

WYKORZYSTANIE SYMULACYJNYCH MODELI PODRÓŻY I WIELOKRYTERIALNEJ METODY RANKINGOWEJ DO PROJEKTOWANIA ROZBUDOWY SIECI TRAMWAJOWEJ¹

Szymon Fierek

mgr inż., Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, tel. +48 61 665 2716, e-mail: szymon.fierek@put.poznan.pl

Andrzej Szarata

dr inż., Katedra Systemów Komunikacyjnych, Politechnika Krakowska, tel. +48 12 628 2533, e-mail: aszarata@pk.edu.pl

Jacek Żak

dr hab. inż., prof. PŁ, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, tel. +48 61 665 2230, e-mail: jacek.zak@put.poznan.pl

***Streszczenie.** W artykule zaprezentowano metodykę modelowania i oceny różnego przebiegu linii tramwajowych w aglomeracji miejskiej. Wykorzystując pakiet symulacyjny VISUM skonstruowano różne warianty linii tramwajowej przebiegającej przez całe miasto w relacji wschód - zachód, rozważając zarówno różną długość linii jak i jej różny przebieg. Następnie opracowane warianty poddano ocenie wielokryterialnej z wykorzystaniem spójnej rodziny kryteriów. Przedstawiono również modelowanie preferencji decydenta. Eksperymenty obliczeniowe prowadzące do uszeregowania (rankingu) wariantów oraz wyboru najkorzystniejszego rozwiązania przeprowadzono z wykorzystaniem wielokryterialnej metody rankingowej AHP.*

***Słowa kluczowe:** modelowanie podróży, model czterostadiowy, wielokryterialne wspomaganie decyzji*

1. Wprowadzenie

Ciągły spadek liczby podróży wykonywanych transportem zbiorowym na rzecz transportu indywidualnego wymusza konieczność podejmowania pilnych działań inwestycyjnych dążących do poprawy konkurencyjności tego pierwszego. Jednocześnie możliwość wykorzystania funduszy europejskich przeznaczonych na ten cel powoduje konieczność analizy i oceny różnych wariantów inwestycyjnych.

W ramach niniejszego artykułu przedstawiono wielokryterialną ocenę wariantów rozbudowy i modernizacji trasy tramwajowej relacji Wschód – Zachód w Łodzi. Inwestycja realizowana była przez Miasto Łódź w celu przywrócenia wysokiej zdolności eksploatacyjnej istniejącej trasy, jej przedłużenia na nowe tereny (mieszkańcowskie i przemysłowe) oraz podniesienia standardu usług przewozowych

1 Wkład procentowy poszczególnych autorów: Fierek S. 33%, Szarata A. 33%, Żak J. 33%

[2]. Projekt wspierał także poprawę atrakcyjności inwestycyjnej terenów wzdłuż linii tramwajowej oraz poprawę dostępności miejsc pracy, nauki i usług. Obszar przylegający bezpośrednio do trasy jest silnie zurbanizowany. W pobliżu zachodniego krańca trasy istnieje osiedle domów jednorodzinnych oraz część „Łódzkiej Specjalnej Strefy Ekonomicznej”, w rejonie pętli tramwajowej w tej części miasta znajdują się osiedla typu blokowego starej zabudowy. Przy trasie znajduje się dworzec kolejowy Łódź-Kaliska, który stanowi istotny węzeł przesiadkowy dla miasta i regionu. Linia jest prowadzona przez ściśle centrum miasta oraz intensywnie rozwijające się osiedla mieszkaniowe. W części wschodniej, po minięciu zespołu osiedli starszej zabudowy blokowej dzielnicy Widzew, linia odbija w kierunku południowym i przez nowszą zabudowę wielorodzinną dochodzi do nowej dzielnicy przemysłowej. Celem niniejszego artykułu jest stworzenie rankingu wariantów rozbudowy tej linii tramwajowej w oparciu o narzędzia analizy wielokryterialnej.

2. Metodyka

2.1. Symulacja

Analizy symulacyjne mające na celu wyznaczenie efektywności funkcjonalnej tej inwestycji [9] zostały opracowane z uwzględnieniem pełnego modelu cztero-stadiowego, w którym popyt jest funkcją liczby ludności, jej struktury wiekowej i społecznej oraz aktywności gospodarczej w dzielnicach, miastach, gminach i powiatach (model uwzględnia nie tylko miasto, ale również otaczające miejscowości). Model symulacyjny odzwierciedla układ geometrii, węzły sieci, oraz cechy trakcyjne poszczególnych odcinków i przebiegi linii transportu zbiorowego. Badaniu poddano warianty sieci odpowiadające stanowi istniejącemu (przyjęto tutaj stan sieci z 2011 roku) oraz wariantowi bazowemu (bezinwestycyjnemu, dla odniesienia do lat 2014 i 2037) oraz 4 warianty rozwoju systemu transportu.

