

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 Prędki: 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

Paulina Szterlik

Uniwersytet Łódzki
e-mail: paulina.szterlik@uni.lodz.pl

LOKALIZACJA MAGAZYNU CENTRALNEGO Z ZASTOSOWANIEM METOD WIELOKRYTERIALNYCH

LOCATION OF CENTRAL WAREHOUSE USING QUANTITATIVE RESEARCH

DOI: 10.15611/pn.2016.446.17

JEL Classification: C44

Streszczenie: Celem pracy jest analiza procesu wyboru lokalizacji magazynu centralnego dla firmy posiadającej swoją bazę w Polsce. Rozmieszczenie dostawców i odbiorców narzuca umiejscowienie nowego składu na terenie Europy. Dzięki zastosowaniu metryki euklidesowej oraz metody środka ciężkości wytypowanych zostało kilka wariantów lokalizacyjnych. Ostateczne umiejscowienie obiektu wyznaczono dzięki hierarchizacji rozpatrywanych lokalizacji z zastosowaniem metod AHP i MUZ.

Słowa kluczowe: metody wielokryterialne, metryka euklidesowa, metoda środka ciężkości, metoda unitaryzacji zerowanej, AHP.

Summary: The article depicts the process of choosing the final location of a central warehouse for a company located in Poland. The positions of suppliers and recipients show that the object should be located in Europe. The aim is to find such a location in which overall costs will be minimal. The use of Euclidean metric and the center of gravity method will be helpful in finding potential locations. The final decision will be made with the use of AHP and the zero unitarization method.

Keywords: multiple-criteria decision analysis, Euclidean metric, the center of gravity method, zero unitarization method, AHP.

1. Wstęp

Właściwa lokalizacja magazynu centralnego jest jedną z kluczowych decyzji strategicznych i może rzutować na utrzymanie pozycji przedsiębiorstwa na rynku. Decyzje związane z budową tego typu obiektu infrastruktury wymagają dogłębnej analizy wymagań inwestora, związanej m.in. z dostępnością środków finansowych, wielko-

ścią przestrzeni magazynowej oraz analizą wpływu budowy na środowisko naturalne i społeczność lokalną. Wybór miejsca budowy powinien zapewniać płynność współpracy na drodze dostawca-odbiorca przy jednoczesnej minimalizacji kosztów przewozów między poszczególnymi firmami. Dla przedsiębiorstw obsługujących międzynarodowych klientów należy również zastanowić się nad tym, czy bardziej opłacalnym jest ulokowanie magazynu w kraju czy poza jego granicami. Istnieje wiele czynników kwalifikacji lokalizacji, którymi może kierować się decydent, zależnych od jego subiektywnej oceny bądź też kryteriów narzuconych przez zarząd przedsiębiorstwa.

Sformułowany w artykule problem badawczy służy pokazaniu metod, którymi może posłużyć się decydent, aby wybrać najlepszą z kilku potencjalnych lokalizacji magazynu. Zadaniem, które należy zrealizować jest ulokowanie obiektu w taki sposób, aby efektywnie obsługiwał firmy partnerskie zlokalizowane na terenie Europy. Obliczenia zostały wykonane na podstawie geograficznego rozkładu dostawców i odbiorców produktów oraz przewidywanego popytu dla poszczególnych przedsiębiorstw. Są to wielkości szacunkowe, służące pokazaniu kolejnych etapów postępowania decyzyjnego. Pierwszymi analizowanymi metodami będą: metryka euklidesowa oraz metoda środka ciężkości. Do analizy zostaną też włączone dwa warianty lokalizacyjne, które zostały narzucone odgórnie. Ponadto przeprowadzona będzie analiza metodami wielokryterialnymi AHP oraz MUZ, które posłużą do wyłonienia finalnego miejsca budowy z uwzględnieniem narzuconych warunków ilościowych oraz jakościowych.

2. Wybrane metody służące do wyznaczania lokalizacji magazynu centralnego

Podstawą do właściwego wytypowania lokalizacji magazynu centralnego jest wyznaczenie miejsc, w których wybudowanie go byłoby ekonomicznie uzasadnione. Tego typu obiekty należy traktować jako kolejny element istniejącej infrastruktury, której głównymi składowymi są zbiory dostawców i odbiorców produktów. Na potrzeby kalkulacji firmy partnerskie należy postrzegać jako położone w przestrzeni punkty. Ich współrzędne można uznać za bazę do późniejszych kalkulacji i analiz. Mapę Europy należy potraktować jako swoisty układ współrzędnych, który posiada swoje jednostki. Do prawidłowego rozwiązania problemu lokalizacji magazynu można posłużyć się odległościami w metryce euklidesowej.

