

Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Lądowej
Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej
Zakład Systemów Komunikacyjnych



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Praca doktorska

**Wpływ metody klasyfikacji produktów na
efektywność transportu wewnątrzmagazynowego**

The impact of products classification method to the efficiency of
internal transport in warehouse

Autor: mgr inż. Augustyn Lorenc
Promotor: dr hab. inż. Andrzej Szarata, prof. PK
Promotor pomocniczy: dr inż. Ilona Jacyna-Golda

Kraków | 2016



„Alteri vivas oportet, si vis tibi vivere”

„Musisz żyć dla innych, jeśli chcesz żyć z pożytkiem dla siebie”

Seneka

Spis treści

1. Wstęp	9
1.1. Podstawowe definicje używane w dysertacji	9
1.2. Geneza pracy.....	11
1.3. Cel i zakres pracy.....	16
1.4. Tezy pracy.....	19
2. Składowanie, klasyfikacja i rozmieszczanie produktów w magazynie	21
2.1. Metody składowania produktów	21
2.1.1. Układ magazynów	23
2.1.2. Składowanie rzędowe a składowanie blokowe.....	27
2.1.3. Metoda stałych i wolnych miejsc składowania.....	30
2.1.4. Wybrane wskaźniki wykorzystywane do oceny stopnia wykorzystania magazynu	31
2.2. Metody planowania i rozmieszczenia produktów	32
2.2.1. Index COI.....	34
2.2.2. Analiza ABC	35
2.2.3. Analiza XYZ	36
2.2.4. Analiza ABC-FC	37
2.2.5. Analiza EIQ.....	40
2.2.6. Metoda AHP	43
2.2.7. Porównanie podstawowych metod wykorzystywanych do klasyfikacji produktów.....	46
2.2.8. Nowoczesne metody i narzędzia wykorzystywane do klasyfikacji produktów	48
3. Transport wewnątrzmagazynowy - kompletacja produktów	50
3.1. Uwagi ogólne.....	50
3.2. Zasady kompletacji produktów	52
3.3. Metody kompletacji zamówień.....	53
3.3.1. Kompletacja według zamówień - Pick by order.....	53
3.3.2. Kompletacja kilku zamówień jednocześnie - Cluster picking.....	54
3.3.3. Kompletacja według asortymentu - Batch picking	54
3.3.4. Kompletacja strefowa - Pick and Pass/Zone picking.....	55
3.3.5. Kompletacja falowa - Wave picking	56
3.3.6. Porównanie metod kompletacji zamówień	56
3.4. Środki transportowe wykorzystywane do kompletacji zamówień	58
3.5. Systemy automatycznej identyfikacji oraz rozwiązania usprawniające kompletację zamówień	60
3.5.1. Wprowadzenie - rodzaje systemów	60
3.5.2. Kody kreskowe.....	60
3.5.3. Fale radiowe RFID	60
3.5.4. Rozpoznawania znaków i obrazów	61
3.5.5. Technologia głosowa.....	62
3.5.6. System pick by light/pick to light.....	62
3.6. Wskaźniki charakteryzujące proces kompletacji	63
4. Model symulacji i oceny efektywności procesu kompletacji zamówień	65
4.1. Założenia ogólne modelu.....	65

4.2.	Zapis matematyczny struktury magazynu.....	66
4.3.	Metoda rozmieszczenia produktów w magazynie z uwzględnieniem ich klas	71
4.4.	Algorytm metody oceny efektywności procesu kompletacji zamówień	72
4.5.	Algorytm wyznaczania czasu kompletacji zamówień.....	73
5.	Ocena wpływu doboru kryteriów klasyfikacji produktów na czas procesu kompletacji zamówień	77
5.1.	Dane do przeprowadzenia analizy – ustalenie wariantów.....	77
5.1.1.	Wariant IA oraz wariant IIA.....	79
5.1.2.	Wariant IB oraz wariant IIB	85
5.2.	Analiza wpływu wyboru kryterium klasyfikacji produktów na czas kompletacji produktów	91
5.2.1.	Analiza dla wariantu IA – mały magazyn, podatność na piętrzenie	91
5.2.2.	Analiza dla wariantu IIA – mały magazyn, wrażliwość na piętrzenie.....	93
5.2.3.	Analiza dla wariantu IB – duży magazyn, podatność na piętrzenie	95
5.2.4.	Analiza dla wariantu IIB – duży magazyn, wrażliwość na piętrzenie	99
6.	Ocena wpływu doboru metody klasyfikacji produktów na czas procesu kompletacji zamówień	103
6.1.	Procedura klasyfikacji produktów z uwzględnieniem wzajemnych powiązań	103
6.1.1.	Analiza dla wariantu IC.....	108
6.1.2.	Analiza dla wariantu IIC.....	112
6.2.	Podział produktów na kategorie w oparciu o dynamiczne wyznaczanie granic	115
6.2.1.	Algorytm metody podziału na kategorie	116
6.2.2.	Analiza efektywności podziału produktów na klasy w oparciu o dynamiczne wyznaczanie granic ..	118
6.3.	Klasyfikacja produktów z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.....	120
6.3.1.	Schemat funkcjonalny opracowanej metody	120
6.3.2.	Struktura sztucznej sieci neuronowej	122
6.3.3.	Proces uczenia sieci – dobór wag	122
6.3.4.	Wybór funkcji uczącej.....	125
6.3.5.	Opis wyników.....	128
6.4.	Ocena korzyści wynikających z zastosowania poszczególnych metod.....	134
7.	Podsumowanie i wnioski	141
7.1.	Wnioski ogólne oraz weryfikacja postawionych tez.....	141
7.2.	Kierunki dalszych badań.....	143
	Bibliografia	144
	Spis rysunków.....	152
	Spis tabel	155
	Załącznik nr 1 - Implementacja metody w postaci aplikacji komputerowej (SPKZ)	157

Streszczenie

W rozprawie omówiono wpływ metod klasyfikacji produktów na efektywność transportu wewnątrzmagazynowego. W ramach niniejszej dysertacji zaproponowano szereg rozwiązań autorskich, do których można zaliczyć: model symulacji i oceny efektywności procesu kompletacji zamówień, trzy metody klasyfikacji produktów oraz szereg algorytmów będących częścią opracowanej aplikacji komputerowej o akronimie SPKZ. Aplikacja może być z powodzeniem wykorzystywana do dalszych badań oraz po dostosowaniu może być zdrożona w rzeczywistych obiektach magazynowych.

W pierwszym rozdziale rozprawy przedstawiono genezę powstania pracy, zidentyfikowano obszar badawczy oraz przedstawiono zakres pracy. W rozdziale tym przedstawiono znaczenie magazynu w systemie transportowym oraz zdefiniowano tezę i cel rozprawy. W tym rozdziale przedstawiono podstawowe definicje stosowane w pracy takich jak: system transportowy, system logistyczny, łańcuch transportowy, łańcuch logistyczny, efektywność, efektywność systemu, optymalizacja, proces transportowy, proces magazynowy, składowanie, komisjonowanie, system komisjonowania, konfekcjonowanie, konsolidacja, kompletowanie, sortowanie, piętrzenie bezpośrednie oraz pośrednie.

Rozdział drugi został poświęcony metodom klasyfikacji i rozmieszczenia produktów w magazynach, do których należą m.in. analiza ABC, analiza XYZ, analiza EIQ, metoda AHP. W rozdziale dokonano porównania tych metod oraz wskazano inne nowoczesne metody i narzędzia wykorzystywane do klasyfikacji produktów. W rozdziale tym scharakteryzowano także obiekty magazynowe oraz omówiono metody składowania produktów.

Trzeci rozdział zawiera omówienie zagadnień ściśle związanych z samą kompletacją. Zostały w nim przedstawione metody kompletacji zamówień, środki transportowe wykorzystywane w magazynach, systemy automatycznej identyfikacji towarów oraz wskaźniki wykorzystywane do oceny procesu kompletacji.

W rozdziale czwartym przedstawiono autorską metodę symulacji i oceny efektywności procesu kompletacji zamówień. Przedstawiona metoda bazuje na generowaniu list kompletacji zamówień, a następnie symulacji procesu ich kompletacji. Pozwala na obliczenie czasu jej trwania z uwzględnieniem czasu transportu, pobierania produktów z regałów oraz czynności towarzyszących.

Rozdział piąty poświęcono na przedstawienie wyników oceny wpływu doboru kryteriów podziału produktów na efektywność procesu kompletacji. Badania w tym rozdziale zostały przeprowadzone dla dwóch różnych wielkości magazynów i potwierdzone statystyczną analizą wyników.

W rozdziale szóstym przedstawiono autorskie metody klasyfikacji produktów opracowane na potrzeby niniejszej dysertacji tj., metodę podziału produktów z uwzględnieniem ich wzajemnych powiązań na listach kompletacji, algorytm podziału produktów na klasy przy dynamicznym wyznaczaniu granic oraz metodę wykorzystującą sztuczne sieci neuronowe. Efektywność przedstawionych metod została oceniona w oparciu o wyniki symulacji przeprowadzone w aplikacji SPKZ oraz poparta analizą statystyczną. Rozdział podsumowano za pomocą oceny kosztów-korzyści wynikających z zastosowania przedstawionych metod.

Wnioski wynikające z przeprowadzonych w rozprawie rozważań zawarto w rozdziale dziewiątym. Przedstawiono w nim również kierunki dalszych badań.

Załącznik nr 1 przedstawia implementację opracowanego modelu w postaci autorskiej aplikacji SPKZ. Aplikacja została stworzona w celu umożliwienia zarówno generowania list kompletacji zamówień, wykonania klasyfikacji produktów, jak również planowania rozmieszczenia produktów w magazynie oraz symulacji procesu kompletacji zamówień. Aplikacja pozwala na uzyskanie danych wystarczających do przeprowadzenia badań potrzebnych do osiągnięcia celów pracy i zweryfikowania postawionych w dysertacji tez.

Abstract

This dissertation presents the influence of methods of product classification on the warehouse internal transport efficiency. The author of the dissertation proposes his own solutions and ideas, which include the simulation and process evaluation of an order completion effectiveness model, three methods of product classification, and a series of algorithms which are part of the computer application with an SPKZ acronym. The application can be easily used for further research, and, after some adjustments it can be introduced into real warehouses and other store rooms.

In the First Chapter, the author presents the genesis and the scope of the dissertation. In this chapter the author also presents the significance of a warehouse in the transport system. The area of research is identified and the thesis and the purpose of the dissertation are defined. In this chapter presents basic definitions used in the dissertation, such as: transport system, logistics system, transport chain, logistics chain, effectiveness, the system effectiveness, optimization, transport process, warehouse process, storage, commissioning, commissioning system, confecting, consolidation, completion, sorting, and direct and indirect stacking.

Chapter Second is devoted to methods of product classification and product distribution in warehouses. They include the ABC analysis, the XYZ analysis, the EIQ analysis, and the AHP method. All the methods are compared. Other up-to-date methods and tools used in the product classification are also presented in this chapter. In this chapter the author also gives the characteristics of warehouses, and depicts methods of product storage.

The Third chapter includes issues strictly connected with the completion itself. It presents order completion methods, transport means used in warehouses, systems of goods automatic identification, and indexes applied for the evaluation of a completion process.

Chapter Four deals with a method of the simulation and effectiveness evaluation of the order completion process worked out by the author. The method is based first on the generation of order completion lists, and then on the simulation of the process of their completion. The method allows the calculation of the completion time including transport time, picking up products from shelves, and auxiliary activities.

Chapter Five presents the results of the evaluation of the influence of product selection criteria on the effectiveness of the completion process. The research presented in this chapter has been conducted for two different warehouse sizes. The research has been confirmed with the use of a statistics analysis of the results.

Chapter Six contains the author's methods of product classification worked out for the needs of the dissertation, i.e. the product selection method which includes products' mutual relationships on the completion lists, the algorithm of product selection into classes with the dynamic border determination, and the method that uses artificial neural networks. The effectiveness of the presented methods has been evaluated on the basis of the results of the simulations conducted in the SPKZ application. The effectiveness has also been proved by a statistics analysis. Chapter Eight has been summed up with the evaluation of costs and profits resulting from the application of the presented methods.

The conclusions derived from the research carried out in the dissertation are in Chapter Nine. This chapter also states the directions of further research.

In appendix no. 1, the implementation of the presented model in a form of the author's SPKZ application is shown. The application has been created in order to enable the generation of order completion lists, product classification, as well as product distribution planning in a warehouse, and the simulation of the order completion process. The application allows for obtaining the sufficient data for both carrying research required in order to achieve the dissertation's goals and verifying the theses drawn in the dissertation.

1. WSTĘP

1.1. Podstawowe definicje używane w dysertacji

Problematyka dysertacji dotyczy zagadnień związanych z procesem magazynowania realizowanym w magazynach bądź centrach dystrybucyjnych systemów logistycznych. Z tego względu, dla jednoznaczności prowadzonych badań w dysertacji, niezbędne jest zdefiniowanie podstawowych pojęć. Tym bardziej, iż istnieje wiele procesów i czynności zachodzących podczas transportu, przechowywania i obsługi produktów w magazynach. Istnieje wiele wyjaśnień pojęć, w niniejszej dysertacji przytoczono te, które najczęściej pojawiają się w literaturze.

Ponieważ obiekty magazynowe są elementem infrastruktury punktowej systemów transportowych i logistycznych (zależy od ujęcia) to zasadne jest wyjaśnianie kilku pojęć z tym związanych takich jak:

„System transportowy składa się z trzech elementów: środków transportu, infrastruktury transportu (punktowa i liniowa) oraz systemu zarządzania ruchem środków transportowych przewożących towary lub osoby. [...] System transportowy składa się z podsystemów, którymi mogą być: podsystem sterowania ruchem, podsystem telekomunikacji i monitorowania ładunków, podsystem przeładunku, podsystem zasilania i inne [56].”

„System logistyczny odpowiada za przestrzennoczasowe przemieszczanie dóbr (materiałów, wyrobów, ludzi, kapitału) i towarzyszących im informacji. W zależności od zasięgu funkcjonowania, systemy logistyczne można podzielić na działające w skali mikro (w ramach działalności określonego przedsiębiorstwa) lub makro (obejmujące zasięgiem całe gałęzie i branże przemysłu [132].”

„Łańcuch transportowy (łańcuch dostaw) to sieć producentów i usługodawców, którzy współpracują ze sobą w celu przetwarzania i przemieszczania dóbr – od fazy surowca do poziomu użytkownika końcowego. Wszystkie te podmioty są połączone przepływami dóbr fizycznych, przepływami informacji raz przepływami pieniężnymi [11].”

„Łańcuch logistyczny [...] to taki łańcuch magazynowo-transportowy, który [...] stanowi technologiczne połączenie punktów magazynowych i przeładunkowych na trasach przewozu towarów, a także organizacyjne i finansowe skoordynowanie operacji logistycznych, w tym procesów zamówień i polityki zapasów [30]”

„Efektywność oznacza uzyskiwanie jak najlepszych wyników i spełnienie wymagań [81].”

„Efektywność systemu (procesu) – cecha wyrażająca całokształt możliwości osiągnięcia celów przez system (zaspokajania potrzeb, działania zgodnie z przeznaczeniem. Wskaźnikami jakości systemu mogą być: stopień osiągnięcia celów (skuteczność), relacje między korzyściami a nakładem [81].”

Pojęcie efektywności w niniejszej dysertacji ma duże znaczenie, ponieważ to w oparciu o nią wybierane są najlepsze metody klasyfikacji produktów. Jako mierzalne korzyści które posłużą do jej oceny wybrano czas kompletacji zamówień, który w wyniku zastosowania poszczególnych metod i kryterium klasyfikacji produktów ulega zmianie.

Kolejnym pojęciem o dużym znaczeniu dla niniejszej pracy jest optymalizacja, która może być zdefiniowana jako:

*„**Optymalizacja** jest dziedziną wiedzy zajmującą się metodami wyboru optymalnych działań związanych z aktywnością człowieka w sferze techniki, gospodarki itp. [85]”*

lub jako:

*„**Optymalizacja** – organizowanie jakichś działań, procesów itp. w taki sposób, aby dały jak największe efekty przy jak najmniejszych nakładach [109].”*

*„**Optymalizacja** – poszukiwanie za pomocą metod matematycznych najlepszego, ze względu na wybrane kryterium, rozwiązania danego zagadnienia gospodarczego, przy uwzględnieniu określonych ograniczeń [109].”*

W związku z powyższymi definicjami optymalizacja w niniejszej pracy jest rozumiana jako odnalezienie lub utworzenie takiej metody klasyfikacji produktów, która będzie pozwalała na zwiększenie efektywności procesu kompletacji zamówień biorąc pod uwagę czas jej trwania.

Do głównych pojęć stosowanych w logistyce magazynowej można zaliczyć:

*„**Magazyn** to obiekt budowlany, w którym magazynuje się dobra materialne (zapasy). Jest on zarządzany i obsługiwany przez zespół ludzi. W magazynie wykorzystuje się ustaloną technologię i odpowiednie środki techniczne [58].”*

*„**Proces transportowy** jest to szereg złożonych czynności organizacyjnych, wykonawczych oraz handlowych mających na celu przemieszczenie ładunków lub ludzi z jednego lub kilku punktów początkowych, zwanych punktami nadania do jednego lub kilku punktów końcowych, zwanych punktami odbioru przy pomocy odpowiednich środków transportu [26].”*

*„**Proces magazynowy** to proces logistyczny złożony z czynności takich jak: przyjęcie, przechowywanie, transport bliski (w procesie magazynowania czynność ta nosi nazwę manipulacji), konserwacja, kompletowanie, prowadzenie ewidencji i wydawanie dóbr materialnych. Czynnościom tym dobra materialne poddawane są w specjalnych obiektach zwanych magazynami [26].”*

*„**Składowanie** to zbiór czynności związanych z umieszczeniem (ulożeniem) zapasów na powierzchni lub w przestrzeni składowej budowli magazynowej (np. w urządzeniach do składowania), w sposób usystematyzowany, odpowiednio do właściwości zapasów i istniejących warunków [82].”*

*„**Komisjonowanie** jest to zestawienie określonych podzbiorów (artykułów) z przygotowanego zbioru całkowitego (asortyment), na podstawie informacji o zapotrzebowaniu w postaci zlecenia. Następuje przy tym zmiana stanu specyficznego dla składowania materiałów w stan charakterystyczny dla wydania materiałów. Komisjonowanie jest częścią ogólnej funkcji rozdziału materiałów, realizowanej w ramach dystrybucji czy logistyki. Komisjonowanie poprzedzane jest składowaniem, a kończy się przekazaniem materiałów do produkcji czy konsumpcji [29].”*

*„**System komisjonowania**. Jako system komisjonowania określa się ogół wszystkich technicznych i organizacyjnych podsystemów prowadzących do przeprowadzenia procesu komisjonowania. Wliczają się w to wszystkie mechaniczne, elektryczne i elektroniczne wyposażenia, maszyny i systemy, jak również metody i procesy służące przeprowadzeniu procesów [29].”*

*„**Konfekcjonowanie** - zespół czynności przygotowujących ładunek towaru do wysyłki i sprzedaży. Polega na porcjowaniu lub pakowaniu produktów w zestawy do wysyłki lub*

sprzedaży detalicznej. Konfekcjonowanie jest jedną z usług magazynowych a szerzej wplata się w łańcuch działań logistycznych [107].”

*„**Konsolidacja** – łączenie przez spedytora wielu przesyłek pochodzących od różnych klientów w jedną przesyłkę i następnie wysłanie skonsolidowanej przesyłki do spedytora kooperującego zagranicą; zwykle oznacza to obniżkę kosztów frachtu [101].”*

*„**Kompletowanie** (kompletacja) polega na pobraniu z posiadanych zapasów takich materiałów i w takiej ilości, jakie wynikają z realizowanego zamówienia. Z pobranych materiałów tworzy się jednostkę lub jednostki ładunkowe [...] Faza kompletowania jest najtrudniejszą częścią procesu magazynowego [26].”*

*„**Sortowanie** jest rozdzielaniem towaru na grupy według podobieństwa cech fizycznych. W przypadku przyjmowania towaru do magazynu zasadniczą cechą są wymagane warunki przechowania. Dlatego oddziela się towary, które trafiają do różnych, oddzielonych od siebie stref przechowalniczych lub do różnych części strefy składowania [79].”*

Istotnym pojęciem wykorzystywanym w magazynowaniu jest także piętrzenie jednostek ładunkowych, czyli ich układanie w stosach, regałach lub kanałach przepływowych [27]. Wyróżnia się:

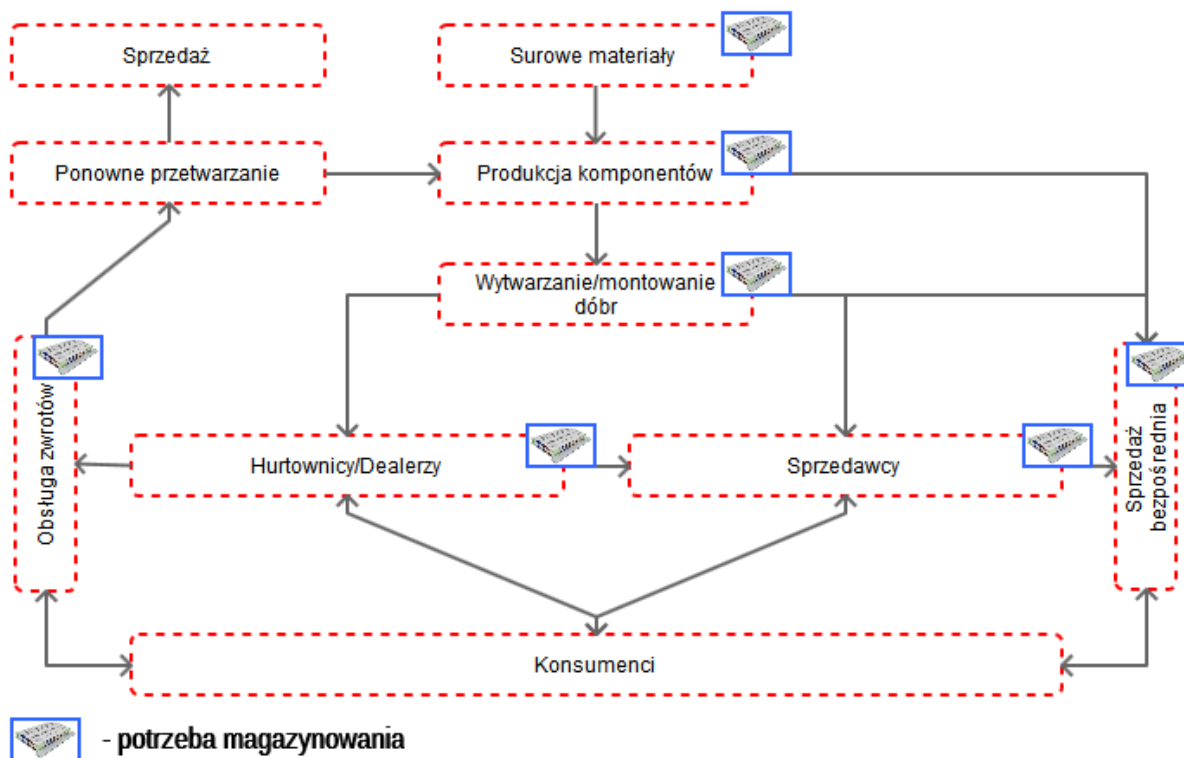
*„**Piętrzenie bezpośrednie bez urządzeń do składowania** polega na układaniu jednej paletowej jednostki ładunkowej bezpośrednio na drugiej. Wysokość tak utworzonego stosu zależy od wytrzymałości na ściskanie piętrzonych towarów lub opakowań. Wysokością piętrzenia w stosy nazywa się liczbę warstw towarów w opakowania lub liczbę jednostek ładunkowych, które są lub mogą być ułożone jedna na drugiej [79].”*

*„**Piętrzenie pośrednie bez urządzeń do składowania** polega na wyposażaniu paletowych jednostek ładunkowych uformowanych na paletach płaskich w nadstawki paletowe lub na stosowaniu palet skrzyniowych. Przy piętrzeniu pośrednim nie ma znaczenia wytrzymałość na ściskanie piętrzonych ładunków lub jego opakowań [79].”*

1.2. Geneza pracy

Zgodnie z definicją magazyn to obiekt budowlany, w którym magazynuje się dobra materialne (zapasy). Jest on zarządzany i obsługiwany przez zespół ludzi. W magazynie wykorzystuje się ustaloną technologię i odpowiednie środki techniczne [58].

Z punktu widzenia logistyki i przewozu ładunków magazyn jest „złem koniecznym”, ponieważ najczęściej nie wnosi żadnej wartości dodanej, a jedynie podnosi koszty transportu, co zostało zauważone w wielu publikacjach [1], [35], [36], [68]. Wyjątkiem są towary, które zyskują na wartości w wyniku upływu czasu, np. wino, antyki, przedmioty kolekcjonerskie, itd. Istnienie magazynu jest niezbędne z uwagi na konieczność przechowywania towarów zarówno zaraz po produkcji jak i na ostatnim etapie przed dystrybucją do klienta docelowego oraz wszędzie tam gdzie wykorzystywany jest więcej niż jeden rodzaj transportu, magazyn pełni rolę ogniwa w łańcuchu transportowo-logistycznym [120]. Magazyn jako element systemu transportowo-logistycznego przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys. 1.1 Miejsce magazynu w łańcuchu transportowym towarów

Źródło: opracowanie własne na podstawie [34]

Zasadnicze funkcje magazynów w systemie logistycznym obejmują: skorygowanie wielkości podaży i popytu, zredukowanie kosztów transportu, wspomaganie procesów produkcyjnych oraz wspomaganie procesów marketingowych [79]. W związku z koniecznością istnienia magazynów dąży się do tego, aby ograniczyć koszty jego funkcjonowania i usprawnić łańcuch transportowy, między innymi przez dostawy *Just-in-Time* (wykonywane w oknach czasowych) oraz *Cross-Docking* (towary przyjmowane do magazynu i przeznaczone do bezzwłocznej wysyłki) [131].

Odpowiednie zaplanowanie układu magazynu oraz rozmieszczenie w nim produktów stanowi duże wyzwanie dla wielu przedsiębiorstw. Mogłoby się wydawać, że jest to problem dość prozaiczny – wystarczy posiadać magazyn o odpowiedniej przestrzeni pozwalającej sprostać ilościowym wymaganiom popytu – jednak samo składowanie produktów nie jest obecnie wystarczające. Współczesny świat – globalny rynek – pozwala konkurować ze sobą nie tylko przedsiębiorstwom lokalnym, ale także tym znajdującym się znacznie dalej, nawet na drugiej półkuli globu. W związku z tym przedsiębiorstw rywalizujących ze sobą jest bardzo dużo, a głównymi kartami przetargowymi są czas i pieniądze. Z punktu widzenia globalnego runku nie jest tak bardzo istotne to skąd pochodzi produkt, ale w jakim czasie i przy jakich kosztach będzie możliwe dostarczenie ładunku do klienta docelowego. Koszt transportu stanowi niejednokrotnie znaczną część całkowitych kosztów produktu, zwłaszcza dla produktów o stosunkowo małej wartości.

W połowie XIX w. zaczęto zwracać szczególną uwagę na optymalizację procesów transportowych w celu poprawy ich efektywności. Prekursorami na skalę światową w tym obszarze okazały się japońskie przedsiębiorstwa produkcyjne, które wykorzystując te same surowce, maszyny oraz technologię produkowały znacznie tańsze oraz lepsze jakościowo produkty [1]. Kluczowym elementem sukcesu okazało się racjonalne wykorzystywanie posiadanych zasobów, odpowiednie zarządzanie w tym kontrola jakości nie tylko końcowego

produktu, ale wszystkich jego elementów na poszczególnych etapach produkcji. Główną ideą stało się dążenie do perfekcji, stałe doskonalenie w myśl filozofii postępowania *Kaizen*, która wskazywała, że każdy nawet efektywny proces ciągle może być ulepszany. Współcześnie metody doskonalenia procesów pozwalają poprawić jakość, zaoszczędzić czas oraz zmniejszyć koszty działania przedsiębiorstwa [116].

System transportowy, podobnie jak każdy obiekt będący systemem składa się ze zbioru elementów i zbioru relacji między tymi elementami warunkującymi realizację celów systemu. Mało tego, również różne systemy transportowe mogą być wzajemnie ze sobą powiązane, a nawet wzajemnie się przeplatać – elementy jednego systemu mogą być również elementami innego [45]. W skład każdego systemu transportowego wchodzi zawsze infrastruktura transportowa, środek transportowy oraz operator systemu. Można oczywiście wyróżnić jeszcze inne jego elementy, jednak te należą do głównych z nich. Infrastruktura transportowa jest również jednym z głównych elementów systemu logistycznego [46]. Wśród elementów punktowych systemów logistycznych należy wymienić tzw. punkty przejścia ładunków w procesie przemieszczania od nadawców do odbiorców [52]. Punkty przejścia to terminale przeładunkowe, centra logistyczne, dystrybucyjne oraz obiekty magazynowe. Ze względu na tematykę rozprawy szczegółowej analizie poddane zostaną obiekty magazynowe. Mimo wysoce rozwiniętych technologii i dążenia do integracji systemów logistycznych i zachodzących w nich procesów praktycznie nie jest możliwe wykonywanie przewozu ładunków bez potrzeby ich składowania.

Nawet koncepcja *Just-in-Time* dążąca do tego, aby produkt był dostarczany na potrzeby klienta (zasysany z rynku) nie pozwala w całości wyeliminować procesów składowania towarów [67]. Magazyny są niezbędnym elementem systemu transportowego w znacznym stopniu wpływającym na jego efektywność. Właśnie z tego powodu niezbędne jest poświęcenie odpowiedniej uwagi zachodzącym w nich procesom oraz dokonanie ich optymalizacji [2], [43], [44].

Obecny poziom technologii pozwala usprawnić wiele procesów mających miejsce w magazynach. Dzięki zastosowaniu systemów WMS (ang. *Warehouse Management System*) możliwe jest zarządzanie zapasami, ustalenie kiedy należy dokonać uzupełnienia zapasów, zlokalizować te, których termin ważności zbliża się ku końcowi oraz zlokalizować miejsce magazynu, w którym znajduje się poszukiwany produkt. Tego typu aplikacje często są wspomagane za pomocą urządzeń automatycznej identyfikacji AI (ang. *Automatic Identification*), które usprawniają proces wprowadzania informacji o produkcie do bazy, a nawet robią to same. Z ich pomocą wystarczy zeskanować kod kreskowy, QR lub RFID przy przyjęciu towaru do magazynu oraz kod regału podczas umieszczenia na nim produktu. Dzięki temu produkt o właściwym identyfikatorze przypisywany jest do określonego miejsca składowania. Podobny proces ma miejsce w przypadku kompletacji i wydania zamówień przez magazyniera. Dzięki systemom informatycznym oraz narzędziom automatycznej identyfikacji możliwe jest nie tylko zwiększenie efektywności zachodzących procesów, ale także zmniejszenie wpływu ludzkiego błędu, takiego jak np. pobranie innego niż pożądaný produkt lub pobranie nieodpowiedniej liczby sztuk.

Z punktu widzenia optymalizacji oprócz usprawnienia procesów obsługi towarów w magazynie istotne jest także dobre zaplanowanie struktury magazynu oraz rozmieszczenia w nim ładunków [49], [51]. Jeśli bowiem proces składowania będzie tylko rolą przypadku może okazać się, że produkty o większym popycie będą znajdowały się w najodleglejszej części magazynu, a te najrzadziej potrzebne najbliżej strefy kompletacji i pakowania. W takim wypadku magazyn będzie narażony na niepotrzebne wydłużanie drogi cykli transportowych podczas procesu magazynowego, a tym samym na straty czasu, wzrostu

liczby potrzebnych pracowników oraz urządzeń transportowych. Obecnie w celu zaplanowania rozmieszczenia produktów w magazynie wykorzystywane są metody klasyfikacji produktów, tzn. przypisaniu ich do grup o różnej randze, a następnie rozmieszczeniu ich w magazynie w taki sposób, aby zapewnić jak najkrótszy czas dostępu do tych produktów, które mają największe znaczenie. Do klasycznych metod klasyfikacji produktów można zaliczyć analizy: ABC, XYZ, EIQ¹ oraz Index COI². Mimo, że metody te są ciągle powszechnie stosowane to nie dają odpowiedniego efektu w stosunku do wymagań stawianych magazynom. Jest to spowodowane tym, że są one najczęściej wykonywane pod kątem jednego kryterium, czasem powtarzane z innym kryterium, a następnie uśrednianie według otrzymanych wyników. Jednak takie rozwiązanie pozwala wziąć pod uwagę kilka kryteriów równocześnie i nie pozwala uwzględnić powiązań występujących między nimi.

Z tego powodu przedsiębiorstwa coraz częściej poszukują nowych metod, łączących te, które są już stosowane ale udoskonalonych [50]. Przy czym ich skuteczność jest uwarunkowana tym czy uwzględnia ona czynniki, które są ważne dla danego przedsiębiorstwa, a każde przedsiębiorstwo ze względu na swój charakter, może mieć inne oczekiwania. Przykładem może być przedsiębiorstwo zajmujące się produkcją towarów sypkich/granulowanych pakowanych w kartony i worki. Dla tego typu przedsiębiorstwa będzie istotne to, aby produkty kompletować według rodzaju opakowania i wagi określającej podatność produktu na piętrzenie, aby uniknąć konieczności zbędnego przekładania produktów na wózek kompletacji w celu uniknięcia uszkodzenia towaru mniejszego przez większy i cięższy znajdujący się powyżej [66]. Jeśli zatem produkty byłyby rozmieszczone tylko z uwzględnieniem charakteryzującego ich popytu to kompletacja według opakowania i masy przysporzyłaby dużo problemów – trzeba by było kilkukrotnie przemierzyć magazyn odwiedzając ponownie miejsca obok których już było się wcześniej. Z drugiej strony nie można też pominąć znaczenia popytu, sezonowości, wartości produktu, można by też zadać sobie pytanie: co z powiązaniem występującymi pomiędzy produktami, np. częstotliwość występowania grupy produktów na listach kompletacyjnych? Z uwagi na ilość danych wejściowych tego typu problemy nie mogą być rozwiązywane za pomocą klasycznych metod klasyfikacji.

Na przełomie XIX i XX w. pojawiły się koncepcje wykorzystania do klasyfikowania produktów algorytmów genetycznych [35]. Rozwiązane to było przełomowe, pozwoliło bowiem na otrzymanie lepszych wyników niż za pomocą wcześniej stosowanych porównań opartych tylko o pojedyncze kryteria. Od tego czasu zagadnienia sztucznej inteligencji były sukcesywnie rozwijane, czego efektem było wykorzystanie pierwszych klasyfikacyjnych sieci neuronowych [89]. Od tego czasu rozwijano kolejne koncepcje wykorzystujące algorytmy genetyczne, sieci neuronowe oraz logikę rozmytą [121]. Jednak dotychczas w obecnie powszechnych publikacjach nie została przedstawiona, żadna metoda klasyfikacji produktów z uwzględnieniem takich danych wejściowych jak: opakowanie, waga oraz powiązania pomiędzy produktami na listach kompletacji zamówień.

Przeprowadzone studia literatury polskiej w temacie klasyfikacji produktów oraz ich rozmieszczenia w magazynie wykazały duże braki w stosunku do badań zachodnich. W krajowych publikacjach pojawiają się najczęściej zagadnienia związane z klasycznymi analizami ABC [79], [3], [57] oraz XYZ oraz samym układzie magazynu i metodach

¹ Analiza EIQ (ang. *Entry-Item-Quantity*), to metoda, która może być wykorzystywana do planowania systemów logistycznych, dystrybucji, planowania rozmieszczenia produktów, wyboru wyposażenia oraz kontroli i prognozowania stanów magazynowych. Analiza została opisana w podrozdziale 2.2.5.

² Index COI (ang. *Cube-per-Order Index*) to jest analiza dwukryterialna, w której jako kryteria przyjmuje się wielkość produktu i popyt. Analiza została opisana w podrozdziale 2.2.1.

składowania [69], [78]. Mimo istnienia szeregu publikacji odnoszących się do algorytmów genetycznych, sieci neuronowych oraz zbiorów rozmytych [123], [100], [84], [119] wciąż brakuje takich, które poruszałyby wykorzystanie tych metod do klasyfikowania produktów. W literaturze zagranicznej można znaleźć więcej tego typu publikacji. Guvenir H.A. oraz Erel E. w swojej publikacji [35] wykorzystali sztuczne sieci neuronowe do analizy wielokryterialnej potwierdzając ich skuteczność w odniesieniu do klasycznych metod. Do porównania rozważanych metod wykorzystali analizę AHP. Partovi F.Y. i Anandarajan, M. natomiast zastosowali metodę propagacji wstecznej oraz algorytmy genetyczne do uczenia sztucznych sieci neuronowych, wykazując, że nie ma znaczącej różnicy pomiędzy oboma metodami uczenia [89]. Quansheng Lei Jian Chen również skupił się na procesie uczenia sztucznej sieci neuronowej wykorzystując kombinację statystycznej analizy głównych składowych (ang. *Principal Component Analysis, PCA*) wraz z algorytmem propagacji wstecznej (ang. *BackPropagation Network, BPN*) i sztucznymi sieciami neuronowymi wykazując skuteczność metody włączenia wielu kryteriów analizy [92]. W literaturze zagranicznej można odnaleźć także wiele opracowań na temat klasycznych metod klasyfikacji produktów oraz ich rozwiniętych odpowiednikach. Yu Min-Chun oprócz klasycznej analizy ABC rozważył także wykorzystanie klasyfikatora maszyny wektorów nośnych (ang. *support vector machine, SVM*) statystycznie potwierdzając jego efektywność [134]. Ching-Wu Chu wraz z współautorami natomiast wykorzystał połączenie analizy ABC z logiką rozmytą (ang. *Fuzzy Logic, FL*) [17]. Podobne podejście zaproponowali Hadi-Vencheh A. oraz Mohamadghasemi A. [37]. Ibrahim Al Kattan oraz Ahmed Bin Adi zwrócili także uwagę na potrzebę zagwarantowania odpowiedniego poziomu gotowości systemu magazynowania oraz zaproponowali własną wielokryterialną metodę klasyfikacji produktów [40].

Dokonując przeglądu literatury zauważono także brak porównania obecnie stosowanych metod ze sobą oraz próby oceny ich efektywności. Nie rozważano także znaczenia wpływu kryteriów decyzyjnych przy planowaniu rozmieszczania produktów na długość procesu kompletacji. Zauważalne braki w tym obszarze wiedzy stały się podstawą do zdefiniowania celów niniejszej dysertacji i przeprowadzenia odpowiednich badań symulacyjnych.

1.3. Cel i zakres pracy

Na potrzeby rozprawy dokonano krytycznego przeglądu literatury z zakresu stosowalności metod klasyfikacji i planowania rozmieszczenia produktów w magazynie. Przegląd literatury zwłaszcza polskiej wskazuje na niewielką liczbę opracowań dotyczących analizowanych zagadnień. Więcej literatury w tym zakresie można znaleźć w publikacjach zagranicznych. Zarówno w literaturze polskiej jak i zagranicznej brak jest kompleksowego podejścia do analiz w zakresie oceny wpływu metod klasyfikacji i planowania rozmieszczenia produktów w magazynie na czas procesu kompletacji. Ponadto w większości przedstawionych w literaturze publikacji analizowane metody oceniane są, na ogół, ze względu na jedno kryterium lub analizę wybranych metod na pracochłonność i czasochłonność w funkcji długości drogi pokonywanej podczas realizacji procesów kompletacji.

W związku z tym zdefiniowano dwa cele naukowe rozprawy:

pierwszym celem naukowym rozprawy jest przeprowadzenie analiz i zaproponowanie metody oceny wpływu różnych kryteriów decyzyjnych i metod klasyfikacji oraz planowania rozmieszczenia produktów w magazynie na czas procesu kompletacji w procesie magazynowania;

natomiast drugim celem rozprawy jest wykazanie możliwości zwiększenia efektywności funkcjonowania magazynu w wyniku wielokryterialnej optymalizacji rozmieszczenia towarów z zastosowaniem modelu działającego w oparciu o sztuczne sieci neuronowe.

Zatem rozprawa miała na celu opracowanie autorskiej metody, która umożliwia prowadzenie analiz w zakresie wpływu stosowanych metod klasyfikacji i planowania rozmieszczenia produktów w magazynie na czas procesu kompletacji. Ponadto w rozprawie został opracowany model wykorzystujący sztuczne sieci neuronowe, który pozwala na wieloaspektową analizę możliwości zwiększenia efektywności funkcjonowania magazynu w wyniku wielokryterialnej optymalizacji rozmieszczenia towarów.

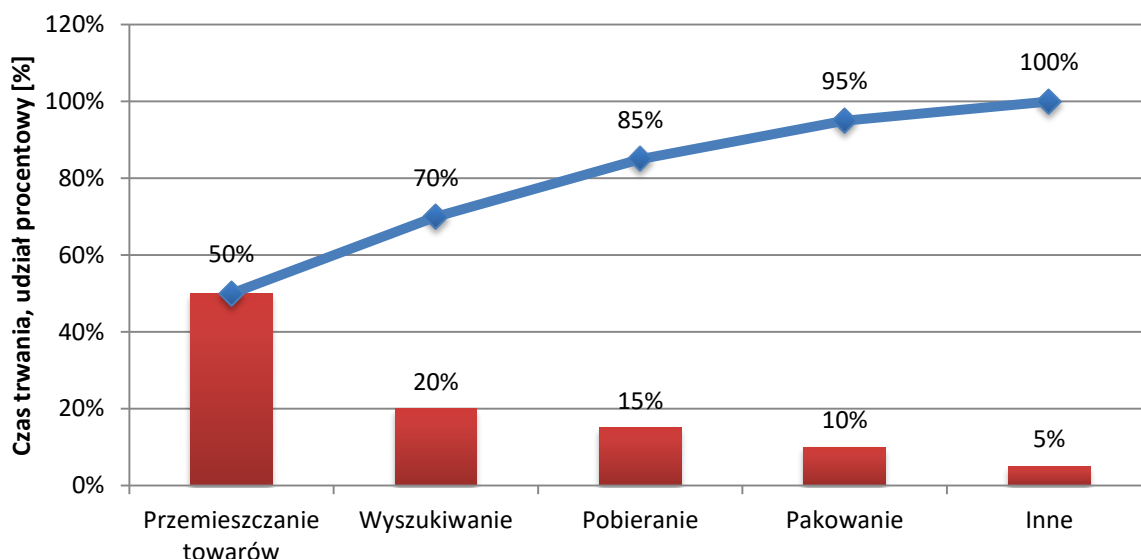
Opracowana metoda została zaimplementowana w postaci aplikacji komputerowej o akronimie SPKZ (Symulacje Procesu Kompletacji Zamówień) w celu przeprowadzenia wielowariantowych analiz. Dotyczą one wpływu stosowanych metod klasyfikacji i planowania rozmieszczenia produktów w magazynie na czas procesu kompletacji oraz możliwości zwiększenia efektywności funkcjonowania magazynu w wyniku wielokryterialnej optymalizacji rozmieszczenia towarów.

Obiektem badań jest magazyn – będący kluczowym ogniwem w łańcuchu transportowo-logistycznym – oraz zachodzące w nim procesy transportowe i logistyczne. Zakres pracy obejmuje następujące zagadnienia:

- identyfikacja procesów zachodzących w magazynie,
- identyfikacja powiązań zachodzących pomiędzy produktami na listach kompletacji,
- dobór modelu matematycznego odwzorowującego proces kompletacji produktów,
- opracowanie modelu wykorzystującego sieci neuronowe umożliwiającego wielokryterialną klasyfikację produktów,
- oszacowanie oszczędności czasu i zwiększenia efektywności magazynu w wyniku zastosowania zaproponowanej metody.

Dokonując przeglądu literatury krajowej i zagranicznej stwierdzono, że w żadnej pozycji literaturowej opisującej planowanie rozmieszczenia produktów w magazynie nie uwzględniono jednocześnie wpływu wagi i objętości produktów oraz popularności

i występujących powiązań pomiędzy produktami. Jest to szczególnie istotne zagadnienie, które w znacznym stopniu może mieć wpływ na efektywność procesu kompletacji. Wskazane jest zatem opracowanie metody, która będzie uwzględniać wymienione kryteria. Należy zwrócić także uwagę na koszty generowane przez proces kompletacji produktów. Na rysunku 1.1 przedstawiono procentowy udział poszczególnych czynności będących składowymi procesu kompletacji produktów.



Rys. 1.1 Udział procentowy czynności będących składowymi procesu kompletacji produktów

Źródło: opracowano na podstawie [102]

Przemieszczanie się po magazynie zajmuje połowę całkowitego czasu kompletacji zamówienia. Czas ten zależy w dużym stopniu od zastosowanego systemu składowania towarów, jak również od sposobu kompletacji zamówienia, na co zwraca uwagę w swojej publikacji [8] D. Battini, CH. Mowrey zwraca natomiast uwagę na konieczność minimalizacji powierzchni składowania i pracy ludzkiej w celu zwiększenia efektywności magazynów [74]. Niemniej jednak istotne jest to, aby podjąć działania zmniejszające czas trwania przemieszczania się środków transportu po magazynie z uwagi na znaczący jego udział w łącznym czasie kompletacji zamówień.

Wyszukiwanie produktów polega na przypisaniu miejsca składowania produktu do danej pozycji na liście kompletacji oraz wyznaczeniu kolejności kompletacji produktów. Czynności te mogą być w pełni zautomatyzowane przez co w dużym stopniu możliwe jest zmniejszenie czasu ich trwania.

Pobranie produktu jest procesem składającym się z odczytu kodu kreskowego produktu i regału oraz pobrania produktu i umieszczenie go na wózku kompletacyjnym. Czynności te są trudne do usprawnienia i skrócenia czasu ich trwania.

W skład czynności przygotowania zamówienia do kompletacji wchodzi odczytanie zamówienia z systemu, przydzielenie do niego pracownika wraz z nośnikiem kompletacyjnym oraz połączenie kilku zamówień w jedną listę kompletacyjną jeśli jest taka możliwość. Wymienione działania mogą być w znacznym stopniu przyspieszone w przypadku wykorzystania systemu WMS.

Do innych czynności można natomiast zaliczyć przeładowywanie produktów na nośniku kompletacyjnym jeśli zachodzi taka potrzeba, zmianę trasy kompletacji, oczekiwanie

na inne środki transportu jeśli utrudniają one przejazd (poprzez blokowanie korytarza), nieoczekiwane przestoje spowodowane nieprzewidzianymi sytuacjami, itd.

Podsumowując, czynności takie jak przygotowanie zamówienia do kompletacji, wyszukiwanie produktu oraz inne czynności będące związane z procesem kompletacji mogą być usprawnione poprzez zastosowanie systemów wspomaganie WMS. Natomiast przemieszczanie się środków transportu po magazynie może być usprawnione poprzez zastosowanie efektywniejszego systemu składowania, wydajniejszych środków transportowych oraz poprzez optymalizację rozmieszczenia produktów. Optymalizacja rozmieszczenia produktów pozwala w naturalny sposób i bez dodatkowych kosztów skrócić drogę pomiędzy najważniejszymi produktami, co w rezultacie pozwala zmniejszyć całkowity czas kompletacji produktów.

Dokonując analizy literatury oraz po przeprowadzeniu konsultacji ze specjalistami w dziedzinie magazynowania, stwierdzono że:

- proces planowania rozmieszczenia produktów powinien uwzględniać wielkość sprzedaży, odległość produktów od strefy pakowania, układ magazynu, wagę i opakowanie produktów, a także ich naturalne właściwości mogące wykluczać składowanie różnych rodzajów produktów obok siebie (z uwagi na bezpieczeństwo),
- aby określić optymalne miejsce składowania produktu w magazynie niezbędne jest uwzględnienie wielu danych wejściowych obejmujących między innymi powiązania pomiędzy produktami,
- wykorzystanie podstawowych analiz takich jak ABC i XYZ nie pozwala w wystarczający sposób na właściwe zaprojektowanie rozmieszczenia produktów w magazynie.

W związku z powyższym stwierdzono, że niezbędne jest opracowanie autorskiej metody, która pozwoliłaby na uwzględnienie wymienionych przesłanek w taki sposób, aby możliwe było opracowanie zaleceń co do optymalnego rozmieszczenia produktów w magazynie.

1.4. Tezy pracy

Zdefiniowane, w punkcie 0, cele rozprawy determinują tezy, które w wyniku przeprowadzonych analiz powinny być udowodnione. Ponieważ rozprawa ma na celu opracowanie metody umożliwiającej ocenę wpływu zastosowania dostępnych metod planowania rozmieszczenia produktów w magazynie na czas procesu kompletacji, to tezy rozprawy można zdefiniować następująco:

Teza główna:

- **TG:** Możliwe jest wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do klasyfikacji produktów w celu rozlokowania ich w magazynie, co poprawi – w stosunku do stosowanych obecnie metod – efektywność procesu kompletacji zamówień.

Teza szczegółowa naukowa:

- **TN1:** Dla magazynów małych i magazynów średniej wielkości wybór metody oraz kryterium klasyfikacji produktów nie ma znaczącego wpływu na czas kompletacji produktów.

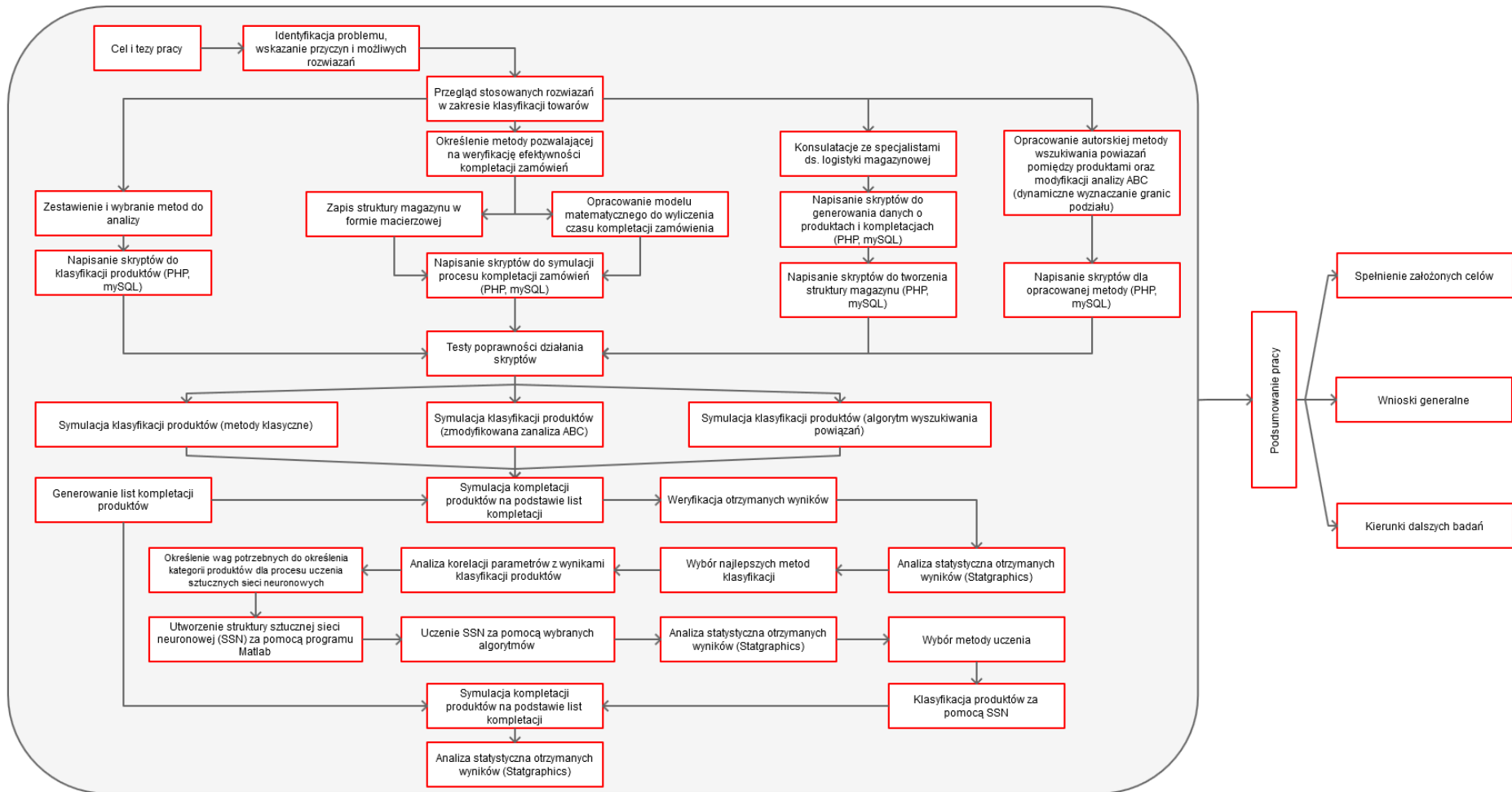
Teza szczegółowa techniczna:

- **TT1:** Rozmieszczenie produktów w magazynie, o złożonej strukturze funkcjonalnej, z uwzględnieniem objętości tych produktów i ich wagi pozwala usprawnić kompletację wielu zamówień jednocześnie.
- **TT2:** Określenie relacji zachodzących pomiędzy produktami na listach kompletacyjnych i rozmieszczenie produktów według tych list pozwala zmniejszyć czas trwania kompletacji towarów bardziej niż w przypadku stosowania kryteriów popularności produktów, liczby sprzedanych sztuk i Indexu COI.

Udowodnienie zdefiniowanych tez będzie możliwe dzięki opracowanej w rozprawie metodzie oraz jej implementacji komputerowej. Metoda i jej implementacja komputerowa umożliwią przeprowadzenie wielowariantowych analiz na danych rzeczywistych magazynu.

Opracowany system SPKZ będzie pozwalał na klasyfikację produktów według popularnych metod takich jak: analiza ABC, analiza XYZ, Index COI, metody wolnych miejsc składowania oraz autorskich metod, tj. zmodyfikowanej wersji analizy ABC, algorytmu wyszukiwania powiązań oraz sztucznych sieci neuronowych. Dzięki możliwości wyboru spośród kilku kryteriów możliwe będzie dokonanie klasyfikacji i oceny efektywności analizowanych metod pod innym aspektem. System będzie umożliwiał zmianę struktury magazynu, co pozwoli na dalszy rozwój badań. Oprócz wykonania klasyfikacji produktów program umożliwi symulację procesu kompletacji zamówień, co będzie podstawą do wykonania analiz statystycznych otrzymanych wyników badań.

Na rysunku 1.2 przedstawiono układ pracy w formie schematu blokowego obejmującego całościową strukturę dysertacji.



Rys. 1.2 Schemat przyjętej w pracy metodyki badawczej

Źródło: opracowanie własne

2. SKŁADOWANIE, KLASYFIKACJA I ROZMIESZCZANIE PRODUKTÓW W MAGAZYNIE

2.1. Metody składowania produktów

Rozwój nowoczesnych systemów magazynowych skupia się na trzech płaszczyznach: układu i rozwoju wyposażenia magazynów, systemów informatycznych wspomagających ich pracę oraz organizacji i zarządzania.

Na płaszczyźnie układu i wyposażenia magazynów dochodzi do ulepszania istniejących rozwiązań konstrukcyjnych oraz wprowadzania nowych. Duże znaczenie mają zarówno regały wykorzystywane do składowania towarów jak również sposób ich ułożenia, co zostało przedmiotem wielu prac badawczych [125], [86], [14], [19]. Ponadto równie ważny jest dobór wszelkiego rodzaju środków transportu przeznaczonych do kompletacji i przewozu produktów. Dobór regałów wpływa na wykorzystanie przestrzeni magazynowej i dostępność do poszczególnych miejsc składowania. Dobór wózków natomiast na możliwości transportowe, szerokość korytarzy transportowych oraz czas kompletacji.

Na płaszczyźnie rozwoju systemów informatycznych dochodzi do zmian zarówno w oprogramowaniu jak i w technologii elektronicznej wymiany danych stanowiącej integralną część każdego systemu informatycznego [56]. Nowoczesne systemy informacyjne mają także możliwość współpracy z urządzeniami automatycznej identyfikacji, które w logistyce magazynowej są jednym z najważniejszych elementów funkcjonowania systemu.

Na płaszczyźnie zarządzania natomiast dąży się do wprowadzania nowych koncepcji usprawniających organizację magazynu, zachodzących w nim procesów oraz pozwalających na stałą kontrolę nad całością systemu magazynowego. W tym obszarze duże znaczenie ma wyznaczenie odpowiednich wskaźników pozwalających scharakteryzować efektywność i funkcjonowanie magazynu [18].

Obecny poziom rozwoju systemów magazynowych można zdefiniować jako wchodzenie w erę inteligentnych magazynów. Pod tym pojęciem rozumie się wykorzystanie sztucznej inteligencji dotyczącej [31]:

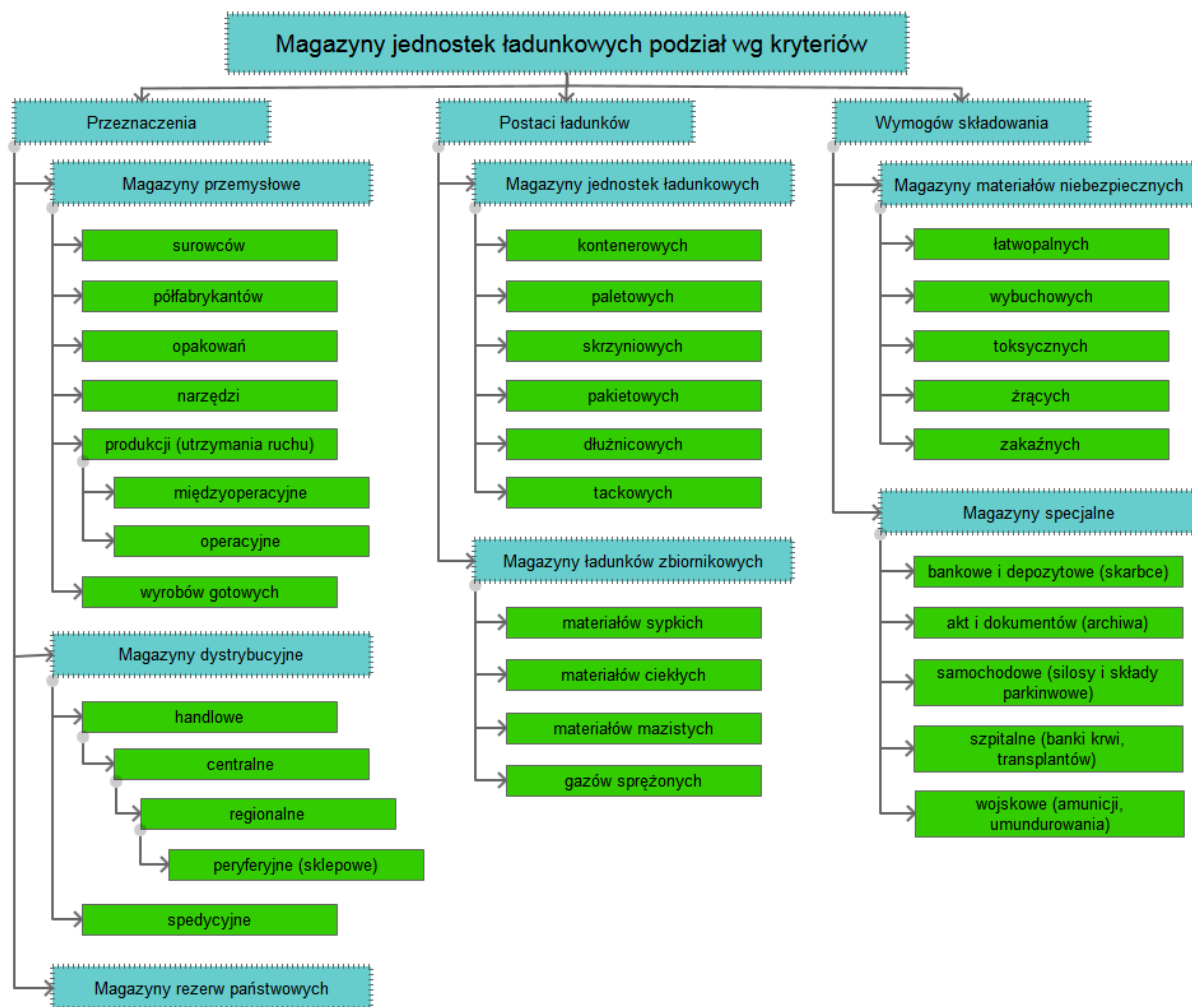
- badań reguł rządzących zachowaniem człowieka,
- tworzenia modeli reprezentujących te zachowania,
- budowy urządzeń i układów fizycznych odwzorowujących takie zachowania.

Nowoczesny magazyn musi posiadać możliwość tak zwanego „inteligentnego odczuwania” wszystkich stanów wewnętrznych. Jest to możliwe za pomocą zainstalowania odpowiednich czujników wchodzących w skład podsystemów sensorycznych w układach [56]:

- zautomatyzowanego i zrobotyzowanego sterowania operacyjnymi funkcjami przepływu i składowania materiałów,
- zautomatyzowanej komunikacji interpersonalnej i kontroli ruchu oraz bezpieczeństwa (m.in. kontroli dostępu, obserwacji kamerowej, kontroli czasu pracy),
- zautomatyzowanego monitoringu nadzorująco-kontrolnego instalacji strukturalnych, takich jak:
 - dozoru antywłamaniowego i nagłośnienia alarmowego,
 - zabezpieczenia przeciwpożarowego,
 - wentylacji, klimatyzacji, ogrzewania,
 - zasilania elektrycznego oraz sterowania oświetleniem.

Oprócz pojęcia inteligentnego magazynu istnieje także pojęcie elastycznego systemu dystrybucji (ESD). Jest to taki system w którym środki automatyzacji przygotowania ładunków charakteryzują się możliwością komponowania zbiorczych jednostek ładunkowych i zdolnością elastycznego dostosowania się do zmiennych wymagań harmonogramów ekspedycji [56].

