

Tomasz Ambroziak¹, Piotr Gołębiowski², Kacper Woźnicki³,

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Ilona Jacyna-Gołda⁴

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji

Roland Jachimowski⁵, Michał Kłodawski⁶, Konrad Lewczuk⁷, Emilian Szczepański⁸

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Wariantowe rozłożenie potoku ruchu w zadanej sieci przy uwzględnieniu kosztów zewnętrznych

1. WPROWADZENIE

Transport jest jedną z najbardziej negatywnie oddziałujących na środowisko gałęzi gospodarki, z wyłączeniem niektórych rodzajów przemysłu ciężkiego i rolnictwa. Ciągły rozwój transportu powoduje wzrost negatywnego wpływu na środowisko naturalne i cywilizacyjne, który wyraża się poprzez [14]:

- emisję gazów cieplarnianych przyczyniających się do zmian klimatycznych,
- lokalną emisję zanieczyszczeń powietrza wpływającą negatywnie na zdrowie ludzi i lokalne środowisko przyrodnicze,
- zajmowanie cennych przyrodniczo terenów i rozcinanie ich ciągłości (fragmentacja) nowobudowanymi ciągami infrastruktury technicznej, przyczyniające się do utraty różnorodności biologicznej,
- emitowanie hałasu zagrażającego ludzkiemu zdrowiu.

Z racji poważnych skutków oddziaływania transportu na środowisko należy poszukiwać metod, które przyczynią się do jego ograniczenia. W związku z tym, zarówno na szczeblu krajowym jak i międzynarodowym, opracowano wiele założeń mających na celu dążenie do osiągnięcia proekologicznego systemu transportowego. Unia Europejska opracowała wiele dokumentów, które obligują państwa członkowskie do wdrożenia działań pozwalających na ograniczenie negatywnego wpływu transportu na środowisko. W jednej z Białych Ksiąg Komisji Europejskiej [4] założono, że do 2050 roku zmniejszona zostanie emisja dwutlenku węgla o 60%. Z kolei jedna z Zielonych Ksiąg poświęcona została mobilności w miastach [13], w której zidentyfikowano problemy degradacji środowiska na obszarach miejskich. Oprócz dokumentów opracowanych przez Komisję Europejską można wymienić działania takie jak wzrost świadomości społeczeństw, ochrona najważniejszych ekosystemów Ziemi, oraz opracowanie koncepcji zrównoważonego rozwoju.

Zrównoważony rozwój to taki rozwój społeczny i gospodarczy, który zapewnia zaspokojenie potrzeb współczesnego społeczeństwa jak również dba o zaspakajanie potrzeb przyszłych pokoleń [2], [17]. Wiąże się z tym również koncepcja zrównoważonego transportu. Zrównoważony system transportowy można zdefiniować jako taki system, który zapewnia równowagę między czynnikami społecznymi i gospodarczymi, a rozwojem przestrzennym i ochroną środowiska w danym kraju. Zatem kształtowanie proekologicznego systemu transportowego uwzględnia równowagę między aspektami gospodarczymi, społecznymi, rozwojem przestrzennym i ochroną środowiska [1].

Jak wynika z powyższych rozważań, zgodnie z dokumentami Komisji Europejskiej, proekologiczny system transportowy powinien być przyjazny dla środowiska naturalnego oraz człowieka, tj. powinien:

¹ tam@wt.pw.edu.pl

² pgolebiowski@wt.pw.edu.pl

³ kacperwoznicki@gmail.com

⁴ Ilona.Jacyna@gmail.com

⁵ rjach@wt.pw.edu.pl

⁶ mkloda@wt.pw.edu.pl

⁷ kle@wt.pw.edu.pl

⁸ eszczepanski@wt.pw.edu.pl

- zapewniać dostępność celów komunikacyjnych w sposób bezpieczny, niezagrażający zdrowiu ludzi i środowisku oraz w sposób równy dla obecnego i kolejnych pokoleń,
- pozwalać funkcjonować efektywnie,
- oferować możliwość wyboru środka transportowego,
- podtrzymać gospodarkę oraz rozwój regionalny,
- ograniczać emisję i odpady do ilości możliwej do ich zaabsorbowania przez środowisko,
- zużywać odnawialne zasoby w ilościach możliwych do ich odtworzenia,
- zużywać nieodnawialne zasoby w ilościach możliwych do ich zastąpienia przez odnawialne substytuty,
- minimalizować hałas i zajętość terenu.

Negatywny wpływ transportu na środowisko wyrażany jest kosztami zewnętrznymi. Koszty zewnętrzne to koszty ponoszone przez społeczeństwo [4], wywołane wystąpieniem jakiegoś czynnika – efektu zewnętrznego. W transporcie efektami tymi są wypadki, zanieczyszczenie powietrza, zmiany klimatu, zatory komunikacyjne i niedobór terenów oraz hałas.

Przedmiotem niniejszego artykułu jest analiza porównawcza dla wariantowego rozłożenia potoku ruchu w zadanej sieci przy uwzględnieniu kosztów zewnętrznych. Istotą rozłożenia potoku ruchu jest [7], [14] przydzielenie do przewiezienia odpowiedniej wielkości potoku ruchu na poszczególne połączenia (drogi) w taki sposób, aby spełnione były warunki nakładane na potok ruchu oraz aby wskaźnik oceny jakości rozwiązania osiągnął wartość ekstremalną – minimalną bądź maksymalną. Badania dotyczące rozłożenia potoku ruchu na sieć prowadzone są od wielu lat. Od 1976 do 2005 roku przygotowano blisko cztery tysiące artykułów na ten temat [21]. Podobne badania, jak w niniejszym artykule, zostały przeprowadzone w 2004 roku [9]. W artykule opisano rozłożenie potoku ładunków na sieć wybranego ciągu komunikacyjnego, w którym dostępne były dwie gałęzie transportu: kolejowa i samochodowa. Jako wskaźnik oceny jakości rozwiązania przyjęto koszty zewnętrzne, których poszukiwano minimalną wartość. Z kolei w artykule [2] przeprowadzono rozłożenie potoku pasażerów na połączenia w ciągu komunikacyjnym Warszawa – Kraków. Przyjęto trzy wskaźniki oceny jakości rozwiązania: koszty średnie, koszty krańcowe oraz całkowitą emisję dwutlenku węgla przez pasażerów.

