

Artur DUCHACZEK\*

## **OPTIMALIZACJA WYBORU POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH WYKORZYSTYWANYCH PODCZAS REALIZACJI PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH**

W Polsce obecnie realizuje się wiele inwestycji budowlanych wymagających ciągłego zabezpieczenia w materiały budowlane. Na sprawność procesu transportowego wpływ mają przede wszystkim wykorzystywane pojazdy ciężarowe. W trakcie realizacji przedsięwzięć transportowych często mamy do czynienia z zadaniami związanymi z potrzebą wielokryterialnego podejmowania decyzji. Stosowane metody optymalizacji wielokryterialnej w większości przypadków są dość skomplikowane. Z tego też względu w niniejszej pracy przedstawiono przykład zastosowania zmodyfikowanej metody Bellingera do optymalizacji wyboru samochodów ciężarowych wykorzystywanych do zabezpieczenia logistycznego przedsięwzięć budowlanych.

Słowa kluczowe: metoda Bellingera, optymalizacja, logistyka, transport.

### **1. WPROWADZENIE**

W trakcie realizacji przedsięwzięć transportowych związanych z zabezpieczeniem logistycznym różnego rodzaju inwestycji budowlanych często mamy do czynienia z zadaniami związanymi z potrzebą wielokryterialnego podejmowania decyzji. Przykładem na to może być między innymi decyzja o zakupie środków transportowych wykorzystywanych w procesie realizacji przedsięwzięć budowlanych. Celem tego działania jest zapewnienie sprawnego i efektywnego transportu materiałów budowlanych, przy jednoczesnym efektywnym wykorzystaniu powierzchni placu budowy oraz magazynów i składowisk materiałów budowlanych.

Na sprawną realizację procesu transportowego wpływ mają przede wszystkim wykorzystywane do tego celu pojazdy ciężarowe. Dlatego wariantami decyzyj-

---

\* Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki.

nymi, ocenianymi wybraną metodą optymalizacji wielokryterialnej, będą pojazdy ciężarowe dostępne na polskim rynku. Użytecznością w analizowanym wariantcie jest zaś efektywne przemieszczanie materiałów budowlanych.

W analizie decyzyjnej należy zawsze uwzględnić wymagania sztywne (ograniczenia) jakimi są m.in. maksymalny ciężar przewożonych towarów, warunki jezdne (np. promień skrętu), koszty zakupu i eksploatacji pojazdów. Zdarza się, że ograniczenia te mogą być w konflikcie. W takim przypadku trzeba podjąć decyzję suboptymalną, która wskazuje preferencje danego decydenta. Wynika stąd, że wielokryterialne podejmowanie decyzji wymaga rozpatrzenia wzajemnych relacji pomiędzy uwzględnianymi wymaganiami [10].

Aktualnie w Polsce realizuje się wiele inwestycji budowlanych, których nierozłącznym elementem jest proces zapewnienia niezbędnych materiałów budowlanych. Jednocześnie na rynku jest duży wybór środków transportowych umożliwiających realizację tego procesu. Przedsiębiorca staje przed koniecznością dokonania zakupu przedmiotowych środków transportowych. Pojawiają się jednak dylematy dotyczące prawidłowego ich wyboru. W takich sytuacjach z pomocą przychodzi różnego rodzaju metody optymalizacji wielokryterialnej, które umożliwiają podjęcie suboptymalnej decyzji o zakupie pojazdów o znacznej przeciwieństwie wartości. Niestety metody te ze względu na swoją złożoność często zniechęcają potencjalnych decydentów do korzystania z nich. Metody optymalizacji wielokryterialnej w większości przypadków są dość skomplikowane i pracochłonne [1, 7, 8, 12, 13]. Wydaje się natomiast, że optymalizacja doboru środków transportowych powinna odbywać się w oparciu o stosunkowo prostą metodę optymalizacyjną. Jedynie w takim przypadku będzie ona chętnie stosowana przez inżynierów w codziennej praktyce. Metoda ta powinna być również łatwa do fizycznej interpretacji. W związku z tym faktem wydaje się, że zastosowanie nieznacznie zmodyfikowanej metody Bellingera umożliwi w prosty sposób optymalny dobór środków transportowych.

Wykorzystaniem średnich samochodów ciężarowymi, tzw. pojazdów skrzyniowych, zainteresowana jest również polska armia. W wojsku polskim przez wiele lat jako średni samochód ciężarowy święcił tryumfy „niezniszczalny” Star266. Jednak kilka lat temu rozpoczęto poszukiwania samochodów, które mogłyby zastąpić wysłużonego już przecież Stara. W roku 2013 na rynku pojawił się Jelcz 442 „Bartek”, którego kilkaset egzemplarzy zamówiła również polska armia. Pojazd ten charakteryzuje się dopuszczalną masą całkowitą pojazdu 15 600 kg oraz ładownością w czasie jazdy po utwardzonych drogach równą 6000 kg. Charakterystyczną cechą tego pojazdu są jego doskonałe warunki jezdne wykorzystywane w warunkach poligonowych przez wojsko [5].

