

WYBÓR TABORU DLA SYSTEMU PUBLICZNEGO TRANSPORTU MIEJSKIEGO Z WYKORZYSTANIEM METODYK: WIELOKRYTERIALNEGO I GRUPOWEGO PODEJMOWANIA DECYZJI

W artykule zaprezentowano metodykę rozwiązywania problemu wyboru/ selekcji taboru dla systemu publicznego transportu miejskiego. Problem decyzyjny sformułowano, jako zadanie wielokryterialnego szeregowania wariantów - tramwajów niskopodłogowych. W procesie decyzyjnym uwzględniono interesy różnych podmiotów, tj. reprezentantów: pasażerów, operatora (przewoźnika) i władz miejskich (w tym organów organizujących transport miejski). Zdefiniowano spójną rodzinę kryteriów oceniających warianty (tramwaje). Przedstawiono sposób definiowania i modelowania preferencji decydentów i interwenientów oraz osiągania kompromisu grupowego według dwóch odrębnych ścieżek (schematów), tj.: „ex-ante” i „ex-post”. W eksperymentach obliczeniowych wykorzystano metodę AHP.

FLEET SELECTION FOR A PUBLIC TRANSPORTATION SYSTEM BASED ON THE METHODOLOGIES OF: MULTIPLE CRITERIA AND GROUP DECISION MAKING

The paper presents the methodology of solving a fleet selection problem for a public transportation system. The decision problem is formulated as a multiple criteria ranking of variants – low-floor tram-cars. The interests of different stakeholders, such as the representatives of: passengers, operator (carrier) and local authorities (including public transport organizers) have been taken into account in the decision making process. A consistent family of criteria, evaluating variants (trams), has been defined. The way of defining and modeling decision maker's (DM's) and interveners' preferences as well as reaching the group compromise along two separate frameworks, i.e.: “ex-ante” and “ex-post” has been presented. The AHP method has been applied in the computational experiments.

1. WSTĘP

Publiczny transport miejski jest specyficznym rodzajem transportu przeznaczonym do masowego przewozu osób (pasażerów) w sposób zorganizowany, najczęściej regularny w

¹Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu; Zakład Logistyki; 60-965 Poznań; ul.Piotrowo 3; Tel. +48 61 665-22-30; +48 61 665-22-36/37 (sekretariat); Fax: +48 61 665-2736

obrębie określonych aglomeracji miejskich [20]. Nie stanowi on odrębnej gałęzi transportu zgodnie z jego pionową / modalną klasyfikacją, lecz jest wyróżniony wśród innych kategorii transportu na bazie jego poziomej klasyfikacji, z uwzględnieniem kryterium terytorialnego zasięgu działania transportu. Systemem publicznego transportu miejskiego nazywamy zespół sprzężonych komponentów, obejmujący: personel (kierowców, motorniczych, pracowników obsługi, kadrę kierowniczą), infrastrukturę transportową (sieć drogową i szynową, sieć energetyczną, zajezdnie, przystanki, urządzenia zabezpieczenia ruchu, parkingi), tabor pojazdów (tramwaje, autobusy, kolej miejską, metro), procesy transportowe oraz zasady i przepisy funkcjonowania i kontroli publicznego transportu miejskiego (marszruty pojazdów, regulaminy pracy, rozkłady jazdy, znaki i sygnalizatory), których wspólne, zorganizowane działanie zmierza do zapewnienia obsługi ruchu pasażerskiego, tj. przewożenia osób z określonych punktów początkowych (źródłowych) do określonych punktów końcowych (przeznaczenia) [[20],[21]].

Choć publiczny transport miejski odgrywa odmienną rolę w poszczególnych rejonach świata w Europie jest wciąż popularny. W wielu krajach Unii Europejskiej 25% do 35% miejskich podróży pasażerskich odbywa się z wykorzystaniem środków transportu publicznego [12]. Unia Europejska w swoich oficjalnych dokumentach [6] poświęca wiele miejsca publicznemu transportowi miejskiemu i podkreśla jego ważną rolę w życiu społecznym i gospodarczym całej wspólnoty europejskiej. Publiczny transport miejski w dużym stopniu decyduje w Europie, o jakości życia mieszkańców obszarów zurbanizowanych i ich mobilności. Daje możliwość swobodnego wyboru miejsca pracy i zamieszkania, czy też urozmaiconego spędzenia wolnego czasu. Wiele projektów Unii Europejskiej (Propolis, Prospects, Quattro, Civitas [21]) poświęcono problematyce publicznego transportu miejskiego. W licznych pracach badacze dowodzą, że może on być racjonalnym rozwiązaniem dla pogarszających się w obszarach zurbanizowanych warunków ruchu, a w szczególności dla kongestii ruchu [3][17][20][21][25][21]].

Jak już wspomniano powyżej, ważnym komponentem każdego systemu publicznego transportu miejskiego jest jego tabor, czyli środki transportu należące do różnych gałęzi transportu. Podstawową rolę odgrywają [20], [25]:

- środki transportu szynowego: metro, lekka kolej miejska, tramwaj, kolej jednotorowa (ang. mono-rail);
- środki transportu drogowego: autobus, trolejbus, mini-bus.

Eksploatowany w publicznym transporcie miejskim tabor w istotny sposób wpływa na warunki podróżowania i w efekcie na ogólny standard podróży pasażerskich. Rodzaj, jakość i wyposażenie taboru wykorzystywanego w danym systemie publicznego transportu miejskiego rzutują na: komfort wsiadania i wysiadania, wygodę w czasie jazdy (poziom zatłoczenia, jakość siedzeń, temperatura, płynność jazdy), bezpieczeństwo pasażerów, czas i punktualność podróży oraz koszty przejazdu. Stąd, wybór taboru dla systemu miejskiego transportu publicznego jest tak ważną, strategiczną decyzją.

W niniejszym artykule przedstawiono metodykę wyboru/selekcji taboru dla systemu publicznego transportu miejskiego z wykorzystaniem zasad wielokryterialnego i grupowego podejmowania decyzji. Rozważania przeprowadzono na rzeczywistym przykładzie wyboru tramwajów niskopodłogowych dla systemu publicznego transportu miejskiego w Poznaniu.

