Grzegorz Tarczyński
Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

WIELOKRYTERIALNA OCENA PROCESU KOMPLETACJI TOWARÓW W MAGAZYNIE

Wprowadzenie

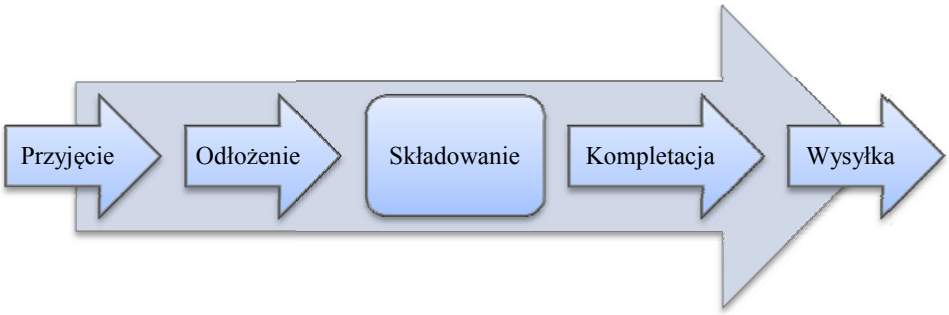
Największą część kosztów operacyjnych, związanych z magazynowaniem, przedsiębiorstwa ponoszą na proces kompletacji zamówień. W wielu opracowaniach naukowych zadanie minimalizacji kosztów kompletacji zamówień realizowane jest poprzez poszukiwanie najszybszego sposobu pobrania potrzebnych towarów. To z kolei, w przypadku kompletacji „ręcznej" typu „człowiek do towaru", tożsame jest z optymalizacją długości trasy niezbędnej do pokonania w celu pobrania znajdujących się na liście kompletacyjnej towarów. Zagadnienie jest dobrze znane i opisane, ale i trudne, bo stanowi nieco zmodyfikowany wariant problemu komiwojażera. Problem kompletacji zamówień można jednak potraktować wielokryterialnie. Szybsza kompletacja z jednej strony zmniejsza ogólne koszty magazynowania, z drugiej może powodować ich wzrost. Krótki czas kompletacji jest jednak wartością sam w sobie, podnosi bowiem jakość obsługi klienta.

Celem pracy jest próba znalezienia takich parametrów magazynu, które zoptymalizują kryteria oceny procesu kompletacji. Zadanie realizowane będzie poprzez stopniową eliminację rozwiązań zdominowanych i przewyższanych. Podjęta zostanie próba wyciągnięcia ogólnych wniosków odnośnie do doboru parametrów magazynu i sposobu wyznaczania trasy magazyniera.

1. Kompletacja zamówień

Uproszczona struktura procesów w węźle logistycznym obejmuje: przyjęcie, odłożenie, składowanie, kompletację i wysyłkę towarów (rys. 1). Najbardziej pracochłonnym procesem jest kompletacja towarów, która stanowi około 60% wszystkich kosztów operacyjnych w magazynie. Zdefiniować ją można jako wyszukiwanie i pobieranie z miejsc odkładczych w magazynie od-

powiednich towarów widniejących na zamówieniu złożonym przez klienta. Bartholdi i Hackman podają, że składa się na nią: przemieszczanie (zajmuje około 55% łącznego czasu kompletacji), wyszukiwanie (15%), pobranie (10%) i wydawanie (20%). Istnieje wiele sposobów realizacji zadania kompletacji, w artykule analiza zostanie ograniczona do takich czynników, jak ustalenie kształtu strefy kompletacyjnej, sposób wyznaczania tras poruszania się magazyniera oraz wpływ liczby wózków widłowych na przebieg procesu kompletacji.



Rys. 1. Uproszczona struktura procesów w węźle logistycznym

Źródło: J.J. Bartholdi, S.T. Hackman: Warehouse and Distribution Science. Georgia Institute of Technology, Atlanta 2012.

Trasa poruszania się magazyniera może być wyznaczana za pomocą jednej z 5 heurystyk[1]. Istnieje również szybki algorytm pozwalający na obliczenie trasy optymalnej[2].

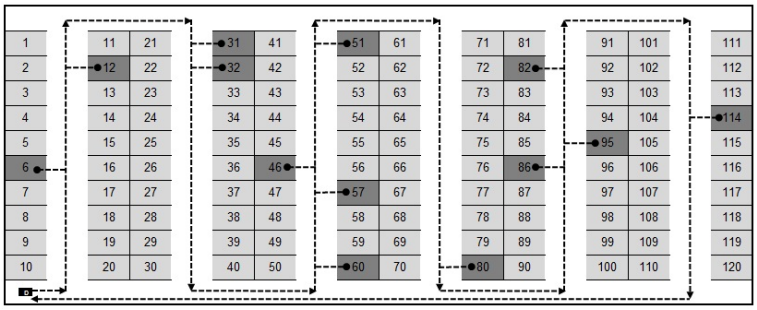
Jedną z najprostszych i bardzo popularną metodą wyznaczania trasy kompletacji zamówień jest metoda S-shape (rys. 2). W tej metodzie osoba wykonująca zadanie kompletacji wchodzi tylko do tych korytarzy, w których są towary znajdujące się na liście kompletacyjnej. Zawsze pobierane są wszystkie potrzebne towary z danego korytarza i dopiero wtedy jest on opuszczany innym końcem niż ten, przez który odbyło się wejście. Osoba kompletująca towary nigdy nie zawraca – możliwe jest to tylko po pobraniu ostatniego towaru z listy. Linia po której porusza się wózek widłowy przypomina kształtem literę S, stąd nazwa metody: S-shape.

Kolejną heurystyką często wykorzystywaną do poruszania się w magazynie podczas kompletacji zamówień jest metoda Midpoint (rys. 3). Tutaj magazyn podzielony jest na dwie części o zbliżonej wielkości i najpierw pobierane są

[1] T. Le-Duc: Design and Control of Efficient Order Picking Processes. Ph.D. Thesis, Erasmus University Rotterdam, Rotterdam 2005.