Celem artykułu jest analiza wpływu kosztów zewnętrznych na rozłożenie potoku pasażerów na ciąg komunikacyjny Warszawa – Bydgoszcz. Cechuje się on multimodalną technologią przewozów, gdyż występują w nim połączenia kolejowe, autobusowe, samochodowe oraz lotnicze. Jako wskaźniki oceny jakości rozłożenia potoku pasażerów na sieć przyjęto dwa różne kryteria cząstkowe: koszty średnie oraz koszty krańcowe. Rozłożenie potoku ruchu przeprowadzono dla dwóch sytuacji. W pierwszej sytuacji poszczególne połączenia były opisane charakterystykami o interpretacji średniego kosztu przemieszczania. W drugiej sytuacji charakterystyki zostały zmodyfikowane do postaci sumy średnich kosztów przemieszczania oraz kosztów zewnętrznych związanych z przewozem potoku ruchu. Rozłożenia dla każdej sytuacji dokonano dla trzech wariantów: dla istniejącej struktury połączeń przy liczbie podróży pochodzącej z 2010 r. (wariant 1), dla bieżącej struktury połączeń przy założeniu wzrostu liczby pasażerów o 40% (wariant 2) oraz trzeci wariant – gdy likwidacji ulegną połączenia pociągów międzywojewódzkich przez Inowrocław (zakończenie modernizacji linii kolejowej nr 9 – Warszawa – Gdańsk) wraz ze zwiększeniem liczby pasażerów o 40%.

2. KOSZTY ZEWNĘTRZNE W TRANSPORCIE

Jak już wspomniano, przedmiotem artykułu jest badanie wpływu kosztów zewnętrznych na rozłożenie potoku ruchu na drogi w ciągu komunikacyjnym Warszawa – Bydgoszcz. Poprzez koszty zewnętrzne w transporcie należy rozumieć sumę kosztów zużycia środków ponoszonych przez społeczeństwo, powstających w trakcie realizacji usługi transportowej. W ich skład wlicza się zanieczyszczenie powietrza, wody i gleby, emisję hałasu, wypadki komunikacyjne, oraz zajętość terenu. Ich ilość i wysokość jest uzależniona od rodzaju usług, np. od rodzaju wybranego środka transportu.

Zanieczyszczenie powietrza, wód i gleby niesie za sobą szereg negatywnych skutków, obejmujących zarówno uszczerbek na zdrowiu, jak i straty ekonomiczne. Do kosztów zewnętrznych związanych z zanieczyszczeniami należą: koszty redukcji skażenia środowiska, koszty zniszczeń powodowanych przez

zanieczyszczenia, koszty kataklizmów klimatycznych oraz koszty zapobiegania skażeniom. Emisja hałasu wytwarzanego podczas realizacji usług transportowych negatywnie oddziałuje na ludzkie zdrowie, zarówno fizyczne jak i psychiczne. Dlatego też koszty zewnętrzne z nią związane mają przede wszystkim charakter społeczny, a zalicza się do nich: straty produktywności wywołane zmęczeniem i niezdolnością do koncentracji, zaburzenia snu, ciągłe przemęczenie oraz koszty opieki zdrowotnej.

Koszty zewnętrzne związane z wypadkami transportowymi to takie, które nie są pokrywane przez sprawcę wypadku lub z ubezpieczenia OC i AC. Zalicza się do nich koszty leczenia, koszty resocjalizacji, koszty przystosowania inwalidów do nowych warunków pracy oraz koszty przedsięwzięcia związane z poszukiwaniem nowych pracowników. Ostatnim rodzajem kosztów zewnętrznych związanych z transportem jest zajętość terenu. W porównaniu tego rodzaju kosztów dla transportu kolejowego i samochodowego, widać największą dysproporcję, co ma związek z bardzo dużym stopniem zajętości terenu przez infrastrukturę drogową. Koszty zajętości terenu mają przede wszystkim związek z wahaniami cen ziemi pod elementy liniowe i punktowe infrastruktury transportowej.

Transport jest wielogałęziowym (niejednorodnym) działem gospodarki narodowej. Każda z gałęzi transportu ma odmienną charakterystykę techniczną, technologiczną i organizacyjną. W przypadku kosztów zewnętrznych ta niejednorodność jest również wyraźnie zauważalna. W tabeli 1 przedstawiony został wykaz kosztów zewnętrznych dla poszczególnych rodzajów transportu.

Tabela 1. Wielkości kosztów zewnętrznych dla poszczególnych rodzajów transportu

Rodzaj transportu	Suma kosztów zewnętrznych	
	min	max
samochodowy – miasto	2,1 [eurocenta/pojazdokm]	1,92 [euro/pojazdokm]
samochodowy – poza miastem	1,0 [eurocent/pojazdokm]	1,09 [euro/pojazdokm]
kolejowy – miasto	48,3 [eurocenta/pociągokm]	10,77 [euro/pociągokm]
kolejowy – poza miastem	26,7 [eurocenta/pociągokm]	9,2 [euro/pociągokm]
lotniczy	1605 [euro/lot]	
wodny śródlądowy	105 [eurocenta/statkokm]	14,82 [euro/statkokm]

Źródło: opracowanie własne na podstawie [15].

Dane z tabeli 1 obrazują różnice w kosztach zewnętrznych generowanych przez poszczególne rodzaje transportu. Dysproporcje pomiędzy wartościami minimalnymi, a maksymalnymi są bardzo duże, co jest związane ze zróżnicowaniem badanych pojazdów (pasażerskie, towarowe), oraz warunków w których zostały przeprowadzone badania (rodzaj terenu, pora doby, godziny szczytu, rodzaj napędu). Wartości opisywanych wcześniej w artykule rodzajów kosztów zewnętrznych są różne dla poszczególnych rodzajów transportu. W tabeli 2 zaprezentowano wartości wybranych składników kosztów zewnętrznych dla wybranych gałęzi.

Tabela 2. Wykaz wybranych kosztów zewnętrznych dla poszczególnych rodzajów transportu [eurocentów/pojazdokm]

Rodzaj transportu	Emisja zanieczyszczeń		Emisja hałasu	
	min	max	min	max
Transport samochodowy	0,1	0,3	0,8	3,4
Transport kolejowy	16	42	1,7	5,2
Transport lotniczy	119	631	150	1200

Źródło: opracowanie własne na podstawie [5].

Z danych w tabeli 2 wynika, że poszczególne gałęzie transportu oddziałują w różny sposób na środowisko. Jedne gałęzie oddziałują negatywnie w większym stopniu (większa wartość kosztów zewnętrznych), inne w mniejszym. Należy zatem dążyć do tego by, zminimalizować sumaryczną wielkość kosztów zewnętrznych emitowanych przez system transportowy. Jednym z działań może być przeniesienie potoku ruchu z gałęzi transportu cechujących się większymi kosztami zewnętrznymi na gałęzie cechujące się niższymi.

3. PRZEDMIOT BADAŃ

3.1. Model systemu transportowego

Badanie procesów zachodzących w rzeczywistych systemach transportowych jest zadaniem skomplikowanym. Koniecznym jest zatem zbudowanie modelu systemu czyli umyślnie uproszczonej reprezentacji rzeczywistości, która zawiera tylko i wyłącznie elementy istotne z punktu widzenia prowadzonych badań. Konstruując model systemu transportowego niezbędnym jest określenie czterech podstawowych jego właściwości: struktury w postaci grafu G , właściwości elementów ją tworzących w postaci zbioru funkcji F , potoku ruchu P oraz organizacji O rozumianej jako wykorzystanie elementów struktury do realizacji zadań przewozowych [7], [11]. Powyższe można przedstawić w postaci czwórki uporządkowanej $MST = \langle G, F, P, O \rangle$.