W niniejszej pracy autor poświęcił swoją uwagę pojazdom ciężarowym, które mogą być przeznaczone do przedsięwzięć logistycznych zarówno na potrzeby sił zbrojnych, jak i cywilnych firm logistycznych zapewniających materiały budowlane niezbędne w inwestycjach na terenie naszego kraju.

Wybór pojazdów ciężarowych dostępnych na polskim rynku jest bardzo duży. Do najpopularniejszych marek należą m.in. firmy Iveco, Jelcz, Star, Kamaz, Mann, Mercedes Scania i Volvo. Uwzględniając dużą renomę pojazdów firmy Volvo oraz ze względu na łatwą dostępność dokumentacji opisującej parametry techniczne sprzedawanych pojazdów zaprezentowanych na stronie firmy Volvo Trucks [6] w niniejszej pracy autor swoją uwagę skupił na pojazdach właśnie tej firmy.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie propozycji niewielkiej modyfikacji metody Bellingera ułatwiającej przyszłemu decydentowi dokonanie wyboru optymalnego w danych warunkach środka transportowego.

## 2. PRZYJĘTY ALGORYTM OBLICZENIOWY

Metoda Bellingera jest jedną ze stosunkowo mało znanych metod optymalizacji wielokryterialnej, w której hierarchie obiektów ustala się na podstawie wartości oceny łącznej  $o_i$  uzyskanej na podstawie przyjętych kryteriów cząstkowych  $K_i$  [4, 14]. W tej metodzie oceny poszczególnych kryteriów obliczane są na podstawie *odległości* wartości analizowanego kryterium do wartości najbardziej niepożądaney. Im analizowany wariant jest bliższy wartości pożądanej, tym jest bardziej *odległy* od wartości niepożądaney, a zatem jego ocena jest wyższa. Z tego względu należy oceny poszczególnych wariantów decyzyjnych doprowadzić do porównywalności względem wszystkich przyjętych kryteriów, a następnie je zsumować [14]. W pracy [4] przedstawiono bardzo przejrzysty algorytm obowiązujący w metodzie Bellingera, w którym wyszczególniono osiem podstawowych jego etapów.

W pracy [2] autorzy podkreślili, że w praktyce inżynierskiej mogą wystąpić trudności z jednoznacznym określeniem wartości niepożądaney danego kryterium. Wyjściem z tej sytuacji mogą być ich zdaniem różnego rodzaju modyfikacje wprowadzone do metody Bellingera. W cytowanej pracy przeanalizowano możliwość optymalnego doboru za pomocą tejże metody wózków widłowych wykorzystywanych w logistyce magazynowej. Uwzględniono w niej pięć kryteriów optymalizacji, wśród których były wysokość, długość i szerokość wózka oraz jego moc silnika, a także promień jego skrętu. Zdaniem autorów pracy [2] wartość niepożądaną danego kryterium można uwzględnić podczas określania warunków brzegowych ograniczających dane kryterium. Przykładowo przyjęcie wartości szerokości wózka widłowego jest uzależnione od obowiązującej skrajni w danym magazynie, a zatem podawanie w tym przypadku wartości niepożądanych jest zbędne, gdyż wystarczy podać ograniczenia w tym zakresie. Usunięcie z istniejącego algorytmu metody Bellingera wartości niepożądaney ułatwiło w znacznym stopniu samą optymalizację [2].

Z tego też względu w pracy [2] autorzy zaproponowali pewną modyfikację metody Bellingera umożliwiającą całkowite wyeliminowanie z algorytmu obliczeniowego wartości niepożądaney. Uzyskane w tej pracy wyniki analiz były bardzo zadawalają-

ce jednak, wykazały kolejne niedogodności związane z użyciem zaproponowanego algorytmu. Nasuwa się bowiem zasadnicze pytanie: Dlaczego podczas optymalizacji nie podawać tylko pożądanego kierunku zmian (minimum lub maksimum) danego kryterium? Takie podejście do optymalizacji jest uzasadnione praktyką inżynierską, bowiem bardzo często określanie dokładnej wartości pożądanej danego kryterium jest dość niewygodne lub nieprecyzyjne. Po co na przykład podawać pożądaną moc silnika pojazdu ciężarowego lub jego ładowność, skoro można podać ogólnie, że interesują nas w tym przypadku wartości maksymalne. Wydaje się, że takie podejście do optymalizacji znacznie ją ułatwi. Z tego też względu w niniejszej pracy autor zaproponował kolejną niewielką modyfikację metody Bellingera.