Zastosowany w niniejszej pracy model ruchu to model 4-etapowy z wtórnym podziałem zadań przewozowych. Zostały w nim uwzględnione wszystkie linie tramwajowe i autobusowe transportu publicznego zarządzane przez MPK Łódź jak również trasy kolejowe oraz główne trasy komunikacji autobusowej PKS. W związku ze strukturą modelu istnieje możliwość określenia częstotliwości dla linii komunikacyjnych w różnych środkach transportu publicznego.

W rezultacie model i prognozy ruchu wykorzystują dokładne częstotliwości, które są określone na podstawie danych rzeczywistych (rozkładów jazdy). Prognozy demograficzne i socjoekonomiczne oparte były na danych regionalnych miasta oraz związane z ogólnymi danymi prognoz GUS, w szczególności demograficznymi i dotyczącymi zatrudnienia. Podstawą analizy modelowej jest oszacowanie prognozowanej ruchliwości mieszkańców oraz wynikających z tego liczebności podróży w poszczególnych grupach motywacji i środkach przewozowych. Model ruchu dla stanu istniejącego został skalibrowany w oparciu o bilans pomiarów ekranowych oraz przekrojowych na etapie tworzenia macierzy, natomiast modele

prognostyczne zbudowano bazując na bilansie demograficznym w obrębie miasta i strefy podmiejskiej oraz przyjętych hipotez zmian ruchliwości uwzględniającej podział na grupy motywacji podróży oraz zmiany demograficzne.

2.2. Wielokryterialne wspomaganie decyzji

Wielokryterialne wspomaganie decyzji (WWD) jest dziedziną wiedzy wywodzącą się z badań operacyjnych. Dziedzina ta zwana też analizą wielokryterialną (franc. *analyse multicritere*) lub wielokryterialnym podejmowaniem decyzji (ang. *multiple criteria decision making*), 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. Według B.Roy [6] wielokryterialne wspomaganie decyzji jest działalnością analityka, który w procesie decyzyjnym pomaga decydentowi znaleźć odpowiedzi na pytania związane z poszukiwaniem najbardziej pożądanego rozwiązania przy uwzględnieniu wielości celów (kryteriów) jakie stawia sobie decydent.

Metodyka WWD służy do rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych czyli sytuacji, w której, mając zdefiniowany zbiór działań (decyzji, wariantów) i spójną rodzinę kryteriów, decydent dąży do [[6]]:

- określenia podzbioru działań (decyzji, wariantów) uważanych za najlepsze względem rozważanej rodziny kryteriów (problem wyboru),
- podziału zbioru działań (decyzji, wariantów) na podzbiory zgodnie z pewnymi normami (problem klasyfikacji albo sortowania),
- uszeregowania zbioru działań (decyzji, wariantów) od najlepszych do najgorszych (problem szeregowania albo rankingu).

Podstawowymi atrybutami wielokryterialnych problemów decyzyjnych są zbiór rozwiązań (wariantów) 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. Zbiór rozwiązań A może być zdefiniowany w sposób bezpośredni (przez wymienienie wszystkich jego elementów) lub pośredni (przez określenie właściwości charakteryzujących elementy zbioru lub warunków go ograniczających). Zbiór A może być stały, tzn. zdefiniowany z góry (a priori) i niepodlegający zmianom w toku procedury decyzyjnej lub ewoluujący (zmienny), czyli podlegający modyfikacjom w trakcie procedury decyzyjnej. Przez spójną rodzinę kryteriów F rozumie się taki zbiór kryteriów, który wg B. Roya [6], powinien spełniać wymagania:

- wyczerpywalności oceny, polegającej na uwzględnieniu wszystkich możliwych aspektów rozważanego problemu,
- spójności oceny, polegającej na właściwym kształtowaniu przez każde kryterium globalnych preferencji decydenta,
- nieredundancji kryteriów, czyli niepowtarzalności zakresów znaczeniowych kryteriów.

Każde kryterium występujące w zbiorze F jest funkcją f_j zdefiniowaną na zbiorze A , służącą do oceny zbioru A i reprezentującą preferencje decydenta w odnie-

sieniu do określonego aspektu (wymiaru) problemu decyzyjnego. Wielokryterialne problemy decyzyjne należą do tzw. problemów matematycznie źle zdefiniowanych, ponieważ przy ich rozwiązywaniu dąży się do wyznaczenia takich rozwiązań x , które maksymalizują wielokryterialną funkcję celu $F(x)$.

$$F(x) = \max\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_j(x)\} \quad (1)$$

przy ograniczeniach: $x \in A$

gdzie:

A – zbiór rozwiązań dopuszczalnych,

$f_j(x)$ – poszczególne cząstkowe funkcje kryterialne dla $j = 1, 2, \dots, J$.