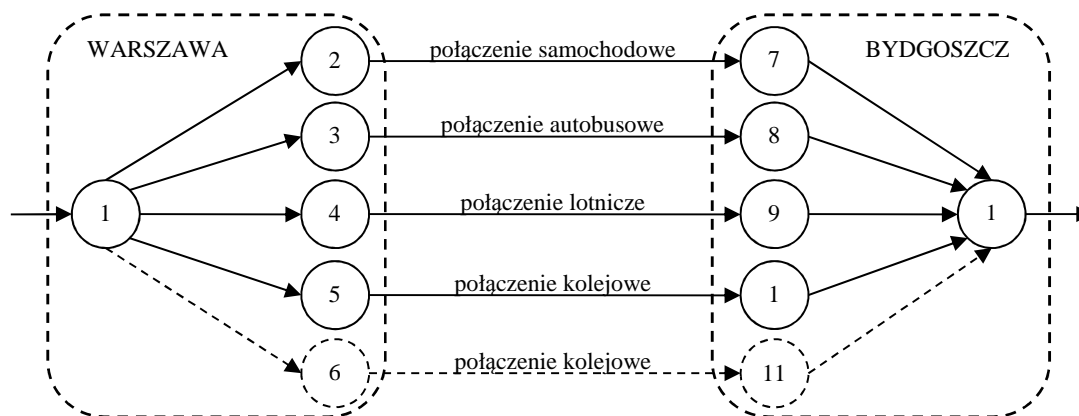
Najwygodniejszym narzędziem do przedstawienia struktury oraz charakterystyk systemu transportowego jest teoria grafów [8], [9], [10], [14]. Zakładamy, że połączenia między dwoma wyróżnionymi miastami tworzą sieć transportową, którą można przedstawić w postaci trójki uporządkowanej $S = \langle G, F_W, F_L \rangle$, gdzie $G = \langle W, L \rangle$ to graf struktury systemu transportowego w którym W to zbiór węzłów sieci transportowej: $W = \{1, \dots, i, \dots, j, \dots, W\}$ a L to zbiór łuków występujących w grafie G , symbolizujących połączenia między wierzchołkiem początkowym o numerze i a wierzchołkiem końcowym o numerze j , przy czym numer węzła początkowego musi być różny od numeru węzła końcowego. Można to przedstawić w następującej postaci: $L = \{(i, j) : (i, j) \in W \times W, i \neq j\}$. F_L to zbiór funkcji określonych na zbiorze łuków grafu G posiadających określoną interpretację, np. czasu przejazdu czy odległości, natomiast F_W to zbiór funkcji określonych na zbiorze wierzchołków grafu G . W analizowanym przypadku na zbiorze wierzchołków nie została opisana żadna funkcja ($F_W = \emptyset$).

Ponadto zakłada się, że dane jest zapotrzebowanie na przewóz, które ma zostać przetransportowane w relacji (a, b) , które można zapisać w postaci x^{ab} , gdzie a – numer węzła będącego źródłem potoku ruchu, należący do zbioru numerów źródeł A , b – numer węzła będącego ujściem potoku ruchu, należący do zbioru numerów ujść B . Zdefiniowano także zbiór relacji przewozu E w postaci $E \subset A \times B$, przy czym $(a, b) \in E$. Założono, że dla każdej relacji $(a, b) \in E$ istnieje zbiór dróg wiążących początek relacji przewozu z jej końcem, oznaczony symbolem P^{ab} . Ponadto w każdym zbiorze zdefiniowanym w ten sposób istnieje co najmniej jedna droga, która oznaczana będzie indeksem p , przy czym $p \in P^{ab}$.

3.2. Zdefiniowanie problemu badawczego

Problemem badawczym opisanym w artykule jest analiza wpływu kosztów zewnętrznych na rozłożenie potoku pasażerów w ciągu komunikacyjnym Warszawa – Bydgoszcz. Ciąg ten charakteryzuje się multimodalną technologią przewozu. Oznacza to, że pomiędzy dwoma wyróżnionymi węzłami można przemieszczać się przy pomocy wielu różnych środków transportu. Do dyspozycji są połączenia kolejowe przez Włocławek i przez Inowrocław, autobusowe, samochodowe oraz lotnicze.

Struktura ciągu komunikacyjnego Warszawa – Bydgoszcz została przedstawiona na rys. 1.



Rys. 1. Struktura ciągu komunikacyjnego Warszawa – Bydgoszcz

Źródło: opracowanie własne.

Przejazd samochodem między Warszawą i Bydgoszczą, odwzorowany łukiem (2, 7), odbywać się będzie przez autostrady A2 i A1. Łuk (3, 8) przedstawia przejazd autobusem przewoźnika PolskiBus.com, między Dworcem Autobusowym Warszawa Metro Młociny, a ulicą Jagiellońską w Bydgoszczy. Połączenie lotnicze pomiędzy Portem Lotniczym Warszawa Okęcie a Portem Lotniczym Bydgoszcz Szwederowo przedstawia łuk (4, 9). Łuk (5, 10) stanowi połączenie kolejowe między stacjami Warszawa Centralna i Bydgoszcz Główna przez Włocławek. Dodatkowo w wariantach 1 i 2 rozpatrywany będzie łuk (6, 11), który przedstawia połączenie kolejowe między Warszawą i Bydgoszczą przez Inowrocław. Połączenie to po zakończeniu modernizacji drogi kolejowej nr 9 (Warszawa – Gdańsk) jest planowane do likwidacji. Charakterystykę poszczególnych połączeń przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Charakterystyka poszczególnych połączeń w ciągu komunikacyjnym Warszawa - Bydgoszcz

Rodzaj połączenia	Odległość [km]	Liczba miejsc	Koszt [zł/pas.]	Czas [h]
Samochodowe	302	4	134,00	2,85
Autobusowe	302	70	25,00	4,33
Lotnicze	250	70	149,00	0,83
Kolejowe p. Włocławek	283	374	60,00	3,67
Kolejowe p. Inowrocław	286	450	70,00	3,00

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z założeniem przyjętym w punkcie 3.1 nie było możliwe przedstawienie Warszawy i Bydgoszczy jako węzłów w postaci jednego wierzchołka, gdyż występowałyby między nimi aż cztery łuki. Dokonano więc rozszerzenia struktury. Przyjęto, że podróż rozpoczynała się będzie w Warszawie na Placu Zamkowym (węzeł 1) i w pierwszej fazie będzie odbywała się do miejsc rozpoczęcia podróży danym środkiem transportu. Punktem docelowym w Bydgoszczy jest Stary Rynek (węzeł 12). Przyjazd do Bydgoszczy odbywać się będzie do punktu opuszczenia danego środka transportu. Z tej przyczyny odwzorowano dodatkowo łuki (1, 2), (1, 3), (1, 4), (1, 5), (1, 6), (7, 12), (8, 12), (9, 12), (10, 12), (11, 12).

