

Grzegorz Tarczyński

Katedra Badań Operacyjnych

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

Algorytm składowania dedykowanego optymalizujący czas kompletacji wyrobów

Streszczenie

Istotnym elementem funkcjonowania magazynów, podlegającym optymalizacji, jest czas kompletacji wyrobów. Może być on minimalizowany poprzez wyznaczenie jak najkrótszej trasy magazyniera, ale również dzięki właściwemu rozmieszczeniu towarów.

W artykule rozważania ograniczono do najpopularniejszych magazynów: prostokątnych, jednoblokowych z kompletacją typu „człowiek do towaru”. Omówione zostały procesy magazynowe i ich wpływ na czas kompletacji wyrobów. Przedstawiona została podstawowa klasyfikacja metod składowania towarów i sposoby wyznaczania trasy magazynierów. Na tym tle zaprezentowano oryginalne metody składowania dedykowanego. Jakość proponowanych metod zweryfikowana została za pomocą symulacji. Otrzymane czasy kompletacji towarów porównano z czasami uzyskanymi dla jednej z metod losowych. Do obliczeń wykorzystano autorski program Warehouse Real-Time Simulator.

Słowa kluczowe: kompletacja wyrobów, magazynowanie, składowanie wyrobów, optymalizacja, symulacje.

1. Wprowadzenie

Kompletacja wyrobów stanowi najbardziej pracochłonny etap procesu magazynowania. Stanowi ona ok. 55% kosztów operacyjnych związanych z funkcjonowaniem magazynu [Bartholdi i Hackman 2011]. Redukcję tych kosztów można więc przeprowadzić poprzez optymalizację procesu kompletacji towarów. W maga-

zynach, w których proces ten przebiega zgodnie z regułą „człowiek do towaru”, zadanie to realizuje się zarówno dzięki wyznaczeniu jak najkrótszej trasy, którą musi przebyć magazynier, pobierając towary, jak i optymalizacji alokacji towarów w magazynie. Drugie zadanie jest bardzo trudne, ale jednocześnie ciekawe dla badaczy, ponieważ dotyczy podejmowania decyzji w warunkach ryzyka i niepewności.

Celem artykułu jest prezentacja oryginalnych algorytmów składowania dedykowanego towarów i zweryfikowanie ich efektywności w połączeniu z popularnymi heurystykami i algorytmem optymalnym służącymi do wyznaczania trasy w magazynie. Zbadane zostanie również, jak wpłynie nagromadzenie towarów szybko rotujących w pewnych obszarach magazynu na powstawanie ewentualnych zatorów spowodowanych jednoczesnym przebywaniem magazynierów w tym samym miejscu.

2. Metody wyznaczania trasy magazyniera

Strefa kompletacji w magazynach może mieć różny kształt. Dla magazynów prostokątnych, tzw. jednoblokowych, czyli takich, gdzie alejki, w których umieszczone są regały z wyrobami, przecięte są tylko dwoma głównymi korytarzami, problem wyznaczania najkrótszej trasy magazyniera został rozwiązany. Często jednak na potrzeby magazynu adaptuje się istniejące już budynki – w tej sytuacji zadanie optymalizacji trasy magazyniera przypomina problem komiwojażera i może być rozwiązywane np. z wykorzystaniem algorytmów genetycznych. Pewna próba rozwiązania tego problemu przedstawiona jest też w pracy A. Sabo [2013], gdzie zastosowano teorię grafów i m.in. użyto minimalne drzewa rozpinające.

W artykule analizę ograniczono do magazynów prostokątnych jednoblokowych ze scentralizowanym punktem przyjęcia i wydania towarów, dla których algorytm wyznaczania najkrótszej trasy podali H.D. Ratliff i A.S. Rosenthal [1983]. Metoda, wykorzystując teorię grafów i programowanie dynamiczne, pozwala na ustalenie najkrótszej trasy magazyniera w bardzo krótkim czasie (czas obliczeń liniowo zależy od liczby alejek w magazynie). Algorytm Ratliffa i Rosenthala uogólniony został przez R. De Koster i E.S. Van Der Poorta [1998] na przypadek zdecentralizowany (wykorzystanie taśmociągów), a przez K.J. Roodbergena i R. De Koster [2001] na przypadek magazynów dwublokowych (trzy główne korytarze). Dla magazynów innego typu znalezienie najkrótszej trasy jest zadaniem trudniejszym i bardziej czasochłonnym.