Dla punktów (x_i, y_i) oraz (x_0, y_0) są one wyznaczone zgodnie ze wzorem [Krawczyk 2001, s. 188]:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}. \quad (1)$$

Uzyskanie potencjalnej lokalizacji magazynu zgodnie z metryką euklidesową wymaga wyznaczenia punktu ciężkości, którego współrzędne wyznaczane są zgodnie ze wzorem [Krawczyk 2001, s. 189]:

$$\bar{x}_0 = \frac{\sum_{i=1}^m a_i * k_i^A * x_i^A + \sum_{j=1}^n b_j * k_j^B * x_j^B}{\sum_{i=1}^m a_i * k_i^A + \sum_{j=1}^n b_j * k_j^B}, \quad (2)$$

$$\bar{y}_0 = \frac{\sum_{i=1}^m a_i * k_i^A * y_i^A + \sum_{j=1}^n b_j * k_j^B * y_j^B}{\sum_{i=1}^m a_i * k_i^A + \sum_{j=1}^n b_j * k_j^B}, \quad (3)$$

gdzie: a_i – przewidywana wielkość dostaw do planowanego magazynu w danym okresie, $i = 1, \dots, m$, $A_i(x_i^A, y_i^A)$ – lokalizacje dostawców, $B_j(x_j^B, y_j^B)$ – lokalizacje odbiorców, b_j – przewidywane zapotrzebowanie odbiorców na towary w danym okresie, $j = 1, \dots, n$, k_i^A – jednostkowy koszt przewozu dla przewozów od i -tych dostawców do magazynu, k_j^B – jednostkowy koszt przewozu dla przewozów z magazynu do j -tych odbiorców.

Kolejnym etapem postępowania jest wykorzystanie wyznaczonych współrzędnych w celu wyznaczenia odległości d_i . Uzyskane wartości należy uwzględnić we wzorze, który określa współrzędne poszukiwanego punktu lokalizacyjnego. Jest on wyznaczony zgodnie z zasadami rachunku różniczkowego i można go utożsamiać z pochodnymi cząstkowymi funkcji K względem x_0 i y_0 . Zależności te mają związek z osiągnięciem minimum lokalnego przez funkcję kosztu (wypukłą funkcję dwóch zmiennych) w punkcie $(x_0; y_0)$. Jest to teoretyczny sposób wyznaczania minimum lokalnego, gdyż w praktyce dokładne wyznaczenie punktu optymalnego jest zadaniem trudnym do wykonania. Skorygowane wartości x_0 i y_0 wyznaczone są zgodnie ze wzorami:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{\sum_{i=1}^m a_i * k_i^A * x_i^A}{d_i^A} + \sum_{j=1}^n \frac{b_j * k_j^B * x_j^B}{d_j^B}}{\sum_{i=1}^m \frac{a_i * k_i^A}{d_i^A} + \sum_{j=1}^n \frac{b_j * k_j^B}{d_j^B}}, \quad (4)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{\sum_{i=1}^m a_i * k_i^A * y_i^A}{d_i^A} + \sum_{j=1}^n \frac{b_j * k_j^B * y_j^B}{d_j^B}}{\sum_{i=1}^m \frac{a_i * k_i^A}{d_i^A} + \sum_{j=1}^n \frac{b_j * k_j^B}{d_j^B}}. \quad (5)$$

Do wyznaczenia potencjalnej lokalizacji magazynu centralnego może również służyć metoda środka ciężkości. Polega ona na zastosowaniu modelu geometrycznego opartego na obliczeniu środka ciężkości popytu. Można go traktować jako odniesienie do fizyki, w którym popyt jest reprezentowany przez z góry określoną masę. W tym przypadku koszty transportu są sumą iloczynów odległości między magazynem a klientami oraz stawki transportowej dla danego przewozu. Współrzędne środka ciężkości wynoszą:

$$x_0 = \frac{\sum x_i W_i}{\sum W_i}, \quad y_0 = \frac{\sum y_i W_i}{\sum W_i}, \quad (6)$$

gdzie: x, y_0 – współrzędne środka ciężkości, czyli miejsca, w którym powinien zostać zlokalizowany magazyn, x_i, y_i – współrzędne lokalizacji i -tego klienta, W_i – przewidywana wielkość popytu dla i -tego klienta.

