

Dr inż. Andrzej Żurkowski
Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa

MODELOWANIE PRZEWOZÓW MIĘDZYAGLOMERACYJNYCH

SPIS TREŚCI

1. Wstęp
2. Systematyka kolejowych przewozów pasażerskich
3. Cele i rozwój metod modelowania przewozów
4. Klasyczny czteroetapowy model transportowy
5. Modelowanie przewozów międzyaglomeracyjnych
6. Zakończenie

STRESZCZENIE

Modelowanie przewozów stanowi stosunkowo mało popularną w Polsce dziedzinę zarówno w zakresie metod teoretycznych, jak i ich praktycznego zastosowania. Świadczy o tym chociażby skromna lista publikacji w języku polskim. Tymczasem przygotowywane projekty inwestycji transportowych, dotyczące zarówno istniejącej jak i nowej infrastruktury, wymagają dysponowania możliwie precyzyjnymi informacjami na temat spodziewanych wielkości zadań przewozowych stojących przed poszczególnymi środkami transportu. W artykule opisano podstawowe metody modelowania stosowane w tym zakresie, koncentrując się szczególnie na zagadnieniach przewozów pasażerskich pomiędzy dwiema aglomeracjami, a zatem w wybranym korytarzu transportowym.

1. WSTĘP

Transport jest częścią naszej rzeczywistości. Trudno jest wyobrazić sobie funkcjonowanie nowoczesnego państwa, regionu czy miasta bez przemieszczania się osób oraz przewożenia ładunków. Społeczne oczekiwania wobec środków transportu, zwłaszcza publicznego, obejmują obecnie jego możliwie szeroką dostępność, niezawodność, bezpieczeństwo (osobiste i komunikacyjne), terminowość i szybkość przewozu, a wszystko to w warunkach możliwie komfortowych i za przystępną cenę. Jakby

na przekór staraniom profesjonalnych przewoźników, w tym głównie kolei, oczekiwania te w znacznej mierze wypełnia dzisiaj motoryzacja indywidualna. Wobec oczywistych zalet transportu publicznego powstaje zatem pytanie, w jaki sposób należy kształtować ofertę przewozową, aby zachęcić klientów do korzystania z jego usług.

Powyższe zagadnienie najwygodniej jest rozpatrzyć na gruncie modelowania przewozów, które wykorzystuje narzędzia zarówno z zakresu badań operacyjnych, jak i w szczególności ekonometrycznych. Modelowanie takie jest narzędziem, a właściwie całą klasą narzędzi, powszechnie stosowanych od lat w wielu krajach, wspomagających procesy planowania transportu. Dotyczy to także Polski, ale z ważnym zastrzeżeniem, że znajomość zagadnień teoretycznych i możliwości ich wykorzystania do zagadnień praktycznych jest jednak zdecydowanie niewystarczająca. Potwierdza to chociażby skromna lista polskich publikacji w tym zakresie. Aby zatem przybliżyć w artykule te zagadnienia w sposób uporządkowany, po przedstawieniu systematyki przewozów pasażerskich skrótkowo opisano rozwój oraz obecny stan metod modelowania przewozów.

2. SYSTEMATYKA KOLEJOWYCH PRZEWOZÓW PASAŻERSKICH

Klasyfikacja systemów transportowych według kryterium przedmiotu transportu wyróżnia dwa rodzaje systemów: pasażerski i towarowy [6]. Opracowana w latach 1970–1985 i stale aktualna tzw. systemowa organizacja przewozów pasażerskich (tabl. 1) dzieli je na cztery podsystemy¹:

- międzyaglomeracyjne (tzw. kwalifikowane),
- międzyregionalne,
- aglomeracyjne,
- regionalne.

Podstawowym kryterium tej klasyfikacji jest tzw. geograficzna dostępność pociągów, a zatem określenie wielkości i rodzajów ośrodków sieci osadniczej, obsługiwanych poszczególnymi kategoriami pociągów. Dostępność połączeń międzyaglomeracyjnych jest zatem ograniczona do aglomeracji i największych miast, natomiast pociągi międzyregionalne zatrzymują się także w mniejszych ośrodkach. Połączenia aglomeracyjne i regionalne obsługują wszystkie stacje i przystanki, a zatem dostępność pociągów jest pełna.

