

dr Krzysztof DMYTRÓW

Wydział Nauk Ekonomicznych i Zarządzania, Uniwersytet Szczeciński

e-mail: krzysztof.dmytrow@usz.edu.pl

ORCID: 0000-0001-7657-6063

DOI: 10.15290/oes.2018.03.93.23

WPLYW WAG W METODZIE TOPSIS NA DŁUGOŚĆ TRASY POKONYWANEJ PRZEZ MAGAZYNIERA W ZALEŻNOŚCI OD ROZMIARU ZAMÓWIENIA

Streszczenie

Cel – zbadanie wpływu przyjętego systemu wag w metodzie TOPSIS podczas wyboru lokalizacji na długość trasy pokonywanej przez magazyniera podczas procesu kompletacji produktów w zależności od rozmiaru zamówienia.

Metodologia badania – Gdy przedsiębiorstwo stosuje przechowywanie współdzielone, wybór lokalizacji, z której zamówiony produkt będzie pobrany jest jednym z ważniejszych problemów w procesie kompletacji. Dla każdego produktu lokalizacja może być wybrana na podstawie jednego lub kilku kryteriów. W artykule zostały wykorzystane trzy kryteria, dla których za pomocą metody TOPSIS została zbudowana miara syntetyczna, mierząca poziom atrakcyjności każdej lokalizacji. Zastosowano siedem kombinacji wag. Po wyborze lokalizacji, za pomocą heurystyki *s-shape*, została wyznaczona trasa, którą musi pokonać magazynier. Powyższa analiza została przeprowadzona dla trzech rozmiarów pojedynczego zamówienia, w którym było 10, 20 oraz 30 produktów. Zbadano po 20 zleceń dla wielkości pojedynczego zamówienia wynoszących 10 i 20 różnych produktów oraz 15 zleceń dla zamówień 30-elementowych, a różnice pomiędzy otrzymanymi wynikami dla każdej wielkości zamówienia zostały zbadane za pomocą jednoczynnikowej analizy wariancji.

Wynik – Dla zamówień 10- i 20-elementowych występowały istotne różnice w średnich długościach trasy pokonywanej przez magazyniera, natomiast w przypadku zamówień 30-elementowych różnice nie były istotne statystycznie. W analizowanym przypadku oplacało się nadać dużą wagę kryterium, które preferuje te lokalizacje blisko których są inne kompletowane produkty.

Oryginalność/Wartość – wykorzystanie metod wielokryterialnego podejmowania decyzji w wyborze lokalizacji podczas procesu kompletacji produktów i zastosowanie ich dla rzeczywistych danych w przedsiębiorstwie zajmującym się dystrybucją narzędzi i odzieży roboczej.

Słowa kluczowe: kompletacja, gospodarka magazynowa, heurystyka *s-shape*, metoda TOPSIS

THE INFLUENCE OF WEIGHTS IN THE TOPSIS METHOD ON THE LENGTH OF ROUTE TRAVELLED BY THE PICKER WITH RELATION TO THE ORDER SIZE

Summary

Goal – the analysis of applied system of weights in the TOPSIS during selection of locations on route length during order-picking with respect to the order size.

Research methodology – When a company utilises the shared storage, selection of location from which the product will be picked is one of the crucial problems in the process of order picking. For

each product, the location can be selected on the basis of one or more features. The article presents three features, for which on the basis of the TOPSIS method, a synthetic measure was constructed. Seven combinations of weights were applied. After selection of locations, on the basis of the *s-shape* heuristic the picker's route was designated. The analysis was performed for three sizes of the single order: 10, 20 and 30 different products. 20 orders for 10 and 20 different products and 15 orders for 30 different products were analysed. Differences between the obtained results were analysed by means of the one-way ANOVA.

Score – For orders with 10 and 20 different products there were significant differences in mean route lengths, while for orders with 30 different products, these differences were not statistically significant. In the analysed example, the decision maker should assign big weight to the criterion that prefers locations, close to which the other ordered products are located.

Originality /value – application of the multiple-criteria decision-making techniques in selection of locations during the order-picking and using them for the real data in a company that deals with distribution of tools and workwear.

Keywords: order-picking, warehouse management, the *s-shape* heuristics, TOPSIS method

JEL classification: C12, C44, D22

1. Wstęp

Wybór lokalizacji, które magazynier powinien odwiedzić, ażeby skompletować zamówienie, nie zawsze jest zagadnieniem prostym. O ile problem ten nie występuje w tak zwanym *przechowywaniu dedykowanym*, w którym każdy produkt występuje tylko w jednej lokalizacji (ewentualnie w wielu, ale położonych na przykład na jednym regale, jeżeli rozmiary produktu są takie, że jego zapas nie zmieści się na jednej półce), o tyle nabiera dużego znaczenia w przypadku *przechowywania współdzielonego*. W tym przypadku może on być przechowywany w wielu lokalizacjach, często leżących w zupełnie różnych częściach magazynu, jak i w jednej lokalizacji może być przechowywanych wiele różnych produktów [Bartholdi, Hackman, 2016, s. 14-18].

