

Dorota GAWROŃSKA  
Politechnika Śląska  
Wydział Organizacji i Zarządzania

## WIELOKRYTERIALNA ANALIZA PORÓWNAWCZA POJAZDU Z SILNIKIEM SPALINOWYM I POJAZDU Z SILNIKIEM ELEKTRYCZNYM POD WZGLĘDEM FUNKCJONALNOŚCI ORAZ SKAŻENIA ŚRODOWISKA

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę samochodów napędzanych silnikiem spalinowym oraz silnikiem elektrycznym ze względu na podstawowe parametry techniczne oraz skażenie środowiska. Ponieważ kryteria oceny pojazdów są zarówno kryteriami ilościowymi, jak i jakościowymi, posłużono się teorią zbiorów rozmytych. Na tej podstawie utworzono model rozmyty analizy porównawczej pojazdów.

**Słowa kluczowe:** kryterium, waga, parametry, liczba rozmyta, liczba LR, funkcja przynależności, funkcje odniesienia, skażenie środowiska, napęd elektryczny, silnik spalinowy.

## MULTI-CRITERIA COMPARATIVE ANALYSIS OF VEHICLE WITH COMBUSTION ENGINE AND ELECTRIC IN TERMS OF FUNCTIONALITY AND ENVIRONMENTAL CONTAMINATION

**Summary.** This paper presents an analysis of the internal combustion engine-powered vehicles and power because of the basic technical and environmental pollution. Since the criteria for assessing the vehicles are both quantitative criteria and qualitative, were used in the theory of fuzzy sets. On this basis, established a comparative analysis of fuzzy model vehicles.

**Keywords:** criterion, weight, performance, number of fuzzy number of LR, membership function, function reference, environmental pollution, electric motor, internal combustion engine.

## 1. Wprowadzenie

Jednym z problemów współczesnego świata jest oparcie motoryzacji na paliwach pochodzących z ropy naftowej. Uzależnienie od krajów eksportujących ropę oraz stale wzrastająca cena ropy przyczyniają się do poszukiwania nowych rozwiązań, w tym zastosowania jako źródła energii różnych paliw: gazu, wodoru, biopaliwa czy odnawialnych źródeł energii (energia wiatrowa, wodna, geotermalna, biomasy). Jest to alternatywa dla popularnych paliw, takich jak benzyna czy olej napędowy. Ważnym argumentem jest również kwestia skażenia środowiska. Przy eksploatacji samochodów z silnikiem spalinowym następuje emisja: tlenku węgla (CO), węglowodorów (HC), tlenków azotu (NOx), dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) czy azotu (N<sub>2</sub>). Emisja tych zanieczyszczeń nie występuje natomiast przy eksploatacji samochodu elektrycznego. Kwestia odpowiedzialności społeczeństwa w kwestii ochrony środowiska jest jednym z argumentów branych pod uwagę przy rozpatrywaniu zakupu samochodu elektrycznego. Drugą kwestią jest europejski standard emisji spalin (norma dopuszczalnych emisji spalin w nowych pojazdach sprzedawanych na terenie Unii Europejskiej). Standardy te zostały opracowane w serii dyrektyw europejskich, które sukcesywnie zwiększają swoją restrykcyjność<sup>1</sup>.

W dzisiejszych czasach sektor motoryzacji przedstawia szeroką gamę samochodów ze względu na parametry techniczne oraz zastosowane w nich źródła energii: benzyna, ropa, gaz, prąd, biopaliwa itp. Można wyróżnić następujące rodzaje samochodów: samochody z silnikiem spalinowym, samochody z silnikiem elektrycznym oraz hybrydy, które łączą dwa pierwsze warianty. Samochody elektryczne wykorzystują jako źródło energii akumulatory, np. akumulatory kwasowo-ołowiowe, akumulatory niklowo-wodorkowe, akumulatory Zebra, akumulator litowo-jonowy. Najczęściej wykorzystywanym w samochodach akumulatorem jest akumulator litowo-jonowy.

Dla potencjalnego klienta wybór samochodu nie jest łatwy, głównie ze względu na zróżnicowanie cech opisujących dane typy samochodów oraz ze względu na zmienność wielkości kosztów rozkładających się w czasie.

Zarówno pojazdy napędzane silnikiem elektrycznym, jak i samochody napędzane silnikiem spalinowym mają wady i zalety. Wadami pojazdów napędzanych silnikiem spalinowym są np.: import coraz droższej, zagranicznej ropy, podczas gdy energia może być wytwarzana samodzielnie w kraju (np. Elektrowniach Bełchatów, Kozienice, Opole, Turów); wyższy stopień emisji szkodliwych zanieczyszczeń niż w przypadku samochodów elektrycznych. Do zalet samochodu z silnikiem spalinowym należą: nieograniczony zasięg (inaczej niż w przypadku samochodu elektrycznego, w którym jest on ograniczony stopniem

---

<sup>1</sup> Obecnie obowiązuje Dyrektywa 2007/715/EC[13] dla lekkich samochodów osobowych i służbowych od 2009 roku. Planowana jest dyrektywa 2007/715/EC[13] od 2014 roku dla ciężkich pojazdów samochodowych. Dopuszczalna wartość emisji tlenków azotu ma wynieść 400 mg/kWh, a więc o 80% mniej niż w normie Euro 5. Limity emisji cząstek stałych zostaną zmniejszone o 66% i mają wynosić 10 mg/kWh.

naładowania akumulatora); większa przestrzeń bagażowa oraz ładowność; szeroki wachlarz zastosowań (miasto, teren, transport).

