

PRACE NAUKOWE

Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu

RESEARCH PAPERS

of Wrocław University of Economics

Nr 446

Metody i zastosowania badań operacyjnych



Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu
Wrocław 2016

Redakcja wydawnicza: Joanna Świrska-Korlub

Redakcja techniczna: Barbara Łopusiewicz

Korekta: Barbara Cibis

Łamanie: Małgorzata Myszkowska

Projekt okładki: Beata Dębska

Informacje o naborze artykułów i zasadach recenzowania
znajdują się na stronach internetowych

www.pracnaukowe.ue.wroc.pl

www.wydawnictwo.ue.wroc.pl

Publikacja udostępniona na licencji Creative Commons

Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 3.0 Polska
(CC BY-NC-ND 3.0 PL)



© Copyright by Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
Wrocław 2016

ISSN 1899-3192
e-ISSN 2392-0041

ISBN 978-83-7695-610-7

Wersja pierwotna: publikacja drukowana

Zamówienia na opublikowane prace należy składać na adres:

Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu

ul. Komandorska 118/120, 53-345 Wrocław

tel./fax 71 36 80 602; e-mail: econbook@ue.wroc.pl

www.ksiegarnia.ue.wroc.pl

Druk i oprawa: TOTEM

Wstęp

Wstęp	7
Krzysztof Echaust: Modelowanie wartości ekstremalnych stóp zwrotu na podstawie danych śróddziennych / Modeling of extreme returns on the basis of intraday data	9
Helena Gaspars-Wieloch, Ewa Michalska: On two applications of the Omega ratio: $\max\Omega_{\min}$ and $\Omega(H+B)$ / O dwóch zastosowaniach wskaźnika Omega: $\max\Omega_{\min}$ i $\Omega(H+B)$	21
Agata Gluzicka: Zastosowanie modelu MAD z dodatkowymi warunkami ograniczającymi / Application of the MAD model with additional constraints	37
Dorota Górecka, Małgorzata Szalucka: Foreign market entry mode decision – approach based on stochastic dominance rules versus multi-actor multi-criteria analysis / Wybór sposobu wejścia na rynek zagraniczny – podejście oparte na dominacjach stochastycznych a wieloaktorska analiza wielokryterialna	47
Paweł Hanczar, Dagmara Pisiewicz: Logistyka odzysku – optymalizacja przepływów w systemie gospodarki komunalnej / Reverse logistics – optimization of flows in the system of waste management	70
Michał Jakubiak, Paweł Hanczar: Optymalizacja tras zbiórki odpadów komunalnych na przykładzie MPO Kraków / Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes on the example of MPO Cracow	83
Michał Kameduła: Zastosowanie koewolucyjnego algorytmu genetycznego w rozwiązaniu zadania trójkryterialnego / Application of co-evolutionary genetic algorithm for a three-criterion problem.....	93
Donata Kopańska-Bródka, Renata Dudzińska-Baryła, Ewa Michalska: Zastosowanie funkcji omega w ocenie efektywności portfeli dwuskładnikowych / Two-asset portfolio performance based on the omega function .	106
Marek Kośny, Piotr Peternek: Zagadnienie sposobu definiowania preferencji na przykładzie przydziału uczniów do oddziałów klasowych / Definition of preferences in the context of pupils' allocation to classes	115
Wojciech Młynarski, Artur Prędko: Ocena efektywności technicznej i finansowej wybranych nadleśnictw Lasów Państwowych za pomocą metody DEA / Technical and financial efficiency evaluation for selected forestry managements of the State Forests National Forest Holding – the DEA approach.....	126

Piotr Namieciński: Alternatywna metoda określania preferencji decydenta w zagadnieniach wielokryterialnych / Alternative methods of decision-maker preferences identification in multicriteria issues	144
Marek Nowiński: Testowanie nieliniowych algorytmów optymalizacyjnych – zestaw funkcji typu <i>benchmark</i> / Testing nonlinear optimization algorithms – set of benchmark type functions	159
Agnieszka Przybylska-Mazur: Wybrana metoda analizy długoterminowej stabilności finansów publicznych / The selected method of analysis of the long-term sustainability of public finance	173
Ewa Roszkowska, Tomasz Wachowicz, Robert Jankowski: Analiza porozumienia końcowego w negocjacjach elektronicznych w kontekście zgodności systemu oceny ofert negocjatora z informacją preferencyjną/ Analyzing the negotiation agreements in a context of concordance of negotiation offer scoring systems with negotiators' preferential information	187
Aleksandra Sabo-Zielonka, Grzegorz Tarczyński: Adaptacja heurystyki <i>s-shape</i> na potrzeby wyznaczenia trasy przejścia w niestandardowym układzie strefy kompletacji zamówień / Adaptation of the s-shape heuristic for the custom layout of the order-picking zone	207
Jakub Staniak: Inicjalizacja ukrytych modeli Markowa z wykorzystaniem analizy skupień / Initialization of hidden Markov models by means of clustering analysis.....	224
Paulina Szterlik: Lokalizacja magazynu centralnego z zastosowaniem metod wielokryterialnych / Location of central warehouse using quantitative research	237
Grzegorz Tarczyński: Porównanie efektywności kompletacji łączonych zleceń z kompletacją niezależną / An attempt of comparison of order batching with independent order-picking	250

Wstęp

Kolejna, XXXIV Ogólnopolska Konferencja Naukowa im. Profesora Władysława Bukietyńskiego, organizowana corocznie przez najważniejsze ośrodki naukowe zajmujące się dziedziną badań operacyjnych, w roku 2015 odbyła się w pięknym, zabytkowym i świeżo odremontowanym zespole pałacowo-parkowym w Łagowie koło Zgorzelca. Konferencję zrealizowaną pod nazwą *Metody i Zastosowania Badań Operacyjnych* przygotowała Katedra Badań Operacyjnych Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu pod kierownictwem dr. hab. Marka Nowińskiego, prof. UE.

Konferencje te mają już długoletnią tradycję – są to coroczne spotkania pracowników nauki specjalizujących się w badaniach operacyjnych. Głównym celem konferencji było, podobnie jak w latach ubiegłych, stworzenie (przede wszystkim dla młodych teoretyków, a także praktyków dyscypliny) forum wymiany myśli na temat najnowszych osiągnięć dotyczących metod ilościowych wykorzystywanych do wspomagania procesów podejmowania decyzji, a także prezentacja nowoczesnych zastosowań badań operacyjnych w różnych dziedzinach gospodarki. Ten cenny dorobek naukowy nie może być zapomniany i jest publikowany po konferencji w postaci przygotowywanego przez organizatorów zeszytu naukowego zawierającego najlepsze referaty na niej zaprezentowane.

W pracach Komitetu Naukowego Konferencji uczestniczyli czołowi przedstawiciele środowisk naukowych z dziedziny badań operacyjnych w Polsce; byli to: prof. Jan B. Gajda (Uniwersytet Łódzki), prof. Stefan Grzesiak (Uniwersytet Szczeciński), prof. Bogumił Kamiński (SGH w Warszawie), prof. Ewa Konarzewska-Gubała (Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu), prof. Donata Kopańska-Bródka, prof. Maciej Nowak i prof. Tadeusz Trzaskalik (Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach), prof. Dorota Kuchta (Politechnika Wrocławska), prof. Krzysztof Piasecki (Uniwersytet w Poznaniu) i prof. Józef Stawicki (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu).