Istnieje kilka rodzajów przechowywania współdzielonego – przechowywanie chaotyczne, składowanie w najbliższej wolnej lokalizacji oraz składowanie według klasy [De Koster, Le-Duc, Roodbergen, 2007, s. 491]. Przechowywanie chaotyczne (*chaotic storage*) nazywane jest czasami przechowywaniem według dowolnego porządku składowania (*free storage order*) [Gudehus, Kotzab, 2012, s. 478]. Taki system jest racjonalny, gdy wszystkie produkty są zamawiane mniej więcej tak samo często i w podobnych ilościach. Składowanie w najbliższej wolnej lokalizacji jest racjonalne, jeżeli chcemy zminimalizować czas rozmieszczania produktów w magazynie – wtedy umieszczamy zamówiony produkt w pierwszej napotkanej wolnej lokalizacji, o ile się on w niej zmieści. Przechowywanie według klasy stosujemy, gdy jedne produkty są zamawiane częściej niż inne (wtedy powinny być rozmieszczane bliżej punktu odładczego) – takie podejście znacznie skraca drogę pokonywaną przez magazyniera i czas kompletacji produktów nawet o 40% w porównaniu z przechowywaniem chaotycznym [Le-Duc, 2005, s. 41].

To, jak są rozmieszczane produkty w magazynie, wpływa istotnie na sposób ich pobierania i na wybór lokalizacji do odwiedzenia przez magazyniera. Lokalizacje,

które magazynier ma odwiedzić, można wybierać za pomocą jednego lub wielu kryteriów. W literaturze przedmiotu ten problem nie jest dostatecznie rozpoznany. Analizując problem kompletacji produktów, a co za tym idzie, wyznaczanie trasy, którą ma pokonać magazynier, zakłada się, że dany produkt występuje tylko w jednym miejscu w magazynie [Tarczyński, 2017, s. 194]. W większości przypadków nie jest to prawdą, ponieważ obecnie w przedsiębiorstwach stosuje się najczęściej przechowywanie współdzielone. Częstkowe podejście do tego zagadnienia można spotkać we wspomnianej wcześniej pracy Gudehusa i Kotzaba [2012, s. 579]. Wspomniano tam kilka strategii wyboru lokalizacji, z której można pobrać produkt, jeżeli występuje w więcej, niż jednym miejscu:

- FIFO (*First-In-First-Out*, czyli pierwszy na wejściu, pierwszy na wyjściu),
- pierwszeństwo mają te lokalizacje, w których popyt jest zaspokojony częściowo,
- regulacja ilości,
- pobieranie jednostki przechowywania.

Pierwsza strategia (FIFO) jest strategią naturalną, gdy mamy do czynienia z produktami o okresie przydatności porównywalnym bądź krótszym niż średni okres jego rotacji. Taka sytuacja występuje na przykład dla produktów spożywczych. Strategię drugą stosuje się, gdy w różnych lokalizacjach występują niewielkie ilości kompletowanego produktu, a celem jest oczyszczenie z nich lokalizacji. Taka strategia wymaga większego nakładu pracy magazyniera, a co za tym idzie, pokonania większej drogi i dłuższego czasu kompletacji. W strategii trzeciej wybiera się te lokalizacje, w których występuje najwięcej produktów (idealny jest wybór lokalizacji, w której zapotrzebowanie na produkt jest zaspokojone w całości). Jej zaletą jest to, że magazynier będzie musiał odwiedzić mniej lokalizacji, czyli zlecenie zostanie skompletowane możliwie szybko, a wadą to, że stosowanie jej zwiększa rozproszenie produktów w magazynie. Strategia czwarta jest podobna do trzeciej z tym, że jeżeli w danej lokalizacji występuje pełne opakowanie kompletowanego produktu oraz opakowanie już napoczęte, a należy pobrać ilość równą pełnemu opakowaniu, to pobierane jest pełne opakowanie, a napoczęte pozostawia się.

Nawet jeżeli stosuje się którąś z powyższych strategii, to czasami zastosowanie tylko jednego kryterium nie wystarczy, żeby wybrać lokalizację, którą należy odwiedzić. Jeżeli na przykład stosuje się strategię FIFO i jest kilka lokalizacji, w których dany produkt jest jednakowo długo przechowywany, wówczas należy dodać drugie kryterium – na przykład wybrać lokalizację bliżej punktu odkładczego, czy tę, w której dany produkt występuje w większej ilości. Dlatego problem wyboru lokalizacji, które należy odwiedzić, ażeby skompletować zamówienie, jest problemem wielokryterialnego podejmowania decyzji. Jeżeli dany produkt występuje w wielu lokalizacjach, każdą z nich opisuje się za pomocą wybranych kryteriów. Następnie za pomocą wybranej metody wielokryterialnego podejmowania decyzji wybiera się najbardziej atrakcyjną z punktu widzenia danego zlecenia lokalizację, którą należy odwiedzić, aby pobrać z niej dany produkt.