Na drogi stanowiące sieć dokonano zostało rozłożenie potoku ruchu w aspekcie oceny dostosowania infrastruktury do zadań dla dwóch sytuacji. Zbiór sytuacji S można określić następująco (gdzie: s – numer sytuacji, S – liczba sytuacji): $S = \{1, 2, \dots, s, \dots, S\} = \{1, 2\}$.

W **pierwszej sytuacji** ($s = 1$) poszczególne połączenia były opisane charakterystykami o interpretacji średniego kosztu przemieszczania. W **drugiej sytuacji** ($s = 2$) charakterystyki poszczególnych połączeń zostały zmodyfikowane do postaci o interpretacji sumy średnich kosztów przemieszczania oraz kosztów zewnętrznych związanych z przemieszczaniem [15].

Rozłożenia potoku ruchu dla każdej sytuacji dokonano dla trzech wariantów. Zbiór wariantów dla sytuacji s -tej $V(s)$ można określić następująco (gdzie: $v(s)$ – numer wariantu dla sytuacji s -tej, $V(s)$ – liczba wariantów dla sytuacji s -tej): $V(s) = \{1, 2, \dots, v(s), \dots, V(s)\}$ ($V(1) = \{1, 2, 3\}$, $V(2) = \{1, 2, 3\}$).

Wariant 1 to rozłożenie potoku pasażerów o wielkości pochodzącej z 2010 roku na istniejące drogi w analizowanym fragmencie sieci transportowej, tj. na połączenia: kolejowe (p. Włocławek i p. Inowrocław) oraz połączenia lotnicze, samochodowe i autobusowe. **Wariant 2** to rozłożenie potoku pasażerskiego na sieć w stanie istniejącym (jak w wariantcie 1), lecz wielkość potoku ruchu będzie zwiększona w stosunku do chwili obecnej o prawie 40% (prognoza na rok 2020). **Wariant 3** to rozłożenie potoku pasażerów na analizowany ciąg, przy uwzględnieniu likwidacji połączenia kolejowego przez Inowrocław. Połączenie to zostało uruchomione ze względu na trwającą modernizację drogi kolejowej nr 9 (Warszawa – Gdańsk) w celu skrócenia czasu jazdy do Trójmiasta. Po zakończeniu naprawy torów połączenie ma zostać zlikwidowane. Wielkość potoku ruchu w wariantcie 3 będzie zwiększona w stosunku do chwili obecnej o prawie 40% (prognoza na rok 2020).

Na podstawie szacunków przyjęto, że potok podróży obciążający analizowany ciąg komunikacyjny wynosi 8000 pasażerów na dobę (stan na 2010 rok). Przyjmując, że nie wszystkie podróże realizowane są codziennie to potok roczny w analizowanej relacji wynosi 2 920 tys. pasażerów. Taka wielkość będzie rozkładana na sieć w **wariantcie 1**. W **wariantcie 2** i **3** rozkładana będzie na sieć wielkość o prawie 40% większa.

3.3. Wskaźniki oceny jakości rozwiązania

Na potrzeby badań przeprowadzone zostało wielokryterialne rozłożenie potoku ruchu w wybranym fragmencie sieci transportowej. Kryteriami oceny jakości organizacji realizacji zadań przez system transportowy $\mathbf{X}(v(s))$ w każdym wariantcie dla s -tej sytuacji $v(s)$, $v(s) \in V(s)$ są:

- $f_1(\mathbf{X}(v(s)))$ – koszty średnie przemieszczania potoku ruchu w analizowanym fragmencie sieci transportowej. Kryterium kosztów średnich może być uznane za ocenę kosztów transportu z punktu widzenia nabywcy usług transportowych. Wybór drogi dokonywany jest przez każdego użytkownika sieci zgodnie z kryterium osiągnięcia maksymalnej korzyści. Interpretacja funkcji jest następująca: koszty średnie c przemieszczania potoku ruchu po drogach o numerach p i p' ($p, p' \in P^{ab}$) w relacji (a, b) dla każdego wariantu rozłożenia w sytuacji s -tej $v(s)$ są sobie równe i przyjmują wartość minimalną:

$$f_1(\mathbf{X}(v(s))) = \min_{\{\mathbf{X}(v(s))\}} \{c^{p,ab}(\mathbf{X}(v(s))) = c^{p',ab}(\mathbf{X}(v(s)))\} \quad (1)$$

- $f_2(\mathbf{X}(v(s)))$ – koszty krańcowe przemieszczania potoku ruchu w analizowanym fragmencie sieci transportowej. Kryterium kosztów krańcowych może być uznane za ocenę kosztów transportu z punktu widzenia dostawcy usług transportowych. Wybór drogi dokonywany jest przez jednego centralnego decydenta zgodnie z kryterium osiągnięcia minimalnych kosztów całkowitych transportu. Koszty krańcowe m przemieszczania potoku ruchu po drogach o numerach p i p' ($p, p' \in P^{ab}$) w relacji (a, b) dla każdego wariantu rozłożenia w sytuacji s -tej $v(s)$ są sobie równe i przyjmują wartość minimalną:

$$f_2(\mathbf{X}(v(s))) = \min_{\{\mathbf{X}(v(s))\}} \{m^{p,ab}(\mathbf{X}(v(s))) = m^{p',ab}(\mathbf{X}(v(s)))\} \quad (2)$$

Globalna funkcja kryterium $F(\mathbf{X}(v(s)))$ składa się z dwóch kryteriów cząstkowych, według których oceniany będzie każdy wariant $\mathbf{X}(v(s))$ rozłożenia potoku ruchu na analizowanym fragmencie sieci transportowej dla każdej sytuacji. Jest ona więc wektorem w postaci:

$$F(\mathbf{X}(v(s))) = \langle f_1(\mathbf{X}(v(s))), f_2(\mathbf{X}(v(s))) \rangle \longrightarrow \min_{\mathbf{X}(v(s))} \quad (3)$$

Każdy wariant rozłożenia potoku ruchu $\mathbf{X}(v(s))$ musi spełniać ograniczenia i warunki nakładane na potok ruchu [8], [14].