Zaletami samochodów elektrycznych są:

- niska emisja zanieczyszczeń do środowiska,
- wyższa konwersja energii na ruch,
- bezpłatne parkowanie w strefach płatnego parkowania (np. Katowice<sup>2</sup>) lub zniżki na parkowanie (np. Szczecin, Kraków),
- zdecydowanie niższe koszty pokonywania krótkich dystansów niż samochodem spalinowym,
- proste w konstrukcji, mniejsze prawdopodobieństwo awarii oraz koszty eksploatacji,
- hamowanie regeneracyjne (odzyskiwanie energii elektrycznej z hamowania),
- energia elektryczna może być wytwarzana z paliw kopalnych: węgiel kamienny i brunatny, oraz z odnawialnych źródeł energii, czyli z energii wiatrowej, wodnej, geotermalne, biomasy, natomiast silniki spalinowe potrzebują konkretnych rodzajów paliwa,
- podczas postoju w korku nie jest zużywana energia w ilości większej niż podczas jazdy (w samochodach z silnikiem spalinowym spalanie paliwa wzrasta),
- samochody elektryczne są cichsze od spalinowych.

Wadami samochodów elektrycznych są:

- przeznaczone głównie na tryb miejski,
- problem recyklingu i utylizacji po okresie eksploatacji,
- zasięg jest zdecydowanie krótszy niż samochodów z silnikiem spalinowym,
- samochody elektryczne są droższe od spalinowych,
- wysoka cena nowych akumulatorów,
- wraz z eksploatacją akumulatorów spada zasięg,
- ze względu na montaż akumulatorów zmniejszają się ładowność samochodu i obszar przestrzeni ładunkowej,
- zasięg skraca się po włączeniu ogrzewania lub klimatyzacji czy podczas jazdy po zmiennym ukształtowaniu terenu.

W zależności od wyboru kryterium oceny, przewagę mają albo samochody spalinowe albo elektryczne. Aby porównać omawiane typy pojazdów, posłużono się teorią zbiorów rozmytych<sup>3</sup>, która umożliwia uwzględnienie nie tylko różnego rodzaju kryteriów jakościowych oraz ilościowych, ale również kryteriów ilościowych przedstawionych w formie przedziałów wartości (jak np. czas ładowania akumulatorów czy przestrzeń ładunkowa).

---

<sup>2</sup> UM Katowice [bip.um.katowice.pl](http://bip.um.katowice.pl) 12.05.2013.

<sup>3</sup> Kacprzyk J.: Zbiory rozmyte w analizie systemowej. PWN, Warszawa 1986.

## 2. Teoria zbiorów rozmytych

W pracy zastosowano liczby rozmyte<sup>4</sup> jako reprezentację niepewnych wartości, które „pozwalają określić nie tylko w pełni możliwe wartości danej i wartości całkiem niemożliwe, ale także wartości możliwe w różnych stopniach”<sup>5</sup>. Liczby rozmyte charakteryzowane są przez trzy parametry  $m, \alpha, \beta$ , co zapisuje się jako  $A = (m, \alpha, \beta)$ .

Parametr  $m$  jest liczbą rzeczywistą, zwaną wartością średnią,  $\alpha, \beta$  są odpowiednio rozrzutami lewostronnym i prawostronnym, a  $L$  i  $R$  to funkcje odniesienia. Funkcja przynależności liczby typu  $LR$  określona jest następującym wzorem:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m-x}{\alpha}\right) & \text{dla } x < m \\ 1 & \text{dla } x = m \\ R\left(\frac{x-m}{\beta}\right) & \text{dla } x > m \end{cases} . \quad (1)$$

Ze względu na fakt określania ocen pojazdów względem parametrów technicznych jako poziom spełnienia w przedziale możliwych wartości oraz opierania się na niektórych kryteriach wyrażonych w formie przedziałów wyrażających niepewność ( $[m-\alpha, m]$  oraz  $[m, m+\beta]$ ), w niniejszej pracy przyjęto następującą postać funkcji  $L$  oraz  $R$ <sup>6</sup>:

$$L(x) = R(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x < m - \alpha \\ 1 - |x| & \text{dla } m - \alpha \leq x \leq m + \beta \\ 0 & \text{dla } x > m + \beta \end{cases} . \quad (2)$$

Operacje na liczbach rozmytych typu  $LR$  będą określane jako operacje na tych trzech parametrach  $(m, \alpha, \beta)$ <sup>7</sup>.

Ze względu na różne preferencje potencjalnych właścicieli pojazdu z silnikiem spalinowym czy elektrycznym, można wprowadzić oceny ważone kryteriów, uwzględniające kładzenie większego nacisku na pewne parametry techniczne.

## 3. Przedstawienie hierarchicznej struktury parametrów technicznych

Przystępując do analizy porównawczej pojazdów, tworzymy strukturę kryteriów. Na początku wyodrębniamy parametry (kryteria), które wyrażają preferencje potencjalnego właściciela (poziom kryteriów szczegółowych, niepodzielnych – *Poziom 2* struktury

<sup>4</sup> Dubois D., Prade H.: Fuzzy set and systems – theory and applications. Academic press, New York 1980.

<sup>5</sup> Łachwa A.: Rozmyty świat zbiorów, liczb relacji, faktów, reguł i decyzji. AOW Exit, Warszawa 2001.

<sup>6</sup> Rutkowski L.: Metody i techniki sztucznej inteligencji. PWN, Warszawa 2009.