W takiej sytuacji koncepcja rozwiązania globalnie optymalnego nie ma uzasadnienia, gdyż w praktyce nie istnieje rozwiązanie, które byłoby najlepsze ze względu na wszystkie kryteria oceny. Zamiast tego wprowadza się pojęcie rozwiązania niezdominowanego lub sprawnego, zwanego również rozwiązaniem paretooptymalnym [10]. Rozwiązanie a jest sprawne \Leftrightarrow gdy w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych A nie istnieje żadne inne rozwiązanie b , które dominuje nad a . Istotne jest przy tym pojęcie relacji dominacji. Rozwiązanie a dominuje nad b (aDb) \Leftrightarrow gdy dla każdego kryterium j ($j=1, 2, \dots, J$) oceny rozwiązań a i b , odpowiednio $f_j(a)$ i $f_j(b)$, zachowują zależność $f_j(a) \geq f_j(b)$ i przynajmniej jedna z nierówności jest ostra, tj. dla wybranego j $f_j(a) > f_j(b)$. Jeżeli natomiast żadna z nierówności nie jest ostra, to mówimy o tzw. dominacji słabej, a uzyskane rozwiązanie a jest słabo niezdominowane. Najczęściej uzyskiwany zbiór rozwiązań niezdominowanych jest dość liczny ze względu na znaczną liczbę rozważanych kryteriów. Z tego zbioru rozwiązań decydent wybiera rozwiązanie najbardziej satysfakcjonujące, czyli kompromisowe [10].

Do rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych stosuje się różnorodne narzędzia i metody WWD. Metody te można w ogólności podzielić na trzy grupy [10]:

- metody wieloattributowej teorii użyteczności, zwane przez B. Roya metodami syntezy do pojedynczego kryterium, pomijającymi nieporównywalność np. UTA, AHP [8],
- metody oparte na relacji przewyższania, które B. Roy nazywa metodami syntezy przewyższającej z uwzględnieniem nieporównywalności np. ELECTRE I–IV, Promethee [1] oraz Oreste [5],
- metody interaktywne, wg B. Roya nazywane metodami dialogowej oceny lokalnej, opartej na podejściu prób i błędów w poszczególnych iteracjach np. LBS [3].

W niniejszej pracy wykorzystano metodę AHP należącą do wielokryterialnych metod szeregowania wariantów.

3. Modelowanie i ocena wariantów

3.1. Opis wariantów

Projekt rozbudowy linii tramwajowej zakłada powstanie czterech wariantów przebiegu linii tramwajowej [9]. Poniżej przedstawiono te warianty oraz opisano stan obecny.

Wariant 0 – wariant bezinwestycyjny, reprezentujący stan obecny – linia tramwajowa o długości ok. 12 km łącząca łódzkie osiedle Retkinia (pętla na al. ks. kard. S. Wyszyńskiego), zlokalizowane po zachodniej stronie miasta z osiedlami im. Mieszka I, i Bolesława Chrobrego (pętla Augustów) zlokalizowanymi po stronie wschodniej. Przebieg linii zaznaczono na rys. 1 czarną przerywaną linią.

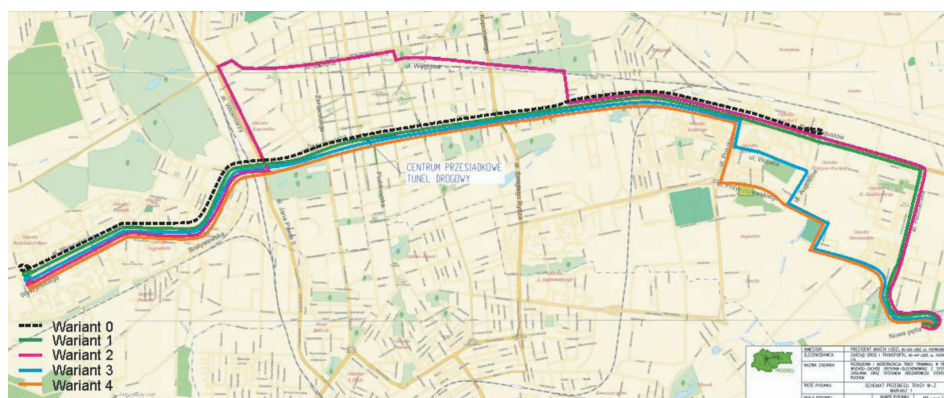
Wariant 1 – wariant inwestycyjny, zakładający wykorzystanie istniejącego przebiegu linii oraz wydłużenie jej o ok. 5 km do osiedla Widzew – Wschód (łączna długość ok. 17 km) wzdłuż ul. Rokietnickiej, al. Hetmańskiej, ul. Kazimierza Odnowiciela oraz al. Ofiar Terroryzmu 11 września. Ponadto założono, że na całej długości trasy torowisko przebiegać będzie na poziomie terenu jako torowisko wydzielone. Przebieg linii zaznaczono na rys. 1 zieloną linią.