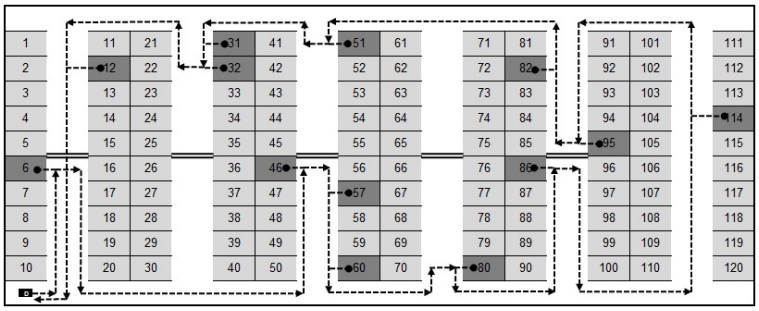
[2] H.D. Ratliff & A.S. Rosenthal: Order-picking in A Rectangular Warehouse: A Solvable Case of the Traveling Salesman Problem. „Operations Research" 1983, Vol. 31 (3), s. 507-521.

towary z tej części w której znajduje się punkt przyjęcia/wydania. Dopiero po pobraniu ostatniego towaru z tej części magazynu możliwe jest przekroczenie granicy i pobranie pozostałych towarów. Cechą charakterystyczną metody Midpoint jest to, że zazwyczaj po pobraniu ostatniego towaru wózek widłowy znajduje się blisko punktu przyjęcia/wydania.



Rys. 2. Przykład wyznaczania trasy metodą S-shape

Źródło: Opracowanie własne na podstawie T. Le-Duc: Design and Control of Efficient Order Picking Processes. Ph.D. Thesis, Erasmus University Rotterdam, Rotterdam 2005.

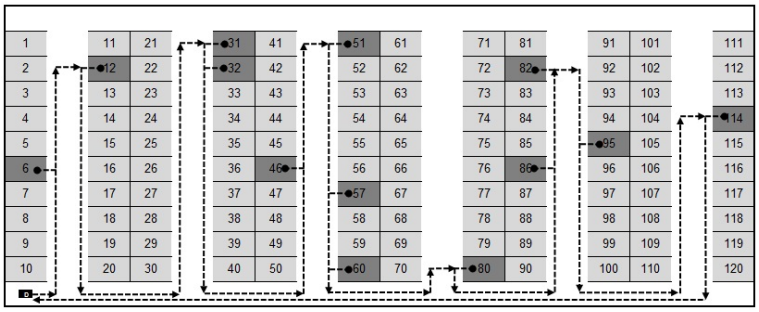


Rys. 3. Przykład wyznaczania trasy metodą Midpoint

Źródło: Ibid.

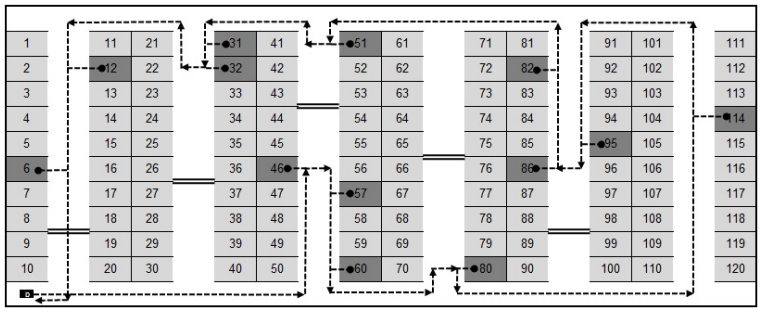
Metoda Return (rys. 4) również nie stwarza problemów z praktycznym zastosowaniem. W użyciu jest tylko jeden główny korytarz – ten, na końcu którego zazwyczaj znajduje się punkt przyjęcia/wydania. Osoba dokonująca kompletacji przemieszcza się tylko do tych korytarzy bocznych, w których znajdują się potrzebne towary, pobiera je i zawsze kieruje się do tego samego wejścia, przez które wchodziła. Drugi główny korytarz pozostaje niewykorzystany.

Pewne trudności z praktycznym zastosowaniem może sprawiać metoda Largest Gap (rys. 5). Metoda ta powstała z przekształcenia metody Midpoint. Tutaj również magazyn dzielony jest na dwie części, ale podział jest umowny: wyznaczany jest on niezależnie dla każdego zamówienia i każdego korytarza. Korytarze dzielone są w miejscu, które stanowi największy odstęp pomiędzy dwoma pobieranymi w tym korytarzu towarami albo pomiędzy końcem korytarza a najbliższym towarem, który należy pobrać. Zastosowanie metody Largest Gap gwarantuje uzyskanie co najmniej tak dobrych tras i czasów kompletacji, jak w przypadku metody Midpoint. Wyznaczenie miejsca podziału korytarzy może jednak w praktyce sprawiać pewne trudności.



Rys. 4. Przykład wyznaczania trasy metodą Return

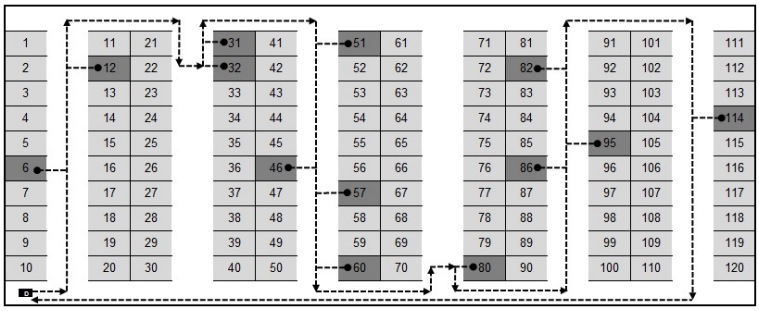
Źródło: Ibid.



Rys. 5. Przykład wyznaczania trasy metodą Largest Gap

Źródło: Ibid.

