podnosi koszty kompletacji. Zastosowanie klasyfikacji ABC – powszechnie rekomendowane w zarządzaniu zapasami (Staniec & Stajuda, 2012) – zostało empirycznie potwierdzone jako skuteczne narzędzie optymalizacyjne.

Interesującym wynikiem było również stwierdzenie, że losowy podział może generować krótkie czasy w przypadku małych zleceń – co pokrywa się z obserwacją Ivanova (2017), że systemy odporne muszą uwzględniać elastyczność w sytuacjach nietypowych.

Szczególnie istotne jest zaobserwowanie, że losowe rozmieszczenie towarów prowadzi do dramatycznego wzrostu maksymalnych czasów kompletacji (do 1517 sekund), co potwierdza kluczowe znaczenie systematycznego podejścia do organizacji przestrzeni magazynowej. Ten wynik jest zgodny z teoretycznymi podstawami zarządzania magazynem, gdzie chaos organizacyjny przekłada się bezpośrednio na obniżenie produktywności.

Dodatkowo, warto rozważyć wykorzystanie dynamicznego planowania tras wózków widłowych oraz wsparcie operatorów poprzez systemy lokalizacyjne. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że pozornie niewielkie zmiany w organizacji przestrzennej magazynu mogą prowadzić do znacznych oszczędności czasu i kosztów operacyjnych.

Należy jednak uwzględnić ograniczenia przeprowadzonego badania. Model pomija istotne

warehouse staff, who, knowing the current layout, can more efficiently match the goods being picked with their location.

The simulation results provide guidance on the direction of optimisation, but the implementation of the proposed solutions requires taking into account the specific organisational characteristics of the company and conducting pilot implementations. The model can also be used to analyse the efficiency of forklifts during working hours, which would make it possible to determine employee productivity and implement measures to improve the functioning of internal transport.

6. Summary

The research confirmed the validity of simulation modelling as an effective research method in management, particularly in the analysis and optimisation of logistics processes. Based on a digital representation of the actual warehouse system, it was possible to conduct an in-depth analysis without the need to interfere with the actual working conditions. This approach allowed for the safe and effective testing of 15 variants of inventory placement scenarios, which would be extremely difficult, costly, or even impossible in real-world conditions.

The results confirm the effectiveness of simulation modelling in optimising warehouse processes. Literature, including that by Šaderová (2018), emphasises the importance of accurately mapping logistics processes to predict the effects of operational decisions.

The use of a simulation environment made it possible to analyse the impact of inventory placement strategies on order fulfilment time, resource utilisation intensity, and process stability. The results obtained, such as the significant advantage of ABC classification-based scenarios over random placement, confirm the practical usefulness of this method in making rational operational decisions.

aspekty rzeczywistej pracy magazynu, takie jak: przyjmowanie towaru, ruchy wewnątrzmagazynowe, funkcjonowanie linii produkcyjnej, czasowe ograniczenia realizacji zamówień, możliwe awarie sprzętu oraz czynnik ludzki. Dodatkowo, zmiana rozmieszczenia towarów może negatywnie wpłynąć na pracę magazynierów, którzy znając aktualne rozmieszczenie mogą sprawniej łączyć pobierany towar z jego lokalizacją.

Wyniki symulacji stanowią wskazówkę kierunku optymalizacji, jednak implementacja proponowanych rozwiązań wymaga uwzględnienia specyfiki organizacyjnej przedsiębiorstwa oraz przeprowadzenia pilotażowych wdrożeń. Model może również służyć do analizy efektywności pracy wózków w godzinach roboczych, co umożliwiłoby określenie produktywności pracowników oraz wdrożenie działań poprawiających funkcjonowanie transportu wewnętrznego.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły zasadność zastosowania modelowania symulacyjnego jako skutecznej metody badawczej w zarządzaniu, w szczególności w analizie i optymalizacji procesów logistycznych. Na podstawie cyfrowego odwzorowania rzeczywistego systemu magazynowego możliwe było przeprowadzenie pogłębionej analizy bez potrzeby ingerowania w rzeczywiste warunki pracy. Takie podejście pozwoliło na bezpieczne i efektywne przetestowanie 15 wariantów scenariuszy rozmieszczenia zapasów, co w warunkach rzeczywistych byłoby niezwykle trudne, kosztowne lub wręcz niemożliwe.

Uzyskane rezultaty potwierdzają skuteczność zastosowania modelowania symulacyjnego w optymalizacji procesów magazynowych. W literaturze, m.in. u Šaderovej (2018), podkreśla się znaczenie dokładnego odwzorowania procesów logistycznych dla przewidywania skutków decyzji operacyjnych.

Zastosowanie środowiska symulacyjnego umożliwiło analizę wpływu strategii rozmieszczenia zapasów na czas kompletacji zamówień, intensywność wykorzystania zasobów i stabilność procesów. Uzyskane wyniki, jak na przykład znacząca przewaga scenariuszy opartych na klasyfikacji ABC względem rozmieszczenia

The most important advantages of simulation modelling include:

- the ability to realistically map complex processes and logistics structures,
- the flexibility to experiment with different organisational variants without operational risk,
- the ability to identify bottlenecks and critical points in the system,
- access to detailed quantitative data and its visualisation to support analysis.