Artykuł składa się z 6 rozdziałów. W rozdziale 1 przedstawiono rozważania wstępne, charakteryzując publiczny transport miejski i rolę taboru w tym transporcie. Rozdział 2 poświęcono omówieniu istoty problemu wyboru/ selekcji taboru w transporcie miejskim. W rozdziale 3 zamieszczono podstawy metodyczne prac badawczych, w tym scharakteryzowano metodykę wielokryterialnego wspomagania decyzji (WWD) oraz reguły grupowego podejmowania decyzji (GPD). Przedstawiono również metodę AHP. W rozdziale 4 szczegółowo scharakteryzowano problem decyzyjny wyboru tramwajów niskopodłogowych dla systemu publicznego transportu miejskiego w Poznaniu, zaś w rozdziale 5 zaprezentowano przebieg i rezultaty eksperymentów obliczeniowych. W rozdziale 6 zawarto wnioski i podsumowanie artykułu. Całość uzupełniono spisem bibliograficznym oraz streszczeniami w językach polskim i angielskim.

2. PROBLEM WYBORU/ SELEKCJI TABORU W TRANSPORCIE MIEJSKIM

Problem wyboru (selekcji) taboru należy do szeroko pojętej problematyki zarządzania taborem [2] i wiąże się ściśle z zagadnieniem kompozycji taboru [23], obejmującym dwa podproblemy, tj.: ustalanie liczebności taboru [23], czyli najbardziej racjonalnej jego liczby oraz wybór/ selekcję najbardziej pożądanego rodzaju pojazdów. Oba problemy polegają na właściwym dopasowaniu popytu - charakteru i wielkości zleceń przewozowych do podaży – wielkości i rodzaju posiadanego taboru. Wymagają one określenia takiej liczby i rodzaju pojazdów, która z jednej strony gwarantuje możliwie pełną realizację zleceń przewozowych, z drugiej zaś pozwala uniknąć wysokich kosztów stałych, związanych z niepełnym wykorzystaniem posiadanych pojazdów (nadmiar podaży). Oba zagadnienia są szeroko omawiane w literaturze przedmiotu [2], [23].

Kompozycja, w tym wybór/ selekcja taboru, w szczególności dla systemu publicznego transportu miejskiego jest problemem decyzyjnym o charakterze strategicznym, a podjęte decyzje wiążą się z długofalowymi konsekwencjami. W strukturze problemu kompozycji taboru dla systemu miejskiego transportu publicznego wyróżnić można następujące poziomy [20], [21]:

- wyboru gałęzi transportu (np. metro, lekka kolej miejska, autobus czy tramwaj), skutkującego określonym podziałem modalnym podróży pasażerskich;
- ustalenia kategorii (marki) pojazdów i ich liczebności w obrębie każdej z gałęzi.

Pierwszy z wymienionych wyborów wiąże się z kształtowaniem ogólnego planu systemu transportu publicznego w mieście [20], [21]. Drugi, będący przedmiotem rozważań w niniejszym artykule wiąże się z oceną i doбором konkretnych środków transportowych, czyli np. marek autobusów, modeli tramwajów.

Jak już wspomniano we wstępie, jakość taboru i sposób zarządzania nim w istotny sposób wpływają na standardy obsługi pasażerów w systemach publicznego transportu miejskiego. Warto też zauważyć, że ze swej istoty problem wyboru taboru ma charakter wielokryterialny. Potwierdzają to prace wielu autorów, którzy są zgodni, co do tego, że w procesie oceny pojazdów istotne jest uwzględnienie zestawu kryteriów obejmujących między innymi: parametry techniczno-eksploatacyjne, czynniki ekonomiczne, komfort i bezpieczeństwo podróży oraz aspekty ekologiczne [8], [23]. Sugeruje się, że ocena różnych pojazdów i ostateczny wybór jednego z nich powinny uwzględniać: cenę zakupu, koszty eksploatacji pojazdów, bezpieczeństwo i wygodę przewozów, trwałość i niezawodność pojazdu, nowoczesność rozwiązań i walory estetyczne, przyjazność dla środowiska i inne.

Ponadto niektórzy autorzy [8], [23] stwierdzają, że przy wyborze taboru konieczne jest uwzględnienie interesu różnych podmiotów zainteresowanych jego zakupem. W szczególności wymienia się interesy [21], [23]: pasażera korzystającego ze środków transportu publicznego w mieście, operatora systemu transportowego, który eksploatuje tabor oraz władz miejskich, które finansują zakup taboru. W kilku pracach przedstawiono zastosowanie metod wielokryterialnych przy wyborze środków transportowych dla systemu publicznego transportu miejskiego [19], [23]. Niektóre raporty badawcze informują o grupowych procesach decyzyjnych dotyczących wyboru taboru dla aglomeracji miejskich [1]. W sytuacjach takich następuje wzajemna interakcja pomiędzy uczestnikami procesu decyzyjnego, a osiągane decyzje kompromisowe uwzględniają satysfakcję różnych grup. Stąd, wybór taboru dla systemu publicznego transportu miejskiego powinien być oparty o zasady wielokryterialnego i grupowego podejmowania decyzji.

3. PODSTAWY METODYCZNE PRAC BADAWCZYCH

3.1 Istota wielokryterialnego wspomaganie decyzji

Wielokryterialne wspomaganie decyzji (WWD) jest dziedziną wiedzy wywodzącą się z badań operacyjnych. Dziedzina ta zmierza do wyposażenia decydenta w procedury, narzędzia i metody matematyczno – informatyczne umożliwiające rozwiązywanie złożonych problemów decyzyjnych, przy analizie których konieczne jest uwzględnienie wielu, często przeciwstawnych punktów widzenia. Metodyka WWD służy do rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych [11], [16], [23], czyli sytuacji, w której mając zdefiniowany zbiór zadań (rozwiązań, wariantów) A oraz spójną rodzinę kryteriów oceny F decydent dąży do:

- określenia wariantu uważanego za najlepszy (problem wyboru),
- dokonania podziału wariantów na określone klasy (problem klasyfikacji),
- uszeregowania wariantów od najlepszego do najgorszego (problem szeregowania).