Istnieje wiele metod wielokryterialnego podejmowania decyzji. W badanym przypadku (gdy istnieje skończona liczba alternatyw, a każda z nich jest reprezentowana

przez skończoną liczbę kryteriów o znanych wartościach) naturalnym wyborem są dyskretne metody wielokryterialnego podejmowania decyzji. Wśród nich można wyróżnić następujące: AHP, ANP, Electre, SAW, COPRAS, podejście oparte na funkcji straty, czy metoda TOPSIS [Trzaskalik, 2015; Podvezko, 2011; Vommi, Kakollu, 2016].

W niniejszej pracy zastosowano metodę TOPSIS (*Technique for the Order of Prioritisation by Similarity to Ideal Solution*). Wybór tej metody podyktowany był faktem, że jest to jedna z najczęściej używanych metod wielokryterialnego podejmowania decyzji. Za jej pomocą zostały wybrane lokalizacje do odwiedzenia. Lokalizacje zostały opisane przez trzy kryteria – odległość lokalizacji od punktu odkładczego, stopień zaspokojenia zapotrzebowania oraz liczbę innych kompletowanych produktów w sąsiedztwie badanej lokalizacji [Dmytrów, 2015, 2016]. Zbadano zlecenia kompletacyjne dla trzech różnych rozmiarów pojedynczego zamówienia – 10, 20 oraz 30 różnych produktów. Następnie za pomocą heurystyki *s-shape* została wyznaczona trasa, którą pokona magazynier w trakcie procesu kompletacji. Zastosowanie tej heurystyki podyktowane jest faktem, że jest ona najczęściej stosowana w praktyce i najłatwiejsza do implementacji [Tarczyński, 2012]. Ponieważ przemieszczanie się magazyniera stanowi największy odsetek czasu procesu kompletacji (około 55%) [Bartholdi, Hackman, 2016, s. 25], dlatego kryterium podejmowania decyzji będzie minimalizacja łącznej drogi pokonywanej przez magazyniera. Celem badania jest sprawdzenie, czy wagi przypisane poszczególnym kryteriom wpływają istotnie na długość trasy pokonywanej przez magazyniera w zależności od wielkości zamówienia.

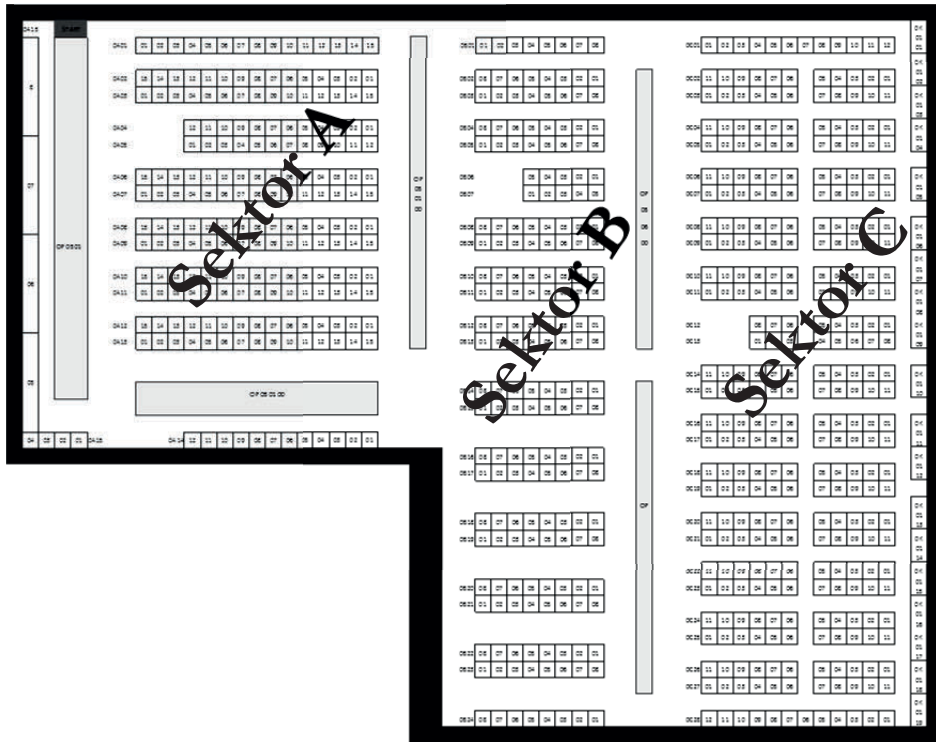
2. Opis problemu decyzyjnego i zastosowanej metody

Opisywane zagadnienia kompletacji dotyczyły zleceń realizowanych w rzeczywistym magazynie niskiego składowania. Magazyn ten znajduje się w przedsiębiorstwie, zlokalizowanym w pobliżu Szczecina, będącym oddziałem dużej międzynarodowej firmy zajmującej się produkcją i dystrybucją narzędzi i odzieży roboczej. Składa się on z trzech sektorów – A, B i C. W lewym górnym rogu znajduje się punkt odkładczy (zaznaczony na czerwono). Plan magazynu przedstawiono na rysunku 1.

W toku uzupełniania stanów magazynowych i kompletowania zamówień pojawiły się następujące problemy:

- Produkty są rozmieszczane we wszystkich sektorach w magazynie.
- W najbliższym położonym sektorze (A) są pobierane najczęściej, dlatego generalnie są one w tym sektorze najbardziej rozproszone.
- Produkty są najrzadziej pobierane z sektora położonego najdalej (C), dlatego tam na ogół w pojedynczej lokalizacji znajduje się najwięcej jednostek produktów.