Pomimo że algorytm wyznaczania trasy optymalnej jest szybki i łatwy do oprogramowania, w praktyce często stosuje się również heurystyki. R. De Koster, T. Le Duc i K.J. Roodbergen [2007] podają trzy przyczyny stosowania heurystyk:

algorytm wyznaczania trasy optymalnej ma zastosowanie tylko dla specyficznego układu strefy kompletacji, najkrótsza trasa wyznaczona przez algorytm często może być przez magazynierów postrzegana za nielogiczną (magazynierzy pewnie poruszają się po stałych trasach) i trasa optymalna (w odróżnieniu od niektórych heurystyk) nie uwzględnia możliwości wystąpienia zatorów w magazynie spowodowanych przez tzw. efekt przepełnienia (*congestion effect*).

W literaturze przedstawionych jest 5 heurystyk, które mają zastosowanie w magazynach prostokątnych jednoblokowych: *s-shape*, *midpoint*, *return*, *largest gap* i *combined*. Szczegółowe opisy zasad wyznaczania trasy dla każdej z nich można znaleźć np. w pracy [Le-Duc 2005].

3. Metody składowania towarów

Ogromny wpływ na czas kompletacji zamówień ma – oprócz ustalenia jak najszybszej trasy poruszania się magazynierów – również sposób rozmieszczenia towarów w magazynie. Problem jest bardzo trudny do rozwiązania, ponieważ dotyczy podejmowania decyzji w warunkach ryzyka i niepewności (nie jest znany przyszły popyt na wyroby). Dodatkowo efekty mogą być oceniane wielokryterialnie: zadanie minimalizacji czasu kompletacji zamówień może stać w sprzeczności z bardziej ogólnym celem, którym jest zmniejszanie łącznych kosztów funkcjonowania magazynu.

Jedną z pierwszych prac dotyczących problemu optymalizacji składowania towarów w magazynie jest artykuł J.L. Hesketta [1963]. Autor zaproponował, aby towary o wysokim współczynniku rotacji i małych gabarytach przechowywać blisko punktu przyjęcia i wydania towarów. W tym celu towary należy posortować rosnąco według tzw. współczynnika COI (*cube-per-order index*) i w takiej kolejności umieszczać na polach odkładczych znajdujących się najbliżej punktu przyjęcia i wydania towarów.

Inną kluczową pracą poruszającą zagadnienia optymalizacji składowania towarów w magazynie jest artykuł C. Kallina i J. Lynn [1976], którzy zaproponowali cztery kryteria (sprowadzone do postaci warunków), które powinny być spełnione podczas rozmieszczania towarów w magazynie:

– kompatybilność (*compatibility*) – towary, które nie są „zgodne”, nie mogą być przechowywane w bezpośrednim sąsiedztwie (np. artykuły spożywcze i ropopochodne),

– komplementarność (*complementarity*) – towary komplementarne należy przechowywać w niewielkiej odległości od siebie,

– popularność (*popularity*) – wyroby o dużym współczynniku rotacji powinny być przechowywane w miejscu łatwo dostępnym dla magazyniera,

– przestrzeń (*space*) – towary o małych gabarytach należy przechowywać blisko punktu przyjęcia i wydania towarów.

Na podstawie przedstawionych kryteriów powstało wiele metod składowania towarów. Metody te można podzielić na kilka grup (bardziej szczegółowy opis problemu można znaleźć np. w pracach: [De Koster, Le Duc i Roodbergen 2007, s. 488–491; Wäscher 2004; Huber 2011, s. 14–16; Le Duc 2005, s. 12–17; Roodbergen 2001, s. 14–15]. Przykładowy podział obejmuje następujące metody:

- oparte na składowaniu losowym (*random storage assignment*),
- składowania najbliższej punktu przyjęcia i wydania towarów (*closest-open-location storage assignment*),
- składowania dedykowanego (*dedicated storage assignment*),
- składowania oparte na klasyfikacji ABC (*class-based storage assignment*),
- składowania oparte na grupowaniu towarów (*family-grouping storage assignment*).

Przedstawiony tutaj (za pracą T. Le Duc [2005]) podział na 5 grup wydaje się najbardziej kompletny. Należy jednak zaznaczyć, że klasy te nie są rozłączne. Niektóre metody składowania można przypisać do kilku grup.

W dalszej części artykułu skupiono się przede wszystkim na metodach składowania dedykowanego opartych na grupowaniu towarów często pojawiających się na zamówieniach razem.