W zależności od rodzaju przechowywanych towarów, wymogów składowania i przeznaczenia magazynów można dokonać ich podziału i klasyfikacji (Rys. 2.1).



Rys. 2.1 Klasyfikacja magazynów ze względu składowane produkty

Źródło: opracowano na podstawie [55]

Inna klasyfikacja magazynów oparta jest m.in. o kryteria wysokości składowania, rodzaju procesu magazynowego oraz ochrony produktów przed czynnikami atmosferycznymi. W oparciu o te kryteria w literaturze przedmiotu [29], [56], [58] wyróżnia się m.in. magazyny otwarte (np. place składowe), magazyny zamknięte (np. magazyny wysokiego składowania, magazyny niskiego składowania). Oprócz wymienionych magazynów (Rys. 2.1) na szczególną uwagę zasługują magazyny wysokiego składowania oraz magazyny typu cross docking.

Coraz częściej magazyny wysokiego składowania budowane są o proporcji długość/szerokość = 0,5. Takie rozwiązanie jest podyktowane ograniczoną możliwością wykorzystania powierzchni – co związane jest z dużym kosztem terenów pod zabudowę oraz ograniczeniami wynikającymi z istniejącej zabudowy sąsiednich działek. Przyjmuje się, że

optymalną ze względu na koszty inwestycji wysokością magazynu są 33 metry [56]. W magazynach wysokiego składowania należy dążyć do maksymalnej automatyzacji procesów w celu usprawnienia przepływu ładunków oraz minimalizacji powierzchni potrzebnej do składowania towarów.

Działanie cross-dockingu polega na tym, że produkty od różnych dostawców przychodzące do magazynu jako dostawy całopojazdowe nie są składowane w celu późniejszej kompletacji, ale od razu są przemieszczane przez magazyn, kompletowane i załadowywane do ciężarówek dostarczających ładunki do poszczególnych klientów [20]. Istotą cross-dockingu jest odpowiednie ustalenie kolejności towarów, które będą załadowywane na pojazd [41]. W magazynach typu cross docking towary są składowane przez bardzo krótki okres czasu. Często też jeśli cały magazyn nie pełni roli magazynu cross dockingowego to wydzielona zostaje w nim strefa przeznaczona na składowanie części produktów w formie cross-dockingu. W tego typu rozwiązaniach wykorzystywane są tylko te produkty, które charakteryzują się dużą rotacją. Powierzchnia przeznaczona na tego typu składowanie zazwyczaj nie jest duża, tak samo jak czas od chwili przyjęcia towaru do chwili jego wydania. Celem cross-dockingu jest takie zaplanowanie procesu, aby dążyć do sytuacji, w której ładunek nie jest w ogóle składowany, a od razu przeładowywany na kolejny środek transportu.

Z cross-dockiem bardzo często są łączone dostawy Just-in-Time (JiT), czyli tak zwane dostawy na czas. Tego typu strategia zarządzania dąży do takiego planowania dostaw towarów, aby były one dostarczane na daną godzinę. Takie rozwiązanie pozwala zmniejszyć ilość zapasów i zamawiać praktycznie tylko to co będzie potrzebne. JiT z kolei łączy się z metodami obliczania wielkości zamówień opisywanych w wielu publikacjach [11], [70], [127]. Odpowiednie dobranie wielkości zamówień, organizacja transportu wraz z uwzględnieniem okien czasowych pozwala na [108]:

- zmniejszenie ilości składowanych towarów,
- redukcję miejsca magazynowania,
- zmniejszenie zagrożenia przeterminowania produktów,
- zwiększenie efektywności magazynu,
- zmniejszenie kosztów.

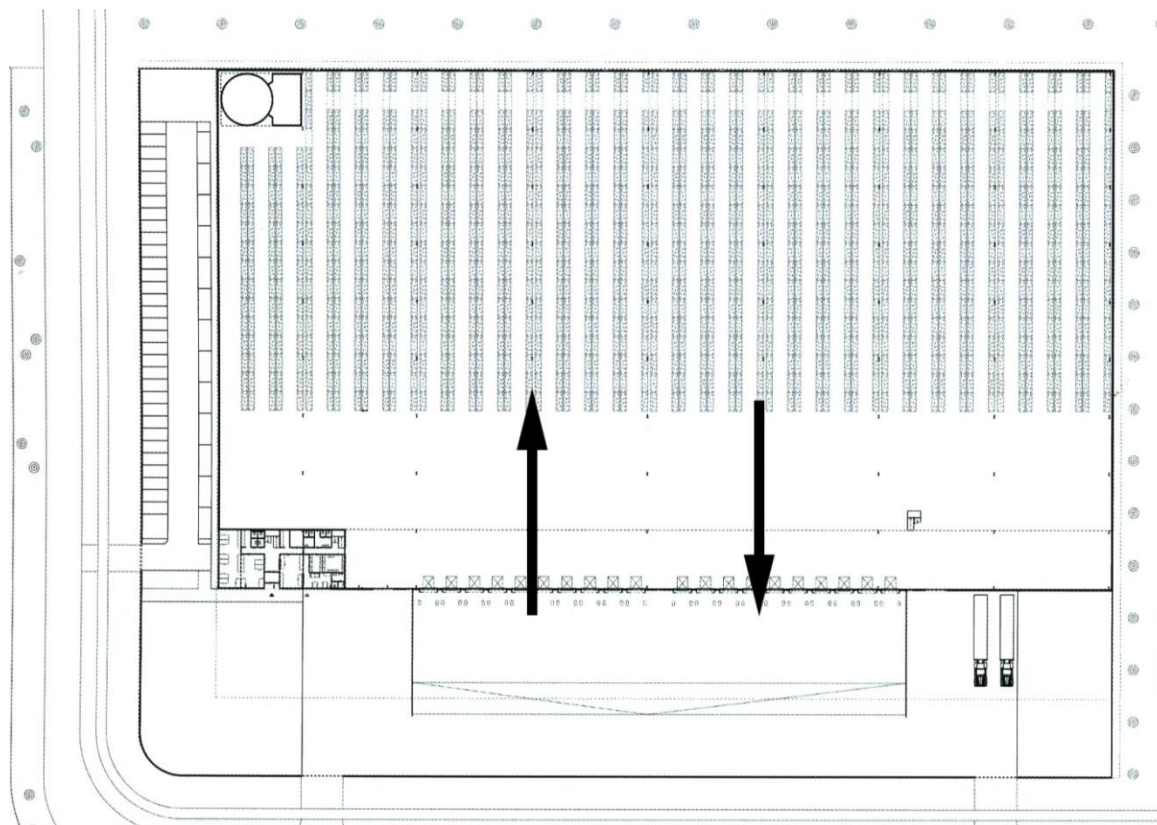
Zarówno cross-docking jak i Just-in-Time powinny być stosowane w magazynie w celu zwiększenia jego efektywności. Ich zastosowanie powinno być również uwzględnione przy rozmieszczaniu produktów. W związku z tym konieczne jest przeprowadzenie analizy rotacji produktów wraz z uwzględnieniem ich sezonowości. Dostawy Just-in-Time powinny być realizowane na dystansach nie większych niż 10-15km [56].

2.1.1. Układ magazynów

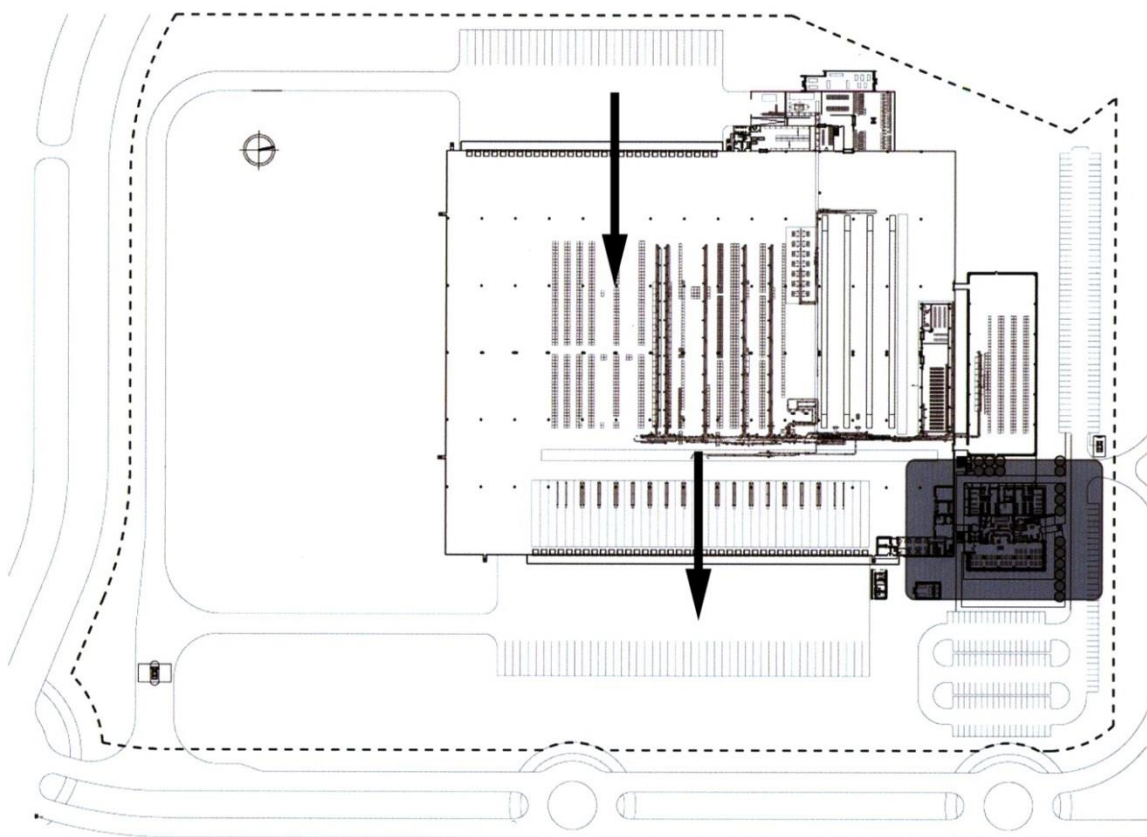
Magazyny niezależnie od ich rodzajów mogą być podzielone na trzy typy z uwagi na układ doków załadunkowych [21]:

- Magazyny o układzie workowym (Rys. 2.2),
- Magazyny o układzie przelotowym – prostym (Rys. 2.3, Rys. 2.4),
- Magazyny o układzie kątowym (Rys. 2.5, Rys. 2.6).

Układ magazynu jest zależny od możliwości inwestycyjnych (warunków zabudowy terenu), przyjętego systemu obsługi magazynu i systemu składowania. Badania w zakresie wpływu układu rozmieszczenia regałów w magazynie przeprowadził m.in. N. Boysen [10]. Wady i zalety poszczególnych układów magazynów przedstawiono w tabeli 2.1.



Rys. 2.2 Magazyn o układzie workowym
Źródło: opracowano na podstawie [75]

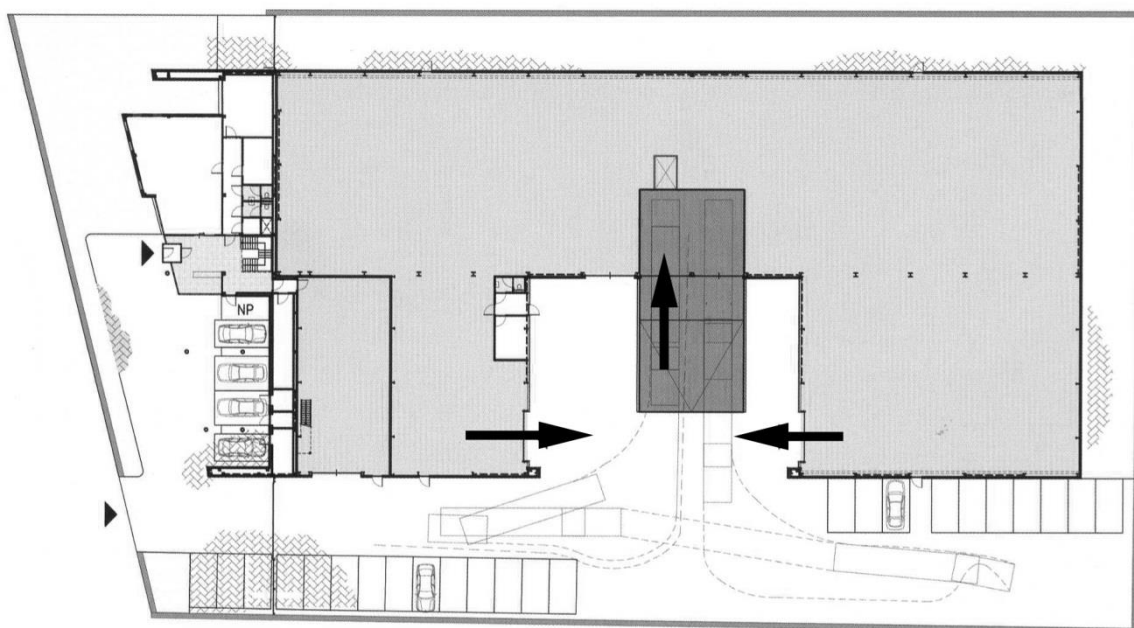


Rys. 2.3 Magazyn o układzie przelotowym
Źródło: opracowano na podstawie [75]

Praca doktorska | Politechnika Krakowska | 2016



Rys. 2.4 Magazyn o układzie przelotowym – doki centrum dystrybucyjnego w Almere (Holandia)
Źródło: [75]



Rys. 2.5 Magazyn o układzie kątowym (podwójnym)
Źródło: opracowano na podstawie [75]



Rys. 2.6 Magazyn o układzie kątowym – doki, na przykładzie firmy Van De Scheur (Holandia)

Źródło: [75]

Tabela 2.1 Zalety i wady poszczególnych układów magazynów

	Zalety	Wady
Układ workowy	<ul style="list-style-type: none"> - duża efektywność wykorzystania stanowisk przeładunkowych, sprzętu do załadunku i wyładunku (głównie wózki magazynowe) oraz zasobów ludzkich, - lepsze wykorzystanie działki inwestycyjnej (wspólny dla przyjęć i wydań plac przymagazynowy), - pełna możliwość wykorzystania wyników analizy Pareto³ i skrócenie tras transportowych. 	<ul style="list-style-type: none"> - bezpośrednie sąsiedztwo towarów wchodzących i wychodzących (możliwość pomyłek), - koncentracja ruchu środków transportu wewnętrznego i zewnętrznego w jednym miejscu (zwiększenie ryzyka kolizji).
Układ przelotowy - prosty	<ul style="list-style-type: none"> - rozdzielenie od siebie towarów wchodzących i wychodzących, - uporządkowany kierunek przepływu towarów, - poprawa bezpieczeństwa poprzez dekoncentrację ruchu środków transportu wewnętrznego i zewnętrznego. 	<ul style="list-style-type: none"> - niska efektywność wykorzystania: stanowisk przeładunkowych, sprzętu mechanicznego oraz zasobów ludzkich, - wymagana większa działka inwestycyjna z dodatkowym placem przymagazynowym, - ograniczona możliwość skrócenia tras transportowych.
Układ kątowy	<ul style="list-style-type: none"> - rozdzielenie od siebie towarów wchodzących i wychodzących, - uporządkowany kierunek przepływu towarów, - poprawa bezpieczeństwa poprzez dekoncentrację ruchu środków transportu wewnętrznego i zewnętrznego. 	<ul style="list-style-type: none"> - niska efektywność wykorzystania: stanowisk przeładunkowych, sprzętu mechanicznego oraz zasobów ludzkich, - wymagana większa działka inwestycyjna z dodatkowym placem przymagazynowym, - ograniczona możliwość skrócenia tras transportowych.

Źródło: opracowanie własne

W magazynach wyróżnia się cztery podstawowe strefy funkcjonalne: przyjęć, składowania, kompletacji i wydań towarów [79]. Przykład rozmieszczenia stref w magazynie przedstawiono na rysunku 2.7.

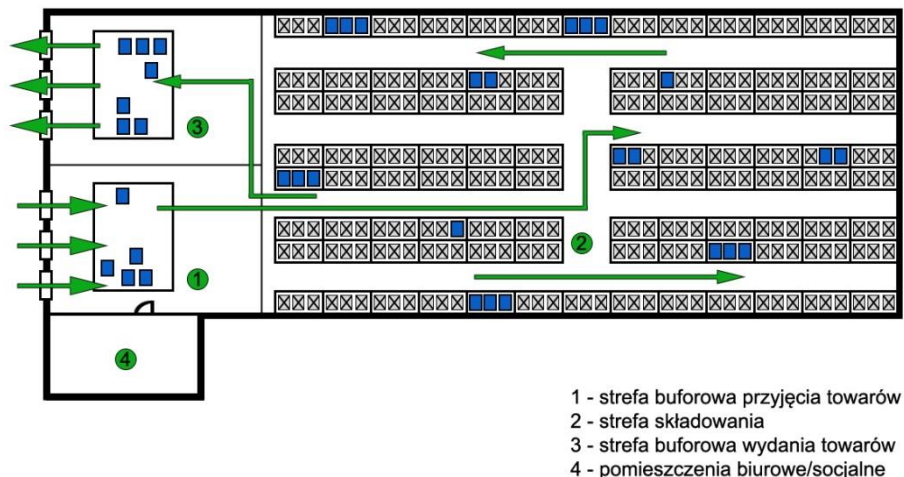
Strefa przyjęć będąca strefą buforową to strefa w której dochodzi do wykonania czynności operacyjno-technologicznych związanych z przyjęciem towaru do magazynu.

Strefa składowania jest to wydzielona przestrzeń w której przechowywane są towary. W strefie składowania odbywa się pobieranie produktów, a nawet kompletacja całych zamówień. Wielkość strefy składowania zależy od liczby poziomów składowania oraz przyjętej technologii składowania towarów.

³ Analiza Pareto mówi o tym, że 80% wyników wpływa tylko z 20% przyczyn

Strefa kompletacji to przestrzeń magazynu w której odbywa się wyłącznie kompletacja towarów. W wielu magazynach z uwagi na to, że kompletacja produktów odbywa się w strefie składowania ta strefa nie występuje.

Strefa wydań jest wydzieloną strefą przeznaczoną do wykonywania czynności organizacyjno-technicznych związanych z wydaniem i ekspedycją ładunków.



Rys. 2.7 Przykładowe rozmieszczenie stref w magazynie o układzie workowym

Źródło: opracowanie własne

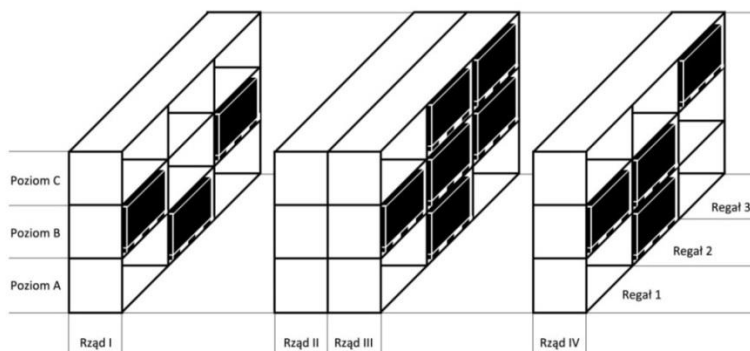
Strefa przyjęć oraz strefa wydań wyposażone są we fronty przeładunkowe. Czynności przeładunkowe są wykonywane z poziomu rampy lub na placu manewrowym przy pomocy urządzeń transportowych. Efektywność frontów przeładunkowych zależy od zastosowanych na nim urządzeń roboczych, do których można zaliczyć: mostki ładunkowe, platformy przeładunkowe, rampy przejezdne, bramy magazynowe, kurtyny uszczelniające oraz urządzenia ułatwiające pozycjonowanie pojazdów przy frontach przeładunkowych [28]. Na rysunku 2.7 za pomocą zielonych strzałek przedstawiono przykładowy obieg ładunków w magazynie.

2.1.2. Składowanie rzędowe a składowanie blokowe

Jedną z powszechnie stosowanych technologii składowania jest składowanie rzędowe. Składowanie tego typu polega na rozmieszczeniu produktów – najczęściej z wykorzystaniem jednostek ładunkowych – w rzędach, tak aby zapewnić swobodny dostęp do każdej lokalizacji. Składowanie rzędowe może być zastosowane zarówno przy wykorzystaniu wielopoziomowych regałów jak i bez nich, tj. przy składowaniu jednostek ładunkowych w stosach na jednym poziomie lub przy ich piętrzeniu [80].

W przypadku małych magazynów o 3-4 poziomach składowania, najczęściej produkty tego samego typu znajdują się na kilku poziomach w tym samym regale. Często też poziomy powyżej drugiego są wykorzystane jako zapas towarów służący do uzupełniania poziomu pierwszego (Rys. 2.8 – poziom B) i zerowego (Rys. 2.8 – poziom A). Umożliwia to kompletację lekkich produktów bez konieczności wykorzystywania wózków widłowych do pobrania produktów z wyższych poziomów.

Składowanie rzędowe jest najczęściej spotykaną metodą w większości standardowych magazynów. Główną cechą przemawiającą za tym sposobem składowania jest niski koszt inwestycji i brak konieczności stosowania systemów wspomagających pracę magazynu (WMS) przy zachowaniu przejrzystości i swobody dostępu do towarów.



Rys. 2.8 Składowanie rzędowe, trzypoziomowe

Źródło: opracowanie własne

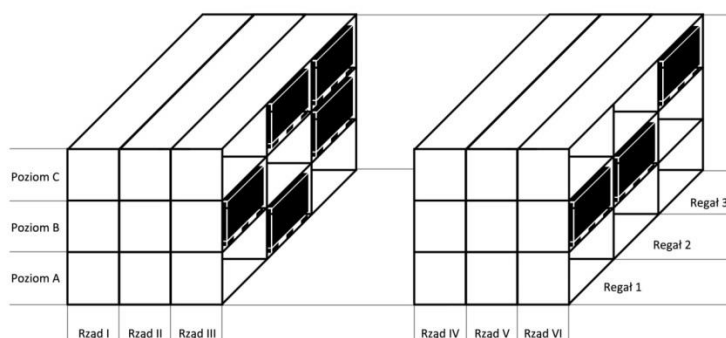
Zalety i wady składowania rzędowego przedstawiono w tabeli 2.2.

Tabela 2.2 Zalety i wady składowania rzędowego

Zalety	Wady
Swobodny dostęp do towarów i łatwa organizacja pracy	Niski wskaźnik wykorzystania przestrzeni magazynowej
Przejrzystość rozmieszczenia jednostek ładunkowych	Konieczność wykorzystania urządzeń magazynowych w przypadku składowania w poziomach
Niski koszt inwestycji	Wymagana duża liczba dróg transportowych

Źródło: opracowanie własne

Natomiast składowanie blokowe jest sposobem magazynowania towarów bezpośrednio na podłodze magazynu jeden obok drugiego z zachowaniem luzów manipulacyjnych lub w regałach umieszczonych jeden przy drugim bez stałego dostępu do wszystkich z nich. Aby uzyskać dostęp do produktów znajdujących się „w głąb” należy najpierw pobrać produkty będące przy drodze transportowej. Taki sposób składowania znacznie poprawia wykorzystanie powierzchni, jednak dla produktów o określonej przydatności do użycia konieczne jest zapewnienie kontroli nad stanem produktów. Utrudnione jest także zastosowanie zasady FIFO⁴. Składowanie blokowe stosuje się tam gdzie występuje mały wolumen produktów w asortymencie, a wymagane jest składowanie ich w dużej ilości [24]. Sposób składowania blokowego przedstawiono na rysunku 2.9.



Rys. 2.9 Składowanie blokowe, trzypoziomowe

Źródło: opracowanie własne

Porównanie sposobu składowania blokowego i rzędowego oraz wskazówki dotyczące wyboru jednego z nich przedstawiono w tabeli 2.3.

⁴ Zasadę FIFO przedstawiono w podrozdziale 3.2.

Tabela 2.3 Wskazówki dotyczące doboru technologii składowania w magazynie

Cecha	Sposób składowania					
	Składowanie blokowe w stosach	Składowanie rzędowe w regałach półkowych	Składowanie rzędowe w regałach ramowych	Składowanie w regałach przejezdnych	Składowanie w regałach przepływowych	Składowanie w regałach zablokowanych
Sposób obsługi	Wózek podnośnikowy czołowy	Wózek unoszący ręczny	Wózek podnośnikowy	Wózek podnośnikowy	Wózek podnośnikowy	Wózek podnośnikowy czołowy
Wykorzystanie powierzchni	50-80%	25-48%	30-60%	40-78%	35-70%	50-70%
Czas obsługi	Średni	średni	krótki	długi	krótki	długi
Zalety	- dobre wykorzystanie powierzchni - niskie nakłady inwestycyjne	- dobra organizacja pracy - bezpośredni dostęp do każdej jednostki	- dobra organizacja pracy - bezpośredni dostęp do każdej jednostki	- dogra organizacja pracy -bardzo dobre wykorzystanie powierzchni i przestrzeni	- dobra organizacja pracy - dobre wykorzystanie powierzchni i przestrzeni - wymuszone stosowanie zasady FIFO	- dobre wykorzystanie powierzchni i przestrzeni
Wady	- wymagana duża liczba jłp w jednym asortymencie - wymagana podatność jłp na piętrzenie -utrudnione zastosowanie zasady FIFO	- duża liczba dróg manipulacyjnych - złe wykorzystanie powierzchni i przestrzeni - ograniczenie masy	- duża liczba dróg manipulacyjnych	- wysokie koszty uzbrajania magazynu - długi czas dostępu	- wysokie koszty uzbrojenia magazynu	- wysokie koszty uzbrojenia magazynu - składowanie jednostek na paletach o wysokiej jakości
Ogólne wytyczne stosowania	- duża liczba jłp w jednym asortymencie - zwarta i sztywna konstrukcja jednostki ładunkowej - nie wymagana zasada FIFO	- opakowania jednostkowe - duża liczba asortymentów o małej ilości - konieczny dostęp do każdej jednostki ładunkowej - mała wielkość pobrań	- duża liczba asortymentów o małej ilości - konieczny dostęp do każdej jednostki ładunkowej - jednostki ładunkowe, których nie można piętrzyć	- duża liczba asortymentów - konieczny dostęp do każdej jednostki ładunkowej Jednostki ładunkowe, których nie można piętrzyć - wysoki koszt utrzymania warunków przechowywania	- duża liczba jłp w jednym asortymencie - jednostki ładunkowe, których nie można piętrzyć - wymuszenie stosowania zasady FIFO	- duża liczba jłp w jednym asortymencie - jednostki ładunkowe, których nie można piętrzyć

Źródło:[68]

2.1.3. Metoda stałych i wolnych miejsc składowania

W metodzie stałych miejsc składowania (ang. *static storage*) towary znajdujące się w magazynie mają dokładnie określone miejsce w którym powinny się znajdować, tj. przydzielone regały przeznaczone tylko do składowania produktów określonego rodzaju. Zaletą tej metody jest przejrzystość magazynu i łatwość odnalezienia towarów. Natomiast głównymi wadami: konieczność posiadania dużej powierzchni składowania oraz wydłużona droga kompletacji towarów. Liczba regałów przeznaczona dla jednego rodzaju produktu odpowiada jego maksymalnemu zapotrzebowaniu. W praktyce rzadko zdarza się tak, aby w tym samym czasie dla wszystkich produktów jednocześnie wolumen przechowywanych towarów odpowiadał ich maksymalnemu zapotrzebowaniu [71]. W związku z tym duża powierzchnia magazynu najczęściej pozostaje pusta.

W metodzie stałych miejsc składowania można wyróżnić dwa przypadki składowania:

- składowania dedykowanego (ang. *dedicated storage*) – regał przeznaczony na stałe składowanie tylko jednego typu produktu [25],
- składowania dla grup produktów (składowania w oparciu o klasy) (ang. *class-based storage*) – regał przeznaczony na stałe składowanie dowolnych produktów, znajdujących się w jednej grupie [25].

Systemy stałych miejsc składowania oraz składowania w oparciu o klasy są do siebie podobne, z tą różnicą, że pierwszy z nich nie jest zdefiniowany przez metody klasyfikacji czyli produkty nie są porządkowane względem siebie nawzajem. Metoda składowania produktów w oparciu o klasy jest skuteczniejsza od metody stałych miejsc składowania ponieważ pozwala zaoszczędzić ilość wymaganego miejsca oraz odległości pomiędzy produktami. Metody klasyfikacji produktów pozwalają uzyskać informację o tym jak bardzo dany produkt jest istotny w odniesieniu do pozostałych pod kątem określonego kryterium decyzyjnego. Celem bezpośrednim klasycznych metod jest określenie klasy nie zaś minimalizacja czasu lub drogi kompletacji produktów – co stanowi cel pośredni, który nie zawsze jest osiągnięty. Nowoczesne metody wykorzystywane do klasyfikacji produktów mają natomiast na celu osiągnięcie zmniejszenia drogi i czasu kompletacji produktów przez co są znacznie bardziej skuteczne.

W metodzie wolnych miejsc składowania natomiast wyróżnia się, przypadki:

- dowolnych miejsc składowania (ang. *random storage, RS*) [33],
- najbliższego wolnego miejsca składowania (ang. *closest open location storage, COLS*) [33].

W metodzie wolnych miejsc składowania nie ma potrzeby rezerwacji przestrzeni dla danego typu produktu. Towary na bieżąco są umieszczane w dowolnym aktualnie dostępnym regale, które jest najczęściej najbliższą lokalizacją. Wielkość przestrzeni składowania w takim przypadku jest dobierana na poziomie średnich stanów zapasów z uwzględnieniem dodatkowej powierzchni zapewniającej możliwość składowania większej ilości towarów w przypadku wzrostu popytu. Metoda ta znacznie lepiej pozwala wykorzystać dostępną przestrzeń magazynową. W związku z tym, że produkty są rozmieszczone w różnych miejscach w magazynie, a ich lokalizacja może być inna każdego dnia to wymagane jest zastosowanie systemu informatycznego wspomagającego pracę magazynu (ang. *Warehouse Management System, WMS*), który pozwoliłby określić aktualne miejsce składowania produktu.

2.1.4. Wybrane wskaźniki oceny stopnia wykorzystania magazynu

W procesie planowania systemu organizacyjnego i optymalizacji magazynu wykorzystywanych jest wiele wskaźników. Wśród nich należy wymienić wskaźniki powierzchniowe i kubaturowe (przestrzenne), przy czym mogą dotyczyć wykorzystania całej powierzchni czy przestrzeni magazynu w odniesieniu do zapasu magazynowego lub udziału powierzchni/przestrzeni strefy składowania w całkowitej powierzchni/przestrzeni magazynu. Do podstawowych wskaźników zalicza się: wskaźnik wykorzystania przestrzeni i powierzchni magazynowej. Wskaźniki te zależą od sposobu składowania towarów. Im wartość współczynnika jest bardziej zbliżona do 100% tym efektywniejsze jest wykorzystanie powierzchni w magazynie. Zgodnie z publikacją [48] współczynnik określający wykorzystanie przestrzeni magazynowej wyraża się wzorem (1).

$$W_p = \frac{F_{skł}}{F_c} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

W_p – współczynnik określający wykorzystanie przestrzeni magazynowej,

$F_{skł}$ – powierzchnia składowania, m²,

F_c – powierzchnia całkowita magazynu, m².

Wartość współczynnika W_p może kształtować się w przedziale [48]:

- 0,25 – 0,35 dla składowania towarów w podwójnych rzędach,
- 0,58 – 0,65 dla składowania palet w systemie blokowym,
- do 0,77 dla składowania ręcznego w stosach w magazynie bez słupów wewnętrznych.

Wielkość wartości współczynnika W_p jest ściśle związana ilością, szerokością i rozmieszczeniem korytarzy transportowych i przejść pomiędzy regałami, stąd też może przyjmować wartości w szerokim zakresie.

Współczynnik wykorzystania przestrzeni magazynu obliczany jest ze wzoru (2).

$$W_v = \frac{V_s}{V_c} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

W_v – współczynnik wykorzystania przestrzeni magazynu,

V_s – objętość przestrzeni składowania w magazynie, m³,

V_c – objętość całkowita magazynu m³.

Wartość współczynnika wykorzystania przestrzeni magazynu W_v może kształtować się w przedziale [48]:

- 0,21 – 0,29 dla składowania jednostek ładunkowych w podwójnych rzędach,
- 0,5 – 0,56 dla składowania ładunków na paletach w systemie blokowym.

Należy także zwrócić uwagę na fakt, że zastosowanie metody wolnych miejsc składowania pozwala na zmniejszenie potrzebnej powierzchni składowania o około 30% w stosunku do metody stałych miejsc składowania [79].

Innymi ważnymi wskaźnikami są wskaźniki kosztowe: kosztów miejsca składowania oraz kosztów magazynowania [58]. Wskaźnik kosztów miejsca składowania obliczany jest ze wzoru (3).

$$W_s = \frac{K_m}{L_m} \quad (3)$$

gdzie:

- W_s – wskaźnik kosztów miejsca składowania, zł/jłp⁵,
- K_m – koszty magazynowania, zł,
- L_m – liczba miejsc składowania, jłp.

Wskaźnik kosztów magazynowania natomiast przypiera postać (4).

$$W_m = \frac{K_m}{Z_m} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie:

- W_m – wskaźnik kosztów magazynowania,
- K_m – koszty magazynowania, zł,
- $\overline{Z_m}$ – wartość średniego zapasu magazynu, zł.

2.2. Metody planowania i rozmieszczenia produktów

Każdy magazyn funkcjonuje inaczej. Jest to spowodowane różnicą w systemie składowania, wyposażeniu, kadrze pracowniczej, wielkości magazynu, rotacji towarów oraz zmienności popytu. Z punktu widzenia optymalizacji magazynu pod względem ponoszonych kosztów i wydajności istotne jest odpowiednie rozmieszczenie produktów, tak aby zapewnić do nich stały i szybki dostęp oraz zmniejszyć ilość składowanych towarów [62].

Rozmieszczenie produktów jest silnie związane z efektywnością funkcjonowania magazynu i jest uzależnione od [79]:

- wymaganych warunków przechowywania,
- typu jednostki ładunkowej,
- technologii składowania,
- parametrów obrotu grup asortymentowych.

W zależności od tego gdzie w magazynie znajduje się dany produkt będzie wyznaczona odpowiednio inna droga, którą należy pokonać w celu pobrania produktu. Jej czas będzie uzależniony od rzeczywistej długości, liczby zakrętów, poziomu składowania na którym znajduje się produkt oraz rodzaju wykorzystanego wózka kompletacyjnego. Najlepszym rozwiązaniem byłoby umieszczenie produktu na samym początku strefy

⁵ jłp – jednostka ładunkowa paletowa

składowania i kompletacji, aby skrócić drogę potrzebną do jego pobrania. Z uwagi na wielkość asortymentu praktycznie nigdy nie ma możliwości, aby każdy produkt był relatywnie blisko strefy pakowania. Konieczne jest zatem dokonanie wyboru który produkt jest ważniejszy i powinien znaleźć się bliżej strefy pakowania. Należy zatem ustalić kryterium, które będzie miało największe znaczenie dla procesu planowania i rozmieszczenia produktów w magazynie, który jest realizowany za pomocą metod klasyfikacji produktów. Klasycznymi jednokryterialnymi metodami klasyfikacji produktów dla stałych miejsc składowania są:

- metoda ABC,
- metoda XYZ,

Natomiast do wielokryterialnych metod lub narzędzi klasyfikacji produktów zaliczyć można [61]:

- indeks COI,
- analizę ABC-FC
- analizę EIQ,
- metodę AHP,
- logikę rozmytą,
- algorytmy genetyczne,
- sieci neuronowe.

W magazynach o dużym zróżnicowaniu asortymentowym czasem nawet do kilku tysięcy produktów, odpowiednie zaplanowanie ich rozmieszczenia jest niezbędne, aby zapewnić efektywność procesu kompletacji zamówień i funkcjonowania magazynu. Klasyfikacji produktów dokonuje się w tym celu, aby uzyskać ich podział na kilka grup odpowiadających znaczeniu danego kryterium [34]. Następnie planując rozmieszczenie towarów w magazynie uwzględnia się także ich rozplanowanie, aby zapewnić najkrótszą drogę ze strefy kompletacji/wydań do produktów o najwyższym priorytecie – grupie z największą wagą. Na efektywność procesu magazynowego składają się trzy elementy: sposób składowania i pomieszczenia produktów, sposób kompletacji produktów i wyznaczania drogi kompletacji oraz zarządzanie zamówieniami. W tym rozdziale zostaną przedstawione metody służące do klasyfikowania produktów i ich rozmieszczenia w magazynie.

Najczęściej przy planowaniu rozmieszczenia produktów w magazynie uwzględnia się [33]:

- popularność produktu (ang. *popularity*) – liczba odwiedzin danego regału,
- obroty (ang. *turnover*) – całkowita liczba produktów przechodzących przez magazyn w określonym przedziale czasowym,
- objętość produktu (ang. *volume*) – oczekiwany popyt danego produktu w określonym przedziale czasu przemnożony przez objętość produktu,
- częstotliwość pobrań (ang. *pick density*) – stosunek popularności produktu do jego objętości,
- współczynnik kubatury na zamówienie (ang. *Cube per Order Index – COI*) – stosunek objętości zajmowanej przez dany produkt w stosunku do jego popularności,
- wagę produktów (ang. *weight*) – oczekiwany popyt danego produktu w określonym przedziale czasu przemnożony przez wagę produktu [66], [60].

Z uwagi na liczbę składowanych produktów w magazynach, liczbę regałów i wynikającą z tego mnogość kombinacji wariantów rozmieszczenia produktów nie jest

możliwe sprawdzenie wszystkich możliwych rozwiązań w celu odnalezienia optymalnego. W związku z czym nie poszukuje się takiego optimum, a jedynie dokonuje się klasyfikacji produktów, przyjmując, że jej wynik pozwala na osiągnięcie rozwiązania suboptymalnego [133]. Jak już wspomniano klasyczne metody pozwalają najpierw uporządkować produkty, a następnie przypisać im określone klasy, które służą do planowania rozmieszczenia produktów.

2.2.1. Index COI

Index COI (ang. *Cube-per-Order Index*) pozwala w najprostszy sposób dokonać klasyfikacji produktów [61]. Analiza dokonywana tą metodą jest analizą dwukryterialną, w której jako kryteria przyjmuje się wielkość produktu i popyt. Jako wielkość produktu może być przyjęta jego objętość lub waga, natomiast jako popyt: liczba pobrań produktu (popularność) lub średnie zapotrzebowanie. Wzór (5) na obliczenie współczynnika COI przybiera następującą postać:

$$w_i = \frac{v_i}{p_i}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

gdzie:

- w_i – współczynnik COI,
- v_i – wielkość produktu: objętość lub waga, m³, kg,
- p_i – popyt: popularność produktu lub średnie zapotrzebowanie na produkt, szt.,
- i – indeks produktu.

Poprzez zastosowanie obliczonego współczynnika COI w celu rozmieszczenia produktów w taki sposób, aby te o najniższym współczynniku znajdowały się jak najbliżej strefy pakowania/wydań skrócona zostaje droga pokonywana przez największe/najcięższe produkty. Uzależnienie wielkości towaru od popytu pozwala znaleźć wartość pośrednią pomiędzy tymi dwoma kryteriami [25].

Dodatkowym plusem dla tej metody jest fakt, że przy kompletacji kilku zamówień jednocześnie, kiedy ma się do czynienia z produktami o dużym zakresie wagowym planując ścieżkę kompletacji od najdalszego punktu względem strefy wydań unika się częstych zmian kolejności produktów na wózku kompletacyjnym. Takie zmiany są konieczne jeśli istnieje ryzyko uszkodzenia produktu lżejszego przez cięższy. Zastosowanie tej metody pośrednio zmniejsza czas potrzebny na przekładanie produktów, a zarazem czas trwania całości kompletacji. Istnieje możliwość wykorzystania klasycznej metody ABC wykonując ją dwukrotnie raz przyjmując jako kryterium wagę produktów, drugi raz zapotrzebowanie na produkt. Następnie konieczne jest ustalenie współczynników wagowych w celu zestawienia obu wyników analiz. Jednak przy dużym asortymencie wykorzystanie współczynnika COI będzie znacznie szybsze niż wykonanie analizy ABC.

Wykorzystanie współczynnika COI jest szczególnie przydatne dla metody wolnych miejsc składowania. Najczęściej w takim wypadku ma charakter informacyjno-decyzyjny i przyczynia się do redukcji czasu kompletacji bez konieczności wykonywania złożonych obliczeń lub analiz. W literaturze można znaleźć informacje o wykorzystaniu współczynników COI do podziału produktów na grupy ABC [13]. Przez co zdarza się też, że jest to błędnie kojarzone z analizą ABC.

2.2.2. Analiza ABC

Analiza ABC jest najczęściej stosowaną analizą pozwalającą dokonać klasyfikacji produktów. Klasyczna analiza ABC pozwala dokonać podziału na trzy grupy o procentowym udziale wynoszącym: A – 80%, B – 15%, C – 5%. Można spotkać odmiany tej analizy wyodrębniające więcej grup w odpowiednio skorygowanym udziale procentowym. Analiza ABC jest analizą jednokryterialną nie ma zatem możliwości wzięcia pod uwagę kilku parametrów wejściowych jednocześnie. Możliwe jest jednak kilkukrotne wykonanie analizy za każdym razem uznając jako kryterium inną cechę, a następnie dokonać syntezy wyników przyjmując stosowne wagi dla każdego kryterium (wyniku analizy) [66]. Wspomniana analiza najczęściej jest wykonywana według kryteriów [56], [79], [25]:

- wartości sprzedaży lub zysku ze sprzedaży,
- częstości pobrań,
- wielkości wydań,
- wagi i objętości.

Istotne jest ujednoczenie cech, tj. zapewnienie, że dla każdego produktu okres z jakiego będą pochodziły dane będzie taki sam oraz że będzie on reprezentatywny – nie może być wycinkiem z krótkiego czasu nieodzwierciedlającego zachodzących w magazynie zmian. Takim przykładem mogłaby być sytuacja wyboru nieodpowiedniego okresu dla produktów o odmiennej sezonowości, np. kremu do opalania i zimowych czapek, a następnie stwierdzenia, że wyniki dokonanej analizy będą mogły mieć zastosowanie dla całego roku.

Analiza ABC jest wykonywana w następujących krokach:

1. Wybór cechy (kryterium) dla jakiego będzie wykonywana analiza, wraz z określeniem okresu z którego będą uwzględniane dane.
2. Opracowaniu listy towarów, które będą poddane klasyfikacji. Można dla nich przyjąć następujące oznaczenia:

P_1, \dots, P_m – nazwy produktów,

w_1, \dots, w_m – wartość kryterium,

$m=1, 2, 3, \dots$ – indeks produktu.

3. Uporządkowaniu listy towarów według wartości kryterium poczynając od największej malejąco.
4. Obliczeniu całkowitej wartości kryterium (6):

$$W = \sum_{i=1}^m w_i \quad (6)$$

gdzie:

W – całkowita wartość kryterium,

w_i – wartość analizowanego kryterium.

5. Obliczeniu udziału w całkowitej wartości kryterium (7) wyrażonej w procentach:

$$r_i = \frac{w_i}{W}; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

6. Obliczeniu skumulowanego wskaźnika udziału – sum częściowych (8) rekurencyjnie:

$$\begin{aligned} q_1 &= w_1, \\ q_k &= q_{k-1} + w_k; \quad k = 2, 3, \dots, m \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie:

q_k – skumulowany wskaźnik udziału k -tego produktu,

w_k – wartość k -tego kryterium,

7. Określeniu wartości granicznych dla grup. Zazwyczaj przyjmuje się wartość udziału skumulowanego: $A = 80\%$, $B = 15\%$.
8. Podziału produktu na grupy: $A \in (0; 80]$; $B \in (80; 95]$; $C \in (95; 100]$.

Analiza ABC jest często porównywana z klasyfikacją Pareto-Lorenza, zgodnie z którą 20% zbioru tworzącej klasę A generuje 80% wartości całego zbioru.

2.2.3. Analiza XYZ

Analiza XYZ jest analizą pozwalającą uzupełnić analizę ABC o dodatkowe kryterium dokonując klasyfikacji wewnątrz już wydzielonych grup. Kryterium jakie jest najczęściej stosowane w analizie XYZ to regularność zużycia określana na podstawie historycznych danych sprzedaży. W odróżnieniu od wspomnianej analizy ABC w której dokonuje się klasyfikacji według popularności produktów lub liczby sprzedanych sztuk, analiza XYZ pozwala na ich niezależną ocenę – w oparciu o indywidualny współczynnik dla każdego produktu. Podstawowe założenia są takie same dla obu wspomnianych analiz tzn. okres wykorzystywany do obliczeń musi być wspólny dla wszystkich produktów oraz musi być zapewniona zgodność okresu i jednostek w jakich są one mierzone.

Analiza XYZ jest wykonywana w następujących krokach:

1. Zestawienie danych z jednakowych okresów, przy czym im większa liczba okresów tym otrzymany wynik będzie pozwalał na osiągnięcie lepszych efektów.
2. Obliczenie średniej liczby sprzedanych sztuk (\bar{w}_t) dla każdego produktu.

$$\bar{w}_t = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}}{n} \quad (9)$$

gdzie:

\bar{w}_t – średnia liczba sprzedanych sztuk produktów,

w_{ij} – liczba sprzedanych sztuk i -tego produktu w okresie j ,

n – liczba okresów uwzględnianych w analizie.

3. Obliczenie odchylenia standardowego (10).

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (w_{ij} - \bar{w}_t)^2}{n-1}} \quad (10)$$

gdzie:

s_i – odchylenie standardowe,

w_{ij} – liczba sprzedanych sztuk i -tego produktu w okresie j ,

\bar{w}_t – średnia liczba sprzedanych sztuk produktów,

n – liczba okresów.

4. Obliczenie współczynnika zmienności (11) dla każdego produktu.

$$V_i = \frac{s_i}{\bar{w}_t} \quad (11)$$

gdzie:

V_i – współczynnik zmienności,

s_i – odchylenie standardowe,

\bar{w}_t – średnia liczba sprzedanych sztuk produktów.

5. Uporządkowanie listy produktów rosnąco według wartości współczynnika zmienności V_i

6. Określenie wartości granicznych dla grup. Zazwyczaj przyjmuje się wartość udziału: $X=0,2V_i$, $Y=0,4V_i$.

7. Podział produktu na grupy: $X \in (0; 0,2]$; $Y \in (0,2; 0,4]$; $Z \in (0,4; 1]$.

W wyniku analizy dokonuje się podziału produktów na grupy XYZ, przy czym przyjmuje się, że [56]:

- Grupa X składa się z produktów, które są wykorzystywane regularnie. Powinien być dla nich opracowany system nadzór zsynchronizowany z zapotrzebowaniem. Nie jest wymagane tworzenie dużych zapasów towarów.
- Grupa Y cechuje się znaczną zmiennością, przez co trudno jest dostrzec niektóre prawidłowości i je wykorzystać, np. sezonowość. Konieczne jest opracowanie odpowiedniego poziomu zapasów magazynowych.
- Grupa Z to produkty o sporadycznym wykorzystaniu. Należy dla nich dokonać wyboru pomiędzy stworzeniem zapasu, który będzie przechowywany przez długi okres czasu albo dostawami na żądanie, które będą wymagały poniesienia większych kosztów.

W praktyce najczęściej analiza XYZ jest wykonywana w połączeniu z analizą ABC.

2.2.4. Analiza ABC-FC

Analiza ABC-FC (ang. *Fuzzy Classification*) jest kombinacją klasycznej analizy ABC oraz zbiorów rozmytych. Opiera się o uzyskane wyniki podziału na grupy w wyniku zastosowania analizy ABC oraz XYZ, a także uwzględnia częstotliwość pobrań produktu – zatem pozwala dokonać analizy pod kątem trzech kryteriów jednocześnie.

W związku z tym, że część danych występuje w postaci lingwistycznej (zbyt ogólnej w postaci określonych grup), a część w liczbowej, należy inaczej postępować w każdym przypadku.

W publikacji [17] podano przykład zastosowania analizy ABC-FC. Dla zmiennych lingwistycznych określających grupę przynależności produktu przyjęto, że $Y=(C_1, C_2, \dots, C_n)$ oznacza grupę według analizy ABC, natomiast X_1 , gdzie $X=(V_1, V_2, \dots, V_m)$ grupę przydzieloną według analizy XYZ. Zamiast oznaczenia literowego przyjęto oznaczenie liczbowe. Tworząc tabelę częstości występowania (Tabela 2.4) należy uzupełnić jej komórki wartościami (f_{mn}) odpowiadającymi ilościom produktów w przynależących do obu kategorii, np. AX, AZ, itd.

Tabela 2.4 Częstość występowania produktów na listach kompletacji

		Y			
		C ₁	C ₂	...	C _n
X ₁	V ₁	f ₁₁	f ₁₂	...	f _{1n}
	V ₂	f ₂₁	f ₂₂	...	f _{2n}

	V _m	f _{m1}	f _{m2}	...	f _{mn}

Źródło: [17]

Kolejnym krokiem jest stworzenie tabeli wartości znormalizowanych w oparciu o tabelę 4.1. W tym kroku należy stworzyć nową tabelę dzieląc wartość komórki f_{mn} przez sumę z wiersza otrzymując nową wartość g_{ij} (12).

$$g_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_{k=1}^n f_{ik}} \quad (12)$$

Przy czym zachowana jest zależność (13).

$$\sum_{k=1}^n g_{ik} = 1 \quad (13)$$

Dla każdego $j, 1 \leq j \leq n$ funkcja przynależności (14) będzie przybierała postać:

$$\mu_Y = c_j(X_1) = \begin{cases} g_{1j} & \text{dla } X_0 = V_1 \\ g_{2j} & \text{dla } X_0 = V_2 \\ \dots & \dots \\ g_{mj} & \text{dla } X_0 = V_m \end{cases} \quad (14)$$

Na podstawie funkcji przynależności ustalono współczynnik przynależności produktu do danej grupy. $\mu_{Y=0}(X_1), \mu_{Y=2}(X_1), \mu_{Y=3}(X_1)$.

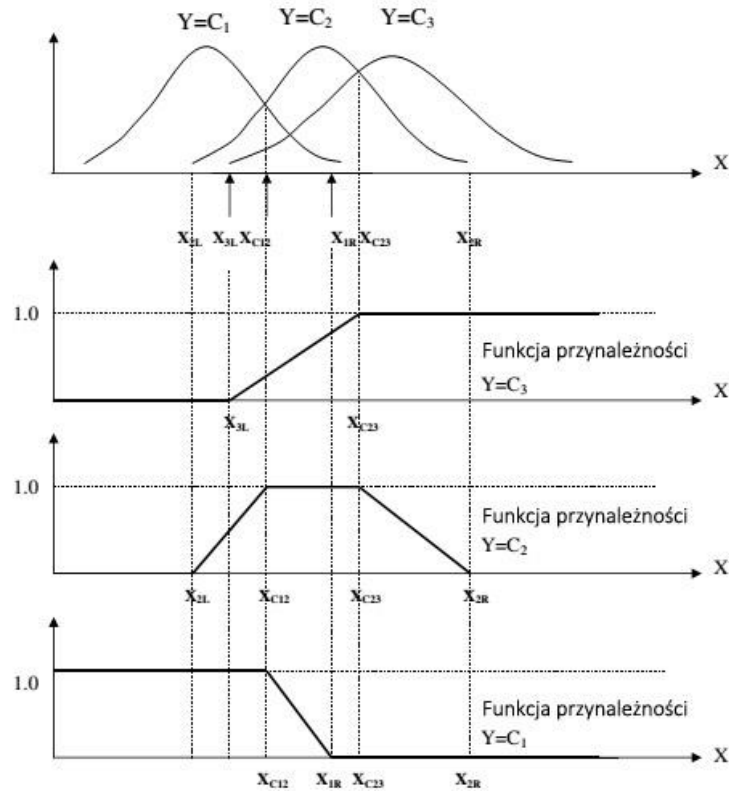
Dla zmiennych liczbowych takich jak np. częstotliwość pobrań produktów (X_2) należy obliczyć średnie oraz odchylenie standardowe dla każdej klasy Y osobno (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 Średnie wartości oraz odchylenia standardowe dla częstotliwości pobrań produktów X_2

Grupa (Y)	Średnia	Odchylenie standardowe
0	\bar{X}_1	S ₁
1	\bar{X}_2	S ₂
2	\bar{X}_3	S ₃

Źródło: opracowano na podstawie [17]

Kolejnym krokiem jest obliczenie wartości odcięcia i progów dla zbiorów rozmytych. Przykładowy wygląd zbiorów rozmytych i funkcji przynależności pokazana na rysunku 2.10.



Rys. 2.10 Funkcja przynależności dla danych

Źródło: opracowano na podstawie [17]

Dla rysunku 2.10 wartości progów i punktów odcięcia funkcji przynależności można zapisać wzorami (15).

$$\begin{aligned}
 X_{C12} &= \frac{S_1 \bar{X}_2 + S_2 \bar{X}_1}{S_1 + S_2}; & X_{C23} &= \frac{S_2 \bar{X}_3 + S_3 \bar{X}_2}{S_2 + S_3} \\
 X_{2L} &= \bar{X}_2 - 3S_2; & X_{3L} &= \bar{X}_3 - 3S_3; \\
 X_{1R} &= \bar{X}_1 + 3S_1; & X_{2R} &= \bar{X}_2 + 3S_2
 \end{aligned} \tag{15}$$

Natomiast funkcja przynależności przybiera postać (16-18). Przy czym należy pamiętać, że funkcja przynależności może przybierać różny kształt, a jego dobór stanowi największą trudność.

$$\mu_{Y=0}(X_2) = \begin{cases} 1 & \text{dla } X_2 < X_{C12} \\ \frac{X_{1R} - X_2}{X_{1R} - X_{C12}} & \text{dla } X_{C12} \leq X_2 < X_{1R} \\ 0 & \text{dla } X_{1R} \leq X_2 \end{cases} \tag{16}$$

$$\mu_{Y=1}(X_2) = \begin{cases} 0 & \text{dla } X_2 \leq X_{2L}; X_2 \geq X_{2R} \\ \frac{X_2 - X_{2L}}{X_{C12} - X_{2L}} & \text{dla } X_{2L} \leq X_2 < X_{C12} \\ 1 & \text{dla } X_{C12} \leq X_2 < X_{C23} \\ \frac{X_{2R} - X_2}{X_{2R} - X_{C23}} & \text{dla } X_{C23} \leq X_2 < X_{2R} \end{cases} \tag{17}$$

$$\mu_{Y=2}(X_2) = \begin{cases} 0 & \text{dla } X_2 < X_{3L} \\ \frac{X_2 - X_{3L}}{X_{C23} - X_{3L}} & \text{dla } X_{3L} \leq X_2 < X_{C23} \\ 1 & \text{dla } X_{C23} \leq X_2 \end{cases} \quad (18)$$

Na podstawie wyżej opisanej funkcji ustalono współczynnik przynależności produktu do danej grupy $\mu_{Y=0}(X_2)$, $\mu_{Y=1}(X_2)$, $\mu_{Y=2}(X_2)$.

Następnym krokiem jest obliczenie stopnia przynależności w oparciu o średnią z obliczonych wcześniej wartości zmiennych lingwistycznych oraz liczbowych dla $Y=1, 2, 3$ co może być zapisane wzorem (19).

$$\mu_{Y=n}(I_t) = \frac{\sum_{i=1}^k \mu_{Y=n}(V_i)}{k}, \quad n = 1, 2, 3 \quad (19)$$

Ostateczną grupę należy przydzielić według zależności (20):

$$\begin{aligned} \mu_{Y=0}(I_t) \leq \mu_{Y=1}(I_t) \leq \mu_{Y=2}(I_t) & \text{ grupa 2} \\ \mu_{Y=0}(I_t) \leq \mu_{Y=1}(I_t) \geq \mu_{Y=2}(I_t) & \text{ grupa 1} \\ \mu_{Y=0}(I_t) \geq \mu_{Y=1}(I_t) \leq \mu_{Y=2}(I_t) & \text{ grupa 1} \\ \mu_{Y=0}(I_t) \geq \mu_{Y=1}(I_t) \geq \mu_{Y=2}(I_t) & \text{ grupa 0} \end{aligned} \quad (20)$$

Po dokonaniu przydziału produktów do grupy według analizy ABC-FC należy scalić otrzymane wyniki z podziałem na grupy według klasycznej analizy ABC (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 Zestawienie klasyfikacji produktów według analizy ABC oraz ABC-FC

Analiza ABC	Analiza ABC-FC		
	Bardzo istotne B ₁	Istotne B ₂	Nieistotne B ₃
A ₁	A ₁ B ₁	A ₁ B ₂	A ₁ B ₃
A ₂	A ₂ B ₁	A ₂ B ₂	A ₂ B ₃
A ₃	A ₃ B ₁	A ₃ B ₂	A ₃ B ₃

Źródło: opracowanie na podstawie [17]

W wyniku zestawienia obu klasyfikacji otrzymano dziewięć grup o różnym stopniu ważności:

- produkty należące do grupy bardzo istotnych = {A₁B₁, A₂B₁, A₁B₂}
- produkty należące do grupy istotnych = {A₃B₁, A₂B₂, A₁B₃}
- produkty należące do grupy nieistotnych = {A₃B₂, A₂B₃, A₃B₃}

Analiza ABC-FC jest bardziej efektywna od jej klasycznej wersji. Główną jej zaletą jest możliwość uwzględnienia kilku kryteriów jednocześnie co w połączeniu z podziałem na dziewięć grup o różnym stopniu ważności pozwala dokonać lepszej klasyfikacji produktów znajdujących się blisko granicy podziału według klasycznej analizy ABC.

2.2.5. Analiza EIQ

W polskiej literaturze analiza EIQ (ang. *Entry-Item-Quantity*) nie została przedstawiona, niemniej jednak została opisana za granicą [25], [59]. Jest to metoda, która może być wykorzystywana do planowania systemów logistycznych, dystrybucji, ale przede wszystkim jest przydatna w magazynach, gdzie może być wykorzystywana do planowania rozmieszczenia produktów, wyboru wyposażenia oraz kontroli i prognozowania stanów magazynowych. Większość klasycznych metod wykorzystuje dwa współczynniki: produkt

(ang. *Item* - I) i ilość (ang. *Quantity* - Q), metoda EIQ natomiast opiera się ponadto na trzecim współczynniku – listach zamówień (ang. *Entry of Order* - E) co pozwala na uzyskanie większej ilości szczegółowych informacji. W metodzie EIQ wykorzystywane są kombinacje wymienionych współczynników w występującej postaci:

- EQ – wielkość zamówienia (Q) klientów (E),
- EN – ilość typów produktów (N) zamówiona przez klientów (E),
- IQ – wielkość zamówienia (Q) dla każdego typu produktu (I),
- IK – częstotliwość zamawiania (K) dla każdego typu produktu (I).

W analizie EIQ podobnie jak metoda oparta o Index COI dokonuje się podziału grup na grupy. Analiza EIQ jest wykonywana w następujących krokach [25]:

1. Zebraniu listy pobrań produktów dla zamówień klientów z przynajmniej kilku dni
2. Utworzeniu tabeli EIQ w oparciu o listy pobrań produktów (Tabela 2.7) na podstawie wzorów (21), (22), (23) oraz (24).

$$EQ_i = \sum_{j=1}^n I_{ij} \text{ dla } i \geq 0; j \geq 0 \quad (21)$$

gdzie:

EQ_i – współczynnik EQ dla i -tego zamówienia (E),

j – indeks typu produktu,

n – ilość typów produktów,

I_{ij} – liczba sztuk j -tego typu produktu dla i -tego zamówienia.

$$EN_i = \sum_{j=1}^n p(I_{ij}) \text{ gdzie } \begin{cases} p = 1 & \text{dla } I_{ij} > 0 \\ p = 0 & \text{dla } I_{ij} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

gdzie:

EN_i – współczynnik EN dla i -tego zamówienia (E),

j – indeks typu produktu,

n – liczba typów produktów,

p – współczynnik określający czy produkt wystąpił w zamówieniu.

$$IQ_j = \sum_{i=1}^m I_{ij} \text{ dla } i \geq 0; j \geq 0 \quad (23)$$

gdzie:

IQ_j – współczynnik IQ dla j -tego typu produktu (I),

i – indeks zamówienia,

m – ilość zamówień,

I_{ij} – ilość sztuk j -tego typu produktu dla i -tego zamówienia.

$$IK_j = \sum_{i=1}^m p(I_{ij}) \text{ gdzie } \begin{cases} p = 1 & \text{dla } I_{ij} > 0 \\ p = 0 & \text{dla } I_{ij} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

gdzie:

IK_j – współczynnik IK dla j -tego typu produktu (I),

- i – indeks zamówienia,
 m – ilość zamówień,
 p – współczynnik określający produkt wystąpił w zamówieniu.

 Tabela 2.7 Przykładowy wygląd tabeli EI_Q

		Produkty [szt.]						EQ		EN	
		I1	I2	I3	I4	I5	I6				
Pozycja z zamówień	E1	8	5	0	3	4	0	20	4		
	E2	5	0	2	7	11	5	30	5		
	E3	12	7	0	2	9	9	39	5		
	E4	0	3	2	0	1	0	6	3		
								Σ EQ			
IQ		25	15	4	12	25	14	Σ IQ	95	Σ EN	
IK		3	3	2	3	4	2	Σ IK	17		

Źródło: opracowano na podstawie [59]

Jeżeli nie popełniono błędu w obliczeniach to prawdziwe będą zależności (25):

$$\sum_{i=1}^m EQ_i = \sum_{j=1}^m IQ_j \text{ oraz } \sum_{i=1}^m EN_i = \sum_{j=1}^n IK_j \quad (25)$$

- Mając tak obliczone współczynniki należy uporządkować listę produktów według wartości kryterium (EQ , IQ , EN lub IK) poczynając od największej malejąco.
- Obliczeniu udział w całkowitej wartości kryterium wyrażonej w procentach r_i (26).

$$r_i = \frac{W_i}{W}; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (26)$$

gdzie:

- W – całkowita wartość kryterium (EQ , IQ , EN lub IK),
 W_i – wartość kryterium.