<sup>7</sup> Piegat A.: Modelowanie i sterowanie rozmyte. Exit, Warszawa 1999.

kryteriów). W dalszej kolejności syntetyzujemy je w grupy kryteriów, określając oceny pojazdów względem poszczególnych grup kryteriów (grupy 1-8 – *Poziom 1* struktury). Następnie grupy kryteriów agregujemy w globalne kryterium (*Poziom 0* struktury) oceny pojazdów.

Do analizy porównawczej pojazdów wybrano następującą grupę parametrów (8 grup opisanych poniżej), charakteryzujących samochody zarówno z silnikiem spalinowym, jak i silnikiem elektrycznym:

1. Koszty:

- a) koszt zakupu pojazdu,
- b) koszt zakupu urządzenia do ładowania akumulatorów,
- c) koszty coroczne (opłaty i naprawy),
- d) koszt nowych akumulatorów,
- e) koszt średniego zużycia energii ([kWh]) na pokonanie 100 km,
- f) koszt średniego zużycia paliwa ([l]) na pokonanie 100 km.

2. Emisja spalin CO<sup>2</sup> (g/km) – dla samochodów elektrycznych emisja całkowita zanieczyszczeń z uwzględnieniem cyklu „well to wheel” („od otworu wiertniczego do koła”, związana z produkcją energii elektrycznej zgodnie z udziałem energii z poszczególnych źródeł).

3. Parametry techniczne:

- a) pojemność zbiornika paliwa,
- b) przyspieszenie do 100 km/h (s),
- c) prędkość maksymalna (km/h),
- d) średnie zużycie energii na pokonanie 100 km [kWh],
- e) średnie zużycie paliwa na pokonanie 100 km [l],
- f) zasięg w cyklu mieszanym.

4. Masa:

- a) ładowność maksymalna,
- b) masa własna pojazdu,
- c) dopuszczalna masa całkowita,
- d) pojemność przestrzeni ładunkowej,
- e) ładowność.

5. Akumulator:

- a) czas ładowania,
- b) wydajność akumulatora,
- c) waga akumulatora,
- d) możliwość recyklingu,
- e) energia właściwa akumulatorów [Wh/kg],
- f) moc właściwa akumulatorów [kW/kg],
- g) co ile miesięcy następuje wymiana akumulatorów [-].

## 6. Silnik:

- a) maksymalny moment obrotowy,
- b) maksymalna prędkość obrotowa,
- c) rodzaj paliwa,
- d) pojemność skokowa ( $\text{cm}^3$ ),
- e) moc maksymalna [kW].

## 7. Wymiary:

- a) szerokość całkowita z lusterkami zewnętrznymi,
- b) wysokość pojazdu pustego,
- c) długość całkowita,
- d) ilu osobowy.

## 8. Dodatkowe przywileje:

- a) darmowe parkowanie w centrum miasta, w strefie płatnego parkowania, dla samochodów elektrycznych,
- b) zniżka na parkowanie dla samochodów elektrycznych,
- c) dofinansowanie od państwa dla samochodów elektrycznych.

W przedstawianym algorytmie zakłada się analizę pojazdów ze skończonego zbioru  $P$  rozważanych pojazdów:

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_N\}, \quad \text{dla } i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

na podstawie zbioru kryteriów  $K_g, K_{gj}$ , gdzie  $g$  określa numer kryterium *Poziomu 1* ( $g = 1, \dots, G$ ) a  $j$  to numer kryterium *Poziomu 2* ( $j = 1, \dots, J$ ).

Na podstawie określonych ważności parametrów i ich grup oraz ocen samochodów względem kryteriów *Poziomu 1* i *Poziomu 2*, dokonuje się określenia ocen łącznych samochodów. Następnie, kierując się maksymalizacją ocen, poszukujemy wartości największej. Maksymalna wartość oceny odpowiadająca danemu samochodowi wskazuje na to auto, które w największym stopniu spełnia nasze oczekiwania.

#### 4. Modelowanie ocen pojazdów za pomocą zmiennych rozmytych

Ważność grup parametrów (kryteriów *Poziomu 1*), określona przez decydenta, dana jest w postaci zmiennej  $V_g$  ( $g$ -kryterium *Poziomu 1*). Zakłada się, że ważności kryteriów są określone na przedziale  $[0,1]$ , co związane jest z warunkiem, że suma wag kryteriów wyrażona przez decydenta musi wynosić 1:

$$\sum_{g=1}^G V_g = 1. \quad (4)$$

Ważność kryteriów *Poziomu 2* – parametrów z poszczególnych grup parametrów (określana przez decydenta) – dana jest w postaci zmiennej  $V_{gj}$  ( $g$ -kryterium *Poziomu 1*,  $j$ -kryterium *Poziomu 2*). Podobnie jak w przypadku kryteriów *Poziomu 1*, ważności kryteriów są określone na przedziale  $[0,1]$  i suma wag kryteriów wyrażona przez decydenta musi wynosić 1:

$$\sum_{j=1}^J V_{gj} = 1. \quad (5)$$

Poniżej przedstawione są ogólnie zasady opisu pojazdów względem poszczególnych kryteriów za pomocą liczby rozmytej typu LR  $O_i$ , określonej charakterystyczną trójką ( $m_{o_i}, \alpha_{o_i}, \beta_{o_i}$ ), gdzie  $\alpha_{o_i}, \beta_{o_i} > 0$  to ustalone rozrzuty lewo- i prawostronne (przedział określony przez decydenta, wyrażający niepewność co do precyzji tego określenia),  $m_{o_i}$  to ustalona wartość – najbardziej oczekiwana bądź średnia liczona zgodnie ze wzorem:

$$o_i^{\text{mod}} = \frac{o_i^{\min} + o_i^{\max}}{2}. \quad (6)$$

W przypadku kryteriów jakościowych ocena pojazdu jest oceną punktową, gdzie decydent określa maksymalną liczbę punktów w ramach danego kryterium oraz przypisuje wartość punktową najbardziej prawdopodobną lub przedział wartości, w przypadku niepewności.