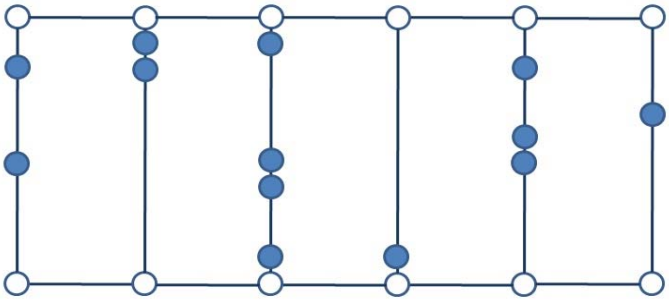
Metoda Combined (rys. 6) stanowi połączenie heurystyk S-shape i Return. Wózek widłowy wjeżdża tylko do tych korytarzy, w których znajdują się potrzebne towary, pobiera je i opuszcza korytarz najbliższym wyjściem. Droga, po której porusza się osoba kompletująca towary w niektórych korytarzach przypomina drogę dla metody S-shape, a w innych Return.



Rys. 6. Przykład wyznaczania trasy metodą Combined

Źródło: Ibid.

Problem poszukiwania najkrótszej trasy w magazynie przypomina nieco problem komiwojażera. Drobna różnica polega na tym, że wózek widłowy może w magazynie przejechać przez pewne miejsca więcej niż jeden raz. Dla sytuacji, gdy magazyn składa się z jednego bloku (ma dwa główne korytarze) bardzo szybki algorytm na wyznaczanie trasy optymalnej podali Ratliff i Rosenthal. Zauważyli oni, że problem można zaprezentować za pomocą grafu niezorientowanego (rys. 7), którego łuki oznaczają drogę, po której może poruszać się wózek widłowy. Węzły „pełne" to miejsca, z których pobierane są towary i należy przejechać przez nie co najmniej raz. Węzły „puste" znajdują się na końcach korytarzy i można, ale nie trzeba przez nie przejeżdżać. Ratliff i Rosenthal wykazali, że przecięcie grafu pionową linią w dowolnym miejscu spowoduje podział grafu na dwa podgrafy, dla których istnieje 7 klas ekwiwalentności. Aby znaleźć najkrótszą trasę, wystarczy najpierw wyznaczyć najkrótsze trasy dla każdej klasy ekwiwalentności dla podgrafu złożonego tylko z pierwszego korytarza bocznego. Następnie dodaje się pojedynczo kolejne korytarze i bazując na optymalnych podgrafach poprzedniego poziomu dla każdej klasy ekwiwalentności wyznacza się znowu najlepsze rozwiązania. Proces kontynuuje się do korytarza, w którym znajdują się ostatnie „pełne" węzły (czyli towary do pobrania). Wówczas ze zbioru 7 grafów wybiera się graf spójny o najkrótszej trasie.

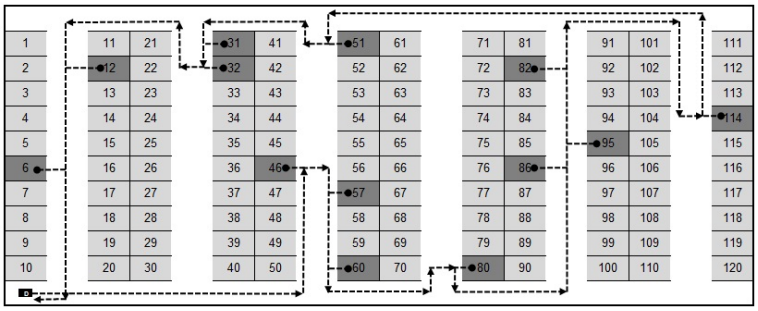


Rys. 7. Przykład grafu służącego do wyznaczenia optymalnej trasy

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: H.D. Ratliff & A.S. Rosenthal: Order-picking in A Rectangular Warehouse: A Solvable Case of the Traveling Salesman Problem. „Operations Research" 1983, Vol. 31 (3), s. 507-521.

Algorytm rozszerzony został na przypadek trzech głównych korytarzy przez Roodbergena i De Kostera, 2001. Przy większej liczbie głównych korytarzy wyznaczenie najkrótszej trasy może sprawiać pewne problemy.

Przykład trasy optymalnej znajduje się na rys. 8.



Rys. 8. Przykład wyznaczania trasy optymalnej

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Ratliff i Rosenthal, 1983.

2. Problem kompletacji zamówień jako zadanie wielokryterialne

Kluczowym elementem wpływającym na efektywność pracy magazynu jest czas kompletacji zamówień. Wpływa on zarówno na koszty funkcjonowania magazynu, jak i jakość obsługi klientów. Dotychczasowe badania[3] koncentrują się na takim rozmieszczeniu towarów w magazynie i wyznaczeniu trasy, który umożliwi wykonanie zadania kompletacji w jak najkrótszym średnim czasie. Pojawiają się dopiero pierwsze prace analizujące wpływ liczby wózków widłowych na czas realizacji zamówień czy problemy wynikające z wzajemnego blokowania się wózków widłowych[4].

Jak zauważyli De Koster i inni[5] czas kompletacji zamówienia jest rosnącą funkcją dystansu pokonanego przez wózek widłowy. Wydaje się więc oczywiste, że najszybciej kompletowane są zamówienia, jeśli operator wózka widłowego porusza się po najkrótszej trasie (wyznaczonej za pomocą algorytmu Ratliffa i Rosenthala). Zastosowanie w praktyce systemu wyznaczania tras optymalnych wiąże się jednak z pewnymi trudnościami. Po pierwsze, wymaga zainstalowania specjalnego komputerowego systemu wyznaczającego trasy i naprowadzającego na towary. Po drugie, De Koster i inni zwracają uwagę na częste pomyłki ludzi realizujących zadanie kompletacji. Okazuje się, że o ile hurystyki powodują, że operatorzy wózków widłowych uczą się pewnych schematów poruszania się po magazynie i po pewnym czasie postępują niemal mechanicznie, to przy metodzie optymalnej często zapominają o pobraniu towarów i muszą po nie wracać. Trasa nie tylko nie jest więc optymalna, ale czas kompletacji bywa gorszy od tego, który możliwy byłby do uzyskania przy nieomylnym zastosowaniu jednej z heurystyk.