However, it should be noted that this method is not without its limitations. Despite their high level of detail, simulation models do not fully take into account all random factors, especially those related to human behaviour or dynamic organisational changes. Building and calibrating a model also requires significant technical expertise and access to accurate data, which can be a limitation for smaller entities.

Despite these caveats, simulation modelling offers unprecedented research opportunities by creating digital twins of real objects. This makes it possible to subject real systems to controlled stresses in a virtual environment, which opens up new perspectives for diagnosing, designing, and improving management processes. Contemporary management – especially in the area of logistics – gains a tool with enormous exploratory, predictive, and optimisation potential thanks to this method.

losowego, potwierdzają praktyczną przydatność tej metody w podejmowaniu racjonalnych decyzji operacyjnych.

Do najważniejszych zalet modelowania symulacyjnego należy zaliczyć:

- możliwość realistycznego odwzorowania złożonych procesów i struktur logistycznych,
- elastyczność eksperymentowania z różnymi wariantami organizacyjnymi bez ryzyka operacyjnego,
- możliwość identyfikacji wąskich gardeł i krytycznych punktów systemu,
- dostęp do szczegółowych danych ilościowych oraz ich wizualizacji wspomagającej analizę.

Należy jednak zaznaczyć, że metoda ta nie jest pozbawiona ograniczeń. Modele symulacyjne, mimo dużej szczegółowości, nie uwzględniają w pełni wszystkich czynników losowych, zwłaszcza tych związanych z zachowaniami ludzkimi czy dynamicznymi zmianami organizacyjnymi. Budowa i kalibracja modelu wymaga też znacznych kompetencji technicznych oraz dostępu do dokładnych danych, co może być ograniczeniem dla mniejszych podmiotów.

Mimo tych zastrzeżeń, modelowanie symulacyjne oferuje niespotykane wcześniej możliwości badawcze poprzez tworzenie cyfrowych bliźniaków rzeczywistych obiektów. Dzięki temu możliwe staje się poddanie systemów rzeczywistych kontrolowanym wymuszeniom w wirtualnym środowisku, co otwiera nowe perspektywy dla diagnozowania, projektowania i usprawniania procesów zarządczych. Współczesne zarządzanie – szczególnie w obszarze logistyki – zyskuje dzięki tej metodzie narzędzie o ogromnym potencjale eksploracyjnym, predykcyjnym i optymalizacyjnym.

Bibliografia

1. Bartosiewicz, S. (2017). Optymalizacja procesów magazynowych w przedsiębiorstwie. *Gospodarka Materiałowa i Logistyka*, 5.
2. Davis, M., Inajima, T. (2021). Toyota Cuts Production as Covid Hits Southeast Asia Suppliers. Bloomberg.
3. Dudziński, Z., Kizera, M. (2002). *Vademecum Gospodarki Magazynowej*, Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr Sp. z o. o., Gdańsk.
4. Halusiak, S., Uciński, J., (2013). *Transport wewnętrzny. Zagadnienia wybrane*. Wyd. Politechniki Łódzkiej.
5. Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., Ivanova, M., (2017). Literature review on disruption recovery in the supply chain. *International Journal of Production Research*, 55(20).
6. Šaderová, J., Marasova, D., Galikova, J. (2018). Simulation as Logistic Support to Handling in the Warehouse: Case Study. *TEM Journal*, 7(1).
7. Shih, W., C. (2020). Global Supply Chains in a Post-Pandemic World. *Harvard Business Review*, 98(5).
8. Skowronek, C., Sarjusz-Wolski, Z. (2012). *Logistyka w przedsiębiorstwie*. Warszawa: PWE.
9. Staniec, I., Stajuda, A. (2012). Metody klasyfikacji wykorzystywane w procesie zaopatrzenia. W: *Aktualne wyzwania w zarządzaniu podmiotami gospodarczymi*, s. 93-112.
10. Serman, J., D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: Irwin/McGraw-Hill.
11. Szymonik, A., Chudzik, M. (2018). *Logistyka nowoczesnej gospodarki magazynowej*. Warszawa: Difin.
12. Tarczyński, G. (2016). Porównanie efektywności kompletacji łączonych zleceń z kompletacją niezależną / An attempt of comparison of order batching with independent order-picking. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, 446.
13. Ten Hompel, M., Schmidt, T. (2007). *Warehouse Management: Automation and Organisation of Warehouse and Order Picking Systems*. Springer.
14. Toomey, J. W. (2000). *Inventory Management: Principles, Concepts and Techniques*. Springer.
15. Venkatesh, P., Sowmiya, P. (2025). ABC-XYZ Classification and Forecasting for Inventory Optimization. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 5(12).
16. Zimon, G. (2012). Zarządzanie zapasami w przedsiębiorstwach tworzących zintegrowany system dostaw. *Zarządzanie finansami firm – teoria i praktyka*, 271(2).



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>) allowing third parties to copy and redistribute the material in any medium or format and remix, transform, and build upon the material for any purpose, even commercially.