Funkcje L i R to ustalone funkcje bazowe opisane wzorem (7). Decydent oceny  $o_i$  traktuje jako „około  $o_i^{\text{mod}}$ ”, przy czym swoją niepewność co do precyzyjnego określenia wyraża w postaci wielkości  $[o_i^{\min}, o_i^{\max}]$  (bądź granic wartości przedziałowych):

$$L(o_i) = R(o_i) = \begin{cases} 0 & \text{dla } o_i < m_i - \alpha_{o_i} \\ 1 - |o_i| & \text{dla } m_{o_i} + \beta_{o_i} \geq o_i \geq m_{o_i} - \alpha_{o_i} \\ 0 & \text{dla } o_i > m_{o_i} + \beta_{o_i} \end{cases} \quad (7)$$

Ponieważ wartości ocen samochodów  $o_i$  traktowane są jako stopień spełnienia przez  $i$ -ty samochód pewnego stanu idealnego w świetle danego kryterium, należy dokonać normowania wartości tych ocen:

$$\hat{\alpha}_{o_i} = \frac{\alpha_{o_i}}{\max(o_i^{\max})}, \quad (8)$$

$$\hat{m}_{o_i} = \frac{m_{o_i}}{\max(o_i^{\max})}, \quad (9)$$

$$\hat{\beta}_{o_i} = \frac{\beta_{o_i}}{\max(o_i^{\max})}, \quad (10)$$

gdzie  $\max(o_i^{\max})$  to największa wartość spośród prawych granic wartości ocen pojazdów w ramach danego kryterium ( $m_{o_i} + \beta_{o_i}$ ). Jeśli wartość oceny względem rozpatrywanego

kryterium powinna być minimalizowana, wtedy normowanie należy przeprowadzić zgodnie z następującymi wzorami:

$$\hat{\alpha}_{o_i} = 1 - \frac{\alpha_{o_i}}{\max(o_i^{\max})}, \quad (11)$$

$$\hat{m}_{o_i} = 1 - \frac{m_{o_i}}{\max(o_i^{\max})}, \quad (12)$$

$$\hat{\beta}_{o_i} = 1 - \frac{\beta_{o_i}}{\max(o_i^{\max})}. \quad (13)$$

Po dokonaniu normowania zmienne  $\hat{\alpha}_{o_i}$ ,  $\hat{m}_{o_i}$  i  $\hat{\beta}_{o_i}$  są nowymi obowiązującymi zmiennymi  $m_{o_i}$ ,  $\alpha_{o_i}$ ,  $\beta_{o_i}$ . Funkcja przynależności oceny samochodu  $i$  względem danego kryterium przedstawia się następująco:

$$\mu_{o_i}(o_i) = \begin{cases} L\left(\frac{m_{o_i} - o_i}{\alpha_{o_i}}\right) & \text{dla } o_i < m_{o_i} \\ 1 & \text{dla } o_i = m_{o_i} \\ R\left(\frac{o_i - m_{o_i}}{\beta_{o_i}}\right) & \text{dla } o_i > m_{o_i} \end{cases}. \quad (14)$$

Kiedy określone są unormowane wartości ocen względem kryteriów *Poziomu 2*, można określić oceny pojazdów względem kryterium wyższego poziomu (*Poziomu 1*) jako sumę ocen z poszczególnych kryteriów w ramach danej grupy (w przypadku uwzględniania wag kryteriów należy określić ważoną ocenę pojazdów w ramach poszczególnych grup).

Przy założeniu, że  $O_{igj}$  to ocena pojazdu względem kryterium *Poziomu 2*, określona charakterystyczną trójką  $(m_{o_{igj}}, \alpha_{o_{igj}}, \beta_{o_{igj}})$ , ostateczna ocena względem kryterium *Poziomu 1*  $O_{ig}$  przedstawia się następująco:

$$O_{ig} = \frac{\sum_{j=1}^J V_{gj} \cdot O_{igj}}{\sum_{j=1}^J V_{gj}}. \quad (15)$$

Następnie, po unormowaniu tych ocen, określamy ocenę globalną pojazdu jako sumę ocen (przy określeniu ważności grup kryteriów określamy ocenę ważoną). Zakładając, że  $O_{ig}$  to ocena pojazdu względem kryterium *Poziomu 1*, określona charakterystyczną trójką  $(m_{o_{ig}}, \alpha_{o_{ig}}, \beta_{o_{ig}})$ , ostateczna ocena względem kryterium globalnego  $O_i$  przedstawia się następująco:



$$O_i = \frac{\sum_{g=1}^G V_g \cdot O_{ig}}{\sum_{g=1}^G V_g}. \quad (16)$$

Takie postępowanie każdemu pojazdowi ze zbioru  $P$  przyporządkowuje ocenę rozmytą względem kryterium globalnego. W przypadku bazowania na rozmytych łącznych ocenach samochodów, należy dokonać ich defuzyfikacji (wyostrzeniu). Proponowaną metodą jest metoda środka ciężkości, przypisująca funkcji przynależności liczbę rzeczywistą. Przy stosowaniu liczb rozmytych można posłużyć się wzorem na określenie środka ciężkości:

$$x_{sc} = \frac{3 \cdot m - \alpha + \beta}{3}. \quad (17)$$

Na podstawie określonych rzeczywistych ocen rozpatrywanych pojazdów należy dokonać analizy porównawczej otrzymanych wyników ocen względem kryterium globalnego. Im większa jest wartość oceny, tym wyższą pozytywną opinię otrzymuje dany samochód.