Mając wyznaczonych kilka potencjalnych lokalizacji magazynu, decydent staje przed wyborem najdogodniejszego miejsca budowy. W czasie analizy poszczególnych wariantów może się kierować kryteriami zależnymi od jego indywidualnych preferencji. W takich sytuacjach zasadne staje się skorzystanie z metod analizy wielokryterialnej, takich jak MUZ lub AHP.

MUZ należy rozumieć jako metodę unitaryzacji zerowanej, która prowadzi do ujednoczenia wartości zmiennych oraz pozbawia je mian. Pozwala ona na ranking poszczególnych wariantów decyzyjnych oraz przyporządkowanie ich do trzech grup: najlepsze, przeciętne, najgorsze. Założeniem początkowym jest to, że informacje dotyczące r obiektów są znane decydentowi. Dla w zmiennych ilościowych oraz s zmiennych jakościowych tworzą one macierz zmiennych diagnostycznych postaci [Kukuła 2012, s. 5]:

$$X = [x_{ij}] = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1w} & x_{1(w+1)} & \dots & x_{1(w+s)} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2w} & x_{2(w+1)} & \dots & x_{2(w+s)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{r1} & x_{r2} & \dots & x_{rw} & x_{r(w+1)} & \dots & x_{r(w+s)} \end{bmatrix} \quad j=1, \dots, w+s.$$

Przebieg postępowania wymusza przyporządkowanie zmiennych decyzyjnych do jednego z trzech zbiorów:

- stymulanty (S) – wzrost ocenianego kryterium wiąże się ze wzrostem zmiennej diagnostycznej,
- destymulanty (D) – spadek ocenianego kryterium wiąże się ze wzrostem zmiennej diagnostycznej,
- nominanty (N) – zmienne, które mają z góry ustaloną wartość. Nie występują one w badanym przypadku [Kukuła 2006, s. 285].

Normalizacji dokonuje się z zastosowaniem następujących wzorów:

- dla stymulant $z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}$,
- dla destymulant $z_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}$.

Istotnym krokiem postępowania jest obliczenie zagregowanej wartości Q zgodnie ze wzorem:

$$Q_i = \sum_{j=1}^S z_{ij}.$$

Po uporządkowaniu uzyskanych wartości Q malejąco można wyróżnić lokalizacje najlepsze, przeciętne oraz najgorsze. W tym celu wykorzystuje się stałą U , zgodnie ze wzorem [Kukuła 2006, s. 289]:

$$U = \frac{\max Q_i - \min Q_i}{3},$$

gdzie: $Q_i \in (\max Q_i - U, \max Q_i >$ – obiekty najlepsze,
 $Q_i \in (\max Q_i - 2U, \max Q_i - U >$ – obiekty przeciętne,
 $Q_i \in (\min Q_i, \max Q_i - 2U >$ – obiekty najgorsze.

W celu znalezienia optymalnej lokalizacji magazynu można posłużyć się wielokryterialną metodą dyskretną AHP (*Analytic Hierarchy Process* – analityczny proces hierarchizacji). Postępowanie związane z wyznaczeniem rankingu można przedstawić w trzech etapach. Pierwszym z nich jest wyznaczenie macierzy porównań parami dla n obiektów w ramach przyjętych przez decydenta kryteriów oraz dla samych kryteriów. W wyniku poszczególnych porównań uzyskanych zostaje $K+1$ macierzy porównań parami. Do porównań używana jest 9-stopniowa skala Saaty'ego, którą przedstawia tab. 1.

Tabela 1. Oceny werbalne stosowane w metodzie AHP

Ocena werbalna Wariant a w porównaniu z wariantem b względem rozpatrywanego kryterium jest preferowany	Oceny werbalne stosowane w metodzie AHP – ocena numeryczna
– ekstremalnie	9
– bardzo silnie do ekstremalnie	8
– bardzo silnie	7
– silnie do bardzo silnie	6
– silnie	5
– umiarkowanie do silnie	4
– umiarkowanie	3
– równoważnie do umiarkowanie	2
– równoważnie	1

Źródło: [Saaty 2008, s. 86].

Ważnym etapem kalkulacji jest sprawdzenie spójności ocen decydenta zgodnie ze wzorem [Saaty 1990, s. 13]:

$$CR = CI/RI,$$

gdzie: CI – indeks spójności, RI – indeks losowy.

Wartość współczynnika spójności CR powinna być mniejsza niż 0,1. Oznacza to, że poszczególne porównania parami są sporządzone w sposób poprawny.