Istnieją zasadniczo dwa wyjątki dotyczące reguły dostępności w ramach przedstawionej klasyfikacji. Pociągi międzyaglomeracyjne obsługują także przewozy sezonowe do wielu miejscowości wypoczynkowych w górach czy nad morzem, które z punktu

1. Definicje „regionalne przewozy pasażerskie”, „pasażerskie przewozy kwalifikowane” itp. zawiera ustawa o transporcie kolejowym z dnia 28 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 86 poz. 789); zapisy te nie są dostatecznie precyzyjne, tworzone były na potrzeby prawno-ekonomiczne i nie mogą stanowić podstawy do zadowalającego opisu systemu przewozów pasażerskich.

widzenia statystyki liczą relatywnie niewielu stałych mieszkańców. Z kolei w przewozach aglomeracyjnych stosowana jest niekiedy tzw. obsługa strefowa, co oznacza, że część pociągów nie zatrzymuje się na wybranych stacjach i przystankach, dzięki czemu skraca się czas przejazdu pociągów i przyspiesza dojazd do centrum miasta z dalej położonych miejscowości.

Tablica 1

Systematyka przewozów pasażerskich [11]

Przewozy	Podsystem	Dostępność	Spółka	Produkty
Dalekobieżne	Międzyaglomeracyjne	Tylko stacje w aglomeracjach i w największych miastach oraz w miejscowościach wypoczynkowych	PKP Intercity S.A.	EuroCity, InterCity, Express, EuroNight
	Międzyregionalne	Stacje w aglomeracjach, dużych miastach oraz w miejscowościach wypoczynkowych	PKP Intercity S.A.	Pospieszne, Tanie Linie Kolejowe
			PKP Przewozy Regionalne sp. z o.o.	Pospieszne
			Koleje Mazowieckie Sp. z o.o.	InterRegio
Lokalne	Agglomeracyjne	Pełna – wszystkie stacje i przystanki (oprócz obsługi strefowej)	PKP Przewozy Regionalne Sp. z o.o.	tzw. „pociągi osobowe”
			Koleje Mazowieckie Sp. z o.o.	
			WKD Sp. z o.o.	
			SKM Warszawa Sp. z o.o.	
			PKP Przewozy Regionalne Sp. z o.o.	
	Regionalne	Pełna – wszystkie stacje i przystanki	PKP Przewozy Regionalne Sp. z o.o.	
			Koleje Mazowieckie Sp. z o.o.	
			PCC Arriva	

Funkcje realizowane przez poszczególne podsystemy wzajemnie się uzupełniają, co dzięki skomunikowaniu i przesiadkom na stacjach węzłowych umożliwia realizację przejazdów pomiędzy wszystkimi stacjami i przystankami na sieci kolejowej oraz w połączeniach międzynarodowych. Należy przy tym zwrócić uwagę, że z punktu widzenia powyższej klasyfikacji nie ma znaczenia, czy pociąg jest prowadzony w ruchu krajowym, czy międzynarodowym. Oba rodzaje połączeń mogą bowiem pojawić się w każdym z podsystemów, nawet w przewozach aglomeracyjnych. Podobnie zaliczenie pociągu do danego podsystemu nie ma związku z długością jego relacji.

Z każdym z wymienionych podsystemów związane są określone produkty, czyli rodzaje usług oferowane nabywcom usług (podróżnym). Szczegółowe zestawienie zawarto w tabeli 1. Należy podkreślić, że o ile sama struktura systemowej organizacji przewozów pozostaje niezmienna od wielu lat, to rodzaje, nazwy i charakter poszczególnych ofert ulegają zmianom. Dzieje się tak zwłaszcza obecnie, czyli w dobie liberalizacji na rynku usług transportowych i konkurowania ze sobą różnych przewoźników. Opisana struktura oferty kolei (strona podaży) wynika z typowej dla przewozów pasażerskich zależności, jaka istnieje pomiędzy wielkością ośrodka układu osadniczego i generowanymi potokami (strona popytu). Modelowanie przewozów (transportu²) dostarcza narzędzi umożliwiających objaśnianie tych związków, a także prognozowanie wielkości przewozów w przyszłości, określanie podziału modalnego itp.

