

Optymalizacja procesu magazynowania wysokoskładowego

*Piotr KISIELEWSKI**
*Przemysław TALAREK***

1. Wstęp

Przedsiębiorstwa biorące aktywny udział w łańcuchach dostaw dążą do poprawy swojego funkcjonowania, a przy tym do zwiększenia konkurencyjności poprzez ulepszenie funkcjonowania różnych procesów, w tym procesu magazynowania. Ulepszenie to ma prowadzić do obniżenia kosztów, zwiększenia wydajności lub ograniczenia pomyłek występujących w obsłudze magazynowej. Wprowadzanie zmian w organizacji magazynu nie może być dokonywane metodą prób i błędów, gdyż decyzje podjęte w ten sposób mogą prowadzić do występowania przestojów w pracy magazynu i w konsekwencji poważnych strat finansowych.

Gospodarka magazynowa, ze względu na złożoność procesów, jakie w niej występują, powinna być wspierana przez systemy informatyczne dopasowane do funkcji oraz charakteru docelowego magazynu, w którym mają być wykorzystywane. Przeprowadzenie symulacji procesu magazynowania na podstawie posiadanych lub przewidywanych danych wejściowych pozwala wskazać kierunek zmian w zarządzaniu magazynem, które mają na celu zoptymalizować proces magazynowania.

Do najważniejszych procesów występujących w magazynie należy komplekacja produktów, której sprawne przeprowadzenie w dużej mierze decyduje o jakości obsługi klienta. Usprawnienie tego procesu, nawet w niewielkim stopniu, może wygenerować znaczne oszczędności w przypadku magazynów obsługujących wiele zleceń dziennie. Lepszy przepływ towarów w magazynie pozwala obsłużyć więcej zamówień, co pozwala zwiększyć zyski.

W artykule przedstawiono problem optymalizacji rozkładu artykułów w magazynie wysokiego składowania, tak aby droga niezbędna do skompletowania zamówienia była jak najkrótsza. W procesie optymalizacji wykorzystano analizę materiałową ABC, algorytm Dijkstry oraz autorski program realizujący niezbędne obliczenia, napisany w języku programowania Python.

* Politechnika Krakowska

** Clonex Sp. z o.o. Sp.k.

2. Metody optymalizacji magazynowania

Magazyn, jako część łańcucha logistycznego, jest jego istotnym elementem odpowiedzialnym za przechowywanie materiałów, a następnie kierowanie ich do kolejnych ogniw tego łańcucha. W zarządzaniu magazynem istotne jest umiejętne wykorzystanie dostępnej powierzchni. Można to osiągnąć poprzez rozplanowanie wielkości i ułożenia strefy przyjęcia, magazynowania, kompletacji oraz wydawania materiału. Planowanie stref w magazynie musi uwzględniać warunki określające sposób zagospodarowania powierzchni magazynu, m.in. złożoność procesu magazynowania, zastosowane fronty przeładunkowe i ich ułożenie [1, 2, 4].

Założeniem optymalizacji magazynowania jest zwiększenie efektywności wykorzystania zasobów logistycznych magazynu. Optymalizacja może być związana ze zmianą wyposażenia magazynu, układu stref magazynowych, sposobu przydzielania zadań oraz ich wykonywania przez pracowników. Dokonując optymalizacji procesów magazynowania, należy przyjąć kryterium, według którego będzie można ocenić wpływ zmian w organizacji procesu.

Wykorzystanie powierzchni magazynowej ocenia się przez stosunek powierzchni wykorzystanej do całkowitej dostępnej powierzchni. W magazynach, gdzie nie są wykorzystywane regały paletowe, uzyskanie najwyższej wartości tego wskaźnika zapewnia składowanie materiałów w układzie blokowym, a wartości wskaźnika wykorzystania powierzchni wynoszą tutaj od 0.6 do 0.8. Dla porównania, wskaźnik ten dla rzędownego układu składowania wynosi od 0.25 do 0.6. Dążenie do optymalizacji wykorzystania powierzchni z zastosowaniem tego typu składowania powoduje ograniczenie warunków piętrzenia materiałów oraz brak dostępu do asortymentu znajdującego się w środku bloków i możliwe jest do zastosowania jedynie dla asortymentu jednorodnego, przy czym nie wymaga dodatkowych nakładów finansowych na wyposażenie magazynu. W przypadku, kiedy jedynym kryterium oceny jest zwiększenie ilości składowanego asortymentu, dobrym rozwiązaniem okazuje się wykorzystanie przepływowych regałów paletowych. Zapewniają one wysoki wskaźnik wykorzystanej powierzchni z powodu ograniczenia ilości dróg transportowych, ale jednocześnie zmuszają do wykorzystania zasady FIFO (*First In First Out* – pierwsze weszło, pierwsze wyszło). Maksymalne wykorzystanie dostępnej powierzchni magazynowej możliwe jest dzięki zastosowaniu metody wolnych miejsc składowania, która zakłada, że asortyment może być umieszczony w każdym wolnym gnieździe regałowym [1, 4].

Proces obsługi magazynowanego asortymentu pod względem czasochłonności może być ograniczony za pomocą zmiany sposobu składowania, badania częstotliwości wydania każdego produktu oraz przemyślane wyznaczanie trasy kompletacji zamówienia.

Optymalnym sposobem magazynowania jest przypisanie stałych miejsc składowania artykułu w układzie rzędownym. Materiał składowany jest niezmiennie w jednym miejscu, a grupy produktów znajdują się obok siebie w zależności od zastosowanego

kryterium podziału, takiego jak typ materiału, producent czy odbiorca. Ułożenie w ten sposób materiału umożliwia szybkie odnalezienie pożądanego produktu, co przekłada się na skrócenie czasu kompletacji zamówień [3].