Zakres tematyczny konferencji obejmował teoretyczne i praktyczne zagadnienia dotyczące przede wszystkim:

- modelowania i optymalizacji procesów gospodarczych,
- metod wspomagających proces negocjacji,
- metod oceny efektywności i ryzyka na rynku kapitałowym i ubezpieczeniowym,
- metod ilościowych w transporcie i zarządzaniu zapasami,
- metod wielokryterialnych,
- optymalizacji w zarządzaniu projektami oraz analizy ryzyka decyzyjnego.

W konferencji wzięło udział 43 przedstawiciele różnych środowisk naukowych, licznie reprezentujących krajowe ośrodki akademickie. W trakcie sześciu sesji ple-

narych, w tym dwóch sesji równoległych, przedstawiono 27 referatów, których poziom naukowy w przeważającej części był bardzo wysoki. Zaprezentowane referaty, po pozytywnych recenzjach, zostają dziś opublikowane w Pracach Naukowych Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu w postaci artykułów naukowych w specjalnie wydany zeszycie konferencyjnym.

Przypominając przebieg konferencji, nie można nie wspomnieć o konkursie zorganizowanym dla autorów referatów niebędących samodzielnymi pracownikami nauki. Dotyczył on prezentacji najciekawszego zastosowania badań operacyjnych w praktyce gospodarczej. Komitet Organizacyjny Konferencji powołał kapitułę konkursu, w której skład weszli: prof. Ewa Konarzewska-Gubała – przewodnicząca, prof. Jan Gajda, prof. Stefan Grzesiak i prof. Donata Kopańska-Bródka. Członkowie Komisji Konkursowej oceniali referaty ze względu na:

- innowacyjność, oryginalność metody będącej przedmiotem zastosowania,
- znaczenie zastosowania dla proponowanego obszaru,
- stopień zaawansowania implementacji metody w praktyce.

Spośród 15 referatów zgłoszonych wyróżniono: 1. miejsce: dr Michał Jakubiak i dr hab. Paweł Hanczar (Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu), *Optymalizacja tras zbiórki odpadów komunalnych na przykładzie MPO Kraków*; 2. miejsce: mgr Dagmara Piesiewicz i dr hab. Paweł Hanczar (Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu), *Logistyka odzysku – optymalizacja przepływów w systemie gospodarki komunalnej*; 3. miejsce: dr Dorota Górecka i dr Małgorzata Szałucka (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu), *Wybór sposobu wejścia na rynek zagraniczny – wieloaktorska analiza wielokryterialna a podejście oparte na dominacjach stochastycznych*.

Przy okazji prezentowania opracowania poświęconego XXXIV Konferencji *Metody i Zastosowania Badań Operacyjnych* i jej bardzo wartościowego dorobku nie możemy nie podziękować członkom Komitetu Organizacyjnego Konferencji, w którego skład wchodził młodzi, acz doświadczeni pracownicy Katedry Badań Operacyjnych Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu: dr Piotr Peternek (sekretarz), dr hab. Marek Kośny, dr Grzegorz Tarczyński oraz mgr Monika Stańczyk (biuro konferencji). Zapewnili oni w sposób profesjonalny sprawne przygotowanie i przeprowadzenie całego przedsięwzięcia oraz zadbali o sprawy administracyjne związane z realizacją konferencji, a także byli odpowiedzialni za dopilnowanie procesu gromadzenia i redakcji naukowych materiałów pokonferencyjnych, które mamy okazję Państwu dziś udostępnić.

Już dzisiaj cieszymy się na nasze kolejne spotkanie w ramach jubileuszowej XXXV Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej im. Profesora Władysława Bukietyńskiego, która tym razem będzie organizowana przez naszych przyjaciół z Katedry Badań Operacyjnych Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu pod kierownictwem prof. dr. hab. Krzysztofa Piaseckiego.

Marek Nowiński

Aleksandra Sabo-Zielonka

Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach
e-mail: a.sabo@wp.pl

Grzegorz Tarczyński

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
e-mail: grzegorz.tarczyński@ue.wroc.pl

ADAPTACJA HEURYSTYKI *S-SHAPE* NA POTRZEBY WYZNACZENIA TRASY PRZEJŚCIA W NIESTANDARDOWYM UKŁADZIE STREFY KOMPLETACJI ZAMÓWIEŃ

ADAPTATION OF THE *S-SHAPE* HEURISTIC FOR THE CUSTOM LAYOUT OF THE ORDER-PICKING ZONE

DOI: 10.15611/pn.2016.446.15

JEL Classification: C15

Streszczenie: W praktyce do wyznaczania trasy przejścia przez magazyn w procesie kompletacji zamówień stosowane są heurystyki, których niewątpliwą zaletą jest łatwość wdrożenia skutkująca mniejszą liczbą pomyłek podczas realizacji procesu pobrania towarów. W artykule analizie poddana została najczęściej stosowana w praktyce heurystyka, służąca do wyznaczania trasy – heurystyka *s-shape*. Skonfrontowano podejście analityczne i symulacyjne do wyznaczania średnich czasów kompletacji zamówień w magazynach o niestandardowym układzie strefy kompletacji. Autorzy wyprowadzają wzory matematyczne pozwalające na oszacowanie przeciętnego dystansu pokonywanego przez magazyniera podczas jednego przejścia komplementacyjnego. Proponowane wzory w swych założeniach uwzględniają pobieranie towarów o różnych współczynnikach rotacji. Takie podejście daje możliwość poszukiwania optymalnego ułożenia towarów w magazynie (minimalizującego oczekiwany czas kompletacji zamówień).

Słowa kluczowe: kompletacja zamówień, heurystyka *s-shape*, niestandardowy układ strefy kompletacji.

Summary: In the paper the custom warehouse layout is considered where pickers move through the picking aisles according to the modified *s-shape* heuristic. The authors analyse the order-picking process for different storage policies using both simulations and analytical approach. For the analytical analysis the equations for average order-picking time are developed and adjusted.

Keywords: order-picking, *s-shape* heuristic, custom warehouse layout.

1. Wstęp

Zagadnienie minimalizacji czasu kompletacji zamówień jest kluczowe dla optymalizacji kosztów operacyjnych magazynu. Proces kompletacji generuje bowiem około 55% tych kosztów [De Koster, Le-Duc, Roodbergen 2007]. Istotny wpływ na czas kompletacji ma właściwe rozmieszczenie towarów szybko rotujących, które umożliwi magazynierowi łatwy dostęp do nich. Weryfikacja rozwiązania może się odbywać z użyciem narzędzi symulacyjnych lub w sposób analityczny. Pierwszą z metod wykorzystali m.in. [Petersen, Schmenner 1999]. Przedstawicielami drugiego podejścia są z kolei [Le-Duc, De Koster 2005]. W obu przypadkach rozpatrywane są magazyny standardowe, o prostokątnym kształcie. W praktyce zdarza się jednak, że na potrzeby magazynowe adoptowane są istniejące budynki, co może skutkować niestandardowym kształtem stref kompletacyjnych.