Jakkolwiek pasażerskie przewozy kolejowe dzieli się na cztery podsystemy, to metody ich modelowania można podzielić na dwa rodzaje: modelowanie przewozów w obrębie aglomeracji oraz pomiędzy nimi. Pomimo wielu podobieństw, także w zakresie stosowanych narzędzi – modeli matematycznych, podejście do obu zagadnień jest nieco odmienne, co wynika z innego charakteru układu osadniczego. W wypadku aglomeracji, obszarami odniesienia stają się (wyznaczone zazwyczaj arbitralnie, chociaż w oparciu o racjonalne przesłanki) strefy w miastach. W modelowaniu przewozów pomiędzy miastami uznaje się umownie, że potoki przemieszczają się pomiędzy ich centrami³.

Szczególnym przypadkiem modelowania przewozów pomiędzy największymi aglomeracjami są zagadnienia związane z tzw. korytarzami transportowymi. To umowne pojęcie oznacza zbiór wszystkich możliwych tras przemieszczania się potoków różnymi środkami transportu (np. kolej, samolot, autobus, motoryzacja indywidualna) pomiędzy dwoma rozpatrywanymi miejscami na sieci transportowej. Jest to zatem sytuacja typowa dla nowoczesnych, rozwiniętych systemów transportowych i będzie przedmiotem szczegółowych rozważań w rozdziale 4.

2. Stosowane w Polsce słownictwo „modelowanie przewozów”, „systemów transportowych”, „sieci (lub układów) transportowych” itp. odnosi się do wielu zagadnień szczegółowych; w piśmiennictwie międzynarodowym używane jest powszechnie „modelowanie transportu” (ang. *transport modelling*, franc. *la modélisation de transport*), szczególnie w zakresie modeli ekonometrycznych.

3. W dalszej części artykułu będzie stosowane nazewnictwo: „modele aglomeracyjne” oraz „międzymiastowe”, które mogą być użyteczne zarówno w przewozach międzyaglomeracyjnych jak i międzyregionalnych, a zatem także pomiędzy mniejszymi miastami lub regionami.

3. CELE I ROZWÓJ METOD MODELOWANIA PRZEWOZÓW

Metody modelowania przewozów pasażerskich są przedmiotem zainteresowania głównie trzech następujących dyscyplin naukowych:

- **geografii** [10] badającej związku jakie istnieją (lub zaistniały historycznie) pomiędzy rozmieszczeniem układu osadniczego, rzeźbą terenu, aktywnością społeczno-gospodarczą a funkcjonującymi lub planowanymi szlakami komunikacyjnymi⁴,
- **transportu** (z dziedziny nauk technicznych) [5], odwzorowującego sieci transportowe zazwyczaj w postaci grafu i badającego rozłożenie potoku ruchu (z uwzględnieniem ograniczeń technicznych) z różnymi funkcjami kryterium celu, głównie z wykorzystaniem metod badań operacyjnych,
- **ekonomii** [4], zajmującej się w szczególności badaniem wielkości i zmian potoków pasażerskich w zależności od czynników społeczno-gospodarczych oraz stosującej przede wszystkim narzędzia ekonometryczne.

Podejście prezentowane w dalszej części artykułu opiera się zasadniczo na modelach ekonometrycznych, ale uwzględnia także narzędzia wykorzystywane w modelowaniu systemów transportowych w ujęciu technicznym. Przed przystąpieniem do opisu zagadnienia modelowania przewozów międzyaglomeracyjnych przedstawiono zarys historycznego rozwoju metod modelowania.

Początki modelowania przewozów pasażerskich sięgają końca XIX wieku [7]. Opracowano wówczas pierwsze modele grawitacyjne, które stosowano do szacowania potencjalnej wielkości przewozów międzymiastowych. Przygotowywane następnie prognozy opierały się na metodzie wykorzystania czynników wzrostu, a zatem wielkość przyszłych przewozów ustalano mnożąc przewozy obecne przez odpowiednie współczynniki (co zakłada stałe tempo wzrostu – liniowa funkcja trendu [14]). Takie podejście budziło oczywiste zastrzeżenia metodologiczne, zwłaszcza dotyczące dokładności prognoz w przypadku niewielkich przewozów początkowych lub braku sytuacji odniesienia, czyli w stosunku do infrastruktury, która miała dopiero powstać.