Ogromny wpływ na czas kompletacji może też mieć kształt strefy kompletacyjnej. Jaki układ jest bardziej korzystny: niewiele regałów z dużą liczbą pól odkładczych czy może mniejsza ich liczba, ale krótszych? Jest to kolejne zagadnienie, które powinno być wzięte pod uwagę przy próbie znalezienia najlepszego sposobu kompletacji.

---

[3] Ch.G. Petersen & R.W. Schmenner: An Evaluation of Routing and Volume-based Storage Policies in an Order Picking Operation. „Decision Sciences" 1999, Vol. 30 (2), s. 481-501.

[4] Ch. Huber: Throughput Analysis of Manual Order Picking Systems with Congestion Consideration. Ph.D. Thesis. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe 2011; S. Hong, A.L. Johnson & B.A. Peters: Batch Picking in Narrow-Aisle Order Picking Systems with Consideration for Picker Blocking. „European Journal of Operational Research" 2012, Vol. 221, s. 557-570.

[5] R. De Koster, T. Le Duc & K.J. Roodbergen: Design and Control of Warehouse Order Picking: A Literature Review. „European Journal of Operational Research" 2007, Vol. 182(2), s. 481-501.

Przedstawione problemy stanowią przesłankę do potraktowania kompletacji towarów jako problemu wielokryterialnego. W dalszych rozważaniach przyjęto następujące założenia:

- liczba pól odkładczych w magazynie wynosi 480,
- rozpatrywany jest magazyn prostokątny, jednoblokowy (z dwoma głównymi korytarzami),
- w magazynie jest tylko jeden poziom składowania towarów (De Koster i inni szacują, że w Europie zachodniej aż 80% magazynów to magazyny jednopoziomowe),
- „ręczna" kompletacja typu „człowiek do towaru" (w odróżnieniu od automatycznych systemów typu AS/R).

Badaniami objęto 360 wariantów decyzyjnych (dla każdego przeprowadzono niezależne symulacje). Każdy wariant decyzyjny to inna kombinacja konfiguracji magazynu, wykorzystywanej liczby wózków widłowych oraz metody kompletacji. Parametry te przyjmowały jedną z wartości:

- konfiguracja magazynu: 48 × 10, 40 × 12, 32 × 15, 30 × 16, 24 × 20, 20 × 24, 16 × 30, 12 × 40, 10 × 48, 8 × 60 (pierwsza liczba oznacza liczbę regałów, a druga liczbę pól odkładczych w regale),
- liczba wózków widłowych: 2, 3, 4, 5, 6, 7,
- metody wyznaczania trasy kompletacji: S-shape, Midpoint, Return, Largest Gap, Combined, optymalna.

W pracy przyjęto następujące kryteria oceny:

- średni czas realizacji jednego zamówienia,
- średni dzienny czas otwarcia magazynu,
- maksymalny dzienny czas otwarcia magazynu,
- średni dzienny czas pracy wózków widłowych,
- średnie dzienne koszty pracy magazynu (1 godz. pracy magazynu: 10 zł, 1 godz. pracy wózka widłowego: 50 zł, koszt wprowadzenia systemu wyznaczania trasy optymalnej: 100 zł/dzień),
- średni dzienny czas oczekiwania na zamówienie (bezczynności) 1 wózka widłowego,
- średni dzienny czas blokowania (mierzony z dokładnością 5min).

Czasy poruszania się wózków widłowych (tabela 1) zaczerpnięto z pracy Fijałkowskiego[6] i własnych obserwacji[7]. Schemat rozmieszczenia regałów i punktu przyjęcia/wydania (doku) przedstawiony jest na rys. 9. Szerokość regału to 2,65 m. W analizowanym przykładzie średnia liczba towarów pobieranych podczas jednego cyklu wynosi 11.

[6] J. Fijałkowski: Transport wewnętrzny w systemach logistycznych. Politechnika Warszawska, Warszawa 2003.

[7] M. Jakubiak & G. Tarczyński: Selection of Manual Order Picking Concept in A Warehouse by Means of Simulation Tools. „Mathematical Economics" 2012, Vol. 8 (15), s. 47-64.

Tabela 1

Czasy poruszania się wózków widłowych

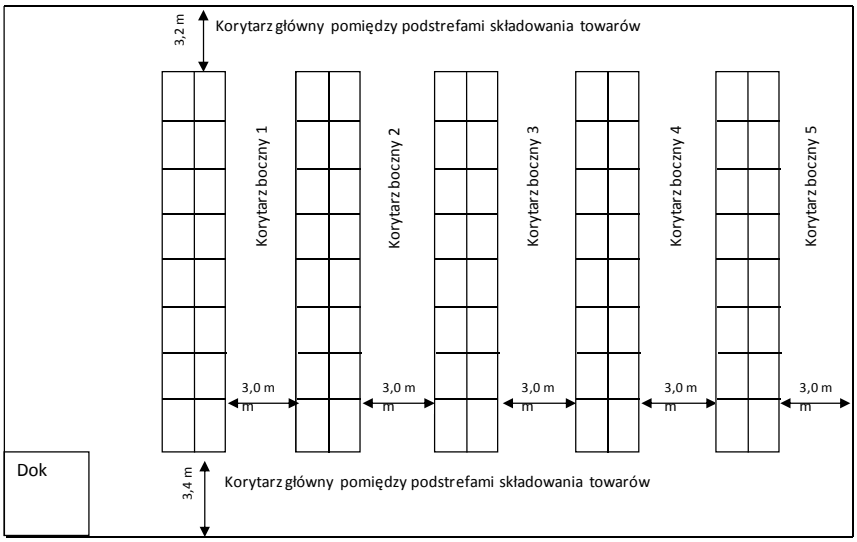
Czynność	Symbol	Jednostka	Czas (min)
Przyśpieszenie po zatrzymaniu (pusty wózek)	AE	cały okres	0,0300
Przyśpieszenie po zatrzymaniu (pełny wózek)	AL	cały okres	0,0300
Prędkość (3 km/h) – pełny wózek	FL	na jeden metr	0,0200
Prędkość (3 km/h) – pusty wózek	FE	na jeden metr	0,0200
Zatrzymanie (pusty wózek)	SE	cały okres	0,0200
Zatrzymanie (wózek pełen)	SL	cały okres	0,0360
Skręt w lewo (przy ruchu do przodu)	TFL	cała operacja	0,0550
Skręt w prawo (przy ruchu do przodu)	TFR	cała operacja	0,0550
Nałożenie palety na widły	NP	cała operacja	0,1333
Zeskanowanie oraz odłożenie towaru na paletę	CP	cała operacja	0,1733
Odłożenie pełnej palety na pole odkładcze	OP	cała operacja	0,2000
Ofoliowanie gotowej palety i naklejenie i wydrukowanie etykiety	OFP	cała operacja	0,3533
Zatrzymanie pełnego wózka		cała operacja	0,0360
Cofanie (0,8 m)		na 0,8 m	0,0750

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Fijałkowski, 2003.