Plan magazynu



Źródło: opracowanie własne.

Magazynier porusza się po magazynie w sposób następujący:

- Jeżeli odwiedza tylko jeden sektor (obojętnie, czy A, B, czy C), to porusza się w kierunku od początku do końca sektora (początek każdego sektora jest to lokalizacja, która jest położona najbliżej punktu odkładczego, a przez koniec sektora rozumie się najdalszą alejkę, do której musi się udać magazynier, aby pobrać kompletowany produkt), po czym wraca do punktu odkładczego.
- Jeżeli odwiedza sektory A i B, to najpierw porusza się od początku do końca sektora A, a potem od końca do początku sektora B.
- Jeżeli odwiedza sektory A i C, to najpierw porusza się od początku do końca sektora A, a potem od końca do początku sektora C.
- Jeżeli odwiedza sektory B i C, to najpierw porusza się od początku do końca sektora B, a potem od końca do początku sektora C.
- Jeżeli odwiedza wszystkie sektory, to najpierw porusza się od początku do końca sektora A, następnie od początku do końca sektora B, a potem od końca do początku sektora C.

W analizowanych przypadkach wszystkie zlecenia dotyczyły towarów znajdujących się we wszystkich sektorach. Jak wspomniano we wprowadzeniu, każda lokalizacja (wariant decyzyjny), w której znajdują się produkty w danym zleceniu komplecacyjnym, została opisana za pomocą trzech kryteriów:

x_1 – odległość lokalizacji od punktu odkladczego,

x_2 – stopień zaspokojenia zapotrzebowania,

x_3 – liczba innych kompletowanych produktów w sąsiedztwie badanej lokalizacji.

Odległość lokalizacji od punktu odkladczego jest kryterium typu „strata” – pożądana jest jak najmniejsza jej wartość. Jest ona mierzona w umownych jednostkach, którymi są szerokości regału. Stopień zaspokojenia zapotrzebowania jest kryterium typu „zysk” – pożądana jest jak największa jej wartość. Wyznacza się go za pomocą następującego wzoru:

$$x_2 = \begin{cases} l & \text{gdy } z > l, \\ \frac{l}{z} & \\ 1 & \text{gdy } l \geq z \end{cases}, \quad (1)$$

gdzie:

l – liczba jednostek kompletowanego produktu, znajdująca się w danej lokalizacji,

z – zapotrzebowanie na kompletowany produkt.

Liczba innych kompletowanych produktów w sąsiedztwie badanej lokalizacji jest kryterium typu „zysk”. Należy zaznaczyć, że pojęcie „sąsiedztwo” można rozumieć na wiele sposobów. Może to być pion jednego regału (szczególnie w przypadku magazynu wysokiego składowania), mogą to także być wszystkie lokalizacje leżące wzdłuż jednej alejki. Takie podejście zastosowano w niniejszym przypadku. Wartości wszystkich kryteriów są mierzone na skali ilorazowej.

W wielokryterialnym podejmowaniu decyzji kryteriom należy nadać wagi. Można to zrobić za pomocą metod statystyczno-formalnych albo eksperckich. Do metod statystyczno-formalnych można zaliczyć wyznaczanie wag na podstawie zmienności kryteriów [Kukuła, 2000]. Innym podejściem jest podejście oparte na mierze entropii Shannona [Lotfi, Fallahnejad, 2010]. Z kolei metoda ekspercka może być oparta na metodzie AHP Saaty’ego, w której eksperci dokonują porównań kryteriów parami i na tej podstawie ustalane są ich wagi [Trzaskalik, 2015]. Wymienione podejścia mają szczególne zastosowanie jeżeli występuje dużo kryteriów decyzyjnych. Gdy ich liczba jest niewielka (a tak jest w tym przypadku), wówczas można bezpośrednio nadać wagi w sposób subiektywny. Tak przyjęto w niniejszym artykule i założono, że zostanie zbadanych siedem kombinacji wag. Przedstawia je tabela 1.

Pierwsza kombinacja zakłada, że wszystkie kryteria są jednakowo ważne. Można traktować ją jako punkt odniesienia. Kombinacje K2, K3 i K4 zakładają – że jedno kryterium jest dwa razy ważniejsze niż pozostałe, a ostatnie trzy kombinacje, że dwa kryteria są dwa razy ważniejsze niż pozostałe. Powodem przyjęcia powyższych kombinacji jest chęć zbadania, czy i w jaki sposób przypisanie jakiemuś kryterium większej wagi, niż pozostałym oraz dwóm z nich większej wagi niż trzeciemu przyczyni się do długości trasy pokonywanej przez magazyniera podczas procesu kompletacji. Oczywiście nie wyczerpuje to wszystkich możliwości, ani nawet nie

gwarantuje, że któraś z nich pozwoli znaleźć najkrótszą trasę. Możliwa jest sytuacja, że nie ma jednej, konkretnej kombinacji wag, która zawsze będzie najlepsza z punktu widzenia minimalizacji łącznej drogi pokonywanej przez magazyniera.