Poniżej w sposób opisowy przedstawiono zależności umożliwiające dokonanie obliczeń według zmodyfikowanej metody Bellingera z podziałem na osiem etapów [4]. Opisowana modyfikacja oryginalnej metody Bellingera występuje w etapie III, w którym następuje obliczanie pomocniczych wartości pożądanych  $S_j^+$  i niepożądanych  $S_j^-$  dla danego kryterium.

W etapie I następuje określenie wymagań i ograniczeń dla przyszłych hipotetycznych wariantów rozwiązań analizowanego problemu (tzw. warunki brzegowe). Etap II to zdefiniowanie dostępnych w danych okolicznościach wariantów decyzyjnych ( $W_1, W_2, \dots, W_n$ ). W etapie III następuje szczegółowe określenie przyjętych kryteriów oceny ( $K_1, K_2, \dots, K_m$ ) i jednostek pomiarowych oraz pożądanego kierunku zmian ( $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$ ) w obrębie danego kryterium cząstkowego („MIN” lub „MAX”).

W etapie tym oblicza się również tzw. *drogę*. W tym celu najpierw określa się średnią arytmetyczną  $X_j$  wartości analizowanych wariantów pod kątem poszczególnych kryteriów:

$$X_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{ij}. \quad (1)$$

gdzie  $a_{ij}$  jest wartością  $i$ -tego wariantu pod kątem  $j$ -tego kryterium.

Następnie określamy pomocniczą wielkość pożądaną  $S_j^+$  i niepożądaną  $S_j^-$  dla danego kryterium według zależności:

$$\text{jeżeli } Z_j = \text{MAX to } S_j^+ = 2X_j \text{ oraz } S_j^- = 0, \quad (2)$$

$$\text{jeżeli } Z_j = \text{MIN to, } S_j^+ = 0 \text{ oraz } S_j^- = 2X_j. \quad (3)$$

Założenia przedstawione powyżej wynikają z faktu, że parametry techniczne pojazdów w danej kategorii nie różnią się od siebie więcej niż o około 20-30%. W przypadku większych rozpiętości poszczególnych parametrów technicznych należałoby zwiększyć mnożnik w wyrażeniu (2) i (3) z dwóch na trzy.

Uzyskane wielkości pozwalają nam na określenie całkowitej długości *drogi*  $L_i$ :

$$L_j = S_j^+ - S_j^- \quad (4)$$

Etap IV polega na ustaleniu hierarchii poszczególnych kryteriów, poprzez ustalenie subiektywnych wartości wag jakie nadaje decydent uwzględnionym kryteriom oceny ( $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ ). W etapie V następuje tworzenie macierzy  $A$  (1), zawierającej rzeczywiste wartości analizowanych wariantów pod kątem poszczególnych kryteriów.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie:  $a_{ij}$  oznacza wartość  $i$ -tego wariantu pod kątem  $j$ -tego kryterium.

Etap VI obejmuje przedstawienie każdej liczby z tablicy z etapu V jako procentu *drogi* od stanu najmniej do najbardziej pożądanego. W tym celu w pierwszej kolejności od wartości rzeczywistej wariantu dla danego kryterium należy odjąć jego pomocniczą wielkość niepożądaną. Obliczając rzeczywiście przebytą *drogę* wyznaczamy wyrazy macierzy  $B$  (etap VIa) (2):

$$B = \begin{bmatrix} (a_{11} - S_1^-) & (a_{12} - S_2^-) & \dots & (a_{1m} - S_m^-) \\ (a_{21} - S_1^-) & (a_{22} - S_2^-) & \dots & (a_{2m} - S_m^-) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (a_{n1} - S_1^-) & (a_{n2} - S_2^-) & \dots & (a_{nm} - S_m^-) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Następnie przedstawiamy każdą liczbę z macierzy  $B$  jako procent rzeczywiście przebytej *drogi*, w wyniku czego powstaje macierz  $C$  (etap VIb) (2).

$$C = \begin{bmatrix} \frac{100b_{11}}{L_1} & \frac{100b_{12}}{L_2} & \dots & \frac{100b_{1m}}{L_m} \\ \frac{100b_{21}}{L_1} & \frac{100b_{22}}{L_2} & \dots & \frac{100b_{2m}}{L_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{100b_{n1}}{L_1} & \frac{100b_{n2}}{L_2} & \dots & \frac{100b_{nm}}{L_m} \end{bmatrix} \quad (7)$$