4. Propozycja metod wykorzystujących warunkowe rozkłady prawdopodobieństwa zakupu towarów

Uwzględnienie w rozważaniach teoretycznych wszystkich postulatów C. Kalliny i J. Lynna jest bardzo trudne. Proponowane metody biorą pod uwagę komplementarność i popularność. Dla pozostałych kryteriów przyjmuje się założenie, że są one spełnione.

Kolejnym problemem, zaniechanym przez wielu autorów, jest wyznaczenie czasu kompletacji. W większości prac przyjmowane jest założenie, że czas kompletacji jest proporcjonalny do długości drogi pokonanej przez magazyniera (por. np. [Wäscher 2004, De Koster, Le Duc i Roodbergen 2007]). Łatwo jednak wykazać, że nie zawsze tak jest ([De Koster, Van Der Poort i Roodbergen 1998, Tarczyński 2013]). Autor w przeprowadzanych badaniach będzie analizował czas kompletacji.

- Pełna lista założeń do proponowanych modeli przedstawia się następująco:
- analiza ograniczona została do magazynów prostokątnych, jednoblokowych,
 - punkt przyjęcia i wydania towarów znajduje się w „południowo-zachodnim” rogu magazynu,

- kompletacja wykonywana jest metodą „człowiek do towaru”,
- kompletacja wykonywana jest z wykorzystaniem wózków widłowych [Fijałkowski 2003] (tabela 1),
- analizowany jest czas kompletacji, zamiast długości drogi pokonywanej przez magazyniera,
- wielkość, ciężar i ilość pobieranych przedmiotów są nieistotne i nie wpływają na prędkość poruszania się magazyniera (postulat przestrzeni nie jest brany pod uwagę),
- czas pobrania wszystkich wyrobów jest taki sam,
- wszystkie towary są kompatybilne,
- liczba towarów w magazynie równa jest liczbie pól odkładczych,
- równocześnie pracuje kilku magazynierów, co umożliwia sprawdzenie, czy w magazynie nie powstają zatory.

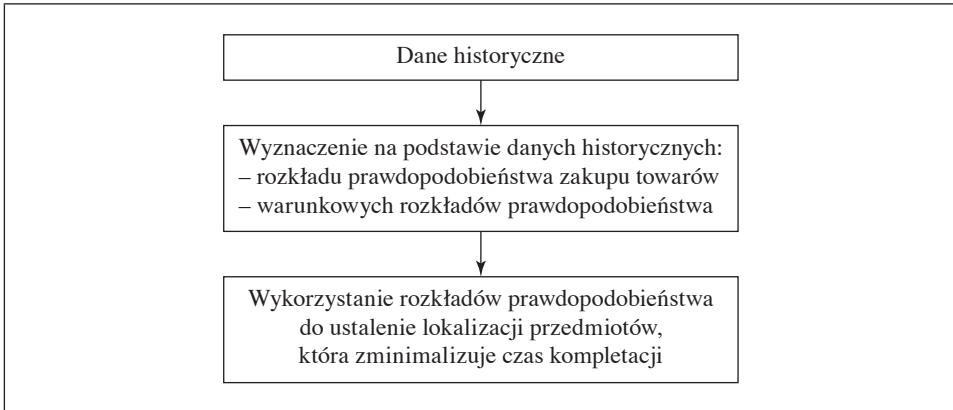
Tabela 1. Czasy poruszania się wózków widłowych

Czynność	Symbol	Jednostka	Czas (min)
Przyspieszenie po zatrzymaniu (pusty wózek)	AE	cały okres	0,0300
Przyspieszenie 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 wydrukowanie i naklejenie etykiety	OFP	cała operacja	0,3533
Zatrzymanie pełnego wózka	–	cała operacja	0,0360
Cofanie (0,8 m)	–	na 0,8m	0,0750

Źródło: opracowanie własne na podstawie: [Fijałkowski 2003].

Problem alokacji towarów w magazynie dotyczy podejmowania decyzji w warunkach ryzyka i niepewności. W proponowanych metodach, na podstawie danych historycznych, wyznaczone będą rozkłady prawdopodobieństwa zakupu towarów przez klientów oraz warunkowe rozkłady prawdopodobieństwa informujące o tym, jak często towary kupowane są w zestawach. W przypadku bardzo dużych zbiorów danych historycznych wykonanie niezbędnych obliczeń może

być trudne i może wymagać wykorzystania technik zgłębiania danych. Uzyskane rozkłady prawdopodobieństwa posłużą do ustalenia lokalizacji towarów w magazynie zgodnie z kryteriami komplementarności i popularności podanymi przez C. Kallinę i J. Lynna [1976] (rys. 1).