Wariant 2 – wariant inwestycyjny, zakładający przesunięcie fragmentu istniejącej linii (odcinek między al. Włókniarzy a ul. Konstytucyjną) na północ i jej równoległe poprowadzenie (wzdłuż ulic Legionów, Zielonej, Narutowicza, torów kolejowych) oraz wydłużenie istniejącej linii do osiedla Widzew – Wschód (wzdłuż ul. Rokietnickiej, al. Hetmańskiej, ul. Kazimierza Odnowiciela oraz al. Ofiar Terroryzmu 11 września). Łączna długość linii w tym wariantcie wynosi 20 km i zaznaczono ją na rys. 1 kolorem różowym.

Wariant 3 – wariant inwestycyjny, zakładający zmianę przebiegu istniejącej linii na końcowym jej odcinku (od ul. Puskina) i wydłużenie jej do osiedla Widzew – Wschód (wzdłuż ul. Puskina, ul. Wujka, ul. Augustów, ul. Przybyszewskiego, al. Hetmańskiej, ul. Kazimierza Odnowiciela oraz al. Ofiar Terroryzmu 11 września). Łączną długość linii w tym wariantcie wynosi ok. 17 km i zaznaczono ją na rys. 1 kolorem niebieskim.

Wariant 4 – wariant inwestycyjny, zakładający zmianę przebiegu istniejącej linii na końcowym jej odcinku (od ul. Puskina) i wydłużenie jej do osiedla Widzew – Wschód (wzdłuż ul. Puskina, ul. Przybyszewskiego, al. Hetmańskiej, ul. Kazimierza Odnowiciela oraz al. Ofiar Terroryzmu 11 września). Łączną długość linii w tym wariantcie wynosi ok. 17 km i zaznaczono ją na rys. 1 kolorem pomarańczowym.

W wyniku rozkładu otrzymanych więźb ruchu wyznaczono potoki pasażerskie i potoki pojazdów komunikacji zbiorowej oraz samochodów osobowych w godzinie szczytu popołudniowego dla każdego z powyższych wariantów, uwzględniając prognozę dla lat: 2014 i 2037.



Rys. 1. Przebieg różnych wariantów rozważanej linii tramwajowej, wg [9]

3.2. Wielokryterialna ocena wariantów

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, że istnieje szereg kryteriów służących do oceny projektów transportowych w tym transportu miejskiego [[4],[7]]. Do najczęściej używanych należą: czas podróży, bezpieczeństwo, niezawodność, punktualność, komfort podróży, czas tracony na przesiadkę, czas oczekiwania, bezpośredniość podróży, częstotliwość, przyjazność dla środowiska i inne. Na tej podstawie oraz biorąc pod uwagę specyfikę wariantów jak również dostępność danych, autorzy artykułu zaproponowali spójną rodzinę kryteriów oceniających analizowane warianty, wśród których znajdują się kryteria oceniające zarówno samą linię jak i jej wpływ na cały system transportu miejskiego.

Zmiana średniego czasu podróży transportem zbiorowym (K1) – kryterium oceniające wpływ nowego przebiegu linii tramwajowej na standard podróży pasażera w poszczególnych wariantach. Kryterium to zostało zdefiniowane jako różnica średniego czasu podróży wszystkich pasażerów systemu transportu zbiorowego, między wariantem bezinwestycyjnym W0, a wariantami inwestycyjnymi (W1-W4). Kryterium wyrażono w godzinach i jest ono maksymalizowane.

Koszty inwestycji (K2) – kryterium o charakterze ekonomicznym oceniające wielkość nakładów finansowych niezbędnych dla zrealizowania zaplanowanych wariantów inwestycyjnych. Kryterium wyrażono w milionach złotych i jest ono minimalizowane.

Wewnętrzna stopa zwrotu (ang. *internal return rate* – IRR) (K3) – kryterium o charakterze ekonomicznym oceniające efektywność poszczególnych wariantów inwestycyjnych. W wyznaczeniu wartości tego kryterium uwzględniono przychody z działalności transportowej, w horyzoncie czasowym 25 lat. Dla tego samego okresu obliczono koszty wynikające z utrzymania i remontowania infrastruktury transportowej. Kryterium to wyrażono w procentach i jest ono maksymalizowane.