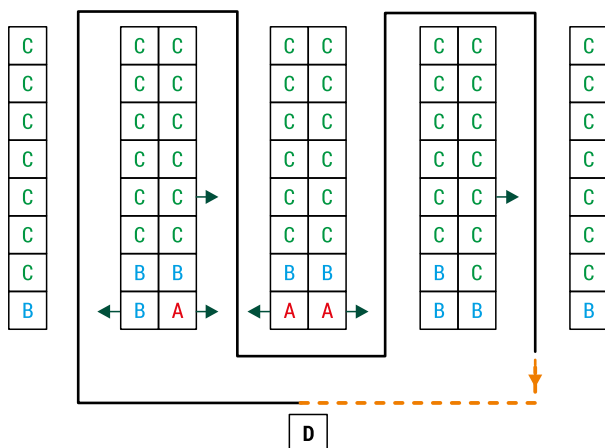
Kontrolowanie częstotliwości wydawania każdego produktu pozwala określić, które produkty powinny zostać umieszczone najbliżej doku kompletacyjnego, dzięki czemu można skrócić drogę pokonywaną w celu pobrania materiału podczas kompletacji zamówień. Głównym czynnikiem poddanym analizie jest wielkość rotacji każdego produktu, czego efekt stanowi przypisanie każdego materiału do grupy według analizy ABC, dzielącej materiały na trzy grupy:

- A – materiały najczęściej pobierane,
- B – materiały o średniej częstotliwości pobierania,
- C – materiały pobierane najrzadziej [4].

Analiza ABC opiera się o regułę Pareto 80-20, w założeniu której 80% zysków z procesu generowanych jest przez 20% asortymentu. Analizę ABC wykonuje się na podstawie zapisów dokumentacji magazynowej, według której należy obliczyć ilość wydań danego produktu, a następnie przypisać go do konkretnej grupy i określić jego lokalizację. Ta metoda wykorzystywana jest głównie w przypadku, kiedy nie występuje zmiana fizycznej postaci asortymentu w trakcie kompletacji zamówienia [3].

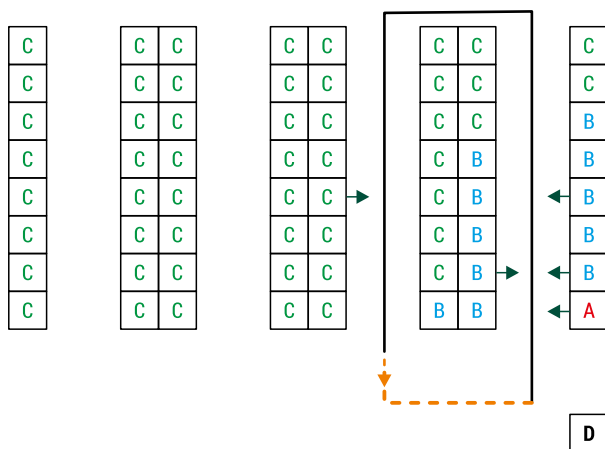
Przypisanie stałych miejsc składowania oraz wykonanie analizy ABC można poszerzyć o strategię rozlokowania asortymentu w magazynie według poniższych wytycznych, które zostały schematycznie przedstawione na rysunkach od 1 do 4:

1. Across-Aisle – artykuły umieszczone są w głąb magazynu od doku kompletacyjnego, poziom po poziomie.
2. Diagonal Storage – artykuły grupy A umieszczone są najbliżej doku kompletacyjnego, a artykuły grupy C najdalej. Do zastosowania tej strategii niezbędne jest wcześniejsze obliczenie odległości między każdym gniazdem paletowym a dokiem kompletacyjnym.
3. Perimeter Storage – artykuły powinny być umieszczone wokół magazynu, rozpoczynając od doku kompletacyjnego i idąc w głąb magazynu, a następnie ponownie umieszczone wokół magazynu.
4. Within-Aisle – strategia wykorzystywana dla magazynu, w którym dok kompletacyjny zlokalizowany jest na środku strefy kompletacyjnej. Artykuły umieszczone są po obu stronach magazynu, symetrycznie w stosunku do doku kompletacyjnego [5].



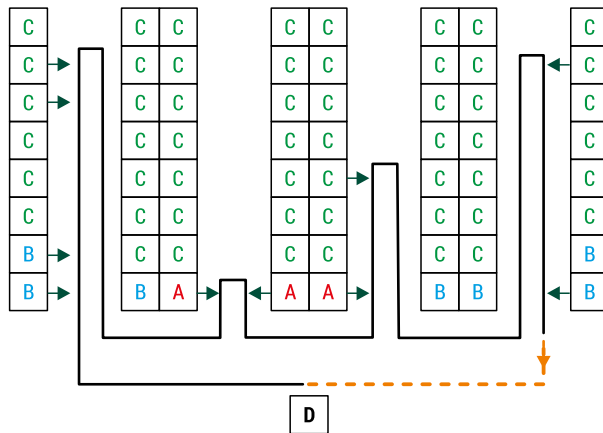
RYS. 1. Strategia Across-Aisle z metodą przejścia S-Shape
 FIG. 1. Across-Aisle strategy with S-Shape routing method

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.
 SOURCE: own elaboration.



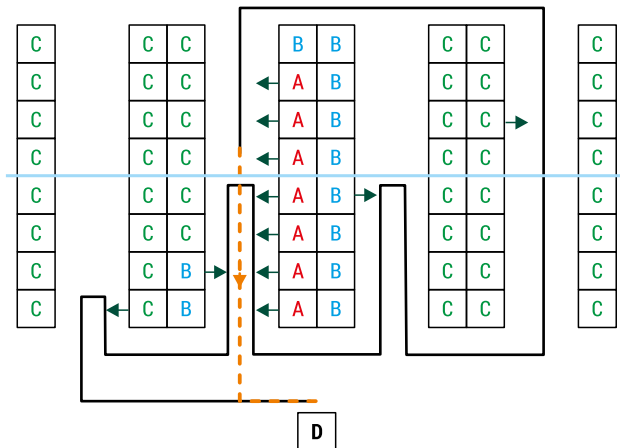
RYS. 2. Strategia Diagonal Storage z metodą przejścia S-Shape
 FIG. 2. Diagonal Storage strategy with S-Shape routing method

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.
 SOURCE: own elaboration.



RYS. 3. Strategia Perimeter Storage z metodą przejścia Return
 FIG. 3. Perimeter Storage strategy with Return routing method

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.
 SOURCE: own elaboration.