Poniżej przedstawione są przyjęte oznaczenia dla liczb rozmytych reprezentujących poszczególne kryteria.

1. Koszty:  $koszt_i$ , określony charakterystyczną trójką  $(m_{Koszt_i}, \alpha_{Koszt_i}, \beta_{Koszt_i})$ :
  - a) koszt zakupu pojazdu  $KZP_i: (m_{KZP_i}, \alpha_{KZP_i}, \beta_{KZP_i})$ ,
  - b) koszt zakupu urządzenia do ładowania akumulatorów  $KZU_i: (m_{KZU_i}, \alpha_{KZU_i}, \beta_{KZU_i})$ ,
  - c) koszty coroczne (opłaty i naprawy),  $KR_i: (m_{KR_i}, \alpha_{KR_i}, \beta_{KR_i})$ ,
  - d) koszt nowych akumulatorów,  $KNA_i: (m_{KNA_i}, \alpha_{KNA_i}, \beta_{KNA_i})$ ,
  - e) średnie zużycie energii na pokonanie 100 km [kWh] \* cena energii elektrycznej za 1 kWh,  $SZE_i: (m_{SZE_i}, \alpha_{SZE_i}, \beta_{SZE_i})$ ,
  - f) średnie zużycie paliwa na pokonanie 100 km [l] \* cena 1 litra paliwa.  $SZP_i: (m_{SZP_i}, \alpha_{SZP_i}, \beta_{SZP_i})$ .
2. Emisja spalin CO<sup>2</sup> (g/km)  $ES_i: (m_{ES_i}, \alpha_{ES_i}, \beta_{ES_i})$ .
3. Parametry techniczne  $PT_i: (m_{PT_i}, \alpha_{PT_i}, \beta_{PT_i})$ :
  - a) pojemność zbiornika paliwa  $PZP_i: (m_{PZP_i}, \alpha_{PZP_i}, \beta_{PZP_i})$ ,
  - b) przyspieszenie do 100 km/h (s)  $P_i: (m_{P_i}, \alpha_{P_i}, \beta_{P_i})$ ,
  - c) prędkość maksymalna (km/h)  $PM_i: (m_{PM_i}, \alpha_{PM_i}, \beta_{PM_i})$ ,
  - d) średnie zużycie energii na pokonanie 100 km [kWh]  $SZE_i: (m_{SZE_i}, \alpha_{SZE_i}, \beta_{SZE_i})$ ,
  - e) średnie zużycie paliwa na pokonanie 100 km [l]  $SZP_i: (m_{SZP_i}, \alpha_{SZP_i}, \beta_{SZP_i})$ ,
  - f) zasięg w cyklu mieszanym  $Z_i: (m_{Z_i}, \alpha_{Z_i}, \beta_{Z_i})$ .

4. Masa  $M_i: (m_{M_i}, \alpha_{M_i}, \beta_{M_i})$ :
- ładowność maksymalna  $LM_i: (m_{LM_i}, \alpha_{LM_i}, \beta_{LM_i})$ ,
  - masa własna pojazdu  $MP_i: (m_{MP_i}, \alpha_{MP_i}, \beta_{MP_i})$ ,
  - dopuszczalna masa całkowita  $DMS_i: (m_{DMS_i}, \alpha_{DMS_i}, \beta_{DMS_i})$ ,
  - pojemność przestrzeni ładunkowej  $PPL_i: (m_{PPL_i}, \alpha_{PPL_i}, \beta_{PPL_i})$ ,
  - ładowność  $L_i: (m_{L_i}, \alpha_{L_i}, \beta_{L_i})$ .
5. Akumulator  $A_i: (m_{A_i}, \alpha_{A_i}, \beta_{A_i})$ :
- czas ładowania  $MP_i: (m_{MP_i}, \alpha_{MP_i}, \beta_{MP_i})$ ,
  - wydajność akumulatora  $MP_i: (m_{MP_i}, \alpha_{MP_i}, \beta_{MP_i})$ ,
  - waga akumulatora  $MP_i: (m_{MP_i}, \alpha_{MP_i}, \beta_{MP_i})$ ,
  - możliwość recyklingu  $MR_i: (m_{MR_i}, \alpha_{MR_i}, \beta_{MR_i})$ ,
  - energia właściwa akumulatorów [Wh/kg]  $EA_i: (m_{EA_i}, \alpha_{EA_i}, \beta_{EA_i})$ ,
  - moc właściwa akumulatorów [kW/kg]  $MA_i: (m_{MA_i}, \alpha_{MA_i}, \beta_{MA_i})$ ,
  - co ile miesięcy następuje wymiana akumulatorów [-]  $LM_i: (m_{LM_i}, \alpha_{LM_i}, \beta_{LM_i})$ .
6. Silnik  $S_i: (m_{S_i}, \alpha_{S_i}, \beta_{S_i})$ :
- maksymalny moment obrotowy  $MMO_i: (m_{MMO_i}, \alpha_{MMO_i}, \beta_{MMO_i})$ ,
  - maksymalna prędkość obrotowa  $MPO_i: (m_{MPO_i}, \alpha_{MPO_i}, \beta_{MPO_i})$ ,
  - rodzaj paliwa  $RP_i: (m_{RP_i}, \alpha_{RP_i}, \beta_{RP_i})$ ,
  - pojemność skokowa (cm<sup>3</sup>)  $PS_i: (m_{PS_i}, \alpha_{PS_i}, \beta_{PS_i})$ ,
  - moc maksymalna (kW)  $MM_i: (m_{MM_i}, \alpha_{MM_i}, \beta_{MM_i})$ .
7. Wymiary  $W_i: (m_{W_i}, \alpha_{W_i}, \beta_{W_i})$ :
- szerokość całkowita z lusterkami zewnętrznymi  $SC_i: (m_{SC_i}, \alpha_{SC_i}, \beta_{SC_i})$ ,
  - wysokość pojazdu pustego  $WP_i: (m_{WP_i}, \alpha_{WP_i}, \beta_{WP_i})$ ,
  - długość całkowita  $DC_i: (m_{DC_i}, \alpha_{DC_i}, \beta_{DC_i})$ ,
  - ilu osobowy  $LO_i: (m_{LO_i}, \alpha_{LO_i}, \beta_{LO_i})$ .
8. Dodatkowe przywileje  $P_i: (m_{P_i}, \alpha_{P_i}, \beta_{P_i})$ :
- darmowe parkowanie w centrum miasta, w strefie płatnego parkowania, dla samochodów elektrycznych,  $DP_i: (m_{DP_i}, \alpha_{DP_i}, \beta_{DP_i})$ ,
  - zniżka na parkowanie dla samochodów elektrycznych  $ZP_i: (m_{ZP_i}, \alpha_{ZP_i}, \beta_{ZP_i})$ ,
  - dofinansowanie od państwa dla samochodów elektrycznych  $D_i: (m_{D_i}, \alpha_{D_i}, \beta_{D_i})$ .