Hong i inni[8] podają dwie sytuacje, w których może dochodzić do wzajemnego blokowania się wózków widłowych w magazynach, w których korytarze są wąskie. W analizowanym przykładzie rozpatrywana będzie tylko jedna sytuacja prowadząca do blokowania. Korytarze są szerokie, do interakcji pomiędzy wózkami widłowymi dochodzi tylko wtedy, gdy jeden wózek pobiera towar, a drugi chce obok przejechać. Jest to zabronione m.in. ze względów bezpieczeństwa i operator drugiego wózka musi poczekać, aż pierwszy zakończy załadunek. Korytarze są na tyle szerokie, że gdy wózki poruszają się, bez problemów mogą się wymijać.

Dla każdego wariantu decyzyjnego przeprowadzono symulację, której wyniki posłużyły do wyznaczenia wartości kryteriów oceny. Każda symulacja obejmowała 100 replikacji (jedna replikacja to jeden dzień roboczy). Średnie czasy napływania zamówień (tabela 2) przyjęto takie, jak w pracy Jakubiaka i Tarczyńskiego[9].

[8] S. Hong, A.L. Johnson & B.A. Peters: Op. cit.
[9] M. Jakubiak & G. Tarczyński: Op. cit.



Rys. 9. Schemat rozmieszczenia regałów i punktu przyjęcia/wydania

Źródło: M. Jakubiak & G. Tarczyński: Selection of Manual Order Picking Concept in A Warehouse by Means of Simulation Tools. „Mathematical Economics" 2012, Vol. 8 (15), s. 47-64.

Aby w możliwie pełny sposób odwzorować sytuację rzeczywistą, przyjęto – podobnie jak to się robi w systemach kolejkowych[10] – że czas pomiędzy dwoma kolejnymi zamówieniami generowany jest z rozkładu wykładniczego (zgodnie z wartościami średnimi przedstawionymi w tabeli 2). Dla wszystkich symulacji wykorzystano ten sam punkt startowy generatora liczb pseudolosowych, więc w każdej symulacji zamówienia pojawiały się w tym samym momencie.

Tabela 2

Średni czas napływania zamówień w magazynie

Przedział czasu	Średni czas napływania zamówień
1	2
8:00-9:00	03:31
9:00-10:00	04:15
10:00-11:00	04:01

[10] P.P. Bocharov, C. D'Apice, A.V. Pechinkin & S. Salerno: Queueing Theory. VSP, Utrecht--Boston 2004.

cd. tabeli 2

1	2
11:00-12:00	06:59
12:00-14:00	10:12
14:00-15:00	05:01
15:00-16:00	04:05
Cały dzień (8:00-16:00)	**05:09**

Źródło: M. Jakubiak & G. Tarczyński: Selection of Manual Order Picking Concept in A Warehouse by Means of Simulation Tools. „Mathematical Economics" 2012, Vol. 8 (15), s. 47-64.

De Koster i Van Der Poort[11] przyjmując założenie o normalnym rozkładzie czasu realizacji zamówień pokazali, że minimalna liczba symulowanych zamówień powinna wynosić około 10 000. W przeprowadzonych badaniach w ciągu 100 dni roboczych zrealizowanych zostało 9497 zamówień i pobrano 104.467 towarów.

Wszystkie obliczenia wykonano w autorskim programie Warehouse Real--time Simulator[12], działającym w środowisku MS Excel. Obliczenia przeprowadzone za pomocą symulatora, a w szczególności symulatora czasu rzeczywistego, są czasochłonne, ale jak zauważają De Koster i Van Der Poort, wyniki uzyskane w ten sposób są dokładniejsze w porównaniu z uzyskanymi poprzez zastosowanie gotowych wzorów na średni czas kompletacji zamówień przy różnych parametrach magazynu, listy kompletacyjnej i metody wyznaczania trasy magazyniera.

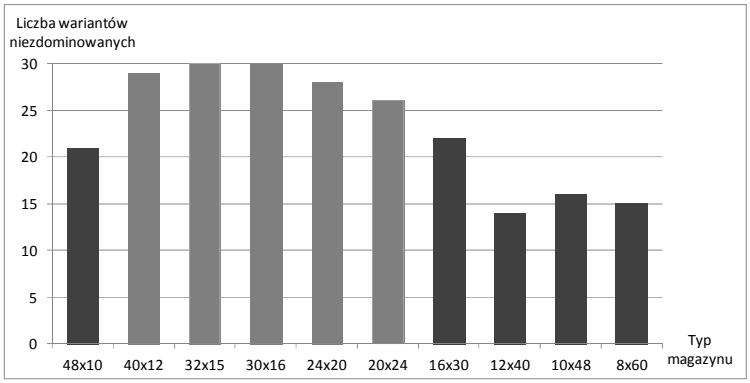
3. Wyniki symulacji

Na pierwszym etapie analizy wielokryterialnej ze zbioru wariantów decyzyjnych usunięto warianty zdominowane. 129 wariantów decyzyjnych miało wszystkie wartości kryteriów nie lepsze, a dla co najmniej jednego kryterium gorsze od innego wariantu, co stanowi 36% całkowitej liczby wariantów decyzyjnych. Najwięcej zdominowanych wariantów decyzyjnych znajdowało się w grupie magazynów z mocno niesymetryczną strefą kompletacji: 12×40, 8×60, 10×48, 48×10, 16×30 (rys. 10). Najwięcej rozwiązań odrzucono dla 7 i 6 wózków widłowych (rys. 11) oraz dla metody Return (rys. 12).