Rys. 1. Schemat postępowania przy ustalaniu lokalizacji towarów w magazynie

Źródło: opracowanie własne.

Zaproponowane metody stanowią modyfikację popularnej metody składowania losowego opartego na klasyfikacji ABC: metody *across-aisle* (rys. 2a). W metodzie tej towary o wysokim współczynniku rotacji umieszcza się blisko tego głównego korytarza, w którym znajduje się punkt przyjęcia i wydania towarów. Towary słabo rotujące lokowane są blisko drugiego głównego korytarza. Oryginalna metoda *across-aisle* stanowić będzie też punkt wyjścia przy porównywaniu efektywności proponowanych metod.

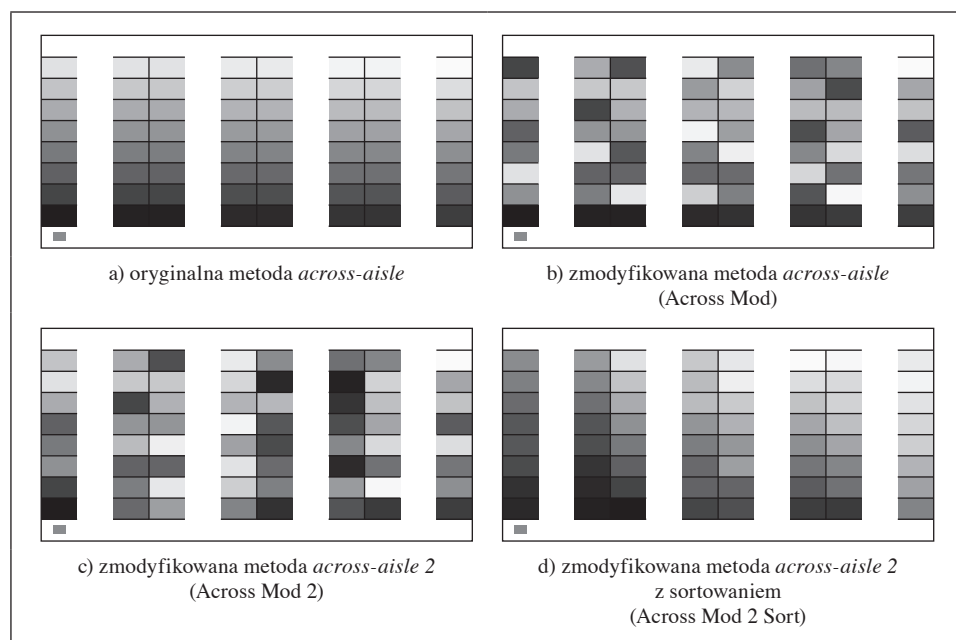
Proponowane modyfikacje metody *across-aisle*:

– zmodyfikowana metoda *across-aisle* (Across Mod): towary na podstawowym poziomie składowania w pierwszym rzędzie (najbliższym głównemu korytarzowi, w którym znajduje się punkt przyjęcia i wydania towarów) umieszcza się tak, jak w oryginalnej metodzie *across-aisle*. Pozostałe wyroby umieszcza się w bocznych alejkach, dla których $P(B|A)P(A)$ jest największe ($P(A)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia na zamówieniu towaru A, który został już ulokowany w pierwszym kroku algorytmu; $P(B|A)$ – prawdopodobieństwo pojawienia się na zamówieniu klienta towaru B, jeśli klient zamawia towar A) (rys. 2b);

– zmodyfikowana metoda *across-aisle* 2 (Across Mod 2): warunkowe prawdopodobieństwa są sortowane, następnie grupuje się towary, dla których wartości warunkowych prawdopodobieństw są najwyższe. Procedurę powtarza się, aż

wszystkie towary zostaną przypisane do grup. Jedna grupa może zawierać tylko tyle elementów, ile jest pól odkładczych w bocznej alejce (rys. 2c);

– zmodyfikowana metoda *across-aisle 2* z sortowaniem (Across Mod 2 sort): po zastosowaniu metody Across Mod 2 towary są sortowane w ramach grup – towary o najwyższych współczynnikach rotacji umieszcza się blisko tego głównego korytarza, w którym znajduje się punkt przyjęcia i wydania towarów. Następnie sortowane są całe grupy – grupy zawierające towary, dla których suma współczynników rotacji jest największa umieszcza się blisko punktu przyjęcia i wydania towarów (rys. 2d).