4. ROZŁOŻENIE POTOKU RUCHU NA SIEĆ TRANSPORTOWĄ

4.1. Rozłożenie potoku ruchu na sieć transportową – sytuacja pierwsza

Rozłożenie potoku pasażerów na drogi w zadanej sieci przeprowadzono z wykorzystaniem dodatku do pakietu Microsoft Excel – Solver. W sytuacji pierwszej łuki opisane były charakterystykami o interpretacji średniego kosztu przemieszczania. Rozłożenie potoku pasażerów w ciągu Warszawa – Bydgoszcz dla kryterium równych kosztów średnich przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Rozłożenie potoku pasażerów [tys. pas. /rok] w ciągu Warszawa – Bydgoszcz dla kryterium równych kosztów średnich – sytuacja pierwsza

Łuk	Interpretacja	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
(2, 7)	połączenie samochodowe	145	326	480
(3, 8)	połączenie autobusowe	1128	1342	1524
(4, 9)	połączenie lotnicze	236	648	996
(5, 10)	połączenie kolejowe p. Włocławek	755	935	1088
(6, 11)	połączenie kolejowe p. Inowrocław	656	836	----
Wskaźnik oceny jakości rozwiązania		171,27 zł./pas.	197,99 zł./pas.	220,61 zł./pas.

Źródło: opracowanie własne.

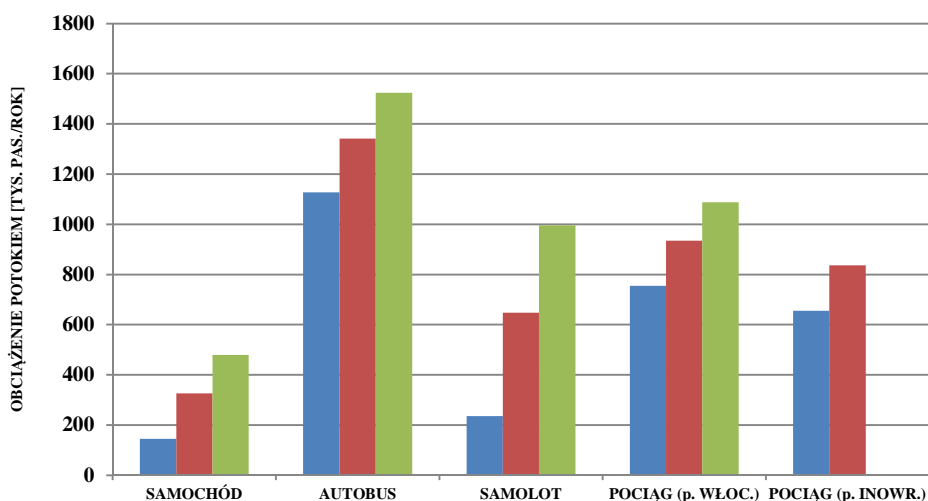
W tabeli 5 przedstawiono rozłożenie potoku pasażerów według kryterium równych kosztów krańcowych.

Tabela 5. Rozłożenie potoku pasażerów [tys. pas. /rok] w ciągu Warszawa – Bydgoszcz dla kryterium równych kosztów krańcowych – sytuacja pierwsza

Łuk	Interpretacja	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
(2, 7)	połączenie samochodowe	454	676	616
(3, 8)	połączenie autobusowe	23	26	1206
(4, 9)	połączenie lotnicze	981	1484	1349
(5, 10)	połączenie kolejowe p. Włocławek	755	976	917
(6, 11)	połączenie kolejowe p. Inowrocław	706	926	----
Wskaźnik oceny jakości rozwiązania		283,39 zł./pas.	348,70 zł./pas.	331,17 zł./pas.

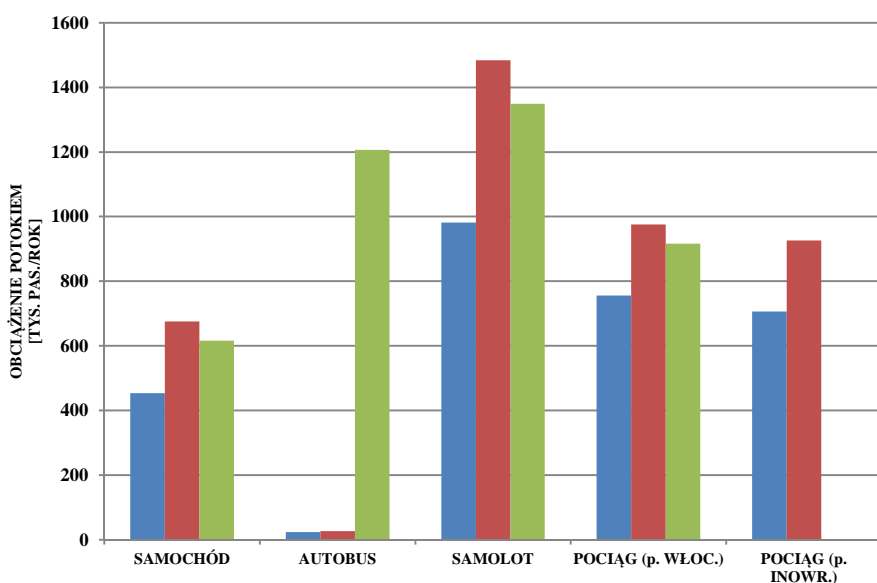
Źródło: opracowanie własne.

Na rys. 2 przedstawiono wykres rozłożenia potoku pasażerów dla kryterium równych kosztów średnich, natomiast na rys. 3 dla kryterium równych kosztów krańcowych. Słupki niebieski symbolizuje wariant pierwszy, słupki czerwony – wariant drugi, a słupki zielony – wariant trzeci.



Rys. 2. Rozłożenie potoku pasażerów dla kryterium równych kosztów średnich – sytuacja pierwsza

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3. Rozłożenie potoku pasażerów dla kryterium równych kosztów krańcowych – sytuacja pierwsza

Źródło: opracowanie własne.

4.2. Rozłożenie potoku ruchu na sieć transportową – sytuacja druga

W sytuacji drugiej łuki opisane były charakterystykami o interpretacji średniego kosztu przemieszczania powiększonego o koszty zewnętrzne związane z przemieszczaniem. Rozłożenie potoku pasażerów w ciągu Warszawa – Bydgoszcz dla kryterium równych kosztów średnich przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Rozłożenie potoku pasażerów [tys. pas. /rok] w ciągu Warszawa – Bydgoszcz dla kryterium równych kosztów średnich – sytuacja druga

Łuk	Interpretacja	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
(2, 7)	połączenie samochodowe	41	223	387
(3, 8)	połączenie autobusowe	1134	1349	1543
(4, 9)	połączenie lotnicze	220	632	1004
(5, 10)	połączenie kolejowe p. Włocławek	812	992	1154
(6, 11)	połączenie kolejowe p. Inowrocław	713	893	----
Wskaźnik oceny jakości rozwiązania		186,28 zł./pas.	213,00 zł./pas.	237,14 zł./pas.

Źródło: opracowanie własne.