Podstawowymi atrybutami wielokryterialnych problemów decyzyjnych (WPD) są zbiór rozwiązań (wariantów) A oraz spójna rodzina kryteriów oceny F . Zbiór rozwiązań A to zbiór obiektów, decyzji, kandydatów, wariantów lub czynności, które mają być poddane analizie i ocenie w trakcie procedury decyzyjnej. W analizowanym przykładzie za warianty przyjęto poszczególne modele tramwajów, opisane w kolejnym rozdziale. Przez spójną rodzinę kryteriów F rozumie się taki zbiór kryteriów, który powinien spełniać wymagania: wyczerpywalności oceny, spójności oceny z nadrzędnymi celami decydenta, nieredundancji kryteriów [16],[23].

Metody WWD służące do rozwiązywania WPD można w ogólności podzielić na trzy grupy [16]: metody wieloatrybutowej teorii użyteczności, np. UTA, AHP, metody oparte na relacji przewyższania np. ELECTRE I–IV, Promethee, Oreste, metody interaktywne (dialogowe), np. LBS. Metody te zostały scharakteryzowane w pracy J. Żaka [23].

Zagadnienie wyboru tramwajów zdefiniowano, jako wielokryterialny problem szeregowania, czyli rankingu wariantów. Ranking wygenerowano z wykorzystaniem metody AHP (ang. *Analytic Hierarchy Process*) [18].

3.2 Metoda AHP

Metoda AHP (ang. *Analytic Hierarchy Process*) [18] jest wielokryterialną metodą hierarchicznej analizy problemu, wykorzystującą zasady wieloatrybutowej teorii użyteczności [11]. Pozwala ona na dekompozycję złożonego problemu decyzyjnego i umożliwia uporządkowanie skończonego zbioru wariantów decyzyjnych A . Metoda ta dopuszcza występowanie ocen, które nie są całkowicie spójne, oraz umożliwia uwzględnienie odstępstw od tradycyjnej dedukcji liniowej, w której zakłada się, że jeżeli $a_1Pa_2 \wedge a_2Pa_3 \Rightarrow a_1Pa_3$.

Algorytm metody AHP składa się z następujących faz [18]:

- Faza I - konstrukcja hierarchicznej struktury procesu decyzyjnego, czyli elementów hierarchii, w tym definicja: celu procesu decyzyjnego, kryteriów i podkryteriów oceny oraz wariantów poddawanych ocenie.
- Faza II - definicja preferencji decydenta, w formie macierzy preferencji w_{ij} w charakterystycznej skali od 1 do 9 punktów i obliczanie bezwzględnych znormalizowanych ocen ważności wszystkich elementów hierarchii w_{ij}^b .
- Faza III - badanie globalnej spójności macierzy preferencji w_{ij} na wszystkich poziomach hierarchii poprzez obliczenie indeksów spójności macierzy CI i porównanie ich z wartością dopuszczalną ($CI < 0.1$);
- Faza IV - generowanie rankingu końcowego wariantów w oparciu o zagregowaną miarę użyteczności U_i każdego z nich, uzyskaną poprzez agregację bezwzględnych znormalizowanych ocen ważności elementów hierarchii w_{ij}^b , za pomocą addytywnej funkcji użyteczności.

Rezultatem końcowym algorytmu metody AHP jest ranking, czyli uszeregowanie wariantów od najlepszego do najgorszego zgodnie z obliczonymi wartościami ich użyteczności U_i od największej do najmniejszej.

3.3 Grupowe podejmowanie decyzji

W procesach grupowego podejmowania decyzji uczestniczą indywidualne osoby reprezentujące różnych decydentów i interwenientów i są odpowiedzialne za podjęcie ostatecznej decyzji. W wielu wypadkach mają one różne systemy wartości [4], a ostateczna decyzja jest najczęściej wynikiem interakcji pomiędzy nimi. Uzyskanie tej decyzji wymaga poszukiwania kompromisu w stosunku do indywidualnych oczekiwań osób zaangażowanych w proces decyzyjny, których interesy często pozostają w konflikcie [15]. Konflikt ten jest wynikiem odmiennej, subiektywnej oceny rozważanego zagadnienia. B. Roy [16] przedstawia kilka zasadniczych źródeł tego konfliktu, tj.: odmienne poglądy etyczne i ideologiczne, różne specyficzne cele, czy różne role pełnione przez interwenientów w społeczeństwie. Na przykład dla problemu wyboru tramwajów, operator przywiązuje znacznie większą wagę do ceny pojazdów niż pasażerowie, dla których z kolei, niezwykle istotne znaczenie ma komfort podróży.

O grupowym podejmowaniu decyzji często mówi się w kontekście wielokryterialnego wspomaganie decyzji [5] oraz teorii negocjacji [10]. Istnieją specjalizowane wersje metod wielokryterialnych dostosowywane do specyfiki grupowych procesów decyzyjnych [5], [9], [15]. W pracy T. Jelassiego, G. Kerstena i S. Ziontsa [10] przedstawiony jest przegląd modeli decyzji grupowych i skonfrontowany z modelami

wykorzystującymi teorię negocjacji. Interesujące podejście do rozwiązywania grupowych problemów decyzyjnych przedstawia również A. Lewandowski [14], który prezentuje system SCDAS (ang. Selection Committee Decision Analysis and Support), wspomagający wybór najlepszego wariantu ze skończonego zbioru wariantów w oparciu o procedurę grupowego osiągania określonego poziomu satysfakcji wszystkich uczestników procesu decyzyjnego.