Optymalizacja procesów składowania towarów obejmuje więcej zagadnień. Istotne jest przyjęcie odpowiedniej heurystyki służącej do wyznaczenia trasy magazyniera [Petersen, Schmenner 1999]. Problem związany z nadmiernym wykorzystaniem powierzchni magazynowej do przechowywania towarów tego samego rodzaju opisano w [Dmytrow 2013]. Autor poddaje analizie trzy sposoby wyboru lokalizacji, z której pobierane będą kompletowane towary. Badana jest m.in. efektywność wariantu umożliwiającego całkowite oczyszczenie jak największej liczby lokalizacji. Zagadnienie wyboru najlepszej lokalizacji z uwzględnieniem podejścia wielokryterialnego i z wykorzystaniem taksonomicznej miary atrakcyjności lokalizacji analizowane jest przez Dmytrowa i Doszynia [2015] oraz Dmytrowa [2015]. Problem ten – choć niezwykle istotny – nie będzie przedmiotem dalszej analizy. Autorzy dla uproszczenia obliczeń zakładają nieograniczoną podaż towaru na każdej z lokalizacji.

Podstawowym celem pracy jest adaptacja klasycznej heurystyki wyznaczania tras *s-shape* (np. [Tarczyński 2015]), dedykowanej prostokątnemu układowi strefy kompletacji na potrzeby układu niestandardowego dla różnych wariantów lokalizacji pola odkładczego. Heurystyka *s-shape* zostanie zmodyfikowana i dostosowana do potrzeb badanego układu strefy kompletacji zamówień dla 3 różnych lokalizacji pola odkładczego I/O.

Dodatковым celem jest wyprowadzenie wzorów matematycznych na średnie czasy kompletacji zamówień dla zaproponowanych niestandardowych stref kompletacji, które uwzględniać będą możliwość pobierania towarów o różnych współczynnikach rotacji. Skonfrontowane zostanie podejście analityczne i symulacyjne, omówione będą ich wady i zalety.

2. Układ magazynu i strefy kompletacji

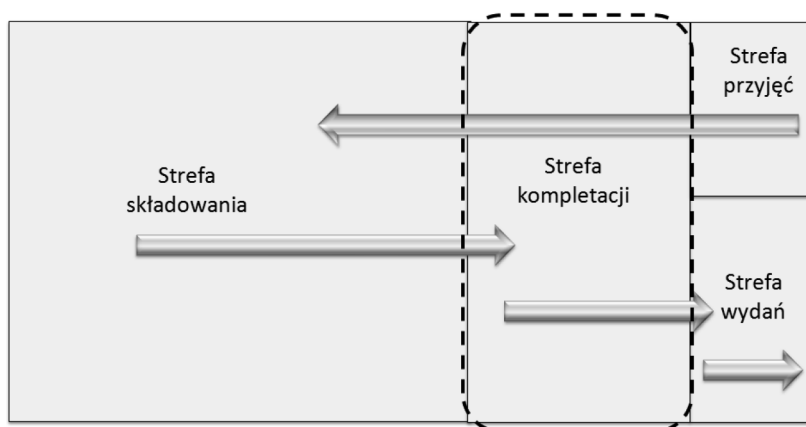
Proces magazynowy jest zestawem czynności, które są realizowane w trakcie przepływu towarów przez magazyn: od rozładunku środków transportu, przez przyjęcie

towarów na magazyn, składowanie, kompletację, aż po wydanie i załadunek na środki transportu. Proces magazynowy jest zespołem działań operacyjnych związanych z przepływem materiałów i informacji [Kisperska-Moroń, Krzyżaniak 2009].

Czynności magazynowe wykonywane są w wydzielonych przestrzeniach (strefach) magazynowych; są nimi [Kisperska-Moroń, Krzyżaniak 2009]:

- strefa przyjęć, w której wykonywane są czynności związane z rozładunkiem towarów ze środków transportu zewnętrznego celem przyjęcia ich do magazynu;
- strefa magazynowania (składowania), w której składowane są towary (w strefie składowania może odbywać się kompletacja);
- strefa kompletacji, w której pobierane są towary celem ich wdania; w wielu magazynach kompletacja odbywa się w strefie składowania, wówczas nie ma wydzielonej strefy kompletacji [Sitko, Gajdzik 2013];
- strefa wydań, dedykowana dla czynności wydania towarów i załadunku na środki transportu zewnętrznego.

Przykład układu magazynu i rozmieszczenia poszczególnych stref magazynowych zaprezentowano na rys. 1.



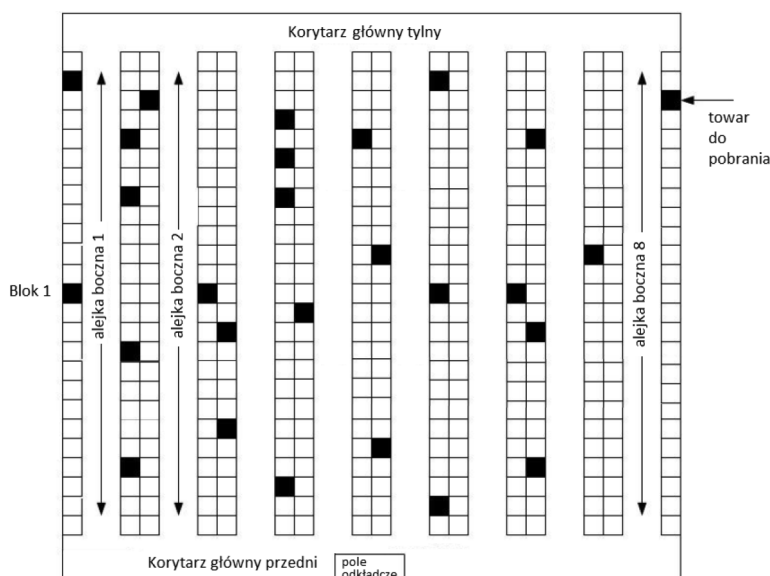
Rys. 1. Układ magazynu

Źródło: opracowanie własne.

Klasyczny układ strefy kompletacji zamówień (*basic warehouse layout, traditional warehouse layout*) jest jednoblokowy o kształcie prostokątnym (rys. 2). Do podstawowych elementów tworzących każdą strefę można zaliczyć korytarz główny przedni, korytarz główny tylny, równoległe ułożone alejki boczne, centralnie zlokalizowane pole odkładcze I/O oraz regały znajdujące się po obu stronach alejek bocznych, na których znajdują się towary pobierane w trakcie procesu kompletacji zamówień.