TABELA 1

Wagi nadane kryteriom decyzyjnym

Kombinacje	x_1	x_2	x_3
K1	0,333	0,333	0,333
K2	0,5	0,25	0,25
K3	0,25	0,5	0,25
K4	0,25	0,25	0,5
K5	0,4	0,4	0,2
K6	0,4	0,2	0,4
K7	0,2	0,4	0,4

Źródło: opracowanie własne.

Dla każdego zlecenia sporządzono listę produktów. Dla każdego produktu pobrano listę lokalizacji, w których występował. Każdą lokalizację opisano za pomocą trzech omówionych wcześniej kryteriów. Kryteriom nadano wagi opisane w tabeli 1 i osobno dla każdego produktu w zleceniu za pomocą metody TOPSIS wybrano lokalizacje do odwiedzenia. Procedura metody TOPSIS jest następująca [Hwang, i Yoon, 1981]:

- Wszystkie kryteria zostały znormalizowane. W pracy przyjęto przekształcenie ilorazowe dane wzorem:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^k x_{ij}^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, r, \quad (2)$$

gdzie:

z_{ij} – znormalizowana wartość j -tego kryterium w i -tym wariantcie decyzyjnym,

x_{ij} – rzeczywista wartość j -tego kryterium w i -tym wariantcie decyzyjnym,

k – liczba wariantów decyzyjnych (lokalizacji),

r – liczba kryteriów (w naszym przypadku $r = 3$).

Powodem zastosowania tej formuły normalizacyjnej była chęć zachowania różnicy w średnim poziomie kryteriów i ich zmienności. Oczywiście, możliwe jest także zastosowanie innych formuł normalizacyjnych, na przykład standaryzacji, czy unitaryzacji zerowanej [Walesiak, 2016, s. 10].

- Znormalizowane wartości kryteriów zostały przemnożone przez ich wagi za pomocą wzoru:

$$t_{ij} = z_{ij} \cdot w_j, \quad i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, r, \quad (3)$$

gdzie w_j – waga nadana j -temu kryterium.

- Dla każdego kryterium został wyznaczony *wzorзец* i *antywzorзец*. Dla kryteriów typu „zysk” wzorcem są maksymalne znormalizowane wartości kryteriów wyznaczone za pomocą wzoru (3) i oznaczone przez t_{bj} , a antywzorcem – wartości minimalne, oznaczone przez t_{wj} . Dla kryteriów typu „strata” jest na odwrót.
- Obliczono podobieństwo każdej lokalizacji do wzorca za pomocą wzoru:

$$q_i = \frac{d_{i0}^-}{d_{i0}^- + d_{i0}^+}. \quad (4)$$

gdzie:

$d_{i0}^- = \sqrt{\sum_{j=1}^r (t_{ij} - t_{wj})^2}$ – odległość euklidesowa i -tego wariantu decyzyjnego (lokalizacji) od antywzorca,

$d_{i0}^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^r (t_{ij} - t_{bj})^2}$ – odległość euklidesowa i -tego wariantu decyzyjnego (lokalizacji) od wzorca,

q_i – wartość miary syntetycznej, określająca podobieństwo i -tego wariantu decyzyjnego (lokalizacji) do wzorca.

- Sporządzono ranking lokalizacji od najwyższego, do najniższego podobieństwa do wzorca.
- Wybrano lokalizacje o najwyższych pozycjach w rankingu. Jeżeli w lokalizacji, będącej najwyższej w rankingu, zapotrzebowanie na produkt było zaspokojone w całości, wówczas wystarczyło wybrać tylko tę lokalizację. Jeżeli nie, wówczas należało wybrać także drugą w rankingu lokalizację i tak dalej aż do zaspokojenia zapotrzebowania na badany produkt.
- Powyższe kroki zostały powtórzone dla wszystkich produktów w zleceniu.

Po wybraniu wszystkich lokalizacji dla każdego produktu w zleceniu, za pomocą heurystyki *s-shape* została wyznaczona droga, którą musi pokonać magazynier. Algorytm heurystyki *s-shape* jest następujący [Le-Duc, 2005, s. 22-23]:

- Magazynier rozpoczyna kompletację idąc od punktu odkladczego korytarzem głównym i wchodzi w pierwszy korytarz boczny, w którym znajdują się lokalizacje, które musi odwiedzić.
- Po pobraniu wszystkich kompletowanych produktów znajdujących się w tym korytarzu, magazynier dochodzi do drugiego korytarza głównego i wchodzi w kolejny korytarz boczny, w którym znajdują się lokalizacje do odwiedzenia. Po pobraniu wszystkich produktów dochodzi do pierwszego korytarza głównego.
- Powyższe kroki powtarzane są tak długo, aż magazynier odwiedzi wszystkie lokalizacje, z których musi skompletować zamówienie.
- Należy zwrócić uwagę, że magazynier wchodzi tylko do tych korytarzy bocznych, przy których znajdują się lokalizacje z kompletowanymi produktami. Każdy odwiedzany korytarz boczny jest pokonywany na całej jego długości, aż do przeciwległego korytarza głównego.