4. DEFINICJA PROBLEMU DECYZYJNEGO

4.1 Opis werbalny zagadnienia

Istotą rozważanego w niniejszym artykule problemu decyzyjnego jest ocena i wybór najlepszego/najkorzystniejszego modelu tramwaju niskopodłogowego dla systemu miejskiego transportu publicznego w Poznaniu. Problem ten jest silnie osadzony w realiach, gdyż jest ściśle związany z rozstrzygniętym w 2010 roku przetargiem na zakup 40 niskopodłogowych tramwajów, przeznaczonych do obsługi przewozów pasażerskich w poznańskim systemie publicznego transportu miejskiego. Decydem, podejmującym decyzję o wyborze konkretnego modelu / typu tramwaju są przedstawiciele operatora miejskiego systemu transportu publicznego, tj. Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego w Poznaniu, ukonstytuowani, jako Komisja Przetargowa. Ostateczną decyzję komisji akceptuje V-ce Prezydent Miasta odpowiadający za sprawy związane z transportem miejskim.

Podmiotami zainteresowanymi dokonywanym wyborem są: władze miasta (Zarząd Miasta) wspólnie z organami miejskimi odpowiedzialnymi za funkcjonowanie transportu miejskiego (w szczególności Zarząd Transportu Miejskiego) oraz mieszkańcy, w szczególności zaś pasażerowie korzystający z publicznego transportu miejskiego. Jednocześnie interwenientem jest również operator systemu transportu miejskiego, który występuje w podwójnej roli. Interesy wymienionych podmiotów, tj. pasażerów (mieszkańców), operatora i władz miasta powinny być uwzględnione w procedurze wyboru tramwajów. Każdy z rozważanych podmiotów, będący interwenientem („oddziaływaczem”) procesu decyzyjnego jest podmiotem grupowym, składającym się z kilku do kilkudziesięciu reprezentantów. Stąd, cały proces decyzyjny ma charakter grupowego procesu podejmowania decyzji. W rozważanej procedurze decyzyjnej decydem zaprasza omawianych interwenientów do wspólnego podjęcia decyzji o wyborze tramwajów.

Decydem i interwenienci pragną ocenić wszystkie rozważane warianty – tramwaje niskopodłogowe za pomocą zestawu kryteriów o charakterze technicznym, ekonomicznym, społecznym i środowiskowym. Zmierzają przy tym do rozważenia możliwie wszystkich aspektów oceny i wzięcia pod uwagę interesów i oczekiwań wszystkich zainteresowanych stron. Ważne jest odpowiednie dopasowanie rozważanego taboru do specyfiki systemu publicznego transportu miejskiego w Poznaniu.

Celem decydem jest uzyskanie zagregowanej, ilościowej oceny wszystkich tramwajów i ich uszeregowanie od najlepszego do najgorszego. Dlatego problem decyzyjny zdefiniowano, jako wielokryterialne zadanie szeregowania (rankingu) wariantów, a do jego rozwiązania wykorzystano wielokryterialną metodę rankingową - AHP, pozwalającą na uzyskanie zagregowanych ocen użyteczności wszystkich rozważanych wariantów.

4.2 Definicja wariantów i kryteriów ich oceny

Analizie poddano siedem modeli tramwajów wytwarzanych przez różnych producentów, dopuszczonych do przetargu. Wśród nich znalazły się: Alstom Citadis – A0001, Ansaldo Breda Sirio – A0002, CAF Bilbao – A0003, PESA 120N – A0004, Siemens Combino – A0005, Solaris Tramino – A0006 oraz Stadler Variotram – A0007. Krótką charakterystykę rozważanych wariantów - tramwajów niskopodłogowych przedstawiono w tabeli 1.

Do oceny tramwajów wykorzystano następujący zestaw kryteriów:

- **Komfort podróży w tramwaju (K1):** kryterium oceniające wygodę, jakość i bezpieczeństwo podróżowania w tramwaju; w definicji tego kryterium uwzględniono takie elementy jak: liczbę miejsc ogółem i liczbę miejsc siedzących; parametry i ergonomiczność wnętrza tramwaju (szerokość drzwi i przejść; wysokość przestrzeni pasażerskiej i podłogi), jakość siedzeń i odległości między nimi.
- **Charakterystyka trakcyjno – eksploatacyjna tramwaju (K2):** kryterium oceniające walory jezdne tramwaju i decydujące o jego bezpieczeństwie oraz możliwościach pracy w różnych warunkach, a także wpływające na bezpieczeństwo podróżowania; przy konstrukcji kryterium pod uwagę wzięto: drogę hamowania, zdolność pokonywania wzniesień, promień łuku, prędkość maksymalną, przyspieszenie, spokojność biegu.
- **Niezawodność tramwaju (K3):** kryterium oceniające zdolność tramwaju do bezawaryjnego wykonywania zadań przewozowych w żądanym okresie eksploatacji oraz uwzględniające szybkość przywrócenia tej zdolności w przypadku ewentualnych usterek; w ocenie tego kryterium uwzględniono parametry określające prawdopodobieństwo bezusterkowej pracy tramwaju, takie jak: długość gwarancji, współczynnik gotowości technicznej.
- **Trwałość tramwaju (K4):** kryterium oceniające całkowity okres eksploatacji tramwaju, w którym zachowuje on sprawność techniczną i gotowość do realizacji zadań przewozowych; w sformułowaniu kryterium uwzględniono takie aspekty jak: długość eksploatacji (życia) tramwaju, przebieg do naprawy głównej.
- **Koszty eksploatacji (K5):** kryterium oceniające całkowite jednostkowe koszty eksploatacji tramwaju, obejmujące: koszty obsługi i napraw oraz zużycia energii, przypadające na 1 km przebiegu.
- **Przyjazność tramwaju dla środowiska (K6):** kryterium oceniające wpływ tramwaju na otoczenie i uwzględniające takie elementy jak: hałas i drgania generowane przez tramwaj, udział materiałów odnawialnych.
- **Użyteczność i funkcjonalność tramwaju (K7):** kryterium oceniające walory użytkowe i funkcjonalność tramwaju, wpływające na jego przyjazność dla pasażerów oraz wydajność w systemie miejskiego transportu publicznego; w analizie tego kryterium uwzględniono zapewnienie w tramwaju: miejsc dla wózków, platform dla inwalidów, systemów informacji akustyczno– wizualnej, systemów klimatyzacyjnych, innego wyposażenia.
- **Cena tramwaju (K8):** kryterium oceniające koszt zakupu pojedynczego tramwaju.