W etapie VII mnożymy liczby otrzymane w etapie VI przez wagi przyjęte w etapie IV, w ten sposób powstaje macierz  $D$  (5).

$$D = \begin{bmatrix} c_{11} \times Y_1 & c_{12} \times Y_2 & \dots & c_{1m} \times Y_m \\ c_{21} \times Y_1 & c_{22} \times Y_2 & \dots & c_{2m} \times Y_m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} \times Y_1 & c_{n2} \times Y_2 & \dots & c_{nm} \times Y_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

Etap końcowy (VIII) to ustalenie wariantu najlepszego na podstawie tak zwanej oceny łącznej  $o_i$  (6), będącej sumą ocen przyznanych poszczególnym wariantom z uwzględnieniem wszystkich analizowanych kryteriów:

$$o_i = \sum_{j=1}^m c_{ij} \cdot \quad (6)$$

Aby uzyskane wyniki analiz były porównywalne z wynikami innych metod optymalizacyjnych, należy je w odpowiedni sposób zmodyfikować. Przykładową zmodyfikowaną ocenę łączną  $z_i$  (7) można określić z następującej zależności [3] (10):

$$z_i = \frac{o_i}{O_w}, \quad (10)$$

gdzie  $O_w$  jest sumą wszystkich ocen łącznych  $o_i$ , obliczaną jako:

$$O_w = \sum_{i=1}^n o_i. \quad (11)$$

### 3. PRZYKŁAD WYBORU ŚRODKÓW TRANSPORTOWYCH

W pracy zaprezentowano możliwości zastosowania zmodyfikowanej metody Bellingera do optymalizacji doboru środków transportowych pod kątem ich własności jezdnych. W niniejszej pracy wykorzystano dane dostępne na stronie internetowej firmy Volvo Trucks [6]. W analizach uwzględniono sześć dwuosioowych pojazdów firmy Volvo (tabela 1). Przyjęte pojazdy charakteryzowały się czterema parametrami, które w tym przypadku pełniły jednocześnie rolę ograniczeń. Pierwszy z tych parametrów to dopuszczalna masa całkowita podwozia równa 18 000 -19 500 kg, drugi parametr to rozstaw osi pomiędzy 3 400-3 700 mm, następnie szerokość pojazdu 2 400-2 500 mm oraz jego wysokość 2 800-3 200 mm. Przyjęta dopuszczalna całkowita masa podwozia powodowała przyjęcie dopuszczalnego nacisku na osie odpowiednio 7 100 (dla jednego z pojazdów 8 000) i 11 500 kg

(tabela 2). To właśnie przede wszystkim te parametry zdecydowały o wyborze przedmiotowej grupy samochodów ciężarowych do optymalizacji.

Tabela 1. Kryteria oceny samochodów ciężarowych przyjętych do analiz [6]

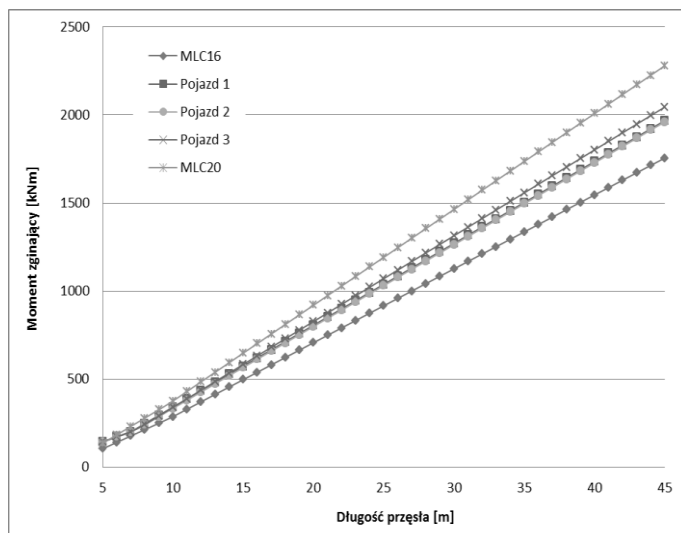
| Model pojazdu | Kąt najazdu [°] | Rozstaw osi [mm] | Ładowność [kg] | Średnica zawracania [mm] | Moc silnika [KM] |
|---------------|-----------------|------------------|----------------|--------------------------|------------------|
| FE 42 RL      | 18              | 3495             | 12135          | 12800                    | 250              |
| FE 42 RA      | 17              | 3500             | 12225          | 12800                    | 250              |
| FL 42 R 818A  | 14              | 3500             | 12635          | 12300                    | 250              |
| FL 42 R 818L  | 14              | 3500             | 12670          | 12300                    | 250              |
| FM 42 R1HA    | 15              | 3700             | 11510          | 13300                    | 330              |
| FM 44 R3CLX   | 27              | 3700             | 10285          | 13400                    | 420              |