Znacznie krótszą historię mają natomiast modele odwzorowujące przewozy wewnątrz aglomeracji. Pierwsze z nich opracowano na początku lat pięćdziesiątych XX w. w Stanach Zjednoczonych [4] w związku z rozwijającą się w szybkim tempie motoryzacją indywidualną. Były to dwa pionierskie projekty: *Detroit Area Transportation Study* (DATS) oraz *Chicago Area Transportation Study* (CATS). Te projekty były skoncentrowane na określeniu wielkości generowanych przewozów. Teoria dotycząca zapotrzebowania na przewozy powstała jako ich uzupełnienie w 1962 roku dzięki pracom Stana Warnera. Wykorzystując dane z projektu CATS, konstruował on modele wyjaśniające wybór środka transportu przez mieszkańców w przejazdach aglomeracyjnych, korzystając

4. Pionierem prac w tym zakresie był m.in. prof. Zbigniew Wasiutyński (1902 – 1974), który opublikował dwie fundamentalne monografie: *O kształtowaniu układów komunikacyjnych*, Warszawa, PWN, 1959 oraz *Optymalizacja układów komunikacyjnych*, Wrocław, Wydaw. Ossolińskich, 1976. Sformułował w nich wiele postulatów kształtowania układów komunikacyjnych. Uzasadniał tezę, że poszukiwanie rozwiązań tych zagadnień ma postać problemu izoperymetrycznego (rachunek wariacyjny).

przy tym z odniesień do biologii i psychologii. W ten sposób wyłoniły się rozproszone modele zapotrzebowania. Wynikały one z obserwacji zachowań jednostkowych, które następnie były agregowane, po części z wykorzystaniem koncepcji behawioralnych organizacji, wywodzących się z ekonomii oraz z psychologii.

Na początku lat siedemdziesiątych XX wieku grupa naukowców z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley rozpoczęła realizację projektu *Urban Travel Demand Forecasting Project* (Prognozowanie zapotrzebowania na przejazdy w aglomeracji), związanego z budowanym właśnie od podstaw systemem szybkiej kolei BART (*Bay Area Rapid Transit*) w San Francisco. Pracami tej grupy kierował profesor ekonomii Daniel McFadden, nie mający wówczas większych doświadczeń w zagadnieniach transportowych. Ambicją i celem zespołu było sporządzenie prognozy przewozów dla całkowicie nowego środka transportu. Prognozowany *modal split* dla BART okazał się zaledwie o 0,1% różny od rzeczywistości. Przy okazji tych prac, wychodząc od zbudowanych przez siebie modeli zapotrzebowania na przewozy, McFadden sformułował podstawy teorii obejmującej obecnie analizę wyborów dyskretnych oraz teorię losowej maksymalizacji użyteczności. Znalazła ona zastosowanie w wielu zagadnieniach ekonomicznych, także nie związanych bezpośrednio z transportem, a jej twórca otrzymał w 2000 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie ekonomii. Z kolei w Massachusetts Institute of Technology, w wyniku badań prowadzonych przez zespół pod kierunkiem Moshe Ben-Akiva opracowano wiele modeli wyboru, które były przedmiotem wielu prac i zastosowań.

W połowie lat siedemdziesiątych nastąpił intensywny rozwój narzędzi modelowania, w szczególności za sprawą największych centrów badawczych. Wiele stosunkowo małych grup badawczych przygotowało i wdrożyło dużo interesujących rozwiązań. Rozwiązania te opisano w wielu branżowych publikacjach, nie uzyskując jednak szerszego rozgłosu. Po tych eksperymentalnych latach można obecnie mówić o znacznie szerszym wykorzystywaniu modelowania wspomagającego planowanie transportu.

Transfer problematyki modelowania przewozów pasażerskich do Europy nastąpił na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych XX wieku [2], przy czym rozwój narzędzi modelowania następował w nieco odmiennych kierunkach. W szczególności dotyczy to znacznie szerszego niż w krajach anglosaskich zastosowania modelu cena – czas. W tamtych latach modele przewidywania zapotrzebowania na przewozy znajdowały zastosowanie w szczególności do projektowania nowej infrastruktury transportowej, planowania jej pojemności itp. Obecnie w krajach Europy Zachodniej modelowanie wykorzystywane jest raczej w procesach planowania przewozów, realizacji polityki transportowej itp.