- Obliczeniu skumulowanego wskaźnika udziału (sum częściowych) rekurencyjnie (27).

$$\begin{aligned}
 q_1 &= w_1 \\
 q_k &= q_{k-1} + w_k; \quad k = 2, 3, \dots, m
 \end{aligned} \quad (27)$$

gdzie:

- q – skumulowany wskaźnik udziału,
 w – wartość kryterium,

- Określeniu wartości granicznych dla grup. Przyjmuje się wartość udziału skumulowanego: $A = 60\%$, $B = 30\%$.
- Podziału produktu na grupy: $A \in (0; 60]$; $B \in (60; 90]$; $C \in (90; 100]$.

Należy wspomnieć, że dokonując podziału produktów na grupy otrzymuje się osobno wyniki dla każdego kryterium (EQ , IQ , EN oraz IK). W ostatecznym rozmieszczeniu produktów można posłużyć się podziałem według jednego kryterium lub stworzyć nowe grupy w oparciu o wszystkie kryteria, np. AAA, ABB, CAB, itd.

W podsumowaniu analizy EIQ najczęściej podaje się:

- liczbę zamówień klientów (E),
- liczbę typów produktów (I),
- całkowitą wielkość zamówień klientów $\left(\sum_{i=1}^m EQ_i = \sum_{j=1}^n IQ_j \right)$
- średnią wielkość zamówień klientów (średnie EQ),
- średnią wielkość zamówienia dla każdego typu produktu (średnie IQ),
- przedział wartości EQ, IQ, EN, IK ,
- całkowitą ilość typów produktów zamówionych przez klientów $\left(\sum_{i=1}^m EN_i = \sum_{j=1}^n IK_j \right)$.

2.2.6. Metoda AHP

Większość metod klasyfikacji bazuje na przyjętych wagach przez logistyków lub menadżerów w związku z czym metody te są bardzo subiektywne. Również analiza AHP cechuje się znaczną subiektywnością jednak przy prawidłowo dobranych współczynnikach wagowych jest to metoda znacznie lepsza niż klasyczne analizy takie jak np. ABC [35]. Mimo wszystko klasyfikacja produktów uzyskana przy pomocy metody AHP jest zależna od początkowo dobranych współczynników wagowych [118]. Istotne jest zatem, aby już na samym początku dobrać odpowiednio wagi. Można tego dokonać na podstawie posiadanych danych o produktach oraz statystyk sprzedażowych. W celu zmniejszenia ryzyka subiektywnej oceny stosuje się także zbiory rozmyte w połączeniu z analizą AHP – FAHP (ang. *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*) [37]. W takim przypadku nie istnieje ścisła skala wagowa, ponieważ wagi są opisywane funkcją przynależności. Często, aby określić wagi stosuje się ankietę delficką (ekspercką) przeprowadzaną wśród specjalistów z danej dziedziny. Takie rozwiązania pozwalają znacznie lepiej odwzorować rzeczywistość opisywaną przez zakładany model.

Metoda AHP jest wykonywana w następujących krokach:

- Wyboru i zestawieniu kryteriów z produktami w formie tabelarycznej.
- Ustaleniu zakresu wag obowiązujących przy ocenie kryteriów.
- Stworzeniu macierzy pierwszeństwa kryteriów przypisując im wagi (w_{nm}) – Tabela 2.8.

Tabela 2.8 Macierz pierwszeństwa kryteriów

		Kryterium			
		C ₁	C ₂	...	C _n
Produkty	P ₁	w ₁₁	w ₂₁	...	w _{n1}
	P ₂	w ₁₂	w ₂₂	...	w _{n2}

	P _m	w _{1m}	w _{2m}	...	w _{nm}
SUMA		$\sum_{i=1}^m w_{1i}$	$\sum_{i=1}^m w_{2i}$	$\sum_{i=1}^m w_{3i}$	$\sum_{i=1}^m w_{ni}$

Źródło: opracowanie własne

- Stworzeniu macierzy preferencji dla produktów w analogiczny sposób jak macierzy pierwszeństwa kryteriów.
- Obliczeniu macierzy znormalizowanych dla macierzy pierwszeństwa kryteriów oraz macierzy preferencji dla produktów. Wartość komórki macierzy normalizowanej można opisać wzorem (28).

$$u_{nm} = \frac{w_{nm}}{\sum_{i=1}^m w_{ni}} \quad (28)$$

gdzie:

- u_{nm} – wartość znormalizowana,
 - n – indeks kolumny w macierzy,
 - m – indeks wiersza w macierzy
 - w_{nm} – wartość komórki w macierzy pierwszeństwa kryteriów,
 - w_{ni} – wartości dla n -tej kolumny oraz i -tego wiersza.
- Obliczeniu wskaźników preferencji według wzoru (29).

$$p_{nm} = \frac{\sum_{j=1}^n u_{mj}}{n} \quad (29)$$

gdzie:

- p_{nm} – wskaźnik preferencji dla m -tego wiersza,
- n – liczba kolumn w macierzy,
- u_{nm} – wartość znormalizowana,

Jeżeli macierz znormalizowana została obliczona ponownie to suma wszystkich wskaźników preferencji będzie równa 1.

- Obliczeniu oceny dla każdego produktu według wzoru (30).

$$op_m = \sum_{i=1}^c p_{kmi} \cdot q_{kmi} \quad (30)$$

gdzie:

- op_m – ocena produktu,
- c – liczba kryteriów,
- p_{cmm} – wskaźnik preferencji produktu według danego kryterium,
- q_{cmm} – wskaźnik preferencji danego kryterium.

- Ostatnim krokiem jest utworzenie grup produktów według uzyskanej oceny.

W analizie AHP należy zwrócić uwagę na konieczność porównywania ze sobą wszystkich elementów wchodzących do analizy – kryteriów i produktów. O ile porównanie kryterium pomiędzy sobą nie jest kłopotliwe z uwagi na fakt, że najczęściej uwzględnia się do pięciu kryteriów jednocześnie, to porównanie ze sobą wszystkich produktów jest już mocno kłopotliwe. Liczbę porównań pomiędzy kryteriami lub produktami można zapisać powszechnie używanym wzorem na kombinację elementów (31).

$$c_n^k = \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (31)$$

gdzie:

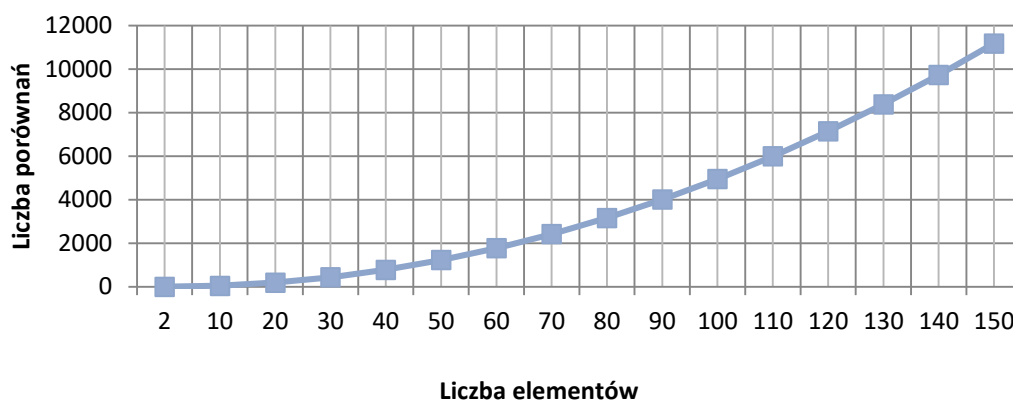
c_n^k – liczba kombinacji,

n – liczba elementów (kryteriów/produktów),

k – liczba elementów w kombinacji – kombinacja dwu elementowa, $k=2$.

Mając zatem w asortymencie 100 produktów ilość porównań będzie wynosiła 4950:

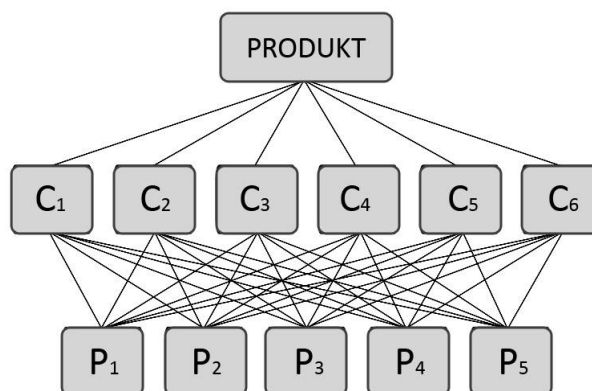
Analizując ilość porównań jakie muszą być wykonane (Rys. 2.11) można zauważyć ich silny wzrost w wyniku analizy dużej liczby elementów.



Rys. 2.11 Liczba porównań w funkcji liczby elementów dla metody AHP

Źródło: opracowanie własne

Analiza AHP jest zatem bardzo czasochłonna jeśli jest wykonywana dla dużej liczby elementów – a tak jest zazwyczaj jeśli chodzi o magazynowanie. Na rysunku 2.12 pokazano przykładową strukturę hierarchiczną procesu decyzyjnego.



Rys. 2.12 Przykładowa struktura procesu decyzyjnego AHP

Źródło: opracowanie własne

W niektórych magazynach bywa składowane nawet ponad 1000 różnych produktów. Zatem zgodnie z rysunkiem 4.3. w przypadku takiej liczby elementów zastosowanie analizy AHP będzie bardzo czasochłonne, przez co może się okazać, że będzie to metoda nieskuteczna. Niemniej jednak przy małej ilości produktów metoda AHP może mieć zastosowanie i pozwoli na otrzymanie lepszych wyników biorąc pod uwagę czas kompletacji zamówień, niż w przypadku wykorzystania klasycznej metody ABC.

2.2.7. Porównanie podstawowych metod wykorzystywanych do klasyfikacji produktów

Omówione w rozdziałach 2.2.1-2.2.6 metody klasyfikacji produktów są metodami najczęściej wykorzystywanymi przy projektowaniu rozmieszczenia produktów w nowych magazynach lub ich restrukturyzacji. Wszystkie metody najczęściej opierają się o dane statystyczne takie jak zapotrzebowanie na produkt, liczbę pobrań produktów, powiązania pomiędzy produktami na listach kompletacyjnych, itd. Metody te są natomiast mało efektywne jeśli chodzi o relokalizację produktów w funkcjonującym magazynie z uwagi na dużą rotację towarów. W takim przypadku spośród omówionych metod najlepiej sprawdza się rozmieszczenie produktów w oparciu o index COI – jest to metoda wykorzystywana najczęściej przy składowaniu w oparciu o wolne miejsca w magazynie.

Dokonując klasyfikacji produktów w oparciu o pozostałe metody, po rozmieszczeniu produktów należy ciągle stosować ten sam układ towarów. Taka konieczność niestety sprawdza się tylko w przypadku stałego popytu i braku sezonowości. Jeśli natomiast występują silne wahania na rynku, należałoby często dokonywać ponownej klasyfikacji produktów i przesunięć wewnątrzmagazynowych – co w dużych magazynach jest znacznym utrudnieniem powodującym zaburzenia w normalnym funkcjonowaniu.

Spośród omówionych metod najczęściej stosowane w przedsiębiorstwach jest analiza ABC w połączeniu z XYZ oraz Index COI. Niemniej jednak są to analizy wykonywane dla jednego lub dwóch kryteriów w związku z czym nie mogą w pełni odzwierciedlić wpływu kryteriów. Duże firmy – zwłaszcza zagraniczne – starają się łączyć kilka metod lub wykonywać je wielokrotnie używając różnych kryteriów i zestawiać je ze sobą. Często też powierza się planowanie rozmieszczenia produktów systemom wspomagania WMS. Te jednak najczęściej korzystają z klasycznych metod klasyfikacji produktów lub ich modyfikacji.

Podsumowując można stwierdzić, że tego typu metody we współczesnym magazynie, który musi dostosowywać się do częstych zmian gospodarki są bardzo ułomne. Słabości klasycznych metod wymusiły na naukowcach i logistykach opracowywanie nowych – bardziej dynamicznych metod klasyfikacji i rozmieszczenia produktów. Fazą przejściową pomiędzy nimi, a nowymi metodami było zastosowanie logiki rozmytej (ang. *Fuzzy Logic*). Obecnie coraz częściej sięga się po zastosowanie algorytmów genetycznych lub sieci neuronowych. Te ostatnie stały się bardzo popularne, co wynika z ich dużych możliwości adaptacyjnych oraz efektywności, która wzrasta wraz z czasem funkcjonowania wdrożonych systemów działających w oparciu o sieci neuronowe.

Zestawienie wszystkich metod omówionych w tym rozdziale przedstawiono w tabeli 2.9.

Tabela 2.9 Porównanie metod klasyfikacji produktów

	Wielokryterialność	Najczęściej uwzględniane kryteria	Zależność od ilości elementów	Sposób klasyfikacji produktów	Najczęstsze zastosowanie
Index COI	Tak, 2 kryteria	- objętość/waga - zapotrzebowanie	nie ma znaczenia	W oparciu o współczynnik COI, brak konieczności podziału na grupy	Metoda wolnych miejsc składowania
Analiza ABC	Nie	- wartość sprzedaży - zysk ze sprzedaży - częstość pobrań - wielkość wydań - objętość/waga	mała	W odniesieniu do innych produktów - w oparciu o udział produktu w stosunku do całości	Metoda stałych miejsc składowania
Analiza XYZ	Nie	- regularność zużycia	mała	W odniesieniu do innych produktów - w oparciu o udział produktu w stosunku do całości	W połączeniu z analizą ABC
Analiza ABC-FC	Tak	- wartość sprzedaży - zysk ze sprzedaży - częstość pobrań - wielkość wydań - objętość/waga - regularność zużycia	mała	W oparciu o funkcję przynależności oraz podział na grupy według analizy ABC	W połączeniu z analizą ABC i XZY
Analiza EIQ	Tak	- wielkość zamówienia klientów - ilość typów produktów zamówiona przez klientów - wielkość zamówienia dla każdego typu produktu - popularność produktu	mała	W oparciu o obliczone współczynniki dla każdego produktu	Metoda wolnych i stałych miejsc składowania
Metoda AHP	Tak	- wartość sprzedaży - zysk ze sprzedaży - częstość pobrań - wielkość wydań - objętość/waga - regularność zużycia	duża	W oparciu o obliczone wskaźniki preferencji oraz przyjęte współczynniki wagowe	Mały asortyment

Źródło: opracowanie własne

2.2.8. Nowoczesne metody i narzędzia wykorzystywane do klasyfikacji produktów

Omawiane we wcześniejszym podrozdziale metody mimo, że są metodami podstawowymi i nie zawsze wystarczająco efektywnymi to jednak są ciągle wykorzystywane w wielu informatycznych systemach wspomagania takich jak ERP czy WMS. Metody te jak już pokazano są stosunkowo proste w implementacji, a ich wykonanie w oparciu o wcześniej przygotowane dane nie zajmuje dużo czasu. System stałych miejsc składowania produktów – dla którego dedykowane są metody klasyfikacji produktów – sam w sobie ma jedną zasadniczą wadę – dużą wrażliwość na wahania popytu. Jeżeli w magazynie składowany jest niezmienny asortyment produktów cechujący się stałym popytem dla każdego z nich to system stałych miejsc składowania jest rozwiązaniem optymalnym [95]. Oczywiście są też inne metody poprawy efektywności funkcjonowania magazynu niż planowanie rozmieszczenia produktów. Do pozostałych metod możemy zaliczyć jeszcze odpowiednie zarządzanie listami zamówień, tj. łączenie ich ze sobą, kompletację wielu zamówień jednocześnie, planowanie trasy kompletacji zamówień, itd. W praktyce najczęściej wszystkie trzy metody są łączone ze sobą. Zarządzanie listami zamówień oraz wyznaczanie ścieżek kompletacji jest omawianych w wielu publikacjach [38], [39], [5], [73], [21], w których pojawiają się nowe koncepcje i metody optymalizacji. W planowaniu rozmieszczenia produktów najwięcej publikacji skupia się na powszechnie stosowanych klasycznych metodach oraz na reorganizacji struktury magazynu [16], [90], [97]. Jedynie analiza EIQ oraz Indeks COI mogą być z powodzeniem stosowane zarówno w systemie stałych jak i wolnych miejsc składowania. Zasadniczym problemem dla magazynów korzystających z systemu stałych miejsc składowania jest mała wrażliwość na wahania popytu. Oczywiście można wykorzystywać metody ABC/XYZ cyklicznie w ciągu roku w określonym odstępie czasu, jednak zawsze pozostaje spadek efektywności funkcjonowania magazynu poza tymi okresami. Z tego powodu zaczęły rozwijać się bardziej złożone metody planowania rozmieszczania produktów w magazynie pozwalające na otrzymywanie wyników w czasie rzeczywistym [4]. Metody te działają w oparciu o takie narzędzia jak zbiory rozmyte, sztuczne sieci neuronowe oraz algorytmy genetyczne [124], [73]. Współczesne metody najczęściej nie dokonują klasyfikacji produktów, a od razu sprawdzają wybrane warianty rozmieszczenia produktów ze zbioru rozwiązań dopuszczalnych. Do takich metod należą metody heurystyczne.

W literaturze można odnaleźć rozwiązania działające w oparciu o metody heurystyczne. Do najczęściej spotykanych metod i narzędzi można zaliczyć [63]:

- **Poszukiwanie minimum lokalnego** (ang. *Local Minimum Search*). Często wykorzystuje się w nich liniowy model matematyczny odzwierciedlający rzeczywisty problem. Model ten wykorzystywany jest do utworzenia możliwych wariantów rozwiązań. Pożądany wynik odnajdywany jest w oparciu o poszukiwanie minimum lokalnego [33],
- **Algorytm symulowanego wyżarzania** (ang. *Simulated Annealing Algorithm, SAA*) wykorzystany do rozwiązania całkowitoliczbowego modelu programowania (integer programming model) pozwalającego na klasyfikację i rozmieszczenie produktów uwzględniając wszystkie możliwe kombinacje, koszty powierzchni składowania oraz koszty kompletacji zamówień, metoda wykorzystuje Index COI [77],
- **Algorytm optymalizacji rojem cząstek** (ang. *Particle Swarm Optimization Algorithm, PSO*) został wykorzystany do podziału produktu na kategorie uwzględniając współczynnik obrotów oraz czas składowania produktów [83],

- **Metoda podziału i ograniczeń** (ang. *Branch and Bound, BBA*) została wykorzystana z programowaniem nieliniowym, w którym zaprezentowany model uwzględniał przestrzeń składowania oraz koszty składowania. W artykule wykorzystano także Index COI [77],
- **Algorytmy genetyczne** (ang. *Genetic Algorithm, GA*) pozwalające na tworzenie nowych rozwiązań będących kombinacją aktualnych rozwiązań lub ich mutacją. Algorytmy genetyczne nie dają możliwości weryfikacji całego zbioru rozwiązań, jednak pozwalają na uzyskanie rozwiązania lepszego z każdym krokiem poszukiwań – generacją [35].
Zdarza się łączenie algorytmów z innymi metodami np. łączenia ścieżek kompletacji produktów [135],
- **Logika rozmyta** (ang. *Fuzzy Logic, FL*) wykorzystywana najczęściej przy podziale produktów na kategorie. Pozwala dostosować przynależność produktów do danej kategorii w przypadku, gdy wartość cechy dla danego produktu znajduje się blisko granicy rozdzielającej kategorie [17],
- **Sztuczne sieci neuronowe** (ang. *Artificial Neural Network, ANN*) są wykorzystywane najczęściej tam gdzie trudno jest określić algorytm postępowania w celu osiągnięcia pożądanego wyniku [91], [122]. W takim przypadku najczęściej dostępne są tylko dane wejściowe oraz informacje na temat pożądanego efektu. Sztuczne sieci neuronowe pomagają znaleźć korelacje pomiędzy danymi wejściowymi a wynikiem. Działanie ANN można podzielić na fazę tworzenia struktury sieci, uczenia sieci – akwizycji wiedzy oraz fazę działania sieci. Sieci neuronowe są narzędziem coraz częściej wykorzystywanym z uwagi na szybkość ich działania, rosnącą jakość wyników w miarę przetwarzania nowych danych oraz bardzo duże możliwości adaptacyjne.
Sztuczne sieci neuronowe są wykorzystywane najczęściej do przewidywania popytu [15], klasyfikacji produktów [134] oraz wyznaczania drogi kompletacji.

Wymienione metody i narzędzia często są wykorzystywane w różny sposób. Powstają ich nowe odpowiedniki, często nieznacznie zmienione. Zdarza się też, że poszczególne narzędzia są łączone ze sobą lub z metodami klasycznymi w celu uzyskania jeszcze lepszych wyników [134], [17], [15], [135].

3. TRANSPORT WEWNĄTRZMAGAZYNOWY - KOMPLETACJA PRODUKTÓW

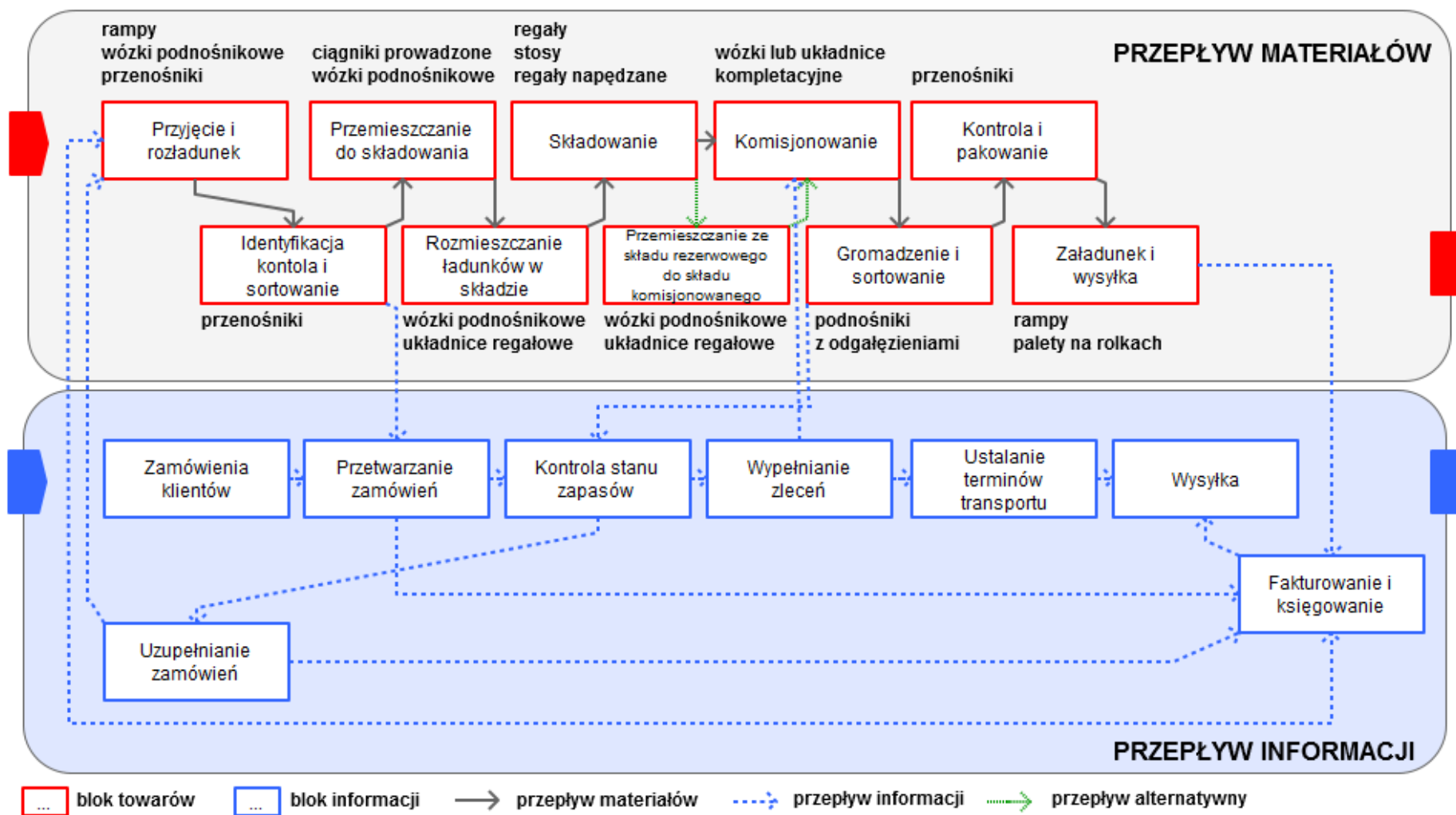
3.1. Uwagi ogólne

Magazyn będący ogniwem łączącym poszczególne etapy przewozu produktów w łańcuchu transportowym jest miejscem, w którym zachodzi realizacja wielu czynności związanych zarówno z wewnątrzmagazynowym transportem ładunków, procesami zmiany ich stanów, tj. komisjonowaniem, konsolidacją oraz innych procesów towarzyszących, jak również z przepływem informacji. Procesy te i zależności zachodzące pomiędzy nimi przedstawiono na rysunku 3.1.

Jednym z głównych procesów zachodzących w magazynach jest transport wewnątrzmagazynowy czyli kompletacja produktów [53], [54], [52], [45], [46], [47]. Jest to złożony proces transportowy, ponieważ łączy ze sobą wiele zależnych elementów, takich jak: przepływ informacji, środki transportu, wyznaczanie dróg kompletacji, wykorzystanego systemu składowania oraz samych ładunków. W trakcie tego procesu wykonywane są następujące czynności:

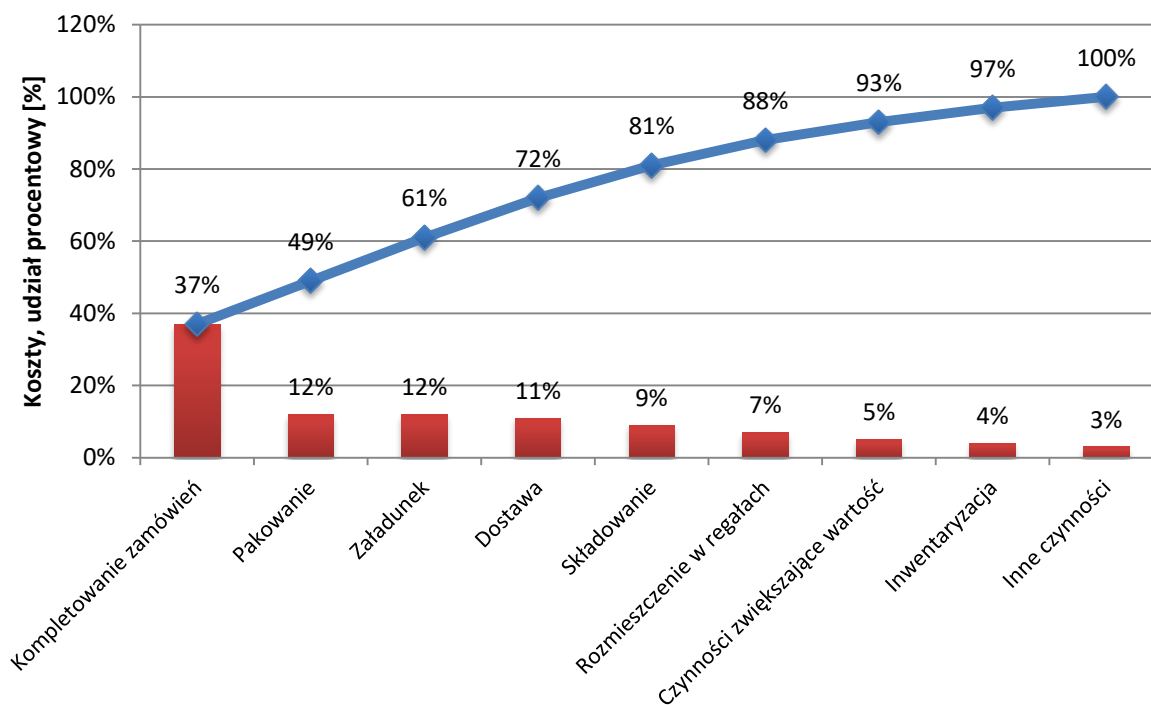
- przygotowanie jednostek ładunkowych dla potrzeb kompletacji, którego celem jest zapewnienie pracownikom najszybszego i bezpośredniego dostępu do towarów,
- kompletowanie zamówień, które jest fizycznym pobraniem określonych na listach kompletacji towarów,
- kontrola ilościowa, której celem jest potwierdzenie kompletności stworzonej jednostki ładunkowej i jej zgodności z listą kompletacji pod kątem asortymentu i ilości,
- pakowanie i formowanie jednostek transportowych. Pakowanie ma na celu zabezpieczenie ładunku przed szkodliwym oddziaływaniem otoczenia i ingerencji właściwości produktów w otoczenie oraz pozwala na lepszy nadzór nad towarami w przypadku dostaw drobnicowych. Formowanie jednostek transportowych pozwala na efektywne wykorzystanie środków transportu i ich łatwe przemieszczenie, identyfikację i obsługę,
- transport do strefy wydań i wydanie towaru.

Proces kompletowania zamówień zasługuje na szczególną uwagę ze względu na zasobochłonność i koszty, które wynoszą od 37% [36] do 55% [1] całości kosztów funkcjonowania magazynów. Biorąc pod uwagę także procesy powiązane tj. pakowanie i załadunek towarów kompletowanie zamówień stanowić może nawet 61% całkowitych kosztów magazynowania [1]. Podział kosztów magazynowania w postaci wykresu Pareto-Lorenza przedstawiono na rysunku 3.2.



Rys. 3.1 Współzależność pomiędzy przepływem materiałów (transportem wewnątrzmagazynowym) a przepływem informacji w magazynie

Źródło: opracowano na podstawie [29]



Rys. 3.2 Przykładowy rozkład kosztów magazynowania

Źródło: opracowano na podstawie [36]

Biorąc pod uwagę wysokie koszty procesu kompletowania zamówień, zmniejszając jego czas, możliwe jest znaczne obniżenie całkowitych kosztów funkcjonowania magazynu. Koszty powstające na etapie magazynowania mają znaczący wpływ na ogół kosztów całego systemu transportowego [136].

3.2. Zasady kompletacji produktów

W procesie kompletacji produktów stosowane są trzy zasady: FIFO, LIFO, FEFO. Zasady te wiążą się z kolejnością pobrania produktów tego samego typu względem zdatności produktu do użycia lub czasu przyjęcia do magazynu [79].

Zasada FIFO (ang. *First In First Out*) czyli pierwsze przyszło pierwsze wyszło odnosi się do pobrania/wydawania towarów w takiej samej kolejności z którą zostały przyjęte do magazynu. Zasada jest stosowana najczęściej tam gdzie ma duże znaczenie starzenie się produktu. Jej stosowanie utrudnione jest w składowaniu blokowym.

Zasada LIFO (ang. *Last In First Out*) czyli ostanie przyszło pierwsze wyszło. Odnosi się do wydawania produktów w odwrotnej kolejności niż zostały dostarczone do magazynu. Zasada ta najczęściej jest stosowana dla składowania blokowego i tam gdzie nie dochodzi do starzenia się towarów.

Zasada FEFO (ang. *First Expired First Out*) czyli pierwsze traci ważność pierwsze wyszło. Jest stosowana tam gdzie bardzo duże znaczenie w procesie składowania odgrywa starzenie się produktów. Jest to ważna zasada ponieważ jej stosowanie zapobiega zepsuciu się produktów i utracie ich użyteczności w wyniku przekroczenia daty ważności/przydatności do użycia.

Stosowanie poszczególnych zasad kompletacji zależy od właściwości towarów oraz sposobu ich składowania w magazynie.

Kompletowanie zamówień odbywa się najczęściej bezpośrednio w strefie składowania, gdzie przechowywane są towary. W szczególnych przypadkach może dochodzić do kompletacji w wydzielonej strefie – takie rozwiązanie ma na celu usprawnienie procesu. W strefie kompletacji znajdują się wtedy wszystkie towary z asortymentu, co pozwala skrócić drogę kompletacji. Towary w tej strefie są systematycznie uzupełniane ze strefy składowania w miarę potrzeby wynikającej z wysyłki towarów. Wydzieloną strefę kompletacji najczęściej stosuje się przy małych produktach i niedużym asortymencie towarów.

W większości magazynów stosowana jest metoda kompletacji nosząca nazwę „człowiek do towaru”. Jest ona najbardziej rozpowszechniona i polega na tym, że pracownik dostając listę kompletacji, a następnie sam lub z pomocą wózka kompletacyjnego przemieszczania się po magazynie w celu pobrania wymaganych towarów.

Drugą metodą stosowaną w magazynach automatycznych jest metoda „towar do człowieka”. Polega ona na pozostaniu pracownika w jednym obszarze magazynu, do którego dostarczane są określone towary za pomocą przenośników rolkowych, regałów karuzelowych lub automatycznych układnic magazynowych.

3.3. Metody kompletacji zamówień

Dobór metody kompletacji zamówień ma duże znaczenie z punktu widzenia efektywności systemu transportu wewnątrzmagazynowego. Jest on silnie powiązany z rodzajem kompletowanych produktów, ich rotacją, liczbą sztuk produktów w zamówieniu, ograniczeniami czasowymi, itd. W niniejszym podrozdziale przedstawiono najnowsze i najczęściej używane metody kompletacji na świecie.

3.3.1. Kompletacja według zamówień - Pick by order

Kompletacja według zamówień (ang. *pick by order*) polega na bezpośrednim (ang. *direct picking*) kompletowaniu całego zamówienia lub jego części przez jednego pracownika. Kompletacja jest wykonywana ręcznie, przy pomocy pojemnika kompletacyjnego (skrzynek, kartonów, koszy, itd.) lub wózka kompletacyjnego (paletowego, widłowego, itd.). Proces kompletacji tego typu uznaje się za zakończony z chwilą umieszczenia ostatniego produktu na wózku kompletacyjnym i zamknięciu zlecenia. Pracownik porusza się po magazynie według kolejnych pozycji znajdujących się na liście kompletacyjnej, terminalu radiowym lub podawanych za pomocą systemu głosowego (kolejność poszczególnych punktów jest wcześniej ustalana ręcznie lub automatycznie w celu wybrania optymalnej trasy). Badania w zakresie zależności układu regałów przy kompletacji według systemu pick by order zostały przeprowadzone i przedstawione w pracy autorstwa N. Boysen [10].

Zaletą tej metody jest to, że zamówienia są od razu kompletne, tzn. nie trzeba dokonywać sortowania produktów i ich podziału na poszczególne zamówienia. Ponadto zmniejszone jest ryzyko związane z pomyłką wynikającą z zamianą produktów pomiędzy kilkoma zamówieniami.

Metoda kompletacji produktów według zamówień jest jedną z najbardziej powszechnych metod. Jednak dla dużych magazynów, gdzie zachodzi konieczność pokonywania znacznych odległości pomiędzy składowanymi produktami znacząco wzrasta zapotrzebowanie na pracę ludzką, co powoduje podniesienie kosztów funkcjonowania magazynu, a także kosztów eksploatacji urządzeń transportowych.

3.3.2. Kompletacja kilku zamówień jednocześnie - Cluster picking

Kompletacja kilku zamówień jednocześnie, zwana też często multikompletacją (ang. *cluster picking*) polega na kompletowaniu dwóch lub więcej zamówień w tym samym czasie, dokonując ich jednoczesnego sortowania. Takie rozwiązanie jest stosowane w przypadku kiedy możliwe jest oddzielenie ze sobą poszczególnych zamówień na wózku kompletacyjnym. Do tego celu wykorzystywane są najczęściej specjalne wózki/kosze (Rys. 3.3a) lub pociągi logistyczne (Rys. 3.3b).

a)



b)



Rys. 3.3 Kosz do kompletacji kilku zamówień (a), pociąg logistyczny (b)

Źródło:[111], [103]

Liczba zamówień, która może być kompletowana tą metodą, zależy od liczby pozycji i sztuk produktów na listach kompletacyjnych, ich objętości, wagi oraz pojemności wózka kompletacyjnego.

Główną zaletą tego systemu kompletacji zamówień jest redukcja drogi kompletacji, a zatem i czasu potrzebnego na skompletowanie wszystkich zamówień łącznie w stosunku do metody kompletacji według zamówień. Wadą natomiast to, że jest możliwość pomylenia miejsca na wózku kompletacyjnym i umieszczenie produktu nie w tym zamówieniu co powinno się znaleźć. Wskazane jest zatem dokonanie sprawdzenia zgodności zamówienia z pozycjami skompletowanymi lub zastosowanie dodatkowych narzędzi automatycznej identyfikacji pozwalających na automatyczną weryfikację poprawności kompletacji [99].

3.3.3. Kompletacja według asortymentu - Batch picking

Kompletacja według asortymentu jest zbliżona do metody kompletowania kilku zamówień jednocześnie. Zasadnicza różnica, występująca pomiędzy nimi polega na tym, że w kompletacji według asortymentu pozycje z kilku zamówień są łączone ze sobą w jedną listę kompletacji, a po ich pobraniu z regału nie dochodzi do rozgraniczenia zamówień na wózku kompletacyjnym. Rozdział pobranych towarów na zamówienia odbywa się jako osobny proces, niezależny od kompletacji mającej miejsce w strefie składowania towarów.

W kompletacji według asortymentu wyróżnia się dwa sposoby pobierania produktów [36]:

- **pobieranie całego wiersza** (ang. *pick by line*), polegające na zaokrągłaniu pobieranej liczby sztuk w górę, stosownie do pełnych jednostek ładunkowych,

a następnie po dokonaniu ich podziału na zamówienia zwracanie pozostałych sztuk do strefy składowania, lub jeśli jest to możliwe przypisywanie od razu do nowopowstałych zamówień,

- **pobieranie do zera** (ang. *pick to zero* lub ang. *bulk picking*), polegające na pobieraniu dokładnie takiej liczby sztuk, jaka została podana na liście kompletacji, aż do chwili skompletowania wszystkich pozycji z listy w wymaganej ilości.

Zaletą tego typu kompletacji jest zmniejszenie pokonywanej drogi i większa dokładność. Ponadto pozwala na większą wydajność (większy wskaźnik pobrań pozycji zamówienia na godzinę). Na uwagę jednak zasługuje konieczność późniejszej straty czasu na rozdział produktów na zamówienia. Wadą natomiast jest podział kompletacji na dwa procesy i trudność w zarządzaniu zamówieniami wrażliwymi na upływ czasu.

Podział produktów na zbiorcze listy zamówień w zależności od potrzeb może być wykonywany w interwałach godzinowych, kilkugodzinowych, zmianowych lub dziennych. Jeżeli występują przypadki zamówień, w których często powtarzają się te same pozycje asortymentu (zwłaszcza towary małej i średniej wielkości) to często dochodzi do zwiększenia interwału czasu tak, aby zmaksymalizować pobieranie pełnych jednostek ładunkowych.

Podział produktów na listy zbiorcze może być wykonywany ręcznie, jednak bardzo często wykorzystywane są do tego systemy WMS, które w większości posiadają taką możliwość.

3.3.4. Kompletacja strefowa - Pick and Pass/Zone picking

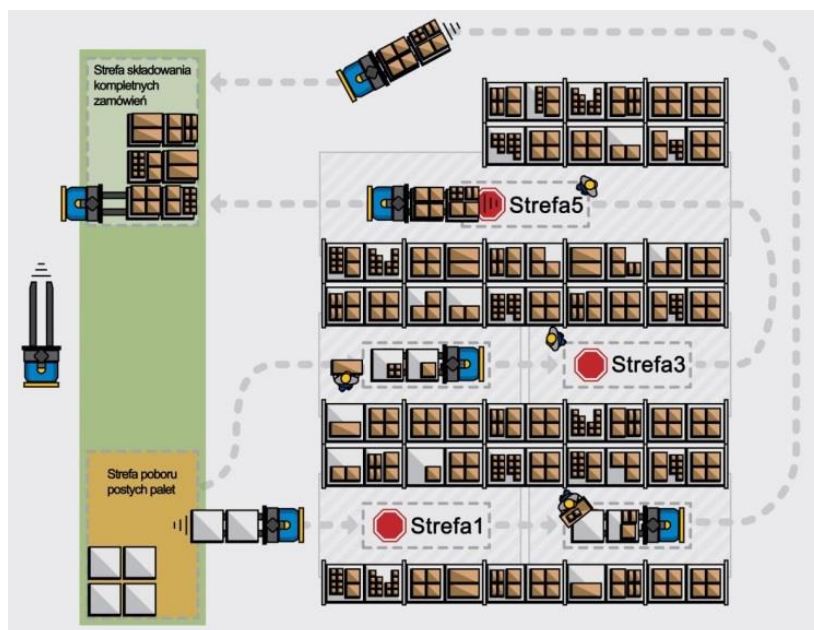
System kompletacji strefowej (ang. *zone picking*) zwany też inaczej pobierz i przekaz (ang. *pick and pass*) polega na podziale powierzchni składowania na mniejsze strefy o wielkości odpowiadającej rotacji produktów – im większy współczynnik rotacji tym mniejsza strefa. Każda ze stref jest obsługiwana przez innego pracownika, który dokonuje kompletacji tylko tych produktów, które znajdują się w jego strefie (Rys. 3.4).

Zamówienia są przekazywane do kolejnych stref, dopiero wtedy kiedy wszystkie pozycje na liście kompletacji zostały pobrane ze strefy wcześniejszej. Zamówienia w zależności od systemu organizacji magazynu są przekazywane razem z koszem/wózkiem kompletacyjnym lub w formie koszy/kartonów za pomocą przenośników rolkowych/taśmowych. Tego typu system został opisany między innymi przez JCH . Pan, PH. Shih, oraz MH.Wu [87].

Zamówienia mogą być kompletowane w formie [36]:

- **kompletacji jednoczesnej/symultanicznej** jest tworzonych kilka list kompletacji – dla wszystkich powiązanych z zamówieniem stref. W każdej ze stref kompletacja zamówień odbywa się niezależnie, a następnie częściowe zamówienia są łączone w jedno kompletne.
- **kompletacji sekwencyjnej**, tworzone jest jedna lista, która po kolei przekazywana jest pomiędzy poszczególnymi strefami, w których dochodzi do dodawania produktów do zamawiania. Nie ma zatem potrzeby ich łączenia, jednak proces kompletacji jednego zamówienia zajmuje więcej czasu.

Dobór wielkości stref kompletacji, przydział do nich zamówień i liczby pracowników ma szczególne znaczenie ponieważ może powodować powstawanie wąskich gardeł wynikających ze złego przydziału siły roboczej do zadań, a zatem przeciążeń w jednej strefie, która w następstwie powoduje opóźnienia w innych.



Rys. 3.4 Schemat funkcjonowania kompletacji strefowej

Źródło: opracowano na podstawie [105]

Kompletacja strefowa jest często używana w magazynach, w których występuje duża liczba małych produktów, np. płyty cd, oraz tam gdzie w magazynie wydzielono strefy składowania zależne od warunków przechowywania (farmaceutyka, produkty spożywcze, towary niebezpieczne) oraz podobieństwa produktów.

3.3.5. Kompletacja falowa - Wave picking

W kompletacji falowej zamówienia są łączone i wydawane w określonych godzinach w ciągu dnia lub powiązane z odprawami środków transportu, cyklem uzupełniania stanów magazynowych, systemem zmianowym, lokalizacji produktów, ich podobieństwa, wymogów usług tworzących wartość dodaną produktów oraz priorytetów kompletacji zleceń. Wykorzystanie kompletacji falowej pomaga również zrównoważyć nakłady pracy w poszczególnych strefach magazynu poprzez logiczne grupowanie i przekazywanie zamówień do kompletacji [129].

Zamówienia mogą być przekazywane w różnym okresie czasu do poszczególnych stref, w oparciu o szacowany czas kompletacji zamówień. Wadą tego systemu kompletacji jest konieczność późniejszego łączenia zamówień ponownie w jedną całość. Jednak w porównaniu z kompletacją według asortymentu lub kompletacją strefową nie ma konieczności ponownego sprawdzania poprawności zamówień (kodów produktów i liczby sztuk). Ponadto taki system organizacji pracy wydłuża proces kompletacji jednego zamówienia, co przy bezpośrednich odbiorach towaru może mieć istotne znaczenie dla klienta.

3.3.6. Porównanie metod kompletacji zamówień

Zastosowanie omówionych metod kompletacji zamówień (podrozdział 3.3.1-3.3.5) jest różne w zależności od rodzaju składowanych towarów, rotacji produktów, ich właściwości, systemu składowania i zasobów finansowych przedsiębiorstwa. W tabeli 3.1. przedstawiono zestawienie omówionych metod wraz z ich typowym zastosowaniem, korzyściami i wadami jakie ze sobą niosą.

Tabela 3.1 Porównanie metod kompletacji zamówień

	Typowe zastosowanie	Korzyści	Wady
Kompletacja według zamówień	Większość przypadków	<ul style="list-style-type: none"> - operacje jednoetapowe - elastyczność - łatwość wdrożenia - możliwość izolacji pilnych zamówień - pracownik może wybrać drogę kompletacji - wykorzystanie systemu manualnego lub informatycznego 	<ul style="list-style-type: none"> - niski współczynnik pobrań - duża prędkość - może powodować powstawanie wąskich gardeł w przypadku krzyżowana się ścieżek kompletacji - szkolenie może zająć sporo czasu w zależności od wykorzystywanych urządzeń magazynowych
Kompletacja kilku zamówień jednocześnie	Większość przypadków	<ul style="list-style-type: none"> - kompletacja wielu zamówień jednocześnie - zmniejszenie pokonywanej odległości - zmniejszenie czasu kompletacji 	<ul style="list-style-type: none"> - szkolenie może zająć sporo czasu - pilne zamówienia nie mogą być wyizolowane w prosty sposób - wymagane wózki do kompletacji wielu zamówień - wymagane produkty o niedużej objętości - wymagany system wspierający łączenie zamówień - może powodować powstawanie wąskich gardeł - może wymagać dodatkowego procesu pakowania zamówień
Kompletacja według asortymentu – pobieranie do zera	e-commerce, obsługa sklepów detalicznych	<ul style="list-style-type: none"> - kompletacja wielu zamówień jednocześnie - bardzo efektywne w przypadku występowania dużej liczby produktów tego samego typu na jednym zamówieniu - zmniejszenie pokonywanej odległości - zwiększenie dokładności - może być wdrożona dla operacji cross-dockingowych 	<ul style="list-style-type: none"> - pilne zamówienia nie mogą być wyizolowane w prosty sposób - wymagany system wspierający łączenie zamówień - „pobieranie do zera” zajmuje więcej czasu niż „pobieranie całego wiersza” - wymagana strefa sortowania i dodatkowi pracownicy - wymagane przepakowywanie produktów
Kompletacja według asortymentu – pobieranie całego wiersza	e-commerce, obsługa sklepów detalicznych	<ul style="list-style-type: none"> - kompletacja wielu zamówień jednocześnie - zwiększenie dokładności - bardzo efektywne w przypadku występowania dużej liczby produktów tego samego typu na jednym zamówieniu - zmniejszenie pokonywanej odległości 	<ul style="list-style-type: none"> - pilne zamówienia nie mogą być wyizolowane w prosty sposób - wymagane zwracanie niewykorzystanych produktów z powrotem do strefy składowania - wymagana strefa sortowania i dodatkowi pracownicy - wymagane przepakowywanie produktów
Kompletacja strefowa	duża liczby jednostek ładunkowych i małej liczby pozycji w zamówieniu	<ul style="list-style-type: none"> - zmniejszenie pokonywanej odległości przez pracownika - operacje mogą być realizowane symultanicznie lub sekwencyjnie - możliwość odseparowania produktów różnego typu, towarów niebezpiecznych, wymagających specjalnej temperatury, itd. 	<ul style="list-style-type: none"> - najczęściej wymagane zastosowanie przenośników - koszt aparatury - najczęściej połączone z systemem <i>pick/put-to light</i> - może powodować niewykorzystanie siły roboczej jeśli nie ma zachowanej równowagi pomiędzy strefami
Kompletacja falowa	zamówienia uzależnione od czasu wysyłki	<ul style="list-style-type: none"> - możliwość efektywnego planowania - zamówienia są pobierane na czas, łatwość integracji z produkcją i wysyłką towarów 	<ul style="list-style-type: none"> - pilne zamówienia nie mogą być wyizolowane w prosty sposób - wymagany system WMS do zarządzania przydziałami

Źródło: opracowano na podstawie [36]

3.4. Środki transportowe wykorzystywane do kompletacji zamówień

Dobór środków transportowych wykorzystywanych w magazynie zależy od rotacji produktów i wielkości magazynu. Im magazyn składa się więcej produktów i im większe są w nim przepływy tym bardziej efektywne i niezawodne powinny być środki transportowe. Natomiast przy ich wyborze duże znaczenie ma także liczba poziomów składowania, warunkująca wymaganą wysokość unosu oraz szerokość korytarza, która z powodów bezpieczeństwa i możliwości technicznych (skrajni) warunkuje szerokość środka transportowego [12]. W tabeli 3.3 przedstawiono szerokość korytarza w odniesieniu do środków transportowych wykorzystywanych do kompletacji zamówień. Natomiast czas przemieszczania się po magazynie w zależności od zastosowanego środka transportu przedstawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2 Przykładowe czasy poruszania się środków transportu

Operacja	Czynność	Czas
Kompletacja ręczna	Podnoszenie i opuszczenie małych produktów	10 s
	Podnoszenie i opuszczenie produktów do 18 kg	20 s
Poruszanie się człowieka	Chód bez produktów	31 m/min
	Chód z wózkiem paletowym	30,5 m/min
Wózek podnośnikowy czołowy wysokiego składowania	Podnoszenie i opuszczanie palety	65 s
	Podnoszenie wideł	20 s/m
	Przemieszczanie się	12 m/min

Źródło: [117]

Przedstawione czasy w tabeli 3.2 są wartościami odwzorowującymi rzeczywisty sposób transportu towarów przy standardowym roboczym tempie wykonywania operacji.

Tabela 3.3 Porównanie wymaganej minimalnej szerokości korytarza w odniesieniu do środków transportowych wykorzystywanych w kompletacji zamówień

	Rodzaj	Wysokość podnoszenia [mm]	Maksymalna podnoszona masa [kg]	Wymagana szerokość korytarza [mm]
	Wózek paletowy (unoszący) ręczny (ang. <i>hand pallet truck, pallet jack</i>)	Nie dotyczy	2300-3000	1800
	Wózek paletowy (unoszący) z napędem (ang. <i>powered pallet truck</i>)	Nie dotyczy	1200-3000	2800
	Wózek podnośnikowy z napędem (ang. <i>powered pallet stacker</i>)	1350-6300	1000-1600	2200-3000
	Wózek podnośnikowy czołowy wysokiego składowania (ang. <i>reach truck</i>)	4500-12500	1400-2500	2650-3150
	Wózek z przeciwwagą (ang. <i>counter-balance truck</i>)	3000-7000	1300-5000	3000-7000
	Wózek kompletacyjny nispopoziomowy (ang. <i>low-level order picker</i>)	Nie dotyczy	1800-2500	1636
	Wózek kompletacji zamówień średniego poziomu (ang. <i>medium-level order picker</i>)	2000-4700	1000-1200	1590
	Wózek kompletacji zamówień wysokiego poziomu (ang. <i>high-level order picker</i>)	4700-9500	1000-1200	1664
	Wózek kompletacji kombinowanych (ang. <i>combination truck</i>)	14800	1000-1500	1600-2300
	Przegubowy wózek widłowy (ang. <i>articulated forklift truck</i>)	12000	1000-2000	1600-2100

Źródło: Opracowano na podstawie [36]

3.5. Systemy automatycznej identyfikacji oraz rozwiązania usprawniające kompletację zamówień

3.5.1. Wprowadzenie - rodzaje systemów

Duże znaczenie systemów automatycznej identyfikacji jest podkreślane w wielu publikacjach [93], [98]. Aby usprawnić kompletację zamówień, najczęściej stosuje się nowoczesne narzędzia pozwalające na automatyczną identyfikację towarów, która może odbywać w oparciu o technologie [22]:

- kodów kreskowych (ang. *Bar Code*),
- fal radiowych (ang. *Radio Frequency Identification – RFID*),
- rozpoznawania znaków (ang. *Optical Character Recognition - ORC*),
- rozpoznawania obrazów (ang. *Vision Systems*).

3.5.2. Kody kreskowe

Kody kreskowe są stosowane z uwagi na łatwość ich wdrożenia, efektywność, dużą precyzję oraz niskie koszty odczytu danych i wprowadzenia ich do systemów informatycznych.

Sam kod kreskowy nie jest nośnikiem informacji o towarze, przechowuje jedynie dane pozwalające na jego identyfikację. Składa się ze zróżnicowanych pod kątem wielkości i grubości czarno-białych kształtów (najczęściej linii – kod paskowy) występujących naprzemiennie po sobie oraz stanowiącego sekwencję znaków kodu liczbowego. Odczyt kodów kreskowych opiera się o zjawisko pochłaniania światła przez ciemne pola, a odbijaniu go przez pola białe. Czytnik kodów przetwarza odbite światło na sygnały elektryczne posiadające różną częstotliwość (w zależności od grubości poszczególnych linii). Otrzymany w ten sposób sygnał zostaje przetworzony przez dekodery, który generuje kod towaru składający się z cyfr, liter oraz znaków, a następnie przesyła go do komputera. Znajdujący się w komputerze system w oparciu o przechowywane informacje w bazie danych i odczytany kod kreskowy wykonuje odpowiednie działania.

3.5.3. Fale radiowe RFID

Kolejną technologią pozwalającą na kontrolę ruchu i lokalizację materiałów w obiegu łańcucha dostaw oraz informowania o postępie poszczególnych działań jest technologia RFID (ang. *Radio Frequency Identification*). Posiada ona szereg zalet klasyfikujących ją na znacznie wyższym poziomie niż obecnie powszechnie stosowane kody kreskowe. Do mocnych stron technologii RFID można zaliczyć możliwość ponownego zapisu danych na transponderach (tagach) oraz ich zmiany, wysoką trwałość związaną także z mniejszym prawdopodobieństwem uszkodzenia czy zatarcia nośnika, a co najważniejsze możliwość odczytu na znaczną odległość od czytnika.

Tag RFID składa się z: chipu, anteny oraz opakowania (szklana kapsuła, papierowa etykieta lub kawałek plastiku). W zależności od parametrów (rodzaju transpondera, anteny, częstotliwości czy zakłóceń) transponder może znajdować się od kilkunastu centymetrów do kilkudziesięciu metrów od czytnika. Jeden czytnik jest w stanie obsługiwać i przetwarzać jednocześnie dziesiątki etykiet, co stanowi znaczącą przewagę w stosunku do czytników kodów kreskowych mogących odczytywać w tym samym czasie tylko jeden kod. Ponadto tagi RFID cechują się już wspomnianą trwałością. Są odporne na warunki atmosferyczne, promieniowanie UV, temperaturę, wodę oraz wstrząsy mechaniczne.

Występują dwa rodzaje tagów: pasywne oraz aktywne. Pierwsze z nich nie posiadają własnego zasilania, czerpią energię z czytników na zasadzie fali odbitej, przez co mają mały zasięg (od kilku centymetrów do kilku metrów). Są stosowane najczęściej w identyfikatorach firmowych lub jako zabezpieczenie przed kradzieżą towarów w sklepach. Tagi aktywne natomiast posiadają własną baterię zasilającą chip. Pozwala to na przechowywanie większej ilości danych oraz zwiększenie zasięgu odczytu do kilkudziesięciu metrów. Ich cena jest jednak znacznie większa przez co są rzadziej stosowane.

3.5.4. Rozpoznawania znaków i obrazów

Do przetwarzania tekstu stosuje się systemy rozpoznawania znaków OCR. Pozwalają one na zamianę tekstu odręcznego lub drukowanego na edytowalny tekst cyfrowy. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu skanera o dobrej rozdzielczości i prawidłowo skonfigurowanego oprogramowania. W oparciu o krój czcionki system rozpoznaje kształty poszczególnych znaków i zapisuje je jako zwykły tekst. Systemy rozpoznawania obrazu (wizyjne) działają w oparciu o wcześniej zdefiniowane i wprowadzone do aplikacji wzorce. W odniesieniu do nich system dokonuje zapisu (kodowania) na pożądanym obiekcie. W trakcie odczytu zachodzi odwrotny proces – obraz jest odczytywany i analizowany pod kątem zgodności z wzorcami znajdującymi się w bazie danych. Na tej podstawie rozpoznawane są znaki graficzne, litery oraz złożone struktury i kształty. Pozwala to na szybkie odnajdowanie istotnych fragmentów tekstu, a nawet pojedynczych wyrazów.

Systemy rozpoznawania znaków i obrazów bardzo często są stosowane w przypadkach automatycznych magazynów dla procesów podziału towarów na zamówienia – automatycznego sortowania (Rys. 3.5) [32].



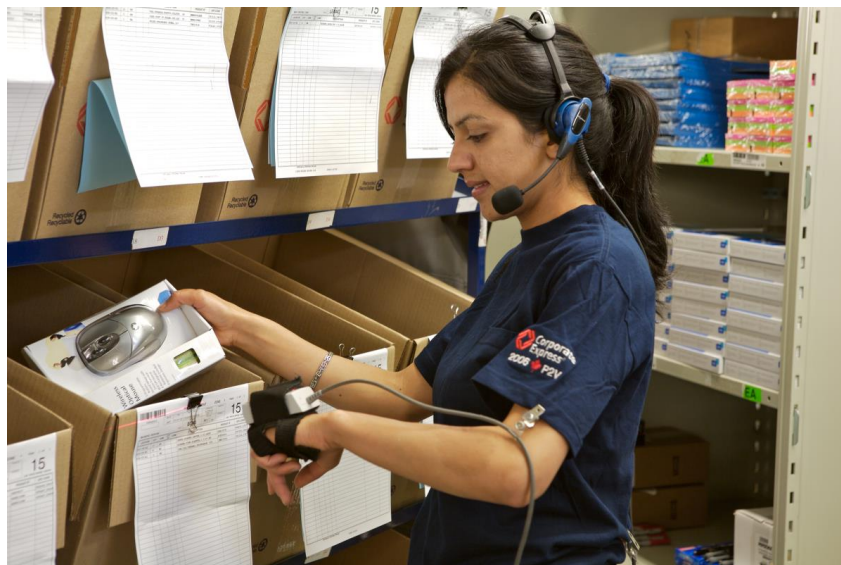
Rys. 3.5 Automatyczny sorter typu taśmowego

Źródło: <http://www.directindustry.com> [104]

W takich rozwiązaniach systemy rozpoznawania znaków wykorzystywane są do identyfikacji towarów, w wyniku której są przenoszone pomiędzy przenośnikami rolkowymi i dostarczane do odpowiednich miejsc w magazynie.

3.5.5. Technologia głosowa

Coraz częściej w procesie kompletacji produktów stosuje się technologie rozpoznawana głosu (ang. *voice picking*). Polecenia wykonania czynności w ramach danej kompletacji są wysyłane do pracownika przez system magazynowy WMS i przetwarzane na komunikat głosowy. Pracownik z jednej strony słyszy w słuchawkach polecenia, które musi wykonać, z drugiej natomiast jest zobowiązany do potwierdzenia ich wykonania w sposób głosowy [72].



Rys. 3.6 Przykład zastosowania kompletacji głosowej

Źródło: <http://ua.automation.com> [110]

Na rysunku 3.6 przedstawiono przykład kompletacji głosowej połączonej z terminalem radiowym typu nadgarstkowego. Takie rozwiązanie ma na celu uwolnienie obu rąk pracownika (nie ma potrzeby noszenia, bądź ciągłego wyciągania i chowania terminala, czy listy kompletacyjnej), co w znaczącym stopniu usprawnia proces kompletacji towarów. Przedstawiony na rysunku proces zeskanowania kodu kreskowego opakowania (lokalizacji regale), a następnie na produkcie pozwala uniknąć błędu związanego z pobraniem nieodpowiedniego towaru. Jeżeli taka sytuacja miałaby miejsce, pracownik otrzymuje polecenie głosowe, aby odłożył pobrany produkt z powrotem na miejsce i powtórnie zeskanował kod w celu potwierdzenia tej czynności, a następnie pobrał produkt właściwy.

3.5.6. System pick by light/pick to light

System pobierania produktów pick by light wykorzystuje wskaźniki świetlne – wyświetlacze LED lub LCD, które są montowane na standardowych regałach, regałach przepływowych, paletowych oraz innych urządzeniach wykorzystywanych do przechowywania towarów (Rys. 3.7). Bardzo często wspomniany system wykorzystywany jest przy kompletacji strefowej.



Rys. 3.7 System pick by light, wskazanie miejsca oraz liczby sztuk do pobrania

Źródło: <http://www.fastec.de> [106]

Proces kompletacji towarów z wykorzystaniem technologii pick by light zaczyna się od zeskanowania kodu kresowego znajdującego się na pojemniku kompletacyjnym, co oznacza gotowość pracownika do kompletacji. Następnie system wysyła wiadomość do strefy w której znajduje się magazynier i wszystkie miejsca składowania towarów znajdujących się na liście kompletacyjnej zostają podświetlone. Wyświetlacze cyfrowe wskazują magazynierowi liczbę sztuk do pobrania, po których pobraniu pracownik wyłącza przyciskiem światło, tym samym potwierdzając wykonanie czynności. Następnie magazynier udaje się do kolejnego miejsca wskazanego w ten sam sposób. Czynność jest powtarzana aż do chwili pobrania wszystkich pozycji z listy kompletacyjnej. Zdarza się, że dodatkowo przy pobraniu produktów pracownik skanuje produkt – jest to dodatkowe potwierdzenie pobranych produktów zwiększające pewność poprawności kompletacji. Głównymi zaletami systemu są:

- zminimalizowane czasu wyszukiwania produktów,
- zmniejszenie liczby błędów podczas kompletacji,
- zmiana stanu zapasów w systemie w czasie rzeczywistym,
- wysoka elastyczność na zmianę sytuacji, na przykład pilne zamówienie lub zmianę liczby sztuk wymaganych do pobrania.