Rys. 2. Wizualizacja propozycji metod składowania towarów (skala szarości pól odkładczych informuje o wartości współczynnika rotacji – na polach ciemniejszych znajdują się towary najczęściej zamawiane i kompletowane)

Źródło: opracowanie własne.

5. Wyniki obliczeń

Algorytmy przetestowano na pięciu zbiorach danych:

1) magazyn jednopoziomowy, warunkowe prawdopodobieństwa zakupu towarów są bliskie zeru (towary nie są kupowane w zestawach),

2) magazyn jednopoziomowy, niektóre warunkowe prawdopodobieństwa zakupu towarów są znacząco większe od zera (towary są czasami kupowane w zestawach),

3) magazyn jednopoziomowy, wiele warunkowych prawdopodobieństw zakupu towarów jest znacząco większych od zera (towary są często kupowane w zestawach),

4) magazyn pięciopoziomowy, niektóre warunkowe prawdopodobieństwa zakupu towarów są znacząco większe od zera (towary są rzadko kupowane w zestawach),

5) magazyn jednopoziomowy, zbiór danych rzeczywistych pochodzących z dużego centrum dystrybucji pewnej sieci spożywczej.

Do obliczeń wykorzystano program Warehouse Real-Time Simulator [Tarczyński 2013]. Zastosowanie symulacji jest dość czasochłonne, umożliwia jednak przeprowadzenie dokładniejszej i pełniejszej analizy niż w przypadku rozwiązań teoretycznych z użyciem wzorów matematycznych. W obliczeniach przyjęto następujące założenia:

- 200 replikacji dla każdego doświadczenia (1 replikacja odpowiadała 1 dniowi pracy magazynu),

- zamówienia napływają do magazynu przez 8 godzin, ale magazyn pracuje dłużej – do momentu, aż skompletowane zostanie ostatnie zamówienie,

- zmienna liczba towarów na zamówieniach (maksymalnie 12 towarów na zamówieniu),

- ponad 18 800 zamówień dla każdego doświadczenia,

- około 150 000–204 000 towarów (indeksów) pobranych w ramach każdego doświadczenia,

- zamówienia napływały zgodnie z rozkładem wykładniczym (podobnie, jak ma to miejsce w systemach kolejkowych) dla średnich wartości podanych w tabeli 2.

Tabela 2. Średni odstęp czasu pomiędzy dwoma zamówieniami

Przedział czasu	Średni czas napływania zamówień
8:00–9:00	03:31
9:00–10:00	04:15
10:00–11:00	04:01
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)	06:02

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki przeprowadzonych symulacji zaprezentowane są jako średnie czasy kompletacji zamówień i procentowa zmiana w porównaniu z metodą *across-aisle* (tabele 3–7). Wartości ponad 100% oznaczają pogorszenie średnich czasów kompletacji względem metody *across-aisle*, w przeciwnym wypadku – skrócenie czasu.

Dla pierwszego eksperymentu proponowane metody nie spowodowały poprawy czasów kompletacji zamówień. Metoda *across-aisle mod* w połączeniu z heurystyką *midpoint* spowodowała nawet 2% wydłużenie średniego czasu kompletacji. Wyniki takie nie są zaskoczeniem, ponieważ w tym eksperymencie towary w ogóle nie były kupowane w zestawach.

Tabela 3. Średnie czasy kompletacji zamówień dla eksperymentu 1

Metoda wyznaczenia trasy	Metoda składowania			
	<i>across-aisle</i>	<i>across-aisle mod</i>	<i>across-aisle mod 2</i>	<i>across-aisle mod 2 sort</i>
<i>Optimal</i>	0:14:05 (100%)	0:14:02 (100%)	0:14:00 (99%)	0:14:01 (100%)
<i>S-Shape</i>	0:16:08 (100%)	0:16:06 (100%)	0:15:58 (99%)	0:15:58 (99%)
<i>Midpoint</i>	0:15:19 (100%)	0:15:15 (100%)	0:15:15 (100%)	0:15:16 (100%)
<i>Return</i>	0:18:12 (100%)	0:18:31 (102%)	0:18:24 (101%)	0:18:13 (100%)
<i>Largest Gap</i>	0:14:54 (100%)	0:14:52 (100%)	0:14:50 (100%)	0:14:53 (100%)
<i>Combined</i>	0:15:03 (100%)	0:15:01 (100%)	0:14:57 (99%)	0:14:57 (99%)

Źródło: opracowanie własne.