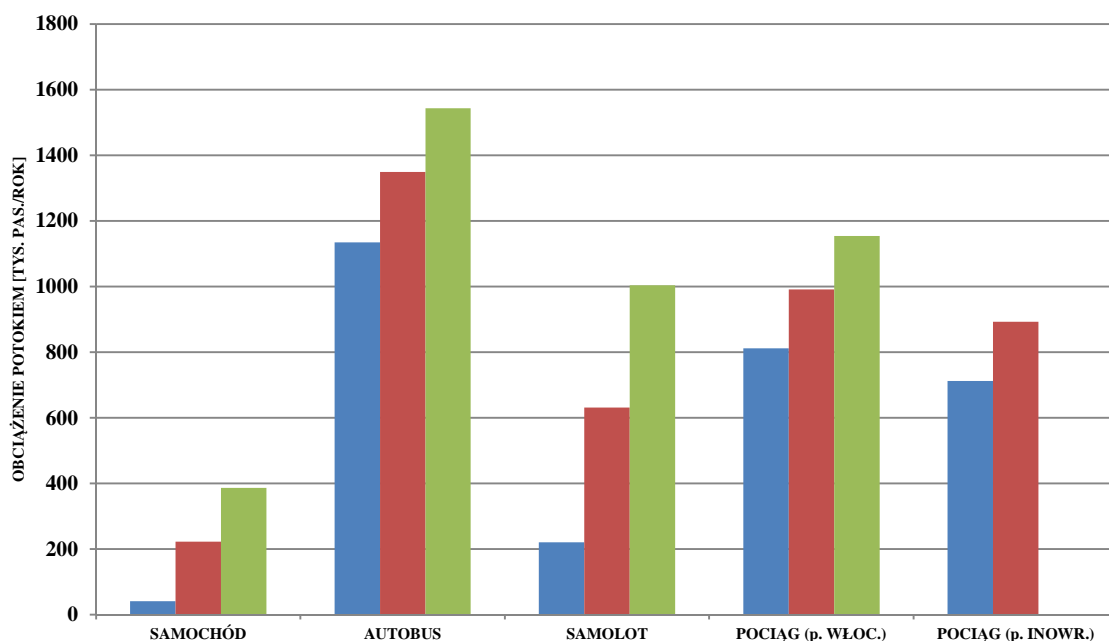
W tabeli 7 przedstawiono rozłożenie potoku pasażerów według kryterium równych kosztów krańcowych.

Tabela 7. Rozłożenie potoku pasażerów [tys. pas. /rok] w ciągu Warszawa – Bydgoszcz dla kryterium równych kosztów krańcowych – sytuacja druga

Łuk	Interpretacja	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
(2, 7)	połączenie samochodowe	248	429	570
(3, 8)	połączenie autobusowe	836	1050	1216
(4, 9)	połączenie lotnicze	624	1036	1353
(5, 10)	połączenie kolejowe p. Włocławek	631	811	950
(6, 11)	połączenie kolejowe p. Inowrocław	581	762	----
Wskaźnik oceny jakości rozwiązania		253,08 zł./pas.	306,51 zł./pas.	347,71 zł./pas.

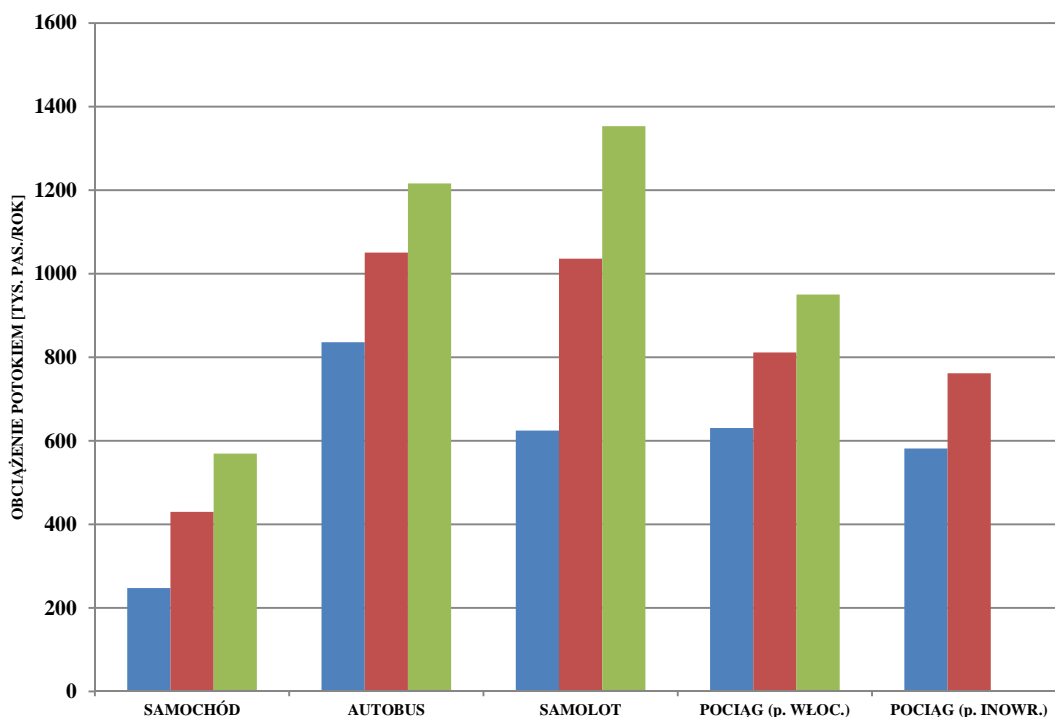
Źródło: opracowanie własne.

Na rys. 4 przedstawiono wykres rozłożenia potoku pasażerów dla kryterium równych kosztów średnich, natomiast na rys. 5 dla kryterium równych kosztów krańcowych. Słupki niebieski symbolizuje wariant pierwszy, słupki czerwony – wariant drugi, a słupki zielony – wariant trzeci.



Rys. 4. Rozłożenie potoku pasażerów dla kryterium równych kosztów średnich – sytuacja druga

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5. Rozłożenie potoku pasażerów dla kryterium równych kosztów krańcowych – sytuacja druga

Źródło: opracowanie własne.

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Analizując rozłożenie potoku pasażerów w ciągu Warszawa – Bydgoszcz dla kryterium równych kosztów średnich, gdy luki były opisane charakterystykami o interpretacji średniego kosztu przemieszczania, można stwierdzić, że najwięcej potoku o wielkości z 2010 roku zostało obsłużone przez autobusy przewoźnika PolskiBus.com. Ich usługi w analizowanym ciągu są najtańsze. Potok ruchu skierowany na połączenia kolejowe osiągnął dość wysoką wartość. Na droższe połączenie kolejowe przez Inowrocław zostało skierowane o 100 tys. pasażerów mniej niż na połączenie tańsze. Najmniej potoku ruchu zostało skierowane na połączenia lotnicze i samochodowe. Prognozowane zwiększenie wielkości potoku ruchu do 2020 roku spowodowało w rozłożeniu potoku ruchu blisko trzykrotny wzrost obciążenia połączenia lotniczego oraz ponad dwukrotne zwiększenie obciążenia na połączeniu samochodowym. Na pozostałych połączeniach odnotowano wzrost obciążenia o około 25%. Likwidacja połączenia kolejowego przez Inowrocław spowodowała przeniesienie potoku do przewiezienia o wielkości około 50% obciążenia w wariantcie 2 na połączenia samochodowe i lotnicze, natomiast na połączenie kolejowe i autobusowe nastąpiło przeniesienie blisko 15% wartości potoku z wariantu 2. Zwiększenie wielkości potoku ruchu do przewiezienia po sieci spowodowało wzrost wskaźnika oceny jakości rozwiązania. Tak samo stało się w przypadku likwidacji połączenia kolejowego.