*Przykład*

W artykule dokonano porównania samochodów z silnikiem spalinowym oraz z napędem elektrycznym, bazując na jednej marce samochodów Renault. Do analizy wybrano te same modele samochodów, które występują zarówno z silnikiem elektrycznym, jak i spalinowym. W poniższej tabeli przedstawiono wartości ocen względem przyjętych kryteriów.

Tabela 1

## Wartości ocen kryteriów

Koszty	Renault Fluence Z.E.	RENAULT Kango Z.E. 2-osobowy	Renault Kango Maxi Z.E. 2-osobowy	Renault Kango Maxi Z.E. 5-osobowy	Renault Fluence	Renault Kango	Renault Kango Maxi 2-osobowy	Renault Kango Maxi 5-osobowy
Koszt zakupu pojazdu	110000	98000	10500	109000	54900	63200	72000	72000
Koszt zużycia energii na pokonanie 100 km	7,25	8,99	8,998,99		-	-	-	-
Koszt zużycia paliwa na pokonanie 100 km	-	-	-	-	31,8	57,24	28,09	28,09
Emisja spalin CO <sup>2</sup> (g/km)	62	81	62	62	119	137	123	123
Przyspieszenie do 100 km/h (s)	13	20,3	24	24	11,5	13,95	15	15
Prędkość maksymalna (km/h)	135	130	130	130	185	165	158	158
Średnie zużycie energii na pokonanie 100 km [Wh/100km]	12,5	15,5	15,5	15,5	-	-	-	-
Średnie zużycie paliwa na pokonanie 100 km [l]	-	-	-	-	6,8	7,7	5,3	5,3
Zasięg w cyklu mieszanym [km]	160	160	170	170	-	-	-	-
Ładowność [kg]	650?	650?	800?	800	500	500	800	800
Masa własna pojazdu	1605	1410	1472	1572	1253	1320	1343	1343
Czas ładowania akumulatora [h]	6-9	6-9	6-9	6-9	-	-	-	-
Wydajność akumulatora [kW/h]	22	22	22	22	-	-	-	-
Waga akumulatora [kg]	250	260	260	260	-	-	-	-
Maksymalny moment obrotowy [NM]	226	226	226	226	240	240	240	240
Pojemność skokowa (cm <sup>3</sup> )	-	-	-	-	1596	1598	1461	1461
Rodzaj paliwa	-	-	-	-	diesel	benzyna	diesel	diesel
Moc maksymalna kW	70	44	44	44	78	77	66	66
Długość całkowita	4622	4213	4597	4597	4622	4213	4597	4597
Darmowe parkowanie w centrum miasta, w strefie płatnego parkowania, dla samochodów elektrycznych	Tak	Tak	Tak	Tak	Nie	Nie	Nie	Nie
Zniżka na parkowanie dla samochodów elektrycznych	Tak	Tak	Tak	Tak	Nie	Nie	Nie	Nie

Źródło: opracowanie własne<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Na podstawie [www.renault.pl](http://www.renault.pl).

Na podstawie przedstawionych wartości ocen parametrów określono oceny rozmyte parametrów dla każdego z analizowanych samochodów (tab. 2).