Kolejnym etapem jest budowa indywidualnych rankingów dla każdej macierzy, która została uzyskana w pierwszym etapie postępowania. Następnie można przejść do sporządzenia rankingu wielokryterialnego. Do obliczeń można wykorzystać dodatek *AHP* programu Excel. Po wprowadzeniu do arkusza poszczególnych danych wyświetlany jest ranking wielokryteriowy oraz wartość współczynnika spójności.

3. Studium przypadku

Dotychczasowa siedziba firmy ulokowana jest w Rzepinie i ze względu na zwiększenie liczby dostawców oraz odbiorców poszczególnych towarów pojemność jej magazynu okazała się niewystarczająca. Planowane są działania mające na celu budowę nowego składu towarów, który obsługiwałby firmy międzynarodowe zlokalizowane na terenie Europy. Koszty jednostkowe przewozu zostały obliczone z zastosowaniem informacji ze strony internetowej <http://www.emapi.pl>. Z racji tego, że podane na niej dane uwzględniają tylko spalanie dla samochodu osobowego, należy dostosować podane wartości do potrzeb samochodów ciężarowych. Porównanie zużycia paliwa dla poszczególnych rodzajów pojazdów (26 l/100 km dla ciągników siodłowych z naczepą oraz 9 l/100 km dla pojazdów osobowych) pozwoliło dostosować podane na stronie internetowej koszty do potrzeb przewozu międzynarodowego. Dla ułatwienia obliczeń przyjęto, że waga przewożonych towarów to 25 ton. Cena paliwa wynosi 4,66 zł/litr. Należy uznać, że koszty jednostkowe przewozu dla nowego magazynu nie powinny przekraczać wartości dla obiektu zlokalizowanego dotychczas w Rzepinie.

Tabela 2. Odległość między dotychczasowym magazynem a poszczególnymi przedsiębiorstwami (km) wraz z kosztem przewozu towarów k_p (zł) oraz jednostkowym kosztem przewozu k_j (zł) dla poszczególnych dostawców (zł/t)

Dostawca/Odbiorca	Odległość rzeczywista d_r	k_p	k_j
Warrington (D)	1279,3	1550,00	62,00
Budapeszt (D)	803,4	973,40	38,94
Amsterdam (D)	747,2	905,31	36,21
Mediolan (D)	1129,2	1368,14	54,73
Charleroi (D)	896,6	1086,32	43,45
Monachium(D)	676,5	819,65	32,79
Poznań (D)	154,2	186,83	7,47
Hamburg (O)	413,6	501,12	20,04
Lublin (O)	615,1	745,26	29,81
Nantes (O)	1524,1	1846,60	73,86
Lipsk (O)	717,2	868,96	34,76
Wilno (O)	940,5	1139,51	45,58
Turyń (O)	1245,8	1509,41	60,38
Kopenhaga (O)	598,4	725,02	29,00
Birmingham (O)	1375,5	1666,56	66,66
Frankfurt nad Menem (O)	639,6	774,94	31,00

gdzie: $k_p = \frac{d_r}{100} * 26 * 4,66$ oraz $k_j = \frac{k_p}{25}$.

Źródło: opracowanie własne z zastosowaniem danych z [<http://www.emapi.pl>].

Tabela 3. Dane i początkowe obliczenia służące do wyznaczenia współrzędnych magazynu centralnego zgodnie z metryką euklidesową

Klient	x_i	y_i	W_i	k_i	Koszt przewozu $W_i * k_i$	Wartości $x_i * W_i * k_i$	Wartości $y_i * W_i * k_i$
Warrington	2,35	53,24	3 750	62,0	232 500	546 375	12 378 300
Budapeszt	19,03	47,3	2 800	38,9	109 032	2 074 879	5 157 214
Amsterdam	4,54	52,22	1 875	36,2	67 894	308 238	3 545 412
Mediolan	9,11	45,28	1 500	54,7	82 095	747 886	3 717 262
Charleroi	4,25	50,27	3 125	43,5	135 781	577 070	6 825 723
Monachium	11,34	48,08	3 750	32,8	122 963	1 394 395	5 912 037
Poznań	16,56	52,24	2 000	7,5	14 940	247 406	780 466
Hamburg	10	53,33	3 125	20,0	62 625	626 250	3 339 791
Lublin	22,34	51,14	4 700	29,8	140 107	3 129 990	7 165 072
Nantes	1,33	47,13	3 125	73,9	230 813	306 981	10 878 193
Lipsk	12,22	51,2	4 700	34,8	163 372	1 996 406	8 364 646
Wilno	25,17	54,41	3 000	45,6	136 740	3 441 746	7 440 023
Turyń	7,42	45,04	5 625	60,4	339 638	2 520 110	15 297 273
Kopenhaga	12,34	55,4	3 200	29,0	92 800	1 145 152	5 141 120
Birmingham	1,54	52,29	5 500	66,7	366 630	564 610	1 917 1 083
Frankfurt nad Menem	8,41	50,07	2 500	31,0	77 500	651 775	3 880 425
				Σ	232 500	20 279 269	118 994 040

* W_i – wielkość przewozu; k_i – koszt jednostkowy przewozu.