Tabela 2. Parametry samochodów ciężarowych przyjęte do określenia klasy MLC [6]

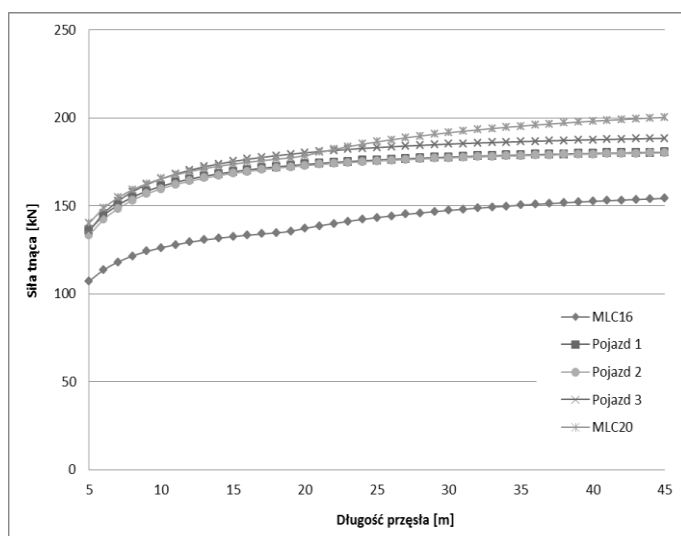
| Model pojazdu | Nacisk osi przedniej [kg] | Nacisk osi tylnej [kg] | Rozstaw osi [m]          | Szerokość pojazdu [m] | Oznaczenie pojazdu |
|---------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|
| FE 42 RL      | 7100                      | 11500                  | 3,495<br>(przyjęto 3,50) | 2,50                  | Pojazd nr 1        |
| FE 42 RA      |                           |                        | 3,50                     | 2,50                  |                    |
| FL 42 R 818A  |                           |                        | 3,50                     | 2,40                  |                    |
| FL 42 R 818L  |                           |                        | 3,50                     | 2,40                  |                    |
| FM 42 R1HA    |                           |                        | 8000                     |                       | 3,70               |
| FM 44 R3CLX   | 3,70                      | 2,49                   |                          |                       | Pojazd nr 3        |

Jak podaje J. Rymśa [9], na składowiskach znajdują się tymczasowe konstrukcje mostowe przeznaczone do szybkiej budowy i odbudowy obiektów drogowych przy przekraczaniu rzek takie, jak most składany MS-54, drogowy most składany DMS-65, składany wiadukt drogowy WD-80 oraz przęsła mostowe z belek L-18. Wybrana do analiz grupa pojazdów ciężarowych w trakcie działań wojennych lub innych sytuacji kryzysowych będzie mogła przemieszczać się po ciągach komunikacyjnych zabezpieczanych przez wojsko polskie, ponieważ dopuszczalny nacisk pojedynczej osi pojazdu kołowego dla mostu składanego MS-54, WD-80 oraz przęsła mostowego z belek L wynosi 120 kN/oś, a dla mostu składanego DMS-65 wynosi 100 kN/oś (będzie zatem nieznacznie tylko przekroczony).

Uwzględniając parametry przyjętych do obliczeń samochodów ciężarowych sklasyfikowano je do trzech grup zaprezentowanych w tabeli 2. Na rysunkach 1 i 2 zaprezentowano rozkład sił wewnętrznych (momentów zginających i sił tnących) w hipotetycznym przęśle w zależności od obciążającego je pojazdu.



Rys. 1. Wartość momentu zginającego w zależności od długości hipotetycznego przęsła



Rys. 2. Wartość siły tnącej w zależności od długości hipotetycznego przęsła

Na podstawie zapisów Stanag-u 2021 [11] pojazd nr 1 i 2 można zakwalifikować do klasy MLC19 (bez uwzględnienia szerokości pojazdu) natomiast pojazd nr 3 do klasy MLC20. Uwzględniając jednak maksymalne dopuszczalne obciążenia tylnej osi analizowanych pojazdów należałoby je wszystkie sklasyfikować do klasy MLC 26.