Tab. 1. Charakterystyka rozważanych wariantów – tramwajów niskopodłogowych

Tramwaj	Alstom Citadis A0001	Ansaldo Breda A0002	CAF Bilbao A0003	PESA 120N A0004	Siemens Combino A0005	Solaris Tramino A0006	Stadler Variotram A0007
Producent (kraj)	Francja	Włochy	Hiszpania	Polska	Niemcy	Polska	Niemcy
Konstrukcja nadwozia	Materiał	aluminium + stal	aluminium + stal	stalowy szkielet + blacha nierdzewna	stalowy szkielet + laminat	stalowy szkielet + tworz. sztuczne	aluminium + stal
	Udział niskiej podłogi	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Zabud.	moduł. 5 członów	moduł. 5 członów	moduł. 5 członów	moduł. 5 członów	moduł. 5 członów	moduł. 5 członów
Pojemność (m-ca siedz.)	212 (48)	209 (46+5 uchylanych)	223 (48)	222 (63)	210 (57)	229 (69)	212 (65)
Liczba drzwi	4 pary x 130 cm + 2 pary x 80 cm	4 pary x 130 cm + 2 pary x 90 cm	4 pary x 130 cm + 2 pary x 80 cm	4 pary x 140 cm + 2 pary x 70 cm	4 pary x 130 cm + 2 pary x 70 cm	4 pary x 150 cm + 2 pary x 75 cm	4 pary x 130 cm + 2 pary x 70 cm
Napęd, moc silników	4 silniki, 480 kW	4 silniki 464 kW	8 silników 560kW	4 silniki, 420 kW	2 silniki, 200 kW	4 silniki, 420 kW	8 silników, 360 kW
Dośw. l. miast/ tramw.	26/1058 Australia, Ameryka Płd., Europa	10/322 Głównie Włochy, Grecja, Szwecja	7/209 Głównie Hiszpania	4/33 Głównie Polska	16/780 Azja, Australia, Europa	0/0 Brak doświad- czenia	14/255 Australia, Europa

- **Doświadczenie dostawcy tramwaju (K9):** kryterium oceniające pozycję i wiarygodność rynkową producenta oraz jego specjalizację w produkcji tramwajów niskopodłogowych oraz doświadczenie w realizacji podobnych zamówień; w ocenie tego kryterium uwzględniono liczbę tramwajów niskopodłogowych wyprodukowanych przez danego producenta oraz liczbę miast, w których eksploatowane są jego tramwaje.

Dla wszystkich rozważanych wariantów A0001 do A0007 uzyskano ich oceny, tworząc tzw. macierz ocen. Jej fragment zamieszczono w tabeli 2. Wszystkie zawarte w tabeli 2 oceny zostały znormalizowane, tj. przeliczone na skalę punktową z przedziału 0-1, wg procedury obliczeniowej zaproponowanej przez R. Kolmana [13].

Tab. 2. Fragment macierzy ocen wariantów – tramwajów niskopodłogowych

KRYTERIA	PODKRYTERIA		Kier. preferencji podkryterium	ALSTOM	ANSALDO BREDA	CAF	PESA	SIEMENS	SOLARIS	STADLER
				A0001	A0002	A0003	A0004	A0005	A0006	A0007
K1	L. m-sc siedzących	[szt.]	Max	48	46	48	63	57	61	57
	L. m-sc ogółem	[szt.]	Max	212	209	223	222	210	229	212
	Min. szer. przejścia	[mm]	Max	590	550	550	742	719	750	520
	Wys. podłogi	[mm]	Min	350	350	350	350	360	350	350
K2	Droga hamowania	[m]	Min	11,4	11,5	11,5	11,5	11,6	11,5	11,5
	Zdolność pokonywania wzniesień	[%]	Max	7	6	6	7	7	6	7
K3	Gwarancja ogólna	[mieś.]	Max	36	36	36	60	36	60	36
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
K7	Platformy dla inwalidów	[0/1]	Max	0	1	0	1	0	0	1
K8	Cena zakupu	[mln zł]	Min	15,4	9,0	12,3	7,1	8,5	8,3	10,4
K9	L. wyprod. tramwajów	[szt.]	Max	1058	322	209	33	780	0	255

4.3 Modelowanie preferencji decydenta i interwenientów

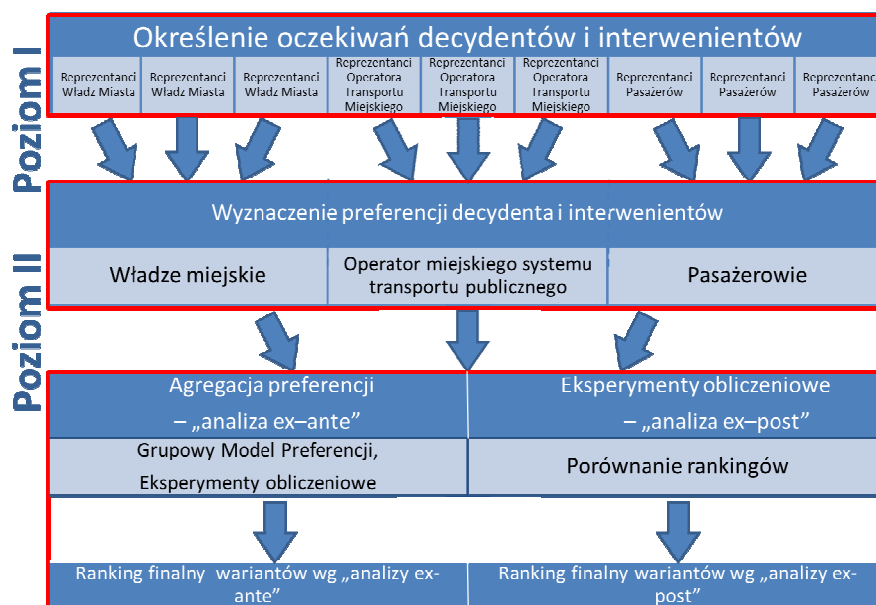
Po zdefiniowaniu wariantów i kryteriów (I faza AHP) przystąpiono do ustalenia modelu preferencji decydenta i interwenientów. Każdą z wymienionych grup, składającą się z kilku do kilkudziesięciu osób poddano ankietyzacji, określając indywidualne oczekiwania i preferencje każdego reprezentanta w poszczególnych podmiotach.