Stopień przyjazności dla środowiska (K4) – kryterium o charakterze środowiskowym odnoszące się do całego systemu transportowego oceniające wpływ proponowanych przebiegów linii tramwajowej na stopień przyjazności dla środo-

wiska. Kryterium wyrażono jako funkcję liczby podróży komunikacji indywidualnej (KI), średniego dystansu podróży KI oraz średniej prędkości podróży KI. Ograniczenie liczby podróży i ich dystansu przy jednoczesnym zwiększeniu średniej prędkości ogranicza negatywny wpływ na środowisko. Kryterium wyrażono w skali punktowej (od 0 do 10) i jest ono maksymalizowane.

Współczynnik przesiadkowości (K5) – kryterium oceniające wygodę pasażera związane z możliwością wykonywania bezpośrednich podróży komunikacją zbiorową (KZ). Kryterium wyrażono jako liczba jazd w ramach podróży KZ przypadająca na całkowitą liczbę podróży. Kryterium to wyrażono w średniej liczbie przesiadek przypadających na podróż KZ a jego wartość jest minimalizowana.

Stopień wykorzystania taboru (K6) – kryterium o charakterze techniczno-ekonomicznym oceniające efektywność wykorzystania środków transportu zbiorowego w poszczególnych wariantach. Wyrażono je jako stosunek liczby pasażero-kilometrów do liczby wozokilometrów analizowanej linii tramwajowej. Kryterium to jest maksymalizowane.

Dopasowanie przebiegu linii do potrzeb transportowych (K7) – kryterium oceniające zasadność przebiegu linii tramwajowej. W wyznaczeniu wartości tego kryterium posłużono się liczbą podróży obsługiwanych przez linie tramwajowe. Im dłuższe linie, przebiegające przez obszary o dużym popycie, tym więcej pasażerów korzysta z systemu transportu zbiorowego. Kryterium to jest maksymalizowane.

Bezpieczeństwo (K8) – kryterium oceniające poziom bezpieczeństwa związanego z przebiegiem linii w poszczególnych wariantach. Uwzględniono w nim bezpieczeństwo drogowe oraz bezpieczeństwo sytuacyjne. W wyznaczeniu wartości tego kryterium uwzględniono takie charakterystyki, jak np. liczba możliwych punktów kolizyjnych czy długość wydzielonego torowiska. Kryterium wyrażone punktowo w skali od 0 do 10, a jego wartość jest maksymalizowana.

Komfort podróży (K9) – kryterium oceniające standard podróżowania środkami transportu zbiorowego. Kryterium zdefiniowano jako procentową liczbę pasażerów mogących zająć miejsce siedzące w środkach transportu zbiorowego na rozważanej linii w godzinie szczytu. Kryterium to jest maksymalizowane.

Niezawodność (K10) – kryterium oceniające punktowo zagrożenie niezrealizowania kursów bądź ich opóźnienia wynikające z przebiegu linii i stopnia zatłoczenia. Kryterium maksymalizowane.

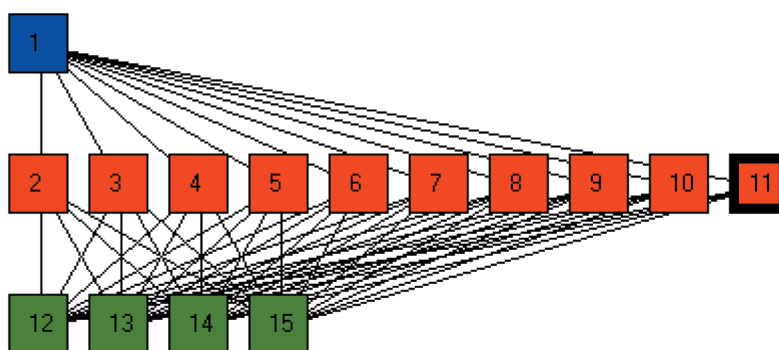
Każdy z wariantów (W1-W4) został oceniony za pomocą wyżej wymienionej spójnej rodziny kryteriów. Część z kryteriów, jak np. czas jazdy otrzymano bezpośrednio z symulacji przeprowadzonych za pomocą programu VISUM, inne, jak np. IRR uzyskano za pomocą dodatkowych obliczeń [9]. W rezultacie skonstruowano macierz ocen przedstawioną w tabeli 1, uwzględniającą prognozę na rok 2014 oraz 2037.