Z przeprowadzonego z punktu widzenia centralnego planisty rozłożenia potoku ruchu (według kryterium równych kosztów krańcowych) można wywnioskować, że najwięcej potoku ruchu o wielkości z 2010 roku zostało obsłużone przez połączenie lotnicze, następnie uplasowały się połączenia kolejowe. Różnica między tańszym i droższym połączeniem kolejowym w stosunku do rozłożenia według kryterium równych kosztów średnich zmniejszyła się do 50 tys. pasażerów. Najmniej potoku zostało skierowane na połączenie autobusowe. Prognozowane zwiększenie wielkości potoku ruchu do 2020 roku spowodowało w rozłożeniu potoku dla wariantu drugiego wzrost obciążenia o około 50% na połączeniu samochodowym oraz lotniczym. Na połączeniach kolejowych odnotowano wzrost o około 30%, natomiast na połączeniu autobusowym tylko o około 12%. Likwidacja połączenia kolejowego przez Inowrocław spowodowała przeniesienie potoku do przewiezienia przez połączenie autobusowe o wielkości prawie 46 razy większej od sytuacji z wariantu 2. Na pozostałych połączeniach nastąpił spadek wielkości przewozu o około 10%

w stosunku do wariantu 2. Zwiększenie wielkości potoku ruchu do przewiezienia po sieci spowodowało wzrost wskaźnika oceny jakości rozwiązania. W przypadku likwidacji połączenia kolejowego, przy tej samej wielkości potoku do przewiezienia, nastąpiła poprawa jego wartości.

Analizując rozłożenie potoku pasażerów w ciągu Warszawa – Bydgoszcz dla kryterium równych kosztów średnich, gdy luki były opisane charakterystykami o interpretacji średniego kosztu przemieszczania powiększonego o wartość kosztów zewnętrznych, można stwierdzić, że najwięcej potoku o wielkości z 2010 roku zostało obsłużone przez autobusy przewoźnika PolskiBus.com. Najmniej potoku ruchu zostało skierowane na połączenie samochodowe. Prognozowane zwiększenie wielkości potoku ruchu do 2020 roku spowodowało w rozłożeniu dla wariantu drugiego ponad pięciokrotny wzrost obciążenia na połączeniu samochodowym oraz blisko trzykrotny na połączeniu lotniczym. Na pozostałych połączeniach zanotowany został wzrost potoku o około 20%. Likwidacja połączenia kolejowego przez Inowrocław spowodowała przeniesienie potoku na połączenie samochodowe (wzrost o około 75% w stosunku do wariantu 2) oraz na połączenie lotnicze (wzrost o około 50% w stosunku do wariantu 2). Na połączeniu kolejowym oraz autobusowym zanotowano wzrost o około 15% w stosunku do wariantu 2. Zwiększenie wielkości potoku ruchu do przewiezienia po sieci spowodowało wzrost wskaźnika oceny jakości rozwiązania. Tak samo stało się w przypadku likwidacji połączenia kolejowego.

Z przeprowadzonego z punktu widzenia centralnego planisty rozłożenia potoku ruchu (według kryterium równych kosztów krańcowych) z uwzględnieniem kosztów zewnętrznych można wywnioskować, że najwięcej potoku ruchu o wielkości z 2010 roku zostało obsłużone przez połączenie autobusowe, następnie uplasowały się połączenia kolejowe przez Włocławek i lotnicze (zbliżone wartości potoku ruchu). Najmniej potoku przydzielono na połączenie samochodowe. Prognozowane zwiększenie potoku ruchu do 2020 roku w rozłożeniu potoku ruchu dla wariantu 2 spowodowało wzrost obciążenia o blisko 70% na połączeniu samochodowym oraz lotniczym. Na pozostałych połączeniach odnotowano wzrost o około 30%. Zwiększenie wielkości potoku ruchu do przewiezienia po sieci spowodowało wzrost wskaźnika oceny jakości rozwiązania. Tak samo stało się w przypadku likwidacji połączenia kolejowego.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wpływ transportu na środowisko jest destrukcyjny. Jego wielkość można wyrazić przy pomocy kosztów zewnętrznych czyli kosztów wypadków, zanieczyszczenia powietrza, zmian klimatu, zatorów komunikacyjnych i niedoborów terenu oraz hałasu. Należy dążyć do tego by zminimalizować ich wielkość. Jednym z działań może być przeniesienie potoku ruchu z gałęzi transportu cechujących się większymi kosztami zewnętrznymi na gałęzie cechujące się niższymi. W artykule zbadano wpływ kosztów zewnętrznych na rozłożenie potoku pasażerów w ciągu komunikacyjnym Warszawa – Bydgoszcz.

Dla rozłożenia potoku ruchu według kryterium równych kosztów średnich uwzględnienie w charakterystykach luków kosztów zewnętrznych spowodowało znaczący spadek udziału połączenia samochodowego w obsłudze potoku pasażerów. Dla pozostałych połączeń zanotowano nieznaczny spadek lub nieznaczny wzrost obciążenia. Dla rozłożenia potoku ruchu z punktu widzenia centralnego planisty w wariantach 1 i 2 uwzględnienie kosztów zewnętrznych spowodowało bardzo duży wzrost obciążenia połączenia autobusowego i spadek obciążenia na pozostałych połączeniach (w największym stopniu na połączeniu samochodowym). W wariantach uwzględniającym likwidację połączenia kolejowego przez Inowrocław (wariant 3) nie widać różnic pomiędzy rozłożeniem uwzględniającym i nieuwzględniającym w charakterystykach luków koszty zewnętrzne.

Dla rozłożenia według kryterium równych kosztów średnich, zarówno gdy uwzględniano koszty zewnętrzne jak i gdy ich nie uwzględniano, najwięcej potoku ruchu zostało skierowane na połączenie autobusowe (najtańsze), zaś najmniej na połączenie samochodowe (najdroższe). Zatem w rozłożeniu z punktu widzenia każdego użytkownika najwięcej potoku obciąża połączenie najtańsze. W rozłożeniu z punktu widzenia centralnego planisty najwięcej potoku ruchu bez uwzględnienia kosztów zewnętrznych skierowano na połączenie lotnicze, natomiast najmniej na połączenie autobusowe, a z uwzględnieniem najwięcej na lotnicze, a najmniej na samochodowe.