Źródło: opracowanie własne.

Rozkład geograficzny dostawców i odbiorców oraz szacowane roczne zapotrzebowania na produkty umożliwiają wyznaczenie punktu ciężkości dla metryki euklidesowej. Zgodnie ze wzorami (2) oraz (3) jego współrzędne to:

$$\bar{x}_0 = \frac{20\,279\,269}{2\,375\,429} \approx 8,54,$$

$$\bar{y}_0 = \frac{118\,994\,039,7}{237\,5428,5} \approx 50,09.$$

Pierwszym etapem procedury iteracyjnej jest wyznaczenie skorygowanych wartości współrzędnych nowego magazynu. Można je uznać za bardziej dokładne w porównaniu z $(\bar{x}_0; \bar{y}_0)$. Wyznaczone zgodnie ze wzorami (4) i (5) współrzędne to:

$$x_0 = \frac{981\,599,77}{800\,2142,49} \approx 8,15,$$

$$y_0 = \frac{49\,037\,974,46}{981\,599,77} \approx 49,96.$$

Jako pierwszy wariant lokalizacyjny dla magazynu centralnego przyjęto okolice Frankfurtu nad Menem.

Kolejną metodą pomocną w wyznaczeniu lokalizacji składu towarów jest metoda środka ciężkości z uwzględnieniem rocznego popytu na towary. Również w tym przypadku jednostkowe koszty przewozu towarów zostały przyjęte na poziomie kosztów jednostkowych wyznaczonych dla dotychczasowego obiektu znajdującego się w Rzepinie. Po wyznaczeniu nowej lokalizacji stanie się możliwa analiza rzeczywistych kosztów przewozu towarów, a co za tym idzie – kosztów jednostkowych przewozu (zł/t). Tak jak w poprzednim przypadku rozważania będzie można uznać za poprawne w momencie, w którym koszty jednostkowe transportu dla składu w Rzepinie nie będą przekraczać kosztów dla nowej lokalizacji magazynu.

Tabela 4. Obliczenia wykorzystane do wyznaczenia lokalizacji zgodnie z metodą środka ciężkości

Dostawca/odbiorca	x_i	y_i	W_i	$x_i * W_i$	$y_i * W_i$
Warrington (D)	2,35	53,24	3 750	8 813	199 650
Budapeszt (D)	19,03	47,3	2 800	53 284	132 440
Amsterdam (D)	4,54	52,22	1 875	85 123	97 913
Mediolan (D)	9,11	45,28	1 500	13 665	67 920
Charleroi (D)	4,25	50,27	3 125	13 281	157 094
Monachium(D)	11,34	48,08	3 750	42 525	180 300
Poznań (D)	16,56	52,24	2 000	33 120	104 480
Hamburg (O)	10	53,33	3 125	31 250	166 656
Lublin (O)	22,34	51,14	4 700	104 998	240 358
Nantes (O)	1,33	47,13	3 125	4 156	147 281
Lipsk (O)	12,22	51,2	4 700	57 434	240 640
Wilno (O)	25,17	54,41	3 000	75 510	163 230
Turyń (O)	7,42	45,04	5 625	41 738	253 350
Kopenhaga (O)	12,34	55,4	3 200	39 488	177 280
Birmingham (O)	1,54	52,29	5 500	84 70	287 595
Frankfurt nad Menem (O)	8,41	50,07	2 500	21 025	125 175
		Σ	54 275	557 269	2 741 362

Źródło: opracowanie własne.

Wzory (6) pozwalają określić współrzędne środka ciężkości jako:

$$x_o = \frac{557\,269}{54\,275} \approx 10,26 \quad y_o = \frac{2\,741\,362}{54\,275} \approx 50,51.$$

Zgodnie w uzyskanymi wynikami kolejnym wariantem lokalizacyjnym są okolice miasta Nordheim vor der Rhön w Niemczech. Biorąc pod uwagę, że jest to niewielka miejscowość (1092 mieszkańców), można stwierdzić, że firma może rozważać umiejscowienie magazynu w mieście Fulda. W późniejszym postępowaniu poszczególne warianty lokalizacyjne zostały nazwane zgodnie z większymi miastami znajdującymi się w ich pobliżu.