W analizach założono sześć możliwych wariantów rozwiązania (W1 ÷ W6). Wśród nich były dwa pojazdy Volvo klasy FE (W1 i W2), dwa pojazdy klasy FL (W3 i W4) i dwa pojazdy klasy FM (W5 i W6) (tabela 1). Przyjęto również pięć kryteriów oceny przedmiotowych pojazdów, takich jak kąt najazdu (K1), rozstaw osi (K2), ładowność pojazdu (K3), minimalna średnica zawracania (K4) i moc silnika (K5) (tabela 1). Jednocześnie przyjęto pożądany kierunek zmian wartości dla poszczególnych kryteriów (tabela 3). Zakładając, że należy szukać pojazdów charakteryzujących się największą wartością kąta najazdu (K1), ładownością pojazdu (K3) i mocą silnika (K5), najmniejszą zaś minimalną średnicą zawracania (K4). Przyjęto również, że maksymalnie duży rozstaw osi (K2) będzie umożliwił w przypadku krótkich przęseł otrzymanie mniejszych wartości momentów zginających w prześle mostu po którym będą przejeżdżać analizowane pojazdy (tabela 1).

Aby wykluczyć wpływ współczynników ważności (tzw. wag) na wyniki prowadzonych obliczeń w niniejszej pracy przyjęto je dla wszystkich kryteriów jednakowe (tabela 3). Dodatkowo podano również pożądaną i niepożądaną wartość dla poszczególnych kryteriów, którą dla celów porównawczych zastosowano jedynie w oryginalnej metodzie Bellingera (tabela 3). W tabeli 4 przedstawiono zestawienie wartości kryteriów dla porównywanych wariantów przedstawionych i opisanych w tabeli 1 (etap V).

Tabela 3. Pożądany kierunek zmian liczbowych i wag dla poszczególnych kryteriów

| Wyszczególnienie        | K1  | K2   | K3    | K4    | K5  |
|-------------------------|-----|------|-------|-------|-----|
| pożądany kierunek zmian | max | max  | max   | min   | max |
| współczynniki ważności  | 0,2 | 0,2  | 0,2   | 0,2   | 0,2 |
| wartość pożądana        | 27  | 3700 | 12670 | 12300 | 420 |
| wartość niepożądana     | 14  | 3495 | 10285 | 13400 | 250 |

Tabela 4. Wartości kryteriów dla poszczególnych wariantów (etap V)

| Wariant/Kryterium | K1 | K2   | K3    | K4    | K5  |
|-------------------|----|------|-------|-------|-----|
| W1                | 18 | 3495 | 12135 | 12800 | 250 |
| W2                | 17 | 3500 | 12225 | 12800 | 250 |
| W3                | 14 | 3500 | 12635 | 12300 | 250 |
| W4                | 14 | 3500 | 12670 | 12300 | 250 |
| W5                | 15 | 3700 | 11510 | 13300 | 330 |
| W6                | 27 | 3700 | 10285 | 13400 | 420 |

Tabela 5. Wielkość drogi od stanu rzeczywistego do niepożądanego  $S_j^-$  (etap VIa)

| Wariant/Kryterium | K1    | K2      | K3       | K4        | K5     |
|-------------------|-------|---------|----------|-----------|--------|
| W1                | 18,00 | 3495,00 | 12135,00 | -12833,33 | 250,00 |
| W2                | 17,00 | 3500,00 | 12225,00 | -12833,33 | 250,00 |
| W3                | 14,00 | 3500,00 | 12635,00 | -13333,33 | 250,00 |
| W4                | 14,00 | 3500,00 | 12670,00 | -13333,33 | 250,00 |
| W5                | 15,00 | 3700,00 | 11510,00 | -12333,33 | 330,00 |
| W6                | 27,00 | 3700,00 | 10285,00 | -12233,33 | 420,00 |

Następnie w tabeli 5 przedstawiono liczby z tabeli 4 (z etapu V) jako wielkość drogi od stanu rzeczywistego do pomocniczej wielkości niepożądanego  $S_j^-$  (macierz  $B$  – etap VIa), przy czym znak minus oznacza, że wielkość pomocnicza  $S_j^-$  jest większa od rzeczywistej wartości analizowanego kryterium. Natomiast w tabeli 6 zaprezentowano liczby z tabeli 5 jako procent rzeczywiście przebytej drogi (macierz  $C$  – etap VIb).