Zbiór danych użyty w drugim eksperymencie uwzględnił już – choć nieczęsto – możliwość zakupu towarów w zestawach. Tutaj proponowane algorytmy spowodowały zmniejszenie średnich czasów kompletacji zamówień. Najlepszą poprawę zaobserwowano dla metody *across-aisle mod 2* i heurystyki *s-shape*: czas kompletacji uległ redukcji o 17%. Dodatkowe posortowanie towarów w ramach metody *across-aisle mod 2 sort* spowodowało dalszą niewielką poprawę wyników: o 1 punkt procentowy. Podobne wyniki uzyskano dla trzeciego zbioru danych. Tutaj metody *across-aisle mod 2* i *across-aisle mod 2 sort* w połączeniu z heurystyką *s-shape* spowodowały skrócenie czasu kompletacji o odpowiednio 18% i 19%.

Tabela 4. Średnie czasy kompletacji zamówień dla eksperymentu 2

Metoda wyznaczenia trasy	Metoda składowania			
	<i>across-aisle</i>	<i>across-aisle mod</i>	<i>across-aisle mod 2</i>	<i>across-aisle mod 2 sort</i>
<i>Optimal</i>	0:14:26 (100%)	0:13:35 (94%)	0:13:02 (90%)	0:13:00 (90%)
<i>S-Shape</i>	0:18:21 (100%)	0:16:17 (89%)	0:15:09 (83%)	0:15:07 (82%)
<i>Midpoint</i>	0:15:26 (100%)	0:14:39 (95%)	0:14:18 (93%)	0:14:16 (92%)
<i>Return</i>	0:17:22 (100%)	0:17:21 (100%)	0:16:35 (95%)	0:16:15 (94%)
<i>Largest Gap</i>	0:15:14 (100%)	0:14:25 (95%)	0:13:55 (91%)	0:14:00 (92%)
<i>Combined</i>	0:15:39 (100%)	0:14:47 (94%)	0:14:05 (90%)	0:14:01 (90%)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 5. Średnie czasy kompletacji zamówień dla eksperymentu 3

Metoda wyznaczenia trasy	Metoda składowania			
	<i>across-aisle</i>	<i>across-aisle mod</i>	<i>across-aisle mod 2</i>	<i>across-aisle mod 2 sort</i>
<i>Optimal</i>	0:13:41 (100%)	0:12:28 (91%)	0:11:47 (86%)	0:11:44 (86%)
<i>S-Shape</i>	0:15:48 (100%)	0:14:03 (89%)	0:12:56 (82%)	0:12:52 (81%)
<i>Midpoint</i>	0:14:47 (100%)	0:13:40 (92%)	0:12:51 (87%)	0:12:56 (87%)
<i>Return</i>	0:16:01 (100%)	0:15:28 (97%)	0:14:26 (90%)	0:13:55 (87%)
<i>Largest Gap</i>	0:14:23 (100%)	0:13:19 (93%)	0:12:30 (87%)	0:12:38 (88%)
<i>Combined</i>	0:14:22 (100%)	0:13:11 (92%)	0:12:19 (86%)	0:12:15 (85%)

Źródło: opracowanie własne.

W czwartym eksperymencie proponowane metody składowania również spowodowały poprawę czasów kompletacji zamówień, choć tym razem niewielką. Warto jednak zwrócić uwagę, że metoda *across-aisle* w połączeniu z heurystyką *return* spowodowała 2% pogorszenie wyników.

Tabela 6. Średnie czasy kompletacji zamówień dla eksperymentu 4

Metoda wyznaczenia trasy	Metoda składowania			
	<i>across-aisle</i>	<i>across-aisle mod</i>	<i>across-aisle mod 2</i>	<i>across-aisle mod 2 sort</i>
<i>Optimal</i>	0:23:24 (100%)	0:22:46 (97%)	0:22:17 (95%)	0:22:29 (96%)
<i>S-Shape</i>	0:25:49 (100%)	0:25:10 (97%)	0:24:55 (97%)	0:24:33 (95%)
<i>Midpoint</i>	0:25:43 (100%)	0:24:59 (97%)	0:24:33 (95%)	0:24:59 (97%)
<i>Return</i>	0:28:26 (100%)	0:28:58 (102%)	0:28:07 (99%)	0:27:18 (96%)
<i>Largest Gap</i>	0:24:59 (100%)	0:24:16 (97%)	0:23:53 (96%)	0:24:18 (97%)
<i>Combined</i>	0:24:31 (100%)	0:24:11 (99%)	0:23:41 (97%)	0:23:28 (96%)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 7. Średnie czasy kompletacji zamówień dla eksperymentu 5