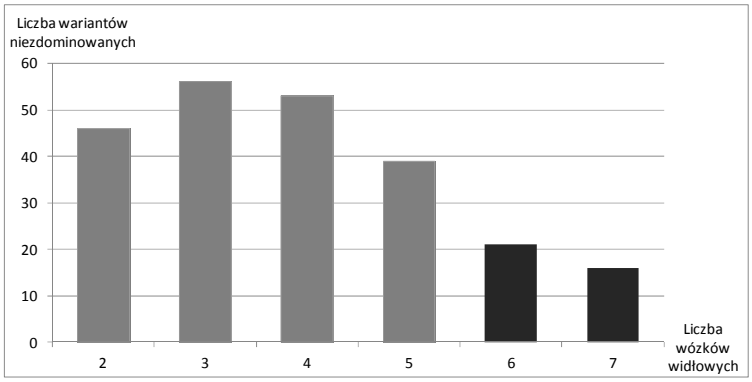
[11] R. De Koster & E.S. Van Der Poort: Routing Order Pickers in a Warehouse: A Comparison Between Optimal and Heuristic Solutions. „IIE Transactions" 1998, Vol. 30, s. 469-480.

[12] G. Tarczyński: Warehouse Real-Time Simulator – How to Optimize Order Picking Time. Working Paper, 2013. http://ssrn.com/abstract=2354827

Na rys. 13 przedstawiono dwa główne kryteria oceny wariantów decyzyjnych: średnie dzienne koszty pracy magazynu i średni czas realizacji jednego zamówienia (dla różnej liczby wózków widłowych). Z wykresu można odczytać, że znaczący spadek czasu kompletacji zamówień następuje przy zwiększaniu liczby wózków widłowych z 2 do 3 i z 3 do 4. Dodawanie kolejnych wózków widłowych nie powoduje już tak znaczącej poprawy wyników, zwiększa natomiast koszty pracy magazynu. Spadek kosztów pracy magazynu następuje przy zmniejszaniu liczby wózków widłowych: z 7 aż do 3. Dalsza redukcja liczby wózków widłowych nie poprawia już kosztów pracy magazynu.

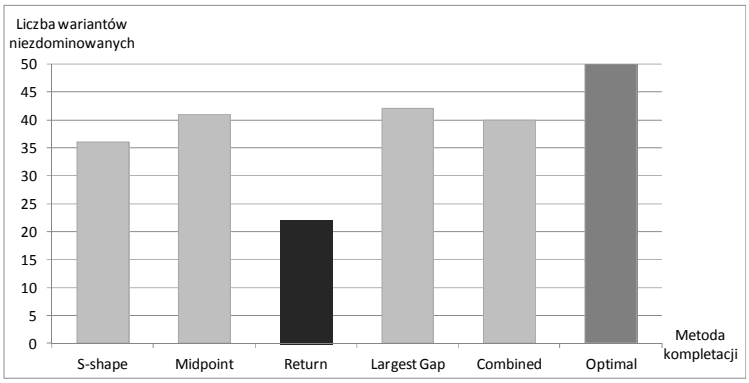


Rys. 10. Niezdominowane warianty decyzyjne dla różnych kształtów strefy kompletacyjnej

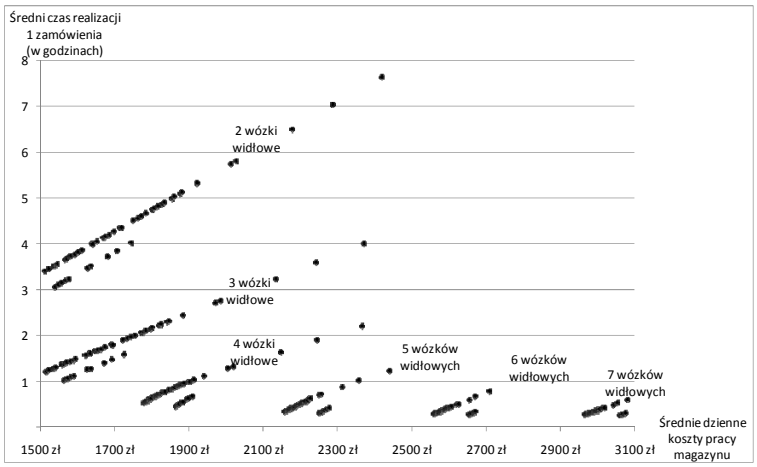


Rys. 11. Niezdominowane warianty decyzyjne dla różnej liczby wózków widłowych

W celu dalszej redukcji liczby wariantów decyzyjnych wykorzystano najprostszą z metod wielokryterialnych: Electre I. Zastosowane wagi i progi weta przedstawione są w tabeli 3. Przyjęto próg zgodności na poziomie: 0,85. Tak wysoka wartość progu zgodności powoduje, że wariant przewyższany nie może mieć gorszej wartości średniego czasu realizacji jednego zamówienia od wariantu przewyższającego. Większa (czyli gorsza) wartość jednego z dwóch kolejnych kryteriów pod względem ważności: średniego dziennego czasu otwarcia magazynu i średniego dziennego kosztu pracy magazynu powoduje, że aby wariant decyzyjny pozostał w zbiorze przewyższanych, wartości wszystkich pozostałych kryteriów muszą być nie gorsze niż dla dowolnego innego wariantu.



Rys. 12. Niezdominowane warianty decyzyjne dla różnych metod wyznaczania trasy



Rys. 13. Zależność średnich dziennych kosztów pracy magazynu od średniego czasu realizacji 1 zamówienia (dla różnej liczby wózków widłowych)

W wyniku zastosowania metody Electre I w zbiorze wariantów decyzyjnych nieprzewyższanych pozostało tylko 18 elementów (tabela 4). Całkowicie wyeliminowane zostały warianty decyzyjne zawierające magazyny typu: 8 × 60, 10 × 48, 32 × 15, 40 × 12 i 48 × 10. Nie pozostał również ani jeden wariant wykorzystujący jedną z metod: S-shape, Return, Combined. Nie zostały natomiast całkowicie wyeliminowane warianty z określoną liczbą wózków widłowych. Najmniej wariantów nieprzewyższanych (1) wykorzystuje 7 wózków widłowych, najwięcej (7) – sześć wózków.