Tabela 6. Liczby z tabeli 5 jako procent rzeczywiście przebytej drogi (etap VIb)

| Wariant/Kryterium | K1    | K2    | K3    | K4    | K5    |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| W1                | 51,43 | 49,01 | 50,94 | 50,07 | 42,86 |
| W2                | 48,57 | 49,08 | 51,32 | 50,07 | 42,86 |
| W3                | 40,00 | 49,08 | 53,04 | 52,02 | 42,86 |
| W4                | 40,00 | 49,08 | 53,19 | 52,02 | 42,86 |
| W5                | 42,86 | 51,88 | 48,32 | 48,11 | 56,57 |
| W6                | 77,14 | 51,88 | 43,18 | 47,72 | 72,00 |

Tabela 7. Liczby z tabeli 6 przemnożone przez wagi przyjęte w tabeli 3 (etap VII)

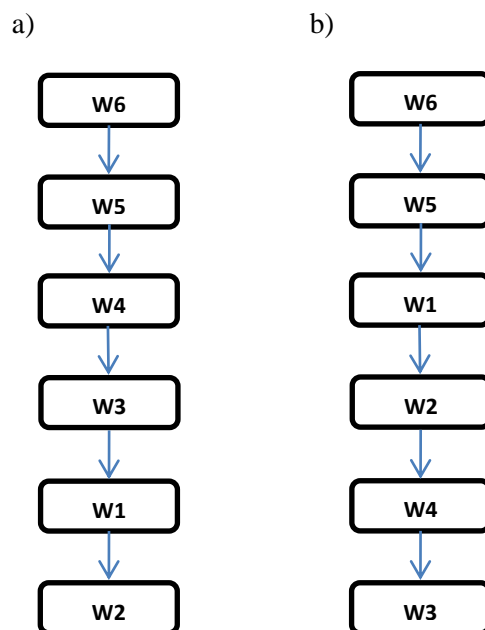
| Wariant/Kryterium | K1    | K2    | K3    | K4    | K5    |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| W1                | 10,29 | 9,80  | 10,19 | 10,01 | 8,57  |
| W2                | 9,71  | 9,82  | 10,26 | 10,01 | 8,57  |
| W3                | 8,00  | 9,82  | 10,61 | 10,40 | 8,57  |
| W4                | 8,00  | 9,82  | 10,64 | 10,40 | 8,57  |
| W5                | 8,57  | 10,38 | 9,66  | 9,62  | 11,31 |
| W6                | 15,43 | 10,38 | 8,64  | 9,54  | 14,40 |

Tablica 8. Oceny łączne uzyskane w wyniku obliczeń

| Wariant | Metoda Bellingera |                    | Zmodyfikowana metoda Bellingera |                    |
|---------|-------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|
|         | Ocena łączna      |                    |                                 |                    |
|         | oryginalna $o_i$  | zunifikowana $z_i$ | oryginalna $o_i$                | zunifikowana $z_i$ |
| W1      | 32,577            | 0,131              | 48,860                          | 0,163              |
| W2      | 32,281            | 0,130              | 48,379                          | 0,161              |
| W3      | 40,194            | 0,162              | 47,399                          | 0,158              |
| W4      | 40,488            | 0,163              | 47,428                          | 0,158              |
| W5      | 43,041            | 0,173              | 49,549                          | 0,165              |
| W6      | 60,000            | 0,241              | 58,385                          | 0,195              |

Realizując etap VII (tabela 7), mnożymy liczby otrzymane w etapie VIb (tabela 6) przez wagi przyjęte w etapie IV (tabela 3). W tabeli 8 dla analizowanego przypadku zaprezentowano zarówno wyznaczone oceny łączne  $o_i$ , jak i oceny zmodyfikowane  $z_i$ . W tabeli tej zaprezentowano również wyniki obliczeń analizowanego przypadku, zrealizowane z wykorzystaniem metody Bellingera [4]. Wyniki obliczeń przedstawiono również w sposób graficzny na rys. 3.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że uwzględniając podczas wyboru przyjęte kryteria najwyższą zmodyfikowaną ocenę łączną  $z_i$  otrzymał wariant W6, następną zaś wariant W5. Oznacza to, że przy założonych warunkach brzegowych wariant W6 (FM 44 R3CLX) jest rozwiązaniem optymalnym zarówno według metody Bellingera, jak i jej wersji zmodyfikowanej. W obu przypadkach wyniki uzyskane dla wariantu W6 są zdecydowanie większe od pozostałych. Należy jednak pamiętać, że prezentowane obliczenia nie uwzględniają rzeczywistych preferencji decydenta ponieważ dla wszystkich pięciu kryteriów równe wartości współczynników ważności (tzw. wag).



Rys. 3. Graficzne przedstawienie wyników obliczeń według metody:  
a) Bellingera oraz b) jej wersji zmodyfikowanej

#### 4. PODSUMOWANIE

Zaletą proponowanej niewielkiej modyfikacji metody Bellingera jest fakt, że eliminuje ona z istniejącego algorytmu metody potrzebę określania liczbowych wartości pożądaných i niepożądaných danego kryterium. Wprowadzona zmiana powoduje, że metoda ta nadaje się doskonale do wykorzystania podczas optymalizacji doboru samochodów ciężarowych wykorzystywanych w procesie zabezpieczenia przedsięwzięć budowlanych. Co najważniejsze proponowana zmiana nie komplikuje prostego i przejrzystego oryginalnego algorytmu metody Bellingera, przez co metoda ta jest nadal warta polecenia do wykorzystania dla inżynierów w codziennej działalności zawodowej.