W rezultacie przeprowadzonych badań ankietowych uzyskano oceny ważności poszczególnych kryteriów (w postaci globalnych ocen punktowych) oraz wyskalowano wrażliwość decydentów (interwenientów) na zmianę wartości kryteriów (Poziom I na rysunku 1). Następnie, uwzględniając grupowy charakter podejmowanych decyzji w dyskusji panelowej zdefiniowano grupowe modele preferencji dla poszczególnych podmiotów, tj. władz miejskich, operatora miejskiego systemu transportu publicznego i pasażerów (Poziom II na rysunku 1).

5. EKSPERYMENTY OBLICZENIOWE

Po uzyskaniu wyżej opisanych preferencji dla poszczególnych podmiotów przystąpiono do eksperymentów obliczeniowych, które przeprowadzono zgodnie z procedurą obliczeniową przedstawioną schematycznie na rysunku 1 – dolna część schematu. Eksperymenty obliczeniowe zrealizowano wg dwóch ścieżek postępowania, tj. „analiza ex-

ante” i „analiza ex-post”. W „analizie ex-ante” doprowadzono do zdefiniowania wspólnego, kompromisowego modelu preferencji dla 3 grup podmiotów i w rezultacie wykonano 1 eksperyment obliczeniowy, uzyskując pojedynczy ranking końcowy.



Rys. 1 Schemat procedury obliczeniowej prowadzący do uzyskania rankingów końcowych wariantów wg analizy „ex-ante” i „ex-post” – tramwajów niskopodłogowych

W przypadku „analizy ex-post” przeprowadzono 3 odrębne eksperymenty obliczeniowe, prowadzące do 3 odmiennych rankingów uzyskanych zgodnie z preferencjami i oczekiwaniami, odpowiednio: władz miejskich, operatora i pasażerów. Następnie wykorzystując procedurę agregacji wartości funkcji użyteczności poszczególnych wariantów w kolejnych rankingach osiągnięto końcowy ranking kompromisowy.

Przy konstruowaniu modeli preferencji (Faza II algorytmu) wykorzystano charakterystyczną dla metody AHP procedurę porównań wszystkich elementów hierarchii parami i przyznawania im odpowiedniego stopnia ważności / preferencji w skali od 1 do 9 punktów. Każda liczba w tej skali odpowiada sile preferencji jednego elementu względem drugiego. Wszystkie współczynniki mają charakter kompensacyjny, tzn. wartość oceny dla elementu mniej ważnego jest odwrotnością oceny dla elementu ważniejszego. Porównania te przeprowadzono dla kryteriów, podkryteriów i wariantów ocenianych przez wszystkie 3 grupy podmiotów uzyskując 30 macierzy preferencji. Dla każdej z macierzy uzyskano bezwzględną, znormalizowaną wagę kryterium / podkryterium / wariantu – w_{ij}^b . Przykładową macierz preferencji dla porównań parami kryteriów wg preferencji pasażerów oraz wartości współczynników w_{ij}^b przedstawiono w tabeli 3. Dla wszystkich podmiotów uzyskano bezwzględne wagi kryteriów w_{ij}^b , które zamieszczono w tabeli 4. Zgodnie z

regułami „analizy ex-post” wagi te zostały użyte w eksperymentach obliczeniowych, które posłużyły do generowania odrębnych rankingów wariantów dla każdej grupy. W przypadku „analizy ex-ante” utworzono uśredniony, „grupowy model preferencji”, uwzględniający oczekiwania wszystkich podmiotów. Model ten stał się podstawową wygenerowania jednego kompromisowego rankingu końcowego.

Tab. 3. Charakterystyczny dla metody AHP model preferencji pasażerów na poziomie kryteriów. Porównanie parami kryteriów w skali 1-9 punktów