Dla rozmiaru pojedynczego zamówienia wynoszącego 10 oraz 20 różnych produktów zbadano 20 zamówień, a dla wielkości pojedynczego zamówienia wynoszącego 30 różnych produktów zbadano piętnaście zamówień. Dla każdej kombinacji wag i dla każdego produktu za pomocą metody TOPSIS wybrano lokalizacje do odwiedzenia. Za pomocą heurystyki *s-shape* wyznaczono trasy, które musi pokonać magazynier, aby skompletować zamówienie. Wyznaczono długości tych tras. Dla każdej kombinacji wag obliczono średnie długości tras i ich wariancje. Za pomocą testu Hartleya [Rozmus, 2012, s. 113-114] zbadano, czy wariancje są równe i w przypadku braku postaw do odrzucenia H_0 , za pomocą jednoczynnikowej analizy wariancji [Domański, 2014, s. 55-56] zbadano, czy średnie długości tras dla każdej kombinacji wag nie różniły się istotnie pomiędzy sobą. W przypadku odrzucenia H_0 , mówiącej, że średnie były równe, za pomocą analizy *post hoc* zbadano, które średnie różnią się istotnie pomiędzy sobą. Wykorzystano test Tukeya porównań wielokrotnych – procedura HSD (*Honestly Significant Differences*) [Rozmus, 2012, s. 115]. Wszystkie testy przeprowadzono dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$.

3. Przykład empiryczny

W pierwszym kroku zbadano zlecenia, w których było 10 różnych produktów ($n = 10$). Podstawowe statystyki opisowe długości tras dla każdej kombinacji wag przedstawia tabela 2.

TABELA 2

Wartości średnie, odchylenia standardowe i współczynniki zmienności długości tras dla zamówień 10-elementowych

$n = 10$	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
\bar{x}	268,1	290,7	269,1	252,9	279,5	270,0	257,8
$S(x)$	38,707	35,169	39,213	35,000	39,424	36,865	44,824
V_s	14,44%	12,10%	14,57%	13,84%	14,11%	13,66%	17,39%

Źródło: opracowanie własne.

Jak widać z powyższej tabeli, najkrótszą trasę można było wyznaczyć, jeżeli w metodzie TOPSIS zastosowano kombinacje wag K4 i K7. Obie nadawały dużą wagę trzeciemu kryterium – liczbie innych kompletowanych produktów, znajdujących się w sąsiedztwie badanej lokalizacji oraz (kombinacja K7) także kryterium drugiemu – stopniowi zaspokojenia zapotrzebowania. Najdłuższe trasy występowały wówczas, gdy dużą wagę miało kryterium x_1 , czyli odległość lokalizacji od punktu odładowczego.

Wartość statystyki w teście Hartleya wyniosła $H = 1,640$, a wartość krytyczna dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i $\nu_1 = 7$ i $\nu_2 = 19$ stopni swobody $H_\alpha = 3,94$ (jest ona taka sama dla rozmiaru pojedynczego zamówienia wynoszącego 10 i 20 produktów). Tak więc test Hartleya nie dał podstaw do odrzucenia H_0 , mówiącej o równości

wariancji dla poszczególnych kombinacji wag. Wartość statystyki w jednoczynnikowej analizie wariancji wyniosła $F = 3,260$ (wartość $p = 0,005$). Tak więc H_0 należy odrzucić, czyli średnie trasy pokonywane przez magazyniera nie były równe. Zastosowano więc test Tukeya. Wartość krytyczna tego testu dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ oraz $n_1 = 7$ i $n_2 = 133$ stopni swobody wynosiła $q_\alpha = 4,24$ (jest ona taka sama dla każdego rozmiaru pojedynczego zamówienia wynoszącego). Wartości statystyki testującej dla wszystkich par przedstawia tabela 3.

TABELA 3
Wartości statystyki testującej dla testu Tukeya dla zamówień 10-elementowych (wartości istotne pogrubiono)

$n = 10$	K2	K3	K4	K5	K6	K7
K1	2,553	0,113	1,712	1,288	0,215	1,158
K2		2,440	4,265	1,265	2,339	3,711
K3			1,825	1,175	0,102	1,271
K4				3,000	1,926	0,554
K5					1,073	2,446
K6						1,373

Źródło: opracowanie własne.

Jak widać, średnia długość trasy dla kombinacji K2 istotnie różniła się od średniej długości trasy dla kombinacji K4. Można wyróżnić dwie grupy kombinacji, w których średnie długości tras nie różniły się istotnie pomiędzy sobą: K1, K2, K3, K5, K6 i K7 oraz K1, K3, K4, K5, K6 i K7. Tak więc dla zamówień, w których było 10 różnych produktów najlepsze efekty dawała kombinacja wag, w której najważniejsze było kryterium x_3 – warto więc pobierać towar z lokalizacji, które występują w grupie z lokalizacjami, w których są inne kompletowane towary.

Takie same obliczenia wykonano dla zamówień 20-elementowych ($n = 20$). Podstawowe statystyki opisowe długości tras dla każdej kombinacji wag przedstawia tabela 4.