W sytuacji gdy łuki były opisane charakterystykami o interpretacji średniego kosztu przemieszczania w rozłożeniu z punktu widzenia każdego użytkownika (według kryterium równych kosztów średnich) wzrost wielkości potoku ruchu do przewiezienia po sieci najmocniej został odnotowany na połączeniu samochodowym i lotniczym. Taki sam wniosek można wysnuć w przypadku likwidacji połączenia kolejowego przez Inowrocław (porównując wariant 2 i 3). Dla rozłożenia z punktu widzenia centralnego planisty (według kryterium równych kosztów krańcowych) zwiększenie wielkości potoku ruchu do przewiezienia także najmocniej zostało odnotowane na połączeniu samochodowym i lotniczym. W przypadku likwidacji połączenia najwięcej potoku zostało skierowane na połączenie autobusowe, a z pozostałych zabrano około 10% wartości potoku z wariantu 2.

Praca naukowa zrealizowana w ramach projektu badawczego pt. „Kształtowanie proekologicznego systemu transportowego” (EMITRANSYS) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Streszczenie

Transport oddziałuje destrukcyjnie na środowisko naturalne. Jego negatywny wpływ można wyrazić przy pomocy kosztów zewnętrznych. Jedne gałęzie transportu oddziałują w większym stopniu (większa wartość kosztów zewnętrznych), inne w mniejszym. Należy dążyć do ograniczenia wielkości kosztów zewnętrznych związanych z działalnością transportu. Jednym z działań może być przeniesienie potoku ruchu z gałęzi transportu cechujących się większymi kosztami zewnętrznymi na inne. W artykule przeanalizowano wpływ kosztów zewnętrznych na rozłożenie potoku pasażerów w ciągu komunikacyjnym Warszawa – Bydgoszcz. Jako wskaźniki oceny jakości rozłożenia potoku na sieć przyjęto koszty średnie oraz koszty krańcowe. Rozłożenie przeprowadzono dla dwóch sytuacji. W pierwszej poszczególne połączenia były opisane charakterystykami o interpretacji średniego kosztu przemieszczania, w drugiej jako suma średnich kosztów przemieszczania i kosztów zewnętrznych. Przeanalizowano trzy warianty różniące się wielkością potoku pasażerów oraz wyposażeniem.

Słowa kluczowe: EMITRANSYS, rozłożenie potoku ruchu, koszty zewnętrzne.

Variant solution of traffic flow distribution in the specified network taking into account the external costs

Abstract

Transport impacts destructive on the environment. Its negative impact can be expressed with the help of external costs. Some modes of transport affect in a greater extent (higher value of external costs), others less. The aim should be to reduce the size of the external costs of transport activities. One of the activities may be transfer of traffic flow from branches of transport characterized by higher external costs on others. In the article was analyzed the impact of external costs for the distribution of passengers flow in the transport connection Warsaw - Bydgoszcz. As indicators of the solution quality assessment of the distribution of the flow on the network assumed average costs and marginal costs. The distribution was carried out for the two situations. In the first individual connections were described by characteristics of the interpretation of the average cost of transport and the second as the sum of the average cost of transport and external costs. We analyzed three variants with varying volume of passengers flow and equipment.

Key words: EMITRANSYS, traffic flow distribution, external costs.

LITERATURA

- [1] Ambroziak, T., Gołębiowski, P., Pyza, D., Jacyna-Gołda, I., Merkisz-Guranowska, A.: Identification and Analysis of Parameters for the Areas of the Highest Harmful Exhaust Emissions in the Model EMITRANSYS. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2013, cz. 20, nr 3, str. 9-20.
- [2] Ambroziak, T., Jacyna, M., Gołębiowski, P., Wasiak, M., Żak, J.: Wpływ rozłożenia potoku ruchu w sieci transportowej na poziom emisji CO₂ przez środki transportu. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, 2013, z. 97, str. 9-18.
- [3] Burton, I.: Report on Reports: Our Common Future: The World Commission on Environment and Development. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 1987, cz. 29 nr 5, str. 25-29.
- [4] Coase, R.: The Problem of Social Cost. *Journal of Law and Economics*, 1960, nr 3, s. 1-14.
- [5] Danklefsen N. (red): Obliczanie kosztów zewnętrznych w sektorze transportu, Parlament Europejski, Bruksela, 2009.

- [6] Graczyk, A.: Ekologiczne efekty zewnętrzne. Identyfikacja, szacowanie, internalizacja. Wyd. Ekonomia i Środowisko, Białystok 2005.
- [7] Jachimowski R., Kłodawski M., Lewczuk K., Szczepański E., Wasiak M.: Implementation of the model of proecological transport system. Journal of KONES, 2013, cz. 20, nr 4, str. 129-139.
- [8] Jacyna M.: Modelowanie i ocena systemów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2009.
- [9] Jacyna M.: Some aspects of multicriteria evaluation of traffic flow distribution in a multimodal transport corridor. Archives of Transport 1999, cz.10 nr1-2, str. 37-52.
- [10] Jacyna M., Kakietek S., Przygocki M.: Wielokryterialne modelowanie rozłożenia potoku ruchu w multimodalnym korytarzu transportowym. Cz. II – ocena dostosowania infrastruktury do zadań. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Seria Transport. Zeszyt 52, Warszawa 2004.
- [11] Jacyna M., Żak J., Jacyna-Gołda I., Merkiś J., Merkiś-Guranowska A., Pielecha J.: Selected aspects of the model of proecological transport system. Journal of KONES, 2013, cz. 20, nr 4, str. 193-202.
- [12] Komisja Europejska: Biała Księga. Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu [on-line].
- [13] Komisja Wspólnot Europejskich: Zielona Księga. W kierunku nowej kultury mobilności w mieście [on-line].
- [14] Leszczyński J. Modelowanie systemów i procesów transportowych, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.
- [15] Maibach, M. i in.: Handbook on estimation of external costs in the transport sector. CE Delft Solutions for environment, economy and technology, 2008. Dostępny on-line: www.ce.nl.
- [16] Ministerstwo Infrastruktury: Polityka Transportowa Państwa na lata 2006 – 2025, [online], [dostęp 16 czerwca 2013 r.], dostępny w Internecie: <http://cms.transport.gov.pl>
- [17] Ortuzar, J., Willumsen L.: Modelling transport. Wiley, 1994.
- [18] Poliński, J.: Identyfikacja, estymacja i internalizacja kosztów zewnętrznych transportu. Problemy Kolejnictwa, 2012, z. 156, str. 33-67.
- [19] Pigou, A.C.: Economics of Welfare. Macmillan Company, London 1952.
- [20] United Nations: Report of the World Commission on Environment and Development [on-line].
- [21] Wu C., Lei H., Yan X., Zhou F.: Data Mining for Bibliometric Analysis of Traffic Flow. Proceedings of Conference on Web Mining and Web-based Application WMWA '09 2009, str. 28-31.
- [22] Żylicz, T.: Ekonomia środowiska i zasobów naturalnych, PWN, Warszawa 2004.