Tabela 2

## Oceny rozmyte względem grupy: nadwozie i wnętrze

Auto	Renault Fluence Z.E.			RENAULT Kangoo Z.E. 2-osobowy			Renault Kangoo Maxi Z.E. 2-osobowy			Renault Kangoo Maxi Z.E. 5-osobowy			Ważność kryteriów
	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	
Koszt zakupu pojazdu	110000	10000	1000	98000	10000	1000	10500	10000	1000	109000	10000	1000	0,9
Koszt zużycia energii na pokonanie 100 km [zł]	7,25	0,25	0,625	8,99	0,31	0,775	8,99	0,31	0,775	8,99	0,31	0,775	0,1
Emisja spalin CO <sup>2</sup> (g/km)	62	0	0	81	0	0	62	0	0	62	0	0	1
Przyspieszenie do 100 km/h (s)	13	2	2	20,3	2	2	24	2	2	24	2	2	0,25
Prędkość maksymalna (km/h)	135	5	5	130	5	5	130	5	5	130	5	5	0,25
Średnie zużycie energii na pokonanie 100 km [Wh/100 km]	12,5	0	0	15,5	0	0	15,5	0	0	15,5	0	0	0,3
Zasięg w cyklu mieszanym [km]	160	40	40	160	40	40	170	40	40	170	40	40	0,2
Ładowość [kg]	650	70	70	650	70	70	800	100	100	800	100	100	0,7
Masa własna pojazdu	1605	0	0	1410	0	0	1472	0	0	1572	0	0	0,3
Czas ładowania akumulatora [h]	7,5	1,5	1,5	7,5	1,5	1,5	7,5	1,5	1,5	7,5	1,5	1,5	0,5
Wydajność akumulatora [kW/h]	22	0	0	22	0	0	22	0	0	22	0	0	0,3
Waga akumulatora [kg]	250	0	0	260	0	0	260	0	0	260	0	0	0,2
Maksymalny moment obrotowy [NM]	226	0	0	226	0	0	226	0	0	226	0	0	0,2
Moc maksymalna kW	70	0	0	44	0	0	44	0	0	44	0	0	0,8
Długość całkowita	4622	0	0	4213	0	0	4597	0	0	4597	0	0	1

Zródło: opracowanie własne.

W celu przeprowadzenia porównania aut dokonuje się normalizacji ocen względem poszczególnych parametrów (tab. 3).

Tabela 3

## Znormalizowane oceny pojazdów elektrycznych w poszczególnych grupach

Auto	Renault Fluence Z.E.			RENAULT Kangoo Z.E. 2-osobowy			Renault Kangoo Maxi Z.E. 2-osobowy			Renault Kangoo Maxi Z.E. 5-osobowy		
	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$
Koszt zakupu pojazdu	0,000	0,909	0,991	0,109	0,909	0,991	0,905	0,909	0,991	0,009	0,909	0,991
Koszt zużycia energii na pokonanie 100 km [zł]	0,194	0,972	0,930	0,000	0,966	0,914	0,000	0,966	0,914	0,000	0,966	0,914

cd. tabeli 3

Emisja spalin CO <sup>2</sup> (g/km)	0,235	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,235	1,000	1,000	0,235	1,000	1,000
Przyspieszenie do 100 km/h (s)	0,542	0,083	0,083	0,846	0,083	0,083	1,000	0,083	0,083	1,000	0,083	0,083
Prędkość maksymalna (km/h)	1,000	0,037	0,037	0,963	0,037	0,037	0,963	0,037	0,037	0,963	0,037	0,037
Średnie zużycie energii na pokonanie 100 km [Wh/100km]	0,194	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000
Zasięg w cyklu mieszanym [km]	0,941	0,235	0,235	0,941	0,235	0,235	1,000	0,235	0,235	1,000	0,235	0,235
Ładowność [kg]	0,813	0,088	0,088	0,813	0,088	0,088	1,000	0,125	0,125	1,000	0,125	0,125
Masa własna pojazdu	0,000	1,000	1,000	0,121	1,000	1,000	0,083	1,000	1,000	0,021	1,000	1,000
Czas ładowania akumulatora [h]	0,000	0,800	0,800	0,000	0,800	0,800	0,000	0,800	0,800	0,000	0,800	0,800
Wydajność akumulatora [kW/h]	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
Waga akumulatora [kg]	0,038	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000
Maksymalny moment obrotowy [NM]	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
Moc maksymalna kW	1,000	0,000	0,000	0,629	0,000	0,000	0,629	0,000	0,000	0,629	0,000	0,000
Długość całkowita	1,000	0,000	0,000	0,912	0,000	0,000	0,995	0,000	0,000	0,995	0,000	0,000

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie znormalizowanych ocen samochodów w dalszej kolejności określa się oceny aut względem poszczególnych grup parametrów (tab. 4).

Tabela 4

## Oceny rozmyte względem poszczególnych grup

Grupy	Renault Fluence Z.E.			RENAULT Kangoo Z.E. 2-osobowy			Renault Kangoo Maxi Z.E. 2-osobowy			Renault Kangoo Maxi Z.E. 5-osobowy			Ważności grup
	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	
Koszt	0,194	1,881	1,921	0,109	1,875	1,905	0,905	1,875	1,905	0,009	1,875	1,905	0,5
Emisja spalin	0,765	0	0	8E-04	0	0	0,7654	0	0	0,7654	0	0	0,05
Parametry techniczne	2,676	1,356	1,356	2,750	1,356	1,356	2,963	1,356	1,356	2,963	1,356	1,356	0,15
Masa	0,813	1,088	1,088	0,934	1,088	1,088	1,083	1,125	1,125	1,021	1,125	1,125	0,1
Akumulator	2,000	0,000	0,000	1,629	0,000	0,000	1,629	0,000	0,000	1,629	0,000	0,000	0,1
Silnik	1,000	0,000	0,000	0,912	0,000	0,000	0,995	0,000	0,000	0,995	0,000	0,000	0,1

Źródło: opracowanie własne.