Tabela 1. Macierz ocen charakteryzująca poszczególne warianty zintegrowanego systemu transportu miejskiego

Kierunek preferencji	K1 [h]	K2 [mln zł]	K3 [%]	K4 [poj./h]	K5 [przesiadki]	K6 [pas./poj.]	K7 [pas]	K8 [pkt]	K9 [%]	K10 [pkt]
	max	min	max	max	min	max	max	max	max	max
2014										
W1	-5,12	623	10,11	0,92	1,57	36,55	41509	9	13,9	9,92
W2	-361,68	811	7,63	10,00	1,60	39,62	45678	4	13,4	0,00
W3	-6,45	633	6,29	0,54	1,57	39,04	41495	5	13,5	9,97
W4	-453,80	628	6,94	0,00	1,57	39,21	42104	7	13,5	8,51
2037										
W1	-2 480,72	623	10,11	1,95	1,56	32,57	36908	9	14,6	4,99
W2	-2 727,80	811	7,63	10,00	1,59	32,96	40643	4	14,6	0,00
W3	-2 492,58	633	6,29	2,04	1,56	32,55	36888	5	14,6	5,02
W4	-2 891,21	628	6,94	1,66	1,56	32,71	37444	7	14,6	4,27

W rozważanej sytuacji decyzyjnej decydem jest miasto Łódź, które w trakcie procesu decyzyjnego pragnie uwzględnić zarówno interes przewoźnika (MPK w Łodzi), jak i pasażera. W modelu preferencji wyrażono dwa główne aspekty: ważność kryteriów oraz wrażliwość decydenta na zmiany wartości kryteriów. W efekcie uzyskano charakterystyczny dla metody AHP model preferencji (względne współczynniki ważności dla kryteriów i wariantów). Do przeprowadzenia eksperymentu obliczeniowego użyto komputerowej aplikacji metody AHP. Kolejne kroki procedury obliczeniowej opisano poniżej.

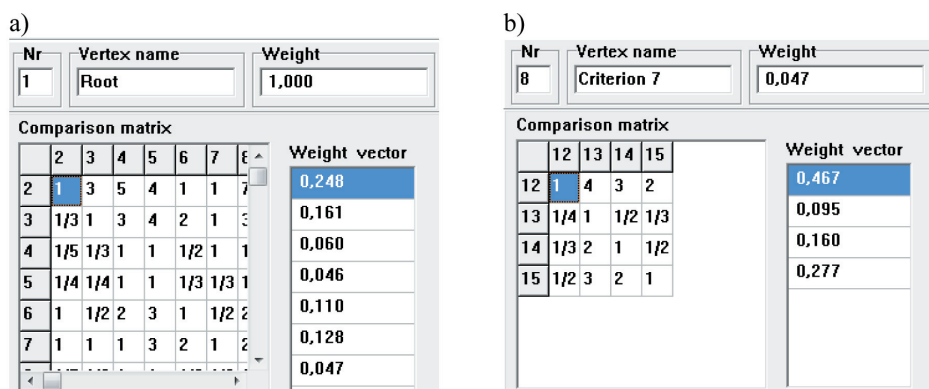
Krok 1 – utworzenie hierarchicznej struktury procesu decyzyjnego (cel procesu oznaczony jest niebieskim blokiem z numerem 1, kryteria kolejno oznaczono czerwonymi blokami z liczbami 2-11 natomiast warianty poddawane ocenie oznaczone są zielonymi blokami z liczbami 12-15).



Rys. 2. Schemat hierarchicznej struktury procesu decyzyjnego

Krok 2 – określenie preferencji decydenta w postaci względnych ocen ważności dokonywanych odpowiednio dla par kryteriów i wariantów decyzyjnych w skali od jednego do dziesięciu punktów. Na rys. 3a przedstawiono porównanie parami

kryteriów, natomiast na rys. 3b wariantów względem jednego z kryteriów (dla przykładu wybrano kryterium przestrzenne – K7).



Rys. 3. Model preferencji decydeny charakterystyczny dla metody AHP – względne współczynniki ważności dla kryteriów a) i wariantów b)

Z porównania wariantów względem kryterium K7 (rys. 3b) wynika, że Wariant 1 (wiersz nr 12) jest najlepszy, natomiast Wariant 2 (wiersz 13) jest gorszy od wszystkich pozostałych. Analizując porównanie parami poszczególnych kryteriów (rys. 3a), można stwierdzić, że kryterium zmiany średniego czasu podróży (K1, wiersz nr 2) charakteryzuje się większą ważnością niż wewnętrzna stopa zwrotu (K3, kolumna nr 4) – współczynnik ważności równy 5 (wiersz nr 2, kolumna nr 4). Z kolei kryterium określające stopień wykorzystania taboru (K6 – wiersz nr 7) jest równo ważne jak kryterium oceniające koszty inwestycji (K2 – kolumna nr3) współczynnik ważności wynosi 1 (wiersz nr 7, kolumna nr 2). Relacje te przekładają się na ostateczną ważność poszczególnych kryteriów i wariantów – np. dla kryterium zmiany średniego czasu podróży (K1) wartość wektora wagowego wynosi 0,248 natomiast dla Wariantu 1 wynosi 0,467