3.6. Wskaźniki charakteryzujące proces kompletacji

W literaturze efektywność postrzegana jest jako ocena poprawności realizacji celu przez dany system lub jako przystosowanie systemu do realizacji zadań. Efektywność stanowi główne kryterium oceny działalności zarówno na poziomie całego systemu, podsystemu lub jego poszczególnych elementów [42].

Do oceny wydajności i efektywności procesów logistycznych bardzo często wykorzystywane są wskaźniki które obliczane są na podstawie powszechnie znanych wzorów, które w swojej pracy przytacza m.in. S. Krzyżaniak [58].

Wydajność pracy oblicza się na podstawie wzoru (32).

$$W_p = \frac{w_{om}}{\bar{l}_p} \quad (32)$$

gdzie:

W_p – wydajność pracy, jłp/pracownik lub kg/pracownik,

w_{om} – wielkość obrotu magazynowego rozumiana jako suma przyjęć i wydań, jłp lub kg,

\bar{l}_p – średnia liczba pracowników zatrudnionych w magazynie os.

Intensywność pracy magazynierów oblicza się na podstawie wzoru (33).

$$I_p = \frac{W_{om}}{l_h} \quad (33)$$

gdzie:

I_p – intensywność pracy magazyniera, jłp/roboczogodzina lub kg/roboczogodzina,

w_{om} – wielkość obrotu magazynowego rozumiana jako suma przyjęć i wydań, jłp lub kg,

l_h – liczba godzin przepracowanych przez magazyniera, roboczogodzina.

Wydajność kompletacji oblicza się na podstawie wzoru (34).

$$W_k = \frac{l_{sp}}{l_p \cdot t_{pr}} \quad (34)$$

gdzie:

W_k – wydajność kompletacji, szt./os.h,

l_{sp} – liczba skompletowanych pozycji, szt.,

l_p – liczba pracowników, os.,

t_{pr} – nominalny czas pracy, h.

Poprawność kompletacji oblicza się na podstawie wzoru (35).

$$P_k = \frac{l_{spp}}{l_{sp}} \cdot 100\% \quad (35)$$

gdzie:

P_k – poprawność kompletacji,

l_{spp} – liczba pozycji skompletowanych poprawnie, szt.,

l_{sp} – liczba skompletowanych pozycji, szt.

Koszt przejścia palety przez magazyn w skali roku oblicza się na podstawie wzoru (36).

$$K_p = \frac{K_{rm}}{P_r} \quad (36)$$

gdzie:

K_p – koszt przejścia palety przez magazyn, zł/jłp,

K_{rm} – roczny koszt magazynowania, zł,

P_r – roczny przepływ jednostek przez magazyn, jłp.

Z uwagi na problem z otrzymaniem rzeczywistych danych pozwalających na wykorzystanie powyższych wskaźników w niniejszej pracy dokonano oceny efektywności w oparciu o własną metodę. Metoda bazuje na generowaniu list kompletacji zamówień, przy określonych wartościach granicznych poszczególnych parametrów, a następnie wykorzystaniu tych list do symulacji procesu kompletacji i obliczenia czasu jej trwania. Opracowana metoda została opisana w rozdziale 4, natomiast opis jej implementacji w postaci aplikacji komputerowej w załączniku nr 1.

4. MODEL SYMULACJI I OCENY EFEKTYWNOŚCI PROCESU KOMPLETACJI ZAMÓWIEŃ

Z uwagi na trudność oceny efektywności procesu kompletacji za pomocą tradycyjnych wskaźników opisanych w podrozdziale 3.6 wynikającą z braku rzeczywistych danych przedstawiających listy kompletacji zamówień, rozmieszczenie produktów w magazynie oraz czas trwania procesu kompletacji, opracowano własną metodę oceny efektywności. Jako kryterium oceny przyjęto czas kompletacji zamówień, którego minimalizacja była celem optymalizacji.

Opracowana metoda polega na wygenerowaniu list kompletacji zamówień przy założeniu wartości granicznych, takich jak: maksymalna/minimalna liczba pozycji na liście kompletacyjnej, maksymalna/minimalna liczba sztuk danego typu produktu oraz wygenerowaniu parametrów produktów przy określeniu minimalnej i maksymalnej granicy wartości dla: wagi, objętości, popularności i liczby regałów w których produkt jest składowany. Na podstawie wygenerowanych list dokonano symulacji procesu kompletacji zamówień obliczając czas jego trwania. W celu jak najlepszego odzwierciedlenia rzeczywistości założono próbę badawczą na poziomie symulacji dla 1000 list kompletacji zamówień. Pozwoliło to na przeprowadzenie analiz statystycznych i porównania wyników dla poszczególnych metod i kryteriów klasyfikacji.

4.1. Założenia ogólne modelu

Dla opracowania metody rozmieszczenia produktów przyjęto następujące założenia określające rodzaj magazynu dla którego możliwe jest zastosowanie przedstawionej metody:

- struktura magazynu może być opisana w postaci macierzowej. Pozwala to na obliczenie odległości pomiędzy poszczególnymi punktami w magazynie z uwzględnieniem parametrów magazynu takich jak: szerokość i długość regału, szerokość korytarza pomiędzy regałami, liczbę korytarzy poprzecznych i wzdłużnych;
- magazyn nie wykorzystuje kompletacji typu „towar do człowieka” tzn. m.in. automatycznych układnic i przenośników w strefie składowania produktów. Wszystkie zamówienia są kompletowane przez pracowników wykorzystujących wózki widłowe i kompletacyjne, poruszających się w strefie składowania produktów. Początek i koniec procesu kompletacji ma miejsce w strefie pakowania;
- proces kompletacji może być wspomagany przez dowolny system WMS oraz narzędzia automatycznej identyfikacji;
- w magazynie mogą być składowane produkty o znacznych różnicach wagowych i gabarytowych;
- dopuszczalne jest istnienie w magazynie wydzielonych stref przechowywania towarów niebezpiecznych, spożywczych oraz drobnicy.

Spełnienie powyższych założeń i celów pozwoli na realizację procesów rozmieszczania i kompletacji produktów w strefie składowania w sposób szybszy i bardziej efektywny niż w przypadku planowania rozmieszczenia produktów za pomocą tradycyjnych metod. Będzie to skutkowało znacznym zwiększeniem elastyczności i efektywności funkcjonowania całego magazynu.

4.2. Zapis matematyczny struktury magazynu

Opracowana metoda może być wdrożona w większości typowych magazynów, tj. takich o rzędowym systemie przechowywania produktów w strefie składowania. Parametry regałów mogą być dowolne, natomiast istotne jest to, aby wszystkie regały były takie same – co jest istotne z uwagi na macierzowo-parametryczny opis struktury magazynu. Liczba poziomów składowania nie ma znaczenia, magazyn może posiadać zarówno jeden poziom składowania jak i więcej.

Na potrzeby opisu struktury magazynu przyjęto następujące oznaczenia:

- p – numer poziomu składowania, przy czym $p=1, \dots, N$,
- x – numer rzędu w magazynie $x=1, \dots, N$,
- y – numer regału w rzędzie $y=1, \dots, N$,
- D_{lr} – długość regału, m,
- D_{wr} – szerokość regału (jednego miejsca paletowego, długość regału podzielona przez liczbę miejsc paletowych), m,
- H_r – wysokość regału, m,
- d_{cr} – szerokość korytarza, m,
- $c_l(x)$ – liczba korytarzy przebiegających w poprzek magazynu do rzędu x ,
- $c_w(y)$ – liczba korytarzy przebiegających wzdłuż magazynu do regału y ,
- $t(p)$ – czas podnoszenia i opuszczenia wideł na dany poziom składowania (p), s,

Oprócz wymienionych parametrów konieczne jest zdefiniowanie w których miejscach znajdują się korytarze pomiędzy regałami. Do opisu struktury służy macierz przejść, tzw. macierz incydencji. W związku z tym struktura powierzchni składowania magazynu może być zapisana w postaci macierzy przejść \mathbf{W} (37).

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1y} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2y} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{x1} & r_{x2} & \cdots & r_{xy} \end{bmatrix} \quad (37)$$

gdzie:

- r – przyjmuje wartość $r(x,y) \in \{0,1\}$, przy czym $r(x,y)=0$ dla korytarzy, dla pozostałych miejsc $r(x,y)=1$,
- x – oznacza rząd w magazynie,
- y – oznacza kolejną pozycję składowania w regale w danym rzędzie (x).

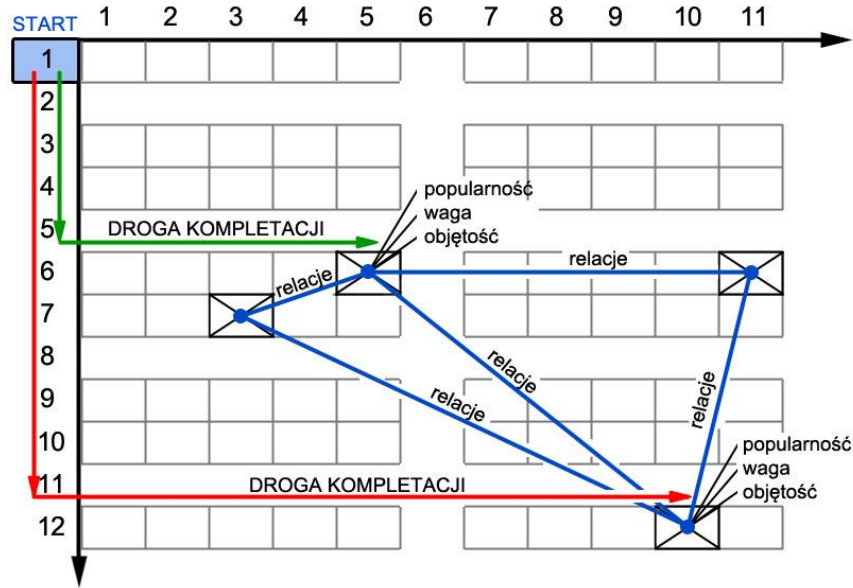
Przykładowo dla magazynu o 8 rzędach składowania i czterech trzypaletowych regałach w każdym z nich macierz opisująca strukturę magazynu przybiera postać (38):

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix}
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1
 \end{bmatrix} \quad (38)$$

Przykładowa macierz \mathbf{W} zawiera cztery korytarze wzdłuż magazynu oraz jeden korytarz w poprzek magazynu. Strefa pakowania zawsze posiada współrzędne $r(0,1)$, a więc znajduje się poza macierzą \mathbf{W} przez co jej lokalizacja nie może być pomyłona z pozycją będącą w strefie składowania towarów. Takie rozwiązanie jest bardzo często spotykane w małych i średniej wielkości magazynach. Zostało też opisane w pracy [94], w której autorzy przedstawiają własny model prognozowania czasu kompletacji zamówień. Oprócz struktury magazynu odwzorowującej powierzchnię składowania produktów istotne jest także uwzględnienie poziomów składowania. Mogą być one przedstawione za pomocą wektora odwzorowującego czas dostępu do każdego z poziomów. Czas ten jest uzależniony od wykorzystywanego do kompletacji produktów środka transportu. W pracy wykorzystano czasy odpowiadające standardowemu wózkowi podnośnikowemu czołowemu wysokiego składowania:

- podnoszenie i opuszczanie palety: 65 s,
- podnoszenie wideł: 20 s/m,
- przemieszczanie się: 12 m/min.

Macierz \mathbf{W} wraz z parametrami opisującymi strukturę magazynu w pełni odzwierciedla jego rzeczywiste parametry. W oparciu o macierz \mathbf{W} powstaje macierz \mathbf{D} odwzorowująca czasy dostępu ze strefy pakowania $r(0,1)$ do każdego regału znajdującego się w strefie składowania. Poglądowy rysunek ilustrujący powiązanie struktury z zapisem macierzowym i drogę przemieszczania się ze strefy pakowania do przykładowego regału przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1 Relacje zachodzące pomiędzy produktami znajdującymi się na liście kompletacji

Źródło: opracowanie własne

Przed uzupełnieniem macierzy **D** konieczne jest wypełnienie macierzy **W**. Czas przemieszczenia się ze strefy pakowania do dowolnego miejsca w magazynie został opisany wzorem (39) wyznaczonym na potrzeby niniejszej dysertacji.

$$t_p(x, y, p) = t_{lp}(D_{lr} \cdot (x - c_l(x)) + d_{cr} \cdot c_l(x)) + t_{lp}(D_{wr} \cdot (y - c_w(y)) + d_{cr} \cdot c_w(y)) + t_a + t(p) \quad (39)$$

gdzie:

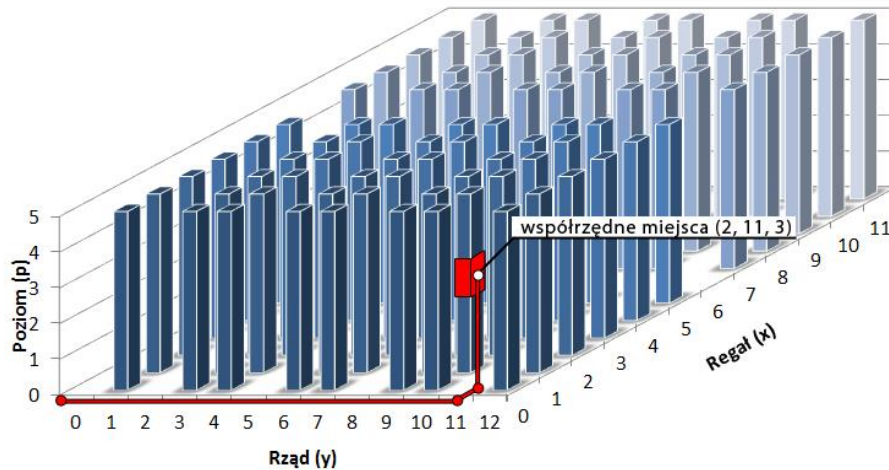
- $t_p(x, y, p)$ – czas przemieszczania się po magazynie,
- x, y – pozycje w macierzy **D** odwzorowujące rząd (x) i regał (y),
- t_{lp} – czas potrzebny na przemieszczenie się na odcinku 1 metra w linii prostej,
- t_a – czas potrzebny na pokonanie łuku (zmiany kierunku jazdy o min. 90°),
- D_{wr} – szerokość regału (jednego miejsca paletowego, długość regału podzielona przez liczbę miejsc paletowych),
- D_{lr} – długość regału,
- d_{cr} – szerokość korytarza,
- $c_l(x)$ – liczba korytarzy przebiegających w poprzek magazynu do rzędu x ,
- $c_w(y)$ – liczba korytarzy przebiegających wzdłuż magazynu do regału y .
- $t(p)$ – czas podnoszenia i opuszczenia wideł na dany poziom składowania (p).

Do dalszych obliczeń w pracy przyjęto czas podnoszenia i opuszczenia wideł na podstawie danych technicznych standardowego wózka podnośnikowego czołowego wysokiego składowania, tj: $t(p)=[0; 58; 116; 174; 232; 290; 348; 406]$.

Ponadto wymagana jest korekta czasu t_p jeśli regał znajduje się frontem do strefy pakowania ponieważ nie będzie konieczne pokonanie dodatkowej odległości równej szerokości korytarza pomiędzy rzędami. Korekta przybiera zatem postać wzoru (40).

$$\text{jeżeli } W(x, y - 1) = 0 \text{ to } t_p = t_p - t_{lp}(D_{wr} + d_{cr}) \quad (40)$$

Przykładowy układ magazynu pokazano na rysunku 4.2.



Rys. 4.2 Droga odpowiadająca obliczeniom czasu poprania produktu dla współrzędnych miejsca składowania (2, 11, 3)

Źródło: opracowanie własne

Po uzupełnieniu całej macierzy **D** czasami dostępu do danego miejsca konieczne jest wykluczenie z macierzy wartości z czasami dostępu miejsc nie będących miejscami składowania towarów w tym celu należy przemnożyć wszystkie wartości z macierzy **D** z wartościami macierzy **W** otrzymując nową macierz **T**. Przykładowo dla 12 rzędów (8 przeznaczonych na regały) po 12 regałów w każdym z nich oraz jednym korytarzem poprzecznym macierz **T** dla pierwszego poziomu składowania będzie następująco (41):

$$T = \begin{bmatrix} 6,6 & 8,4 & 10,2 & 12,0 & 13,8 & 15,6 & 0 & 19,2 & 21,0 & 22,8 & 24,6 & 26,4 & 28,2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6,6 & 8,4 & 10,2 & 12,0 & 13,8 & 15,6 & 0 & 19,2 & 21,0 & 22,8 & 24,6 & 26,4 & 28,2 \\ 17,8 & 19,6 & 21,4 & 23,2 & 25,0 & 26,8 & 0 & 30,4 & 32,2 & 34,0 & 35,8 & 37,6 & 39,4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 17,8 & 19,6 & 21,4 & 23,2 & 25,0 & 26,8 & 0 & 30,4 & 32,2 & 34,0 & 35,8 & 37,6 & 39,4 \\ 29,0 & 30,8 & 32,6 & 34,4 & 36,2 & 38,0 & 0 & 41,6 & 43,4 & 45,2 & 47,0 & 48,8 & 50,6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 29,0 & 30,8 & 32,6 & 34,4 & 36,2 & 38,0 & 0 & 41,6 & 43,4 & 45,2 & 47,0 & 48,8 & 50,6 \\ 40,2 & 42,0 & 43,8 & 45,6 & 47,4 & 49,2 & 0 & 52,8 & 54,6 & 56,4 & 58,2 & 60,0 & 61,8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 40,2 & 42,0 & 43,8 & 45,6 & 47,4 & 49,2 & 0 & 52,8 & 54,6 & 56,4 & 58,2 & 60,0 & 61,8 \end{bmatrix} \quad (41)$$

Dzięki wyznaczeniu macierzy **T** możliwe jest uporządkowanie poszczególnych regałów według ich znaczenia za pomocą uszeregowania wartości czasów dostępu od najniższych do najwyższych. Regały o najkrótszym czasie dostępu będą mogły posłużyć do przechowywania kluczowych towarów. Na rysunku 4.3 zaznaczono poszczególne strefy składowania towarów przypisując im kolory odpowiadające ważności danego miejsca. Kolory odpowiadają procentowemu udziałowi według najwyższej wartości czasu dostępu do regału (10 grup po 10% każda).

4.3. Metoda rozmieszczenia produktów w magazynie z uwzględnieniem ich klas

Planowanie rozmieszczenia produktów w oparciu o klasy polega na wydzieleniu w strefie składowania podstref przypisanych do przechowywania produktów danej grupy. Strefy te są wydzielane w taki sposób, aby liczba regałów przeznaczonych do składowania produktów danej kategorii odpowiadała zapotrzebowaniu na składowane produkty danej klasy – warunek podstawowy. Ponadto istotne jest, by strefa została tak wydzielona, aby czas dostępu do każdego miejsca w regale znajdującym się w strefie A był krótszy bądź równy najkrótszemu czasowi dostępu do regału w strefie B, itd. Co można przedstawić za pomocą nierówności (42).

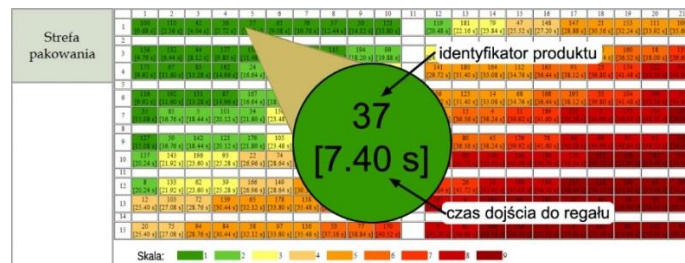
$$\forall_{r \in K} t_d \leq \forall_{r \in K+1} t_d \quad \text{gdzie } K \in \{1, 2, 3\} \quad (42)$$

gdzie:

- r – lokalizacja w regale,
- K – kategoria składowania towarów,
- t_d – czas dostępu do regału [s].

W celu wyznaczenia podstrefy przeznaczonej do przechowywania produktów danej kategorii konieczne jest obliczenie czasu dostępu ze strefy pakowania do każdego regału osobno. Następnie konieczne jest utworzenie macierzy przechowującej współrzędne miejsca składowania w regale z czasem dostępu do niego oraz uszeregowanie jej wartości rosnąco według czasu dostępu. Kolejnym krokiem jest wybranie tylu najniższych wartości, aby zapewnić odpowiednią liczbę miejsc składowania do przechowywania towarów klasy A. Następnie wybranie tylu kolejnych najniższych wartości, aby zapewnić miejsce dla towarów klasy B, itd. W oparciu o tak przypisane miejsca składowania do kategorii produktów możliwe jest umieszczenie towarów na właściwych lokalizacjach.

Rozmieszczenie produktów na regałach wewnątrz grupy najczęściej opiera się o zasadę najbliższego wolnego miejsca – produkty nie mają zatem stałego miejsca przechowywania. Jest to podstawowa różnica pomiędzy systemem składowania w oparciu o grupy, a systemem stałych miejsc składowania. Produkty danego typu mogą zmieniać swoje położenie wraz z upływem czasu, co jest spowodowane naturalnymi procesami wydań i przyjęć towaru. Przykład rozmieszczenia produktów wewnątrz dziewięciu kategorii przedstawiono na rysunku 4.4.



Rys. 4.4 Przykład rozmieszczenia produktów w magazynie wraz ze wskazaniem czasu dostępu

Źródło: opracowanie własne

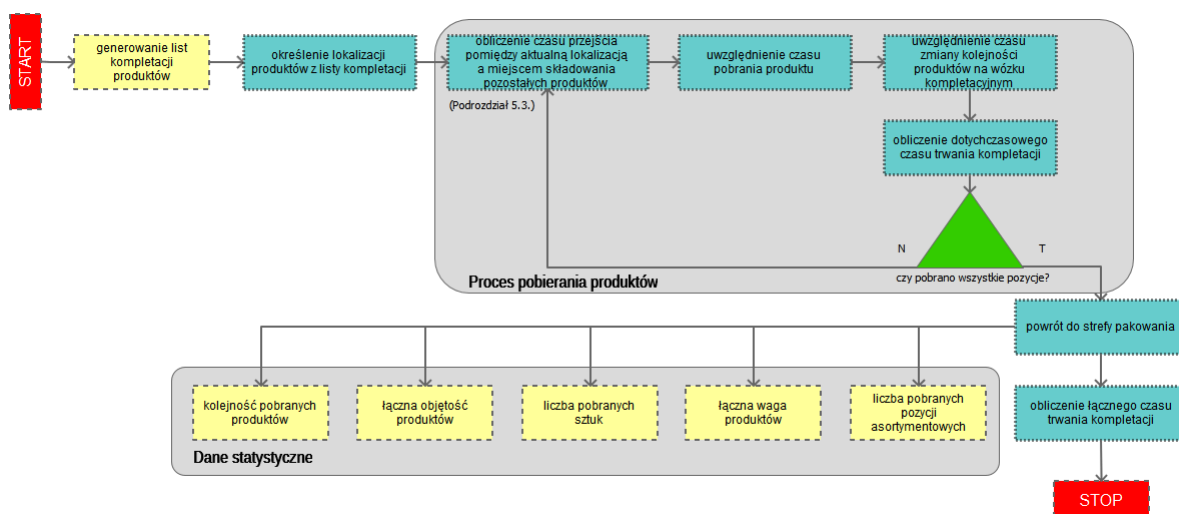
Na rysunku 4.4 przedstawiono strukturę magazynu z podziałem produktów na dziewięć kategorii. W zakolorowanych polach oznaczających miejsca w regałach podano dwie wartości. Pierwsza z nich oznacza identyfikator produktu, natomiast druga w nawiasach prostokątnych oznacza czas dostępu do lokalizacji ze strefy pakowania.

4.4. Algorytm metody oceny efektywności procesu kompletacji zamówień

Ocena efektywności procesów magazynowych może być dokonywana pod kątem różnych kryteriów, np. czasu trwania kompletacji, drogi kompletacji, zasobochłonności (pracy ludzkiej, kosztów, środków transportowych). W niniejszej pracy przyjęto jako kryterium oceny efektywności czas trwania kompletacji. Na jego podstawie wyłoniono te metody klasyfikacji produktów, które pozwalają na osiągnięcie najlepszych wyników – najmniejszych czasów trwania kompletacji. Wybrane metody zostały także ocenione pod kątem korzyści finansowych wynikających z ich wdrożenia (podrozdział 6.4).

W celu oceny efektywności procesu kompletacji wynikającego z zastosowanej metody rozmieszczenia produktów w magazynie – a zatem do pośredniej oceny efektywności tej metody – należy posłużyć się modelem pozwalającym z dużą dokładnością odzwierciedlić procesy zachodzące w rzeczywistym magazynie. W związku z tym posłużono się metodą odzwierciedlającą zamówienia klientów podlegające procesowi kompletacji w magazynach, tj. wykorzystującą losowe listy kompletacji produktów.

W oparciu o wygenerowane listy kompletacji dokonano wyznaczenia trasy kompletacji produktów przyjmując metodę wykorzystywaną przez większość średniej wielkości przedsiębiorstw posiadających własne magazyny, tj. wyznaczanie trasy kompletacji w oparciu o najbliższy punkt względem bieżącej lokalizacji magazyniera [88]. Metoda uwzględnia także konieczność ingerencji w kolejność produktów na wózku kompletacyjnym w przypadku powstania ryzyka zgniecenia produktu mniejszego przez większy – wrażliwości na piętrzenie. Blokowy schemat algorytmu przedstawiono na rysunku 4.5.



Rys. 4.5 Schemat blokowy algorytmu oceny efektywności procesu kompletacji zamówień

Źródło: opracowanie własne

Opis działania algorytmu wyznaczającego drogę kompletacji można przedstawić w kilku krokach. Na początku, losowo wybierany jest identyfikator produktu spośród wszystkich dostępnych. Następnie wybierane są współrzędne produktu o tym identyfikatorze znajdujące się najbliżej (względem czasu dostępu) miejsca początkowego (strefy pakowania) oznaczonego jako lokalizacja $(0, 0, 0)$. Czas dostępu jest w tym przypadku odczytywany z wygenerowanej w procesie tworzenia struktury magazynu macierzy czasów dostępu. Współrzędne punktu docelowego są przechowywane w trzech zmiennych x_{do} (regal), y_{do} (rzęd), p_{do} (poziom). Czas przemieszczenia się z jednego miejsca do drugiego jest

dodawany do całkowitego czasu kompletacji zamówienia. Następnie losowana jest liczba sztuk produktu z ustalonego przedziału. Przy czym jest ona powiązana z całkowitą liczbą sprzedanych sztuk za pomocą współczynnika korekty i zapisana za pomocą funkcji PHP (43).

$$\begin{aligned} \$l_sztuk = \text{ceil}(\text{rand}(\$min_prod_kompl \cdot \$wynik_ratio \cdot 100, \\ \$max_prod_kompl \cdot \$wynik_ratio \cdot 100)) \end{aligned} \quad (43)$$

gdzie:

- ceil – jest funkcją zaokrąglającą ułamki dziesiętne w górę do wartości całkowitych,
- rand – jest funkcją losującą wartość z przedziału (min, max),
- $\$min_prod_kompl$ – jest ustaloną wartością minimalną,
- $\$max_prod_kompl$ – jest ustaloną wartością maksymalną,
- $\$wynik_ratio$ – jest współczynnikiem korekty, w postaci ułamku dziesiętnego, współczynnik jest stosunkiem sprzedanych produktów o danym identyfikatorze do liczby sprzedanych sztuk wszystkich produktów.

Oprócz obliczenia czasu trwania kompletacji zamówienia opracowany algorytm symulacji procesu kompletacji pozwala także na uzyskanie informacji o kolejności pobranych produktów oraz informacji statystycznych o zamówieniu, tj. łącznej objętości i wagi produktów, liczby pobranych sztuk oraz liczby pozycji asortymentowych w zamówieniu.

4.5. Algorytm wyznaczania czasu kompletacji zamówień

W kolejnym kroku losowany jest następny identyfikator produktu jednak tym razem czas dostępu do niego nie jest odczytywany z wspomnianej wcześniej macierzy czasów dostępu przechowującej czasy liczone od miejsca początkowego (strefy pakowania). W związku z tym czas przemieszczania się pomiędzy aktualną lokalizacją magazyniera, a miejscem składowania kolejnego produktu jest przeliczany na bieżąco. Z uwagi na dużą liczbę powiązań nie jest możliwe wygenerowanie macierzy zawierającej takie czasy. Konieczne byłoby w takim przypadku wygenerowanie tylu macierzy ile jest współrzędnych określających miejsce położenia produktu. Zatem dla magazynu o 40 regałach przechowujących po trzy palety na każdym poziomie, 10 rzędach i trzech poziomach składowania, konieczne byłoby opracowanie 3600 macierzy o wymiarach 120x10, co byłoby rozwiązaniem nieefektywnym.

Algorytm wyznaczania czasu kompletacji zamówień można opisać w następujących krokach:

Krok 1 - W pierwszym kroku obliczania czasu kompletacji obliczana jest wartość bezwzględna z różnicy pomiędzy punktem początkowym, a końcowym (44) dla regałów i rzędów.

$$\begin{aligned} x_{temp} &= |x_{pocz} - x_{konc}| \\ y_{temp} &= |y_{pocz} - y_{konc}| \end{aligned} \quad (44)$$

gdzie:

- x_{temp} – różnica pomiędzy punktem początkowym a końcowym (regały),
- y_{temp} – różnica pomiędzy punktem początkowym a końcowym (rzędy),

x_{pocz} – regał początkowy,

x_{konc} – regał końcowy,

y_{pocz} – rząd początkowy.

y_{konc} – rząd końcowy.

Krok 2 - W drugim kroku sprawdzane jest (45) czy regały znajdują się w tym samym rzędzie i czy nie jest to rząd wychodzący bezpośrednio ze strefy pakowania – punktu początkowego.

$$x_{temp} \neq 0 \text{ oraz } x_{temp} \neq 2 \quad (45)$$

Krok 3 - Jeżeli warunek w kroku 2 został spełniony to w obliczeniu czasu należy uwzględnić dwa łuki $l_{luk} = 2$. Ponadto z uwagi na to, że w rozważanym magazynie wykorzystywane są regały dwurzędowe (co trzeci rząd jest korytarzem pomiędzy regałami) do których zapewniony jest stały dostęp to konieczne jest uwzględnienie liczby występujących korytarzy wzdłużnych (46).

$$l_{korwz} = \frac{y_{temp}}{3} \quad (46)$$

gdzie:

l_{korwz} – jest wartością całkowitoliczbową korytarzy wzdłużnych, zaokrąglaną w górę.

W takim przypadku długość drogi w poprzek magazynu opisuje wzór (47).

$$dr_{poprz} = D_{wr} (y_{temp} - l_{korwz}) + d_{cr} \cdot l_{korwz} \quad (47)$$

gdzie:

dr_{poprz} – długość drogi w poprzek magazynu,

D_{wr} – szerokość regału (jednego miejsca paletowego, długość regału podzielona przez liczbę miejsc paletowych),

d_{cr} – szerokość korytarza,

Krok 4 - Analizowany magazyn posiada jeden korytarz poprzeczny, zatem przed obliczeniem drogi wzdłuż magazynu należy sprawdzić czy oba punkty znajdują się w tej samej czy innej strefie magazynu, tj. oddzielonej korytarzem (48).

$$\left(x_{pocz} \leq \frac{l_{reg}}{2} \text{ oraz } x_{konc} > \frac{l_{reg}}{2} \right) \text{ lub } \left(x_{konc} \leq \frac{l_{reg}}{2} \text{ oraz } x_{pocz} > \frac{l_{reg}}{2} \right) \quad (48)$$

gdzie:

l_{reg} – liczba regałów w rzędzie.

Krok 5 - Jeżeli warunek w kroku 4 jest spełniony to drogę wzdłuż magazynu (d_{rwzd}) należy obliczyć ze wzoru (49).

$$d_{rwzd} = D_{lr} \cdot d_{cr} \left(|x_{pocz} - x_{konc}| - 1 \right) \quad (49)$$

gdzie:

d_{rwzd} – długość drogi wzdłuż magazynu,

D_{lr} – długość regału.

Krok 6 – Jeżeli warunek w kroku 4 nie jest spełniony to należy sprawdzić w której strefie magazynu (przed czy za korytarzem poprzecznym) znajdują się oba rozważane punkty (50).

$$x_{pocz} < \frac{l_{reg}}{2} \quad (50)$$

Krok 7 – Jeżeli warunek w kroku 6 jest pełniony to oba punkty znajdują się w pierwszej strefie magazynu, zatem jeżeli:

$$D_{lr} \cdot d_{cr}(x_{pocz} + x_{konc}) < D_{lr} \cdot d_{cr}(l_{reg} - x_{pocz} - x_{konc}) \quad (51)$$

to:

$$dr_{wzd} = D_{lr} \cdot d_{cr}(x_{pocz} + x_{konc}) \quad (52)$$

w przeciwnym przypadku:

$$dr_{wzd} = D_{lr} \cdot d_{cr}(l_{reg} - x_{pocz} - x_{konc}) \quad (53)$$

Krok 8 - Jeżeli warunek w kroku 6 nie jest spełniony to oba punkty znajdują się w drugiej strefie magazynu, zatem jeżeli:

$$D_{lr} \cdot d_{cr}(x_{pocz} + x_{konc} - l_{reg}) < D_{lr} \cdot d_{cr}(2l_{reg} - x_{pocz} - x_{konc}) \quad (54)$$

to:

$$dr_{wzd} = D_{lr} \cdot d_{cr}(x_{pocz} + x_{konc} - l_{reg}) \quad (55)$$

w przeciwnym przypadku:

$$dr_{wzd} = D_{lr} \cdot d_{cr}(2l_{reg} - x_{pocz} - x_{konc}) \quad (56)$$

Krok 9 - Jeżeli warunek w kroku 2 nie został spełniony to w obliczeniu czasu nie należy uwzględniać łuków $l_{luk}=0$, ani długości drogi w korytarzu poprzecznym $dr_{poprz}=0$. Zatem długość pokonywanej drogi w korytarzu wzdłużnym jest zależna od tego czy oba punkty znajdują się w tej części magazynu, czy są oddzielone korytarzem (57). Zatem jeżeli:

$$\left(x_{pocz} \leq \frac{l_{reg}}{2} \text{ oraz } x_{konc} > \frac{l_{reg}}{2} \right) \text{ lub } \left(x_{konc} \leq \frac{l_{reg}}{2} \text{ oraz } x_{pocz} > \frac{l_{reg}}{2} \right) \quad (57)$$

to punkty znajdują się w różnych częściach magazynu, więc:

$$dr_{wzd} = D_{lr} \cdot d_{cr}(x_{konc} - 1) \quad (58)$$

w przeciwnym przypadku:

$$dr_{wzd} = D_{lr} \cdot x_{konc} \quad (59)$$

Krok 10 – W oparciu o obliczoną drogę kompletacji należy obliczyć czas jej trwania w oparciu o wzór (60).

$$t_p = t_{lp}(dr_{wzd} + dr_{poprz}) + t_a \cdot l_{luk} + t_p \quad (60)$$

gdzie:

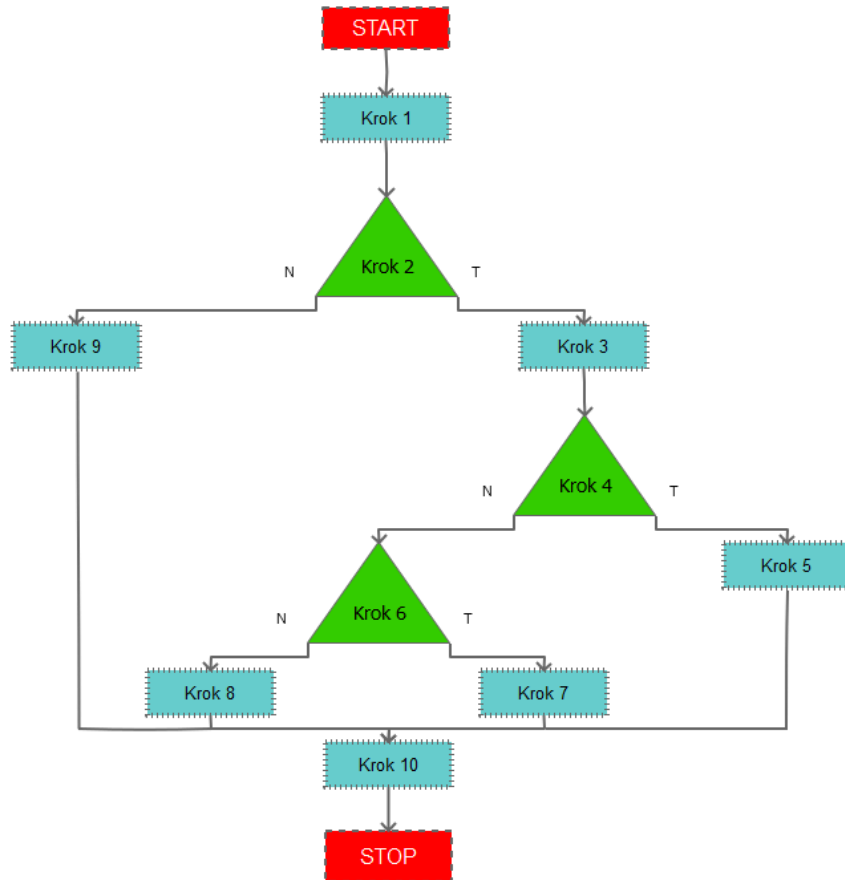
t_p – czas przemieszczania się po magazynie,

t_{lp} – czas potrzebny na przemieszczenie się na odcinku 1 metra w linii prostej,

t_a – czas potrzebny na pokonanie łuku,

t_p – czas unosu i opuszczenia wideł na dany poziom składowania (p).

Schemat blokowy pokazujący omówiony algorytm przedstawiono na rysunku 4.6.



Rys. 4.6 Schemat postępowania przy obliczaniu czasu pokonania drogi pomiędzy dwoma punktami

Źródło: opracowanie własne

Implementacja opisanego modelu w postaci komputerowej o nazwie SPKZ została przedstawiona w załączniku nr 1.

5. OCENA WPŁYWU DOBORU KRYTERIÓW KLASYFIKACJI PRODUKTÓW NA CZAS PROCESU KOMPLETACJI ZAMÓWIEŃ

5.1. Dane do przeprowadzenia analizy – ustalenie wariantów

Do przeprowadzenia oceny wpływu doboru kryteriów podziału produktów na efektywność procesu kompletacji założono wykorzystanie magazynu o najczęściej spotykanym układzie tj. składowania w regałach rzędowych. Założono dwa przypadki magazynów, różniących się od siebie wielkością. Analizując oferty wynajmu powierzchni magazynowej [112] oraz ich ceny zauważono zmianę znaczącą zmianę ceny magazynu za metr dla powierzchni większych niż 5 000 m³, w związku z czym założono, tą wartość jako graniczną pomiędzy magazynami małymi, a dużymi.

Pierwszy nazywany w dalszej części dysertacji magazynem małym posiada 10 rzędów, po 120 miejsc w każdym rzędzie oraz 4 poziomy składowania. Taki układ pozwala na przechowywanie jednocześnie 4 800 jednostek paletowych. Powierzchnia składowania dla tego magazynu wynosi 4 000 m³.

Drugi nazywany w dalszej części dysertacji magazynem dużym posiada 14 rzędów, po 200 miejsc w rzędzie i 6 poziomów składowania. Taki układ pozwala na przechowywanie jednocześnie 50 400 jednostek paletowych. Powierzchnia składowania dla tego magazynu wynosi 9 400 m³.

W obu magazynach założono jeden dodatkowy korytarz poprzeczny. Szerokość korytarzy przyjęto na poziomie 2,8 m co odpowiada przepisom BHP oraz pozwala na przemieszczanie się standardowych wózków paletowych posiadających własny napęd. Każdy regał pozwala przechowywać 3 europalety na jednym poziomie składowania.

Większość firm posiadających magazyny nie archiwizuje danych dotyczących list kompletacji zamówień, rozmieszczenia produktów w magazynie i ich parametrów. Przechowywane są jedynie dane dotyczące wielkości sprzedaży. Ponadto firmy niechętnie udostępniają tego typu dane. W związku z powyższym w wykonanych symulacjach wykorzystano dane generowane losowo, ale determinowane poprzez graniczne wartości minimalne i maksymalne, których wartości zostały skonsultowane ze specjalistami z branży magazynowej. Zaproponowana metoda jest rozwiązaniem opracowanym na potrzeby niniejszej dysertacji, pozwalającym na przeprowadzenie badań symulacyjnych w przypadku braku dostępu do rzeczywistych danych.

Jako wartości graniczne stanowiące punkt odniesienia przyjęto:

- maksymalną liczbę pozycji asortymentowych na zamówieniu: 20 szt.,
- minimalną liczbę pozycji asortymentowych na zamówieniu: 3 szt.,
- maksymalną liczbę sztuk dla pozycji asortymentowej: 60 szt.,
- minimalną liczbę sztuk dla pozycji asortymentowej: 1 szt.,
- maksymalną wagę produktu: 6,0 kg,
- minimalną wagę produktu: 0,1 kg,
- maksymalną objętość produktu: 0,4 m³,
- minimalną objętość produktu: 0,1 m³,
- maksymalną liczbę miejsc zajmowana przez jeden rodzaj produktu: 8 szt.

W symulacjach dokonywano procentowej zmiany maksymalnych wielkości powyższych parametrów o 0,5% ustalając dolną granicę wartości. Następnie dokonano

modyfikacji tych parametrów kolejno o: 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%, 200%, 300%, 400%, 500%.

Dla każdego przypadku analizy bazowano na zbiorze danych, na który składało się 1000 list kompletacji zamówień dla każdego miesiąca wygenerowanych przez aplikację SPKZ.

W symulacjach wykorzystano analizę ABC, ABC połączoną z XYZ oraz Index COI. Analiza EIQ nie została rozważana ze względu trudności w przygotowaniu danych wejściowych i brak dostępu do odpowiednich danych rzeczywistych, ponadto nie jest ona powszechnie stosowana w praktyce. Analizę AHP pominięto z uwagi na brak możliwości jej praktycznego wykorzystania w przypadku, gdy liczba produktów w asortymencie przekracza kilkadziesiąt typów, a więc zdecydowana większość typowych magazynów.

Analizę wykonano dla dwóch wariantów:

- **Wariant I** – zakładający, że nie ma konieczności przekładania produktów na wózek kompletacyjnym w trakcie całego procesu kompletacji,
- **Wariant II** – zakładający, że istnieje konieczność przekładania produktów na wózek kompletacyjnych w trakcie procesu kompletacji. Konieczność ta jest uzależniona od wagi, objętości produktów i rodzaju opakowania (ich podatności na piętrzenie) – w przypadku ryzyka uszkodzenia produktu na niższym poziomie wózka przez produkt znajdujący się nad nim konieczne jest zamienienie produktów kolejnością.

Ponadto dla każdego z głównych wariantów rozważono przypadki piętrzenia ładunków. Zestawienie różnic pomiędzy tak rozważanymi wariantami przedstawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Zestawienie różnic w analizowanych wariantach

Wariant	Struktura magazynu	Liczba typów produktów	Podatność na piętrzenie ⁶
Wariant IA	Rzędów: 10		Tak
Wariant IIA	Miejsc w rzędzie: 120 Poziomów składowania: 4	600	Nie
Wariant IB	Rzędów: 14		Tak
Wariant IIB	Miejsc w rzędzie: 200 Poziomów składowania: 6	1000	Nie

Źródło: opracowanie własne

Do przeprowadzenia oceny wpływu doboru kryteriów podziału produktów na efektywność procesu kompletacji wykorzystano wzór (61) przytoczony przez W. Rogowskiego [96].

$$ww = \frac{\frac{k_i - k_b}{k_b}}{\frac{z_i - z_b}{z_b}} \quad (61)$$

gdzie:

ww – współczynnik wrażliwości na zmianę wartości zmiennej objaśniającej z ,

k_i – czas kompletacji przy i -tej wartości zmiennej z_i ,

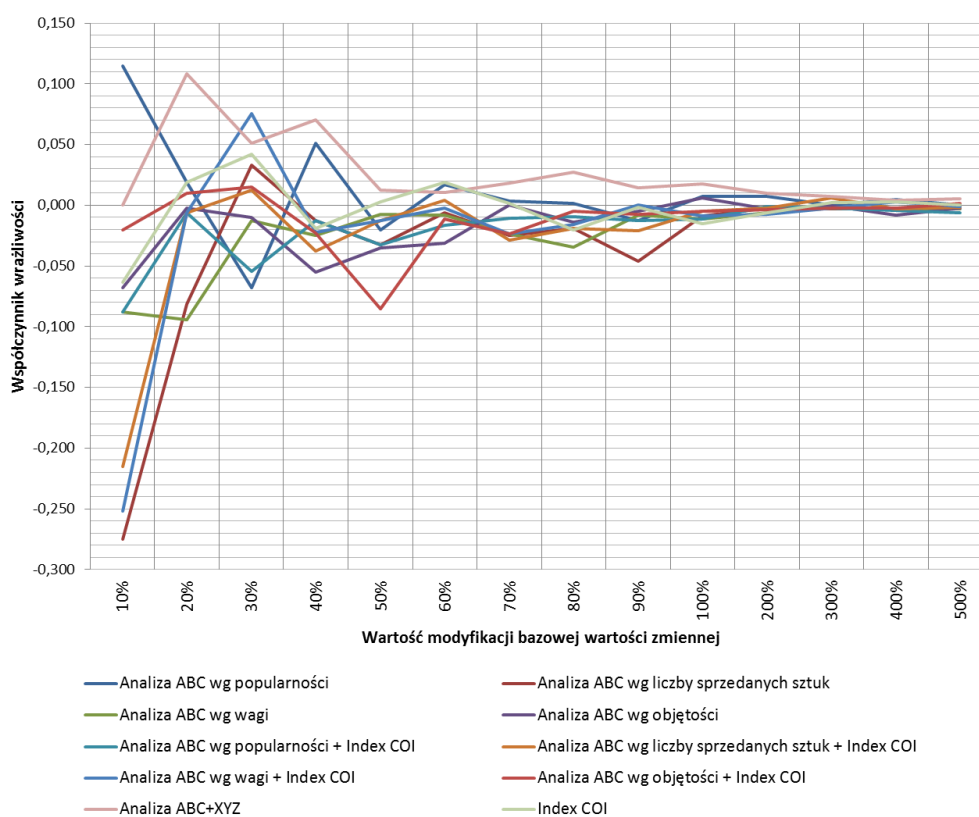
⁶ Jako podatność na piętrzenie rozumie się piętrzenie bezpośrednie na wózku kompletacyjnym. Definicję przedstawiono w podrozdziale 1.1.

- k_b – czas kompletacji dla zmiennej z_b ,
- z_i – i -ta wartość zmiennej objaśniającej,
- z_b – wartość bazowa zmiennej z .

5.1.1. Wariant IA oraz wariant IIA

Dla wariantu I w tabeli 5.2 przedstawiono sumaryczne zestawienie wyników przeprowadzonej symulacji kompletacji produktów, natomiast w tabeli 5.3 przedstawiono wartości współczynnika wrażliwości.

Przeprowadzona ocena wpływu doboru kryteriów podziału produktów na efektywność procesu kompletacji dla Wariantu IA wykazała, że zmiana wielkości kryteriów klasyfikacji nie ma istotnego znaczenia. Wartości współczynnika wrażliwości znajdują się w przedziale pomiędzy -0,275 a 0,229 i cechują się odchyleniem standardowym wynoszącym 0,046, natomiast wartość średniej i mediany wynoszą kolejno -0,011 oraz -0,001. W związku z tym, że wielkości współczynnika wrażliwości są stosunkowo małe można stwierdzić, że każda z powyższych analiz może mieć zastosowanie niezależnie od średniej i odchylenia standardowego wykorzystanych danych. Zauważalny jest fakt, że w wyniku zwiększenia parametrów wejściowych o 10% nastąpiło skrócenie czasu kompletacji produktów dla ich rozmieszczenia z wykorzystaniem współczynnika COI. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 5.1.



Rys. 5.1 Wariant IA – zależność współczynnika wrażliwości od parametrów
 Źródło: opracowanie własne

Tabelaryczne zestawienie wyników oceny wpływu doboru kryteriów podziału produktów na efektywność procesu kompletacji dla wariantu IIA przedstawiono w tabeli 5.4 oraz tabeli 5.5.

Tabela 5.2 Wariant IA - czas kompletacji produktów w wyniku modyfikacji zmiennej objaśniającej

Analiza	Kryterium analizy	Średni czas kompletacji produktów dla 1000 list kompletacji w wyniku modyfikacji bazowej wartości parametru α :														
		[s]														
		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	200%	300%	400%	500%
Analiza ABC	Popularność	792	786	795	789	770	802	778	794	788	787	777	796	798	787	801
	Liczba sprzedanych sztuk	786	800	778	787	808	796	787	797	786	788	767	786	796	793	790
	Waga	788	797	790	782	794	789	794	793	784	775	791	791	787	792	787
	Objętość	797	795	768	794	791	773	781	770	795	784	791	788	790	794	770
Analiza ABC + Index COI	Popularność	796	799	792	798	786	795	786	791	793	793	790	798	797	794	785
	Liczba sprzedanych sztuk	789	791	774	790	794	779	786	793	775	779	776	791	787	805	782
	Waga	789	794	774	793	812	787	789	793	781	784	794	795	782	788	804
	Objętość	788	797	789	801	803	788	763	788	778	793	791	779	791	791	790
Analiza ABC+XYZ	Popularność, sezonowość	807	785	785	802	797	807	790	790	795	802	795	795	801	803	797
Index COI	Popularność, waga	790	790	785	793	800	784	791	799	791	777	789	787	780	795	798

Źródło: opracowanie własne

Tabela 5.3 Wariant IA – wartości współczynnika wrażliwości

Analiza	Kryterium analizy	Wartość współczynnika wrażliwości dla modyfikacji bazowej wartości parametru o:														
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	200%	300%	400%	500%	Średnia
Analiza ABC	Popularność	0,115	0,019	-0,068	0,051	-0,020	0,017	0,004	0,002	-0,013	0,008	0,008	0,000	0,005	0,001	0,009
	Liczba sprzedanych sztuk	-0,275	-0,081	0,033	-0,013	-0,033	-0,006	-0,025	-0,019	-0,046	-0,018	-0,003	-0,003	-0,003	-0,001	-0,275
	Waga	-0,088	-0,094	-0,013	-0,025	-0,008	-0,008	-0,023	-0,035	-0,008	-0,008	-0,006	-0,002	-0,003	-0,003	-0,088
	Objętość	-0,068	-0,003	-0,010	-0,055	-0,035	-0,031	0,000	-0,014	-0,005	-0,009	-0,003	0,000	-0,008	-0,002	-0,068
Analiza ABC + Index COI	Popularność	-0,088	-0,006	-0,054	-0,013	-0,033	-0,017	-0,011	-0,009	-0,013	-0,001	-0,001	-0,002	-0,004	-0,006	-0,088
	Liczba sprzedanych sztuk	-0,215	-0,006	0,013	-0,038	-0,013	0,004	-0,029	-0,019	-0,021	0,000	-0,003	0,006	-0,003	-0,002	-0,215
	Waga	-0,252	-0,006	0,076	-0,022	-0,013	-0,002	-0,023	-0,016	0,000	0,001	-0,008	-0,003	0,003	-0,001	-0,252
	Objętość	-0,020	0,010	0,015	-0,023	-0,085	-0,011	-0,024	-0,005	-0,008	-0,023	-0,004	-0,003	-0,002	0,002	-0,020
Analiza ABC+XYZ	Popularność, sezonowość	0,000	0,108	0,051	0,070	0,013	0,011	0,018	0,027	0,014	0,013	0,010	0,008	0,004	0,005	0,000
Index COI	Popularność	-0,063	0,019	0,042	-0,019	0,003	0,019	0,002	-0,021	-0,001	-0,004	-0,006	0,002	0,003	0,001	-0,063

Źródło: opracowanie własne

Tabela 5.4 Wariant IIA - czas kompletacji produktów w wyniku modyfikacji zmiennej objaśniającej

Analiza	Kryterium analizy	Średni czas kompletacji produktów dla 1000 list kompletacji w wyniku modyfikacji bazowej wartości parametru o: [s]														
		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	200%	300%	400%	500%
Analiza ABC	Popularność	835	881	850	833	825	846	833	838	834	831	821	844	847	837	897
	Liczba sprzedanych sztuk	832	897	833	842	863	851	842	852	836	839	817	834	846	840	877
	Waga	853	944	878	859	882	877	871	870	862	851	866	864	872	866	931
	Objętość	848	920	834	860	857	839	847	836	856	843	866	845	853	792	882
Analiza ABC + Index COI	Popularność	847	927	869	875	852	872	852	857	858	860	854	861	869	859	908
	Liczba sprzedanych sztuk	841	913	840	856	871	845	852	859	840	843	839	854	854	863	893
	Waga	855	946	862	881	900	875	877	870	860	865	868	869	868	862	950
	Objętość	843	937	866	878	880	865	840	856	850	864	857	846	868	859	927
Analiza ABC+XYZ	Popularność, sezonowość	851	875	829	857	841	862	845	839	842	852	841	840	854	848	889
Index COI	Popularność, waga	843	941	873	870	888	872	879	873	868	856	863	861	865	870	947

Źródło: opracowanie własne

Tabela 5.5 Wariant IIA – wartości współczynnika wrażliwości

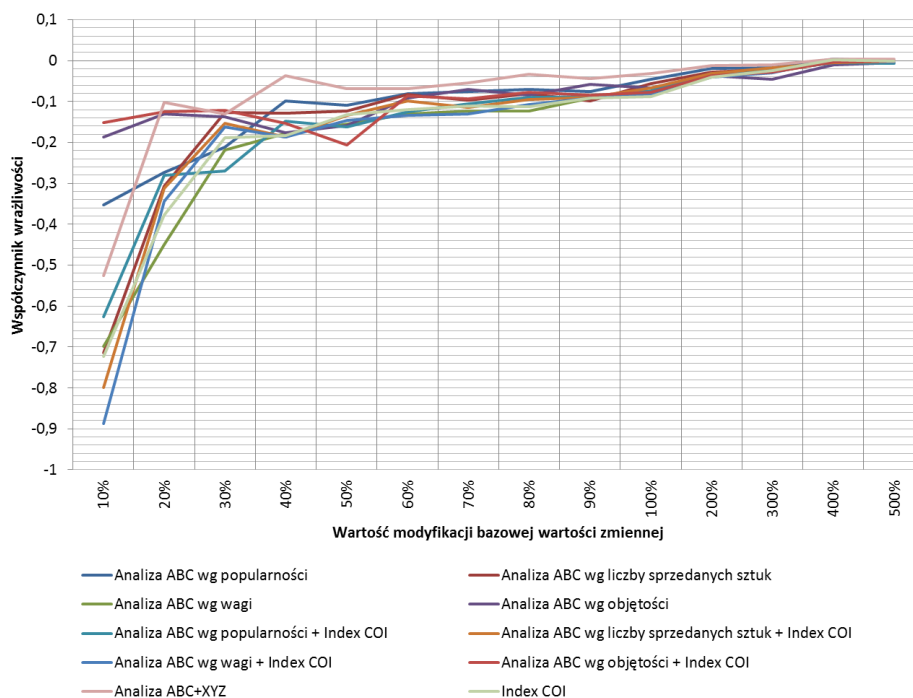
Analiza	Kryterium analizy	Wartość współczynnika wrażliwości dla modyfikacji bazowej wartości parametru o:														
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	200%	300%	400%	500%	Średnia
Analiza ABC	Popularność	-0,352	-0,272	-0,212	-0,099	-0,109	-0,081	-0,076	-0,071	-0,076	-0,054	-0,019	-0,017	0,005	-0,001	-0,102
	Liczba sprzedanych sztuk	-0,713	-0,307	-0,126	-0,128	-0,123	-0,084	-0,097	-0,081	-0,099	-0,070	-0,028	-0,021	-0,006	-0,002	-0,713
	Waga	-0,699	-0,450	-0,219	-0,177	-0,155	-0,131	-0,124	-0,123	-0,092	-0,085	-0,038	-0,028	-0,003	-0,004	-0,699
	Objętość	-0,187	-0,130	-0,137	-0,176	-0,159	-0,091	-0,070	-0,084	-0,059	-0,082	-0,036	-0,046	-0,010	-0,006	-0,187
Analiza ABC + Index COI	Popularność	-0,626	-0,280	-0,270	-0,148	-0,162	-0,126	-0,106	-0,090	-0,087	-0,071	-0,031	-0,024	-0,005	-0,007	-0,626
	Liczba sprzedanych sztuk	-0,800	-0,312	-0,153	-0,186	-0,134	-0,099	-0,114	-0,096	-0,090	-0,065	-0,032	-0,018	-0,005	-0,002	-0,800
	Waga	-0,888	-0,344	-0,162	-0,188	-0,146	-0,134	-0,130	-0,107	-0,092	-0,081	-0,041	-0,030	0,001	-0,003	-0,888
	Objętość	-0,152	-0,126	-0,122	-0,154	-0,207	-0,086	-0,093	-0,078	-0,085	-0,097	-0,037	-0,028	-0,003	-0,001	-0,152
Analiza ABC+XYZ	Popularność, sezonowość	-0,526	-0,103	-0,130	-0,037	-0,069	-0,069	-0,054	-0,033	-0,043	-0,040	-0,012	-0,010	0,004	0,003	-0,526
Index COI	Popularność	-0,723	-0,377	-0,188	-0,183	-0,132	-0,120	-0,111	-0,113	-0,092	-0,085	-0,040	-0,025	0,002	-0,002	-0,723

Źródło: opracowanie własne

Przeprowadzona ocena wpływu doboru kryteriów podziału produktów na efektywność procesu kompletacji dla Wariantu IIA (tabela 5.4 oraz tabela 5.5) wykazała, że podobnie jak w Wariacie I zmiana wielkości parametrów determinujących cechy produktów nie ma istotnego znaczenia. Wartości współczynnika wrażliwości znajdują się w przedziale pomiędzy -0,89 a 0,01 i cechują się odchyleniem standardowym wynoszącym 0,159, natomiast wartość średniej i mediany wynoszą kolejno -0,128 oraz -0,091. Zauważalne jest także zmniejszenie wpływu modyfikacji wartości zmiennej bazowej na współczynnik wrażliwości. Kluczowe znaczenie ma w tym przypadku uwzględnianie dodatkowego czasu na przeładunek produktów na wózek kompletacyjny. Uwzględnienie tego procesu w całkowitym czasie trwania kompletacji zmniejsza wpływ wszystkich analiz wraz ze wzrostem parametrów wejściowych. Znacząca różnica dostrzegalna jest powyżej modyfikacji parametrów o 30%, tj.:

- popularności: 13,
- liczbie sprzedanych sztuk: 39,
- wadze: 3,9 kg,
- objętości 0,3 m³.

Powyżej takich wartości parametrów współczynnik wrażliwości wynosi od -0,207 do 0,005, przy odchyleniu standardowym wynoszącym 0,054, wartości średniej -0,072 oraz medianie -0,075. W związku z tym można stwierdzić, że powyżej wspomnianego zakresu modyfikacji parametrów wejściowych, każda z wykonanych analiz może mieć zastosowanie niezależnie od średniej i odchylenia standardowego wykorzystanych danych. Graficzną prezentację wyników analizy przedstawiono na rysunku 5.2.



Rys. 5.2 Wariant IIA – zależność współczynnika wrażliwości od parametrów

Źródło: opracowanie własne

Dla wariantu I oraz wariantu IIA po przeprowadzeniu oceny wpływu doboru kryteriów podziału produktów na efektywność procesu kompletacji stwierdzono, że zmiana wielkości parametrów wejściowych opisujących cechy produktów nie ma istotnego wpływu na wyniki otrzymane dla przeprowadzonych analiz klasyfikacji produktów.

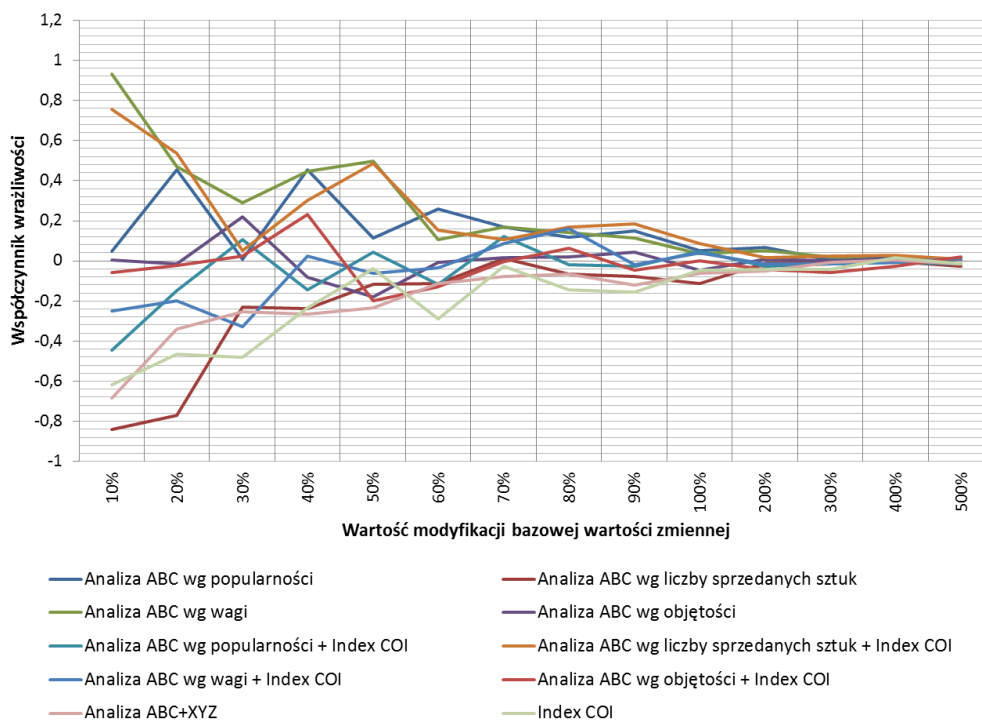
5.1.2. Wariant IB oraz wariant IIB

Aby uniknąć błędu niedopatrzania dokonano także oceny wpływu doboru kryteriów podziału produktów na efektywność procesu kompletacji dla dużego magazynu. Dzięki temu możliwe było sprawdzenie czy wielkość magazynu i liczba przechowywanych produktów ma znaczenie z punktu widzenia rodzaju i kryterium metody klasyfikacji produktów (tabela 5.6 oraz tabela 5.7).