Tabela 5. Odległości rzeczywiste dla poszczególnych lokalizacji wraz z kosztami jednostkowymi przewozu towarów (zł/t)

Dostawca/odbiorca	Frankfurt n. M.		Fulda		Hanower		Bonn	
	d_r	k_j	d_r	k_j	d_r	k_j	d_r	k_j
Warrington	876	42,44	1 006	48,76	910	44,10	709	34,37
Budapeszt	969	46,94	938	45,45	1 028	49,82	1 131	54,82
Amsterdam	443	21,46	547	26,52	386	18,71	289	13,99
Mediolan	661	32,03	703	34,07	968	46,91	803	38,90
Charleroi	399	19,32	529	25,65	508	24,62	232	11,25
Monachium	393	19,03	352	17,05	629	30,48	556	26,94
Poznań	784	37,98	650	31,48	517	25,06	832	40,33
Hamburg	496	24,05	452	21,92	153	7,41	448	21,70
Lublin	1 243	60,23	1 056	51,17	985	47,74	1 330	64,45
Nantes	947	45,88	1 086	52,65	1 162	56,32	887	42,97
Lipsk	1 340	64,92	1 198	58,06	1 077	52,20	1 381	66,95
Wilno	1 516	73,46	1 433	69,42	1 258	60,97	1 621	78,56
Turyn	723	35,02	820	39,72	1 084	52,53	864	41,89
Kopenhaga	821	39,78	777	37,65	478	23,17	772	37,43
Birmingham	969	46,95	1 099	53,28	1 014	49,14	802	38,88
Frankfurt nad Menem	–	–	144	6,98	350	16,96	172	8,35

* d_r – odległość rzeczywista (km), k_p – koszt przewozu (zł), k_j – koszt jednostkowy (zł), W_i – popyt (t), k_c – całkowite koszty transportu (zł).

Źródło: opracowanie własne.

Analiza ekspercka wykazała, że miastami, w których mógłby zostać wybudowany magazyn, są również Hanower i Bonn. Miasta przyjęte odgórnie do rozważań, oraz te, które zostały wyznaczone zgodnie z obliczeniami, zlokalizowane są na terenie Niemiec. Bliskość autostrad oraz dróg szybkiego ruchu czyni je propozycjami wartymi uwagi w analizie wielokryterialnej. Ponadto Fulda oraz Frankfurt nad Menem znajdują się w niedalekiej odległości od siebie, co sprawia że porównanie kosztów transportu dla tych miejscowości staje się niewystarczające. Jeśli się zna współrzędne nowych lokalizacji, możliwe jest wyznaczenie rzeczywistych kosztów jednostkowych przewozu dla poszczególnych klientów, a co za tym idzie – obliczenie rocznych kosztów transportu.

Pierwszą metodą pomocną w ostatecznym wyborze lokalizacji nowego magazynu jest metoda unitaryzacji zerowanej (MUZ). Dzięki niej możliwe jest ustalenie rankingu obiektów z uwzględnieniem wybranych przez decydenta kryteriów. Fakt, że cechy określające poszczególne magazyny posiadają różne wielkości i miana, wymusza ich ujednolicenie. Dzięki temu staje się możliwa ocena wielokryteriowa, która uwzględni wszystkie narzucone cechy.

Tabela 6. Kalkulacja kosztów transportu dla pozostałych wariantów lokalizacyjnych (zł)