Jednak nie w każdym magazynie kształty stref kompletacji są symetryczne. Czasami pomieszczenia przeznaczone do kompletacji towarów z przyczyn zamierzo-

nych lub wymuszonych ograniczeniami warunkowanymi przez strukturę budynku, w jakim występują, nie są prostokątne. Przez niestandardowy układ strefy kompletacji rozumie się strefę kompletacji posiadającą kształt inny niż prostokątny, w której mogą, lecz nie muszą występować alejki boczne ułożone zarówno równoległe, jak i prostopadłe do siebie [Sabo-Zielonka 2015].



Rys. 2. Standardowy układ strefy kompletacji – układ jednoblokowy

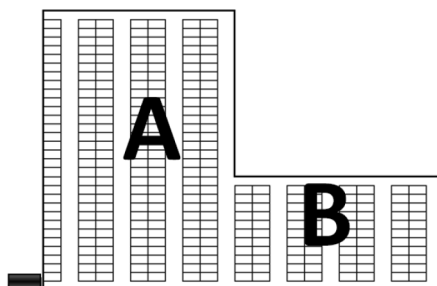
Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie badań własnych autorów, licznych obserwacji, a także wizyt w centrach logistycznych potwierdzono występowanie niestandardowych układów strefy kompletacji w warunkach rzeczywistych. Najczęściej występującą niestandardową postacią strefy kompletacji był układ, który swym kształtem przypomina literę L [De Koster, Le-Duc, Roodbergen 2007]. Na potrzeby badań przyjęto, iż taki kształt strefy kompletacji zamówień określany będzie jako układ *L-shape*.

Na rysunku 3 zaprezentowano przykład strefy kompletacji *L-shape* o układzie *vertical vertical* dla lokalizacji pola odkładczego zlokalizowanego pod blokiem A przy pierwszym regale. Przyjęta nazwa układu – *vertical vertical* – jest odzwierciedleniem ułożenia alejek bocznych i regałów względem siebie w blokach A oraz B.

Dodatkowo zostały wyróżnione trzy inne warianty układu regałów w strefie *L-shape*; są to odpowiednio układy [Sabo-Zielonka 2015]:

- *vertical horizontal*,
- *horizontal vertical*,
- *horizontal horizontal*.



Rys. 3. Układ *L-shape vertical vertical*

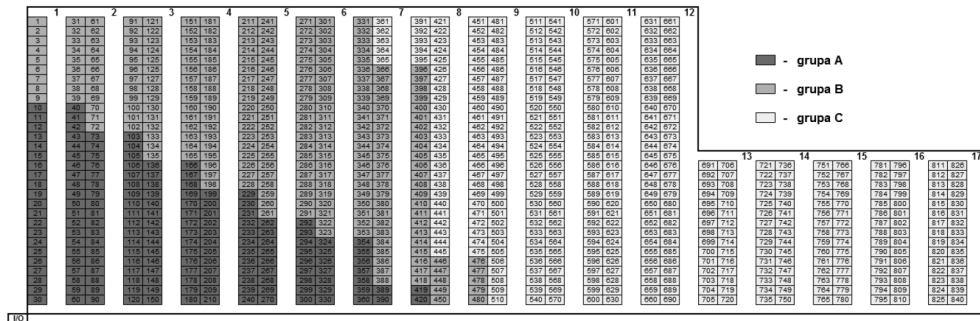
Źródło: opracowanie własne.

3. Rozmieszczenie towarów w magazynie

Zanim asortyment zostanie pobrany w procesie kompletacji, musi uprzednio zostać dostarczony i rozlokowany na półkach. Planowanie rozmieszczenia produktów w magazynie, określane też jako problem rozlokowania (rozmieszczenia) towarów na regałach i półkach, jest elementem niezwykle istotnym z punktu widzenia obiegu towarów w magazynie. Proces kompletacji zamówień jest ściśle powiązany z procesem rozlokowania towarów (*storage assignment*) w magazynie. Logicznym wnioskiem popartym wieloma badaniami jest stwierdzenie, że sposób rozmieszczenia towarów na półkach na wstępie ma bezpośrednie przełożenie na czas kompletacji zamówień, czyli proces występujący na dalszym etapie przepływu towarów przez magazyn. Rozlokowanie towarów jest czynnikiem determinującym efektywność procesu kompletacji (np. [Gaca 2009]).

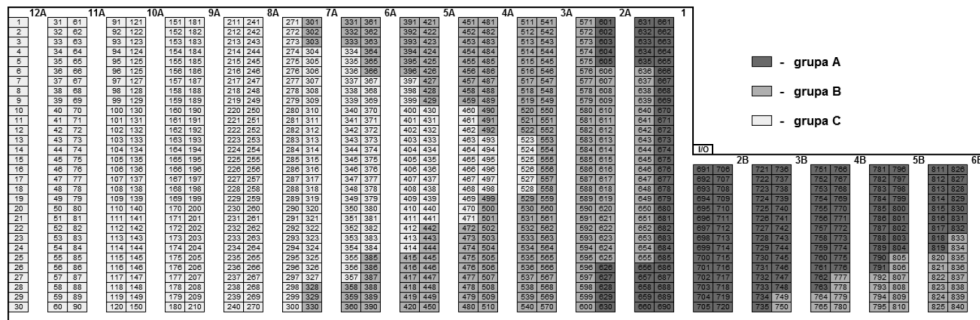
Optymalizacja rozmieszczenia produktów w magazynie jest jednym podstawowych rozwiązań, które pozwalają na zwiększenie efektywności funkcjonowania magazynu, przy czym jest to proces łatwiejszy w implementacji i zdecydowanie mniej kosztowny w porównaniu z problemami zarządzania zamówieniami czy planowania trasy kompletacji zamówień [Lorenc 2014].

Istnieje wiele dostępnych metod, według których można rozmieścić towary na półkach magazynu. W niniejszym artykule przyjęto rozmieszczenie towarów zgodne z klasyfikacją (*class-based storage*), które zakłada podział towarów na grupy, przy czym każda z grup przyporządkowana jest danemu obszarowi w strefie kompletacji. Wybraną klasyfikacją jest klasyfikacja ABC, która ma bardzo szerokie zastosowanie w logistyce, szczególnie w gospodarce magazynowej. Metoda ta polega na wyodrębnieniu z rozpatrywanego zbioru towarów w magazynie trzech grup, oznaczonych kolejno: A, B, C [Krzyżaniak 2005]. Grupa A stanowi 20% łącznej liczby towarów, grupa B – 30%, natomiast grupa C – pozostałe 50% towarów. Klasyfikacja ABC opiera się na zasadzie Pareto, mówiącej o tym, że 20% przyczyn rodzi 80% skutków. Kryterium pozwalającym na oszacowanie liczby towarów w każdej z grup