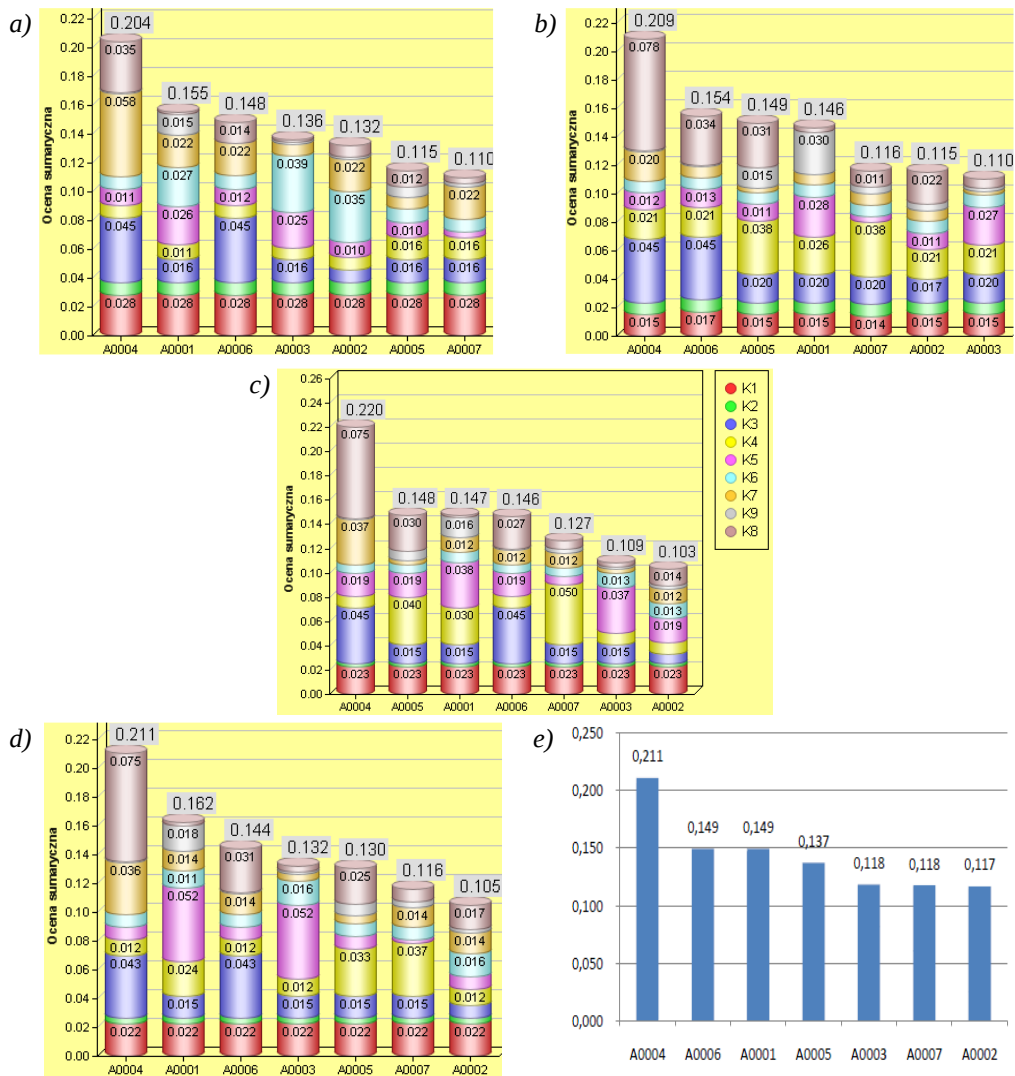
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	Wagi kryteriów w_{ij}^b
K1	1	7	1	1	1	3	2	1	5	0,159
K2	1/7	1	1/7	1/7	1/7	1/5	1/6	1/7	1/3	0,019
K3	1	7	1	1	1	3	2	1	5	0,159
K4	1	7	1	1	1	3	2	1	5	0,159
K5	1	7	1	1	1	3	2	5	1	0,159
K6	1/3	5	1/3	1/3	1/3	1	1/2	1/3	3	0,061
K7	1/2	6	1/2	1/2	1/2	2	1	1/2	4	0,093
K8	1	7	1	1	1/5	3	2	1	1/5	0,159
K9	1/5	3	1/5	1/5	1	1/3	1/4	5	1	0,032

Zgodnie ze schematem obliczeniowym metody AHP w następnym kroku (Faza III algorytmu) obliczono indeksy spójności macierzy CI . Doprowadziło to w niektórych przypadkach do konieczności weryfikacji preferencji decydenta i interwenientów. Po 3 iteracjach osiągnięto dla wszystkich rozważanych macierzy zadowalającą spójność informacji preferencyjnej ($CI < 0.1$)

W fazie IV algorytmu dokonano agregacji bezwzględnych znormalizowanych ocen ważności w_{ij}^b elementów hierarchii za pomocą addytywnej funkcji użyteczności U_i . Na tej podstawie uzyskano rankingi końcowe wariantów przedstawione na rysunku 2. Dla poszczególnych wariantów uzyskano wg różnych modeli preferencji wartości użyteczności z przedziału od $U_i=0,103$ (wariant A0002) do $U_i=0,220$ (wariant A0004). Na rysunkach 2 a-d zaznaczono udział kryteriów K1 do K9 w tworzeniu wartości funkcji użyteczności U_i .

Tab. 4. Wagi kryteriów w_{ij}^b uzyskane metodą AHP dla różnych grup podmiotów

Kryterium	„Analiza ex-post“			„Analiza ex-ante“
	Pasażerowie	Władze miejskie	Operator miejskiego syst. transp. publ.	Grupowy model preferencji
K1	0,195	0,106	0,159	0,155
K2	0,062	0,058	0,019	0,031
K3	0,163	0,186	0,159	0,155
K4	0,076	0,186	0,159	0,14
K5	0,097	0,186	0,159	0,14
K6	0,139	0,106	0,061	0,079
K7	0,163	0,058	0,093	0,102
K8	0,076	0,186	0,159	0,163
K9	0,029	0,058	0,032	0,035



Rys. 2. Rezultaty eksperymentów obliczeniowych metodą AHP - uzyskane wg preferencji a) pasażerów; b) władz miejskich; c) operatora miejskiego systemu transportu publicznego d) grupowych – „analiza ex-ante”; e) zagregowanych – „analiza ex-post”

W przypadku „analizy ex-post” odrębne rankingi dla każdego podmiotu zaprezentowano na rysunkach 2 a, b i c, a następnie skonstruowano ranking kompromisowy – rysunek 2e na podstawie uśrednienia wartości funkcji użyteczności dla każdego wariantu. W przypadku „analizy ex-ante” wygenerowano tylko 1 ranking końcowy w oparciu o wspólny dla wszystkich podmiotów - kompromisowy – grupowy model preferencji.

6. WNIOSKI

W artykule przedstawiono oryginalną metodykę rozwiązywania problemu wyboru / selekcji taboru dla systemu publicznego transportu miejskiego z wykorzystaniem metodyk wielokryterialnego i grupowego podejmowania decyzji. W eksperymentach obliczeniowych wykorzystano metodę AHP. Zastosowano 2 ścieżki dochodzenia do rezultatu końcowego: „ex-ante” i „ex-post”, polegające odpowiednio na: uzyskiwaniu rankingu na podstawie wspólnego – kompromisowego / grupowego modelu preferencji zdefiniowanego dla wszystkich podmiotów przed („ante”) przystąpieniem do eksperymentów obliczeniowych oraz wygenerowaniu 3 rankingów wg różnych modeli preferencji i następnie poszukiwaniu grupowego consensusu po („post”) wykonaniu obliczeń.