Klient	Frankfurt nad Menem		Fulda		Hanower		Bonn	
	d_i	k_c	d_i	k_c	d_i	k_c	d_i	k_c
W.	6,66	1 060 448	8,37	1 563 052	7,46	1 233 654	5,37	692 434
B.	11,20	1 472 167	9,34	1 191 765	10,57	1 474 568	12,41	1 905 391
A.	4,26	171 412	5,97	302 556	5,22	183 210	2,96	77 698
M.	4,78	229 566	5,35	278 532	7,13	501 681	5,81	338 946
C.	3,91	236 237	6,01	501 837	5,90	453 946	2,89	101 492
M.	3,70	264 197	2,66	176 108	4,58	523 619	5,00	505 126
P.	8,71	661 821	6,53	388 563	6,80	340 888	9,58	772 703
H.	3,84	288 905	2,83	192 405	0,98	22 690	3,89	264 121
L.	14,24	4 030 855	12,10	2 951 787	12,64	2 836 354	15,25	4 618 095
N.	7,38	1 058 568	9,55	1 691 340	9,93	1 747 879	6,80	913 240
Li.	4,25	1 298 163	2,08	549 983	2,73	669 378	5,14	1 617 859
W.	17,59	3 877 044	15,41	3 015 570	15,54	2 842 995	18,44	4 346 155
T.	4,97	979 791	6,16	1 398 080	7,70	2 276 380	5,70	1 342 860
K.	6,87	874 070	5,31	637 127	3,97	294 500	7,02	840 709
B.	7,01	1 809 693	8,90	2 659 072	8,22	2 221 753	5,77	1 234 863
F.	0,00	0	1,90	41 241	2,68	113 444	1,47	30 621
Σ		18 312 937		17 539 018		17 736 937		19 602 311

* gdzie: $k_c = d_i * k_j * W_i$.

Źródło: opracowanie własne.

Kryteria użyte do porównania obiektów to:

- k_t – koszty transportu (zł) – całkowite koszty przewozu towarów z magazynu do klientów,
- k_z – koszty zakupu działki budowlanej (zł),
- k_{sr} – koszty wyszkolenia siły roboczej (zł) – dostępność wykwalifikowanych pracowników oraz koszt ich zatrudnienia,
- k_i – koszty inwestycyjne (zł) – wydatki, które należy ponieść w celu budowy nowego magazynu,
- P_m – wielkość przestrzeni magazynowej (tys. m²) – obszar, jaki będzie zajmowała działka, na której wybudowany zostanie nowy magazyn,

- A_e – aspekt ekologiczny (cecha jakościowa) – wpływ budowy magazynu na środowisko naturalne,
- A_s – aspekt społeczny (cecha jakościowa) – wpływ budowy na społeczeństwo lokalne.

Przykładowe koszty zakupu poszczególnych działek budowlanych zostały wyznaczone zgodnie z cenami ziemi uzyskanymi ze strony <http://www.immobilienscout24.de>. Kurs euro uwzględniony w obliczeniach to 4,20 zł. Koszt wyszkolenia jednego pracownika kształtuje się na poziomie 300 euro (1260 zł), zaś koszty inwestycyjne zostały przyjęte odgórnie (wielkości szacunkowe).

Tabela 7. Wartości poszczególnych cech dla wyznaczonych lokalizacji

Kryteria	k_t	k_z	k_{sr}	k_i	P_m	A_e	A_s	
Kierunek	minimum	minimum	minimum	minimum	maksimum	minimum	minimum	
Waga	7	5	3	4	5	2	2	
Obiekty i ich oceny	F. n. M.	18 312 937	10 550 000	315 000	7 362 000	25	3	1
	F.	17 539 018	4 220 000	252 000	3 272 000	32	1	4
	H.	17 736 937	11 868 750	378 000	8 180 000	30	2	1
	B.	16 602 311	5 823 600	252 000	5 726 000	30	1	5

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku zmiennych jakościowych ustalona została 5-stopniowa skala Likerta zgodna z opinią eksperta w kwestii wpływu budowy magazynu na wybraną cechę. Umożliwia ona normalizację danych niemierzalnych przez stopniowanie poszczególnych odpowiedzi respondenta w skali od 1 do $k \in N$ (N – zbiór liczb naturalnych). Preferowany jest taki dobór skali Likerta, aby k było liczbą nieparzystą.

Z racji tego, że w kwestii danej cechy wypowiada się tylko jeden ekspert, transformacja wypowiedzi do liczby z przedziału $[0;1]$ odbywa się z zastosowaniem wzoru [Kukuła 2006, s. 11]:

$$z_{ij} = \frac{l_{ij}-1}{k_j-1},$$

gdzie: l_{ij} – ocena i -tego obiektu w zakresie j -tej zmiennej jakościowej ($i = 1, \dots, k_j$),
 k_j – liczba ocen j -tej zmiennej jakościowej ($j = m+1, \dots$).

Poszczególne cechy jakościowe zostały oszacowane dzięki ocenie prawdziwości następujących stwierdzeń:

- budowa magazynu wpłynie negatywnie na otaczające środowisko naturalne – dla aspektu środowiskowego,
- budowa magazynu wpłynie negatywnie na komfort życia okolicznych mieszkańców – dla aspektu społecznego.