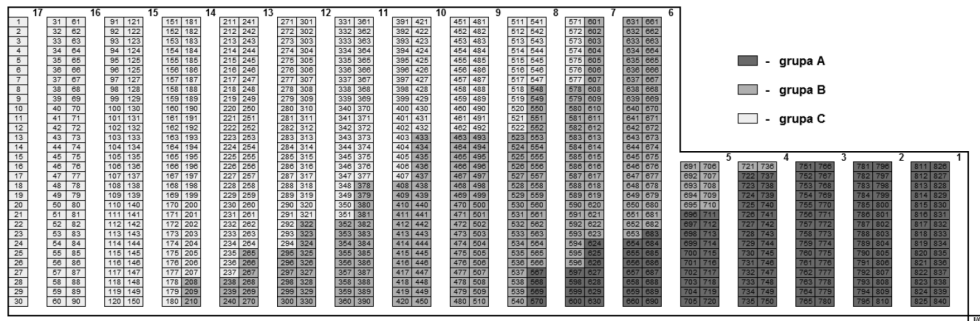
Rys. 4. Wariant 1 rozmieszczenia w magazynie towarów z klas A, B, C i umiejscowienia punktu I/O

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5. Wariant 2 rozmieszczenia w magazynie towarów z klas A, B, C i umiejscowienia punktu I/O

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6. Wariant 3 rozmieszczenia w magazynie towarów z klas A, B, C i umiejscowienia punktu I/O

Źródło: opracowanie własne.

w gospodarce magazynowej jest zazwyczaj częstotliwość pobrań lub wielkość wydań [Niemczyk 2008]. Analiza ABC według częstości pobrań stosowana jest do rozmieszczenia towarów w strefie kompletacji, natomiast analiza według wielkości wydań pozwala na zróżnicowanie towaru pod względem wielkości przepływu na wyjściu magazynu oraz umożliwia określenie wielkości lokalizacji zajmowanej przez towar w strefie kompletacji.

Na rysunkach 4-6 przedstawiono rozmieszczenie towarów w badanej strefie *L-shape* dla układu *vertical vertical*. Odcieniem szarości o największej intensywności oznaczone zostały półki, na których umieszcza się towary z grupy A, odcieniem o mniejszej intensywności – towary grupy B, a kolorem zbliżonym do białego – towary grupy C.

4. Założenia

Przedmiotem badań jest niestandardowy układ strefy kompletacji zamówień przypominającej swym kształtem literę L (*L-shape layout*). Rozpatrywany układ strefy kompletacji składa się z dwóch prostokątnych, połączonych ze sobą bloków: bloku A i B. W analizowanym przypadku mamy do czynienia z kompletacją manualną, w której osoba kompletująca zamówienie udaje się do lokalizacji, gdzie towar jest składowany. Zakłada się, że w danym momencie jedna osoba kompletuje wyłącznie jedno zamówienie (relacja 1:1). W celu skompletowania zamówienia konieczne jest pobranie koszyka z lokalizacji I/O, zebranie wszystkich towarów z listy kompletacyjnej oraz finalnie odłożenie koszyka ponownie do punktu I/O (poła odkładczego). Wszystkie puste i pełne koszyki pobierane i odkładane są do tej samej lokalizacji (I/O), przy czym może to być jedna z trzech dostępnych możliwości. Pierwsza możliwość to zlokalizowanie I/O po lewej stronie bloku A pod pierwszym regałem. Kolejny wariant umiejscowienia pola I/O znajduje się między blokiem A oraz blokiem B nad alejką dzielącą oba bloki. Natomiast trzecia i ostatnia możliwość lokalizacji pola I/O występuje po prawej stronie bloku B, pod ostatnią alejką. Zakłada się, że podczas jednego przejścia pobierane są wszystkie towary występujące na liście kompletacyjnej, a pojemność koszyka jest wystarczająca na ich pomieszczenie. Średni czas zainicjowania realizacji zamówienia, czyli pobrania koszyka przez magazyniera wynosi 5 s., natomiast średni czas pobrania 1 towaru wynosi 7 s.

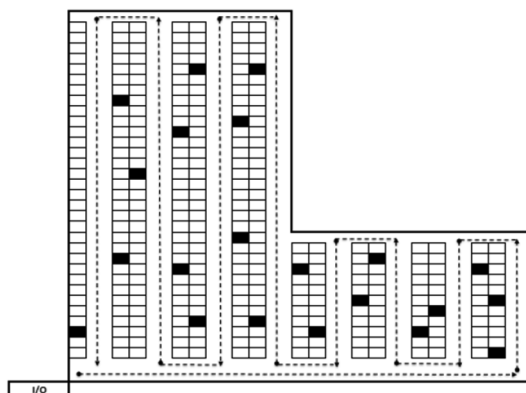
5. Adaptacja heurystyki *s-shape* dla układu *L-shape vv*

Magazynier porusza się po alejkach strefy kompletacji trasą, która swym kształtem przypomina literę S. Na potrzeby niestandardowego układu strefy kompletacji konieczne było wprowadzenie pewnych zmian i dla odróżnienia od standardowej heurystyki *s-shape* przyjęto nazwę *s-shape*". Algorytm heurystyki *s-shape*" rozpoczyna swe działanie od pobrania koszyka przez osobę kompletującą towary z lokalizacji I/O. Poniżej przedstawiono przebieg działania algorytmu heurystyki *s-shape*" dla układu *vertical vertical* w badanym układzie strefy kompletacji *L-shape*.

Algorytm heurystyki *s-shape*” dla układu *vertical vertical*, lokalizacja pola odładczonego 1 (rys. 4):

- Krok 1. Pobierz koszyk z lokalizacji I/O.
- Krok 2. Przejdź korytarzem głównym przednim, a następnie skręć w lewo w ostatnią alejkę, w której występuje przynajmniej jeden towar wymagający pobrania.
- Krok 3. Przejdź alejkę wzdłuż do końca, pobierając towary wymagające pobrania zgodnie ze zleceniem kompletacji, a następnie skręć w lewo w korytarz główny tylny.
- Krok 4. Skręć w lewo w pierwszą alejkę, w której występuje przynajmniej jeden towar wymagający pobrania, jeżeli alejka nie zawiera takich towarów pomiń ją i skręć w następną alejkę, w której takie towary występują.
- Krok 5. Przejdź alejkę wzdłuż, pobierz towary zgodnie ze zleceniem kompletacji, a następnie skręć w prawo w korytarz główny przedni.
- Krok 6. Skręć w prawo w pierwszą alejkę, w której występuje przynajmniej jeden towar wymagający pobrania, jeżeli alejka nie zawiera takich towarów pomiń ją i skręć w następną alejkę, w której takie towary występują.
- Krok 7. Powtarzaj kroki 3-6 do momentu pobrania ostatniego towaru.
- Krok 8. Pobierz ostatni towar, a następnie jeżeli:
 - liczba wszystkich odwiedzonych alejek jest parzysta; przejdź alejką do końca, a następnie skręć w prawo w korytarz główny przedni i powróć do miejsca startowego;
 - w przeciwnym przypadku powróć do korytarza głównego przedniego, skręć w prawo i powróć do miejsca startowego.
- Krok 9. Odłóż koszyk zawierający wszystkie skompletowane towary w lokalizacji I/O.