Przeprowadzona ocena wpływu doboru kryteriów podziału produktów na efektywność procesu kompletacji dla Wariantu IB wykazała, że zmiana wielkości kryteriów klasyfikacji ma istotne znaczenie w przypadku modyfikacji zmiennej objaśniającej do 60%, tj.:

- popularności: 17,
- liczbie sprzedanych sztuk: 51,
- wadze: 5,1 kg,
- objętości 0,4 m³.

Powyżej tych wielkości ich zmiana nie ma istotnego wpływu na metodę klasyfikacji i przyjęte kryterium. Dla wszystkich analizowanych danych wartości współczynnika wrażliwości znajdują się w przedziale pomiędzy -0,84 a 0,93 i cechują się odchyleniem standardowym wynoszącym 0,024, natomiast wartość średniej i mediany wynoszą kolejno -0,023 oraz -0,013. Natomiast porównując jedynie wyniki powyżej wspomnianej granicy 60% wartości współczynnika wrażliwości znajdują się w przedziale -0,15 a 0,18 przy odchyleniu standardowych wynoszącym 0,072, wartości średniej 0,005 i medianie -0,002. Potwierdza to fakt, że w tym zakresie wartości parametrów nie ma statystycznie zauważalnej różnicy pomiędzy przeprowadzonymi klasyfikacjami produktów. W związku z tym można stwierdzić, że każda z powyższych analiz może mieć zastosowanie niezależnie od średniej i odchylenia standardowego wykorzystanych danych. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 5.3 oraz w tabeli 5.8 i tabeli 5.9.



Rys. 5.3 Wariant IB – zależność współczynnika wrażliwości od parametrów

Źródło: opracowanie własne

Tabela 5.6 Wariant IB - czas kompletacji produktów w wyniku modyfikacji zmiennej objaśniającej

Analiza	Kryterium analizy	Średni czas kompletacji produktów dla 1000 list kompletacji w wyniku modyfikacji bazowej wartości parametru α :														
		[s]														
		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	200%	300%	400%	500%
Analiza ABC	Popularność	1315	1321	1434	1319	1555	1389	1519	1472	1438	1491	1382	1493	1340	1413	1336
	Liczba sprzedanych sztuk	1524	1396	1289	1418	1378	1436	1422	1539	1442	1419	1353	1488	1491	1501	1318
	Waga	1129	1234	1235	1227	1331	1409	1202	1263	1258	1243	1170	1243	1192	1152	1178
	Objętość	1239	1241	1229	1374	1189	1129	1228	1258	1264	1293	1180	1262	1235	1306	1298
Analiza ABC + Index COI	Popularność	1459	1394	1416	1505	1374	1490	1357	1582	1438	1423	1528	1382	1388	1426	1336
	Liczba sprzedanych sztuk	1272	1368	1408	1292	1425	1580	1388	1365	1442	1483	1383	1312	1360	1417	1318
	Waga	1113	1085	1069	1003	1123	1078	1090	1179	1258	1094	1155	1082	1069	1079	1178
	Objętość	1188	1153	1174	1202	1325	1069	1034	1185	1264	1135	1190	1088	978	1054	1298
Analiza ABC+XYZ	Popularność, sezonowość	1592	1483	1484	1471	1422	1406	1483	1507	1507	1420	1494	1437	1550	1619	1484
Index COI	Popularność, waga	1149	1078	1042	983	1041	1126	951	1127	1016	989	1097	1053	999	1228	1054

Źródło: opracowanie własne

Tabela 5.7 Wariant IB – wartości współczynnika wrażliwości

Analiza	Kryterium analizy	Wartość współczynnika wrażliwości dla modyfikacji bazowej wartości parametru o:														
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	200%	300%	400%	500%	Średnia
Analiza ABC	Popularność	0,046	0,452	0,010	0,456	0,113	0,259	0,171	0,117	0,149	0,051	0,068	0,006	0,019	0,003	0,061
	Liczba sprzedanych sztuk	-0,840	-0,771	-0,232	-0,240	-0,115	-0,112	0,014	-0,067	-0,077	-0,112	-0,012	-0,007	-0,004	-0,027	-0,240
	Waga	0,930	0,469	0,289	0,447	0,496	0,108	0,170	0,143	0,112	0,036	0,050	0,019	0,005	0,009	0,152
	Objętość	0,003	-0,016	0,218	-0,081	-0,178	-0,009	0,015	0,020	0,044	-0,048	0,009	-0,001	0,014	0,010	-0,067
Analiza ABC + Index COI	Popularność	-0,446	-0,147	0,105	-0,146	0,042	-0,117	0,120	-0,018	-0,027	0,047	-0,026	-0,016	-0,006	-0,017	-0,110
	Liczba sprzedanych sztuk	0,755	0,535	0,052	0,301	0,484	0,152	0,104	0,167	0,184	0,087	0,016	0,023	0,028	0,007	0,126
	Waga	-0,252	-0,198	-0,329	0,022	-0,063	-0,034	0,085	0,163	-0,019	0,038	-0,014	-0,013	-0,008	0,012	-0,107
	Objętość	-0,059	-0,024	0,024	0,231	-0,200	-0,130	-0,003	0,064	-0,045	0,002	-0,042	-0,059	-0,028	0,019	-0,083
Analiza ABC+XYZ	Popularność, sezonowość	-0,685	-0,339	-0,253	-0,267	-0,234	-0,114	-0,076	-0,067	-0,120	-0,062	-0,049	-0,009	0,004	-0,014	-0,219
Index COI	Popularność, waga	-0,618	-0,466	-0,482	-0,235	-0,040	-0,287	-0,027	-0,145	-0,155	-0,045	-0,042	-0,044	0,017	-0,017	-0,239

Źródło: opracowanie własne

Tabela 5.8 Wariant IIB - czas kompletacji produktów w wyniku modyfikacji zmiennej objaśniającej

Analiza	Kryterium analizy	Średni czas kompletacji produktów dla 1000 list kompletacji w wyniku modyfikacji bazowej wartości parametru o: [s]														
		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	200%	300%	400%	500%
Analiza ABC	Popularność	1923	1759	1945	1954	2209	1868	2061	2033	2131	2127	1964	2116	1965	2611	2194
	Liczba sprzedanych sztuk	2104	1847	1848	1977	2036	1857	1862	2074	2239	1974	1960	2208	2202	2684	2388
	Waga	2031	1875	1975	2065	2217	2061	1950	1962	2192	2101	1981	2152	2094	2753	2565
	Objętość	2008	1819	1895	2029	1961	1678	1742	1772	2007	1999	1872	2095	1907	2687	2214
Analiza ABC + Index COI	Popularność	2160	1972	2041	2218	2135	2043	1992	2224	2131	2248	2187	2226	2188	2880	2194
	Liczba sprzedanych sztuk	1914	1958	1983	1903	2219	2073	2001	1994	2239	2123	2114	2133	2265	2927	2388
	Waga	1944	1767	1775	1802	1991	1676	1812	1911	2192	1896	1982	2044	2034	2634	2565
	Objętość	1998	1768	1848	1939	2135	1677	1648	1785	2007	1956	1968	2002	1809	2620	2214
Analiza ABC+XYZ	Popularność, sezonowość	2166	1949	2049	2074	1938	1864	2008	2008	2241	2083	2041	2084	2189	2762	2283
Index COI	Popularność, waga	1979	1715	1724	1715	1840	1736	1596	1800	1910	1766	1872	1980	1952	2814	2270

Źródło: opracowanie własne

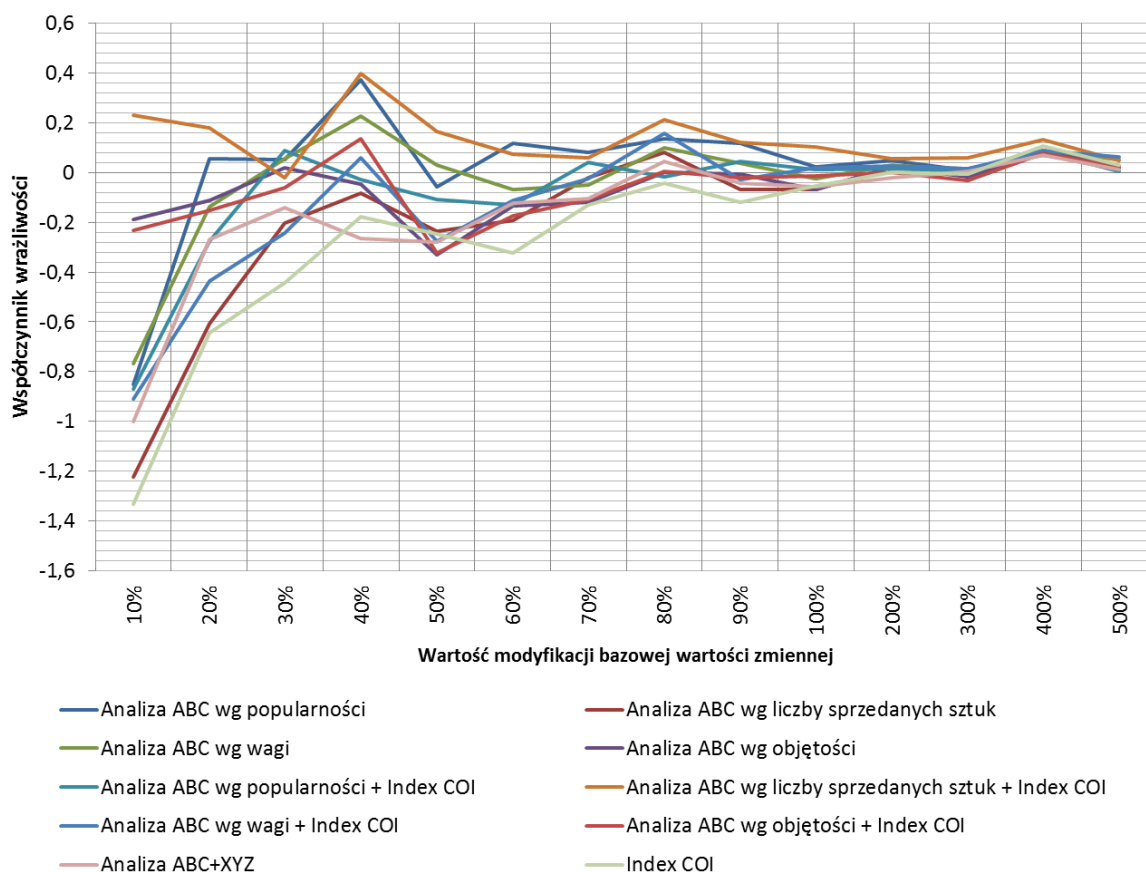
Tabela 5.9 Wariant IIB – wartości współczynnika wrażliwości

Analiza	Kryterium analizy	Wartość współczynnika wrażliwości dla modyfikacji bazowej wartości parametru o:														
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	200%	300%	400%	500%	Średnia
Analiza ABC	Popularność	-0,853	0,057	0,054	0,372	-0,057	0,120	0,082	0,135	0,118	0,021	0,050	0,007	0,089	0,028	-0,052
	Liczba sprzedanych sztuk	-1,221	-0,608	-0,201	-0,081	-0,235	-0,192	-0,020	0,080	-0,069	-0,068	0,025	0,016	0,069	0,027	-0,232
	Waga	-0,768	-0,138	0,056	0,229	0,030	-0,066	-0,049	0,099	0,038	-0,025	0,030	0,010	0,089	0,053	-0,094
	Objętość	-0,188	-0,113	0,021	-0,047	-0,329	-0,132	-0,118	0,000	-0,004	-0,068	0,022	-0,017	0,085	0,021	-0,125
Analiza ABC + Index COI	Popularność	-0,870	-0,275	0,090	-0,029	-0,108	-0,130	0,042	-0,017	0,045	0,013	0,015	0,004	0,083	0,003	-0,142
	Liczba sprzedanych sztuk	0,230	0,180	-0,019	0,398	0,166	0,076	0,060	0,212	0,121	0,104	0,057	0,061	0,132	0,050	0,055
	Waga	-0,910	-0,435	-0,243	0,060	-0,276	-0,113	-0,024	0,159	-0,027	0,020	0,026	0,015	0,089	0,064	-0,173
	Objętość	-0,230	-0,150	-0,059	0,137	-0,321	-0,175	-0,107	0,005	-0,021	-0,015	0,001	-0,032	0,078	0,022	-0,125
Analiza ABC+XYZ	Popularność, sezonowość	-1,002	-0,270	-0,142	-0,263	-0,279	-0,122	-0,104	0,043	-0,043	-0,058	-0,019	0,004	0,069	0,011	-0,037
Index COI	Popularność	-1,334	-0,644	-0,445	-0,176	-0,246	-0,323	-0,129	-0,044	-0,120	-0,054	0,000	-0,005	0,105	0,029	-0,138

Źródło: opracowanie własne

Przeprowadzona ocena wpływu doboru kryteriów podziału produktów na efektywność procesu kompletacji dla Wariantu IIB wykazała, że podobnie jak w Wariacie IB zmiana wielkości parametrów determinujących cechy produktów nie ma istotnego znaczenia dla zmian większych niż 60%. W związku z tym, że zwiększenie wartości początkowej parametrów o 100% odpowiada tym wartościom, które zostały ustalone w czasie konsultacji ze specjalistami, to można wnioskować, że dla klasycznych magazynów każda z powyższych metod może mieć zastosowanie. Wartości współczynnika wrażliwości dla wszystkich analiz znajdują się w przedziale pomiędzy -1,33 a 0,04 i cechują się odchyleniem standardowym wynoszącym 0,280, natomiast wartość średniej i mediany wynoszą kolejno -0,093 oraz -0,098. Dla modyfikacji powyżej 60% natomiast wartość współczynnika wrażliwości znajduje się w zakresie -0,130 a 0,212, przy odchyleniu standardowym wynoszącym 0,067, wartości średniej 0,017 oraz medianie 0,015.

W związku z tym można stwierdzić, że powyżej wspomnianego zakresu 60% każda z powyższych analiz może mieć zastosowanie niezależnie od średniej i odchylenia standardowego wykorzystanych danych. Zauważalne jest także zmniejszenie wrażliwości na modyfikację parametrów wejściowych wraz ze wzrostem tej modyfikacji. Kluczowe znaczenie ma w tym przypadku uwzględnianie dodatkowego czasu na przeładunek produktów na wózku kompletacyjnym. Uwzględnienie tego procesu w całkowitym czasie trwania kompletacji zmniejsza wrażliwość wszystkich analiz wraz ze wzrostem parametrów wejściowych. Graficzną prezentację wyników analizy przedstawiono na rysunku 5.4.



Rys. 5.4 Wariant IIB – zależność współczynnika wrażliwości od parametrów

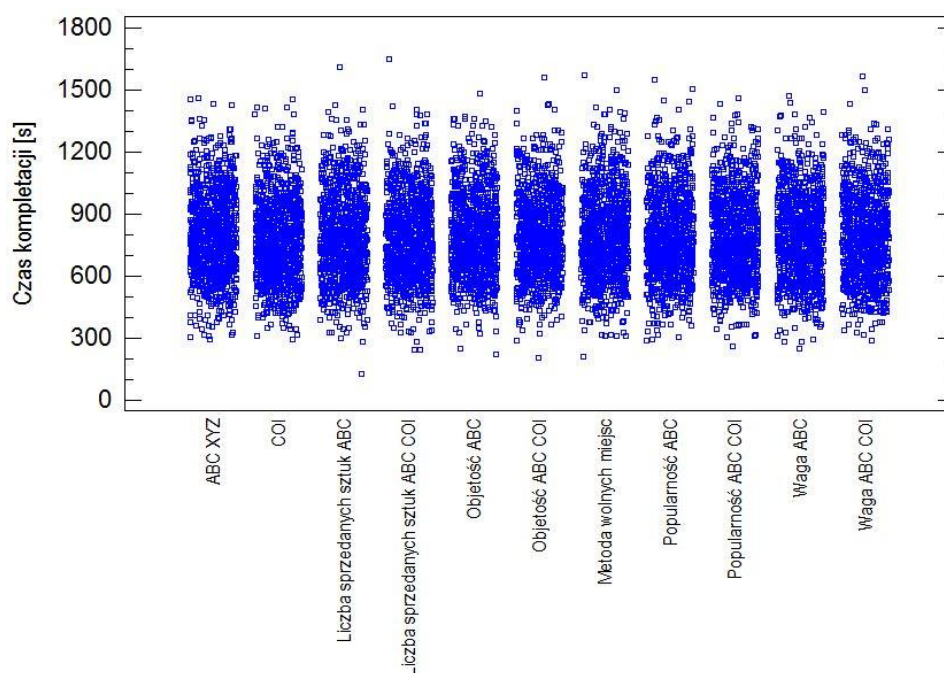
Źródło: opracowanie własne

5.2. Analiza wpływu wyboru kryterium klasyfikacji produktów na czas kompletacji produktów

W celu określenia które z kryteriów przyjmowanych do klasyfikacji produktów i ich rozmieszczenia w magazynie ma największy wpływ na proces kompletacji produktów powodując skrócenie czasu jego trwania wykonano symulacje dla analizy ABC, ABC w połączeniu z Indexem COI, ABC w połączeniu z XYZ, samego Indexu COI oraz metody wolnych miejsc składowania produktów. Podobnie jak w przypadku oceny wpływu doboru kryteriów podziału produktów na efektywność procesu kompletacji wykonano analizy wariantowe zgodnie z założeniami opisanymi w podrozdziale 5.1.

5.2.1. Analiza dla wariantu IA – mały magazyn, podatność na piętrzenie

Wariant IA został wykonany dla magazynu średniej wielkości, tj. posiadającego 120 miejsc na jednostki paletowe w każdym z 10 rzędów składowania produktów i 4 poziomach składowania produktów. W przeprowadzonej symulacji wykorzystano 600 różnych od siebie produktów dla których przygotowano listy kompletacji zgodnie z założeniami opisanymi w podrozdziale 5.1. Graficzną prezentację wyników symulacji czasu trwania kompletacji dla poszczególnych analiz przedstawiono na rysunku 5.5.



Rys. 5.5 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów, Wariant IA

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Przyglądając się rysunkowi 5.5 można zauważyć, że otrzymane wyniki nie różnią się wizualnie od siebie. Statystyki opisowe dla przedstawianego wariantu zawarto w tabeli 5.10. Kolorem żółtym zaznaczono wartości powyżej średniej.

Tabela 5.10 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów dla wariantu IA [s]

	Średnia	Odchylenie standardowe	Mediana	Minimum	Maximum	Zakres
Analiza ABC oraz XYZ	799,6	207,8	784,3	295,2	1459,6	1164,4
Index COI	778,7	198,4	762,8	291,0	1454,6	1163,6
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk	793,6	206,1	779,1	125,6	1607,8	1482,2
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk oraz Index COI	787,2	203,4	769,8	242,8	1648,4	1405,6
Analiza ABC wg objętości	800,9	199,2	787,2	222,4	1480,8	1258,4
Analiza ABC wg objętości oraz Index COI	793,6	197,1	775,8	202,8	1558,0	1355,2
Metoda wolnych miejsc składowania	798,3	211,2	781,8	208,2	1572,0	1363,8
Analiza ABC wg popularności	792,6	204,3	776,1	288,0	1550,6	1262,6
Analiza ABC wg popularności oraz Index COI	790,4	201,9	770,6	257,4	1457,8	1200,4
Analiza ABC wg wagi	788,3	202,7	783,6	251,0	1473,0	1222,0
Analiza ABC wg wagi oraz Index COI	787,2	203,8	776,1	288,2	1566,0	1277,8

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Aby dokonać dokładniejszej oceny różnic pomiędzy poszczególnymi analizami wykonano analizę wariancji (ANOVA) pozwalającą przetestować istotność różnic pomiędzy wartościami średnimi. Analiza ta dokonuje rozkładu wariancji danych na dwa składniki: składnik pomiędzy grupami i w obrębie grupy. Wynik analizy ANOVA przedstawiono w tabeli 5.11.

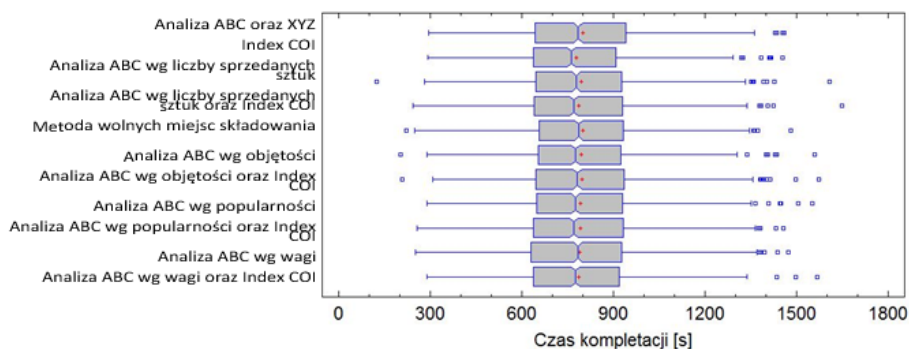
Tabela 5.11 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla Wariantu IA

	Sumy kwadratów (SS)	Stopnie swobody (Df)	Średnia kwadratowa (MS)	Wskaźnik F	Współczynnik P
Pomiędzy grupami	421175	10	42117,5	1,02	0,4241
W obrębie grupy	4,54E+08	10989	41334,8		
Suma	4,55E+08	10999			

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Analiza ANOVA wykazała, że nie ma statystycznie znaczących różnic pomiędzy grupami wyników otrzymanych dla poszczególnych analiz. Wykonane dodatkowo testy porównań wielokrotnych (post hoc) za pomocą metody Scheffego, T Tukeya (HSD), Fishera (LSD), Bonferroniego, Newman-Keulsa oraz testu Duncana, nie wykazały statystycznych różnic pomiędzy grupami. Wymienione testy zostały wykonane w programie Statgraphics Centurion 15.2.11.0.

Ostatnią częścią analizy było wykonanie porównania median za pomocą testu Friedmana. Test ten jest nieparametryczną alternatywą jednoczynnikowej analizy wariancji w układzie międzygrupowym. Test Friedmana służy do porównywania więcej niż trzech prób. Hipoteza zerowa zakłada, że wszystkie próby pochodzą z populacji o tej samej medianie [102]. Wynik testu wynosił 32,407, przy parametrze p równym 0,0003, co pozwala stwierdzić, że grupy nie różnią się od siebie. Wyniki analizy statystycznej przedstawiono w postaci wykresu ramka-wąsy (Rys. 5.6).



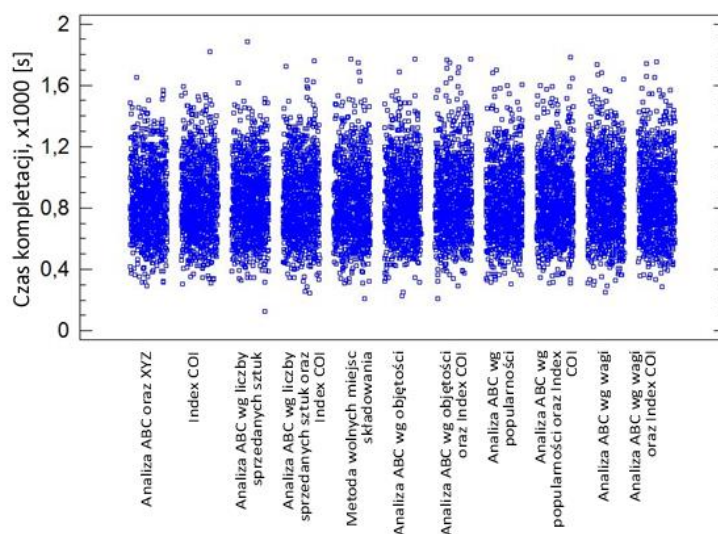
Rys. 5.6 Wykres ramka-wąsy dla Wariantu IA

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Dokonując porównania poszczególnych grup wyników stwierdzono, że największa różnica pomiędzy medianami wartościami występuje dla Indexu COI w stosunku do wyników otrzymanych z analizy ABC połączonej z Indexem COI i wynosi 3,1%. Różnica pomiędzy średnimi natomiast wynosi 2,8% na korzyść Indexu COI w stosunku do analizy ABC wykonanej według kryterium objętości produktów. Stwierdzono zatem, że dla magazynów o rozważanej wielkości, dobór kryterium klasyfikacji produktów nie ma znaczenia. Nie ma również znaczenia organizacja systemu składowania produktów – przydział miejsc składowania lub metoda wolnych miejsc składowania poprawia efektywność jedynie o 2,5%.

5.2.2. Analiza dla wariantu IIA – mały magazyn, wrażliwość na piętrzenie

Wariant IIA bazuje na tym samym układzie magazynu i listach kompletacji produktów co Wariant IA. Czynnikiem odróżniającym oba warianty od siebie jest to, że w niniejszym wariantcie założono, że towary nie są odporne na piętrzenie, co powoduje potrzebę ich przekładania na nośniku kompletacyjnym w ten sposób, aby produkty cięższe i o bardziej podatnym na piętrzenie opakowaniu znajdowały się pod produktami lekkimi. Analogicznie jak we wcześniejszym wariantcie przeprowadzono podział produktów na klasy według których następnie odbywało się ich rozmieszczenie w magazynach. W oparciu o wygenerowane listy kompletacji dokonano symulacji czasu jej trwania co przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 5.7.



Rys. 5.7 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów, Wariant IIA

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Praca doktorska | Politechnika Krakowska | 2016

Również w tym wariancie podobnie jak w poprzednim wizualnie nie jest się w stanie określić czy otrzymane wyniki znacząco się różnią. Dla wykonanych analiz sporządzono statystyki opisowe, które przedstawiono w tabeli 5.12. Kolorem żółtym zaznaczono wartości powyżej średniej.

Tabela 5.12 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów dla wariantu IIA [s]

	Średnia	Odchylenie standardowe	Mediana	Minimum	Maximum	Zakres
Analiza ABC oraz XYZ	847,0	236,0	825,9	295,2	1654,4	1359,2
Index COI	858,8	240,9	839,7	306,8	1818,6	1511,8
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk	846,3	234,3	821,8	125,6	1882,8	1757,2
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk oraz Index COI	852,7	241,8	825,6	247,0	1759,6	1512,6
Metoda wolnych miejsc składowania	849,2	241,7	833,3	208,2	1770,1	1561,9
Analiza ABC wg objętości	859,4	236,7	837,3	230,1	1769,6	1539,4
Analiza ABC wg objętości oraz Index COI	864,9	247,1	838,9	210,5	1772,0	1561,5
Analiza ABC wg popularności	841,8	232,8	821,3	302,4	1699,2	1396,8
Analiza ABC wg popularności oraz Index COI	858,1	241,3	832,4	308,0	1785,8	1477,8
Analiza ABC wg wagi	868,9	247,7	854,6	251,3	1733,8	1482,5
Analiza ABC wg wagi oraz Index COI	869,4	250,9	852,3	288,2	1754,5	1466,3

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Aby sprawdzić czy poszczególne grupy wyników istotnie różnią się od siebie wykonano statystyczną analizę wariancji ANOVA. Analiza wariancji wykazała, że nie ma statystycznie znaczących różnic pomiędzy poszczególnymi grupami wyników. Wynik przeprowadzonej analizy przedstawiono w tabeli 5.13.

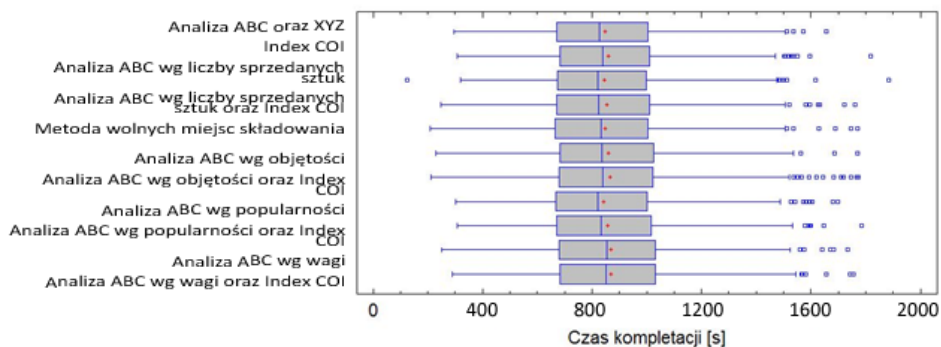
Tabela 5.13 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla Wariantu IIA

	Sumy kwadratów (SS)	Stopnie swobody (Df)	Średnia kwadratowa (MS)	Wskaźnik F	Współczynnik P
Pomiędzy grupami	881762	10	88176,2	1,52	0,1261
W obrębie grupy	6,39E+08	10989	58118,9		
Suma	6,40E+08	10999			

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Wykonane dodatkowo testy porównań wielokrotnych (post hoc) za pomocą metody Scheffego, T Tukeya (HSD), Fishera (LSD), Bonferroniego, Newman-Keulsa oraz testu Duncana, nie wykazały statystycznych różnic pomiędzy grupami.

Dla powyższych danych wykonano także test Friedmana. Wynik testu wynosił 33,487, przy parametrze p równym 0,0002, co pozwala stwierdzić, że grupy pochodzą z populacji o tej samej medianie. Wyniki analizy statystycznej przedstawiono w postaci wykresu ramkawy – rysunek 5.8.



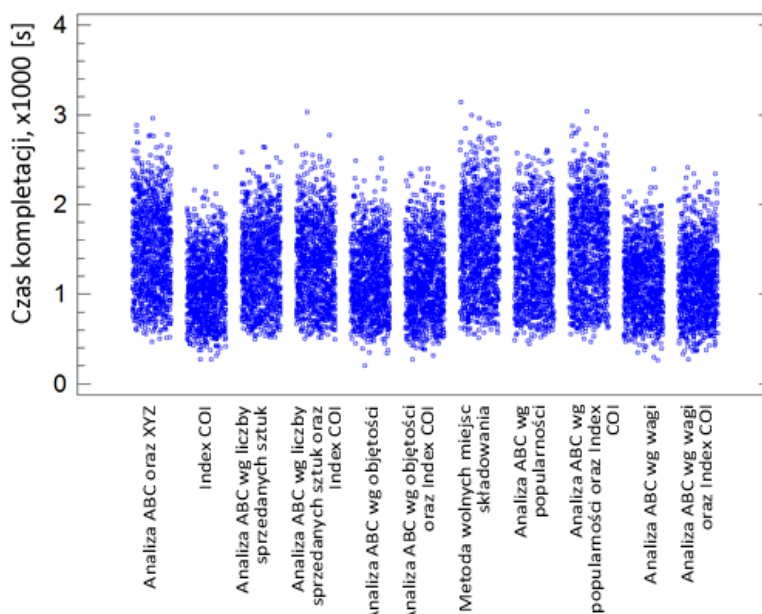
Rys. 5.8 Wykres ramka-wąsy dla Wariantu IIA

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Dokonując analizy porównawczej zbioru najlepszych i najgorszych wyników stwierdzono, że różnica w wartości średnich jest na poziomie 3,1%, a median 3,9% na korzyść analizy ABC według popularności produktów. Najmniej zadowalające wyniki otrzymano poprzez zastosowanie analizy ABC według kryterium wagi. Porównując analizę ABC (popularność produktów) do metody wolnych miejsc składowania stwierdzono, że daje ona średnie wyniki tylko o 0,9% lepsze, natomiast mediana przybiera wartości niższe o 1,5%. Taki rezultat pozwala stwierdzić – podobnie jak w wariancie IA, że wybór metody i kryterium klasyfikacji produktów nie ma znaczenia dla magazynów przeciętnej wielkości.

5.2.3. Analiza dla wariantu IB – duży magazyn, podatność na piętrzenie

Wariant IB został wykonany dla dużego magazynu, tj. posiadającego 200 miejsc na jednostki paletowe w każdym z 14 rzędów składowania produktów i 6 poziomach składowania produktów. W przeprowadzonej symulacji wykorzystano 1000 różnych produktów dla których przygotowano listy kompletacji zgodnie z założeniami opisanymi w podrozdziale 5.1. Wynik symulacji czasu kompletacji produktów w formie graficznej przedstawiono na rysunku 5.9.



Rys. 5.9 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów, Wariant IB

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Rysunek 5.9 pozwala zauważyć, że metody takie jak analiza ABC i XYZ, metoda wolnych miejsc składowania produktów, analiza ABC według kryterium popularności i liczby sprzedanych sztuk oraz analizy abc w połączeniu z Indexem COI według kryteriów popularności i wagi dają wyniki o największym zakresie i odchyleniu standardowym. Jest to także zauważalne na podstawie statystyki opisowej przedstawionej w tabeli 5.14. Kolorem żółtym zaznaczono te wartości, które przewyższają średnią.

Tabela 5.14 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów dla wariantu IB [s]

	Średnia	Odchylenie standardowe	Mediana	Współczynnik zmienności	Minimum	Maximum	Zakres
Analiza ABC oraz XYZ	1488,3	490,8	1479,6	32,98%	470,2	2961,8	2491,6
Index COI	1092,0	367,6	1072,2	33,66%	269,8	2422,8	2153,0
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk	1348,9	432,0	1344,0	32,03%	491,2	2646,2	2155,0
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk oraz Index COI	1367,1	449,1	1357,4	32,86%	499,0	3028,6	2529,6
Analiza ABC wg objętości	1179,2	390,5	1141,6	33,11%	205,2	2512,0	2306,8
Analiza ABC wg objętości oraz Index COI	1180,4	412,3	1139,0	34,94%	268,0	2401,2	2133,2
Metoda wolnych miejsc składowania	1532,1	510,0	1518,2	33,29%	508,4	3141,8	2633,4
Analiza ABC wg popularności	1387,2	453,1	1392,8	32,66%	444,2	2610,6	2166,4
Analiza ABC wg popularności oraz Index COI	1509,6	507,1	1508,0	33,59%	473,4	3042,6	2569,2
Analiza ABC wg wagi	1162,9	367,1	1155,0	31,57%	262,0	2399,2	2137,2
Analiza ABC wg wagi oraz Index COI	1162,2	394,5	1154,6	33,94%	275,2	2409,8	2134,6
Średnia	1310,0	462,7	1271,8	35,32%	205,2	3141,8	2936,6

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

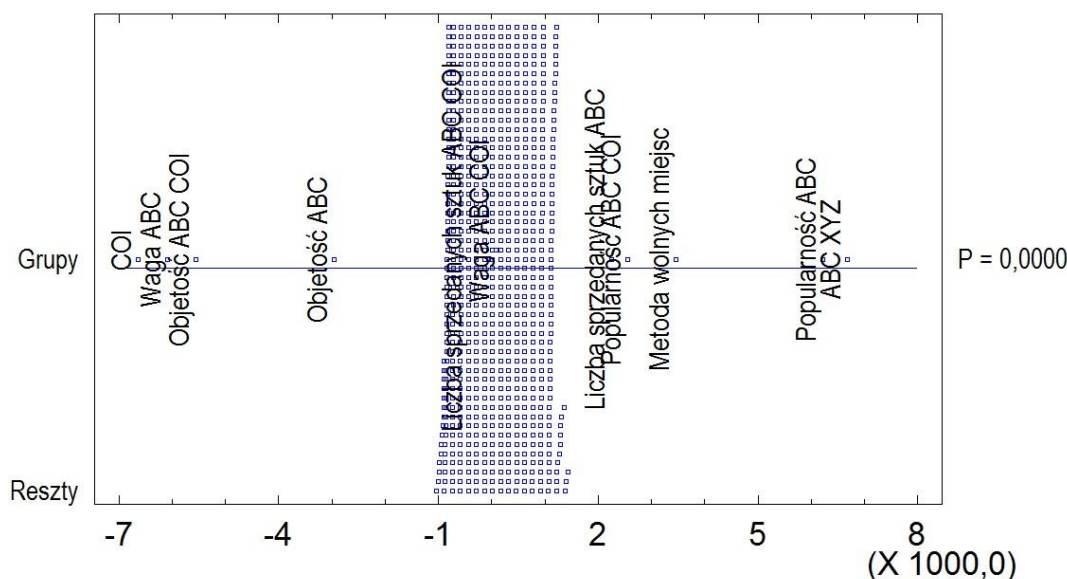
Dla przeprowadzonych analiz wykonano analizę wariancji (ANOVA) w celu przetestowania istotności różnic pomiędzy wartościami średnimi. Analiza ANOVA dokonuje rozkładu wariancji danych na dwa składniki: składnik pomiędzy grupami i w obrębie grupy. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 5.15 oraz na rysunku 5.10.

Tabela 5.15 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla Wariantu IB

	Sumy kwadratów (SS)	Stopnie swobody (Df)	Średnia kwadratowa (MS)	Wskaźnik F	Współczynnik P
Pomiędzy grupami	2,83E+08	10	2,83E+07	148,23	0,0
W obrębie grupy	2,31E+09	12122	190919		
Suma	2,60E+09	12132			

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Wskaźnik testu F, który w tym przypadku wynosi 148,23, jest stosunkiem oszacowania pomiędzy grupami dla oszacowania wewnątrz grupy. Ponieważ wartość współczynnika p dla testu F jest niższa niż 0,05, to istnieje statystycznie znacząca różnica między średnimi z przeprowadzonych analiz na 95,0% poziomie ufności.



Rys. 5.10 Graficzne przedstawienie wyników analizy wariancji ANOVA dla Wariantu IB

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

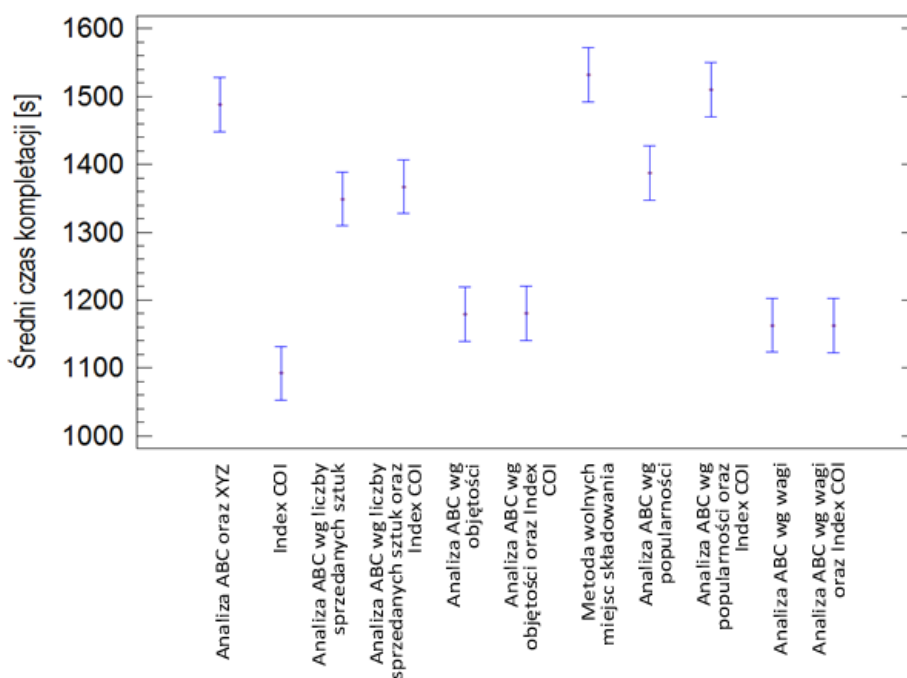
W celu określenia które grupy statystycznie różnią się od siebie wykonano porównania wielokrotne tzw. test post hoc. Do wykonania porównań wielokrotnych stosowane są testy Scheffego, T Tukeya (HSD), Fishera (LSD), Bonferroniego, Newman-Keulsa oraz test Duncana. W analizowanym przypadku wykorzystano test Scheffego który jest uważany za jeden z najbardziej konserwatywnych - "ostrożnych" - testów post hoc [130]. Wynik testu przedstawiono w tabeli 5.16 oraz na rysunku 5.11.

Tabela 5.16 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Scheffego przy 95% przedziale ufności

Analiza	Średni czas kompletacji [s]	Grupy homogeniczne
Index COI	1092,1	X
Analiza ABC wg wagi oraz Index COI	1162,3	XX
Analiza ABC wg wagi	1163,0	XX
Analiza ABC wg objętości	1179,3	X
Analiza ABC wg objętości oraz Index COI	1180,4	X
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk	1349,0	X
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk oraz Index COI	1367,1	X
Analiza ABC wg popularności	1387,2	X
Analiza ABC oraz XYZ	1488,3	X
Analiza ABC wg popularności oraz Index COI	1509,7	X
Metoda wolnych miejsc składowania	1532,2	X

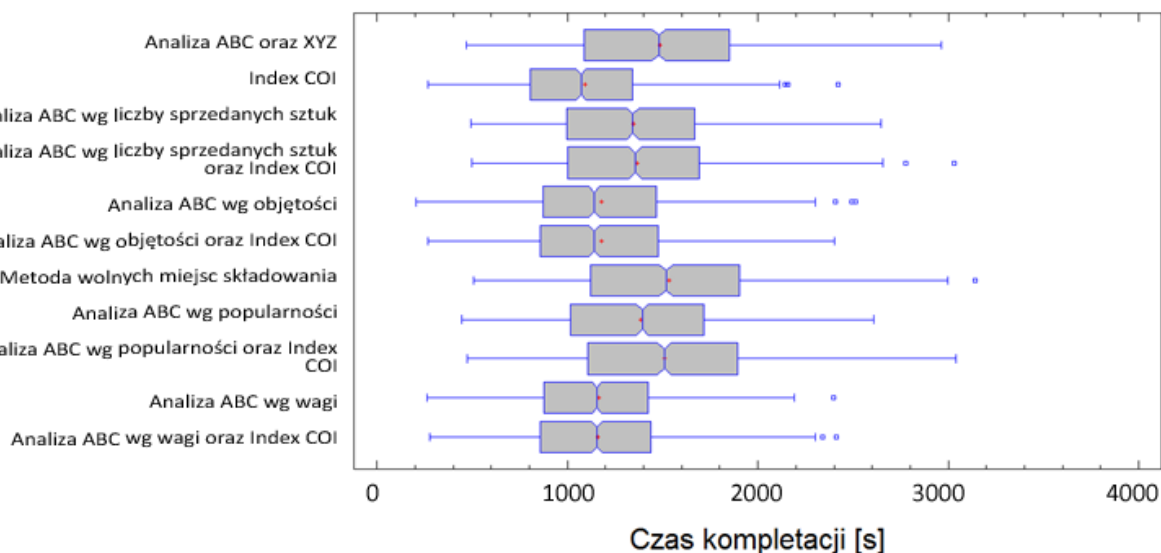
Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Na podstawie przeprowadzonego testu stwierdzono podobieństwo otrzymanych wyników dla analizy ABC z kryterium wagi, analizy ABC z Indexem COI przy kryterium objętości oraz samego Indexu COI. Analizy te cechują się najniższymi wartościami średnimi.



Rys. 5.11 Wynik porównania średnich z interwałem Scheffego przy 95% przedziale ufności
 Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Ostatnią częścią analizy było wykonanie porównania median za pomocą testu Friedmana. Hipoteza zerowa zakładała, że wszystkie próby pochodzą z populacji o tej samej medianie [102]. Wynik testu wynosił 3727,91, przy parametrze p równym 0,0, co pozwala stwierdzić, że grupy znacząco różnią się od siebie. Na rysunku 5.12 przedstawiono graficzną prezentację wyników w postaci wykresu ramka-wąsy.



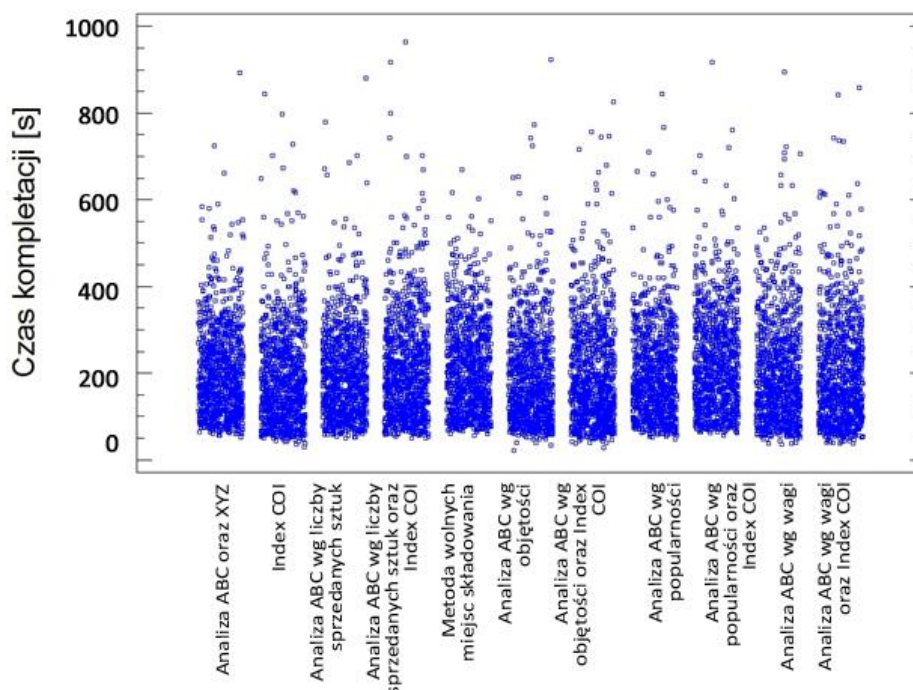
Rys. 5.12 Wykres ramka-wąsy dla Warianu IB
 Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Dokonując porównania wartości średnich i median stwierdzono, że najlepszy pod względem czasu kompletacji rezultat uzyskano po zastosowaniu rozmieszczenia produktów w magazynie na podstawie Indexu COI. Index COI pozwala na osiągnięcie najmniejszej wartości średniej: 1092,0 s oraz mediany: 1072,2 s. Natomiast pozostałe analizy pozwalają na osiągnięcie następujących wyników: analiza ABC według kryterium wagi (średnia: 1162,9 s,

mediana: 1155,0 s), analiza ABC według kryterium wagi połączona z Indexem COI (średnia: 1162,3 s, mediana: 1154,6 s), analiza ABC według kryterium objętości (średnia: 1179,3 s, mediana: 1141,6 s), analiza ABC według kryterium objętości połączona z Indexem COI (średnia: 1180,4 s, mediana: 1139,0 s) wykazują statystyczne podobieństwo dając wyniki nieznacznie gorsze. Analiza ABC w połączeniu z XYZ, analiza ABC w połączeniu z Indexem COI według kryterium popularności oraz metoda wolnych miejsc składowania dają najgorsze wyniki cechujące się ich dużą rozbieżnością oraz wysoką średnią i medianą. Zatem dla dużych magazynów istotne jest rozmieszczenie produktów na podstawie analizy ABC według kryterium wagi, objętości i Indexu COI. Metoda ta pozwala na zmniejszenie czasu trwania kompletacji zamówień w stosunku do metody wolnych miejsc składowania średnio o 28,72%.

5.2.4. Analiza dla wariantu IIB – duży magazyn, wrażliwość na piętrzenie

Podobnie jak w Wariancie IB dla Wariantu IIB przeprowadzono symulacje dla dużego magazynu, tj. posiadającego 200 miejsc na jednostki paletowe w każdym z 14 rzędów składowania produktów i 6 poziomach składowania produktów. Wariant zakładał, że produkty mają ograniczoną podatność na piętrzenie, w związku z czym w trakcie ich kompletacji konieczne jest zamienianie ich kolejnością na nośniku kompletacyjnym aby nie doszło do ich uszkodzenia. W przeprowadzonej symulacji wykorzystano 1000 różnych od siebie produktów dla których przygotowano listy kompletacji zgodnie z założeniami opisanymi w podrozdziale 5.2. Graficzną prezentację symulacji czasu kompletacji produktów przedstawiono na rysunku 5.13.



Rys. 5.13 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów, Wariant IIB

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Na rysunku 5.13 ciężko zaobserwować znaczącą różnicę pomiędzy zbiorami wyników czasu kompletacji zamówień przy zastosowaniu różnych metod klasyfikacji produktów. Statystykę opisową dla przeprowadzonych analiz przedstawiono w tabeli 5.17. Kolorem żółtym zaznaczono te wartości, które przewyższają średnią.

Tabela 5.17 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów dla wariantu IIB [s]

	Średnia	Odchylenie standardowe	Mediana	Współczynnik zmienności	Minimum	Maximum	Zakres
Analiza ABC oraz XYZ	2041,1	1031,7	1858,2	50,55%	517,6	8927,8	8410,2
Index COI	1872,6	1101,3	1639,7	58,81%	298,6	8443,1	8144,5
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk	1960,6	1044,3	1804,8	53,27%	491,2	8801,3	8310,1
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk oraz Index COI	2114,5	1181,5	1878,0	55,88%	499,0	9649,1	9150,1
Metoda wolnych miejsc składowania	2139,1	1033,5	1973,8	48,32%	553,4	6698,4	6145,0
Analiza ABC wg objętości	1872,9	1101,5	1605,0	58,81%	205,2	9240,3	9035,1
Analiza ABC wg objętości oraz Index COI	1968,	1180,2	1688,4	59,97%	274,7	8263,5	7988,8
Analiza ABC wg popularności	1964,7	1040,7	1759,6	52,97%	477,8	8447,8	7970,0
Analiza ABC wg popularności oraz Index COI	2187,1	1141,9	1992,	52,21%	560,3	9171,1	8610,8
Analiza ABC wg wagi	1981,2	1156,6	1711,0	58,38%	359,8	8941,3	8581,4
Analiza ABC wg wagi oraz Index COI	1982,7	1189,4	1678,6	59,99%	375,4	8592,8	8217,4
Średnia	2007,7	1114,8	1780,3	55,53%	205,2	9649,1	9443,9

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

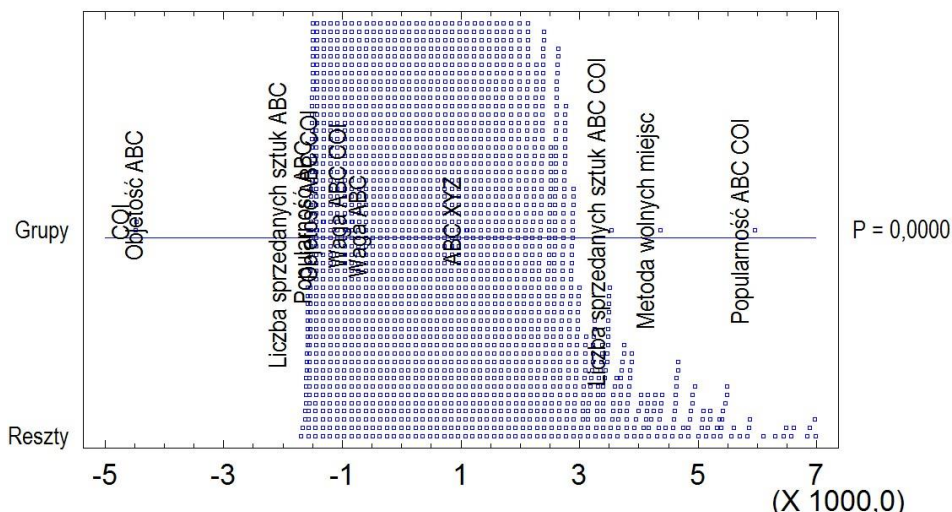
Dla przeprowadzonych analiz wykonano analizę wariancji w celu przetestowania istotności różnic pomiędzy wartościami średnimi. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 5.18 oraz na rysunku 5.14.

Tabela 5.18 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla Wariantu IIB

	Sumy kwadratów (SS)	Stopnie swobody (Df)	Średnia kwadratowa (MS)	Wskaźnik F	Współczynnik P
Pomiędzy grupami	1,05E+08	10	1,05E+07	8,53	0,0
W obrębie grupy	1,36E+10	10989	1,23E+06		
Suma	1,37E+10	10999			

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Wskaźnik testu F, który w tym przypadku wynosi 8,53, jest stosunkiem oszacowania pomiędzy grupami dla oszacowania wewnątrz grupy. Ponieważ wartość współczynnika P dla testu F jest niższa niż 0,05, to istnieje statystycznie znacząca różnica między średnimi czasami kompletacji zamówień z przeprowadzonych analiz na 95,0% poziomie ufności.



Rys. 5.14 Graficzne przedstawienie wyników analizy wariancji ANOVA dla Wariantu IIB

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

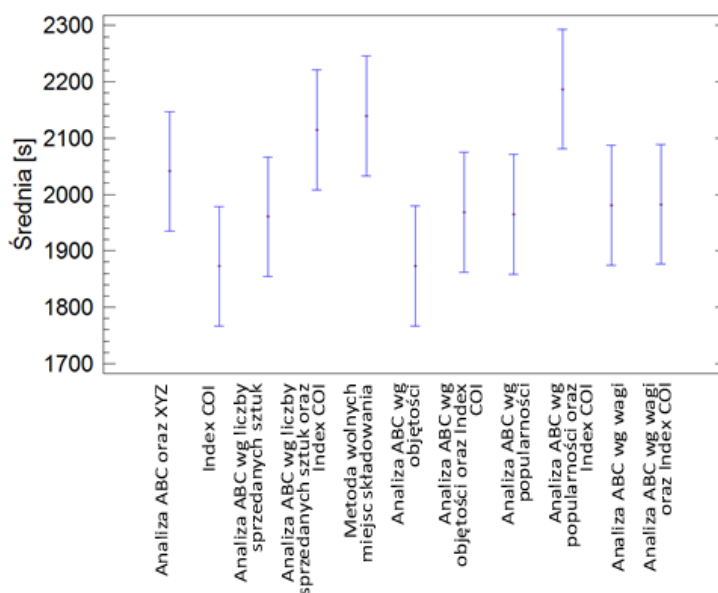
W celu określenia które grupy statystycznie różnią się od siebie wykonano porównania wielokrotne - test post hoc Scheffego. Wynik testu przedstawiono w tabeli 5.19 oraz na rysunku 5.15.

Tabela 5.19 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Scheffego przy 95% przedziale ufności

Analiza	Średni czas kompletacji [s]	Grupy homogeniczne
Index COI	1872,7	X
Analiza ABC wg objętości	1873,0	X
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk	1960,6	XX
Analiza ABC wg popularności	1964,5	XX
Analiza ABC wg objętości oraz Index COI	1968,2	XX
Analiza ABC wg wagi	1981,3	XXX
Analiza ABC wg wagi oraz Index COI	1982,8	XXX
Analiza ABC oraz XYZ	2041,2	XXX
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk oraz Index COI	2114,5	XX
Metoda wolnych miejsc składowania	2139,1	XX
Analiza ABC wg popularności oraz Index COI	2187,1	X

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

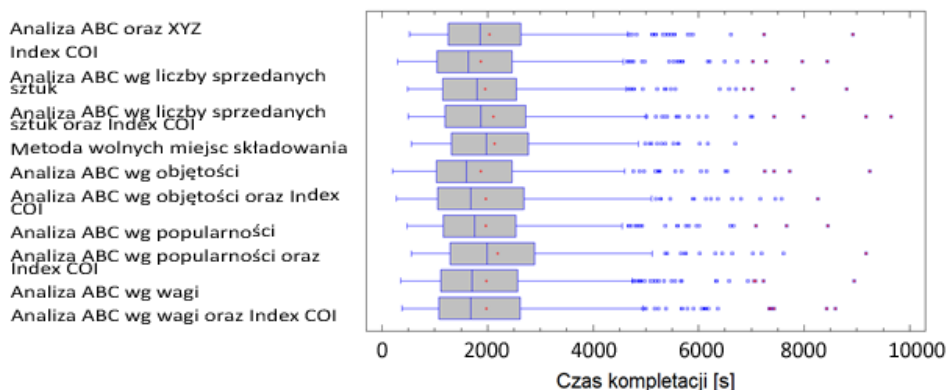
Na podstawie przeprowadzonego testu Scheffego można zauważyć, że podobnie jak w Wariancie IB występuje podobieństwo średnich czasów trwania kompletacji dla analizy ABC według wszystkich kryteriów oraz analizy ABC z Indexem COI według wagi i objętości.



Rys. 5.15 Wynik porównania średnich z interwałem Scheffego przy 95% przedziale ufności

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Ostatnią częścią analizy było wykonanie porównania median czasu trwania kompletacji za pomocą testu Friedmana. Hipoteza zerowa zakładała, że wszystkie próby pochodzą z populacji o tej samej medianie [102]. Wynik testu wynosił 1121,65, przy parametrze p równym 0,0, co pozwala stwierdzić, że grupy znacząco różnią się od siebie. Na rysunku 5.16 przedstawiono graficzną prezentację wyników w postaci wykresu ramka-wąsy.



Rys. 5.16 Wykres ramka-wąsy dla Wariantu IIB

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Dokonując porównania wartości średnich i median stwierdzono, że najlepsze rezultaty uzyskano przy zastosowaniu rozmieszczenia produktów w magazynie na podstawie:

- indexu COI, średnia: 1872 s, mediana: 1639 s,
- analizy ABC według liczby sprzedanych sztuk, średnia: 1960 s, mediana: 1804 s,

Najmniej zadowolające wyniki pod względem czasu trwania kompletacji otrzymano przy zastosowaniu analizy ABC połączonej z Indexem COI według popularności produktów – średnia wartość czasu kompletacji wyniosła 2187 s, mediana: 1992 s, a zakres wyników: 8610 s. Można zatem stwierdzić, że dla dużych magazynów i produktów o małej podatności na piętrzenie ładunków najlepiej spisują się metody w których kryterium decyzyjnym jest objętość i waga produktów, takie jak Index COI. Metoda ta pozwala na osiągnięcie mniejszego czasu trwania kompletacji niż w przypadku wolnych miejsc składowania średnio o 12,46%.

6. OCENA WPŁYWU DOBORU METODY KLASYFIKACJI PRODUKTÓW NA CZAS PROCESU KOMPLETACJI ZAMÓWIEŃ

W ramach dysertacji opracowano trzy nowe metody klasyfikacji produktów. Należą do nich:

- procedura klasyfikacji produktów z uwzględnieniem wzajemnych powiązań,
- podział produktów na kategorie w oparciu o dynamiczne wyznaczanie granic,
- klasyfikacja produktów z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

Metody te zostały porównane z metodami klasycznymi i ocenione pod kątem efektywności, dla której jako kryterium oceny wybrano czas kompletacji zamówień.

6.1. Procedura klasyfikacji produktów z uwzględnieniem wzajemnych powiązań

Dokonując klasyfikacji produktów można przyjąć jako kryterium podziału powiązania występujące pomiędzy nimi, tj. częstotliwość występowania na listach kompletacyjnych. W takim przypadku rozmieszczenie produktów bazuje na uporządkowanej liście produktów w kolejności od największej do najmniejszej liczby wystąpień produktów na listach kompletacyjnych. Jednak takie rozwiązanie nie jest do końca rozwiązaniem poprawnym ponieważ nie odzwierciedla występujących powiązań pomiędzy poszczególnymi produktami, a jedynie częstotliwość ich sprzedaży. Aby relacje zachodzące pomiędzy produktami były uwzględnione należy utworzyć macierz powiązań zawierającą relacje zachodzące pomiędzy wszystkimi produktami (każdy z każdym). Zasadniczym problemem jest natomiast takie uporządkowanie produktów, aby te, które częściej występowały z innymi na listach kompletacyjnych znajdowały się blisko siebie. Aby go rozwiązać opracowano metodę pozwalającą na porządkowanie produktów w oparciu o wspomnianą macierz powiązań (częstotliwości występowania na listach kompletacyjnych).

Metodykę porządkowania produktów według powiązań pomiędzy produktami na listach kompletacji można przedstawić w następujących krokach:

1. Utworzenie macierzy **A** - macierz częstotliwości występowania na listach kompletacyjnych (62).

$$A = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{x1} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{x2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{1y} & w_{2y} & \cdots & w_{xy} \end{bmatrix} \quad (62)$$

2. Obliczenie sumy s_u wierszy (63) z macierzy **A**.

$$s_u = \sum_{idx=1}^i w(idx, idy) \quad (63)$$

gdzie:

- idx – identyfikator kolumny w macierzy **A**,
- idy – identyfikator wiersza w macierzy **A**.

3. Zapis sumy s_u do macierzy **S** (64).

$$S = \begin{bmatrix} id_{prod1} & id_{prod2} & \cdots & id_{prody} \\ s_{u1} & s_{u2} & \cdots & s_{uy} \end{bmatrix} \quad (64)$$

gdzie:

id_{prody} – identyfikator produktu odpowiedniego sumie s_{uy}

4. Odczytanie identyfikatora (*ident*) dla wartości maksymalnej z macierzy S, jeżeli występuje kilka takich samych wartości to odczytanie wszystkich z nich,
5. Skopiowanie wartości z macierzy A do nowej macierzy B dla powyższych identyfikatorów (*ident*),
6. Dodanie identyfikatora (*ident*) do wektora W, który przechowuje identyfikatory uporządkowanych produktów w kolejności od największej do najmniejszej liczby powiązań,
7. Wybranie z macierzy B wartości maksymalnej oraz odczytanie dla niej identyfikatorów produktów – odpowiednich dla *idx*, *idy* wybranej wartości.
Przy czym jeżeli jest kilka wartości maksymalnych to wybranie tego dla którego wartość odpowiadająca identyfikatorowi (*ident*) w macierzy S jest największa,
8. Sprawdzenie czy *idx* lub *idy* znajdują się w wektorze W, jeżeli:
 - nie znajdują się to dodanie do wektora W obu wartości *idx*, *idy*,
 - jeżeli znajdują się to nie dodanie ich ponownie,
9. Zastąpienie aktualnej wartości w macierzy B wartością równą 0 dla wybranego w kroku 7 maksimum,
10. Dodanie do macierzy B wartości z macierzy A o identyfikatorze odpowiadającym ostatnio dodanemu (*ident*),
11. Sprawdzenie warunku (65).

$$\max(B) = 0 \quad (65)$$

- jeżeli tak to zakończenie działania algorytmu,
 - jeżeli nie to przejście do kolejnego kroku (12),
12. Sprawdzenie czy liczba wartości w wektorze W jest równa liczby analizowanych produktów:
 - jeżeli tak to zakończenie działania algorytmu,
 - jeżeli nie to przejście do kroku 7.