Wybrana do oceny miara istotności to:

- 1) nie zgadzam się;
- 2) raczej się nie zgadzam;
- 3) nie wiem;
- 4) raczej się zgadzam;
- 5) zgadzam się.

Tabela 8. Unormowane wartości zmiennych wraz z rangami uzyskanymi metodą MUZ

Lokalizacja	k_t	k_z	k_{sr}	k_i	P_m	A_e	A_s	Q	Ranga
Fulda	0,45	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	6,45	najlepsze
Bonn	1,00	0,79	1,00	0,50	0,71	1,00	0,00	5,00	najlepsze
Hanower	0,34	0,00	0,00	0,00	0,71	0,50	1,00	2,55	najgorsze
Frankfurt nad Menem	0,00	0,17	0,50	0,17	0,00	0,00	0,25	1,09	najgorsze

Źródło: opracowanie własne.

Postępowanie normalizacyjne pokazało, że lokalizacje zostały przyporządkowane do dwóch grup (najlepsze oraz najgorsze). Jest to sytuacja korzystna dla decydenta, ponieważ nie będzie on musiał przeprowadzać dokładniejszej analizy dla lokalizacji przeciętnych.

Ostatnią użytą do rankingu metodą jest metoda dyskretna AHP, w której dokonywane są porównania parami wariantów decyzyjnych względem przyjętych kryteriów. Obliczenia zostały wykonane dodatkiem programu Excel AHP. Ranking obiektów przedstawia tab. 9. Miary spójności CR kształtują się na dopuszczalnym poziomie (tab. 10).

Tabela 9. Ranking potencjalnych lokalizacji magazynu uzyskany metodą AHP

Lp.	Obiekty	Indeksy
1	Fulda	0,4735
2	Hanower	0,2336
3	Bonn	0,2259
4	Frankfurt nad Menem	0,0670

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 10. Miary spójności dla poszczególnych kryteriów

Miary spójności	Numer kryterium						
	k_t	k_z	k_{sr}	k_i	P_m	A_e	A_s
λ	4,2125	4,2121	4,1378	4,2382	4,1674	4,1378	4,0937
CI	0,0708	0,0707	0,0459	0,0794	0,0558	0,0459	0,0312
RI	0,8907	0,8907	0,8907	0,8907	0,8907	0,8907	0,8907
CR	0,0795	0,0794	0,0516	0,0891	0,0626	0,0516	0,0351

Źródło: opracowanie własne.

Porównanie uzyskanych wyników pokazuje, że najlepszym wariantem lokalizacyjnym z uwzględnieniem narzuconych kryteriów byłoby ulokowanie magazynu w okolicach miasta Fulda.

4. Podsumowanie

Wybór odpowiedniej lokalizacji magazynu centralnego jest decyzją kluczową, ponieważ wiąże się z wykorzystaniem znacznych ilości środków finansowych oraz jest przedsięwzięciem niezwykle czasochłonnym. W ostatecznym wyborze lokalizacji może pomóc metoda AHP lub MUZ (zob. tab. 11). Dzięki zastosowaniu metryki euklidesowej oraz metody środka ciężkości uzyskano dwa warianty lokalizacyjne. Ich bliskie położenie względem siebie spowodowało, że do analizy zostały włączone dwa dodatkowe miasta. Analiza wielokryterialna wykazała, że decydent mógłby być skłonny do wyboru lokalizacji w pobliżu miasta Fulda.

Tabela 11. Porównanie wyników uzyskanych metodami MUZ oraz AHP

Lokalizacja	MUZ		AHP
	Q	Ranga	Indeks
Fulda	6,45	najlepsze	0,4735
Bonn	5,00	najlepsze	0,2259
Hanower	2,55	najgorsze	0,2336
Frankfurt nad Menem	1,09	najgorsze	0,0670

Źródło: opracowanie własne.

Literatura

- Krawczyk S., 2001, *Metody ilościowe w logistyce. Tom II*, Wydawnictwo C.H. Beck, Warszawa.
- Kukuła K., 2006, *Badania operacyjne w przykładach i zadaniach*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kukuła K., 2012, *Propozycja budowy rankingu obiektów z wykorzystaniem cech ilościowych oraz jakościowych*, *Metody Ilościowe w Badaniach Ekonomicznych (XIII/1)*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Saaty T., 1990, *How to make a decision: The analytic hierarchy process*, *European Journal of Operational Research*, vol. 48.
- Saaty T., 2008, *Decision making with the analytic hierarchy process*, *International Journal of Services Sciences*, vol. 1.