Ewolucja zastosowań modeli transportowych w oczywisty sposób skutkuje zmianami rodzajów opracowywanych narzędzi. W ujęciu syntetycznym można stwierdzić, że z dwu głównych – wymienionych wcześniej obszarów zastosowania modelowania przewozów, zdecydowanie dominują obecnie modele aglomeracyjne przygotowywane na użytek planowania urbanistycznego. Modelowanie przewozów pomiędzy miastami (bądź regionami) stosowane jest rzadziej, co wynika zapewne z faktu, że infrastruktura służąca tym przewozom jest w rozwiniętych krajach europejskich w znacz-

nej mierze dostateczna. Zagadnienia planowania wielkości przewozów pomiędzy miastami pojawiają się zatem głównie jako towarzyszące nowym projektom, takim jak budowa nowych dróg, autostrad, linii kolejowych itp. Obecnie modelowanie transportu jest uznawane jako element planowania transportowego [3] i nie może być traktowane jako jego alternatywa. Modelowanie pozostaje zatem jedynie wspomaganie planowania, chociaż w pewnych wypadkach może grać ważną rolę w tym procesie. Implementacja planów transportowych prowadzi do doskonalenia systemów transportu, natomiast zadaniem modelowania jest towarzyszenie podejmowanym decyzjom i wspieranie ich efektywności. Rozwój technologii komputerowej, jaki nastąpił w ostatnich latach XX wieku praktycznie wyeliminował istotny wcześniej, problem ograniczonych możliwości obliczeniowych przy budowaniu, a zwłaszcza testowaniu modeli transportowych. Obecnie głównymi ograniczeniami są czynniki ludzkie: współczesne planowanie transportu wymaga zręczności i profesjonalizmu, a zaawansowane modele teoretyczne – kompetentnych implementacji oraz umiejętności posługiwania się oprogramowaniem.

Podsumowując powyższy, z konieczności skrótowy przegląd historycznego rozwoju metod modelowania transportowego, warto wspomnieć o stowarzyszeniu IATBR – *The International Association for Travel Behaviour Research* (Międzynarodowe Stowarzyszenie Badania Zachowań Transportowych), które od swojego utworzenia w 1970 roku zajmuje się gromadzeniem dorobku w zakresie modelowania. Jego misją jest także organizowanie wymiany informacji w międzynarodowym gremium teoretyków i praktyków przedmiotu. Stowarzyszenie organizuje światowe konferencje w cyklu co 3 lata oraz coroczne spotkania w Waszyngtonie (*Transportation Research Board*) i w Europie (*European Transport Conference*). Stowarzyszenie liczy obecnie 143 osoby reprezentujące uniwersytety i firmy konsultingowe.

4. KLASYCZNY CZTEROETAPOWY MODEL TRANSPORTOWY

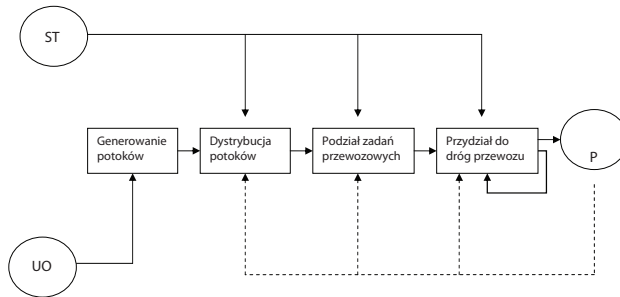
Wieloletnie doświadczenia badawcze związane z konstruowaniem, weryfikacją i zastosowaniem modeli transportowych doprowadziły w latach sześćdziesiątych XX wieku do sformułowania zasadniczej struktury, tzw. klasycznego modelu transportowego [2, 4, 8], obejmującego cztery podstawowe kroki (etapy) (ang. *classic four step transport model*, fr. *modèle à quatre étapes*):

- generowanie potoków (ang. *trip generation*, franc. *génération de la demande*), określające częstość podróżowania na podstawie danych demograficznych oraz socjo-ekonomicznych,
- dystrybucję potoków (ang. *trip distribution*, franc. *distribution des déplacements*), kojarzącą (zestawiającą) początki (źródła) i końce (ujścia) tych potoków, np. w postaci macierzy, z ewentualnym wykorzystaniem np. modelu grawitacyjnego,
- podział zadań przewozowych pomiędzy gałęzie (lub środki) transportu (ang. *modal split*, *mode choice*, franc. *répartition modale*), polegający na modelowaniu wyboru

środka transportu, a zatem prowadzący do powstania macierzy źródło-ujście dla każdego ze środków transportu,

- przydział do dróg przewozu (ang. *route assignment*, franc. *affectation des déplacements*), sprowadzający się do ustalenia tras przemieszczania poszczególnych części potoku rozdzielonych uprzednio na określone gałęzie transportu.