Tabela 3

Wartości wag oraz progów weta dla przyjętych kryteriów oceny wariantów decyzyjnych (metoda Electre I)

Nazwa kryterium	Wagi	Progi weta
Średni czas realizacji jednego zamówienia	0,35	05:00
Średni dzienny czas otwarcia magazynu	0,15	01:00:00
Maksymalny dzienny czas otwarcia magazynu	0,1	02:00:00
Średni dzienny czas pracy wózków widłowych	0,1	03:00:00
Średnie dzienne koszty pracy magazynu	0,15	50 zł
Średni dzienny czas oczekiwania na zamówienie	0,1	01:00:00
Średni dzienny czas blokowania	0,05	05:00

Koncentrując się na dwóch najistotniejszych kryteriach: średnim czasie kompletacji jednego zamówienia i średnich dziennych kosztach pracy magazynu można spośród rozwiązań nieprzewyższanych wybrać mniejszą liczbę rozwiązań. Jeśli dla średniego czasu kompletacji zamówień przyjmiemy górną granicę na poziomie jednej godziny, a dla średniego dziennego kosztu pracy magazynu będzie to 2000 zł, to pozostaną 3 rozwiązania:

– magazyn 13 × 20, 4 wózki widłowe, metoda Largest Gap,
– magazyn 16 × 16, 4 wózki widłowe, metoda Largest Gap,
– magazyn 13 × 20, 4 wózki widłowe, metoda optymalna.

Tabela 4

Warianty decyzyjne nieprzewyższane wraz z wartościami kryteriów oceny

Opis wariantu decyzyjnego	Kryterium 1*	Kryterium 2*	Kryterium 3*	Kryterium 4*	Kryterium 5*	Kryterium 6*	Kryterium 7*
1	2	3	4	5	6	7	8
13 × 20 *2 wózki* *Largest Gap*	*3:25:33*	*13:44:38*	*27:29:16*	*17:27:08*	*1 511,83 zł*	*0:10:01*	1:30

cd. tabeli 4

1	2	3	4	5	6	7	8
16 × 16 *2 wózki* *Largest Gap*	*3:25:30*	*13:44:40*	*27:29:21*	*17:26:05*	*1 511,90 zł*	*0:10:00*	1:21
16 × 16 *3 wózki* *Largest Gap*	*1:14:00*	*9:27:28*	*28:22:24*	*11:46:57*	*1 513,24 zł*	*0:54:23*	2:16
13 × 20 *2 wózki* *Optimal*	*3:04:47*	*13:04:23*	*26:08:46*	*16:37:17*	*1 538,04 zł*	*0:10:07*	1:20
13 × 20 3 wózki Optimal	1:02:37	9:08:13	27:24:38	11:16:43	1 561,90 zł	1:16:46	2:24
16 × 16 *4 wózki* *Largest Gap*	*0:32:52*	*8:27:32*	*33:50:08*	*9:07:54*	*1 776,36 zł*	*6:13:08*	2:53
13 × 20 *4 wózki* *Largest Gap*	*0:32:53*	*8:27:36*	*33:50:22*	*9:03:54*	*1 776,57 zł*	*6:12:07*	3:39
13 × 20 4 wózki Optimal	0:28:42	8:24:05	33:36:18	8:58:06	1 864,26 zł	7:18:47	3:13
16 × 16 *5 wózki* *Largest Gap*	*0:21:56*	*8:17:55*	*41:29:33*	*8:36:21*	*2 157,60 zł*	*13:41:08*	3:20
13 × 20 5 wózki Optimal	0:19:57	8:16:19	41:21:33	8:32:37	2 250,68 zł	14:52:59	3:30
16 × 16 *6 wózki* *Largest Gap*	*0:18:41*	*8:15:03*	*49:30:19*	*8:30:06*	*2 557,77 zł*	*21:29:16*	3:54
13 × 20 *6 wózki* *Largest Gap*	*0:18:42*	*8:15:16*	*49:31:38*	*8:29:42*	*2 558,91 zł*	*21:28:23*	4:37
13 × 20 *6 wózki* *Midpoint*	*0:19:15*	*8:15:48*	*49:34:47*	*8:29:41*	*2 561,62 zł*	*20:57:45*	4:50
13 × 20 6 wózki Optimal	0:17:28	8:14:11	49:25:06	8:27:18	2 653,28 zł	22:44:38	3:48
11 × 24 *6 wózki* *Optimal*	*0:17:36*	*8:14:16*	*49:25:35*	*8:26:52*	*2 653,69 zł*	*22:36:21*	4:18
9 × 30 *6 wózki* *Optimal*	*0:18:05*	*8:14:55*	*49:29:33*	*8:26:50*	*2 657,11 zł*	*22:06:26*	4:41

cd. tabeli 4

1	2	3	4	5	6	7	8
7 × 40 *6 wózki* *Optimal*	*0:19:08*	*8:15:44*	*49:34:25*	*8:27:21*	*2 661,31 zł*	*21:05:07*	5:22
13 × 20 7 wózki Optimal	0:16:45	8:13:30	57:34:28	8:22:46	3 060,97 zł	30:42:07	3:57

* Kryteria: 1. Średni czas realizacji jednego zamówienia. 2. Średni czas otwarcia magazynu. 3. Średni dzienny czas pracy wózków widłowych. 4. Maksymalny czas otwarcia magazynu. 5. Średnie dzienne koszty pracy magazynu. 6. Średni dzienny czas oczekiwania na zamówienie (bezczynności) wózków widłowych. 7. Średni dzienny czas blokowania wózków widłowych.

Zastosowanie metody satysfakcjonujących poziomów kryteriów dopiero po eliminacji rozwiązań przewyższanych budzi jednak kontrowersje i w praktyce nie powinno być stosowane. W analizowanym przykładzie trzecia część analizy przeprowadzona została w celu zwrócenia szczególnej uwagi na dużą zmienność wartości najważniejszych kryteriów.