W celu porównania poszczególnych grup parametrów przeprowadza się normalizację tych ocen (tab. 5).

Tabela 5

## Znormalizowane oceny rozmyte względem poszczególnych grup

Renault Fluence Z.E.			RENAULT Kango Z.E. 2-osobowy			Renault Kangoo Maxi Z.E. 2-osobowy			Renault Kangoo Maxi Z.E. 5-osobowy			Ważności grup
m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	
0,101	0,979	1,000	0,057	0,984	1,000	0,475	0,984	1,000	0,005	0,984	1,000	0,5
1,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,765	0,000	0,000	0,765	0,000	0,000	0,05
0,903	0,458	0,458	0,928	0,458	0,458	1,000	0,458	0,458	1,000	1,000	1,000	0,15
0,722	0,967	0,967	0,830	0,967	0,967	0,963	1,000	1,000	0,907	1,000	1,000	0,1
1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,1
1,000	0,000	0,000	0,912	0,000	0,000	0,995	0,000	0,000	0,995	0,000	0,000	0,1

Źródło: opracowanie własne.

W dalszej kolejności na podstawie ocen względem poszczególnych grup parametrów określa się ocenę względem kryterium globalnego (tab. 6).

Tabela 6

## Oceny rozmyte względem kryterium globalnego

Renault Fluence Z.E.			RENAULT Kangoo Z.E. 2-osobowy			Renault Kangoo Maxi Z.E. 2-osobowy			Renault Kangoo Maxi Z.E. 5-osobowy		
m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$
0,92	1,3	1,27	0,81	1,25	1,26	1,31	1,25	1,268	0,85	1,25	1,268

Źródło: opracowanie własne.

Po przeprowadzeniu normalizacji ocen względem kryterium globalnego uzyskuje się następujące oceny (tab. 7).

Tabela 7

## Znormalizowane oceny względem kryterium globalnego

Renault Fluence Z.E.			RENAULT Kangoo Z.E. 2-osobowy			Renault Kangoo Maxi Z.E. 2-osobowy			Renault Kangoo Maxi Z.E. 5-osobowy		
m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$	m	$\alpha$	$\beta$
0,7	1	0,97	0,62	0,96	0,97	1	0,99	1	0,67	0,99	1

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie znormalizowanych ocen określa się ocenę rzeczywistą samochodu względem kryterium globalnego (tab. 8).

Tabela 8

## Rzeczywiste oceny względem kryterium globalnego

Pojazd	Wartości rzeczywiste
Renault Fluence Z.E.	0,708061157
RENAULT Kango Z.E. 2-osobowy	0,627689106
<b>Renault Kangoo Maxi Z.E. 2-osobowy</b>	<b>1,003954953</b>
Renault Kangoo Maxi Z.E. 5-osobowy	0,675484138

Źródło: opracowanie własne.

Porównując wyniki z powyższej tabeli, można wyciągnąć wniosek, że samochód z silnikiem elektrycznym Renault Kangoo Maxi Z.E. 2-osobowy uzyskał najlepszą ocenę ze względu na wybrane kryteria oraz przyjęte ważności poszczególnych kryteriów.

## 5. Podsumowanie

Wybór samochodu ze względu na typ zastosowanego silnika nie jest łatwy. Dzieje się tak ze względu na zróżnicowanie cech opisujących dane typy samochodów oraz ze względu na niepewność związaną z kosztami w trakcie eksploatacji samochodów, zwłaszcza elektrycznych. Zarówno pojazdy napędzane silnikiem elektrycznym, jak i pojazdy z silnikiem spalinowym mają wady i zalety. W tym celu, w niniejszym artykule zaproponowano możliwość przeprowadzenia analizy porównawczej samochodów o różnych źródłach energii. Na podstawie tego rozwiązania można uzyskać odpowiedź, który z rozważanych typów pojazdów samochodu najlepiej spełni nasze oczekiwania.

## Bibliografia

1. Kacprzyk J.: *Wieloetapowe sterowanie rozmyte*. WNT, Warszawa 2001.
2. Łachwa A.: *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*. AOW Exit, Warszawa 2001.
3. Chojcan J.: *Zbiory rozmyte i ich zastosowanie*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
4. Piegat A.: *Modelowanie i sterowanie rozmyte*. AOW Exit, Warszawa 1999.
5. Kacprzyk J.: *Zbiory rozmyte w analizie systemowej*. PWN, Warszawa 1986.
6. Driankow D., Hellendoorn H., Reinfrank M.: *Wprowadzenie do sterowania rozmytego*. WNT, Warszawa 1996.
7. Dubois D., Prade H.: *Fuzzy set and systems – theory and applications*. Academic press, New York 1980.
8. Piekarski W.: *Motoryzacyjne skażenie środowiska*. Wyd. Wieś jutra, Warszawa 2009.
9. Mysłowski S.: *Analiza wpływu wybranych parametrów pracy silnika spalinowego na zanieczyszczenie środowiska*. Wyd. Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, Szczecin 2010.
10. Merkisz J.: *Wpływ motoryzacji na skażenie środowiska naturalnego*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.
11. Rutkowski L.: *Metody i techniki sztucznej inteligencji*. PWN, Warszawa 2009.



**Abstract**

This paper presents a method of benchmarking cars with a combustion engine and electric. It gives the possibility to compare vehicle features both a quantitative and qualitative. On the basis of the criteria adopted and proposed assessment of their validity was determined that the vehicle meets our expectations in the highest degree.