TABELA 4
Wartości średnie, odchylenia standardowe i współczynniki zmienności długości tras dla zamówień 20-elementowych

$n = 20$	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
\bar{x}	338,9	369,9	339,1	319,9	352,8	340,3	321,9
$S(x)$	32,774	40,360	35,064	33,699	35,179	36,204	30,317
V_s	9,67%	10,91%	10,34%	10,53%	9,97%	10,64%	9,42%

Źródło: opracowanie własne.

Dla zamówień 20-elementowych sytuacja jest bardzo podobna, jak dla zamówień, w których do skompletowania było 10 różnych produktów. Tutaj także najkrótsze trasy były dla kombinacji K4 i K7, a najdłuższe dla kombinacji K2.

Wartość statystyki w teście Hartleya dla zamówień 20-elementowych wyniosła $H = 1,772$. Także tutaj test Hartleya nie dał podstaw do odrzucenia H_0 . W wyniku przeprowadzonej jednoczynnikowej analizy wariancji uzyskano wartość statystyki testującej $F = 4,800$ (wartość $p = 0,0001$). Tak więc H_0 należy odrzucić, czyli średnie trasy pokonywane przez magazyniera nie były równe. Po zastosowaniu testu Tukeya, wartości statystyki testującej dla wszystkich par przedstawia tabela 5.

TABELA 5

Wartości statystyki testującej dla testu Tukeya dla zamówień 20-elementowych (wartości istotne pogrubiono)

$n = 20$	K2	K3	K4	K5	K6	K7
K1	3,876	0,031	2,365	1,741	0,181	2,122
K2		3,845	6,241	2,135	3,695	5,998
K3			2,397	1,710	0,150	2,153
K4				4,107	2,546	0,243
K5					1,560	3,863
K6						2,303

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku zamówień 20-elementowych średnia długość trasy dla kombinacji K2 różniła się istotnie od średnich dla kombinacji K4 i K7.

Dla zamówień 30-elementowych ($n = 30$) podstawowe statystyki opisowe długości tras dla każdej kombinacji wag przedstawia tabela 6.

TABELA 6

Wartości średnie, odchylenia standardowe i współczynniki zmienności długości tras dla zamówień 30-elementowych

$n = 30$	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
\bar{x}	355,4	389,3	346,6	334,7	386,1	361,4	333,9
$S(x)$	57,188	70,675	72,915	60,692	70,863	64,465	61,926
V_s	16,09%	18,16%	21,04%	18,14%	18,35%	17,84%	18,55%

Źródło: opracowanie własne.

Podobnie, jak dla zamówień 10- i 20-elementowych, także i dla zamówień 30-elementowych, najkrótsze trasy były dla kombinacji K4 i K7, a najdłuższe dla kombinacji K5.

Wartość statystyki w teście Hartleya dla zamówień 30-elementowych wyniosła $H = 1,626$, a wartość krytyczna dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i $v_1 = 7$ i $v_2 = 14$

stopni swobody $H_\alpha = 4,95$, czyli podobnie, jak w dwóch poprzednich przypadkach, nie było podstaw do odrzucenia H_0 . W wyniku przeprowadzonej jednoczynnikowej analizy wariancji uzyskano wartość statystyki testującej $F = 2,433$ (wartość $p = 0,031$). Tak więc, analogicznie jak w przypadku zamówień 10- oraz 20-elementowych H_0 należy odrzucić, czyli średnie trasy pokonywane przez magazyniera nie były równe. Po zastosowaniu testu Tukeya, wartości statystyki testującej dla wszystkich par przedstawia tabela 7.

TABELA 7

Wartości statystyki testującej dla testu Tukeya dla zamówień 30-elementowych (wartości istotne pogrubiono)

$n = 30$	K2	K3	K4	K5	K6	K7
K1	2,245	0,583	1,374	2,037	0,398	1,427
K2		2,828	3,619	0,208	1,847	3,672
K3			0,791	2,620	0,981	0,844
K4				3,411	1,772	0,053
K5					1,639	3,464
K6						1,825

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku zamówień 30-elementowych, mimo że analiza wariancji wykazała istotność różnic pomiędzy średnimi, test Tukeya tego nie potwierdził. Mimo że występowały wyraźne różnice między średnimi (średnia długość trasy dla kombinacji K2 wyniosła 389,3 jednostek wobec 334,7 jednostek dla kombinacji K4 i 333,9 dla kombinacji K7 – różnica wyniosła ponad 55 jednostek, czyli dla kombinacji K2 średnia długość trasy była o 16,6% dłuższa). Zapewne wynika to z faktu, że dla zamówień 30-elementowych, współczynniki zmienności dla każdej kombinacji były znacznie większe niż dla zamówień 10- i 20-elementowych (współczynnik zmienności wyniósł średnio około 19% dla zamówień 30-elementowych wobec około 14% dla zamówień 10-elementowych i około 10% dla zamówień 20-elementowych).