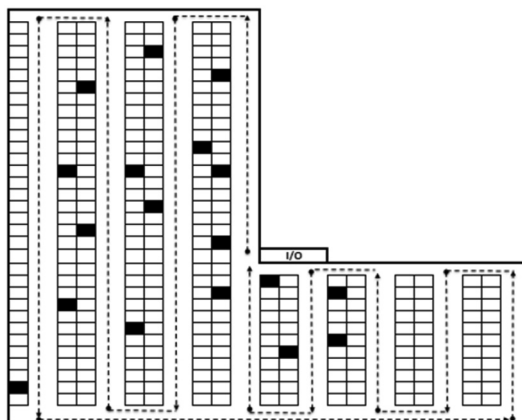
Ilustrację graficzną przebiegu działania algorytmu *s-shape*” dla układu *vertical vertical* dla lokalizacji 1 pola odładczonego I/O zaprezentowano na rys. 7.



Rys. 7. Heurystyka *s-shape*” układ *vertical vertical*, lokalizacja 1

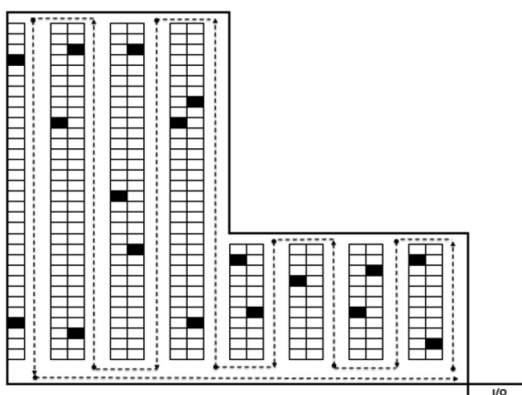
Źródło: opracowanie własne.

W sposób analogiczny na rys. 8-9 zaprezentowano przebiegi działania algorytmów odpowiednio dla lokalizacji 2 pola odkładczego I/O (między bokami) oraz 3 (pod blokiem B przy ostatniej alejce).



Rys. 8. Heurystyka *s-shape*” układ *vertical vertical*, lokalizacja 2

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 9. Heurystyka *s-shape*” układ *vertical vertical*, lokalizacja 3

Źródło: opracowanie własne.

6. Średnie czasy kompletacji – podejście analityczne

W celu wyznaczenia średnich czasów kompletacji zamówień wyprowadzone zostaną wzory matematyczne. Przyjęto następującą notację:

- d_h – dystans pokonany przez magazyniera w głównych korytarzach [m],
- d_v – dystans pokonany przez magazyniera w bocznych alejkach [m],

- d_{wej} – odległość między wejściami do dwóch sąsiadujących bocznych alejek w tym samym głównym korytarzu [m],
- d_i^{reg} – długość i -tej bocznej alejki [m],
- v – prędkość, z jaką porusza się magazynier [m/s],
- P_i – prawdopodobieństwo pobrania towaru z i -tej alejki,
- m_i – liczba indeksów towarów przechowywanych w i -tej alejce,
- p^k – prawdopodobieństwo pobrania towaru z klasy k ($k = A, B, C$),
- m^k – liczba indeksów towarów z klasy k przechowywanych w całym magazynie,
- m_i^k – liczba indeksów towarów z klasy k przechowywanych w i -tej alejce,
- M – całkowita liczba towarów przechowywana w magazynie,
- N – liczba bocznych alejek,
- N – liczba indeksów towarów na zamówieniu,
- T – czas kompletacji jednego zamówienia,
- t_{init} – czas zainicjowania i zakończenia kompletacji zamówienia,
- t_{pobr} – średni czas pobrania towaru.

Średnie czasy kompletacji zamówień dla zadanych parametrów magazynu i list kompletacyjnych mogą być wyznaczane nie tylko za pomocą symulacji, ale również w sposób analityczny. Generowanie zamówień jest procesem losowym i przypomina nieco losowanie ponumerowanych kulek z szuflady (numery kulek odpowiadają numerom półek w magazynie). W omawianych przykładach towary składowane w magazynie podzielone zostały na 3 klasy: A, B i C – prawdopodobieństwo wylosowania konkretnej kulki w ramach jednej klasy jest więc takie samo, ale różne dla różnych klas. Przyjęto – zgodnie z regułą Pareto i analogicznie, jak w innych opisanych w literaturze badaniach – że 20% indeksów towarów składowanych w magazynie to towary z klasy A, które generują 80% łącznego popytu. Towarów z grupy B jest 30%, a prawdopodobieństwo ich wystąpienia na zamówieniu wynosi 15%. Resztę stanowią liczne, ale stosunkowo najrzadziej kompletowane towary z klasy C:

$$\frac{m^A}{m^A + m^B + m^C} = 20\%,$$

$$\frac{m^B}{m^A + m^B + m^C} = 30\%,$$

$$\frac{m^C}{m^A + m^B + m^C} = 50\%,$$

$$m^k = \sum_i m_i^k,$$

$$p^A \cdot m^A = 80\%,$$

$$p^B \cdot m^B = 15\%,$$

$$p^C \cdot m^C = 5\%.$$

Badania przeprowadzane (m.in. przez autorów artykułu) na danych rzeczywistych pokazują, że przedstawiony rozkład prawdopodobieństwa w zbliżonej posta-

ci występuje w praktyce bardzo często. Oczywiście częstotści pobierania towarów w ramach jednej klasy wyznaczone na podstawie rzeczywistych zbiorów danych nie są identyczne, ale przyjęcie takiego założenia nie powinno spowodować znaczących zmian uzyskanych wyników.

Ponieważ częstotści występowania na zamówieniach towarów z różnych klas nie są jednakowe, więc również prawdopodobieństwa losowania pól odkładczych („kulek”) są różne dla towarów z różnych klas. W zasadzie, generując towary na zamówienia, mamy do czynienia z losowaniem bez zwracania. Właściwe byłoby więc wykorzystanie zmodyfikowanego rozkładu hipergeometrycznego. Wiadomo jednak, że magazyn jest duży, a liczba indeksów towarów w nim przechowywanych wynosi 11760 (w każdej alejce znajduje się od 210 do 840 indeksów). Punktem wyjścia do dalszych rozważań będzie więc rozkład dwumianowy (losowanie ze zwracaniem), który dla dużych problemów stanowi dobre przybliżenie rozkładu hipergeometrycznego.