W pracy dowiedziono, że „analiza ex-ante” daje podobne, ale nieidentyczne rezultaty z „analizą ex-post”. W obu przypadkach wariantem wygrywającym ranking został wariant A0004 – tramwaj PESA 120N, którego użyteczność wynosi 0,211. Również na końcowych pozycjach obu rankingów znalazły się te same tramwaje – Ansaldo Breda Sirio (A0002) oraz Stadler Variotram (A0007), choć uzyskały już one nieco inne wartości użyteczności. W środkowej części rankingów nastąpiła zamiana na pozycjach 2 i 3 pomiędzy Alstom Citadis (A0001) i Solaris Tramino (A0006) oraz na pozycjach 4 i 5, pomiędzy CAF Bilbao (A0003) i Siemens Combino (A0005). Również w tym przypadku wartości funkcji użyteczności dla poszczególnych wariantów uzyskane w analizach „ex-ante” i „ex-post” są odmienne.

Ciekawą obserwacją jest to, że mimo różnych preferencji poszczególnych grup „oddziaływaczy” ich ostateczny, zagregowany wybór jest identyczny. Zarówno władze miejskie, operator jak i pasażerowie najwyżej ocenili tramwaj PESA 120N (wariant A0004). Wariant ten zawdzięcza swoje zwycięstwo takim cechom jak: wysoka niezawodność, niska cena tramwaju oraz wysoki komfort podróży w tramwaju.

Ważnym wnioskiem wynikającym z badań jest również to, że w zagadnieniach transportowo – logistycznych możliwe jest połączenie metodyk wielokryterialnego i grupowego podejmowania decyzji. Wykazano, że metoda AHP jest przydatnym narzędziem do tego typu analiz. W szczególności umożliwia ona łatwą agregację końcowych rezultatów – obliczenie użyteczności poszczególnych wariantów jako średniej arytmetycznej lub ważonej z ich użyteczności uzyskanych w rankingach wygenerowanych wg modeli preferencji charakterystycznych dla poszczególnych grup „oddziaływaczy”.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bieńczyk M., Fierek S., Kruszyński M., Żak J.: *Wielokryterialna ocena tramwajów przeznaczonych do obsługi systemu transportu publicznego*. W: Bukowski L. (red.) „Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej”, Kraków, 2009, s. 252-261.
- [2] Crainic T., Laporte G.: *Planning Models for Freight Transportation*. European Journal of Operational Research, Vol. 97, No. 3, 1997, s. 409–438.
- [3] Czyżak P., Żak J. *A Model of an Urban Transportation System Formulated as a Multiobjective Mathematical Programming Problem Under Uncertainty*. Journal of Advanced Transportation; Vol. 29, No. 1, 1995, s. 43–62.
- [4] DeSanctis G., Gallupe R.: *A Foundation for the Study of Group Decision Support Systems*. Management Science, Vol. 33, No. 5, 1987, s. 589-609.

- [5] Dyer R., Forman E.: *Group Decision Support with the Analytic Hierarchy Process*. Decision Support Systems, Vol. 8, 1992, s. 99-124.
- [6] European Commission: *White Paper-European Transport Policy for 2010. Time to decide*. Brussels 2001.
- [7] Eurostat - <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>.
- [8] Gasiński L., Kłos Z., Żak J.: *Problemy kształtowania jakości eksploatacyjnej pojazdów i innych obiektów technicznych*. Wydawnictwo PP, Poznań, 1994.
- [9] Jarke M., Jelassi T., Shakun M.: *MEDIATOR: Toward a Negotiation Support System*. European Journal of Operational Research, Vol. 31, No. 3, 1987, s. 314-334.
- [10] Jelassi T., Kersten G., Zionts S.: *An Introduction to Group Decision and Negotiation Support*. W: Bana e Costa C. (red.): *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*. Springer-Verlag, Berlin, 1990, s.537-568.
- [11] Keeney R., Raiffa H.: *Decisions with Multiple Objectives. Preferences and Value Tradeoffs*. Cambridge University Press, Cambridge, 1993.
- [12] Kenworthy J., Laube E. (red.): *The Millennium Cities Database for Sustainable Transport*. International Society of Public Transport, Brussels, 2001.
- [13] Kolman R.: *Inżynieria jakości*. Państwowe Wyd. Ekonomiczne, Warszawa, 1992.
- [14] Lewandowski A.: *Decision Support System for Group Decision Making: Decision Theoretic Framework*. Decision Support Systems, Vol. 5, 1989, s. 403-423.
- [15] Leyva-Lopez J., Fernandez-Gonzalez E.: *A New Method for Group Decision Support Based on ELECTRE III Methodology*. European Journal of Operational Research, Vol. 148, No. 1, 2003, s. 14-27.
- [16] Roy B.: *Decision-Aid and Decision Making*. European Journal of Operational Research, Vol. 45, 1990, s. 324-331.
- [17] Rudnicki A.: *Jakość komunikacji miejskiej*. Wyd. SITK, Kraków, 1999.
- [18] Saaty T.: *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, 1980.
- [19] Saaty T.: *Transport Planning with Multiple Criteria: The Analytic Hierarchy Process Applications and Progress Review*. Journal of Advanced Transportation, Vol. 29, No. 1, 1995, s. 81-126.
- [20] Vuchic V.: *Urban Transit: Operations, Planning and Economics*. J. Wiley and Sons, New York, 2005.
- [21] Żak J.: *The Methodology of Multiple Criteria Decision Making/ Aiding in Public Transportation*. Journal of Advanced Transportation, Vol. 45, No. 1, 2011, s.1-20.
- [22] Żak J.: *The Methodology of Multiple-Criteria Decision Making in the optimization of an Urban Transportation System: Case Study of Poznan City in Poland*. International Transactions in Operational Research Vol. 6, 1999, s.571-590.
- [23] Żak J.: *Wielokryterialne wspomaganie decyzji w transporcie drogowym*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, rozprawa nr 394, Poznań, 2005.
- [24] Żak J., Bożek M., Cieślík R.: *Wielokryterialna metoda wyboru środka transportowego dla systemu komunikacji miejskiej*. W: Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej: Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia komunikacyjnego, Poznań, 8-10 października, 1997, s. 84-90.
- [25] Żak J., Fierek S.: *Design and Evaluation of Alternative Solutions for an Integrated Urban Transportation System*. Proceedings of the World Conference on Transport Research, Berkeley, June 24-28, 2007 (WCTR'2007 - CD Proceedings – 21 stron).