4. Podsumowanie

Celem artykułu było zbadanie, w jaki sposób wagi nadane poszczególnym kryteriom wpływają na średnie długości trasy pokonywanej przez magazyniera w procesie kompletacji produktów i czy różnice te są istotne. Zbadano ten wpływ dla różnych wielkości pojedynczego zamówienia. Z przeprowadzonych badań można wysnuć następujące wnioski:

- Dla każdej wielkości pojedynczego zamówienia najkrótszą trasę dawały kombinacje wag K4 (0,25; 0,25; 0,5) oraz K7 (0,2; 0,4; 0,4), a najdłuższą – kombinacja K2 (0,5; 0,25; 0,25).

- Dla zamówień 10-elementowych istotnie różniła się średnia długość tras dla kombinacji K2 (najdłuższe) od średniej dla kombinacji K4 (najkrótsze).
- Dla zamówień 20-elementowych istotnie różniły się średnie długości tras dla kombinacji K2 (najdłuższe) od średnich dla kombinacji K4 i K7 (najkrótsze).
- Dla zamówień 30-elementowych także średnia długość tras dla kombinacji K2 była najdłuższa, a średnie długości dla kombinacji K4 i K7 były najkrótsze, ale mimo że analiza wariancji wskazała na istotne różnice pomiędzy średnimi, test Tukeya tego nie potwierdził.
- Oplaca się (z punktu widzenia długości pokonywanej przez magazyniera trasy) nadać większą wagę kryterium x_3 , która preferuje lokalizacje, które są blisko tych, w których są inne kompletowane produkty.
- Wyniki uzyskane dla referencyjnej kombinacji wag, w której wszystkie kryteria były jednakowo ważne (K1), plasowały się na ogół w środku.

Należy zaznaczyć, że takie wyniki otrzymano dla tego konkretnego magazynu z omówioną wcześniej polityką wyznaczania trasy magazyniera oraz dla danego rozkładu produktów w magazynie (w sektorach bliższych punktowi odkładczemu rozłożenie produktów było bardziej rozproszone, niż w sektorach dalszych), dlatego nie należy ich uogólniać na inne rodzaje magazynów. Dalszym etapem badań będzie zbadanie większej liczby zleceń dla poszczególnych wielkości pojedynczego zamówienia za pomocą metod symulacyjnych dla różnych polityk rozmieszczenia produktów w magazynie (od przechowywania czysto chaotycznego po przechowywanie według klasy) oraz porównanie wyników otrzymanych dla różnych formuł normalizacyjnych.

Literatura

- Bartholdi J.J., Hackman S.T., 2016, *Warehouse & Distribution Science, Release 0.97*, The Supply Chain and Logistics Institute, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, GA 30332-0205 USA, 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", no. 182(2), p. 481-501.
- Dmytrów K., 2015, *Taksonomiczne wspomaganie wyboru lokalizacji w procesie kompletacji produktów*, „Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach”, nr 248, s. 17-30.
- Dmytrów K., 2016, *Grupowanie lokalizacji w magazynie podczas procesu kompletacji produktów*, Studia i Prace WNEiZ US nr 45/2, s. 187-198, DOI: 10.18276/sip.2016.45/2-15.
- Domański Cz., 2014, *Wybrane klasyczne testy statystyczne*, [w:] Domański Cz., Pekaśiewicz D., Baszczyńska A., Witaszczyk A., *Testy statystyczne w procesie podejmowania decyzji*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Gudehus T., Kotzab H., 2012, *Comprehensive Logistics, Second Edition*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-642-24367-7.

- Hwang, C.L., Yoon, K., 1981, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer-Verlag, New York.
- Kukuła K., 2000, *Metoda unitaryzacji zerowanej*, PWN, Warszawa.
- Le-Duc T., 2005, *Design and Control of Efficient Order Picking Processes*. PhD thesis, RSM Erasmus University.
- Lotfi F.H., Fallahnejad R., 2010, *Imprecise Shannon's Entropy and Multi Attribute Decision Making*, "Entropy", no. 12, p. 53-62; DOI: 10.3390/e12010053.
- Podvezko V., 2011, *The Comparative Analysis of MCDA Methods SAW and COPRAS*, "Inżynieria Ekonomiczna – Engineering Economics", vol. 22(2), p. 134-146.
- Rozmus D., 2012, *Analiza wariancji*, [w:] *Statystyczna analiza danych z wykorzystaniem programu R*, Walesiak M., Gatnar E. (red.), PWN, Warszawa.
- Tarczyński G., 2012, *Analysis of the impact of storage parameters and the size of orders on the choice of the method for routing order picking*, "Operations Research and Decisions", no. 22, p. 105-120.
- Tarczyński G., 2017, *Model dla zadania kompletacji zleceń łączonych uwzględniający problem blokowania się magazynów*, „Przegląd Statystyczny”, r. LXIV, z. 2, s. 193-211.
- Trzaskalik T., 2015, *Wprowadzenie do badań operacyjnych z komputerem*, PWE, Warszawa.
- Vommi V.B., Kakollu S.R., 2016, *A simple approach to multiple attribute decision making using loss functions*, "Journal of Industrial Engineering International", vol. 12, p. 1-10, DOI: 10.1007/s40092-016-0174-6.
- Walesiak M., 2016, *Wybór grup metod normalizacji wartości zmiennych w skalowaniu wielowymiarowym*, „Przegląd Statystyczny”, r. LXIII, z. 1, s. 7-18.