Działanie opisanej metody przedstawiono na przykładzie poniżej. Posłużono się w nim dziewięcioma produktami o identyfikatorach 1÷9.

Tabela 6.1 Macierz A – po pierwszej iteracji [liczba powiązań]

id_{prod}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	s_u
1	0	11	15	2	3	21	10	0	2	64
2	11	0	1	0	2	1	0	2	1	18
3	15	1	0	8	1	3	5	3	2	38
4	2	0	8	0	8	9	4	7	1	39
5	3	2	1	8	0	2	1	3	0	20
6	21	1	3	9	2	0	1	2	0	39
7	10	0	5	4	1	1	0	8	6	35
8	0	2	3	7	3	2	8	0	12	37
9	2	1	2	1	0	0	6	12	0	24
s_u	64	18	38	39	20	39	35	37	24	

Źródło: opracowanie własne

Kolorem jasno zielonym oznaczono wartości przechowywane także w macierzy B. Kolorem ciemno zielonym oznaczono identyfikator dodawany do wektora W dla aktualnej iteracji. Kolorem grafitowym zaznaczono identyfikatory, które już zostały umieszczone w wektorze W i nie są uwzględniane w dalszych krokach.

Z macierzy A (Tabela 6.1) wybrano produkt o największej sumie wierszy/kolumn, jest to produkt o identyfikatorze 1.

Z macierzy B (Tabela 6.2) wybrano produkt o największej sumie wierszy/kolumn, jest to produkt o identyfikatorze 6.

Tabela 6.2 Macierz A, B – po drugiej iteracji [liczba powiązań]

id_{prod}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	s_u
1	0	11	15	2	3	21	10	0	2	64
2	11	0	1	0	2	1	0	2	1	18
3	15	1	0	8	1	3	5	3	2	38
4	2	0	8	0	8	9	4	7	1	39
5	3	2	1	8	0	2	1	3	0	20
6	21	1	3	9	2	0	1	2	0	39
7	10	0	5	4	1	1	0	8	6	35
8	0	2	3	7	3	2	8	0	12	37
9	2	1	2	1	0	0	6	12	0	24
s_u	64	18	38	39	20	39	35	37	24	

Źródło: opracowanie własne

Z macierzy B (Tabela 6.3) wybrano produkt o największej sumie wierszy/kolumn, jest to produkt o identyfikatorze 3.

Tabela 6.3 Macierz A, B – po trzeciej iteracji [liczba powiązań]

id_{prod}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	s_u
1	0	11	15	2	3	21	10	0	2	64
2	11	0	1	0	2	1	0	2	1	18
3	15	1	0	8	1	3	5	3	2	38
4	2	0	8	0	8	9	4	7	1	39
5	3	2	1	8	0	2	1	3	0	20
6	21	1	3	9	2	0	1	2	0	39
7	10	0	5	4	1	1	0	8	6	35
8	0	2	3	7	3	2	8	0	12	37
9	2	1	2	1	0	0	6	12	0	24
s_u	64	18	38	39	20	39	35	37	24	

Źródło: opracowanie własne

Z macierzy B (Tabela 6.4) wybrano produkt o największej sumie wierszy/kolumn, jest to produkt o identyfikatorze 2.

Tabela 6.4 Macierz A, B – po czwartej iteracji [liczba powiązań]

id_{prod}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	s_u
1	0	11	15	2	3	21	10	0	2	64
2	11	0	1	0	2	1	0	2	1	18
3	15	1	0	8	1	3	5	3	2	38
4	2	0	8	0	8	9	4	7	1	39
5	3	2	1	8	0	2	1	3	0	20
6	21	1	3	9	2	0	1	2	0	39
7	10	0	5	4	1	1	0	8	6	35
8	0	2	3	7	3	2	8	0	12	37
9	2	1	2	1	0	0	6	12	0	24
s_u	64	18	38	39	20	39	35	37	24	

Źródło: opracowanie własne

Z macierzy B (Tabela 6.5) wybrano produkt o największej sumie wierszy/kolumn, jest to produkt o identyfikatorze 7.

Tabela 6.5 Macierz A, B – po piątej iteracji [liczba powiązań]

id_{prod}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	s_u
1	0	11	15	2	3	21	10	0	2	64
2	11	0	1	0	2	1	0	2	1	18
3	15	1	0	8	1	3	5	3	2	38
4	2	0	8	0	8	9	4	7	1	39
5	3	2	1	8	0	2	1	3	0	20
6	21	1	3	9	2	0	1	2	0	39
7	10	0	5	4	1	1	0	8	6	35
8	0	2	3	7	3	2	8	0	12	37
9	2	1	2	1	0	0	6	12	0	24
s_u	64	18	38	39	20	39	35	37	24	

Źródło: opracowanie własne

Tabela 6.6 Macierz A, B – po szóstej iteracji [liczba powiązań]

id_{prod}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	s_u
1	0	11	15	2	3	21	10	0	2	64
2	11	0	1	0	2	1	0	2	1	18
3	15	1	0	8	1	3	5	3	2	38
4	2	0	8	0	8	9	4	7	1	39
5	3	2	1	8	0	2	1	3	0	20
6	21	1	3	9	2	0	1	2	0	39
7	10	0	5	4	1	1	0	8	6	35
8	0	2	3	7	3	2	8	0	12	37
9	2	1	2	1	0	0	6	12	0	24
s_u	64	18	38	39	20	39	35	37	24	

Źródło: opracowanie własne

Z macierzy B (Tabela 6.6) wybrano produkt o największej sumie wierszy/kolumn, jest to produkt o identyfikatorze 4.

Tabela 6.7 Macierz A, B – po siódmej iteracji [liczba powiązań]

id_{prod}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	s_u
1	0	11	15	2	3	21	10	0	2	64
2	11	0	1	0	2	1	0	2	1	18
3	15	1	0	8	1	3	5	3	2	38
4	2	0	8	0	8	9	4	7	1	39
5	3	2	1	8	0	2	1	3	0	20
6	21	1	3	9	2	0	1	2	0	39
7	10	0	5	4	1	1	0	8	6	35
8	0	2	3	7	3	2	8	0	12	37
9	2	1	2	1	0	0	6	12	0	24
s_u	64	18	38	39	20	39	35	37	24	

Źródło: opracowanie własne

W macierzy B (Tabela 6.7) istnieje kilka możliwości wyboru następnego identyfikatora produktu, ale w związku z wyborem we wcześniejszych iteracjach produktów o identyfikatorach 3, 4 i 7 pozostaje wybranie produktu spośród dwóch o identyfikatorach 5 oraz 8. Dla wybranych wartości suma s_u jest największa w przypadku produktu o identyfikatorze 8 (wartość sumy 37) zatem ostatecznie wybrano produkt o identyfikatorze 8.

Tabela 6.8 Macierz A, B – po ósmej iteracji [liczba powiązań]

id_{prod}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	s_u
1	0	11	15	2	3	21	10	0	2	64
2	11	0	1	0	2	1	0	2	1	18
3	15	1	0	8	1	3	5	3	2	38
4	2	0	8	0	8	9	4	7	1	39
5	3	2	1	8	0	2	1	3	0	20
6	21	1	3	9	2	0	1	2	0	39
7	10	0	5	4	1	1	0	8	6	35
8	0	2	3	7	3	2	8	0	12	37
9	2	1	2	1	0	0	6	12	0	24
s_u	64	18	38	39	20	39	35	37	24	

Źródło: opracowanie własne

Z macierzy B (Tabela 6.8) wybrano produkt o największej sumie wierszy/kolumn o identyfikatorze 9.

Z macierzy B (Tabela 6.9) wybrano produkt o największej sumie wierszy/kolumn, jest to produkt o identyfikatorze 5. Liczba wartości w wektorze W jest równa liczbie produktów, zatem działanie algorytmu może być zakończone. Jego rezultat zawiera wektor W (66) przechowujący identyfikatory następujących produktów.

$$W = [1 \ 6 \ 3 \ 2 \ 7 \ 4 \ 8 \ 9 \ 5] \quad (66)$$

Tabela 6.9 Macierz A, B – po dziewiątej iteracji [liczba powiązań]

id_{prod}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	s_u
1	0	11	15	2	3	21	10	0	2	64
2	11	0	1	0	2	1	0	2	1	18
3	15	1	0	8	1	3	5	3	2	38
4	2	0	8	0	8	9	4	7	1	39
5	3	2	1	8	0	2	1	3	0	20
6	21	1	3	9	2	0	1	2	0	39
7	10	0	5	4	1	1	0	8	6	35
8	0	2	3	7	3	2	8	0	12	37
9	2	1	2	1	0	0	6	12	0	24
s_u	64	18	38	39	20	39	35	37	24	

Źródło: opracowanie własne

Aby sprawdzić czy opracowana metoda wyszukiwania powiązań pomiędzy produktami jest skuteczna, wykonano symulację wykorzystując te same listy kompletacji, które zastosowano do analizy efektywności kompletacji zamówień w wyniku zastosowania rozmieszczenia produktów według metod klasycznych (1000 list) i tego samego dużego magazynu posiadającego 200 miejsc na jednostki paletowe w każdym z 14 rzędów składowania produktów i na każdym z 6 poziomów składowania produktów.

W przeprowadzonej symulacji wykorzystano 1000 różnych od siebie produktów o następujących parametrach:

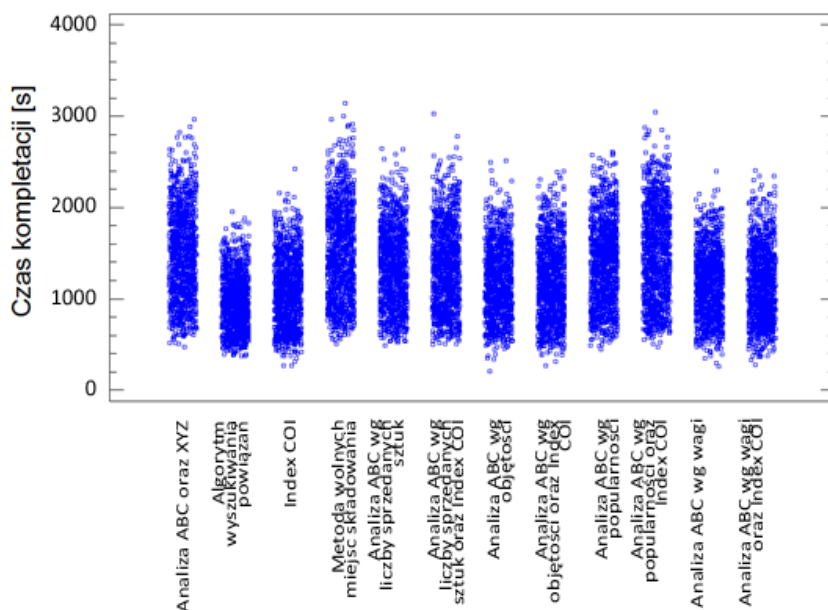
- Waga: od 0,1 do 6 kg,
- Objętość: od 0,1 do 0,4 m³,
- Liczba pozycji na liście kompletacji: od 3 do 20 szt.,
- Liczba sztuk danego produktu: od 1 do 60 szt.

Symulacje przeprowadzono w dwóch wariantach:

- **Wariant IC**, dla produktów o wysokiej podatności na piętrzenie,
- **Wariant IIC**, dla produktów o niskiej podatności na piętrzenie.

6.1.1. Analiza dla wariantu IC

W wariantcie IC sprawdzono skuteczność algorytmu wyszukiwania powiązań dla produktów o dużej podatności na piętrzenie. W związku z tym nie uwzględniano czasu przeładunku towarów na wózku kompletacyjnym. Wynik przeprowadzonej symulacji czasu kompletacji produktów przedstawiono na rysunku 6.1.



Rys. 6.1 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów, Wariant IC

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Rysunek 6.1 pozwala zauważyć znaczącą dominację algorytmu powiązań nawet w stosunku do wykazującego się dotychczas najlepszymi wynikami Indexu COI. Statystykę opisową dla wykonanych analiz przedstawiono w tabeli 6.10.

Tabela 6.10 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów dla wariantu IC [s]

	Średnia	Odchylenie standardowe	Mediana	Minimum	Maximum	Zakres
Analiza ABC oraz XYZ	1488,3	490,8	1479,6	470,2	2961,8	2491,6
Algorytm wyszukiwania powiązań	970,4	301,4	940,8	372,0	1954,2	1582,2
Index COI	1092,0	367,6	1072,2	269,8	2422,8	2153,0
Metoda wolnych miejsc składowania	1532,1	510,0	1518,2	508,4	3141,8	2633,4
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk	1348,9	432,0	1344,0	491,2	2646,2	2155,0
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk oraz Index COI	1367,1	449,1	1357,4	499,0	3028,6	2529,6
Analiza ABC wg objętości	1179,2	390,5	1141,6	205,2	2512,0	2306,8
Analiza ABC wg objętości oraz Index COI	1180,4	412,3	1139,0	268,0	2401,2	2133,2
Analiza ABC wg popularności	1387,2	453,1	1392,8	444,2	2610,6	2166,4
Analiza ABC wg popularności oraz Index COI	1509,6	507,1	1508,0	473,4	3042,6	2569,2
Analiza ABC wg wagi	1162,9	367,1	1155,0	262,0	2399,2	2137,2
Analiza ABC wg wagi oraz Index COI	1162,2	394,5	1154,6	275,2	2409,8	2134,6
Średnia	1281,7	461,1	1236,6	205,2	3141,8	2936,6

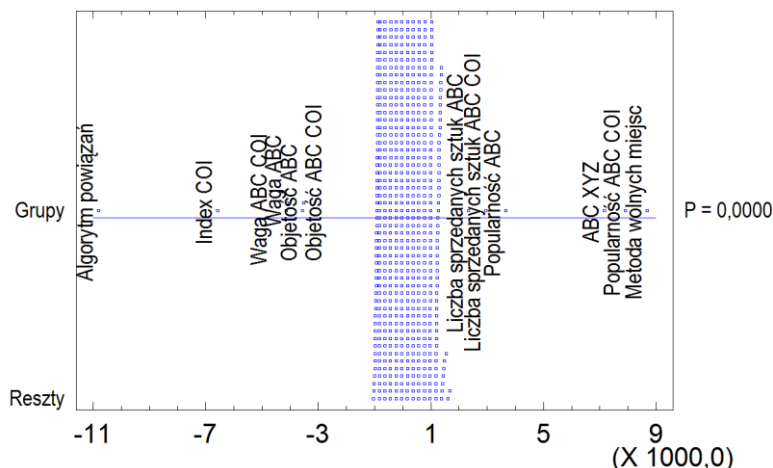
Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Dla przedstawionych analiz wykonano analizę wariancji ANOVA w celu przetestowania istotności różnic pomiędzy wartościami średnimi. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 6.11 oraz na rysunku 6.2.

Tabela 6.11 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla Wariantu IC

	Sumy kwadratów (SS)	Stopnie swobody (Df)	Średnia kwadratowa (MS)	Wskaźnik F	Współczynnik P
Pomiędzy grupami	4,00E+08	11	3,63E+07	198,98	0,0
W obrębie grupy	2,41E+09	13224	182580		
Suma	2,81E+09	13235			

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)



Rys. 6.2 Graficzne przedstawienie wyników analizy wariancji ANOVA dla Wariantu IC

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Wskaźnik testu F, który w tym przypadku wynosi 198,98, jest stosunkiem oszacowania pomiędzy grupami dla oszacowania wewnątrz grupy. Ponieważ wartość współczynnika P dla testu F jest niższa niż 0,05, to istnieje statystycznie znacząca różnica między średnimi przeprowadzonych analiz na 95,0% poziomie ufności.

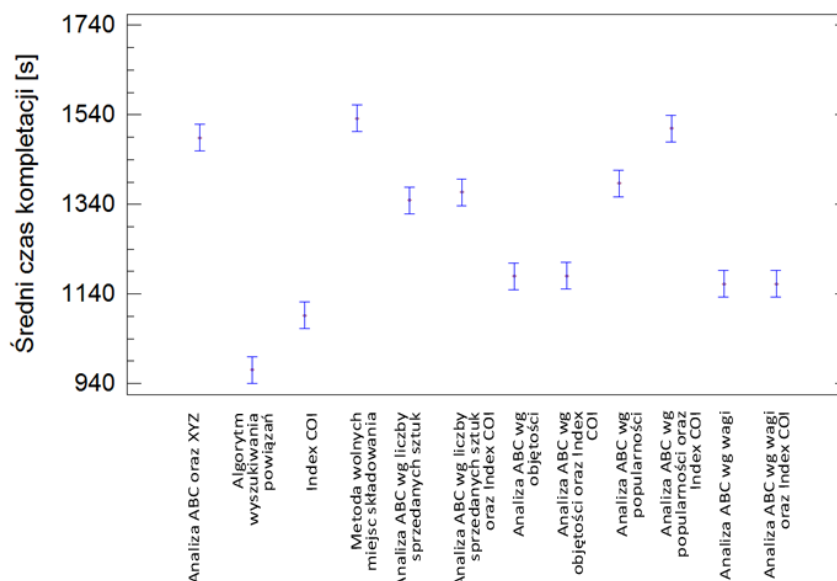
W celu określenia które z poszczególnych grup wyników statystycznie różnią się wykonano test post hoc Tukeya (HSD). Uzyskane w ten sposób grupy homogeniczne przedstawiono w tabeli 6.12, natomiast graficzna prezentacja wyników została przedstawiona na rysunku 6.3.

Tabela 6.12 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Tukeya HSD przy 95% przedziale ufności

Analiza	Średni czas kompletacji [s]	Grupy homogeniczne
Algorytm wyszukiwania powiązań	970,4	X
Index COI	1092,1	X
Analiza ABC wg wagi oraz Index COI	1162,3	X
Analiza ABC wg wagi	1163,0	X
Analiza ABC wg objętości	1179,3	X
Analiza ABC wg objętości oraz Index COI	1180,4	X
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk	1349,0	X
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk oraz Index COI	1367,1	X
Analiza ABC wg popularności ABC	1387,2	X
Analiza ABC oraz XYZ	1488,3	X
Analiza ABC wg popularności oraz Index COI	1509,7	X
Metoda wolnych miejsc składowania	1532,2	X

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

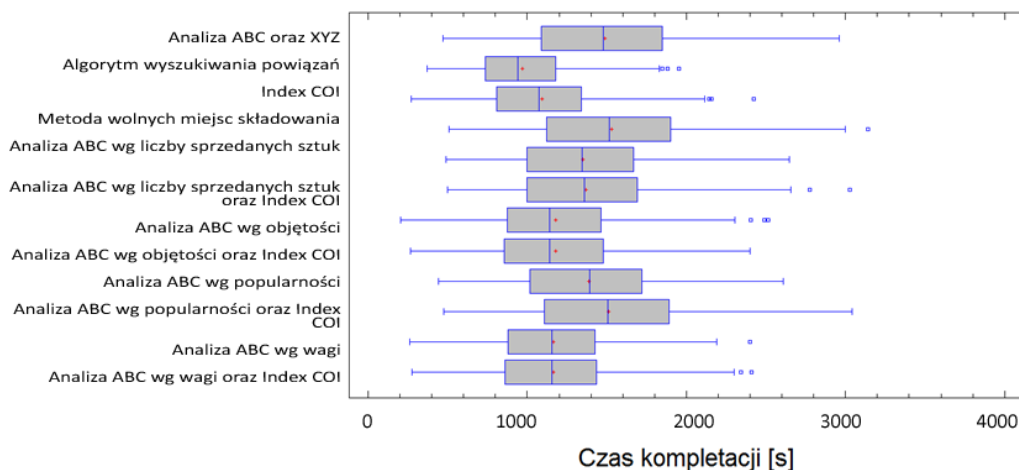
Na podstawie przeprowadzonego testu stwierdzono brak podobieństwa wyników otrzymanych w wyniku działania algorytmu wyszukiwania powiązań do pozostałych analiz.



Rys. 6.3 Wynik porównania średnich z interwałem Tukeya HSD przy 95% przedziale ufności

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Ostatnią częścią analizy danych było wykonanie porównania median grup za pomocą testu Friedmana. Wynik testu wynosił 4769,32, przy parametrze p równym 0,0, co pozwala stwierdzić, że grupy statystycznie różnią się od siebie przy 95% przedziale ufności. Na rysunku 6.4 przedstawiono graficzną prezentację wyników w postaci wykresu ramka-wąsy.



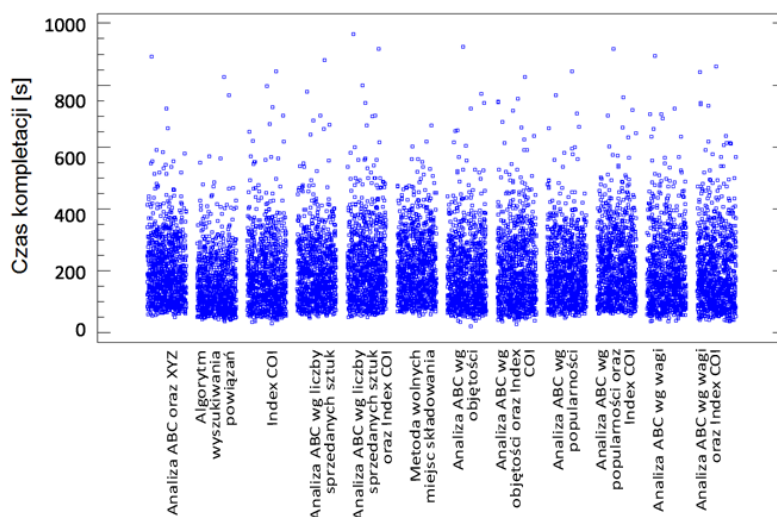
Rys. 6.4 Wykres ramka-wąsy dla Variantu IC

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Przeprowadzona analiza wyników pozwoliła stwierdzić, że opracowany algorytm wyszukiwania powiązań pomiędzy produktami, daje wyniki lepsze od Indexu COI o 11,1% porównując wartości średnie i o 12,2% porównując mediany. Natomiast w stosunku do metody wolnych miejsc składowania daje wyniki lepsze o 36,7% porównując średnie i 38,0% według mediany.

6.1.2. Analiza dla wariantu IIC

W Wariancie IIC założono, że przechowywane produkty w magazynie nie są podatne na piętrzenie, zatem może istnieć konieczność zmiany ich ułożenia na wózku kompletacyjnym, w celu uniknięcia uszkodzenia produktów. Wynik symulacji kompletacji produktów przedstawiono na rysunku 6.5.



Rys. 6.5 Czas kompletacji zamówień w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów, Wariant IIC

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Na wykresie przedstawionym na rysunku 6.5 można zauważyć, że opracowany algorytm wyszukiwania podobieństw pomiędzy produktami pozwala uzyskać stosunkowo niski czas kompletacji produktów przy jednoczesnym zachowaniu jednego z mniejszych rozrzutu wyników. Statystykę opisową dla wykonanych analiz przedstawiono w tabeli 6.13.

Tabela 6.13 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów dla wariantu IIC

	Średnia	Odchylenie standardowe	Mediana	Minimum	Maximum	Zakres
Analiza ABC oraz XYZ	2041,1	1031,7	1858,2	517,6	8927,8	8410,2
Algorytm wyszukiwania powiązań	1567,2	910,3	1346,4	381,2	8264,3	7883,1
Index COI	1872,6	1101,3	1639,7	298,6	8443,1	8144,5
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk	1960,6	1044,3	1804,8	491,2	8801,3	8310,1
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk oraz Index COI	2114,5	1181,5	1878,0	499,0	9649,1	9150,1
Metoda wolnych miejsc składowania	2139,1	1033,5	1973,8	553,4	6698,4	6145,0
Analiza ABC wg objętości	1872,9	1101,5	1605,0	205,2	9240,3	9035,1
Analiza ABC wg objętości oraz Index COI	1968,2	1180,2	1688,4	274,7	8263,5	7988,8
Analiza ABC wg popularności	1964,7	1040,7	1759,6	477,8	8447,8	7970,0
Analiza ABC wg popularności oraz Index COI	2187,1	1141,9	1992,8	560,3	9171,1	8610,8
Analiza ABC wg wagi	1981,2	1156,6	1711,0	359,8	8941,3	8581,4
Analiza ABC wg wagi oraz Index COI	1982,7	1189,4	1678,6	375,4	8592,8	8217,4
Średnia	1971,0	1105,9	1740,0	205,2	9649,1	9443,9

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Praca doktorska | Politechnika Krakowska | 2016

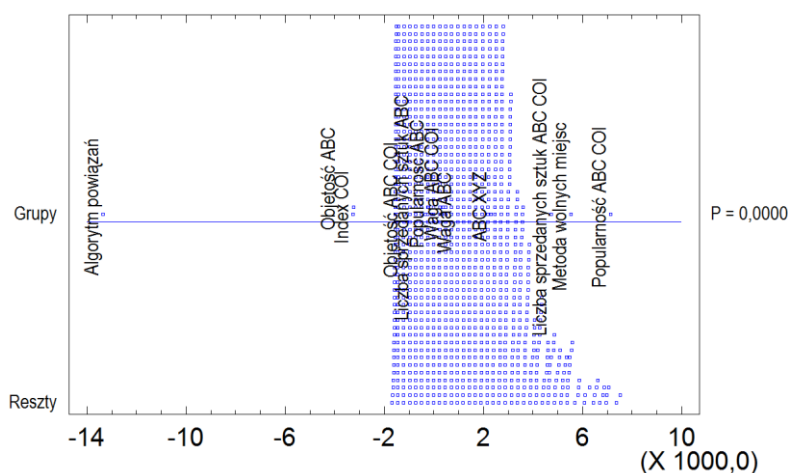
Dla przedstawionych danych wykonano analizę wariancji, której wyniki przedstawiono w tabeli 6.14 oraz w postaci graficznej na rysunku 6.6.

Tabela 6.14 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla Wariantu IIC

	Sumy kwadratów (SS)	Stopnie swobody (Df)	Średnia kwadratowa (MS)	Wskaźnik F	Współczynnik P
Pomiędzy grupami	2,83E+08	11	2,57E+07	21,44	0,0
W obrębie grupy	1,44E+10	11988	1,20E+06		
Suma	1,47E+10	11999			

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Wskaźnik testu F, dla przeprowadzonej analizy wynosi 21,44. W związku z tym, że wartość współczynnika p dla testu F jest niższa niż 0,05, to istnieje statystycznie znacząca różnica między średnimi przeprowadzonych analiz na 95,0% poziomie ufności.



Rys. 6.6 Graficzne przedstawienie wyników analizy wariancji ANOVA dla Wariantu IIC

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

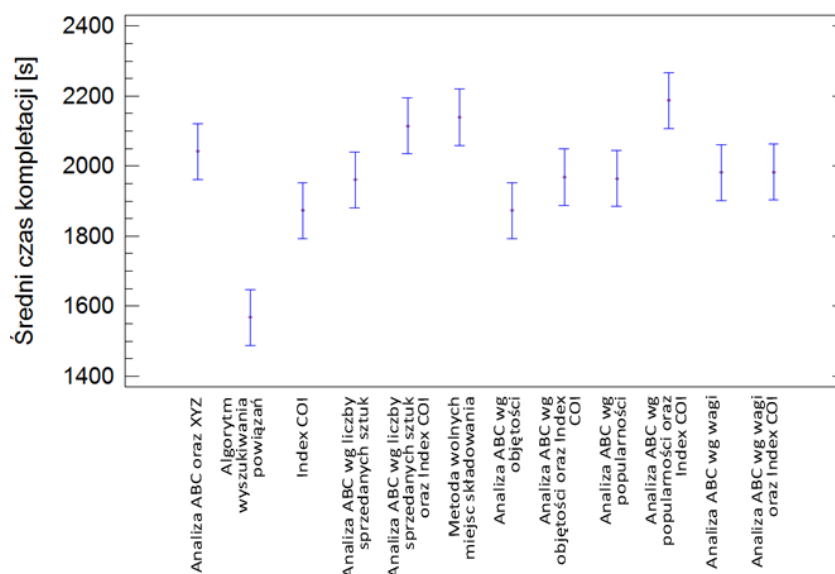
W celu określenia które z poszczególnych grup wyników statystycznie różnią się od siebie wykonano test post hoc Tukeya (HSD). Wyniki testu przedstawiono w tabeli 6.15.

Tabela 6.15 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Tukeya HSD przy 95% przedziale ufności

Analiza	Średni czas kompletacji [s]	Grupy homogeniczne
Algorytm wyszukiwania powiązań	1567,3	X
Index COI	1872,7	X
Analiza ABC wg objętości	1873,0	X
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk	1960,6	XX
Analiza ABC wg popularności	1964,8	XX
Analiza ABC wg objętości oraz Index COI	1968,2	XX
Analiza ABC wg wagi	1981,3	XXX
Analiza ABC wg wagi oraz Index COI	1982,8	XXX
Analiza ABC oraz XYZ	2041,2	XXX
Analiza ABC wg liczba sprzedanych sztuk oraz Index COI	2114,5	XXX
Metoda wolnych miejsc składowania	2139,1	XX
Analiza ABC wg popularności oraz Index COI	2187,1	X

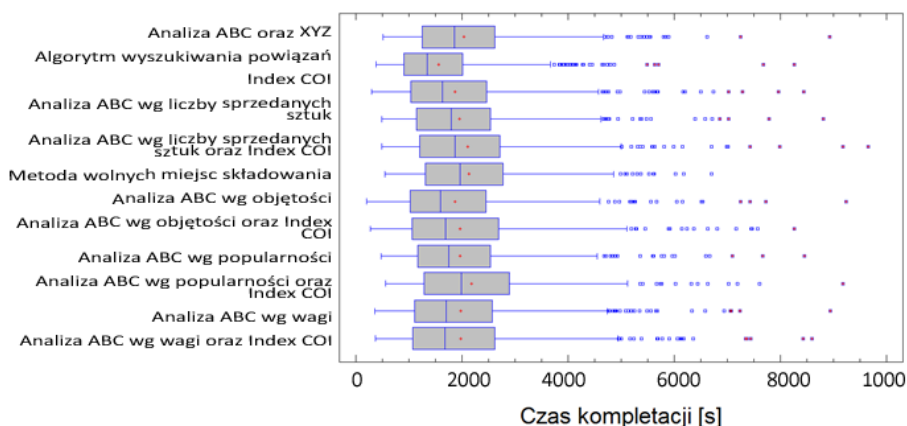
Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Na podstawie przeprowadzonego testu stwierdzono brak podobieństwa wyników otrzymanych w wyniku działania algorytmu wyszukiwania powiązań do pozostałych metod klasyfikacji produktu. Średnie wartości czasu kompletacji produktów, wraz z interwałem dla testu Tukeya przedstawiono na rysunku 6.7.



Rys. 6.7 Wynik porównania wielokrotnego za pomocą testu Tukeya HSD przy 95% przedziale ufności
 Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Dla omawianych danych wykonano porównanie median grup za pomocą testu Friedmana, którego wynik wynosił 2135,43, przy parametrze p równym 0,0, co pozwala stwierdzić, że grupy statystycznie różnią się od siebie przy 95% przedziale ufności. Na rysunku 6.8 przedstawiono graficzną prezentację wyników w postaci wykresu ramka-wąsy.



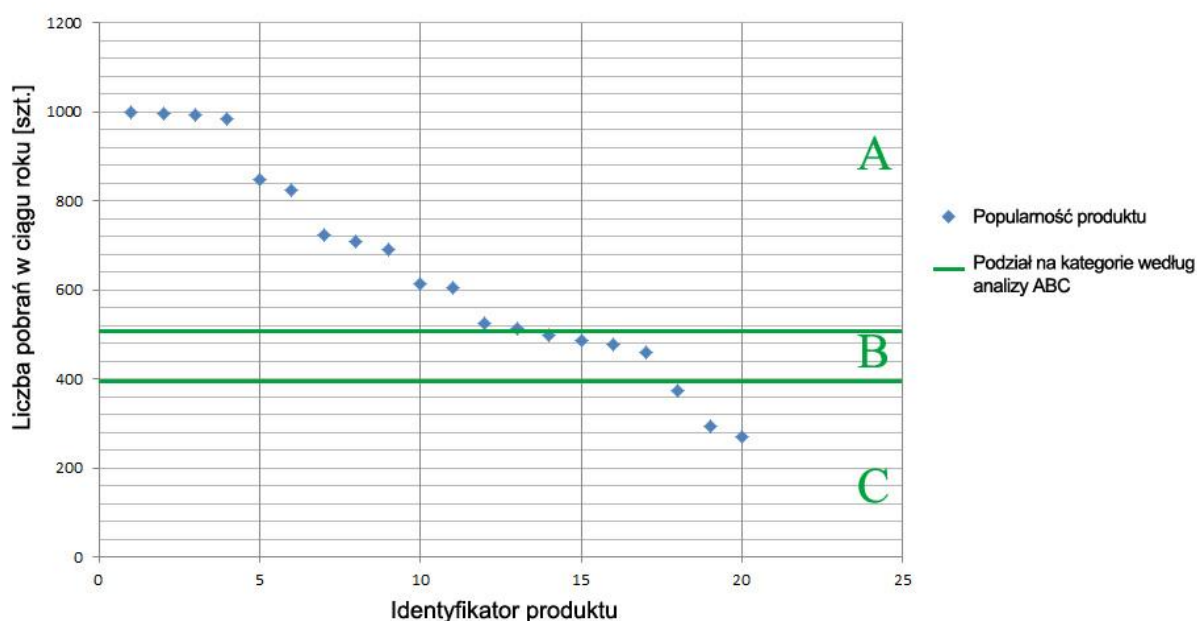
Rys. 6.8 Wykres ramka-wąsy dla Wariantu IIC
 Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Z przeprowadzonej analizy wynika, że rozmieszczenie produktów za pomocą opracowanego algorytmu wyszukiwania powiązań pomiędzy produktami daje znacznie odbiegające wyniki od wyników uzyskanych za pomocą pozostałych metod klasyfikacji. Porównując wyniki opracowanego algorytmu z rozmieszczeniem produktów w oparciu o wolne miejsca składowania, stwierdzono, że w przy pomocy algorytmu wyszukiwania powiązań możliwe jest skrócenie średniego czasu trwania kompletacji o 26,7% oraz mediany o 31,8%. Natomiast w stosunku do najlepszej metody, tj. Indexu COI, której efektywność potwierdzono w podrozdziale 5.2.4 uzyskano wyniki lepsze o 16,3% według wartości średniej

i o 17,8% według mediany. W związku z powyższym wykazano, że opracowany algorytm wyszukiwania powiązań pomiędzy produktami jest bardziej efektywny od współcześnie stosowanych metod klasyfikacji produktów w przypadku towarów o małej podatności na piętrzenie.

6.2. Podział produktów na kategorie w oparciu o dynamiczne wyznaczanie granic

Najczęściej podział produktów na kategorie odbywa się w oparciu o z góry założone przedziały wartości. Często wykorzystywana jest przy tym zasada Pareto Lorenza wskazująca na podział na dwie kategorie stanowiące 80% i 20% udziału w całości. Natomiast klasyczna analiza ABC dzieli produkty na trzy grupy o procentowym udziale wynoszącym: A – 80%, B – 15%, C – 5% [56], chociaż można też się spotkać z innymi wartościami podziału, które mogą odbiegać o 10% od przyjętego podziału dla klasycznej analizy ABC. Przykładowe wyniki klasyfikacji ABC w oparciu o popularność produktu (ilość odwiedzin regału) przedstawiono na rysunku 6.9.



Rys. 6.9 Podział produktów na kategorie ABC według udziału 80%, 15% i 5% dla popularności produktu

Źródło: opracowanie własne

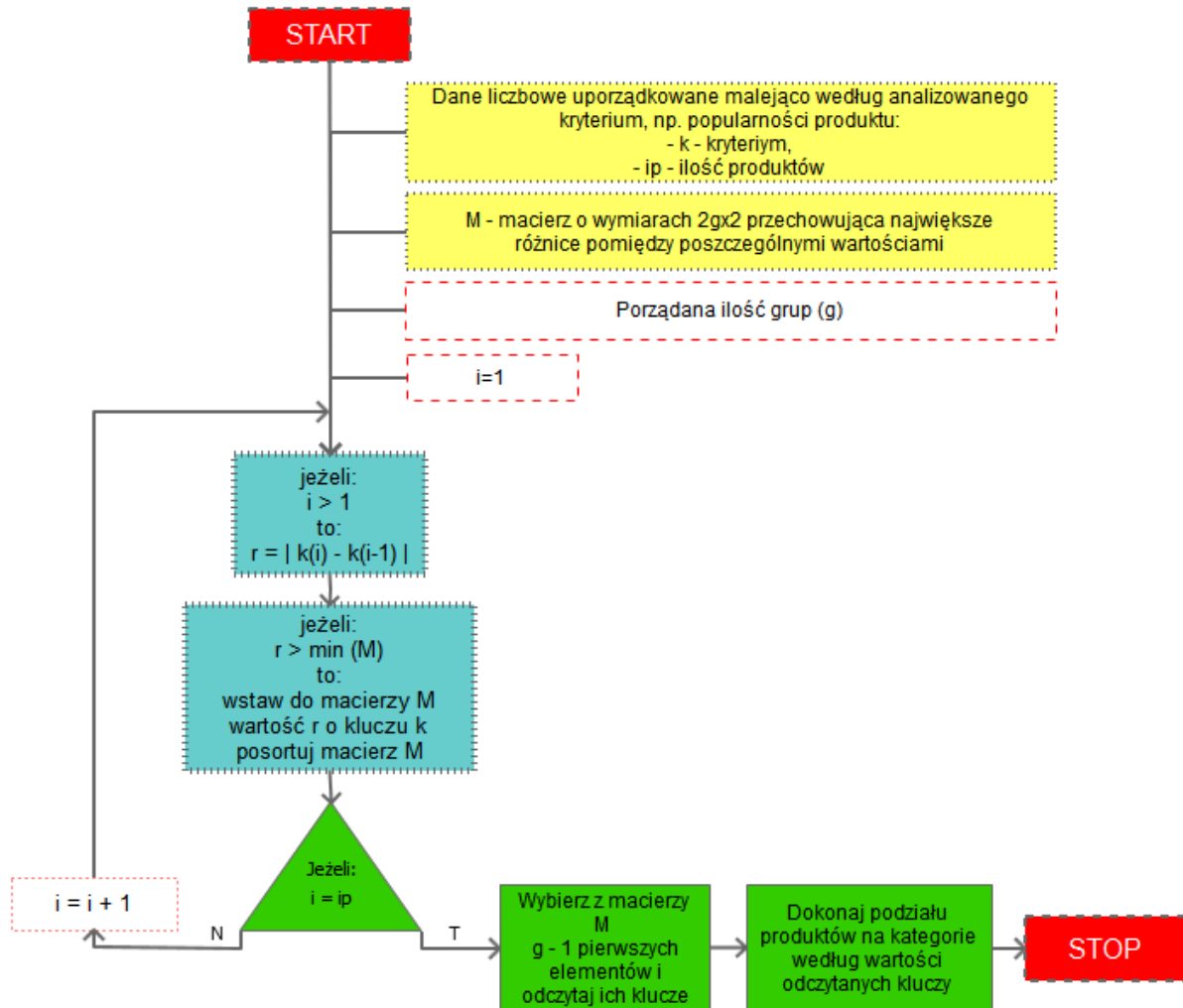
Przytoczony podział pokazuje, że w poszczególnych wartościach znalazły się produkty:

- Grupa A, 13 produktów z maksymalną różnicą wartości pomiędzy produktami 394,
- Grupa B, 4 produkty z maksymalną różnicą wartości pomiędzy produktami 38,
- Grupa C, 3 produkty z maksymalną różnicą wartości pomiędzy produktami 105.

Można zatem zauważyć, że dla takiego podziału grupę A mogą tworzyć produkty najmniej podobne do siebie. Wyniki analizy ABC zależą od sposobu rozłożenia wyników. W przedstawianym przykładzie można dopatrzeć się ich rozkładu liniowego przez co grupa A jest mimo wszystko najszabszą, ponieważ cechuje się najmniejszym podobieństwem pomiędzy produktami. Dla takiego podziału produktów na kategorie planowanie ich rozmieszczenia w magazynie może się okazać, że mało efektywne z punktu widzenia czasu kompletacji w stosunku do innych metod. Trafniejszym rozwiązaniem byłby podział według zbieżności wartości.

6.2.1. Algorytm metody podziału na kategorie

Dla podziału według zbieżności wartości konieczne jest wyznaczenie granic podziału dla każdego przypadku z osobna [64]. Aby tego dokonać posłużono się dwoma autorskimi algorytmami opracowanymi na potrzeby niniejszej pracy. Pierwszy z nich dokonuje podziału na dwukrotnie większą liczbę grup niż zakładano, drugi natomiast dokonuje połączenia tych grup w taki sposób, aby ich wartości były jak najbardziej do siebie zbliżone. Jako wartości mogą być przyjęte: wartość sprzedaży lub zysk ze sprzedaży, częstość pobrań, wielkość wydań, waga lub objętości produktu. Sposób działania pierwszego algorytmu został przedstawiony na rysunku 6.10.



Rys. 6.10 Algorytm podziału produktów na kategorie według największych różnic wartości

Źródło: opracowanie własne

W wyniku działania algorytmu podziału produktów według największych różnic wartości (Rys. 6.10), dla zakładanej liczby trzech grup zostanie zwrócony wynik w postaci podziału na 30 grup. Kolejnym krokiem jest połączenie uzyskanych grup w taki sposób, aby zachowane było możliwie największe podobieństwo wartości pomiędzy łączonymi grupami. Algorytm łączący grupy działa w oparciu o iterację w której za każdym razem łączone są ze sobą te grupy dla których wartości graniczne najmniej różnią się od siebie.

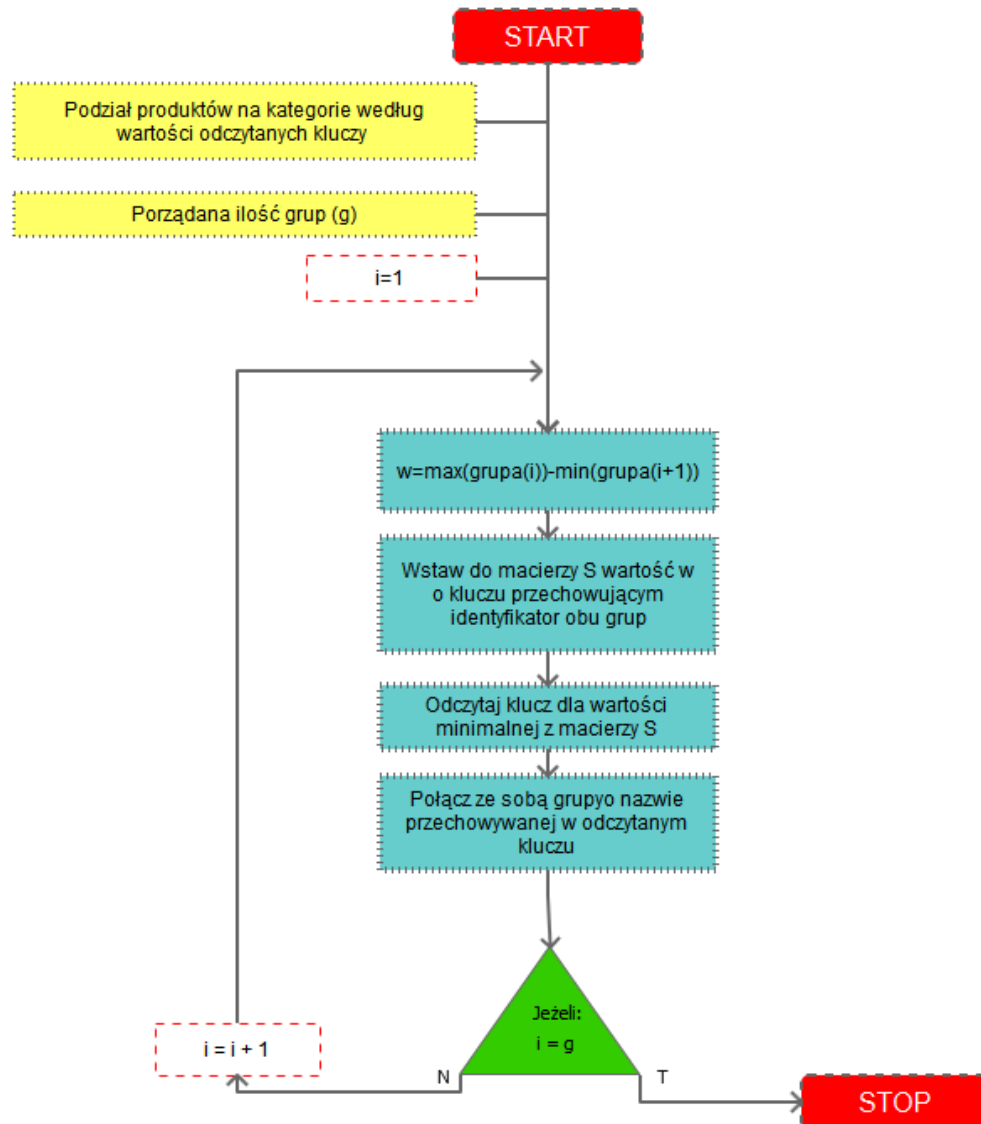
W celu określenia rozbieżności wartości posłużono się równaniem (67).

$$w = \max(\text{grupa}(i)) - \min(\text{grupa}(i + 1)) \quad (67)$$

gdzie:

- w – współczynnik określający rozbieżność wartości w grupie,
- grupa – będąca zbiorem wszystkich wartości w grupie
- i – zmienna iteracyjna określająca aktualną grupę.

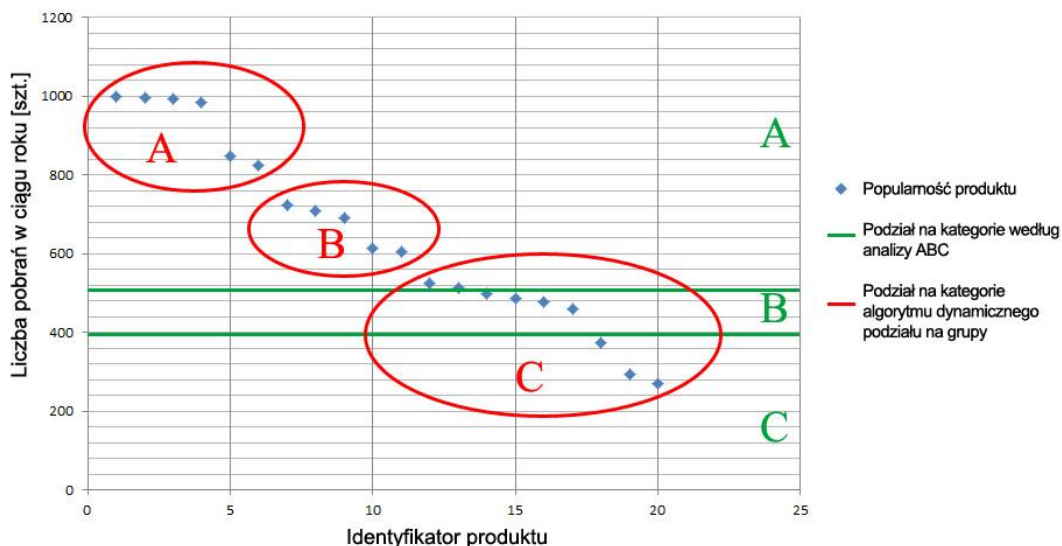
Sposób działania algorytmu łączącego grupy do ilości zakładanej na początku przedstawiono na rysunku 6.11.



Rys. 6.11 Algorytm łączenia grup produktów za pomocą iteracji

Źródło: opracowanie własne

Efektem działania algorytmu (Rys. 6.11) jest połączenie grup do liczby grup zakładanych na początku. Zastosowanie drugiego algorytmu pozwala uniknąć błędu podziału na grupy o bardzo dużej rozbieżności pomiędzy wynikami. Na rysunku 6.12 zilustrowano wynik działania prezentowanej metody w połączeniu z klasycznym podziałem według analizy ABC.



Rys. 6.12 Podział na kategorie według analizy ABC oraz algorytmu dynamicznego podziału na grupy
Źródło: opracowanie własne

Zastosowanie obu algorytmów gwarantuje podział na grupy z uwzględnieniem dwóch kryteriów podziału, tj. różnicy pomiędzy sąsiednimi punktami oraz zbieżności wartości kryterium wewnątrz grupy.

Przedstawiony algorytm podziału został zweryfikowany pod kątem efektywności ustalonej względem kryterium czasu kompletacji zamówień i porównany z klasyczną metodą ABC.

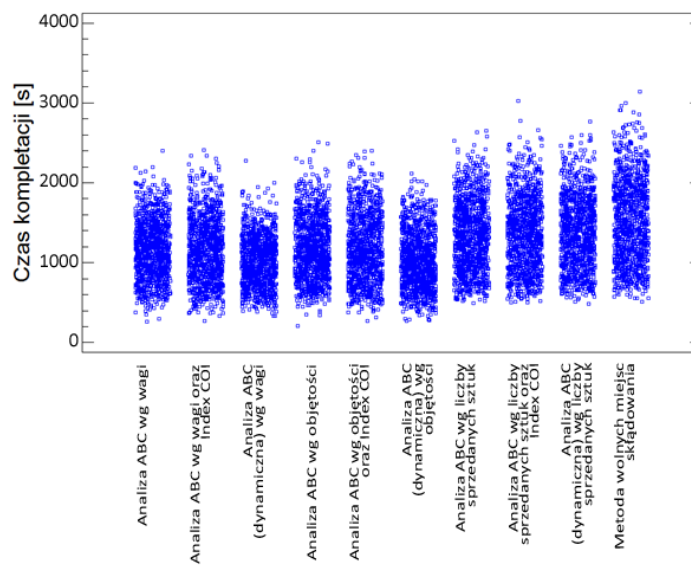
6.2.2. Analiza efektywności podziału produktów na klasy w oparciu o dynamiczne wyznaczanie granic

Aby zweryfikować efektywność przedstawionego algorytmu podziału produktów na klasy w oparciu o dynamiczne wyznaczanie granic wykonano statystyczne analizy porównawcze. W przypadku magazynów średniej wielkości algorytm pozwala na zmniejszenie czasu kompletacji zamówień o około 2,4% w stosunku do analizy ABC oraz połączonej analizy ABC z Indexem COI dla produktów podatnych na piętrzenie. W pozostałych przypadkach, tj.:

- magazynów średniej wielkości i produktów niepodatnych na piętrzenie,
- magazynów dużych, bez względu na podatność produktów na piętrzenie

czas kompletacji produktów w wyniku zastosowania omawianego algorytmu został zmniejszony tylko w szczególnych przypadkach, tj. klasyfikacji po objętości lub wadze. W związku z tym stwierdzono, że jedynie dla niedużych magazynów algorytm może mieć zastosowanie, jednak nie pozwoli na uzyskanie znaczącej poprawy.

Wyniki symulacji czasu trwania kompletacji bez uwzględniania znaczenia podatności na piętrzenie dla przypadku dużego magazynu wykonanych do celów porównawczych przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 6.13.



Rys. 6.13 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów
 Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Dokonując graficznego porównania wyników (Rys. 6.13), można zaobserwować, że przedstawiony algorytm pozwala na otrzymanie wyników lepszych od klasycznej metody ABC oraz jej połączenia z Indexem COI. Statystykę opisową dla porównywanych analiz przedstawiono w tabeli 6.16.

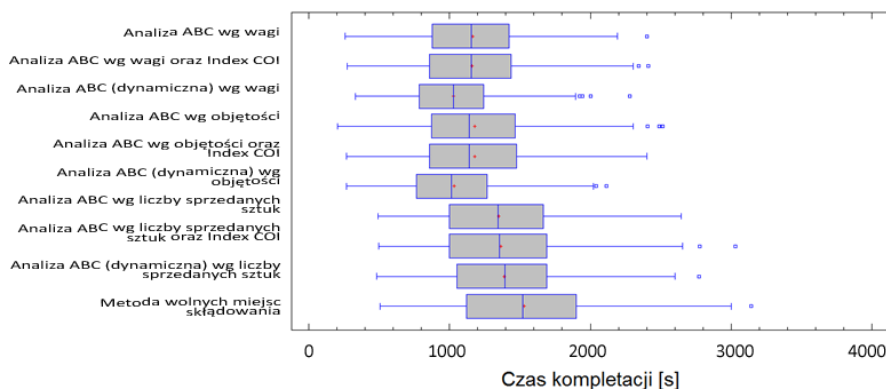
Tabela 6.16 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów [s]

	Średnia	Odchylenie standardowe	Mediana	Minimum	Maximum	Zakres
Analiza ABC wg wagi	1163,0	367,2	1155,0	262,0	2399,2	2137,2
Analiza ABC wg wagi oraz Index COI	1162,3	394,5	1154,6	275,2	2409,8	2134,6
Analiza ABC (dynamiczna) wg wagi	1029,5	309,4	1027,2	333,6	2278,2	1944,6
Analiza ABC wg objętości	1179,3	390,5	1141,6	205,2	2512,0	2306,8
Analiza ABC wg objętości oraz Index COI	1180,4	412,4	1139,0	268,0	2401,2	2133,2
Analiza ABC (dynamiczna) wg objętości	1035,5	356,7	1014,4	269,8	2114,0	1844,2
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk	1349,0	432,0	1344,0	491,2	2646,2	2155,0
Analiza ABC wg liczby sprzedanych sztuk oraz Index COI	1367,1	449,2	1357,4	499,0	3028,6	2529,6
Analiza ABC (dynamiczna) wg liczby sprzedanych sztuk	1387,2	432,9	1392,8	486,0	2769,2	2283,2
Metoda wolnych miejsc składowania	1532,2	510,0	1518,2	508,4	3141,8	2633,4
Średnia	1238,5	437,1	1199,5	205,2	3141,8	2936,6

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Statystyczne wyniki przeprowadzonych analiz przedstawiono w postaci graficznej na wykresie typu ramka-wąsy (Rys. 6.14).

Z przeprowadzonych analiz wynika, że algorytm podziału produktów na klasy w oparciu o dynamiczne wyznaczanie granic pozwala zwiększyć efektywność procesu kompletacji zamówień dla kryterium czasu kompletacji zamówień.



Rys. 6.14 Wykres ramka-wąsy dla symulacji według dynamicznego wyznaczania granic

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Opracowany algorytm pozwala na zmniejszenie czasu kompletacji dla kryterium objętości o 11,4% względem średnich wartości analizy ABC oraz 32,8% względem metody wolnych miejsc składowania. Dla kryterium wagi wyniki są lepsze o 12,2% względem średnich wartości analizy ABC oraz 32,4% względem metody wolnych miejsc składowania.

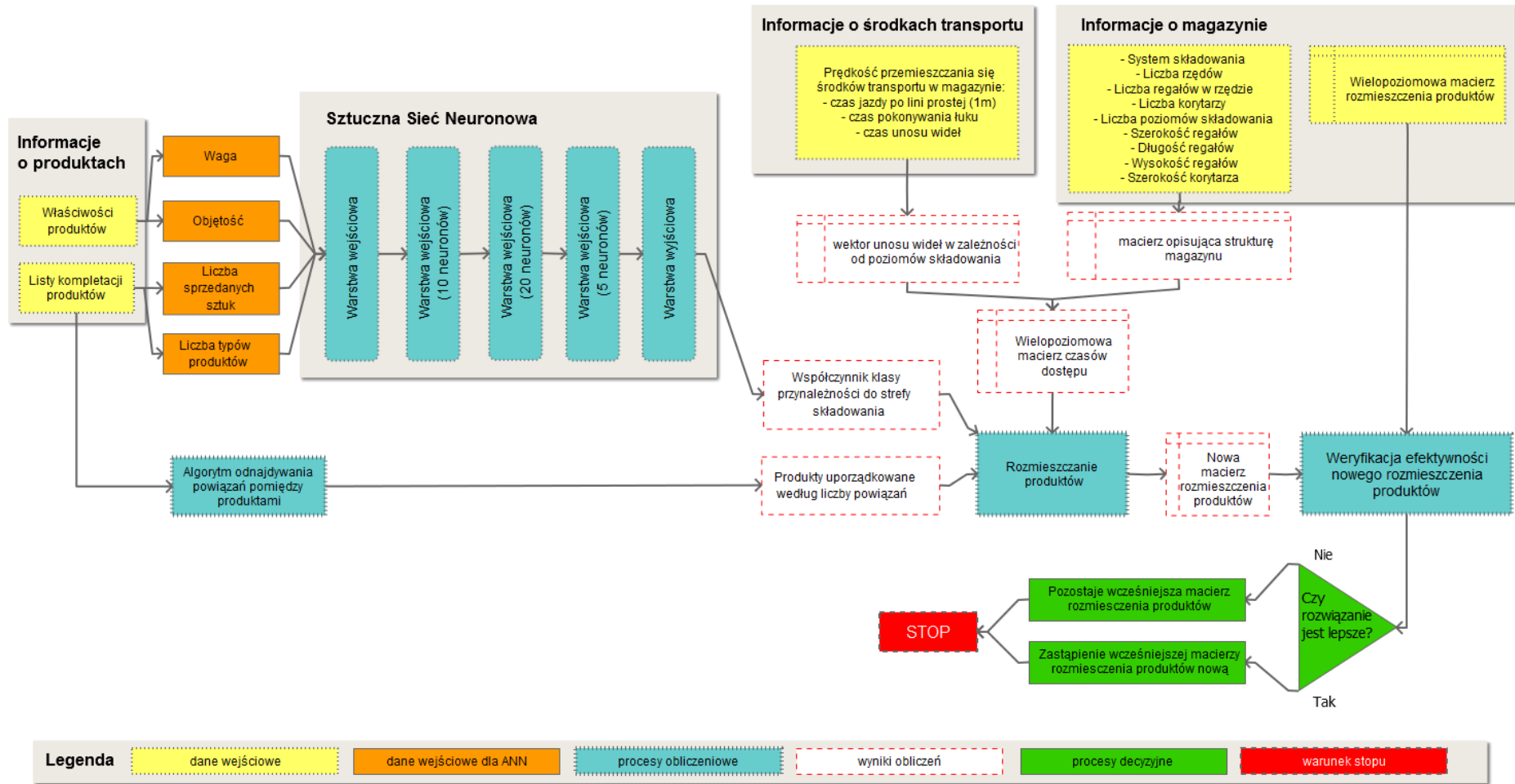
Dla kryterium liczby sprzedanych sztuk otrzymano wynik gorszy pod względem czasu kompletacji zamówień o 2,8% według klasycznej analizy ABC oraz wynik lepszy o 9,4% według metody wolnych miejsc składowania. Podobny wynik otrzymano dla kryterium popularności – gorszy o 4,7% względem analizy ABC i lepszy o 5,1% od metody wolnych miejsc składowania.

6.3. Klasyfikacja produktów z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych

W ramach początkowych badań przeprowadzono szereg symulacji ukierunkowanych na wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych (SSN) do rozwiązania problemu podziału produktów na klasy. W tym celu wykorzystano sieć typu feedforward, dla której dokonywano modyfikacji struktury (liczby warstw i neuronów w poszczególnych z nich) oraz zastosowano metodę nauczania w oparciu o wzorce, tj. zestaw danych wejściowych (waga i objętość produktów, liczbę sprzedanych sztuk, popularność produktu) oraz pożądaných wyników (klasy przynależności). Zasadniczym problemem było ustalenie klas przynależności, które przypisywano w oparciu o klasyczne analizy (ABC, XYZ, Index COI) przyjmując różne kryteria. Następnie w oparciu o otrzymane wyniki dokonywano doboru wag w celu połączenia niezwiązanych ze sobą wyników kilku analiz w jedną kategorię. Modyfikacja wag w sposób progresywny nie przynosiła jednak zadowalających efektów. Również zmiana struktury sieci i funkcji uczącej nie pozwoliła na uzyskanie lepszych efektów. W każdym przypadku otrzymane wyniki klasyfikacji produktów na podstawie których dokonano ich rozmieszczenia w magazynie, powodowały wydłużenie czasu trwania kompletacji o około 1-3%. W związku z tym uznano za wskazane dokonanie zmiany metody doboru wag.

6.3.1. Schemat funkcjonalny opracowanej metody

Opracowana metoda wykorzystuje sztuczne sieci neuronowe jako podstawowe narzędzie pozwalające określić klasę produktów w oparciu o zbiór danych wejściowych takich jak: waga produktu, objętość, liczba sprzedanych sztuk oraz powiązania pomiędzy produktami. Przedstawioną metodę zaprezentowano w postaci schematu blokowego na rysunku 6.15.



Rys. 6.15 Schemat blokowy opracowanej metody planowania rozmieszczenia produktów w magazynie

Źródło: opracowanie własne

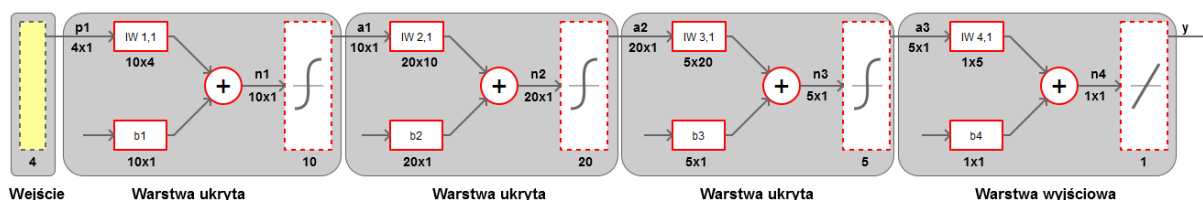
Na rysunku 6.15 zaznaczono kolorem żółtym dane wejściowe wykorzystywane w opracowanej metodzie. Należą do nich:

- dane opisujące magazyn – w tym strukturę magazynu oraz sposób składowania towarów,
- prędkości poruszania się po magazynie dla wybranego rodzaju u środka transportu,
- początkowa macierz rozmieszczenia produktów,
- właściwości produktów,
- archiwalne listy kompletacji produktów.