Krok 3 – badanie poziomu globalnej spójności macierzy na każdym poziomie hierarchii, czyli sprawdzanie, jak dalece spójna jest informacja preferencyjna podana przez decydentów w kroku 2 w odniesieniu do kryteriów i wariantów. Oceny ważności elementów hierarchii są tym bardziej spójne, im mniejsza jest wartość obliczonego indeksu spójności (ang. *consistency index CI*). Jeżeli wartości *CI* na poszczególnych poziomach hierarchii są równe 0, to informacja preferencyjna podana przez decydentów na tych poziomach jest idealnie spójna. Oznacza to, że względne oceny ważności kryteriów, podkryteriów i wariantów zostały zdefiniowane w sposób perfekcyjny. W przypadku, gdy wartość *CI* przyjmuje wartość większą od dopuszczalnej, odpowiadającej 0,1 wówczas konieczna jest weryfikacja informacji preferencyjnej podanej przez decydentów, gdyż charakteryzuje się ona zbyt dużą niespójnością. W takiej sytuacji następuje powrót do fazy II algorytmu metody AHP. W przedstawionym eksperymencie indeks ten nie przekroczył w żadnym przypadku tej wartości. W prezentowanym eksperymencie obliczenio-

wym maksymalna wartość indeksu spójności wynosi 0,089 co potwierdza spójność wyrażonych preferencji.

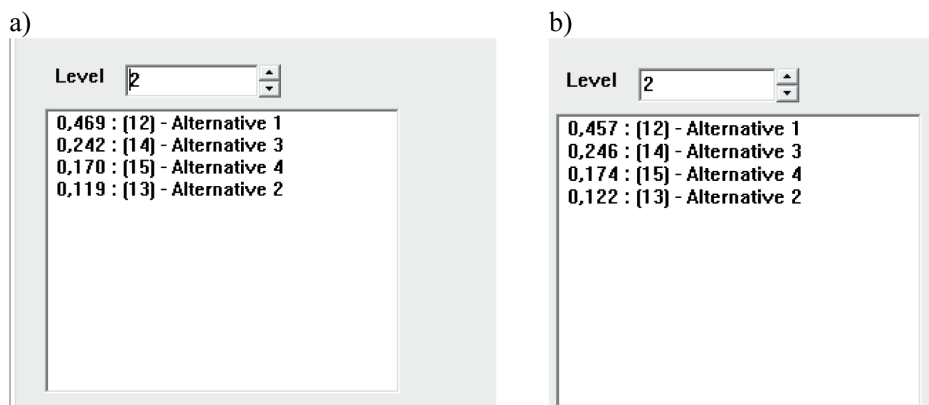
Krok 4 – agregacja znormalizowanych bezwzględnych oceny ważności elementów hierarchii za pomocą addytywnej funkcji użyteczności (5).

$$U_i = \sum_{s(t-2)=1}^{s(t-2)} w_{s(t-2)}^{b/ns(t-3)} \cdot \sum_{s(t-1)=1}^{s(t-2)} w_{s(t-1)}^{b/ns(t-1)} \cdot w_{s(t-1)}^{b/ns(t-2)} \quad (5)$$

gdzie:

- $w_{s(t)}^{b/ns(t-1)}$ – znormalizowana bezwzględna ocena ważności (waga) elementu hierarchii s na poziomie t – wariantu ($s = i$) względem elementu hierarchii s na poziomie $t - 1$ – podkryterium ($s = j'$),
- $w_{s(t-1)}^{b/ns(t-2)}$ – znormalizowana bezwzględna ocena ważności (waga) elementu hierarchii s na poziomie $t - 1$ – podkryterium ($s = j'$), względem elementu hierarchii s na poziomie $t - 2$ – kryterium ($s = j$),
- $w_{s(t-2)}^{b/ns(t-3)}$ – znormalizowana bezwzględna ocena ważności (waga) elementu hierarchii s na poziomie $t - 2$ – kryterium ($s = j$) względem elementu hierarchii s na poziomie $t - 3$ – celu nadrzędnego.

Rezultatem końcowym algorytmu metody AHP jest ranking, czyli uszeregowanie wariantów od najlepszego do najgorszego zgodnie z obliczonymi wartościami ich użyteczności od największej do najmniejszej. Na rys. 4 przedstawiono końcowe uszeregowanie wariantów uzyskane w wyniku przeprowadzonego eksperymentu obliczeniowego z wykorzystaniem metody AHP.