Metoda wyznaczenia trasy	Metoda składowania			
	<i>across-aisle</i>	<i>across-aisle mod</i>	<i>across-aisle mod 2</i>	<i>across-aisle mod 2 sort</i>
<i>Optimal</i>	0:13:46 (100%)	0:13:08 (95%)	0:12:48 (93%)	0:12:45 (93%)
<i>S-Shape</i>	0:15:59 (100%)	0:14:57 (94%)	0:14:19 (90%)	0:14:15 (89%)
<i>Midpoint</i>	0:14:56 (100%)	0:14:16 (96%)	0:14:09 (95%)	0:14:08 (95%)
<i>Return</i>	0:16:32 (100%)	0:16:37 (101%)	0:16:03 (97%)	0:15:50 (96%)
<i>Largest Gap</i>	0:14:35 (100%)	0:13:56 (96%)	0:13:43 (94%)	0:13:47 (95%)
<i>Combined</i>	0:14:38 (100%)	0:13:58 (95%)	0:13:33 (93%)	0:13:30 (92%)

Źródło: opracowanie własne.

Eksperyment przeprowadzony na piątym, rzeczywistym zbiorze danych także potwierdził skuteczność proponowanych metod składowania w redukcji czasu kompletacji. Najlepszy wynik uzyskano ponownie dla heurystyki *s-shape* i metody *across-aisle mod 2 sort*: nastąpiła 11% redukcja czasu. Podobnie, jak w eksperym-

mencie 4, także tutaj metoda *across-aisle mod* w połączeniu z heurystyką *return* spowodowała niewielki (o 1%) wzrost średniego czasu kompletacji zamówień.

Tabela 8. Średnie czasy wzajemnego blokowania się magazynierów podczas kompletacji jednego zamówienia dla eksperymentu 2

Metoda wyznaczenia trasy	Metoda składowania			
	<i>aisle across</i>	<i>aisle across mod</i>	<i>aisle across mod 2</i>	<i>aisle across mod 2 sort</i>
<i>Optimal</i>	0:02:08 (100%)	0:01:57 (91%)	0:01:56 (91%)	0:02:01 (95%)
<i>S-Shape</i>	0:01:52 (100%)	0:01:56 (103%)	0:02:02 (108%)	0:01:55 (103%)
<i>Midpoint</i>	0:02:43 (100%)	0:02:20 (86%)	0:02:27 (90%)	0:02:35 (95%)
<i>Return</i>	0:03:51 (100%)	0:03:43 (96%)	0:03:37 (94%)	0:03:42 (96%)
<i>Largest Gap</i>	0:02:38 (100%)	0:02:13 (84%)	0:02:19 (88%)	0:02:35 (98%)
<i>Combined</i>	0:02:22 (100%)	0:02:08 (90%)	0:02:08 (90%)	0:02:08 (90%)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8 przedstawia średnie dzienne czasy blokowania się magazynierów dla drugiego eksperymentu. Jak widać, wartości są stosunkowo niewielkie. Tylko w połączeniu z heurystyką *s-shape* proponowane metody składowania towarów spowodowały wzrost częstości występowania sytuacji wzajemnego blokowania się przez magazynierów (do 8%). Dla pozostałych heurystyk i dla trasy optymalnej, sytuacja uległa poprawie (nawet do 16%). Dla pozostałych eksperymentów sytuacja wyglądała podobnie: średnie łączne czasy blokowania się wózków widłowych były niewielkie.

6. Wnioski

W artykule przedstawiono oryginalne metody składowania dedykowanego towarów i zweryfikowano ich efektywność na pięciu zbiorach danych. W sytuacji, gdy towary były rzeczywiście często kompletowane w typowych zestawach, proponowane metody uzyskiwały lepsze wyniki od porównywanej metody *across-aisle*. Gdy towary nie były zamawiane i kompletowane w zestawach, średnie czasy kompletacji uzyskane dla metody *across-aisle* i zaproponowanych jej modyfikacji były zbliżone. Niekiedy nawet wyniki dla proponowanych metod

były nieco gorsze, ale różnica była bardzo mała. W analizowanych przykładach składowanie dedykowane towarów nie doprowadziło do efektu przepełnienia i poważnych zatorów mogących utrudnić pracę w magazynie.