W każdym z wariantów w użyciu pozostają 4 wózki widłowe. Wykorzystywane są dwie konfiguracje magazynu i dwie metody kompletacji towarów. Wydaje się, że dla omawianego problemu wybór wariantu decyzyjnego powinien zostać ograniczony tylko do tych trzech rozwiązań. Należy jednak pamiętać, iż są sytuacje, w których jakość obsługi klienta jest najważniejsza. Skrócenie czasu kompletacji będzie wówczas celem nadrzędnym, a pozostałe kryteria zostaną pominięte lub zmarginalizowane.

Podsumowanie

Optymalizacja zadania kompletacji zamówień jest problemem wielokryterialnym, choć często analiza procesów magazynowania prowadzona jest w sposób uproszczony i ogranicza się tylko do jednego zagadnienia: wyznaczenia najkrótszej trasy wózka widłowego. Bardziej pełne ujęcie problemu, uwzględnienie częstości z jaką napływają zamówienia i liczby wózków widłowych, kształtu strefy kompletacyjnej i pewnych problemów związanych z praktycznym zastosowaniem tras optymalnych pozwala na sformułowanie wniosku, że skracanie czasu kompletacji zamówień może spowodować wzrost kosztów pracy magazynu.

W analizowanym przykładzie tylko 129 na 360 wariantów decyzyjnych (36%) było zdominowanych. Na dalszym etapie, wykorzystując metodę Electre I, usunięto rozwiązania przewyższane. Na końcu zaproponowano wybór jednego z trzech wariantów spośród 18 wariantów nieprzewyższanych.

Problem wzajemnego blokowania się wózków widłowych w omawianym przykładzie jest marginalny. Korytarze w magazynie miały wystarczającą szerokość, aby kompletacja odbywała się bezkolizyjnie. Efekt blokowania mógł występować tylko podczas pobierania towaru i powodowany był względami bezpieczeństwa.

Wartości kryteriów oceny (oprócz blokowania) dla analizowanych wariantów decyzyjnych były bardzo zróżnicowane i podejmując strategiczne decyzje o sposobie magazynowania należy je uwzględnić.

Warianty decyzyjne z magazynami o dużej liczbie krótkich regałów i o małej liczbie długich regałów wchodzą w skład zbioru rozwiązań przewyższanych. Wyznaczając strefy kompletacyjne w magazynie należy unikać takich rozwiązań.

Skrócenie czasu kompletacji zamówień, a przez to zmniejszenie kosztów funkcjonowania magazynu może się odbyć jeszcze w inny sposób: poprzez optymalizację rozmieszczenia towarów w magazynie. Choć zagadnienie to analizowane jest już od 50 lat (kluczowe znaczenie dla rozwoju tej dziedziny nauki ma praca Hesketta[13], to jest to temat wciąż aktualny i zgłębiany przez naukowców z ośrodków badawczych na całym świecie. Zagadnienie optymalizacji rozmieszczenia towarów w magazynie nie było jednak tematem tego artykułu. Problem jest na tyle szeroki, że wymaga odrębnego opracowania.

Literatura

Bartholdi J.J., Hackman S.T.: Warehouse and Distribution Science, Georgia Institute of Technology, Atlanta 2012.

Bocharov P.P., D'Apice C., Pechinkin A.V. & Salerno S.: Queueing Theory. VSP, Utrecht-Boston 2004.

De Koster R., Le Duc T. & Roodbergen K.J.: Design and Control of Warehouse Order Picking: A Literature Review. „European Journal of Operational Research" 2007, Vol. 182(2).

[13] J.L. Heskett: Cube-per-order Index – A Key to Warehouse Stock Location. „Transport and Distribution Management" 1963, Vol. 3, s. 27-31.

De Koster R. & Van Der Poort E.S.: Routing Order Pickers in a Warehouse: A Comparison Between Optimal and Heuristic Solutions. „IIE Transactions" 1998, Vol. 30.
Fijałkowski J.: Transport wewnętrzny w systemach logistycznych. Politechnika Warszawska, Warszawa 2003.
Heskett J.L.: Cube-per-order Index – A Key to Warehouse Stock Location. „Transport and Distribution Management" 1963, Vol. 3.
Hong S., Johnson A.L. & Peters B.A.: Batch Picking in Narrow-Aisle Order Picking Systems with Consideration for Picker Blocking. „European Journal of Operational Research" 2012, Vol. 221.
Huber Ch.: Throughput Analysis of Manual Order Picking Systems with Congestion Consideration. Ph.D. Thesis. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe 2011.
Jakubiak M. & Tarczyński G.: Selection of Manual Order Picking Concept in A Warehouse by Means of Simulation Tools. „Mathematical Economics" 2012, Vol. 8 (15).
Le-Duc T.: Design and Control of Efficient Order Picking Processes. Ph.D. Thesis, Erasmus University Rotterdam, Rotterdam 2005.
Petersen Ch.G. & Schmenner R.W.: An Evaluation of Routing and Volume-based Storage Policies in an Order Picking Operation. „Decision Sciences" 1999, Vol. 30 (2).
Ratliff H.D. & Rosenthal A.S.: Order-picking in A Rectangular Warehouse: A Solvable Case of the Traveling Salesman Problem. „Operations Research" 1983, Vol. 31 (3).
Tarczyński G.: Warehouse Real-Time Simulator – How to Optimize Order Picking Time. Working Paper, 2013. http://ssrn.com/abstract=2354827

MULTI-CRITERIA EVALUATION OF THE ORDER-PICKING PROCESS IN THE WAREHOUSE

Summary

This paper presents the order-picking problem as a multicriteria task. Using simulation tool 360 variants of solution were generated. The different combinations of the picking zone's shape, the number of forklift trucks and the picker-routing methods were considered. The variants were evaluated by seven criteria and the dominated solutions were removed. Then, using the Electre I method, the number of solutions was even more limited. The paper discusses and presents conclusions how to optimize the order-picking process.