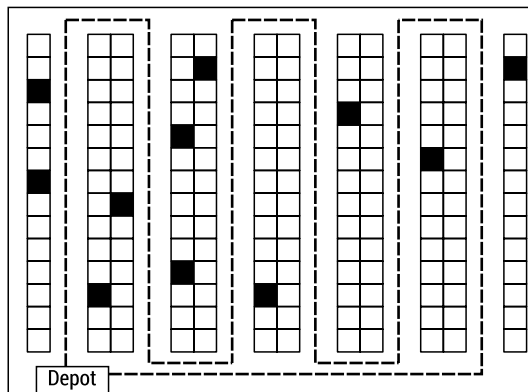
RYS. 4. Strategia Within-Aisle z metodą przejścia Midpoint
 FIG. 4. Within-Aisle strategy with Midpoint routing method

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.
 SOURCE: own elaboration.

Wydajność procesu kompletacji jest w dużej mierze zależna od sposobu wyznaczania trasy dla osoby kompletującej zamówienie. Każda trasa powinna być ustalana przez system informatyczny wykorzystujący odpowiednie algorytmy deterministyczne bądź metody heurystyczne. Wykorzystanie algorytmów pozwala na znalezienie najkrótszej ścieżki, która pozwoli zrealizować dane zamówienie, natomiast wykorzystanie

heurystyk nie zawsze gwarantuje wyznaczenie optymalnej ścieżki kompletacyjnej. Do najczęściej stosowanych tu algorytmów należy algorytm Dijkstry. Najczęściej stosowane heurystyki to:

1. Metoda S-Shape – najprostsza metoda wyznaczania trasy kompletacji. Osoba kompletująca zamówienie wchodzi do alejki z pierwszym artykułem do pobrania, a następnie przechodzi przez całą alejkę, wychodząc na drugim końcu i przechodzi do kolejnej alejki w celu pobrania artykułu. Schemat został przedstawiony na rysunku 5.
2. Metoda Return – pracownik rozpoczyna kompletację od lewej strony magazynu, pobiera wszystkie artykuły znajdujące się w alejce, a następnie cofa się do początku alejki i przechodzi do kolejnej. Schemat został przedstawiony na rysunku 6.
3. Metoda Midpoint – magazyn podzielony jest na dwie części. Pracownik dochodzi do połowy danej alejki, a następnie wraca i wchodzi do następnej. Jedynie pierwsza i ostatnia alejka pokonywane są w całości. Schemat został przedstawiony na rysunku 7.
4. Metoda Largest Gap – pracownik wchodzi do pierwszej alejki i opuszcza ją po przeciwnej stronie. W następnych alejkach osoba kompletująca zamówienie pokonuje drogę do momentu dotarcia do lokacji, z której lepszym wyjściem jest cofnięcie się do wejścia alejki, aby później wejść do niej z drugiej strony magazynu. Tylko pierwsza i ostatnia alejka w magazynie pokonywane są w całości. Schemat został przedstawiony na rysunku 8 [2].

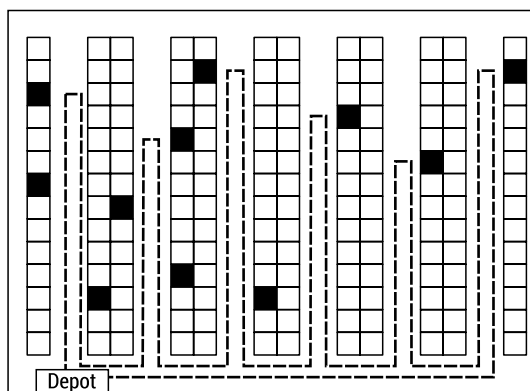


RYS. 5. Heurystyka S-Shape

FIG. 5. S-Shape heuristic

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

SOURCE: own elaboration.

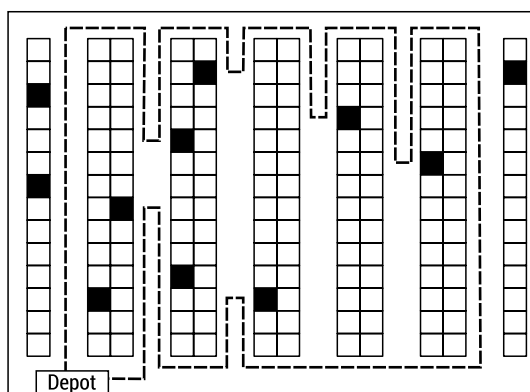


RYS. 6. Heurystyka Return

FIG. 6. Return heuristic

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

SOURCE: own elaboration.

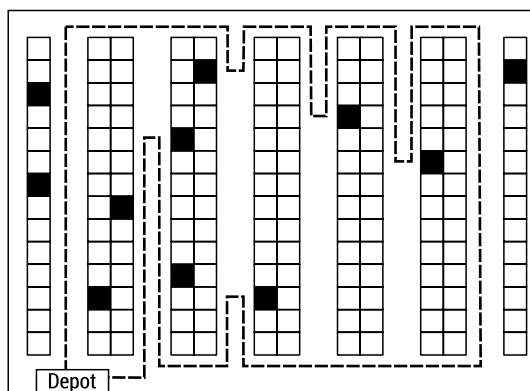


RYS. 7. Heurystyka Midpoint

FIG. 7. Midpoint heuristic

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

SOURCE: own elaboration.