Spośród metod składowania losowego towarów opartych na klasyfikacji ABC, oprócz metody *across-aisle* na uwagę zasługuje metoda diagonal – niekiedy daje ona lepsze rezultaty.

Istnieje możliwość wykorzystania proponowanych algorytmów w praktyce. Wprawdzie G. Wäscher [2004] zwraca uwagę na trudności z wdrożeniem algorytmów dedykowanych, to zdaniem autora w pewnym ograniczonym zakresie możliwe jest ich zastosowanie. Niezbędne jest jednak uwzględnienie wszystkich kryteriów C. Kalliny i J. Lynna [1976].

Literatura

- Bartholdi III J.J., Hackman S.T. [2011], *Warehouse and Distribution Science*, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- De Koster R., Le Duc T., Roodbergen K.J. [2007], *Design and Control of Warehouse Order Picking: A Literature Review*, „European Journal of Operational Research”, vol. 182(2), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009>.
- De Koster R., Van Der Poort E.S. [1998], *Routing Order Pickers in a Warehouse: A Comparison between Optimal and Heuristic Solutions*, „IIE Transactions”, vol. 30, <http://dx.doi.org/10.1023/A:1007599307171>.
- De Koster R., Van Der Poort E.S., Roodbergen K.J. [1998], *When to Apply Optimal or Heuristic Routing for Orderpickers* [w:] *Advances in Distribution Logistics*, red. B. Fleischmann, J.A.E.E. van Nunen, M.G. Speranza, P. Stähly, Springer, Berlin, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-46865-0_16.
- Fijałkowski J. [2003], *Transport wewnętrzny w systemach logistycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Heskett J.L. [1963], *Cube-per-order Index – a Key to Warehouse Stock Location*, „Transport and Distribution Management”, nr 3.
- Huber Ch. [2011], *Throughput Analysis of Manual Order Picking Systems with Congestion Consideration*, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.
- Kallina C., Lynn J. [1976], *Application of the Cube-per-order Index Rule for Stock Location in a Distribution Warehouse*, „Interfaces”, vol. 7(1), <http://dx.doi.org/10.1287/inte.7.1.37>.
- Le-Duc T. [2005], *Design and Control of Efficient Order Picking Processes*, Erasmus University Rotterdam, Rotterdam.
- Ratliff H.D., Rosenthal A.S. [1983], *Order-picking in a Rectangular Warehouse: A Solvable Case of the Traveling Salesman Problem*, „Operations Research”, vol. 31(3), <http://dx.doi.org/10.1287/opre.31.3.507>.
- Roodbergen K.J. [2001], *Layout and Routing Methods for Warehouses*, Erasmus University Rotterdam, Rotterdam.

- Roodbergen K.J., De Koster R. [2001], *Routing Order Pickers in a Warehouse with a Middle Aisle*, „European Journal of Operational Research”, vol. 133(1), [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00177-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00177-6).
- Sabo A. [2013], *Analiza problemu kompletacji zamówień w magazynie wysokiego składowania* [w:] *Decyzje optymalne w wybranych obszarach praktyki gospodarczej*, red. T. Trzaskalik, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice.
- Tarczyński G. [2013], *Warehouse Real-Time Simulator – How to Optimize Order Picking Time*, Working Paper, SSRN: <http://ssrn.com/abstract=2354827>, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2354827>.
- Wäscher G. [2004], *Order Picking: A Survey of Planning Problems and Methods* [w:] *Supply Chain Management and Reverse Logistics*, eds. M. Dyckhoff, R. Lackes, J. Reese, Springer, Berlin–New York, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-24815-6_15.

A Dedicated Storage Location Assignment Algorithm that Optimises Order-picking Time

(Abstract)

An essential element of warehouse work which can be optimised is order-picking time. It can be minimised by determining the shortest picker's route and the appropriate storage location assignment of items.

In this paper only one-block rectangular warehouses with picker-to-part order picking systems are considered. The warehouse processes are presented. The routing heuristics and the optimal algorithm and storage location assignment methods are described. Against this background the original dedicated storage location assignment algorithms are presented. The efficiency of the methods is verified using simulations. For the calculations the original software Warehouse Real-Time Simulator is used.

Keywords: order-picking, warehousing, storage location assignment, optimisation, simulations.