Tabela 1. Liczba indeksów towarów składowanych w alejkach i prawdopodobieństwa pobrania towarów – wariant 1 magazynu

Numer alejki	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Liczba indeksów towarów z klasy A składowanych w alejce	588	504	420	336	252	196	56	0	0
Liczba indeksów towarów z klasy B składowanych w alejce	252	336	420	504	588	644	644	140	0
Liczba indeksów towarów z klasy C składowanych w alejce	0	0	0	0	0	0	140	700	840
Prawdopodobieństwo pobrania towaru z alejki	,2107	,1857	,1607	,1357	,1107	,0940	,0476	,0119	,0071
Numer alejki	10	11	12	13	14	15	16	17	Razem
Liczba indeksów towarów z klasy A składowanych w alejce	0	0	0	0	0	0	0	0	2352
Liczba indeksów towarów z klasy B składowanych w alejce	0	0	0	0	0	0	0	0	3528
Liczba indeksów towarów z klasy C składowanych w alejce	840	840	630	420	420	420	420	210	5880
Prawdopodobieństwo pobrania towaru z alejki	,0071	,0071	,0054	,0036	,0036	,0036	,0036	,0018	1

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2. Liczba indeksów towarów składowanych w alejkach i prawdopodobieństwa pobrania towarów – wariant 2 magazynu

Numer alejki	12A	11A	10A	9A	8A	7A	6A	5A	4A
Liczba indeksów towarów z klasy A składowanych w alejce	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Liczba indeksów towarów z klasy B składowanych w alejce	0	0	0	0	0	168	336	504	672
Liczba indeksów towarów z klasy C składowanych w alejce	840	840	840	840	840	672	504	336	168
Prawdopodobieństwo pobrania towaru z alejki	,0071	,0071	,0071	,0071	,0071	,0129	,0186	,0243	,0300
Numer alejki	3A	2A	1	2B	3B	4B	5B	6B	Razem
Liczba indeksów towarów z klasy A składowanych w alejce	0	280	630	420	364	308	252	98	2352
Liczba indeksów towarów z klasy B składowanych w alejce	840	560	0	0	56	112	168	112	3528
Liczba indeksów towarów z klasy C składowanych w alejce	0	0	0	0	0	0	0	0	5880
Prawdopodobieństwo pobrania towaru z alejki	,0357	,1190	,2143	,1429	,1262	,1095	,0929	,0381	1

Źródło: opracowanie własne.

Bezpośrednie skorzystanie z rozkładu dwumianowego byłoby jednak możliwe tylko wtedy, gdy wszystkie alejki w magazynie miałyby takie same parametry: długość alejki, liczba przechowywanych indeksów i prawdopodobieństwo ich pobrania. Analizowany przez autorów problem nie spełnia żadnego z tych warunków: alejki mają różną długość, a towary w nich przechowywane pobierane są z różną częstością. Liczby indeksów towarów z poszczególnych klas przechowywanych w alejkach oraz prawdopodobieństwa pobrania towaru z alejek zawierają tab. 1-3.

Prawdopodobieństwa pobrania towarów z alejek przedstawione w tab. 1-3 wyznaczono zgodnie ze wzorem:

$$P_i = \sum_k m_i^k \cdot p^k.$$

Na średni dystans pokonywany przez magazyniera podczas procesu kompletacji zamówienia składa się odległość, którą przebył on w głównym korytarzu i w bocznych alejkach.

Tabela 3. Liczba indeksów towarów składowanych w alejkach i prawdopodobieństwa pobrania towarów – wariant 3 magazynu

Numer alejki	17	16	15	14	13	12	11	10	9
Liczba indeksów towarów z klasy A składowanych w alejce	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Liczba indeksów towarów z klasy B składowanych w alejce	0	0	0	84	168	252	364	504	504
Liczba indeksów towarów z klasy C składowanych w alejce	840	840	840	756	672	588	476	336	336
Prawdopodobieństwo pobrania towaru z alejki	,0071	,0071	,0071	,0100	,0129	,0157	,0195	,0243	,0243
Numer alejki	8	7	6	5	4	3	2	1	Razem
Liczba indeksów towarów z klasy A składowanych w alejce	112	196	252	336	406	420	420	210	2352
Liczba indeksów towarów z klasy B składowanych w alejce	532	644	378	84	14	0	0	0	3528
Liczba indeksów towarów z klasy C składowanych w alejce	196	0	0	0	0	0	0	0	5880
Prawdopodobieństwo pobrania towaru z alejki	,0624	,0940	,1018	,1179	,1387	,1429	,1429	,0714	1

Źródło: opracowanie własne.

Dla pierwszego i trzeciego rozpatrywanego wariantu magazynu punkt przyjęcia i wydania towarów, w którym magazynier rozpoczyna i kończy kompletację każdego zamówienia znajduje się przy skrajnej alejce. Aby wyznaczyć średni dystans, który zostanie pokonany w głównym korytarzu, należy dla każdej alejki wyliczyć, jakie jest prawdopodobieństwo, że pracownik będzie przechodził koło jej wejścia. Prawdopodobieństwo to zależy od liczby towarów na zamówieniu n :

$$P(\text{wszystkie pobierane towary są w } j-1 \text{ początkowych alejkach}) = \left(\sum_{i=1}^{j-1} P_i \right)^n.$$

$$\begin{aligned} P(\text{magazynier dojdzie do } j\text{-tej alejki}) &= \\ &= 1 - P(\text{wszystkie pobierane towary są w } j-1 \text{ początkowych alejkach}) = \\ &= 1 - \left(\sum_{i=1}^{j-1} P_i \right)^n. \end{aligned}$$

Dla drugiego wariantu magazynu punkt, w którym magazynier zaczyna i kończy kompletację zamówień znajduje się przy jednej ze środkowych alejek. W tym przypadku przy obliczaniu odpowiednich prawdopodobieństw należy osobno rozpatrywać część magazynu znajdującą się po prawej i po lewej stronie punktu startowego.

Wartość oczekiwana odległości pokonanej przez magazyniera w głównym korytarzu wynosi więc (dystans mnożony jest przez 2, ponieważ trasa pokonywana jest dwukrotnie: pierwszy raz po towary, a drugi raz z towarami):

$$E(d_h) = 2 \cdot \left(\sum_{j=1}^N \left(1 - \left(\sum_{i=1}^{j-1} P_i \right)^n \right) - 1 \right) \cdot d_{wej}.$$

Do obliczenia odległości pokonywanej w bocznych alejkach niezbędne jest wyznaczenie dla każdej alejki prawdopodobieństwa wejścia do niej przez magazyniera:

$$\begin{aligned} P(\text{magazynier wejdzie do } j\text{-tej alejki}) &= \\ = 1 - P(\text{wszystkie pobierane towary są w innych alejkach}) &= \\ = 1 - (1 - P_j)^n. \end{aligned}$$

Dokonując kompletacji zgodnie z metodą *s-shape*, magazynier prawie zawsze po wejściu do bocznej alejki pokonuje całą jej długość (wyjątkową sytuację opisuje np. [Hall 1993]). Średni dystans pokonywany przez magazyniera w bocznych alejkach jest więc przy takich założeniach równy:

$$\begin{aligned} E(d_v) &= \sum_{j=1}^N P(\text{magazynier wejdzie do } j\text{-tej alejki}) \cdot d_j^{reg} = \\ &= \sum_{j=1}^N \left((1 - (1 - P_j)^n) \cdot d_j^{reg} \right). \end{aligned}$$

Na średni czas kompletacji zamówień wpływ ma nie tylko dystans pokonany przez magazyniera, ale też czas pobrania towaru i czas inicjalizacji i zakończenia procesu kompletacji.

$$E(t) = \frac{d_h + d_v}{v} + n \cdot t_{pobr} + t_{init}.$$

W tabeli 4 porównano średnie czasy kompletacji zamówień dla trzech wariantów magazynu uzyskane za pomocą symulacji i wzorów. Najmniejszą wartość błędu osiągnięto dla wariantu 1 (poniżej 5%), a największą dla trzeciego wariantu magazynu i kompletacji 20 towarów – ponad 11%. Błąd spowodowany jest w głównej mierze nieuwzględnieniem możliwości innego zachowania się magazyniera w ostatniej alejce. W standardowym magazynie, jeśli liczba alejek, do których wchodzi magazynier jest parzysta, dystans pokonany przez magazyniera równy jest iloczynowi ich liczby i długości. Jeśli liczba jest nieparzysta, wówczas ostatnia alejka pokonywana

jest zgodnie z heurystyką *return* (magazynier zawraca). W przedstawionych obliczeniach nie uwzględniono tego problemu. Jest on stosunkowo łatwy do rozwiązania w przypadku losowego rozmieszczenia przedmiotów, przy podziale na klasy ABC sytuacja się komplikuje. Dodatkową trudność stanowi różna długość alejek, co jednak znalazło odzwierciedlenie w prezentowanych wzorach.