RYS. 8. Heurystyka Largest Gap

FIG. 8. Largest Gap heuristic

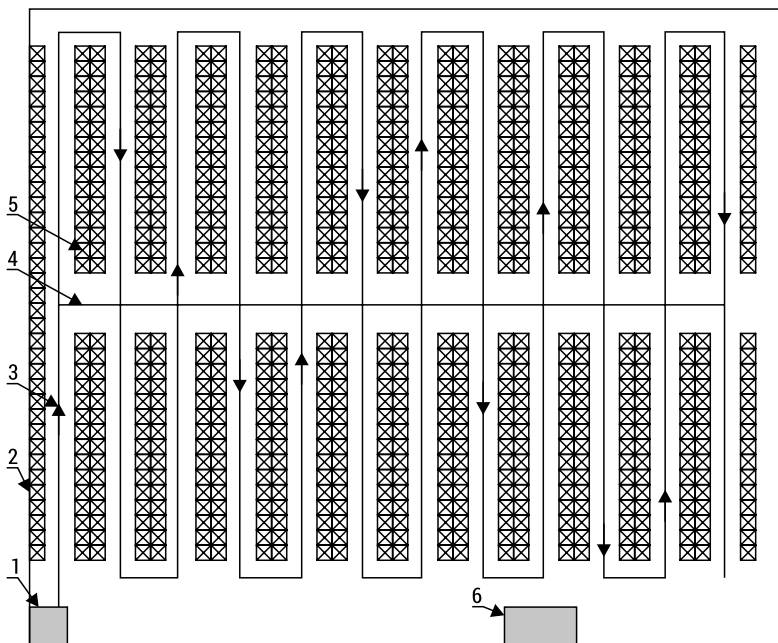
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

SOURCE: own elaboration.

3. Przyjęty w pracy model decyzyjny

Model decyzyjny został opracowany dla magazynu wysokiego składowania należącego do firmy produkującej artykuły malarskie, takie jak farby, grunty i podkłady. Na powierzchnię magazynową składają się dwie strefy składowania produktów oddzielone od siebie drogą komunikacyjną. Każda strefa składa się z 12 alejek z 10 regałami rzędownymi po obu jej stronach. Regały stosowane w tym magazynie mają 7 m wysokości i umożliwiają składowanie materiałów na 6 poziomach po 3 palety na każdy poziom. Łączna liczba miejsc paletowych w tym magazynie wynosi 4 320, a liczba wszystkich pozycji asortymentowych jest równa 3 240 i zajmuje 3 850 miejsc paletowych, co daje 84% wykorzystania łącznej powierzchni magazynowej. Schemat magazynu został przedstawiony na rysunku 9.

Celem optymalizacji rozmieszczenia produktów w magazynie jest skrócenie drogi, jaką pokonuje osoba kompletująca zamówienia. Przyjęte zostało, że jeden pracownik w tym samym czasie może skompletować produkty należące do jednego zamówienia. Miejsce rozpoczęcia oraz zakończenia kompletacji znajdują się w dwóch różnych miejscach, a wielkość palety, na której umieszczane są pobrane materiały jest wystarczająca, aby zebrać całe zamówienie bez konieczności odłożenia pełnej palety i pobrania nowej. W ramach analizy przyjęto, że obliczenia zostaną wykonane dla zamówień składających się odpowiednio z 5, 10, 20, 30, 40 i 50 produktów. Dla każdego wariantu zostanie wygenerowanych 1 000 list kompletacyjnych.



RYS. 9. Schemat magazynu: 1 – strefa rozpoczęcia kompletacji, 2 – paleta z materiałem, 3 – droga kompletacji, 4 – droga komunikacyjna, 5 – regał przesuwny, 6 – miejsce odkładania skompletowanych zamówień

FIG. 9. Warehouse layout: 1 – order picking beginning zone, 2 – pallet with material, 3 – order picking path, 4 – communication path, 5 – sliding rack, 6 – order picking finishing zone

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

SOURCE: own elaboration.

Produkty będą umieszczane w regałach według strategii składowania Diagonal Storage. Każdy produkt w magazynie ma przypisaną współrzędną x , y , z , które informują o jego lokalizacji w konkretnej alejce, na odpowiednim regale oraz wysokości składowania. Współrzędne służą do obliczenia odległości między kolejnymi punktami, do których musi udać się pracownik magazynu.

Współrzędna X :

1. określa alejkę, w której znajduje się pożądaný produkt;
2. pierwsza alejka ma przypisaną współrzędną $x = 2$, ponieważ $x = 1$ odnosi się do lokalizacji pierwszego regału z którego pobierany jest produkt;
3. każda następna alejka ma współrzędną x zwiększoną o 3 w stosunku do poprzedniej, czyli $x_i = x_{i-1} + 3$ dla $i > 1$;
4. w rozpatrywanym magazynie jest 12 alejek, więc $X = [2, 5, \dots, 35]$.

Współrzędna Y:

1. określa długość strefy kompletacyjnej;
2. miejsce składowania pierwszej palety w alejce zaczyna się od $y = 11$, $y = [1, 2, \dots, 10]$ i odnosi się do lokalizacji „wejścia” – wózki widłowe służące do kompletacji zamówień wyposażone są w czujnik magnetyczny, który nie pozwoli na wjazd do alejki bez odpowiedniego ustawienia wózka widłowego względem ścieżki magnetycznej wzdłuż regałów;
3. miejsce składowania każdej następnej palety wzdłuż alejki oznaczone jest jako $y_i = y_{i-1} + 1$;
4. w rozpatrywanym magazynie jest 30 regałów wysokiego składowania na każdą stronę alejki;
5. współrzędne do wykorzystania przez algorytm przy rozmieszczaniu produktów mieszczą się w zakresie $y = [11, 12, \dots, 45]$ oraz $y = [49, 50, \dots, 83]$;
6. współrzędne Y w zakresie $y = [46, 47, 48]$ zarezerwowane są dla drogi komunikacyjnej między strefami kompletacyjnymi.

Współrzędna Z:

1. określa ilość poziomów składowania;
2. w rozpatrywanym magazynie jest sześć poziomów składowania;
3. miejsce składowania pierwszej palety w alejce zaczyna się od $z = 1$; współrzędne do wykorzystania przez algorytm przy rozmieszczaniu produktów mieszczą się w zakresie $z = [1, 2, \dots, 6]$.

W modelowaniu magazynu, w celu usprawnienia oraz ułatwienia obliczeń, przyjęto, że droga pokonywana przez magazyniera zostanie podzielona przez drogę odniesienia równą odległości między środkiem geometrycznym dwóch sąsiadujących gniazd paletowych – $L_{odn} = 1,4$ [m]. W wyniku tego zabiegu miary odległościowe zostały w projekcie sprowadzone do wielkości bezwymiarowych.