Jeśli w wyniku obliczeń, określenia kategorii przynależności i rozmieszczenia produktów według nich efektywność procesu kompletacji by spadła to decyzja o zmianie rozmieszczenia produktów nie będzie podejmowana. Jeśli natomiast nowy wariant okazałby się lepszy to wtedy wskazane będzie dokonanie przesunięć wewnątrzmagazynowych poszczególnych produktów według nowego planu lokalizacji produktów.

6.3.2. Struktura sztucznej sieci neuronowej

Do modelowania sztucznych sieci neuronowych wykorzystano oprogramowania Matlab R2011b z Toolboxem Neural Network. Zdecydowano, że do symulacji zostanie wykorzystana sieć wielowarstwowa jednokierunkowa typu feedforward składająca się z trzech warstw ukrytych. Sieci tego typu to struktury, w których istnieje ściśle określony kierunek przepływu sygnałów – od pewnego wejścia, do wyjścia, na którym sieć podaje ustalone rozwiązanie. Sieci typu feedforward są najczęściej stosowane i najbardziej użyteczne. W pierwszej z warstw ukrytych zastosowano 10 neuronów, w drugiej 20, w trzeciej zaś 5. We wszystkich warstwach ukrytych użyto tangensoidalną funkcję aktywacji. Natomiast jako dane wejściowe wykorzystano: liczbę sprzedanych sztuk produktu rocznie, popularność produktu, jego wagę oraz objętość. Wybór struktury sieci i funkcji aktywacji został dobrany doświadczalnie. Uproszczony schemat zastosowanej sieci neuronowej przedstawiono na rysunku 6.16.



Rys. 6.16 Struktura zastosowanej sztucznej sieci neuronowej

Źródło: opracowanie własne

6.3.3. Proces uczenia sieci – dobór wag

W celu doboru wag dokonano porównania i oceny efektywności (względem czasu trwania kompletacji zamówień) poszczególnych analiz i przyjętych kryteriów (popularności produktów, liczby sprzedanych sztuk, wagi oraz objętości), co pozwoliło wyłonić te, dzięki którym możliwe było osiągnięcie najlepszych wyników. W tym celu wykorzystano wyniki analiz przeprowadzonych dla Wariantu IB (podrozdział 5.2.3) oraz opracowanego algorytmu wyszukiującego powiązania pomiędzy produktami (podrozdział 6.1). Wybrano metody klasyfikacji dające najlepsze wyniki, tj.: index COI, analizę ABC według kryterium wagi, analizę ABC według kryterium objętości oraz algorytm wyszukiwania powiązań.

Ideą postępowania było sprawdzenie czy istnieją statystyczne zależności danych wejściowych z czasem kompletacji zamówień, a następnie w przypadku potwierdzenia takich zależności, ustalenie wag korygujących wyniki klasyfikacji produktów dla powyższych

metod. Zatem dla wymienionych metod dokonano statystycznej analizy korelacji danych wejściowych z czasem kompletacji zamówień otrzymanym w wyniku zastosowania poszczególnych metod klasyfikacji produktów. Dla każdej z par (parametr wejściowy – metoda klasyfikacji produktów) sprawdzono wartość współczynnika p , który dla wszystkich możliwych par był mniejszy od 0,05, co oznacza statystyczną korelację liniową pomiędzy wartościami w parze dla 5% poziomu istotności. Następnie obliczono współczynnik korelacji przyjmujący wartość w skali od -1 (silna korelacja odwrotnie proporcjonalna) do 1 (silna korelacja wprost proporcjonalna). Wykresy pokazujące zależności dla poszczególnych par przedstawiono na rysunku 6.17. Natomiast współczynniki korelacji przedstawiono w tabeli 6.17.

Tabela 6.17 Współczynniki korelacji (k) parametrów wejściowych z wynikami dla analiz

	Index COI	ABC (Waga)	ABC (Objętość)	Algorytm powiązań	Suma
Liczba produktów [szt.]	0,7384	0,7724	0,7723	0,6891	-
Liczba typów produktów [szt.]	0,7982	0,8375	0,8342	0,7433	-
Objętość produktów [m ³]	0,6250	0,6735	0,6514	0,5594	-
Waga produktów [kg]	0,7139	0,7512	0,7319	0,6548	-
Średnia	0,7189	0,7587	0,7475	0,6617	2,8866

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

W oparciu o współczynniki korelacji (k) w celu określenia współczynników wagowych (w) potrzebnych do obliczenia ostatecznej kategorii uczącej dokonano normalizacji wartości średniej wykorzystując zależność (69).

$$w = \frac{\bar{k}}{\sum_{i=1}^n \bar{k}} \quad (69)$$

gdzie:

k – współczynnik korelacji wyników dla analizy z parametrem wejściowym,

n – liczba analiz.

Otrzymano zatem następujące współczynniki wagowe (70).

$$w = \begin{cases} 0,2490 & \text{dla} & \text{Indexu COI} \\ 0,2628 & \text{dla} & \text{Analizy ABC (wg wagi)} \\ 0,2589 & \text{dla} & \text{Analizy ABC (wg objętości)} \\ 0,2292 & \text{dla} & \text{Algorytmu wyszukiwania powiązań} \end{cases} \quad (70)$$

Ostateczną kategorię (kat) wykorzystaną w procesie uczenia sztucznych sieci neuronowych obliczono ze wzoru (71).

$$kat = 0,2490 \cdot kat_{COI} + 0,2628 \cdot kat_{ABC} + 0,2589 \cdot kat_{ABC2} + 0,2292 \cdot kat_{AP} \quad (71)$$

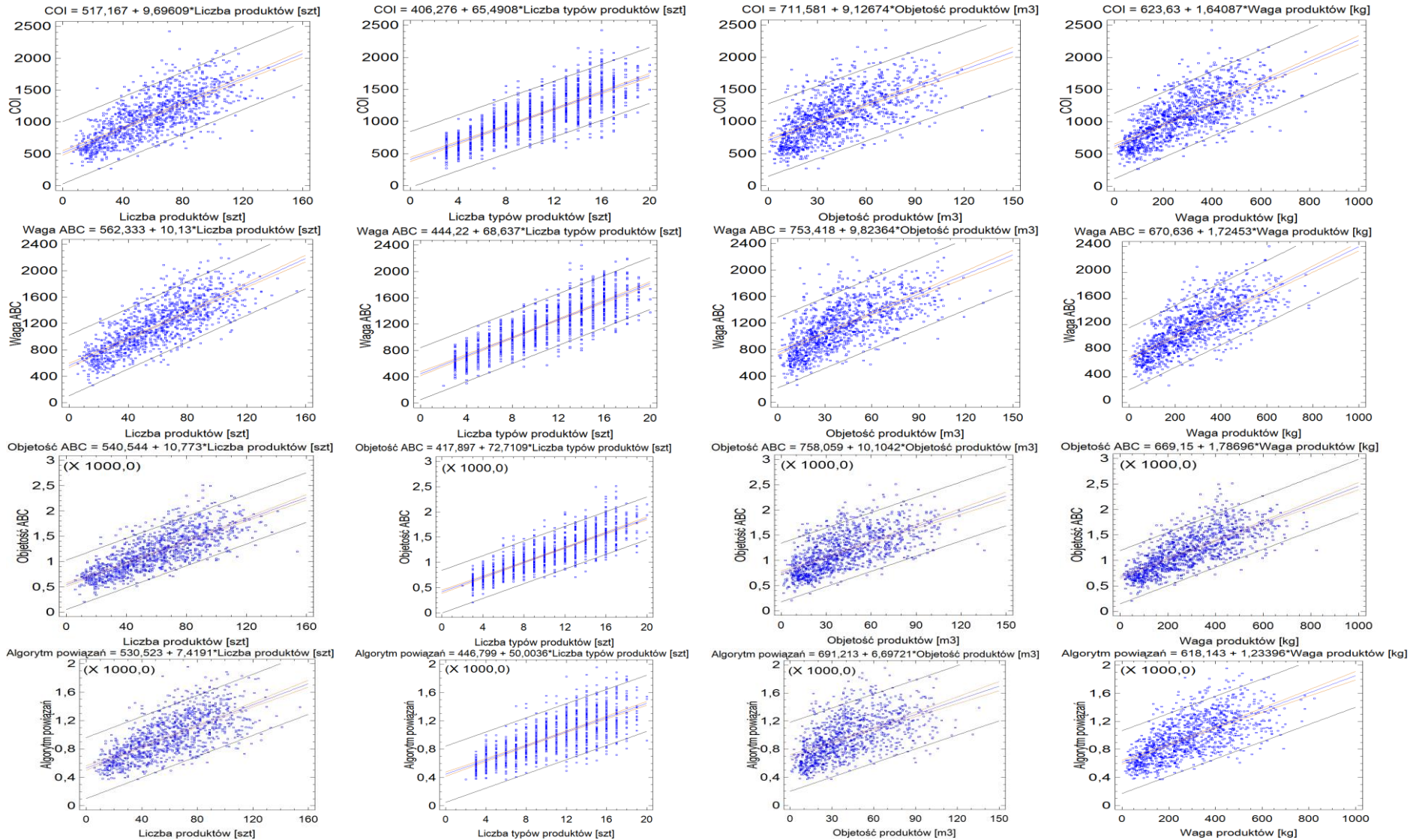
gdzie:

kat_{COI} – kategoria uzyskana w wyniku zastosowania Indexu COI,

kat_{ABC} – kategoria uzyskana w wyniku zastosowania analizy ABC według wagi,

kat_{ABC2} – kategoria uzyskana w wyniku zastosowania analizy ABC według objętości,

kat_{AP} – kategoria uzyskana w wyniku zastosowania algorytmu wyszukiwania powiązań.



Rys. 6.17 Zależności czasu kompletacji dla poszczególnych analiz w funkcji parametru wejściowego

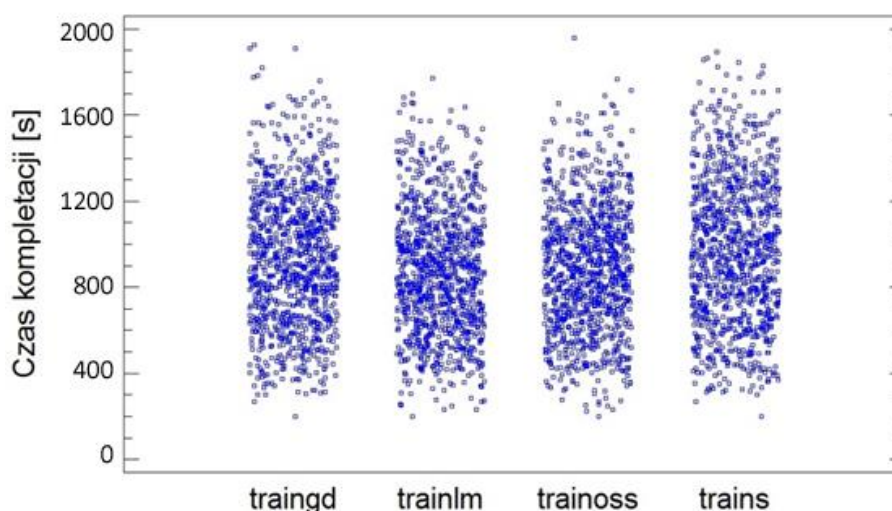
Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

6.3.4. Wybór funkcji uczącej

Program Matlab umożliwia skorzystanie z wielu algorytmów uczenia sztucznych sieci neuronowych. Zastosowanie poszczególnych algorytmów uczenia powoduje otrzymywanie różnych wyników [6]. W niniejszej pracy wykorzystano część z nich. Jako funkcję celu przyjęto minimalizację błędu średniokwadratowego. Otrzymane wyniki będące liczbą zmiennoprzecinkową zostały zaokrąglone matematycznie do liczb całkowitych odpowiadających klasie przynależności produktów. Następnie wykonano analizy statystyczne w celu określenia, która z metod pozwala na takie wyznaczenie kategorii produktów, które pozwala uzyskać krótszy czas kompletacji zamówień. Spośród dostępnych w programie algorytmów uczenia wykorzystano najpopularniejsze z nich, tj. [7]:

- Trainoss – metoda propagacji wstecznej - One step secant (ang. *one-step secant backpropagation*),
- Traingd – metoda gradientu prostego/wstecznej propagacji błędu (ang. *gradient descent backpropagation*),
- Trains – sekwencyjna metoda modyfikacji wag z funkcją uczenia (ang. *Sequential order incremental training with learning functions*),
- Trainlm – algorytm Levenberga-Marquardta (ang. *Levenberg-Marquardt backpropagation*),
- Trainbfg – metoda gradientowa Broydena-Fletcher-Goldfarba-Shano – quasi-Newtonowska (ang. *BFGS quasi-Newton backpropagation*),
- Traincgb – metoda gradient sprzężonego Powella-Beale’go (ang. *conjugate gradient backpropagation with Powell-Beale restarts*).

Do oceny efektywności zastosowanych algorytmów uczenia sieci zastosowano symulację kompletacji produktów w oparciu o listy kompletacji – metoda ta została opisana w podrozdziale 4.4. Z uwagi na to, że algorytmy trainlm, trainbfg oraz traincgb dały bardzo podobne wyniki, które po zaokrągleniu dały identyczną klasę przynależności w dalszej części analizy funkcje trainbfg i traincgb nie były rozważane. Wynik symulacji czasu kompletacji produktów przedstawiono na rysunku 6.18.



Rys. 6.18 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej funkcji uczenia SSN

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Jak można zauważyć na rysunku 6.18 najbardziej odbiegające od pozostałych są wyniki uzyskane po zastosowaniu funkcji uczącej trains - sekwencyjna metoda modyfikacji wag

z funkcją uczenia. Statystykę opisową dla przeprowadzonych symulacji przedstawiono w tabeli 8.18. Dokonując wstępnego przeglądu danych statystycznych, można stwierdzić, że funkcja trainlm może pozwolić na osiągnięcie najkorzystniejszego rezultatu – ma najniższą wartość średnią i medianę przy zachowaniu najmniejszego odchylenia standardowego, zakresu i maksymalnego czasu trwania kompletacji zamówienia (Tabela 6.18).

Tabela 6.18 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od funkcji uczenia SSN [s]

Funkcja uczenia	Średnia	Odchylenie standardowe	Mediana	Współczynnik zmienności	Minimum	Maximum	Zakres
traingd	938,3	312,8	929,7	0,333	198,4	1926,4	1728,0
trainlm	872,1	288,9	857,5	0,331	201,2	1771,2	1570,0
trainoss	886,7	292,1	879,2	0,329	201,2	1958,0	1756,8
trains	971,5	334,3	958,2	0,344	198,4	1894,0	1695,6

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

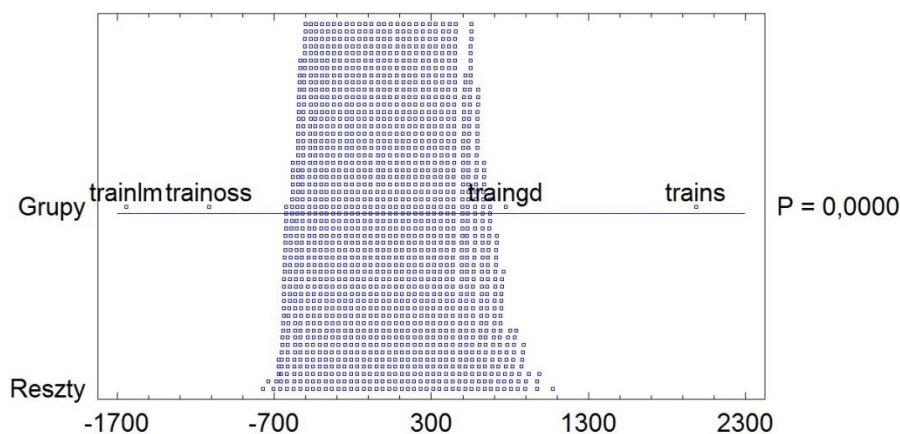
W celu porównania istotności różnic dla poszczególnych funkcji uczenia, wykonano analizę wariancji ANOVA porównującą wartości średnie. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 6.19 oraz na rysunku 6.19.

Tabela 6.19 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla funkcji uczenia SSN

	Sumy kwadratów (SS)	Stopnie swobody (Df)	Średnia kwadratowa (MS)	Wskaźnik F	Współczynnik P
Pomiędzy grupami	6,35E+06	3	2,12E+06	22,39	0
W obrębie grupy	3,78E+08	3996	94594,4		
Suma	3,84E+08	3999			

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Dla analizy wariancji wskaźnik testu F wyniósł 22,39, natomiast wartość współczynnika P jest niższa niż 0,05, co potwierdza istnienie statystycznie znaczącej różnicy między średnimi z przeprowadzonych analiz na 95,0% poziomie ufności.



Rys. 6.19 Graficzne przedstawienie wyników analizy wariancji ANOVA dla funkcji uczenia SSN

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

W celu określenia które grupy statystycznie różnią się od siebie wykonano porównania wielokrotne - test post hoc Scheffego. Wynik testu przedstawiono w tabeli 6.20 oraz na rysunku 6.20.

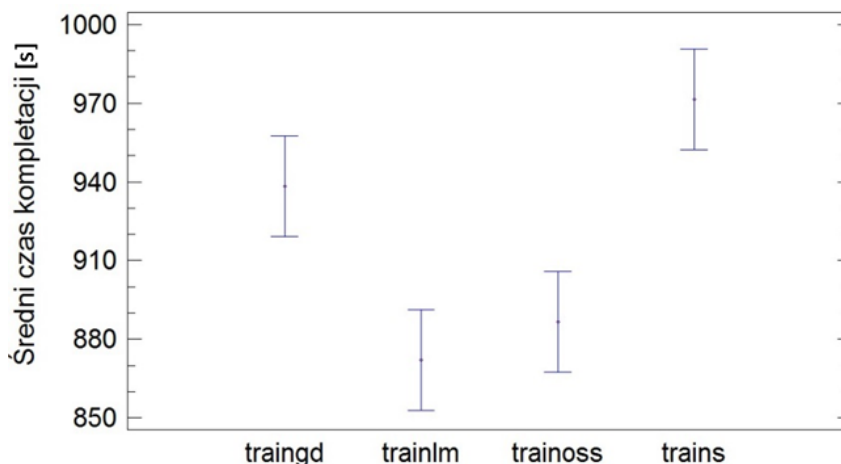
Tabela 6.20 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Scheffego przy 95% przedziale ufności

Funkcja uczenia SSN	Średni czas kompletacji [s]	Grupy homogeniczne
trainlm	872,1	X
trainoss	886,7	X
traingd	938,3	X
trains	971,5	X

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Na podstawie przeprowadzonego testu Scheffego można zauważyć, podobieństwo wyników dla dwóch par, tj. funkcji trainlm i trainoss oraz funkcji traingd i trains. Różnice pomiędzy poszczególnymi parami wyglądają następująco:

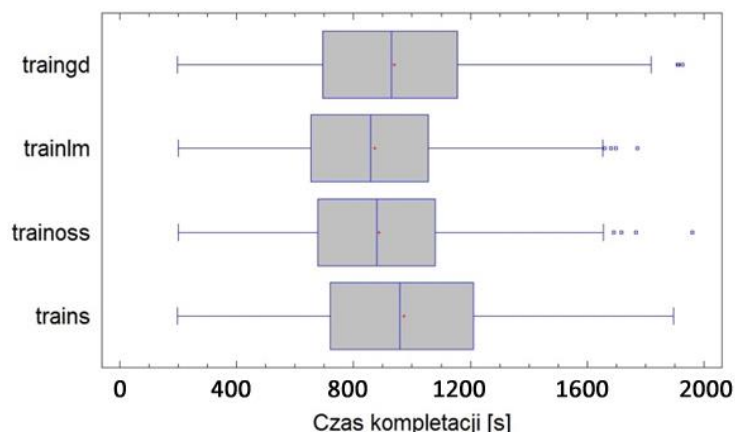
- traingd – trainlm: 66,1 s,
- traingd – trainoss: 51,6 s,
- traingd – trains: -33,2 s – brak statystycznej różnicy,
- trainlm – trainoss: -14,6 s – brak statystycznej różnicy,
- trainlm – trains: -99,4 s,
- trainoss – trains: -84,8 s.



Rys. 6.20 Wynik porównania średnich z interwałem Scheffego przy 95% przedziale ufności

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Ostatnią częścią analizy było wykonanie porównania median za pomocą testu Friedmana. Hipoteza zerowa zakładała, że wszystkie próby pochodzą z populacji o tej samej medianie. Wynik testu wynosił 133,48, przy parametrze p równym 0, co pozwala stwierdzić, że grupy znacząco różnią się od siebie. Na rysunku 6.21 przedstawiono graficzną prezentację wyników w postaci wykresu ramka-wąsy.



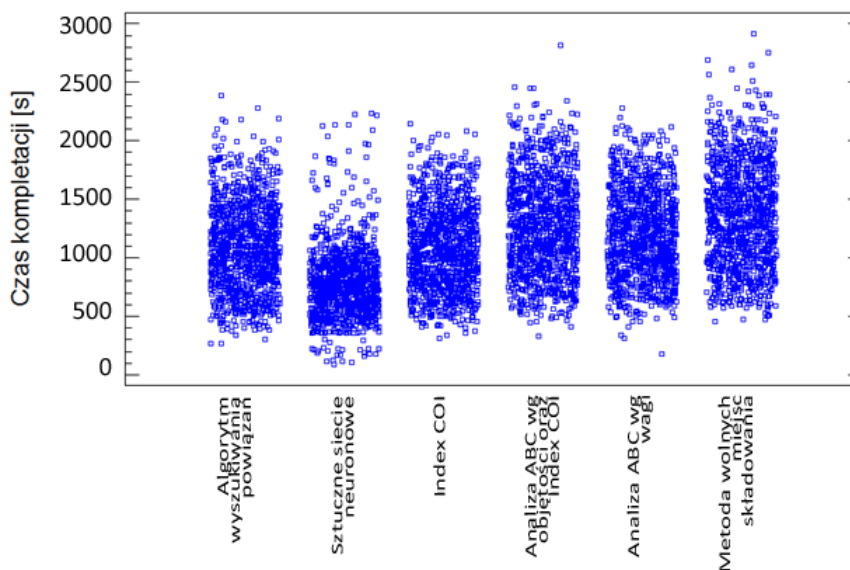
Rys. 6.21 Wykres ramka-wąsy dla funkcji uczenia SSN

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

W oparciu o przeprowadzone testy statystyczne stwierdzono, że najkrótszy czas kompletacji produktów można uzyskać przy zastosowaniu funkcji uczącej trainlm, jednak zbliżoną do niej funkcją jest funkcja trainoss, która statystycznie wykazuje duże podobieństwo. Argumentem przemawiającym za ostatecznym zastosowaniem funkcji trainlm w procesie uczenia sztucznej sieci neuronowej jest najmniejsze odchylenie standardowe i zakres wyników, a także najmniejsza spośród wszystkich funkcji uczących średnia i mediana.

6.3.5. Opis wyników

Podobnie jak we wcześniejszych podrozdziałach dokonano zestawienia wyników otrzymanych po zastosowaniu sztucznej sieci neuronowej z pozostałymi metodami klasyfikacji produktów. Do celów porównawczych wybrano metody dające dotychczas najlepsze wyniki oraz metodę wolnych miejsc składowania jako punkt odniesienia. Zestawienie czasów kompletacji w formie graficznej dla zastosowanych metod klasyfikacji produktów i ich rozmieszczenia w magazynie przedstawiono na rysunku 6.22. Dla poniższych danych założono, że produkty mogą być piętrzone na wózku kompletacyjnym.



Rys. 6.22 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów (z założeniem możliwości piętrzenia produktów)

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Na podstawie rysunku 6.22 można stwierdzić, że wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do klasyfikacji produktów pozwala osiągnąć znacznie lepsze wyniki niż klasyczne analizy. Na uwagę zasługuje też fakt o przyjęciu nietypowego sposobu uczenia sieci – na podstawie metody ABC bazującej na wadze i objętości produktów, indexu COI oraz na podstawie wyszukiwania powiązań pomiędzy produktami na listach kompletacji. Większość klasycznych metod klasyfikacji opiera się o liczbę sprzedanych sztuk produktów bądź jego popularności.

Tabela 6.21 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów [s]

	Średnia	Odchylenie standardowe	Mediana	Minimum	Maximum	Zakres
Algorytm wyszukiwania powiązań	1103,3	371,6	1088,6	265,2	2385,2	2120,0
Sztuczne sieci neuronowe	782,1	302,5	754,8	92,4	2238,4	2146,0
Index COI	1090,8	358,3	1061,4	314,2	2142,0	1827,8
Analiza ABC wg objętości oraz Index COI	1279,8	414,6	1259,0	329,4	2817,8	2488,4
Analiza ABC wg wagi	1201,3	368,6	1173,4	177,0	2279,0	2102,0
Metoda wolnych miejsc składowania	1359,3	437,7	1343,2	459,4	2913,8	2454,4
Średnia	1136,1	420,3	1087,9	92,4	2913,8	2821,4

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Przełóżając dane zawarte w tabeli 6.21 można zauważyć, że dla opcji piętrzenia produktów, wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do ich klasyfikacji jest najlepszym sposobem. Opracowany algorytm powiązań oraz Index COI dają podobne do siebie wyniki, które jednak są gorsze od wyników otrzymanych dla sztucznych sieci neuronowych o około 28,7%.

Przeprowadzona analiza wariancji ANOVA wykazała, że istnienie statystycznie znacząca różnica między średnimi czasów dla przedstawionych metod klasyfikacji na 95,0% poziomie ufności. W związku z tym przeprowadzono także porównanie wielokrotne testem Scheffego (Tabela 6.22, Rys. 6.23).

Tabela 6.22 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Scheffego przy 95% przedziale ufności

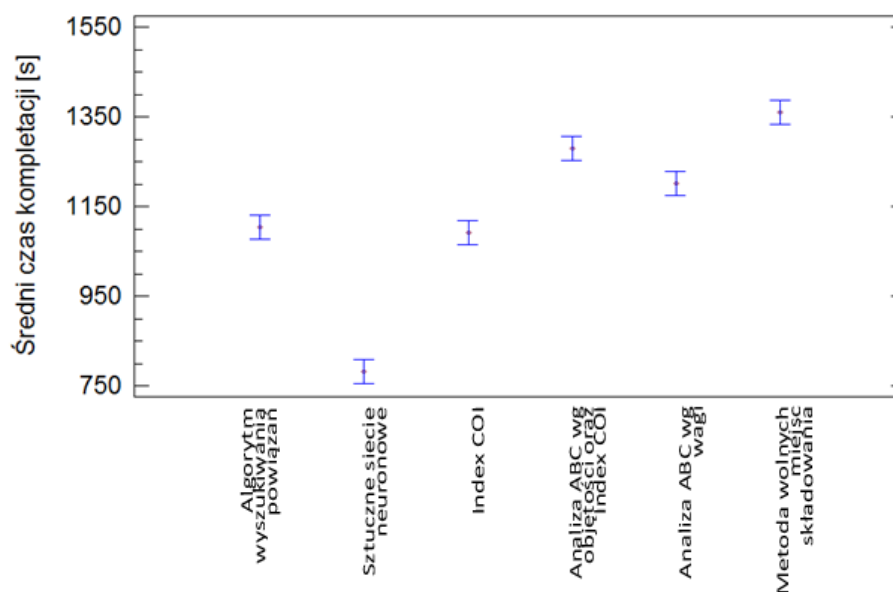
Analiza	Średni czas kompletacji [s]	Grupy homogeniczne
Sztuczne sieci neuronowe	782,1	X
Index COI	1090,8	X
Analiza ABC wg wagi	1103,8	X
Analiza ABC wg objętości oraz Index COI	1201,3	X
Algorytm wyszukiwania powiązań	1279,8	X
Metoda wolnych miejsc składowania	1359,3	X

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Na podstawie przeprowadzonego testu Scheffego można zauważyć, że średni wynik uzyskany dla rozmieszczenia produktów na podstawie sztucznych sieci neuronowych znacznie odbiega od wyników dla pozostałych metod. Różnice pomiędzy poszczególnymi parami wyglądają następująco:

- Algorytm wyszukiwania powiązań – Sztuczne sieci neuronowe: 321,2 s - brak statystycznej różnicy,
- Algorytm wyszukiwania powiązań – Index COI: 12,5 s,

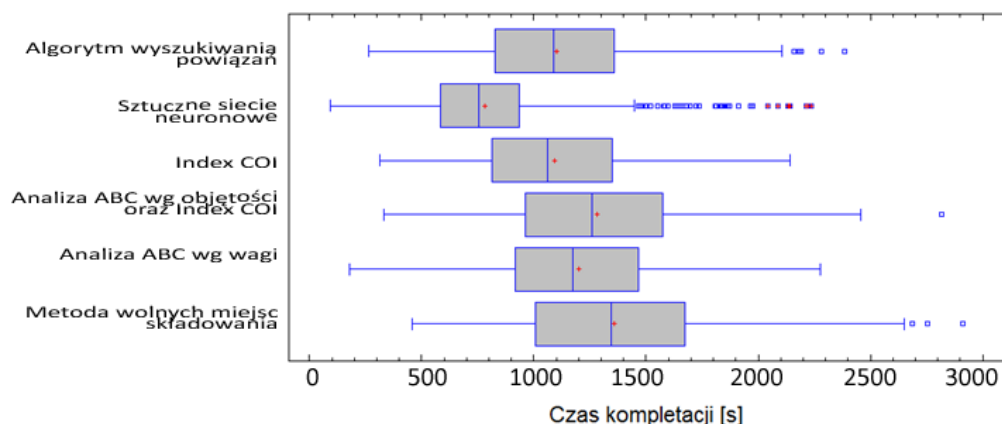
- Algorytm wyszukiwania powiązań – Analiza ABC wg objętości oraz Index COI: -176,5 s - brak statystycznej różnicy,
- Algorytm wyszukiwania powiązań – Analiza ABC wg wagi: -98,1 s - brak statystycznej różnicy,
- Algorytm wyszukiwania powiązań – Metoda wolnych miejsc składowania: -256,0 s - brak statystycznej różnicy,
- Sztuczne sieci neuronowe – Index COI: -308,66 - brak statystycznej różnicy,
- Sztuczne sieci neuronowe – Analiza ABC wg objętości oraz Index COI: -497,7 - brak statystycznej różnicy,
- Sztuczne sieci neuronowe – Analiza ABC wg wagi: -419,2 s - brak statystycznej różnicy,
- Sztuczne sieci neuronowe – Metoda wolnych miejsc składowania: -577,2 s - brak statystycznej różnicy,
- Index COI – Analiza ABC wg objętości oraz Index COI: -189,0 s - brak statystycznej różnicy,
- Index COI – Analiza ABC wg wagi: -110,6 s - brak statystycznej różnicy,
- Index COI - Metoda wolnych miejsc: -268,5 s - brak statystycznej różnicy,
- Analiza ABC wg objętości oraz Index COI – Analiza ABC wg wagi: 78,5 s - brak statystycznej różnicy,
- Analiza ABC wg objętości oraz Index COI - Metoda wolnych miejsc składowania: -79,5 s - brak statystycznej różnicy,
- Analiza ABC wg wagi – Metoda wolnych miejsc składowania: -158,0 s - brak statystycznej różnicy.



Rys. 6.23 Wynik porównania średnich z interwałem Scheffego przy 95% przedziale ufności

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Ostatnią częścią analizy było wykonanie porównania median za pomocą testu Friedmana. Hipoteza zerowa zakładała, że wszystkie próby pochodzą z populacji o tej samej medianie. Wynik testu wynosił 2218,35, przy parametrze p równym 0,0, co pozwala stwierdzić, że grupy znacząco różnią się od siebie. Na rysunku 6.24 przedstawiono graficzną prezentację wyników w postaci wykresu ramka-wąsy.

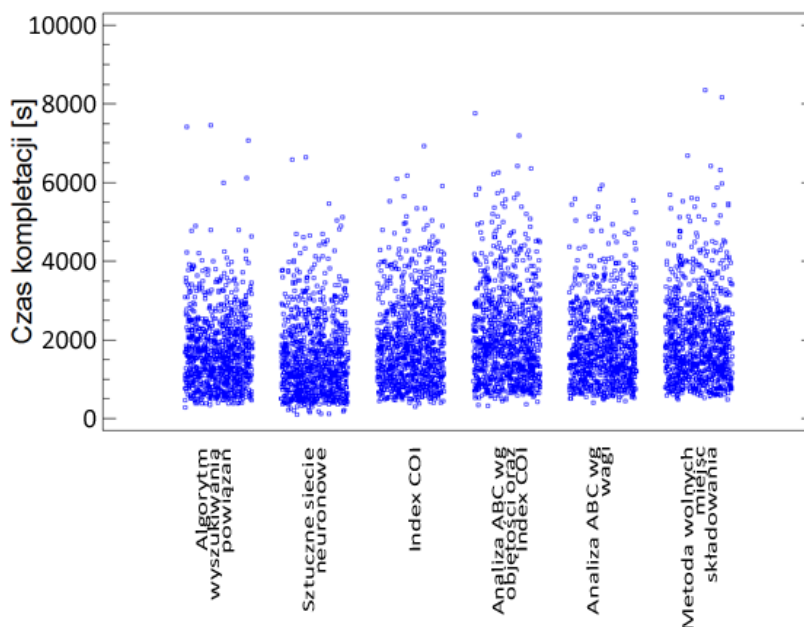


Rys. 6.24 Wykres ramka-wąsy dla metod kompletacji produktów z opcją piętrzenia ładunków

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Porównując wyniki otrzymane w wyniku zastosowania sztucznej sieci neuronowej do wyników otrzymanych innymi metodami, przy założeniu, że jest możliwość piętrzenia ładunków na wózku kompletacyjnym stwierdzono, że zastosowanie sieci neuronowych pozwala osiągnąć znacznie lepsze rezultaty niż te uzyskane za pomocą klasycznych metod. W porównaniu do metody wolnych miejsc składowania możliwe jest osiągnięcie średnich wartości niższych o około 43,1% (42,5% wartość średnia, 43,8% mediana). Natomiast w porównaniu do Indexu COI będącego najlepszą z klasycznych metod możliwe jest zmniejszenie czasu trwania kompletacji o 28,6%.

Dokonując porównania tych samych metod, ale uwzględniając konieczność zmiany kolejności produktów na wózku kompletacyjnym wynikającą z ich wrażliwości na piętrzenie zastosowano analogiczne metody statystyczne. Zestawienie czasów kompletacji w formie graficznej dla zastosowanych metod klasyfikacji produktów i ich rozmieszczenia w magazynie przedstawiono na rysunku 6.25.



Rys. 6.25 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów (z założeniem wrażliwości na piętrzenie produktów)

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Podobnie jak w przypadku wcześniejszym na podstawie rysunku 6.25 można stwierdzić, że wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do klasyfikacji produktów pozwala osiągnąć lepsze wyniki niż dla klasycznych metod, zwłaszcza wolnych miejsc składowania. Statystykę opisową dla przedstawionych przypadków przedstawiono w tabeli 6.23.

Tabela 6.23 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów [s]

	Średnia	Odchylenie standardowe	Mediana	Minimum	Maximum	Zakres
Algorytm wyszukiwania powiązań	1697,3	936,5	1549,8	277,4	7451,1	7173,7
Sztuczne sieci neuronowe	1526,7	975,1	1304,0	106,4	6639,7	6533,3
Index COI	1909,2	1061,5	1726,8	314,2	6928,1	6613,9
Analiza ABC wg wagi	2066,4	1160,18	1824,8	323,6	7764,9	7441,3
Analiza ABC wg objętości	1892,4	981,5	1684,8	414,2	5930,1	5515,9
Metoda wolnych miejsc składowania	2040,1	1105,9	1832,9	491,4	8351,3	7859,9
Średnia	1855,4	1036,8	1653,9	321,2	7177,5	6856,3

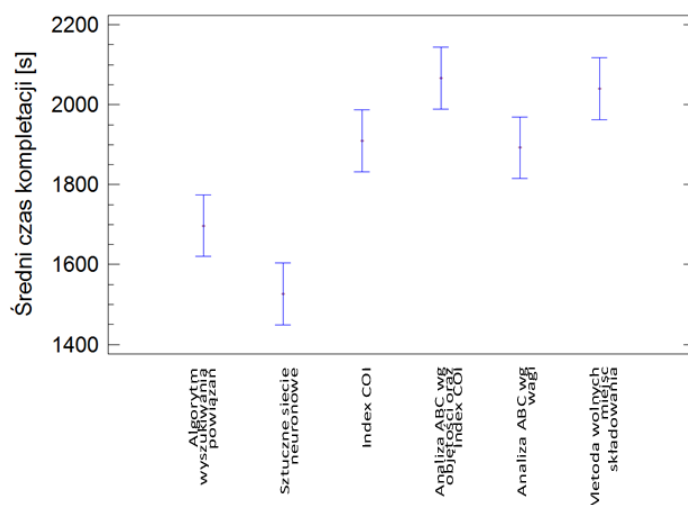
Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Przeprowadzona analiza wariancji ANOVA wykazała, że istnieje statystycznie znacząca różnica między średnimi czasami kompletacji dla przedstawionych metod klasyfikacji na 95,0% poziomie ufności. W związku z tym przeprowadzono także porównanie wielokrotne testem Scheffego (Tabela 6.24).

Tabela 6.24 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Scheffego przy 95% przedziale ufności

Analiza	Średni czas kompletacji [s]	Grupy homogeniczne
Sztuczne sieci neuronowe	1526,8	X
Algorytm wyszukiwania powiązań	1697,4	X
Analiza ABC wg objętości	1892,5	X
Index COI	1909,3	X
Metoda wolnych miejsc składowania	2040,2	X
Analiza ABC wg wagi	2066,4	X

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)



Rys. 6.26 Wynik porównania średnich z interwałem Scheffego przy 95% przedziale ufności

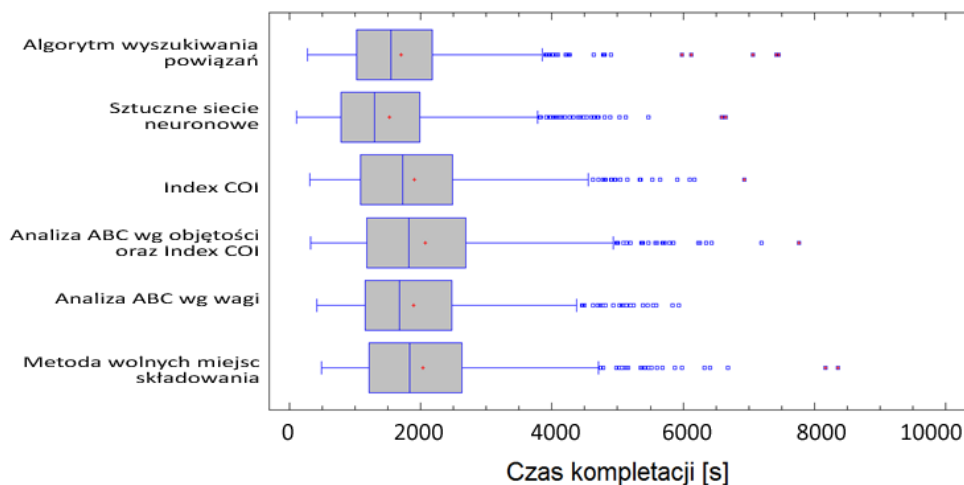
Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Na podstawie przeprowadzonego testu Scheffego można zauważyć, że średni wynik uzyskany dla sztucznych sieci neuronowych znacznie odbiega od pozostałych (Rys. 6.26).

Różnice pomiędzy poszczególnymi parami wyglądają następująco:

- Algorytm wyszukiwania powiązań – Sztuczne Siecie Neuronowe: 170,6 s - brak statystycznej różnicy,
- Algorytm wyszukiwania powiązań – Index COI: -211,9 s - brak statystycznej różnicy,
- Algorytm wyszukiwania powiązań – Analiza ABC wg wagi: -369,0 s - brak statystycznej różnicy,
- Algorytm wyszukiwania powiązań – Analiza ABC wg objętości: -195,1 s - brak statystycznej różnicy,
- Algorytm wyszukiwania powiązań – Metoda wolnych miejsc składowania: -342,8 s - brak statystycznej różnicy,
- Sztuczne Siecie Neuronowe – Index COI: -382,5 s - brak statystycznej różnicy,
- Sztuczne Siecie Neuronowe – Analiza ABC wg wagi: -539,7 s - brak statystycznej różnicy,
- Sztuczne Siecie Neuronowe – Analiza ABC wg objętości: -365,7 s - brak statystycznej różnicy,
- Sztuczne Siecie Neuronowe - Metoda wolnych miejsc składowania: -513,4 s - brak statystycznej różnicy,
- Index COI – Analiza ABC wg wagi: -157,2 s - brak statystycznej różnicy,
- Index COI – Analiza ABC wg objętości: 16,8 s,
- Index COI - Metoda wolnych miejsc składowania: -130,9 s,
- Analiza ABC wg wagi – Analiza ABC wg objętości: 174,0 s - brak statystycznej różnicy,
- Analiza ABC wg wagi – Metoda wolnych miejsc składowania: -26,3 s,
- Analiza ABC wg objętości – Metoda wolnych miejsc składowania: -147,7 s.

Ostatnią częścią analizy było wykonanie porównania median za pomocą testu Friedmana, na podstawie którego stwierdzono, że grupy znacząco różnią się od siebie. Na rysunku 6.27 przedstawiono graficzną prezentację wyników w postaci wykresu ramka-wąsy.



Rys. 6.27 Wykres ramka-wąsy dla metod kompletacji produktów założeniem wrażliwości na piętrzenie produktów

Źródło: opracowanie własne (Statgraphics Centurion 15.2.11.0)

Dokonując porównania otrzymanych wyników dla rozmieszczenia produktów z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i innych metod klasyfikacji stwierdzono, że w przypadku istnienia konieczności przekładania produktów na wózek w trakcie procesu kompletacji sztuczne sieci neuronowe pozwalają na osiągnięcie lepszych wyników niż w przypadku zastosowania innych metod. W porównaniu do metody wolnych miejsc składowania, zastosowanie sztucznych sieci neuronowych pozwala na skrócenie średniego czasu trwania kompletacji o 25,2% oraz mediany o 28,9%. Dokonując natomiast porównania z opracowanym algorytmem wyszukiwania powiązań, to sztuczne sieci neuronowe dają wynik lepszy o 10,1% (średnia) i 15,9% (mediana).

6.4. Ocena korzyści wynikających z zastosowania poszczególnych metod

Ocena tylko i wyłącznie czasu trwania kompletacji z punktu widzenia przedsiębiorstwa może być niewystarczająca, ponieważ zmiana metody wolnych miejsc składowania na metodę stałych miejsc składowania wymaga zwiększenia powierzchni o około 10%. Co w rezultacie podnosi koszty wynajmu przestrzeni magazynowej. Zatem wdrożenie takiego systemu mogłoby spowodować straty finansowe przedsiębiorstwa mimo zmniejszenia wydatków ponoszonych na obsługę środków transportu i wynagrodzenia dla pracowników [9].

W oparciu o przeprowadzone symulacje kompletacji zamówień i analizę statystyczną dokonano porównania wydajności magazynu w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów. W założeniach przyjęto czas kompletacji zamówień zgodny ze średnim czasem otrzymanym dla przeprowadzonych symulacjach – wariant IB (podrozdział 5.2.3) oraz wariant IIB (podrozdział 5.2.4).

Dokonano obliczenia wymaganego zapotrzebowania na pracę oraz oszacowania kosztów funkcjonowania magazynu wzięto pod uwagę koszt wynajmu powierzchni magazynowej, mediów, materiałów eksploatacyjnych wykorzystywanych przy wózkach, serwisu wózków oraz wynagrodzenia pracowników.

Koszt wynajmu magazynu jest uzależniony od jego powierzchni. Dla analizowanego przypadku założono wykorzystanie dużego magazynu o powierzchni równej 9 400 m². Magazyn ten składa się z 14 rzędów, po 200 miejsc w rzędzie i 6 poziomów składowania. Taki układ pozwala na przechowywanie jednocześnie 50 400 jednostek paletowych. Stawka za metr wynajmowanej powierzchni takiego magazynu jest niższa niż w przypadku wynajmu małych powierzchni i wynosi średnio 7,00 zł za m². Natomiast stawka za media wynosi około 3,10 zł za m². Wielkości te ustalono na podstawie analizy cen rynkowych [112]. Koszt paliwa i materiałów eksploatacyjnych wyceniono na 7,80 zł/h podstawie danych eksploatacyjnych wózka widłowego STILL RX 70-16/20 [113]. Natomiast koszt serwisu przyjęto na poziomie 700 zł rocznie [114]. Wynagrodzenie magazyniera przyjęto na poziomie 2590 zł brutto w oparciu o medianę wynagrodzenia podawaną przez portal www.wynagrodzenia.pl dla stanowiska magazyniera [115].

Sumaryczne zestawienie obrazujące wydajność magazynowania w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji i rozmieszczenia produktów przedstawiono w tabeli 6.25.

Tabela 6.25 Wydajność systemu magazynowania w zależności od metody klasyfikacji i rozmieszczenia produktów

Metoda klasyfikacji produktów	Analiza ABC	Analiza ABC oraz Index COI	Analiza ABC (dynamiczna)	Analiza ABC	Analiza ABC oraz Index COI	Analiza ABC (dynamiczna)	Analiza ABC	Analiza ABC oraz Index COI	Analiza ABC (dynamiczna)	Analiza ABC	Analiza ABC oraz Index COI	Analiza ABC (dynamiczna)	Analiza ABC+XYZ	Index COI	Algorytm wyszukiwania nowości	Metoda wolnych miejsc składowania	Sztuczne sieci neuronowe
	Popularność			Liczba sprzedanych sztuk			Waga			Objętość			Własne				
Kryterium	Popularność			Liczba sprzedanych sztuk			Waga			Objętość			Własne				
Liczba zamówień [szt.]	300																
Średnia waga produktów [kg]	285,5																
Średnia objętość produktów [m ³]	41,7																
Średnia liczba pobranych sztuk [szt.]	59																
Średnia liczba pozycji na zamówieniu [szt.]	10,5																
Wariant bez uwzględniania przeladunku na wózku kompletacyjnym																	
Średni czas kompletacji zamówienia [s]	1528	1450	1394	1433	1526	1499	1201	1193	1079	1281	1280	1228	1537	1091	1103	1359	782
Wymagana liczba pracowników [os.]	16	15	15	15	16	16	13	12	11	13	13	13	16	11	11	14	8
Wydajność pracy [kg/pracownik]	5382	5669	5898	5739	5388	5483	6844	6891	7618	6420	6425	6695	5351	7538	7453	6049	10513
Wydajność kompletacji [szt./rg.]	25	26	27	26	25	25	31	32	35	30	30	31	25	35	34	28	48
Zmiana czasu pracy względem metody wolnych miejsc składowania [%]	12,4	6,7	2,6	5,4	12,3	10,3	-11,6	-12,2	-20,6	-5,8	-5,8	-9,6	13,1	-19,8	-18,8	0,0	-42,5
Wariant z uwzględnianiem przeladunku na wózku kompletacyjnym																	
Średni czas kompletacji zamówienia [s]	2204	2231	2206	2099	2299	2354	2066	2060	1953	1892	1892	2077	2160	1909	1697	2040	1527
Wymagana liczba pracowników [os.]	23	23	23	22	24	25	22	21	20	20	20	22	23	20	18	21	16
Wydajność pracy [kg/os.]	3730	3685	3728	3916	3576	3493	3979	3991	4210	4345	4345	3958	3806	4307	4844	4030	5386
Wydajność kompletacji [szt./os.h]	17	17	17	18	16	16	18	18	19	20	20	18	17	20	22	19	25
Zmiana czasu pracy względem metody wolnych miejsc składowania [%]	8,0	9,4	8,1	2,9	12,7	15,4	1,3	1,0	-4,3	-7,2	-7,2	1,8	5,9	-6,4	-16,8	0,0	-25,2

Źródło: opracowanie własne

Do oceny kosztów-korzyści posłużono się wskaźnikami dyskontowymi: IRR, NPV oraz NPVR.

Wartość wskaźnika IRR (71) może być obliczona za pomocą interpolacji liniowej [116].

$$IRR = i_1 + \frac{PV \cdot (i_2 - i_1)}{PV + |NV|} \quad (71)$$

gdzie:

- IRR - wewnętrzna stopa zwrotu,
- i_1 - poziom stopy procentowej, przy którym $NPV > 0$,
- i_2 - poziom stopy procentowej, przy którym $NPV < 0$,
- PV - poziom NPV obliczony na podstawie i_1 ,
- NV - poziom NPV obliczony na podstawie i_2 .

W przytoczonym wzorze (71) szczególne znaczenie ma różnica pomiędzy poziomem i_1 a poziomem i_2 , która nie powinna być wyższa niż jeden punkt procentowy. Wynika to z braku liniowego charakteru pomiędzy poziomem stopy procentowej, a poziomem wskaźnika NPV. Inwestycja jest opłacalna jeśli wewnętrzna stopa zwrotu jest wyższa od stopy granicznej, będącej najniższą możliwą do zaakceptowania przez przedsiębiorstwo stopą rentowności.

Metoda wartości zaktualizowanej netto NPV (ang. *net present value*) pozwala określić aktualną wartość wpływów i wydatków pieniężnych związanych z realizacją ocenianego przedsięwzięcia rozwojowego. Wskaźnik NPV określa się jako sumę, przepływów pieniężnych netto zdyskontowanych oddzielnie dla każdego roku, zrealizowanych w całym okresie objętym rachunkiem, przy stałym poziomie stopy dyskontowej. W związku z czym wskaźnik ten wyraża wielkość korzyści jakie rozpatrywane przedsięwzięcie może przynieść firmie. Równanie (72) opisujące wartość wskaźnika NPV przybiera postać [116]:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{D_t}{(1+i)^t} - I \quad (72)$$

gdzie:

- D_t - przepływy pieniężne netto związane z bieżącym funkcjonowaniem przedsięwzięcia (bez nakładów inwestycyjnych), w kolejnych okresach cyklu obliczeniowego,
- i - stopa dyskontowa,
- t - kolejne okresy eksploatacji inwestycji,
- I - nakłady początkowe.

Jeżeli wartość wskaźnika $NPV \geq 0$ to oceniana inwestycja jest opłacalna, ponieważ dodatnia stopa rentowności jest wyższa od stopy granicznej, określonej przez przyjętą do rachunku stopę procentową. Natomiast ujemna wartość świadczy o niższej od granicznej stopie rentowności przedsięwzięcia, zatem nie będzie ono opłacalne z punktu widzenia interesów przedsiębiorstwa.

W przypadku, gdy planowane wdrożenie wymaga różnego nakładu kapitału i czasu to ocena za pomocą samego wskaźnika NPV może być niewystarczająca. Nie wyraża on bowiem precyzyjnie różnic w poziomie rentowności alternatywnych sposobów wykorzystania

kapitału. Bardziej obiektywne w takim przypadku jest wykorzystanie wskaźnika NPVR (ang. *Net Present Value Ratio*). Wskaźnik ten jest relacją miernika NPV i wartości obecnej wymaganego nakładu inwestycyjnego (ang. *Present Value of the Investment, PVI*) i wyraża się wzorem (73) [116].

$$NPVR = \frac{NPV}{PVI} \quad (73)$$

gdzie:

NPVR - wskaźnik wartości zaktualizowanej netto,

NPV - wartość zaktualizowana netto,

PVI - obecna wartość wymaganego nakładu inwestycyjnego.

Podstawą wyboru najbardziej opłacalnego, spośród badanych przedsięwzięć, jest maksymalizacja wskaźnika NPVR.

Ostatnim wykorzystywanym wskaźnikiem zwrotu inwestycji była wewnętrzna stopa zwrotu IRR. Wskaźnik IRR oznacza stopę procentową, przy której obecna (zaktualizowana) wartość strumieni wydatków pieniężnych jest równa obecnej wartości strumieni wpływów pieniężnych. Innymi słowy jest to taka stopa procentowa, przy której wartość zaktualizowana netto ocenianego przedsięwzięcia jest równa zero, tj. $NPV = 0$.

Zgodnie z założonymi kosztami jednostkowymi oraz czasem kompletacji i wynikającym z tego zapotrzebowaniem na pracowników i środki transportowe na podstawie przytoczonych wzorów (70, 71, 72) obliczono wskaźniki IRR, NPV oraz NPVR. Jako łączny okres oceny przyjęto 24 miesiące, koszty oszacowano w skali miesięcznej. W ocenie kosztów założono wynajem powierzchni magazynowej, co ma znaczący wpływ na koszty zwrotu inwestycji. W związku z czym jeśli przedsiębiorstwo posiada własną powierzchnię magazynową to wartości poszczególnych wskaźników będą większe, co przełoży się na szybszy zwrot kosztów inwestycji.

Wyniki kalkulacji przedstawiono w tabeli 6.26.

Tabela 6.26 Wartości wskaźników IRR, NPV oraz NPVR dla poszczególnych metod klasyfikacji

Metoda klasyfikacji produktów	Analiza ABC	Analiza ABC oraz Index COI	Analiza ABC (dynamiczna)	Analiza ABC	Analiza ABC oraz Index COI	Analiza ABC (dynamiczna)	Analiza ABC	Analiza ABC oraz Index COI	Analiza ABC (dynamiczna)	Analiza ABC	Analiza ABC oraz Index COI	Analiza ABC (dynamiczna)	Analiza ABC+XYZ	Index COI	Algorytm wyszukiwania powiązań	Metoda wolnych miejsc składowania	Sztuczne sieci neuronowe
Kryterium	Popularność			Liczba sprzedanych sztuk			Waga			Objętość			Własne				
Wariant bez uwzględnienia przeładunku na wózku kompletacyjnym																	
koszty pracy [zł] ⁷	61120	58023	55775	57323	61058	59990	48062	47736	43181	51242	51202	49135	61480	43639	44139	54383	31291
koszt magazynu [zł] ⁸	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	79176	87973
oszczędność	-15535	-12438	-10190	-11738	-15473	-14405	-2477	-2151	2404	-5657	-5617	-3550	-15895	1946	1446	0	14295
IRR [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	17,1	-	-	-	-	13,4	9,2	n/d	103,8
NPV	-102970	-85195	-72289	-81176	-102617	-96487	-28014	-26144	7801	-64626	-64263	-45693	-156606	3689	-804	n/d	114635
NPVR [%]	-746,3	-617,5	-523,9	-588,4	-743,7	-699,3	-203,1	-189,5	56,5	-468,4	-465,8	-331,2	-1135,1	26,7	-5,8	n/d	830,9
Wariant z uwzględnieniem przeładunku na wózku kompletacyjnym																	
koszty pracy [zł] ⁷	88187	89264	88247	83995	91980	94181	82671	82420	78133	75710	75712	83114	86426	76382	67904	81619	61079
koszt magazynu [zł] ⁸	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	87973	79176	87973
oszczędność	-15366	-16443	-15425	-11173	-19159	-21360	-9850	-9599	-5312	-2888	-2891	-10292	-13605	-3560	4917	0	11742
IRR [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,6	n/d	85,1
NPV	-151858	-161535	-152390	-114187	-185934	-205712	-102296	-100043	-61524	-39748	-39769	-106272	-136035	-45787	30382	n/d	91705
NPVR [%]	-1100,6	-1170,8	-1104,5	-827,6	-1347,6	-1490,9	-741,4	-725,1	-445,9	-288,1	-288,2	-770,2	-985,9	-331,9	220,2	n/d	664,7

Źródło: opracowanie własne

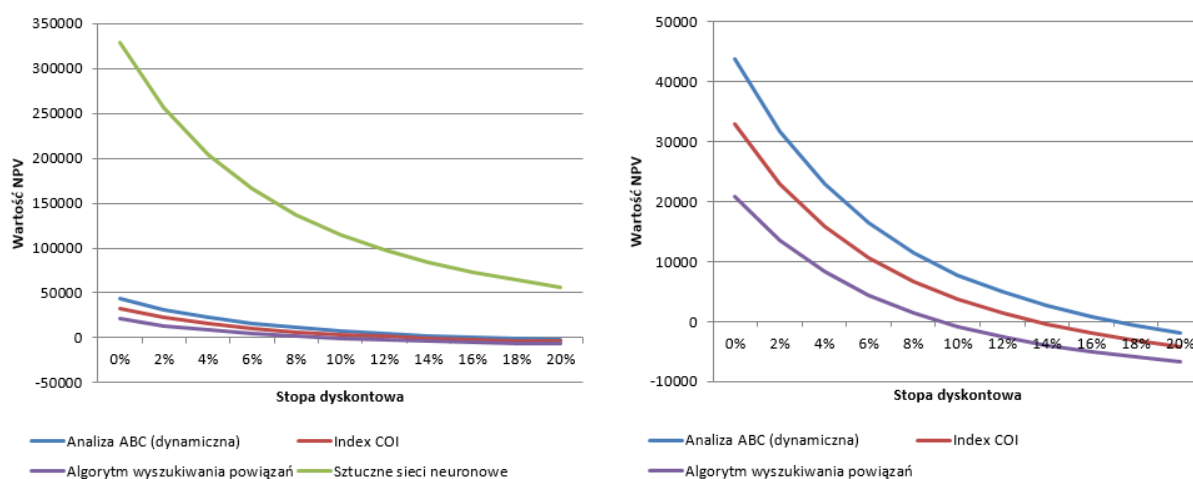
⁷ koszty pracownicze i techniczne

⁸ koszt wynajmu magazynu i mediów

Analizując dane zawarte w tabeli 6.26 można zauważyć, że dla wariantu nie uwzględniającego przeładunku towarów na wózku kompletacyjnym opłacalne jest wdrożenie systemu stałych miejsc składowania produktów w oparciu o ich klasyfikację wykonaną na podstawie analizy ABC (podziału dynamicznego) według kryterium wagi, Indexu COI lub sztucznych sieci neuronowych. Przy czym tylko sztuczne sieci neuronowe mają wszystkie wskaźniki na odpowiednio wysokim poziomie. Metody te wybrano do wariantowej oceny korzyści inwestycji.

Dla wariantu uwzględniającego przeładunek produktów zauważana jest znacząca różnica. Tylko algorytm wyszukiwania powiązań oraz sztuczne sieci neuronowe pozwalają na uzyskanie zadowalających wskaźników zwrotu nakładów inwestycyjnych. Metody te wybrano do wariantowej oceny korzyści inwestycji.

Dla wybranych na podstawie tabeli 6.26 metod klasyfikacji produktów wykonano analizę korzyści inwestycji, w której założono zmianę wartości stopy dyskontowej w zakresie od 0 do 20%. Wartość wskaźnika NPVR w zależności od stopy dyskontowej dla wariantu nie uwzględniającego przeładunku produktów na wózku kompletacyjnym przedstawiono na rysunku 6.28.

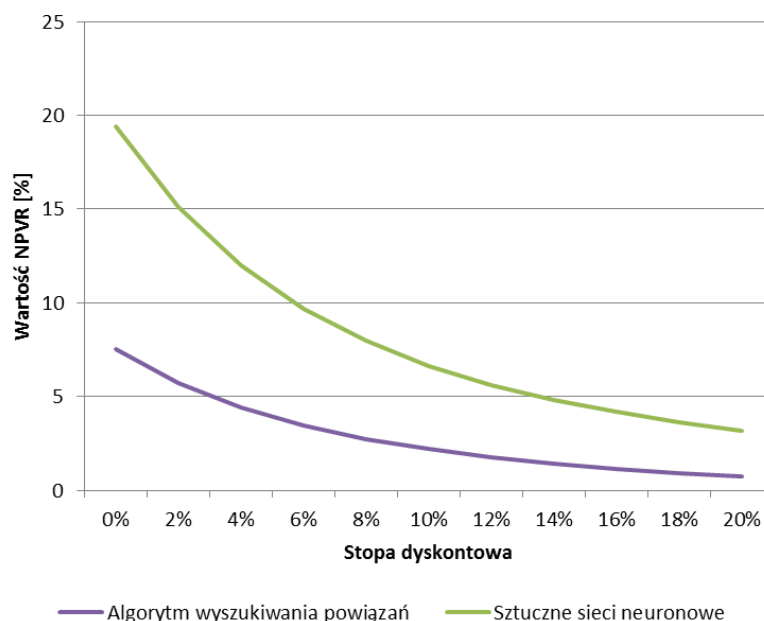


Rys. 6.28. Wartość wskaźnika NPV w zależności od stopy dyskontowej

Źródło: opracowanie własne

Analizując wykresy (Rys. 6.28) można zauważyć, że metoda klasyfikacji i rozmieszczenia produktów w oparciu o sztuczne sieci neuronowe zawsze jest inwestycją opłacalną. Wdrożenie metody klasyfikacji w oparciu o dynamiczną analizę ABC według kryterium wagi jest opłacalne od wartości stopy dyskontowej mniejszej niż 16%, Indexu COI do 14%, natomiast algorytmu wyszukiwania powiązań do 10%.

Analiza korzyści inwestycji dla wariantu uwzględniającego przeładunek produktów na wózku kompletacyjnym dotyczyła tylko dwóch wybranych metod: algorytmu wyszukiwania powiązań oraz sztucznych sieci neuronowych. Zależność wartości wskaźnika NPVR w zależności od wartości stopy dyskontowej przedstawiono na rysunku 6.29.



Rys. 6.29. Wartość wskaźnika NPVR w zależności od stopy dyskontowej

Źródło: opracowanie własne

Analizując wykres (Rys. 6.29) można zauważyć, że obie metody są inwestycją opłacalną dla stopy dyskontowej do 20%. Przy czym sztuczne sieci neuronowe wykazują silniejszą zależność wartości wskaźnika NPVR od stopy dyskontowej.