Odrębną kwestią jest ustalenie kryteriów oceny analizowanych pojazdów. Po pierwsze jest to często kwestia indywidualnych preferencji danego decydenta. Po drugie związane jest to często z dostępnością odpowiednich danych (parametrów technicznych) charakteryzujących pojazdy ciężarowe (warianty decyzyjne). Niestety często dane techniczne, które należałoby uwzględnić w procesie optymalizacji wyboru środków transportowych nie są umieszczane na kartach informacyjnych danego pojazdu, przez co ilość zastosowanych kryteriów zostaje znacznie ograniczona.

Niewątpliwym problemem, który pojawia się w procesie optymalizacji doboru samochodów ciężarowych wykorzystywanych w procesie zabezpieczenia placów budów jest dobór wartości wag poszczególnych kryteriów wykorzystywanych w procesie decyzyjnym. W większości metod optymalizacyjnych wielkości te dobierane są intuicyjnie, bez stosowania metod i algorytmów minimalizujących niekonsekwencję wyboru osoby prowadzącej tą optymalizację. Wydaje się, że ten element jest poważnym niedociągnięciem omawianej metody i powinien zostać w przyszłości wyeliminowany.

### LITERATURA

- [1] Belton V., Stewart T., Multiple criteria decision analysis: an integrated approach. Springer, 2002.
- [2] Duchaczek A., Skorupka D., Zastosowanie zmodyfikowanej metody Bellingera do optymalizacji doboru środków transportowych, Budownictwo i Architektura, 2014, vol. 13, nr 4, s. 351-356.
- [3] Duchaczek A., Skorupka D., Ocena ryzyka uszkodzenia obiektów mostowych, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych im. gen. Tadeusza Kościuszki, 2013, nr 3, s. 99-109.
- [4] Górny P., Elementy analizy decyzyjnej. Akademia Obrony Narodowej, Warszawa 2004.
- [5] [http://pl.uzbrojenie.wikia.com/wiki/Jelcz\\_442.32\\_Bartek](http://pl.uzbrojenie.wikia.com/wiki/Jelcz_442.32_Bartek) <dostęp on-line 2.12.2014>.
- [6] <http://www.volvotrucks.com> <dostęp on-line 02.12.2014>.
- [7] Junker U., Preference-based search and multi-criteria optimization. Annals of Operations Research, 2004, vol.130(1-4), s. 75-115.
- [8] Kunjur A., Krishnamurty S., A robust multi-criteria optimization approach. Mechanism and Machine Theory, 1997, 32(7), s. 797-810.
- [9] Marszałek J. i inni, Mosty składane. Projektowanie, budowa i eksploatacja. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2005.
- [10] Skorupka D., Duchaczek A., Szleszyński A., Optymalizacja doboru środków transportowych w logistyce magazynowej, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych im. gen. Tadeusza Kościuszki, 2012, nr 4, s. 137-145.
- [11] Stanag 2021. Military Load Classification of Bridges. Edition no. 6. 7 September 2006.
- [12] Steuer R. E., Multiple criteria optimization: theory, computation, and application. Malabar: Krieger, 1989.
- [13] Turskis Z., Zavadskas E. K., Peldschus F., Multi-criteria optimization system for decision making in construction design and management. Inżynieria i Gospodarka Budowlana, 2009, vol. 1(61), s. 7-18.
- [14] Wolny M., Wspomaganie decyzji kierowniczych w przedsiębiorstwie przemysłowym. Wieloatrybutowe wspomaganie organizacji przestrzennej komórek produkcyjnych z zastosowaniem teorii gier, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.

## **OPTIMIZATION OF THE SELECTION OF TRUCKS USED IN CONSTRUCTION PROJECTS**

### **Summary**

In Poland, currently there are a lot of ongoing construction projects requiring a continuous supply of building materials. Efficient implementation of the transport process is influenced primarily by trucks used for this purpose. During the implementation of transport projects we often have to deal with tasks which require multi-criteria decision-making. The currently used multi-criteria optimization methods in most cases are quite complicated. For this reason, in this paper the example of implementation of the modified Bellinger method for optimization of the choice of trucks used for logistic construction projects has been presented. The results were compared with calculations basing on the original Bellinger method.

Keywords: Bellinger method, optimization, logistics, transport