Aby określić, które produkty należy umieścić jak najbliżej doku kompletacyjnego, posłużono się metodą zarządzania zapasami, a dokładnie analizą ABC. Kryterium, według którego dokonano tej analizy, jest częstość występowania danego produktu na zamówieniu kompletacyjnym. Sposób wyznaczania tej wielkości przedstawia wzór (1).

$$\delta_m = \frac{I_m}{I} \quad (1)$$

gdzie:

δ_m – częstość występowania produktu m na listach kompletacyjnych w badanym okresie;

I_m – liczba list kompletacyjnych, na których występuje produkt m w badanym okresie;

I – liczba wszystkich list kompletacyjnych w badanym okresie.

Oceny proponowanej zmiany w rozmieszczeniu produktów dokonujemy według kryterium opisanego wzorem (2). Sposób obliczenia średniej odległości, jaką musi przebyć magazynier podczas kompletacji zamówienia, został opisany wzorami (3) oraz (4).

$$\Delta = \left(1 - \frac{L_2}{L_1}\right) 100\% \quad (2)$$

gdzie:

Δ – kryterium oceny wprowadzonych zmian w rozmieszczeniu produktów w magazynie, [%];

L_1 – średnia odległość, jaką musi przebyć osoba kompletująca zamówienie przed zmianą w rozmieszczeniu produktów, określona wzorem:

$$L_1 = \frac{1}{I} \sum_{n=1}^I l_n \quad (3)$$

L_2 – średnia odległość, jaką musi przebyć osoba kompletująca zamówienie po zmianie w rozmieszczeniu produktów, określona wzorem:

$$L_2 = \frac{1}{I} \sum_{n=1}^I l_n^p \quad (4)$$

W powyższych wzorach przyjęto oznaczenia:

l_n – odległość, jaką pokonuje osoba kompletująca n -te zamówienie przed zmianą rozmieszczenia produktów;

l_n^p – odległość, jaką pokonuje osoba kompletująca n -te zamówienie po zmianie rozmieszczenia produktów;

I – liczba wszystkich list kompletacyjnych w badanym okresie.

W celu obliczenia drogi, jaką pokonuje osoba kompletująca zamówienie, przyjęto, że musi ona odwiedzić przynajmniej pięć miejsc w magazynie:

1. miejsce poboru pustej palety;
2. lokalizację „wejścia” do alejki, w której znajduje się pożądaný produkt;
3. miejsce składowania produktu;
4. lokalizację „wyjścia” z alejki, w której obecnie znajduje się pracownik;
5. miejsce odłożenia palety z zamówieniem.

W przypadku wystąpienia na liście kompletacyjnej produktów, które znajdują się w różnych alejkach, po punkcie 4 należy wykonać ponownie kroki 2-4. Wszystkie odwiedzane miejsca zapisywane są w jednej tabeli, co umożliwia obliczenie odległości między każdą parą sąsiadujących ze sobą lokalizacji.

Do obliczeń wykorzystano wzór (5):

$$l_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}, \quad i = j-1 \quad (5)$$

gdzie:

- l_i – odległość między dwoma punktami na liście kompletacyjnej;
- x_i – współrzędna x dla pierwszej lokalizacji, dla której obliczana jest odległość;
- y_i – współrzędna y dla pierwszej lokalizacji;
- z_i – współrzędna z dla pierwszej lokalizacji;
- x_{i+1} – współrzędna x dla drugiej lokalizacji, dla której obliczana jest odległość;
- y_{i+1} – współrzędna y dla drugiej lokalizacji;
- z_{i+1} – współrzędna z dla drugiej lokalizacji;
- j – liczba miejsc, do których musi udać się magazynier przy kompletacji zamówienia.

Całkowitą odległość, jaką pokonuje osoba kompletująca zamówienia przedstawia wzór (6):

$$l_n = \sum_{i=1}^{j-1} l_i \quad (6)$$

l_n – łączna odległość do przebycia przy kompletacji n -tego zamówienia.

4. Badania symulacyjne

Algorytm wykorzystany w aplikacji pozwala na obliczenie drogi, jaką pokonuje osoba kompletująca zamówienie w magazynie o dowolnych wymiarach, jednak przy zachowaniu pewnych stałych elementów, takich jak:

1. miejsce rozpoczęcia kompletacji;
2. miejsce zakończenia kompletacji;
3. podział magazynu na dwie strefy oraz istnienie drogi komunikacyjnej między tymi strefami;
4. miejsce, w którym położony jest pierwszy regał oraz kierunku poszerzania strefy magazynowania.

Program symulacyjny miał za zadanie:

1. określić parametry magazynu;
2. określić pulę miejsc składowania produktów w magazynie;
3. określić asortyment dostępny w magazynie;
4. utworzyć listy kompletacyjne;
5. opisać asortyment w magazynie za pomocą analizy ABC;
6. obliczyć odległość, jaką pokonuje magazynier przy kompletowaniu zamówień, wykorzystując każdą metodę wyznaczania trasy i zapisać wyniki;
7. dokonać optymalizacji ułożenia asortymentu w magazynie według analizy ABC.

Do wyznaczenia ścieżki, po jakiej porusza się osoba kompletująca zamówienia, wykorzystano algorytm Dijkstry, heurystykę S-Shape, Midpoint, Return, a także Buyer i Sorted-Buyer. Dwa ostatnie sposoby opisują zbieranie zamówień w sposób podobny do robienia zakupów w hipermarkecie.

Metoda Buyer przedstawia pobieranie artykułów przez osobę, która nie zna rozłożenia produktów w sklepie i produkty na jej liście są ułożone w sposób losowy. Metoda Sorted-Buyer przedstawia zachowanie osoby, która doskonale orientuje się w ułożeniu asortymentu w sklepie, przez co jej lista zakupów jest ułożona w taki sposób, aby nie musiała chodzić kilka razy przez daną alejkę z produktami, aby pobrać interesujący ją artykuł.