Rys. 4. Ranking finalny wariantów dla horyzontu czasowego a) 2014 oraz b) 2037

Jak wynika z rys. 4 pierwsze miejsce w obu rankingach zajął wariant 1, zaś ostatnie wariant 2. Zwycięzca rankingów charakteryzuje się najlepszą oceną kryteriów K1, K2, K3, K5, K8, K9 (odpowiednio: zmiana średniego czasu podróży transportem zbiorowym, koszty inwestycji, wewnętrzna stopa zwrotu, współczynnik przesiadkowości, bezpieczeństwo oraz komfort podróży) i bardzo dobrymi

ocenami pozostałych. Zdecydowanie najslabiej został oceniony wariant 2. Poważną wadą w przypadku tego wariantu są kryteria wysokiej koszty inwesty i dużej ujemnej zmiany średniego czasu podróży (straty czasu) względem stanu obecnego. Warto ponadto zwrócić uwagę na fakt, że wariant ten cechują najlepsze wartości dla kryteriów K4, K6 i K7 (odpowiednio stopień przyjazności dla środowiska, stopień wykorzystania taboru, kryterium przestrzenne) jednak kryteria te były mniej ważne dla decydenta. Ponadto w obu horyzontach czasowych przebieg rankingu jest taki sam, różnice występują jedynie w wartościach funkcji użyteczności, jednak są one niewielkie.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono zastosowanie narzędzi symulacji ruchu i wielokryterialnego wspomaganie decyzji do konstruowania i oceny wariantów przebiegu linii tramwajowej w Łodzi. Wykorzystując narzędzia makrosymulacji, wygenerowano cztery alternatywne warianty.

Zdefiniowano spójną rodzinę kryteriów, która z uwagi na specyfikę projektu obejmowała kryteria oceniające zarówno przebieg samej linii tramwajowej, jak również jej wpływ na system transportowy miasta. Jako dane wejściowe do wyznaczenia wartości zdefiniowanego zbioru kryteriów wykorzystano wyniki pochodzące z modelu symulacyjnego odwzorowującego system transportowy miasta wraz z interakcjami zachodzącymi między poszczególnymi gałęziami transportu. Pozwoliło to precyzyjnie sparametryzować badane warianty. Warianty te poddano ocenie za pomocą spójnej rodziny kryteriów przy wykorzystaniu modelu preferencji decydenta. Eksperymenty obliczeniowe prowadzące do uszeregowania wariantów przeprowadzono metodą AHP – metodą wielokryterialnego szeregowania wariantów. Dzięki zastosowaniu tej metody, w otrzymanym uszeregowaniu widać odległości pomiędzy poszczególnymi wariantami: najbardziej pożądanym wariant 1 w obu rankingach (na rok 2014 i na 2037) uzyskał wyraźną przewagę na pozostałymi - niemalże dwukrotnie wyższą wartość funkcji użyteczności.

W przypadku rozbudowy linii tramwajowej w Łodzi, uwzględnienie spójnej rodziny dziesięciu kryteriów pozwoliło na wskazanie wariantu najbardziej pożądanego - kompromisowego (wariant 1), spełniającego postawione wymagania. W rozważanym przypadku autorzy artykułu rekomendują decydentowi wybór tego wariantu.

Bibliografia

- [1] Brans J., Mareschal B., Vincke P., PROMETHEE: A New Family of Outranking Methods in Multicriteria Analysis. W: Brans J. (red.): Operational Research'84. North-Holland Publishing, Amsterdam, pp. 408-421, 1984.

-
- [2] Friedberg J., Szubra M., Studium wykonalności projektu pn. Rozbudowa i modernizacja trasy tramwaju w relacji Wschód – Zachód (Retkinia– Olechów) wraz z systemem zasilania oraz systemem obszarowego sterowania ruchem. Materiały niepublikowane, Kraków, 2010.
- [3] Jaskiewicz A., Słowiński R., The Light Beam Search Approach – an Overview of Methodology and Applications. *European Journal of Operational Research*, Vol. 113, No. 2, pp. 300–314, 1999.
- [4] Quattro– Project of European Union (Working Papers). D2: Definition and Evaluation of Quality in Urban Passenger Transportation. D3: Tendering and Contracting of Urban Passenger Transportation Services. D4: Link between Customer Satisfaction and Quality Indices, Brussels, 1997.
- [5] Roubens M., Preference Relations on Actions and Criteria in Multicriteria Decision Making. *European Journal of Operational Research*, Vol. 10, pp. 51-55, 1982.
- [6] Roy B., Wielokryterialne wspomaganie decyzji. WNT, Warszawa, 1990.
- [7] Rudnicki A., Jakość Komunikacji Miejskiej. Kraków, 1999.
- [8] Saaty T., The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York, 1980.
- [9] Studium Wykonalności projektu pn. Rozbudowa i modernizacja trasy tramwaju w relacji Wschód – Zachód (Retkinia– Olechów) wraz z systemem zasilania oraz systemem obszarowego sterowania ruchem. Materiały niepublikowane, Łódź, grudzień 2011.
- [10] Żak J.: Wielokryterialne wspomaganie decyzji transporcie drogowym. Politechnika Poznańska, Poznań, 2005.