Algorytm wyszukiwania powiązań wykazuje taką zależność tylko do 12%. Powyżej tej wartości znaczenie stopy dyskontowej odgrywa drugorzędą rolę.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

7.1. Wnioski ogólne oraz weryfikacja postawionych tez

Pierwszym celem naukowym niniejszej dysertacji było przeprowadzenie analiz i zaproponowanie metody oceny wpływu różnych kryteriów decyzyjnych i metod klasyfikacji oraz planowania rozmieszczenia produktów w magazynie na czas procesu kompletacji w procesie magazynowania. Natomiast drugim wykazanie możliwości zwiększenia efektywności funkcjonowania magazynu w wyniku wielokryterialnej optymalizacji rozmieszczenia towarów z zastosowaniem modelu działającego w oparciu o sztuczne sieci neuronowe. Oba cele pracy zostały osiągnięte.

Na potrzeby niniejszej rozprawy opracowano autorską metodę, która umożliwia prowadzenie analiz w zakresie wpływu stosowanych metod klasyfikacji i planowania rozmieszczenia produktów w magazynie na czas procesu kompletacji. Ponadto opracowano metodę podziału produktów na klasy w oparciu o powiązania występujące pomiędzy produktami oraz model wykorzystujący sztuczne sieci neuronowe, który pozwala na wieloaspektową analizę możliwości zwiększenia efektywności funkcjonowania magazynu w wyniku wielokryterialnej optymalizacji rozmieszczenia towarów.

Opracowana metoda ma ujęcie kompleksowe, tj. pozwala na uwzględnianie powiązań pomiędzy produktami – w oparciu o listy kompletacji (częstotliwość występowania produktów razem z innymi na listach kompletacyjnych) oraz na zmniejszenie liczby koniecznych przesunięć produktów na wózku kompletacyjnym wynikających z ich wagi i objętości.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji dla małego magazynu (podrozdział 5.2.1.) tj. pozwalającego na przechowywanie maksymalnie 4800 jednostek paletowych stwierdzono, że największa różnica pomiędzy medianami wartościami występuje dla Indexu COI w stosunku do wyników otrzymanych z analizy ABC połączonej z Indexem COI i wynosi 3,1%. Różnica pomiędzy średnimi natomiast wynosi 2,8% na korzyść Indexu COI w stosunku do analizy ABC wykonanej według kryterium objętości produktów. Stwierdzono zatem, że dla magazynów o rozważanej wielkości, dobór kryterium klasyfikacji produktów nie ma znaczenia. Nie ma również znaczenia organizacja systemu składowania produktów – przydział miejsc składowania lub metoda wolnych miejsc składowania poprawia efektywność jedynie o 2,5%. Zatem dla magazynów o podobnej wielkości nie ma możliwości znacząco zwiększenia efektywności funkcjonowania magazynu w wyniku zastosowania klasyfikacji produktów. Bardziej racjonalne w takim przypadku jest dążenie do obniżenia kosztów funkcjonowania magazynu poprzez zmniejszenie powierzchni magazynowej. Przeprowadzone symulacje i analizy pozwalają potwierdzić postawioną tezę szczegółową naukową TN1: *„Dla magazynów małych i magazynów średniej wielkości wybór metody oraz kryterium klasyfikacji produktów nie ma znaczącego wpływu na czas kompletacji produktów.”*

Przeprowadzając natomiast symulacje dla magazynów średnich i dużych (podrozdział 5.2.4.) pozwalających na przechowywanie 16 800 jednostek paletowych w tym samym czasie stwierdzono, że najlepsze rezultaty uzyskano przy zastosowaniu rozmieszczenia produktów w magazynie na podstawie:

- indexu COI, średnia: 1872 s, mediana: 1639 s,
- analizy ABC według liczby sprzedanych sztuk, średnia: 1960 s, mediana: 1804 s,

Najgorsze wyniki otrzymano przy zastosowaniu analizy ABC połączonej z Indexem COI według popularności produktów – średnia wartość czasu kompletacji wyniosła 2187 s,

mediana: 1992 s, a zakres wyników: 8610 s. Można zatem stwierdzić, że dla dużych magazynów i produktów o małej podatności na piętrzenie ładunków najlepiej spisują się metody w których kryterium decyzyjnym jest objętość i waga produktów, takie jak Index COI. Metoda ta pozwala na uzyskanie lepszych wyników niż w przypadku wolnych miejsc składowania średnio o 12,46%. Wykonane symulacje pozwoliły stwierdzić, że analizy oparte o właściwości produktu takie jak waga i objętość są bardziej efektywne niż zastosowanie metody wolnych miejsc składowania lub klasycznych analiz działających w oparciu o kryterium liczby sprzedanych sztuk lub popularności produktów. Pozwala to na potwierdzenie postawionej na początku tezy szczegółowej technicznej TT1: *„Rozmieszczenie produktów w magazynie, o złożonej strukturze funkcjonalnej, z uwzględnieniem objętości tych produktów i ich wagi pozwala usprawnić kompletację wielu zamówień jednocześnie”*.

Dokonując porównania otrzymanych wyników dla rozmieszczenia produktów z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych (podrozdział 6.3.) i innych metod klasyfikacji stwierdzono, że w przypadku istnienia konieczności przekładania produktów na wózek w trakcie procesu kompletacji sztuczne sieci neuronowe pozwalają na osiągnięcie lepszych wyników niż w przypadku zastosowania innych metod. W porównaniu do metody wolnych miejsc składowania, zastosowanie sztucznych sieci neuronowych pozwala na skrócenie średniego czasu trwania kompletacji o 25,2% oraz mediany o 28,9%. Zatem przeprowadzone analizy pozwalają potwierdzić zatem tezę główną TG:

„Możliwe jest wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do klasyfikacji produktów w celu rozłokowania ich w magazynie, co poprawi – w stosunku do stosowanych obecnie metod – efektywność procesu kompletacji zamówień.”

oraz tezę techniczną TT2:

„Określenie relacji zachodzących pomiędzy produktami na listach kompletacyjnych i rozmieszczenie produktów według tych list pozwala zmniejszyć czas trwania kompletacji towarów bardziej niż w przypadku stosowania kryteriów popularności produktów, liczby sprzedanych sztuk i Indexu COI.”

Rozważając natomiast zastosowanie opracowanego algorytmu wyszukiwania powiązań to pozwala on na efektywniejszą pracę magazynu o około 16,8%. Stanowi to wynik ponad dwukrotnie lepszy od możliwych do osiągnięcia przy zastosowaniu klasycznych metod klasyfikacji niezależnie od przyjętego kryterium. Z uwagi na mniejszą pracochłonność i stosunkowo dużą szybkość działania w stosunku do sztucznych sieci neuronowych metoda może być z powodzeniem w magazynach, w których często zmienia się udział ilościowy poszczególnych produktów oraz asortyment. Zarówno metoda wyszukiwania powiązań jak i zastosowanie sztucznych sieci neuronowych mogą być z powodzeniem wdrożone do zastosowań praktycznych.

W związku z tym, że ocena metod klasyfikacji i rozmieszczenia produktów w magazynie na podstawie samego czasu trwania kompletacji może okazać się niewystarczająca (wdrożenie może być nieopłacane) to w pracy dokonano oceny opłacalności poszczególnych rozwiązań. W tym celu na podstawie założonych kosztów (podrozdział 6.4) obliczono wskaźniki dyskontowe: IRR, NPV oraz NPVR.

W wyniku przeprowadzenia powyższych analiz wykazano, że dla wariantu nieuwzględniającego możliwości piętrzenia ładunków (brak przeładunek produktów na wózek kompletacyjnym) metoda klasyfikacji i rozmieszczenia produktów w oparciu o sztuczne sieci neuronowe zawsze jest inwestycją opłacalną. Wdrożenie metody klasyfikacji w oparciu o dynamiczną analizę ABC według kryterium wagi jest opłacalne od wartości

stopy dyskontowej mniejszej niż 16%, Indexu COI do 14%, natomiast algorytmu wyszukiwania powiązań do 10%.

Analiza korzyści inwestycji dla wariantu uwzględniającego możliwości piętrzenia dotyczyła dwóch najlepszych metod, tj. algorytmu wyszukiwania powiązań oraz sztucznych sieci neuronowych. Obie metody okazały inwestycją opłacalną dla stopy dyskontowej do 20%. Przy czym sztuczne sieci neuronowe wykazały silniejszą zależność wartości wskaźnika NPVR od stopy dyskontowej. Algorytm wyszukiwania powiązań wykazał taką zależność tylko do 12% stopy dyskontowej. Powyżej tej wartości znaczenie stopy dyskontowej odgrywa drugorzędą rolę.

7.2. Kierunki dalszych badań

Podczas badań symulacyjnych przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy zauważono silną zależność efektywności funkcjonowania magazynu od jego wielkości i zastosowanej metody klasyfikacji produktów. W zawiązku z tym celem dalszych badań będzie:

- określenie wpływu wielkości magazynu na dobór metody klasyfikacji produktów pozwalającej na zwiększenie efektywności procesu kompletacji zamówień.

Ponadto planowane jest podjęcie zagadnień:

- wpływu stopnia zautomatyzowania procesu kompletacji zamówień na dobór metody klasyfikacji i planowania rozmieszczenia produktów w magazynie, w tym wykonanie badań symulacyjnych i oceny efektywności inwestycji związanej z wdrożeniem określonej metody klasyfikacji i rozmieszczenia produktów,
- zastosowania innych metod kompletacji poza rozważaną w niniejszej pracy kompletacją według zamówień, tj. kompletacji typu: cluster picking, batch picking, pick and pass oraz wave picking (omówionych w podrozdziale 3.2),
- dokonanie oceny efektywności i opracowanie rankingu metod kompletacji zamówień,
- zastosowania innego układu regałów w magazynie oraz kilku miejsc przygotowania do wysyłki (pakowania) zlokalizowanych w pobliżu doków załadowniczych – wariant dużych magazynów i centrów logistycznych,
- możliwości i efektywności zastosowania do klasyfikacji produktów innych narzędzi, takich jak algorytmy genetyczne, czy logika rozmyta.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Accorsi R., Manzini R., Maranesi F., *A decision-support system for the design and management of warehousing systems*. Computers in Industry 65(1), 2014.
- [2] Ambroziak T., Jacyna M., Jacyna-Golda I., Jachimowski R., Merkisz-Guranowska A., Pyza D., Żak J., *O pewnym podejściu do modelowania systemu transportowego w aspekcie zrównoważonego rozwoju*. Logistyka (4), 2014.
- [3] Andrzejczyk P., Zając J., *Zapasy i magazynowanie – przykłady i ćwiczenia, wyd. II*. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2012.
- [4] Balakrishnan J., Cheng CH., *Dynamic Layout Algorithms: a State-of-the-art Survey*. Omega-International Journal Of Management Science (4), 1998.
- [5] Barreto Se., Ferreira C., Paixao J., Santos BS., *Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem*. European Journal of Operational Research (179), 2007.
- [6] Bartecki K., *Sztuczne sieci neuronowe w zastosowaniach, zbiór ćwiczeń laboratoryjnych z wykorzystaniem przybornika Neural Network programu Matlab*. Politechnika Opolska, Opole 2010.
- [7] Bartman J., *Podstawowe funkcje biblioteki narzędziowej "Neural Network Toolbox. Version 5"*. Uniwersytet Rzeszowski, Rzeszów 2008.
- [8] Battini D., Calzavara M., Persona A., Sgarbossa F., *Order picking system design: the storage assignment and travel distance estimation (SA&TDE) joint method*. International Journal of Production Research 53(4), 2015.
- [9] Bauer M., Szarata A., *Metodyka oceny miejskich inwestycji transportowych. Problemy współczesnych systemów logistycznych i transportowych*. Prace Naukowe. Transport (97), 2013.
- [10] Boysen N., Stephan K., *The deterministic product location problem under a pick-by-order policy*. Discrete Applied Mathematics 161(18), 2013.
- [11] Bozarth C., Handfield R. B., *Wprowadzenie do zarządzania operacjami i łańcuchem dostaw – kompletny podręcznik logistyki i zarządzania dostawami*. Helion, Gliwice 2007.
- [12] Burinskiene A., *Optimising forklift activities in wide-aisle reference warehouse*. International Journal of Simulation Modelling 14(4), 2015.
- [13] Caron F., Marchet G., Perego A., *Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part Systems*. International Journal of Production Research 36(3), 1998.
- [14] Celik M., Sural H., *Order picking under random and turnover-based storage policies in fishbone aisle warehouses*. IIE Transactions 46(3), 2014.
- [15] Chen FL., Chen YC., Kuo JY., *Applying Moving back-propagation neural network and Moving fuzzy-neuron network to predict the requirement of critical spare parts*. Expert Systems with Applications 37(6), 2010.
- [16] Chew EP., Tang, LC., *Travel time analysis for general item location assignment in a rectangular warehouse*. European Journal of Operational Research (112), 1999.

- [17] Ching-Wu Chu, Gin-Shuh Liang, Chien-Tseng Liao, *Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification*. Computers & Industrial Engineering (55), 2008.
- [18] Christopher M., *Logistyka i zarządzanie łańcuchem dostaw. Strategie obniżki kosztów i poprawy poziomu obsługi*. Polskie Centrum Doradztwa Logistycznego, Warszawa 2000.
- [19] Clark KA., Meller RD., *Incorporating vertical travel into non-traditional cross aisles for unit-load warehouse designs*. IIE Transactions 45(12), 2013.
- [20] Coyle J.J., Bardi E.J., Langley Jr. C.J., *Zarządzanie logistyczne*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2010.
- [21] De Koster R., Le-Duc T., Roodbergen KJ., *Design and control of warehouse order picking: A literature review*. European Journal of Operational Research (182), 2007.
- [22] Długosz J., *Nowoczesne technologie w logistyce*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2009.
- [23] Dudziński Z., *Jak sporządzić instrukcję magazynową*. Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr, Gdańsk 2000.
- [24] Dudziński Z., Kizyn M., *Vademecum gospodarki magazynowej*. Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr Sp. z o.o., Gdańsk 2002.
- [25] Felix T.S. Chan, Chan H.K., *Improving the productivity of order picking of a manual-pick and multi-level rack distribution warehouse through the implementation of class-based storage*. Expert Systems with Applications (38), 2011.
- [26] Fertsch M. (red.), *Podstawy logistyki, podręcznik do kształcenia w zawodzie technik logistyk*, wyd. 2. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2008.
- [27] Fertsch M., *Słownik terminologii logistycznej*. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2006.
- [28] Ficoń K., *Logistyka techniczna. Infrastruktura logistyczna*. BEL Studio, Warszawa 2009.
- [29] Fijałkowski J., *Technologia magazynowania. Wybrane zagadnienia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [30] Gołębska E., *Logistyka w gospodarce światowej*, C.H. Beck, Warszawa 2009.
- [31] Grosse EH., Glock CH., Jaber MY., Neumann WP., *Incorporating human factors in order picking planning models: framework and research opportunities*. International Journal of Production Research 53(3), 2015.
- [32] Group Aberdeen., *Warehouse operations: Increase responsiveness through automation*. Aberdeen Group, Boston 2009.
- [33] Guerriero F., Musmanno R., Pisacane O., Rende F., *A mathematical model for the Multi-Levels Product Allocation Problem in a warehouse with compatibility constraints*. Applied Mathematical Modelling (37), 2013.
- [34] Guerriero F., Pisacane O., Rende F., *Comparing heuristics for the product allocation problem in multi-level warehouses under compatibility constraints*. Applied Mathematical Modelling (39), 2015.

- [35] Guvenir H.A., Erel E., *Multicriteria inventory classification using a genetic algorithm*. European Journal of Operational Research 105(1), 1998.
- [36] Gwynne R., *Warehouse management - 2nd edition, a complete guide to improving efficiency and minimizing costs in the modern warehouse*. Kogan Page, London 2014.
- [37] Hadi-Vencheh A., Mohamadghasemi A., *A fuzzy AHP-DEA approach for multiple criteria ABC inventory classification*. Expert Systems with Applications (38), 2011.
- [38] Henn S., *Algorithms for on-line order batching in an order picking warehouse*. Computers & Operations Research (39), 2012.
- [39] Henn S., Schmid V., *Metaheuristics for order batching and sequencing in manual order picking systems*. Computers & Industrial Engineering (66), 2013.
- [40] Ibrahim Al Kattan, Ahmed Bin Adi, *Multi-criteria decision making on total inventory cost and technical readiness*. International Journal on Interactive Design and Manufacturing 2 (3), 2008.
- [41] Iris F.A., Vis Kees Jan Roodbergen, *Layout and control policies for cross docking operations*. Computers & Industrial Engineering (61), 2011.
- [42] Jacyna-Gołda I., *Wskaźniki oceny efektywności funkcjonowania obiektów magazynowych w łańcuchach dostaw*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej (105) 2015.
- [43] Jacyna-Gołda I., *Uwarunkowania techniczno-organizacyjne projektowania sieci logistycznej dla przedsiębiorstw produkcyjnych*. Logistyka (3), 2014.
- [44] Jacyna-Gołda I., *Chosen aspects of logistics network design method for production service companies*. International Journal of Logistics Systems and Management 2-3 (15), 2013.
- [45] Jacyna M., Kłodawski M., *Pracochłonność procesu komisjonowania dla wariantowego rozmieszczania asortymentu w strefie kompletacji*. Prace Naukowe PW, Transport, z.70, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [46] Jacyna M., Kłodawski M., *Wydajność kompletacji przy wieloblokowych układach strefy komisjonowania*. Logistyka (4), Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2011.
- [47] Jarmosz M. L., Jacyna M., *Wspomaganie komputerowe badania efektywności procesu komisjonowania*. Logistyka (4), Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2009.
- [48] Kamińska J., *Podnoszenie i przenoszenie ładunków*. CIOP, Warszawa 1998.
- [49] Karkula M., *Modelowanie i symulacja procesów logistycznych*. Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Kraków 2013.
- [50] Karkula M., *Badania symulacyjne procesów transportowych realizowanych w obiektach logistycznych*. Logistyka (4), 2014.
- [51] Karkula M., *Analiza wybranych procesów transportowych obsługi magazynu metodami symulacyjnymi*. Logistyka (4), 2010.
- [52] Kłodawski M., Jacyna M., *Czas procesu kompletacji jako kryterium kształtowania strefy komisjonowania*. Logistyka (4), Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2011.

- [53] Kłodawski M, Jacyna M, *Wybrane aspekty problematyki komisjonowania w funkcji pracochłonności procesu*. Logistyka (4), Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2009.
- [54] Kłodawski M., Jacyna M., *Wpływ układu strefy komisjonowania na długość drogi kompletowania*. Logistyka (4), Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2010.
- [55] Korzeń Zb., *Logistyczne systemy transportu bliskiego i magazynowania, Tom 1*. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 1997.
- [56] Krawczyk S., *Logistyka, teoria i praktyka*. Difin, Warszawa 2011.
- [57] Krzyżaniak S., Cyplik P., *Zapasy i magazynowanie Tom I*. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2007.
- [58] Krzyżaniak S., Niemczyk A., Majewski J., Andrzejczyk P., *Organizacja i monitorowanie procesów magazynowych*. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2014.
- [59] Li M.L., *Goods classification based on distribution center environmental Factors*. International Journal of Production Economics 119(2), 2009.
- [60] Li ZQ., Tian ZJ., Xie YF., Huang R., Tan, JY., *A knowledge-based heuristic particle swarm optimization approach with the adjustment strategy for the weighted circle packing problem*. Computers and Mathematics with Applications (66), 2013.
- [61] Lorenc A., *Koncepcja wykorzystania sieci neuronowych do klasyfikacji produktów i ich rozmieszczenia w magazynie*. W: J. Feliksa (red.) *Wybrane zagadnienia logistyki Tom II*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2013.
- [62] Lorenc A., *Metody klasyfikacji i rozmieszczania produktów w magazynie – przegląd praktycznych rozwiązań*, Logistyka (3), 2014.
- [63] Lorenc A., *Planowanie rozmieszczania produktów w magazynie – najnowsze rozwiązania i trendy rozwojowe*, Logistyka (3), 2014.
- [64] Lorenc A., *Zwiększenie efektywności funkcjonowania magazynu w wyniku zastosowania dynamicznego podziału produktów na grupy*, Logistyka (6), 2014.
- [65] Lorenc A., Więcek P., *Application of fuzzy sets to multi-classification of products in the warehouse*. TANGER Ltd., Ostrava 2014.
- [66] Lorenc A., Kaczor G., *Zwiększenie efektywności procesu kompletacji zamówień w wyniku optymalizacji rozmieszczenia produktów w magazynie z uwzględnieniem ich częstotliwości pobrań oraz gramatury*. Logistyka (5), 2012.
- [67] Lorenc A., Szkoda M., *Customer Logistic Service in the Automotive Industry with the Use of the SAP ERP System*, 2015 4th IEEE International Conference on Advanced logistics and Transport (ICALT), Valenciennes, France, 2015.
- [68] Lu WR, McFarlane D., Giannikas V., Zhang, Q, *An algorithm for dynamic order-picking in warehouse operations*. European Journal of Operational Research 248(1), 2016.
- [69] Markusik S., *Infrastruktura logistyczna w transporcie Tom II: Infrastruktura punktowa – magazyny, centra logistyczne i dystrybucji, terminale kontenerowe*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [70] Mason R., Evans B., *The Lean Supply Chain. Managing the Challenge at Tesco*. Kogan Page, London 2015.

- [71] Matulewski M., Konecka S., Fajfer P., Wojciechowski A., *Systemy logistyczne, Komponenty, działania, przykłady*. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2009.
- [72] Miller A., *Order picking for the 21st century. Voice vs. Scanning Technology. White Paper*. Tompkins Associates, 2004.
- [73] Moeller K., *Increasing warehouse order picking performance by sequence optimization*. Procedia Social and Behavioral Sciences (20), 2011.
- [74] Mowrey CH., Parikh PJ., *Mixed-width aisle configurations for order picking in distribution centers*. European Journal of Operational Research 232(1), 2014.
- [75] Mulder R., Kobussen M., *Warehouse and distribution centre*. Design Media Publishing Limited, Hong Kong 2014.
- [76] Muppani VR., Adil GK., *A branch and bound algorithm for class based storage location assignment*. European Journal of Operational Research (189). 2008.
- [77] Muppani VR., Adil GK., *Efficient formation of storage classes for warehouse storage location assignment: A simulated annealing approach*. Omega-International Journal Of Management Science (36), 2008.
- [78] Murphy jr P.R., Wood D.F., *Nowoczesna logistyka – wydanie X*. Helion, Gliwice 2011.
- [79] Niemczyk A., *Zapasy i magazynowanie Tom II: Magazynowanie*. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2007.
- [80] Niemczyk A., *Zarządzanie magazynem*. Wyższa Szkoła Logistyki, Poznań 2010.
- [81] Niziński S., Żurek J., *Logistyka ogólna*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2011.
- [82] Norma PN-N-01800:1984. *Gospodarka magazynowa – Terminologia podstawowa*. 1984.
- [83] Onut S., Tuzkaya UR., Dogac B., *A particle swarm optimization algorithm for the multiple-level warehouse layout design problem*. Computers & Industrial Engineering (58) 2008.
- [84] Osowski S., *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
- [85] Ostwald M., *Podstawy optymalizacji konstrukcji*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.
- [86] Ozturkoglu O., Gue KR., Meller RD., *A constructive aisle design model for unit-load warehouses with multiple pickup and deposit points*. European Journal of Operational Research 236(1), 2014.
- [87] Pan JCH., Shih PH., Wu MH., *Order batching in a pick-and-pass warehousing system with group genetic algorithm*. Omega-International Journal Of Management Science, Part: B (57), 2015.
- [88] Pan JCH., Wu MH., Chang WL., *A travel time estimation model for a high-level picker-to-part system with class-based storage policies*. European Journal of Operational Research 237(3), 2014.
- [89] Partovi F.Y., Anandarajan, M., *Classifying inventory using an artificial neural network approach*. Computers and Industrial Engineering 41(4), 2002.

- [90] Petersen CG., Aase G., *A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking*. International Journal of Production Economics (92), 2004.
- [91] Pokora W., Świdorski A., *Modelowanie neuronowe w zastosowaniu do oceny zarządzania konfiguracją w logistyce*, Gospodarka Materiałowa i Logistyka (5), 2014.
- [92] Quansheng Lei Jian Chen, Qing Zhou, *Multiple Criteria Inventory Classification Based on Principal Components Analysis and Neural Network*. Lecture Notes in Computer Science (3498), 2005.
- [93] Ramtin F., Pazour JA., *Product allocation problem for an AS/RS with multiple in-the-aisle pick positions*. IIE Transactions 47(12), 2015.
- [94] Rao SS., Adil GK., *Class-based storage with exact S-shaped traversal routing in low-level picker-to-part systems*. International Journal of Production Research 51(16), 2013.
- [95] Rao SS., Adil GK., *Optimal class boundaries, number of aisles, and pick list size for low-level order picking systems*. IIE Transactions 45(12), 2013.
- [96] Rogowski W., *Rachunek efektywności przedsięwzięć inwestycyjnych*. Oficyna Ekonomiczna, Kraków 2004.
- [97] Roodbergen KJ., de Koster R., *Routing order pickers in a warehouse with middle aisle*. European Journal of Operational Research (133) 2001.
- [98] Roodbergen KJ., Vis IFA., Taylor GD., *Simultaneous determination of warehouse layout and control policies*. International Journal of Production Research 53(11), 2015.
- [99] Rushton A., Croucher P., Baker P., *The handbook of logistics and distribution management. Understanding the supply chain*. Kogan Page, London 2014.
- [100] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*. PWN, Łódź 1999.
- [101] Sikorski P.M., *Spedycja w praktyce - wiek XXI*. Polskie Towarzystwo Transportowe, Warszawa 2000.
- [102] StatSoft., *Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL*, Krakow 2006.
- [103] Strona internetowa: www.linde-mh.pl, dostęp dnia: 15-08-2015.
- [104] Strona internetowa: www.directindustry.com, dostęp dnia: 15-08-2015.
- [105] Strona internetowa: www.evansdist.com, dostęp dnia: 17-08-2015.
- [106] Strona internetowa: www.fastec.de, dostęp dnia: 17-08-2015.
- [107] Strona internetowa: www.konfekcjonowanie.pl, dostęp dnia: 15-07-2015.
- [108] Strona internetowa: www.system-kanban.pl, dostęp dnia: 16-07-2013.
- [109] Strona internetowa: www.sjp.pwn.pl, dostęp dnia: 12-06-2014.
- [110] Strona internetowa: www.ua.automation.com, dostęp dnia: 15-08-2015.
- [111] Strona internetowa: www.wanzl.com, dostęp dnia: 15-08-2015.
- [112] Strona internetowa: www.otodom.pl/wynajem/haleimagazyny/krakow, dostęp dnia: 17-01-2016.
- [113] Strona internetowa: www.muratorplus.pl, dostęp dnia: 17-01-2016.
- [114] Strona internetowa: www.wozkiwidlowe.com.pl, dostęp dnia: 17-01-2016.

- [115] Strona internetowa: *wynagrodzenia.pl*, dostęp dnia: 17-01-2016.
- [116] Sierpińska M., Jachna T., *Ocena przedsiębiorstwa według standardów światowych*, PWN, Warszawa 1999.
- [117] Stuart E., *Excellence in warehouse management - how to minimise costs and maximise value*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester 2005.
- [118] Subramanian N., Ramanathan R., *A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management*. International Journal of Production Economics (138), 2012.
- [119] Szarata A., *Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w drogownictwie i komunikacji*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Budownictwo (z93), Gliwice 2001.
- [120] Szarata A., *The simulation analysis of suppressed traffic*, Advances in Transportation Studies (29), 2013.
- [121] Szczepański E., Jacyna-Gołda I., Murawski J., *Genetic algorithms based approach for transshipment hub location in urban areas*. Archives of Transport 3(31), 2014.
- [122] Świdorski A., *The assessment of product configuration management with usage of artificial neural networks*, Polish Journal of Commodity Science, vol. 3 (20), 2009.
- [123] Tadeusiewicz R., Gąciarz T., Borowik B., Leper B., *Odkrywanie właściwości sieci neuronowych*. Polska Akademia Umiejętności, Kraków 2007.
- [124] Theys C., Bräysy O., Dullaert W., Raa B., *Using a TSP heuristic for routing order pickers in warehouses*. European Journal of Operational Research (200), 2010.
- [125] Thomas LM., Meller RD., *Analytical models for warehouse configuration*. IIE Transactions 46(9), 2014.
- [126] Tompkins J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., Frazelle, E.H., Tanchoco, J.M.A., *Facilities Planning*. John Wiley & Sons, New York 2003.
- [127] van den Berg J.P., *Highly competitive warehouse management*. Management Outlook Publishing, Buren 2012.
- [128] van den Berg J.P., Zijm W.H.M., *Models for warehouse management: Classification and examples*. International Journal of Production Economics (59), 1999.
- [129] Vitasek K., *Supply chain management terms and glossary*. Scvisions. 2013.
- [130] Winer BJ., Brown DR., Michels KM., *Statistical Principles In Experimental Design 3rd Edition*. McGraw-Hill, New York 1991.
- [131] Witkowski J., *Zarządzanie łańcuchem dostaw, koncepcje, procedury, doświadczenia*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2010.
- [132] Wojciechowski Ł., Wojciechowski A., Kosmatka T., *Infrastruktura magazynowa i transportowa*, Wyższa Szkoła Logistyki, Poznań 2009.
- [133] Wutthisirisart P., Noble JS., Chang CA., *A two-phased heuristic for relation-based item location*. Computers & Industrial Engineering (82), 2015.
- [134] Yu Min-Chun, *Multi-criteria ABC analysis using artificial-intelligence-based classification techniques*. Expert Systems with Applications (38), 2011.

- [135] Zhang G.Q., Lai K.K., *Combining path relinking and genetic algorithms for the multiple-level warehouse layout problem*. European Journal of Operational Research (169) 2006.
- [136] Żak J., Kłodawski M., Lewczuk K., Gołębiowski P., Jacyna-Gołda I., *Wybrane aspekty szacowania kosztów zewnętrznych w transporcie*. Logistyka (4), 2014.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1 Miejsce magazynu w łańcuchu transportowym towarów	12
Rys. 1.1 Udział procentowy czynności będących składowymi procesu kompletacji produktów	17
Rys. 1.2 Schemat przyjętej w pracy metodyki badawczej	20
Rys. 2.1 Klasyfikacja magazynów ze względu składowane produkty	22
Rys. 2.2 Magazyn o układzie workowym	24
Rys. 2.3 Magazyn o układzie przelotowym	24
Rys. 2.4 Magazyn o układzie przelotowym – doki centrum dystrybucyjnego w Almere (Holandia)...	25
Rys. 2.5 Magazyn o układzie kątowym (podwójnym).....	25
Rys. 2.6 Magazyn o układzie kątowym – doki, na przykładzie firmy Van De Scheur (Holandia).....	26
Rys. 2.7 Przykładowe rozmieszczenie stref w magazynie o układzie workowym	27
Rys. 2.8 Składowanie rzędowe, trzypoziomowe.....	28
Rys. 2.9 Składowanie blokowe, trzypoziomowe.....	28
Rys. 2.10 Funkcja przynależności dla danych.....	39
Rys. 2.11 Liczba porównań w funkcji liczby elementów dla metody AHP.....	45
Rys. 2.12 Przykładowa struktura procesu decyzyjnego AHP	45
Rys. 3.1 Współzależność pomiędzy przepływem materiałów a przepływem informacji w magazynie	51
Rys. 3.2 Przykładowy rozkład kosztów magazynowania	52
Rys. 3.3 Kosz do kompletacji kilku zamówień (a), pociąg logistyczny (b)	54
Rys. 3.4 Schemat funkcjonowania kompletacji strefowej.....	56
Rys. 3.5 Automatyczny sorter typu taśmowego	61
Rys. 3.6 Przykład zastosowania kompletacji głosowej	62
Rys. 3.7 System pick by light, wskazanie miejsca oraz liczby sztuk do pobrania	63
Rys. 4.1 Relacje zachodzące pomiędzy produktami znajdującymi się na liście kompletacji	68
Rys. 4.2 Droga odpowiadająca obliczeniom czasu poprania produktu dla współrzędnych miejsca składowania (2, 11, 3).....	69
Rys. 4.3 Rozkład czasu dostępu do towarów ze strefy pakowania w zależności od czasu transportu..	70
Rys. 4.4 Przykład rozmieszczenia produktów w magazynie wraz ze wskazaniem czasu dostępu	71
Rys. 4.5 Schemat blokowy algorytmu oceny efektywności procesu kompletacji zamówień	72
Rys. 4.6 Schemat postępowania przy obliczaniu czasu pokonania drogi pomiędzy dwoma punktami	76
Rys. 5.1 Wariant IA – zależność współczynnika wrażliwości od parametrów	79
Rys. 5.2 Wariant IIA – zależność współczynnika wrażliwości od parametrów.....	84
Rys. 5.3 Wariant IB – zależność współczynnika wrażliwości od parametrów	85
Rys. 5.4 Wariant IIB – zależność współczynnika wrażliwości od parametrów.....	90
Rys. 5.5 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów, Wariant IA	91
Rys. 5.6 Wykres ramka-wąsy dla Wariantu IA	93

Rys. 5.7 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów, Wariant IIA	93
Rys. 5.8 Wykres ramka-wąsy dla Wariantu IIA.....	95
Rys. 5.9 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów, Wariant IB.....	95
Rys. 5.10 Graficzne przedstawienie wyników analizy wariancji ANOVA dla Wariantu IB	97
Rys. 5.11 Wynik porównania średnich z interwałem Scheffego przy 95% przedziale ufności	98
Rys. 5.12 Wykres ramka-wąsy dla Wariantu IB	98
Rys. 5.13 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów, Wariant IIB	99
Rys. 5.14 Graficzne przedstawienie wyników analizy wariancji ANOVA dla Wariantu IIB	101
Rys. 5.15 Wynik porównania średnich z interwałem Scheffego przy 95% przedziale ufności	102
Rys. 5.16 Wykres ramka-wąsy dla Wariantu IIB.....	102
Rys. 6.1 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów, Wariant IC.....	109
Rys. 6.2 Graficzne przedstawienie wyników analizy wariancji ANOVA dla Wariantu IC	110
Rys. 6.3 Wynik porównania średnich z interwałem Tukeya HSD przy 95% przedziale ufności	111
Rys. 6.4 Wykres ramka-wąsy dla Wariantu IC	111
Rys. 6.5 Czas kompletacji zamówień w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów, Wariant IIC	112
Rys. 6.6 Graficzne przedstawienie wyników analizy wariancji ANOVA dla Wariantu IIC	113
Rys. 6.7 Wynik porównania wielokrotnego za pomocą testu Tukeya HSD przy 95% przedziale ufności	114
Rys. 6.8 Wykres ramka-wąsy dla Wariantu IIC.....	114
Rys. 6.9 Podział produktów na kategorie ABC według udziału 80%, 15% i 5% dla popularności produktu.....	115
Rys. 6.10 Algorytmu podziału produktów na kategorie według największych różnic wartości.....	116
Rys. 6.11 Algorytm łączenia grup produktów za pomocą iteracji	117
Rys. 6.12 Podział na kategorie według analizy ABC oraz algorytmu dynamicznego podziału na grupy Źródło: opracowanie własne.....	118
Rys. 6.13 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów	119
Rys. 6.14 Wykres ramka-wąsy dla symulacji według dynamicznego wyznaczania granic	120
Rys. 6.15 Schemat blokowy opracowanej metody planowania rozmieszczenia produktów w magazynie	121
Rys. 6.16 Struktura zastosowanej sztucznej sieci neuronowej.....	122
Rys. 6.17 Zależności czasu kompletacji dla poszczególnych analiz w funkcji parametru wejściowego	124
Rys. 6.18 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej funkcji uczenia SSN	125
Rys. 6.19 Graficzne przedstawienie wyników analizy wariancji ANOVA dla funkcji uczenia SSN.	126
Rys. 6.20 Wynik porównania średnich z interwałem Scheffego przy 95% przedziale ufności	127

Rys. 6.21 Wykres ramka-wąsy dla funkcji uczenia SSN	128
Rys. 6.22 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów (z założeniem możliwości piętrzenia produktów)	128
Rys. 6.23 Wynik porównania średnich z interwałem Scheffego przy 95% przedziale ufności	130
Rys. 6.24 Wykres ramka-wąsy dla metod kompletacji produktów z opcją piętrzenia ładunków	131
Rys. 6.25 Czas kompletacji produktów w zależności od zastosowanej metody klasyfikacji produktów (z założeniem wrażliwości na piętrzenie produktów).....	131
Rys. 6.26 Wynik porównania średnich z interwałem Scheffego przy 95% przedziale ufności	132
Rys. 6.27 Wykres ramka-wąsy dla metod kompletacji produktów założeniem wrażliwości na piętrzenie produktów	133
Rys. 6.28. Wartość wskaźnika NPV w zależności od stopy dyskontowej	139
Rys. 6.29. Wartość wskaźnika NPVR w zależności od stopy dyskontowej.....	140
Rys. z.1 Zrzut ekranu dla modułu przygotowania danych – ustawienia parametrów symulacji.....	158
Rys. z.2 Zrzut ekranu dla modułu przygotowania danych – tworzenie struktury magazynu.....	159
Rys. z.3 Zrzut ekranu dla modułu klasyfikacji i symulacji – klasyfikacja produktów.....	160
Rys. z.4 Zrzut ekranu dla modułu klasyfikacji i symulacji – rozmieszczenie produktów w magazynie	161
Rys. z.5 Zrzut ekranu dla modułu klasyfikacji i symulacji – symulacja procesu kompletacji zamówień	161
Rys. z.6 Zrzut ekranu dla modułu integracji z programem Matlab – eksport danych.....	162
Rys. z.7 Zrzut ekranu dla modułu Sztucznych Sieci Neuronowych – menu symulacji	162

SPIS TABEL

Tabela 2.1 Zalety i wady poszczególnych układów magazynów.....	26
Tabela 2.2 Zalety i wady składowania rzędowego.....	28
Tabela 2.3 Wskazówki dotyczące doboru technologii składowania w magazynie.....	29
Tabela 2.4 Częstość występowania produktów na listach kompletacji.....	38
Tabela 2.5 Średnie wartości oraz odchylenia standardowe dla częstotliwości pobrań produktów X_2 ..	38
Tabela 2.6 Zestawienie klasyfikacji produktów według analizy ABC oraz ABC-FC.....	40
Tabela 2.7 Przykładowy wygląd tabeli EIQ.....	42
Tabela 2.8 Macierz pierwszeństwa kryteriów.....	43
Tabela 2.9 Porównanie metod klasyfikacji produktów.....	47
Tabela 3.1 Porównanie metod kompletacji zamówień.....	57
Tabela 3.2 Przykładowe czasy poruszania się środków transportu.....	58
Tabela 3.3 Porównanie wymaganej minimalnej szerokości korytarza w odniesieniu do środków transportowych wykorzystywanych w kompletacji zamówień.....	59
Tabela 5.1 Zestawienie różnic w analizowanych wariantach.....	78
Tabela 5.2 Wariant IA - czas kompletacji produktów w wyniku modyfikacji zmiennej objaśniającej	80
Tabela 5.3 Wariant IA – wartości współczynnika wrażliwości.....	81
Tabela 5.4 Wariant IIA - czas kompletacji produktów w wyniku modyfikacji zmiennej objaśniającej	82
Tabela 5.5 Wariant IIA – wartości współczynnika wrażliwości.....	83
Tabela 5.6 Wariant IB - czas kompletacji produktów w wyniku modyfikacji zmiennej objaśniającej	86
Tabela 5.7 Wariant IB – wartości współczynnika wrażliwości.....	87
Tabela 5.8 Wariant IIB - czas kompletacji produktów w wyniku modyfikacji zmiennej objaśniającej	88
Tabela 5.9 Wariant IIB – wartości współczynnika wrażliwości.....	89
Tabela 5.10 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów dla wariantu IA [s].....	92
Tabela 5.11 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla Wariantu IA.....	92
Tabela 5.12 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów dla wariantu IIA [s].....	94
Tabela 5.13 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla Wariantu IIA.....	94
Tabela 5.14 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów dla wariantu IB [s].....	96
Tabela 5.15 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla Wariantu IB.....	96
Tabela 5.16 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Scheffego przy 95% przedziale ufności.....	97
Tabela 5.17 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów dla wariantu IIB [s].....	100
Tabela 5.18 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla Wariantu IIB.....	100
Tabela 5.19 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Scheffego przy 95% przedziale ufności.....	101
Tabela 6.1 Macierz A – po pierwszej iteracji [liczba powiązań].....	104

Tabela 6.2 Macierz A, B – po drugiej iteracji [liczba powiązań].....	105
Tabela 6.3 Macierz A, B – po trzeciej iteracji [liczba powiązań]	105
Tabela 6.4 Macierz A, B – po czwartej iteracji [liczba powiązań]	106
Tabela 6.5 Macierz A, B – po piątej iteracji [liczba powiązań]	106
Tabela 6.6 Macierz A, B – po szóstej iteracji [liczba powiązań]	106
Tabela 6.7 Macierz A, B – po siódmej iteracji [liczba powiązań]	107
Tabela 6.8 Macierz A, B – po ósmej iteracji [liczba powiązań]	107
Tabela 6.9 Macierz A, B – po dziewiątej iteracji [liczba powiązań].....	108
Tabela 6.10 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów dla wariantu IC [s]	109
Tabela 6.11 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla Wariantu IC	110
Tabela 6.12 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Tukeya HSD przy 95% przedziale ufności...	110
Tabela 6.13 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów dla wariantu IIC	112
Tabela 6.14 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla Wariantu IIC	113
Tabela 6.15 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Tukeya HSD przy 95% przedziale ufności...	113
Tabela 6.16 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów [s].....	119
Tabela 6.17 Współczynniki korelacji (k) parametrów wejściowych z wynikami dla analiz	123
Tabela 6.18 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od funkcji uczenia SSN [s]	126
Tabela 6.19 Wyniki analizy wariancji średniego czasu kompletacji ANOVA dla funkcji uczenia SSN	126
Tabela 6.20 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Scheffego przy 95% przedziale ufności.....	127
Tabela 6.21 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów [s].....	129
Tabela 6.22 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Scheffego przy 95% przedziale ufności.....	129
Tabela 6.23 Statystyka opisowa czasu kompletacji zamówień w zależności od metody klasyfikacji produktów [s].....	132
Tabela 6.24 Porównanie wielokrotne za pomocą testu Scheffego przy 95% przedziale ufności.....	132
Tabela 6.25 Wydajność systemu magazynowania w zależności od metody klasyfikacji i rozmieszczenia produktów.....	135
Tabela 6.26 Wartości wskaźników IRR, NPV oraz NPVR dla poszczególnych metod klasyfikacji..	138

ZAŁĄCZNIK NR 1 - IMPLEMENTACJA METODY W POSTACI APLIKACJI KOMPUTEROWEJ (SPKZ)

W oparciu o przedstawioną w rozdziale 4 metodę symulacji i oceny efektywności procesu kompletacji zamówień wykonano autorską aplikację komputerową. Została ona napisana w języku PHP 5.3 oraz HTML 4.0 przy wykorzystaniu relacyjnej bazy danych MySQL 5.6. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest wykorzystanie dużych zbiorów danych, czytelne prezentowanie wyników oraz łatwość modyfikacji parametrów wejściowych. Ponadto opracowana aplikacja umożliwia integrację z oprogramowaniem Matlab.

Aplikacja została sprawdzona pod kątem poprawności kodu i jego zgodności ze standardami. Ponadto każdy z opracowanych algorytmów został przetestowany na przykładach, które następnie zostały obliczone manualnie w celu wykrycia błędów logicznych i merytorycznych niemożliwych do wykrycia przy sprawdzeniu tylko i wyłącznie poprawności kodu. Po gruntownym przeanalizowaniu wielu różnych przypadków, wykluczono błędy znajdujące się w aplikacji. Tym samym wykluczono wpływ działania aplikacji na wyniki symulacji, co jest niezwykle ważne z badawczego punktu widzenia. Weryfikacja poprawności działania aplikacji i poprawa zidentyfikowanych błędów zajęła cztery miesiące.

Opracowana aplikacja ma budowę modułową, na którą składają się cztery główne moduły: przygotowania danych, klasyfikacji i symulacji, wymiany danych z programem matlab (eksportu i importu) oraz sztucznych sieci neuronowych.

Opracowana aplikacja umożliwia:

- przedstawienie struktury magazynu w postaci matematycznej,
- opis parametrów produktów składowanych w magazynie,
- wykonanie klasyfikacji produktów za pomocą metod: analizy ABC, XYZ, indexu COI oraz takich kryteriów jak: popularność produktu, liczba sprzedanych sztuk, waga lub objętość,
- symulację rozmieszczenia produktów w magazynie,
- utworzenie list kompletacji zamówień,
- symulację procesu kompletacji zamówień.

Charakterystyka modułów aplikacji

Moduł przygotowania danych pozwala dokonać konfiguracji zarówno parametrów symulacji jak również właściwości produktów i struktury magazynu. Zrzut ekranu dla omawianego modułu przedstawiono na rysunku z.1.

SPKZ
Symulacje procesów kompletacji zamówień

PRZYGOTOWYWANIE DANYCH | KLASYFIKACJE I SYMULACJE | EKSPORT I IMPORT (MATLAB) | SZTUCZNE SIECI NEURONOWE

ustawienia parametrów symulacji

liczba produktów na liście kompletacyjnej (20)

liczba produktów na liście kompletacyjnej (3)

liczba jednego produktu na liście kompletacyjnej (60)

liczba jednego produktu na liście kompletacyjnej (1)

minimalna liczba kompletacji dziennie (10)

maksymalna liczba kompletacji dziennie (50)

próg odcięcia dla analizy ABC, do progu klasa 2, powyżej klasa 1 (80)

próg odcięcia dla analizy ABC, do progu klasa 1, powyżej klasa 0 (95)

kara za przeładunek jednej sztuki produktu o objętości 1 m³ (10) [s]

czas pokonywania 1 m w linii prostej (2.0) [s]

czas pokonywania łuku (2.0) [s]

czas pobrania produktu z 1 poziomu składowania (unos+opuszczenie) (0) [s]

czas pobrania produktu z 2 poziomu składowania (unos+opuszczenie) (58) [s]

czas pobrania produktu z 3 poziomu składowania (unos+opuszczenie) (116) [s]

czas pobrania produktu z 4 poziomu składowania (unos+opuszczenie) (174) [s]

czas pobrania produktu z 5 poziomu składowania (unos+opuszczenie) (232) [s]

czas pobrania produktu z 6 poziomu składowania (unos+opuszczenie) (290) [s]

czas pobrania produktu z 7 poziomu składowania (unos+opuszczenie) (348) [s]

czas pobrania produktu z 8 poziomu składowania (unos+opuszczenie) (406) [s]

wykonaj

Ustawienia właściwości produktów

liczba produktów w asortymencie (1000)

maksymalna liczba regałów na jeden typ produktu (20)

maksymalna waga produktu (6.0)

minimalna waga produktu (0.1)

maksymalna objętość produktu (0.4)

minimalna objętość produktu (0.1)

wykonaj

Ustawienia struktury magazynu

liczba poziomów składowania (4)

liczba korytarzy poprzecznych (1)

liczba korytarzy wzdłużnych (1)

liczba rzędów regałów (10)

liczba miejsc paletowych w rzędzie (200)

długość regału (0.9)

szerekość regału (1.4)

szerekość korytarza (2.8)

wykonaj

Opogramowanie zostało opracowane i wykonane na potrzeby pracy doktorskiej przez: Augustyn Lorenc

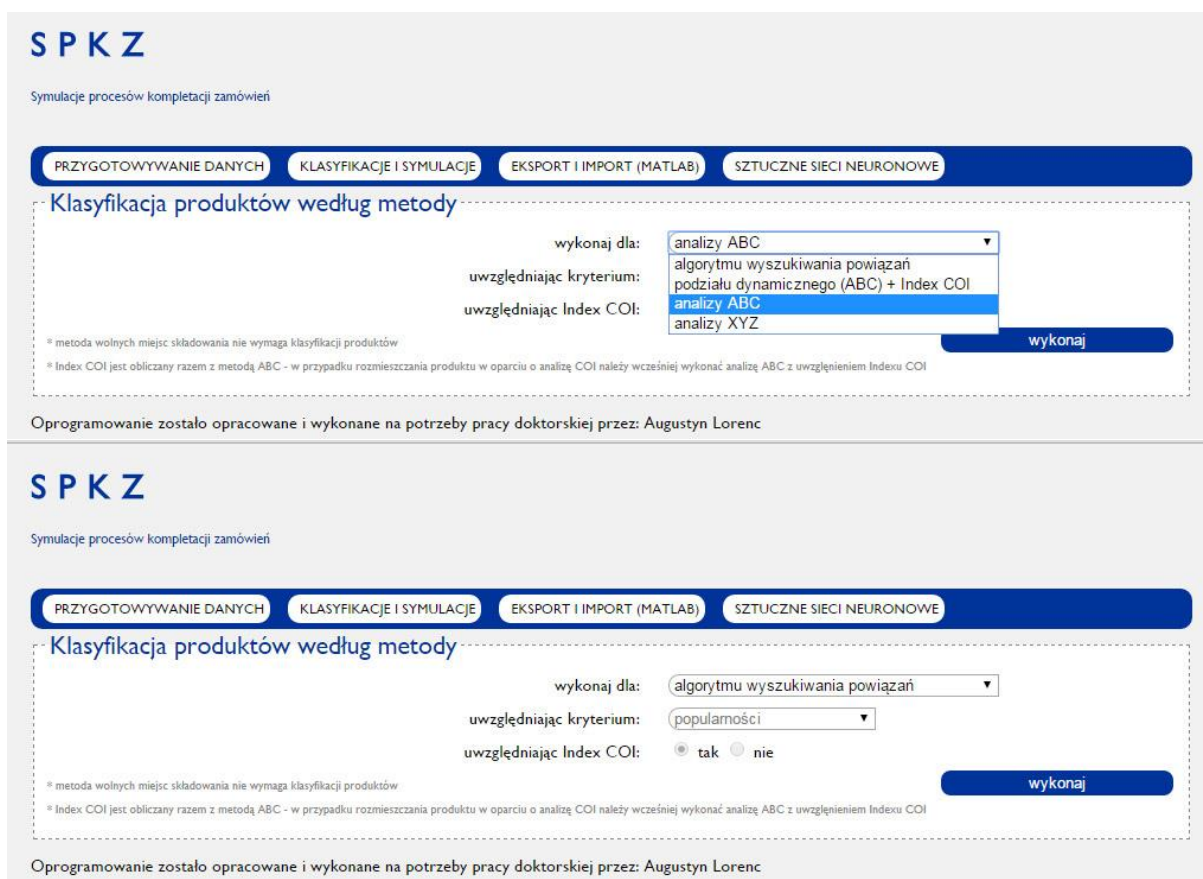
Rys. z.1 Zrzut ekranu dla modułu przygotowania danych – ustawienia parametrów symulacji

Źródło: opracowanie własne

Po wprowadzeniu danych i ich zapisie w systemie, należy przystąpić do kolejnego kroku, tj. tworzenia struktury magazynu (Rys. z.2). Ta część modułu jest zautomatyzowana, tj. na podstawie konfiguracji program sam tworzy macierz (W) odpowiadającą miejscom składowania produktów (regałom) oraz korytarzom. Opis macierzowy struktury magazynu omówiono w podrozdziale 4.2. W tym miejscu następuje także obliczenia czasów dostępu do poszczególnych regałów ze strefy pakowania produktów (macierz T) z uwzględnieniem poziomów składowania.

Kolejnym modułem jest moduł klasyfikacji i symulacji składający się z trzech etapów: dokonania klasyfikacji produktów, zaplanowania ich rozmieszczenia w magazynie oraz symulacji kompletacji zamówień.

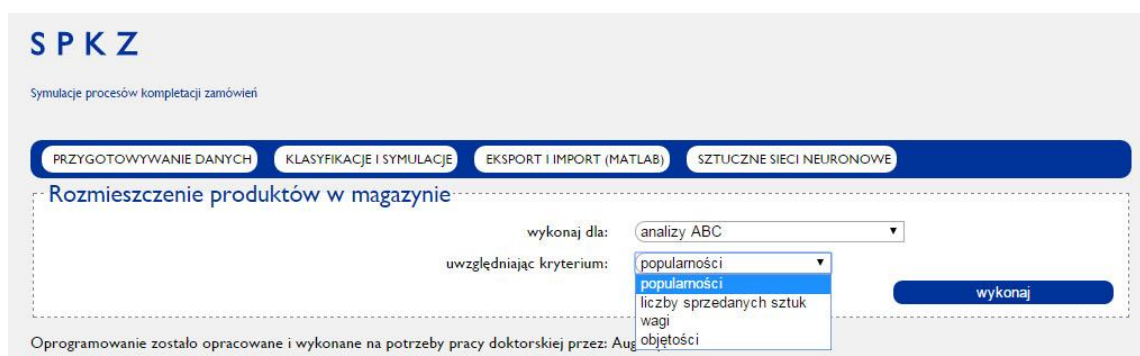
W etapie klasyfikacji produktów należy wybrać jedną z metod klasyfikacji, tj. algorytmu wyszukiwania powiązań, analizy ABC połączonej z analizą XYZ, analizy ABC, modyfikacji analizy ABC z dynamicznym wyznaczaniem granic (opisane w podrozdziale 6.2) połączone z Indexem COI. Dla dwóch ostatnich metod należy także określić kryterium analizy – popularność produktu, liczba sprzedanych sztuk, waga lub objętość. W przypadku algorytmu wyszukiwania powiązań oraz analizy XYZ kryteria ustalane są automatycznie. Ponadto dla analizy ABC istnieje możliwość uwzględnienia dodatkowo Indexu COI. Zrzuty ekranu z wyborem metody klasyfikacji przedstawiono na rysunku z.3.



Rys. z.3 Zrzut ekranu dla modułu klasyfikacji i symulacji – klasyfikacja produktów

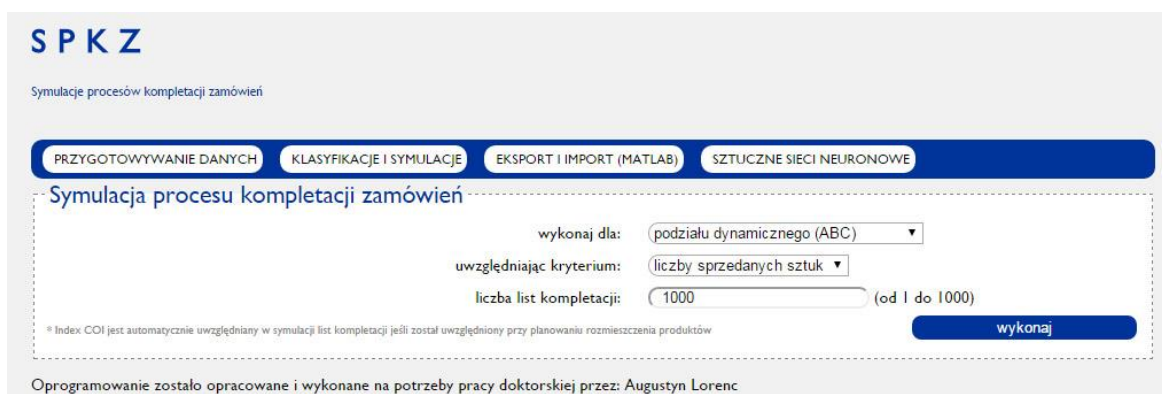
Źródło: opracowanie własne

Na rysunku z.4 przedstawiono zrzut ekranu dla wyboru sposobu rozmieszczenia produktów w magazynie. W tym kroku należy dokonać wyboru metody klasyfikacji produktów z wcześniej omówionych lub metody wolnych miejsc składowania, a następnie wybrać uwzględniane kryterium klasyfikacji.



Rys. z.4 Zrzut ekranu dla modułu klasyfikacji i symulacji – rozmieszczenie produktów w magazynie
Źródło: opracowanie własne

Ostatnią opcją tego modułu jest wykonanie symulacji kompletacji list zamówień. W ustawieniach symulacji należy jedynie wybrać zastosowaną metodę klasyfikacji produktów wraz z podaniem kryterium, a następnie podać liczbę list kompletacji, które mają być uwzględniane w symulacji (Rys. z.5). Pozostałe ustawienia symulacji są zdefiniowane w ustawieniach początkowych programu – moduł przygotowania danych – dlatego nie trzeba ich ponownie podawać. Po zatwierdzeniu wyboru program dokonuje symulacji kolejno obliczając czas pójścia do regału oraz pobrania z niego określonej liczby sztuk produktu. Kolejność pobrania produktów zostaje wyznaczana na bieżąco poprzez wyznaczenie najbliższego względem aktualnej pozycji magazyniera miejsca składowania produktu znajdującego się na liście kompletacyjnej. Wynikiem symulacji jest czas kompletacji listy zamówienia, kary wynikającej z konieczności zmiany kolejności produktów na wózku kompletacyjnym – dodatkowego czasu oraz łącznego kompletacji zamówienia z karą. Ponadto program podaje statystyczne dane kompletacji tj. średni poziom składowania, łączną liczbę pobranych produktów w zamówieniu, liczbę pozycji produktów na liście, łączną wagę oraz objętość.



Rys. z.5 Zrzut ekranu dla modułu klasyfikacji i symulacji – symulacja procesu kompletacji zamówień
Źródło: opracowanie własne

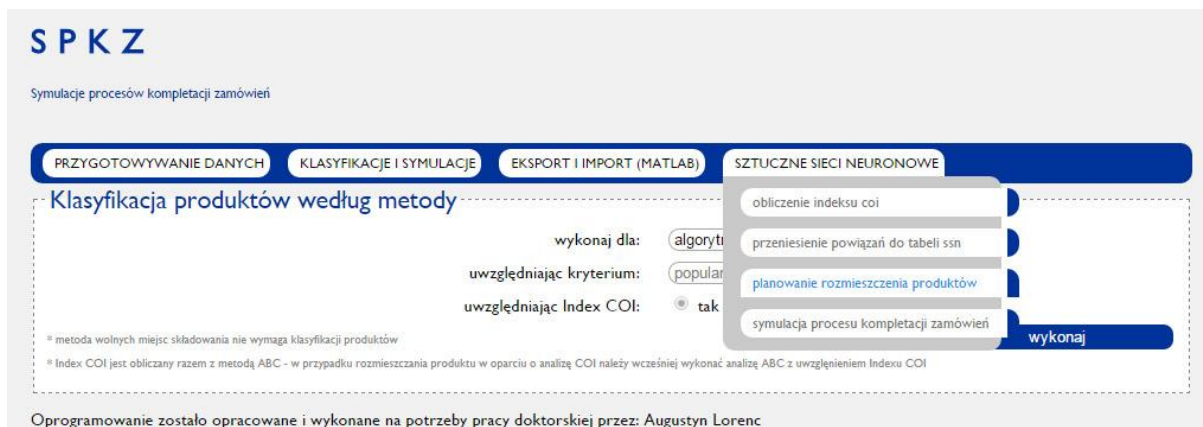
Trzecim modułem aplikacji jest moduł wymiany danych pomiędzy omawianym systemem, a programem Matlab. Program dokonuje przygotowania danych potrzebnych do procesu uczenia sztucznej sieci neuronowej, tj. właściwości produktu (waga, objętość, ilość sprzedanych sztuk, liczba powiązań produktu z innymi) oraz pożądaných klas produktu obliczanych na podstawie wag zgodnie z podrozdziałem 6.3.1. Przygotowane dane są zapisywane w postaci pliku csv (Rys. z.6), który następnie jest wczytywany do programu Matlab. Po wykonaniu obliczeń w Toolboxie Neural Network i zapisu tabeli wynikowej do pliku csv możliwe jest wczytanie wyników klasyfikacji produktów za pomocą sztucznych sieci neuronowych do opracowanego programu.



Rys. z.6 Zrzut ekranu dla modułu integracji z programem Matlab – eksport danych

Źródło: opracowanie własne

Zadaniem modułu sztucznych sieci neuronowych jest dokonanie obliczenia Indexu COI dla wszystkich produktów, odczytanie liczby powiązań występowania produktów w parach na listach kompletacji, zaplanowanie rozmieszczenia produktów w magazynie oraz wykonanie symulacji kompletacji zamówień (Rys. z.7). Podobnie jak w przypadku klasycznych metod wynikiem symulacji jest obliczenie czasu kompletacji listy zamówienia, kary czasowej wynikającej z konieczności zmiany kolejności produktów na wózku kompletacyjnym oraz łącznego czasu trwania kompletacji zamówienia z karą. Ponadto program podaje statystyczne dane kompletacji tj. średni poziom składowania, łączną liczbę pobranych produktów w zamówieniu, liczbę pozycji produktów na liście, łączną wagę oraz objętość.



Rys. z.7 Zrzut ekranu dla modułu Sztucznych Sieci Neuronowych – menu symulacji

Źródło: opracowanie własne

Podsumowanie - funkcje i zadania aplikacji

Aplikacja SPKZ została stworzona w celu umożliwienia zarówno generowania list kompletacji zamówień, wykonania klasyfikacji produktów, jak również planowania rozmieszczenia produktów w magazynie oraz symulacji procesu kompletacji zamówień.

Aplikacja pozwala na wykonanie dowolnej liczby symulacji, dzięki czemu możliwe jest otrzymanie dużego zbioru wyników. Ponadto otrzymane informacje stanowią dobry zbiór danych badawczych na który składają się:

- listy kompletacji zamówień powiązane z parametrami produktu (waga, objętość, popularność, liczba zajętych regałów),
- zapis rozmieszczenia produktów w magazynie,

- czas dostępu do każdego produktu w regale,
- czas kompletacji zamówień,
- informacje statystyczne dla każdej kompletacji, takie jak: kolejność pobranych produktów, łączna objętość i waga produktów, liczba pozycji asortymentowych na liście kompletacyjnej, liczba pobranych sztuk.

Powyższe dane są wystarczające do przeprowadzenia badań potrzebnych do osiągnięcia celów pracy i zweryfikowania postawionych w dysertacji tez. W tym celu, za pomocą niniejszej aplikacji wykonano analizę wpływu zmiany kryterium klasyfikacji na efektywność procesu kompletacji (rozdział 5) oraz oceny efektywności klasycznych i własnych metod klasyfikacji produktów (rozdział 6).