Wyznaczanie trasy do pokonania z użyciem algorytmu Dijkstry odbywa się w następujących krokach:

1. Utwórz macierz najmniejszych odległości między każdym punktem na liście kompletacyjnej, włącznie z miejscem rozpoczęcia i zakończenia kompletacji.
2. Pogrupuj lokacje z listy kompletacyjnej według alejki, której dotyczą oraz strefy magazynu, tworząc sektory.
3. Utwórz listę decyzyjną zawierającą po jednej cyfrze przypadającej na każdy sektor, którą następnie wprowadź do zbioru list decyzyjnych.
4. Oblicz odległość, jaką trzeba pokonać z pierwszego do drugiego sektora, pobierając przy tym wszystkie produkty z drugiego sektora, uwzględniając dwa warianty kolejności, w jakiej pobiera się artykuły i wybierz opcję pozwalającą na skrócenie wymaganego dystansu:
 - a) gdy elementy sektora posortowane są według współrzędnej y w rosnącej kolejności,
 - b) gdy elementy sektora posortowane są według współrzędnej y w malejącej kolejności.
5. Powtórz krok 4 dla każdego następnego sektora, zapisz otrzymane wyniki.
6. Zamień w sposób losowy kolejność sektorów, do których musi udać się pracownik magazynu (poza pierwszym i ostatnim), a następnie nowo powstałą listę decyzyjną wprowadź do zbioru list decyzyjnych (jeżeli nowa lista obecnie znajduje się w zbiorze, powtórz krok 6).
7. Powtórz krok 4 oraz 5, a następnie wybierz wariant dający lepszy wynik.
8. Powtarzaj kroki 4-7 aż do osiągnięcia 10 000 iteracji.

5. Wyniki

Dzięki wykorzystaniu modelu decyzyjnego opisanego w rozdziale 3 oraz algorytmu w rozdziale 4, otrzymano wyniki przedstawiające możliwy do osiągnięcia poziom optymalizacji magazynowania wysokoskładowego. Wyniki zostały przedstawione w sposób zbiorczy w tabeli 1. Różnica w odległości, jaka jest niezbędna do pokonania przy kompletacji zamówień przed i po alokacji produktów metodą analizy ABC,

została przedstawiona w sposób jednostkowy i procentowy. Poziom dokonanej optymalizacji kompletacji zamówień przy wykorzystaniu różnych metod wyznaczania drogi kompletacji zamówienia i dla różnej wielkości zamówień został przedstawiony na rysunku 10.

TAB. 1. Średnia odległość niezbędna do kompletacji zamówienia – wyniki zbiorcze

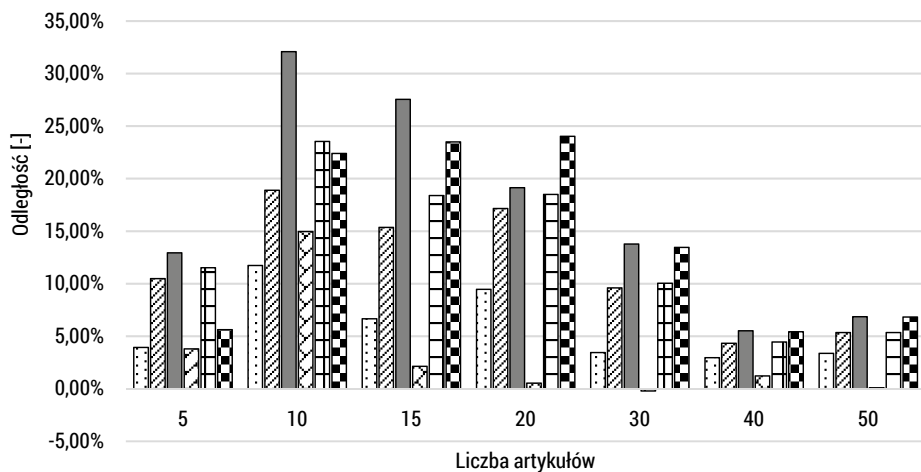
TAB. 1. Average distance needed for order picking – summary list

Heurystyka		Liczba artykułów:						
		50	40	30	20	15	10	5
I ₁	Metoda Buyer	755,096	611,284	463,019	326,555	248,738	176,93	102,683
	Metoda Sorted buyer	185,373	176,857	165,254	150,153	136,222	123,456	89,875
	Metoda S-Shape	144,979	137,814	129,98	121,377	115,468	111,158	94,755
	Metoda Mid-point	189,037	180,601	170,264	154,842	146,078	134,216	99,896
	Metoda Largest gap	185,412	177,724	167,582	154,088	143,971	137,473	107,483
	Dijkstra	145,259	138,239	129,228	119,945	110,261	99,453	76,092
I ₂	Metoda Buyer	729,597	593,212	447,045	295,647	232,151	156,165	98,645
	Metoda Sorted buyer	175,437	169,184	149,373	124,379	115,297	100,137	80,451
	Metoda S-Shape	135,039	130,207	112,075	89,865	83,654	75,482	82,500
	Metoda Mid-point	188,858	178,382	170,629	154,012	142,945	114,139	96,098
	Metoda Largest gap	175,489	169,805	150,74	125,58	117,486	105,105	95,091
	Dijkstra	135,336	130,732	111,84	91,128	84,356	77,17	71,813

Heurystyka		Liczba artykułów:						
		50	40	30	20	15	10	5
L ₂ - L ₁ [-]	Metoda Buyer	-25,499	-18,072	-15,974	-30,908	-16,588	-20,765	-4,038
	Metoda Sorted buyer	-9,936	-7,674	-15,881	-25,774	-20,926	-23,319	-9,424
	Metoda S-Shape	-9,941	-7,606	-17,905	-31,513	-31,813	-35,675	-12,255
	Metoda Mid-point	-0,179	-2,22	0,365	-0,83	-3,133	-20,077	-3,798
	Metoda Largest gap	-9,923	-7,919	-16,842	-28,509	-26,486	-32,368	-12,392
	Dijkstra	-9,923	-7,507	-17,388	-28,816	-25,905	-22,283	-4,28
Δ [%]	Metoda Buyer	3,38	2,96	3,45	9,46	6,67	11,74	3,93
	Metoda Sorted buyer	5,36	4,34	9,61	17,17	15,36	18,89	10,49
	Metoda S-Shape	6,86	5,52	13,78	25,96	27,55	32,09	12,93
	Metoda Mid-point	0,09	1,23	-0,21	0,54	2,14	14,96	3,80
	Metoda Largest gap	5,35	4,46	10,05	18,50	18,44	23,54	11,53
	Dijkstra	6,83	5,43	13,46	24,03	23,49	22,41	5,62

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

SOURCE: own elaboration.