Najkrótsze czasy kompletacji uzyskano dla pierwszego wariantu rozmieszczenia towarów i lokalizacji pola odkładczego. Tylko dla niewielkiej liczby towarów na zamówieniu lepsze wyniki dał wariant drugi. Lokalizacja pola odkładczego nie na krawędzi strefy kompletacyjnej, jak ma to miejsce w wariantach pierwszym i trzecim, tylko wewnątrz tej strefy, umożliwiła łatwiejszy dostęp do towarów najszybciej rotujących. Skutkuje to gorszym dostępem do pozostałych towarów, co powoduje dłuższe czasy kompletacji przy większych zamówieniach.

Tabela 4. Średnie czasy kompletacji zamówień uzyskane za pomocą wzorów i symulacji

	Liczba towarów na zamówieniu	Średni czas kompletacji		Błąd
		symulacje	wzory	
Wariant 1	5	10:50	10:50	0,02%
	10	13:22	13:27	0,57%
	15	17:39	18:13	3,25%
	20	23:14	22:10	4,58%
Wariant 2	5	10:16	9:22	8,81%
	10	14:57	14:32	2,83%
	15	23:33	21:37	8,17%
	20	27:15	24:43	9,32%
Wariant 3	5	10:30	9:37	8,40%
	10	15:59	15:05	5,65%
	15	20:23	19:09	6,07%
	20	28:58	25:43	11,23%

Źródło: opracowanie własne.

7. Zakończenie

Problem minimalizacji czasu kompletacji zamówień jest niezwykle istotny zarówno dla zwiększenia jakości obsługi klientów, jak i optymalizacji kosztów operacyjnych magazynu. Kluczowym elementem jest utworzenie takich stref kompletacyjnych, które umożliwią magazynierowi łatwy dostęp do towarów najszybciej rotujących. Zadanie to nie zawsze jest możliwe do wykonania w przypadku adaptacji na potrzeby magazynowe budynków już istniejących. W takim przypadku warianty najczęściej opisywane w literaturze nie mają zastosowania. Z przeprowadzonych badań

wynika, że dla magazynów o niestandardowym kształcie – dwublokowych nieprostokątnych – kluczowe znaczenie ma lokalizacja pola odkładczego, w sąsiedztwie którego rozmieszczone są towary szybko rotujące. Różnice w czasach kompletacji zamówień w zależności od sposobu lokalizacji pola odkładczego wynoszą od 5% do 33% (dla różnych wielkości zamówień).

Weryfikacja projektowanych rozwiązań (wariantów decyzyjnych) może odbywać się w sposób analityczny lub symulacyjny. Oba podejścia mają swoje wady i zalety. Podejście analityczne pozwala na obliczenie średnich czasów kompletacji zamówień dla zadanych parametrów natychmiast, symulacje komputerowe są natomiast bardziej czasochłonne. W wyniku zastosowania wzorów matematycznych uzyskuje się tylko wartości średnie (można też próbować oszacować wariancję). Symulacje natomiast generują pełną informację o rozkładzie prawdopodobieństwa. Umożliwiają również porównywanie czasów kompletacji dla tych samych zamówień, ale realizowanych przy innych parametrach magazynu. Zarówno model symulacyjny, jak i analityczny wymagają przyjęcia pewnych założeń, uproszczenia badanego zjawiska. Metody symulacyjne pozwalają na uzyskanie dokładnych wyników dla przyjętego modelu, w przypadku podejścia analitycznego wyniki nie są tak precyzyjne.

Literatura

- 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, 182(2), s. 481-501.
- Dmytrów K., 2013, *Procedura kompletacji zakładająca oczyszczenie lokalizacji*, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania, tom 2 Metody Ilościowe w Ekonomii, nr 31, Szczecin, s. 22-36.
- Dmytrów K., 2015, *Taksonomiczne wspomaganie wyboru lokalizacji w procesie kompletacji produktów*, Studia Ekonomiczne 248, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice, s. 17-30.
- Dmytrów K., Doszyń M., 2015, *Taksonomiczna procedura wspomagania kompletacji produktów w magazynie*, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Taksonomia 25, *Klasyfikacja i analiza danych – teoria i zastosowania*, Wrocław, s. 72-80.
- Gaca K., 2009, *Rozlokowanie towarów jako czynnik determinujący efektywność procesu kompletacji*, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Organizacja i Zarządzanie, Łódź.
- Kisperska-Moroń D., Krzyżaniak S., 2009, *Logistyka*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań.
- Krzyżaniak S., 2005, *Podstawy zarządzania zapasami w przykładach*, Wydawnictwo Instytutu Logistyki i Magazynowania, Poznań, s. 20-25.
- Le Duc T., De Koster R., 2005, *Travel Distance Estimation in Single-block ABC-Storage Strategy Warehouses*, [w:] *Distribution Logistics*, Springer Berlin Heidelberg, s. 185-200.
- Lorenc A.K., 2014, *Metody klasyfikacji i rozmieszczania produktów w magazynie – przegląd praktycznych rozwiązań*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Logistyka, nr 3/2014, s. 3831-3837.
- Niemczyk A., 2008, *Zapasy i magazynowanie*, tom II, *Magazynowanie*, Biblioteka Logistyka, Poznań.
- Petersen C.G., Schmenner R.W., 1999, *An evaluation of routing and volume-based storage policies in an order picking operation*, Decision Sciences, no 30.2, s. 481-501.

- Sabo-Zielonka A., 2015, *Heurystyki wyznaczania tras w dwublokowej nieprostokątnej strefie kompletacji zamówień*, [w:] *Studia ekonomiczne*, Trzaskalik T. (red.), Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice.
- Sitko J., Gajdzik B., 2013, *Charakterystyka funkcjonowania systemu magazynowego w firmie Market S.A.*, [w:] *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, Knosala R. (red.), Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, s. 503-514.
- Tarczyński G., 2015, *Średnie czasy kompletacji zamówień dla heurystyki s-shape – wzory i symulacje*, *Studia Ekonomiczne* 237, *Informatyka i Ekonometria* 2, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice, s. 104-116.