Buyer method
 Sorted buyer method
 S-Shape method
 Mid-point method
 Return method
 Dijkstra

RYS. 10. Poziom dokonanej optymalizacji dla różnych metod kompletacji zamawiania

FIG. 10. Optimization level for different methods of order completion

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

SOURCE: own elaboration.

Wpływ sortowania listy kompletacyjnej według artykułów do pobrania został liczbowo przedstawiony w tabeli 2. Wielkość ΔL jest różnicą między wynikami dla metod Buyer i Sorted Buyer, natomiast ΔL [%] wyraża, o ile procent wynik został poprawiony dzięki zastosowaniu sortowania.

Najlepsze wyniki w analizowanym magazynie wysokiego składowania osiągnięto przy zastosowaniu heurystyki S-shape oraz algorytmu Dijkstry. Metoda S-shape bardzo dobrze sprawdziła się, gdy trzeba było skompletować dużą ilość asortymentu lub artykuły znajdowały się w sąsiednich alejkach. Wykorzystanie analizy ABC ograniczyło o 32% niezbędną drogę do pokonania dla tej metody.

Algorytm Dijkstry okazał się lepszy w przypadku, gdy artykuły do skompletowania znajdowały się daleko od siebie lub gdy było ich mało do pobrania. W tym wypadku udało się ograniczyć drogę kompletacji o 24%.

Metoda Buyer, która opisuje pobieranie artykułów według kolejności odnotowanego zapotrzebowania na dany produkt i nie uwzględnia w żadnym stopniu optymalnego ich kompletowania, jedynie w przypadku wystąpienia pięciu artykułów na liście kompletacyjnej nie odbiegała efektywnością od pozostałych heurystyk. Znaczna różnica w efektywności zaczyna występować, gdy na liście kompletacyjnej do pobrania jest co najmniej 10 artykułów, również po dokonaniu korekty ABC ułożenia materiałów w magazynie.

TAB. 2. Wpływ sortowania artykułów na długość drogi kompletacyjnej

TAB. 2. Impact of article sorting on distance of order picking path

Przed zastosowaniem analizy ABC							
Heurystyka	Liczba artykułów:						
	5	10	15	20	30	40	50
Metoda Buyer	102,68	176,93	248,74	326,56	463,02	611,28	755,10
Metoda Sorted buyer	89,875	123,46	136,22	150,15	165,25	176,86	185,37
ΔL [-]	12,808	53,474	112,52	176,40	297,77	434,43	569,72
ΔL [%]	12,47	30,22	45,23	54,02	64,31	71,07	75,45
Po zastosowaniu analizy ABC							
Heurystyka	Liczba artykułów:						
	5	10	15	20	30	40	50
Metoda Buyer	98,645	156,17	232,15	295,65	447,05	593,21	729,60
Metoda Sorted buyer	80,451	100,14	115,30	124,38	149,37	169,18	175,44
ΔL [-]	18,19	56,03	116,85	171,27	297,67	424,03	554,16
ΔL [%]	18,44	35,88	50,34	57,93	66,59	71,48	75,95

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

SOURCE: own elaboration.

Dla analizowanego magazynu oraz utworzonych list kompletacyjnych heurystyka Mid-point uzyskała znacząco gorsze wyniki w obu przypadkach ułożenia asortymentu. Wpływ na efektywność tej heurystyki ma przyjęta strategia układania materiału wewnątrz magazynu. Po zastosowaniu analizy ABC wyniki otrzymane dla 30 artykułów świadczą o pogorszeniu efektywności kompletacji zamówień, a dla 50 artykułów – o znikomym wpływie na kompletację. Z tego powodu, metoda Mid-point okazała się niewskazana do stosowania w połączeniu ze składowaniem typu Diagonal Storage.

Przed analizą ABC ułożenia asortymentu w magazynie heurystyka Return pozwoliła na uzyskanie zbliżonych rezultatów co Mid-point method. Po zastosowaniu analizy ABC udało się ograniczyć nakład pracy magazyniera o ponad 20%.

6. Wnioski

Magazynowanie jest niezwykle istotnym procesem dotyczącym łańcucha dostaw. Dążenie do poprawy jego funkcjonowania należy do kluczowych zadań kadry logistycznej zarządzającej łańcuchem dostaw. Osiągnięcie tego możliwe jest m.in. poprzez analizę zapotrzebowania na każdy asortyment w magazynie oraz porównanie możliwych do zastosowania metod wyznaczania trasy kompletacyjnej i sposobu rozmieszczenia materiału wewnątrz magazynu.

Przeprowadzona optymalizacja magazynowania wysokoskładowego wykazała, że kompletacja zamówień dzięki analizie materiałowej ABC może zostać polepszona nawet o 32% poprzez odpowiednie ułożenie asortymentu w magazynie.

Dokonanie rozmieszczenia materiałów według analizy ABC tylko dla jednej metody wyznaczania trasy nie przyniosło poprawy kompletacji. Wyznaczając trasę do skompletowania 30 artykułów, dla heurystyki Mid-point uzyskano o 0,21% gorsze wyniki. Również w przypadku kompletowania 50 artykułów wpływ relokacji materiałów na efektywność tej metody był bardzo mały – udało się skrócić drogę magazyniera tylko o około 0,09%, tj. w granicach błędu obliczeń.

W świetle wyników przeprowadzonych badań wykazano, że nie można jednoznacznie wytypować najlepszej metody wyznaczania drogi kompletacyjnej dla każdego zamówienia w analizowanym magazynie. Wybranie najlepszej drogi kompletacyjnej powinno zacząć się od określenia ilości artykułów do skompletowania, a następnie wybrania metody S-Shape lub algorytmu Dijkstry.

Otrzymane wyniki mają ograniczone zastosowanie dla innego typu składowania w magazynie. Różnice wyników mogą być spowodowane zbyt małą liczbą zamówień kompletacyjnych analizowanych podczas pracy algorytmu, rozmiarem magazynu i ułożeniem regałów w magazynie, sposobem losowania artykułów podczas tworzenia list kompletacyjnych, a także zastosowaną strategią rozmieszczenia materiału. W celu sprawdzenia wyników, przy uwzględnieniu tych samych list kompletacyjnych, można dokonać kolejnych symulacji, zmieniając po jednym czynnikiem i porównać otrzymane wyniki z bazowymi, co pozwoli dodatkowo określić wpływ wyżej wymienionych elementów na efektywność kompletacji zamówień.

Literatura

1. Niemczyk A. *Zapasy i magazynowanie. Tom II Magazynowanie. Podręcznik do kształcenia w zawodzie technik logistyk*. Biblioteka Logistyka. Poznań; 2008.
2. Roodbergen KJ. *Layout and routing methods for warehouses*. ERIM Ph.D. series Research in Management 4, Erasmus University Rotterdam, Rotterdam; 2001.
3. Kudelska I. *Metoda wyboru zmiennych miejsc składowania w magazynie*, rozprawa doktorska. Poznań; 2016

4. Dudziński Z, Kizyn M. *Vademecum gospodarki magazynowej*. Gdańsk: Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr Sp. z o.o.; 2002.
5. Garbacz M, Łopuszański M. *Optymalizacja procesu kompletacji w magazynie (cz. 1)*. Logistyka. 2015; 6: 628-636.

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono sposoby optymalizacji procesu magazynowania wysokiego składowania pod kątem skrócenia czasu kompletacji zamówień. Celem pracy jest optymalizacja procesu przechowywania wysokiego poziomu na wybranym przykładzie z użyciem oryginalnego programu napisanego w języku programowania Python. W tym celu program wykorzystuje algorytm Dijkstry, analizę materiałową ABC i przyjęty model matematyczny.

Praca składa się z dwóch części. Pierwsza koncentruje się na podstawowej teorii magazynowania, optymalizacji i realizacji zamówień. W tej części wyjaśniono również główny aspekt analizy materiałowej, który wykorzystuje regułę Pareto do optymalizacji magazynowania i algorytm Dijkstry do określania ścieżki realizacji zamówienia.

Druga część pracy zawiera kluczowe informacje, które są niezbędne do przeprowadzenia procesu optymalizacji. Na początku przedstawiono obszar magazynowy wybranego przykładu z danymi o korytarzach, strefach składowania, regałach paletowych, ilości artykułów i wykorzystaniu gniazd paletowych. Jako uzupełnienie tej informacji przedstawiono schemat techniczny w celu zilustrowania analizowanego przykładu. Następnie sformułowano założenia optymalizacyjne, określające układ magazynu, jego wymiary i wyposażenie. Ta część pracy obejmuje również wyniki symulacji komputerowej, które przedstawiono w tabelach i wykresach. W oparciu o wyniki symulacji można stwierdzić, że aspekt metody wyznaczania najlepszej drogi kompletacji zamówienia jest bardzo istotny, jeśli kierownictwo próbuje obniżyć koszty w firmie. Zastosowanie najprostszej metody Buyer do wyznaczania drogi kompletacji może skutkować skróceniem drogi nawet o 76% dzięki organizacji kolejności produktów na liście zamówienia. Wynik drogi kompletacji z najbardziej popularnych metod S-Shape można polepszyć o 32% przy użyciu analizy materiałowej ABC i o 24% przy użyciu algorytmu Dijkstry. Symulacje dla analizowanego typu magazynu ze składowaniem produktów typu Diagonal Storage wykazały problemy tylko z metodą Mid-Point, w której uzyskano gorsze wyniki po zmianie ABC alokacji produktów, ale przyczyną takich wyników mogła być niewystarczająco liczna lista produktów do kompletacji zamówienia lub strategia składowania zastosowana w przedmiotowym magazynie.

W pracy krótko scharakteryzowano analizę materiałową ABC, sposoby wyznaczania tras kompletacyjnych oraz układania asortymentu wewnątrz magazynu. Na wybranym przykładzie zaprezentowano model decyzyjny oraz algorytm, którego zadaniem było ograniczenie długości drogi niezbędnej do kompletacji zamówienia. Wyniki badań symulacyjnych zestawiono porównawczo w tabelach i przedstawiono zbiorczo na wykresach. Uzyskane wyniki umożliwiły sformułowanie podsumowujących wniosków.

Słowa kluczowe: magazynowanie wysokoskładowe, kompletacja zamówień, optymalizacja procesu

Summary

Optimization of the high-level storage process

The purpose of the paper is the optimization of the high-level storage process on a selected example with usage of original program written in Python programming language. The program uses Dijkstra's algorithm, material analysis of ABC and adopted mathematical model in order to achieve the target.

The work consists of two parts. First one is focusing on the basic theory of warehousing, optimization and completion of orders. This paragraph also explains the main aspect of material analysis which uses Pareto's rule for the storage optimization and Dijkstra's algorithm for determining the path of order completion.

Second part of the paper contains crucial information what is necessary to conduct the optimization process. At the beginning, warehousing area of selected example was presented with data about aisles, storage zones, pallet rackings, articles amount and pallet nests usage. As a supplement to this information, technical drawing was presented for the purpose of illustrating of the analyzed example. Subsequently the optimization assumptions were formulated such as dimensionless distance quantities, completion properties and restrictions, designation of warehouse layout. This part shows the results of simulation. The simulation results was presented in tables and charts. Based on the calculations, aspect of routing method is very crucial if management tries to reduce cost in a company. The most simple routing Buyer method, can be improved even by 76% just by organizing the order of products on the lists. One of the most common routing S-shape method, can be optimized by 32% with usage of material analysis of ABC and 24% with usage of Dijkstra's algorithm. There were problems only with Mid-point method, which scores says that it gives worse results after products relocation, but that might happen because amount of order picking lists were not enough or used storage strategy.

Keywords: high-level warehousing, completion of orders, optimization of process