W takim ujęciu pełny model transportowy jest zatem sekwencją czterech sub-modeli nazywanych dalej modułami (rys. 1). Według obecnych poglądów model ten stanowi zasadniczy kanon postępowania przy modelowaniu przewozów, a jednocześnie dogodny kontrapunkt do opracowywania szeregu metod alternatywnych, polegających na przykład na budowaniu wspólnych modeli dla kilku kroków postępowania (tabl. 2). Wykorzystywany jest przede wszystkim do modelowania przewozów wewnątrz aglomeracji, ale może być także wykorzystywany w przewozach pomiędzy miastami, w tym głównie międzyaglomeracyjnymi. Dalej zostaną syntetycznie opisane cztery moduły klasycznej procedury planowania transportowego.



Rys. 1. Klasyczny czteretapeowy model transportowy [4]: ST – System Transportowy (układ połączeń), UO – Układ osadniczy, P – Potoki [Linie przerywane oznaczają ewentualny powrót do poprzednich kroków. Linia pogrubiona oznacza poszukiwanie stanu równowagi]

Tablica 2

Systematyka modelowania transportowego [4]

Moduł	Modele sekwencyjne	Modele syntetyczne	
I	Generowanie	II + III (modele złożone)	I + II + III (modele bezpośrednie)
II	Dystrybucja		
III	Podział modalny		
IV	Przydział	Modele organizowania ruchu	

MODUŁ I

Generowanie potoków

Celem tego modułu jest określenie liczby przemieszczeń przypadających na mieszkańców rozpatrywanych stref miejskich [2]. W tym celu cały rozpatrywany obszar zur-

banizowany – na podstawie wybranych kryteriów – zostaje podzielony na Z określonych stref z_k , ($k= 1, \dots, Z$), nawiązujących zazwyczaj do podziałów administracyjnych. W wypadku największych aglomeracji, liczba Z może dojść nawet do kilkuset. Następnie zadanie sprowadza się do określenia:

- liczby przemieszczeń O_k generowanych w każdej strefie z_k ,
- liczby przemieszczeń D_k które trafią do każdej z tych stref.

Powyższe zadanie jest zatem równoważne zagadnieniu badania tzw. „częstości podróży”, które polega na określeniu spodziewanej liczby podróży, które przeciętny mieszkaniec podejmie w określonym czasie. Czynniki mającymi zasadniczy wpływ na wielkość generowanych przewozów są przede wszystkim dochody ludności, struktura społeczna, model rodziny i wiele innych elementów. Znaczenie ma także struktura zabudowy, a w szczególności proporcje powierzchni przeznaczonych na działalność gospodarczą, budynki mieszkalne, sklepy, ośrodki kultury, urzędy itp. Ze strukturą zabudowy jest ściśle powiązana struktura zatrudnienia, a zatem zarówno ogólna liczba pracowników (uczniów, studentów), jak i charakter ich zajęć, rozłożenie w czasie itp. Najprostszym sposobem prognozowania wielkości generowanych potoków (przy poczynionym już uprzednio zastrzeżeniu dotyczącym stałego tempa wzrostu) jest wykorzystanie modelu liniowego postaci [4]:

$$x_k^d = \alpha_k \cdot x_k^c, \quad (1)$$

gdzie x_k^d oraz x_k^c są odpowiednio przyszłymi oraz obecnymi przewozami związanymi ze strefą k , (c oraz d oznaczają odpowiednio okres będący punktem odniesienia oraz okres perspektywiczny). Jednocześnie α_k jest współczynnikiem wzrostu, który zależy od wielkości populacji p_k , jej dochodów b_k oraz współczynnika motoryzacji m_k :

$$\alpha_k = \frac{f(p_k^d, b_k^d, m_k^d)}{f(p_k^c, b_k^c, m_k^c)}. \quad (2)$$

Moduł generowania potoków obejmuje jeszcze wiele innych szczegółowych zagadnień, które nie są tutaj rozważane. Warto przy tym zauważyć, że proponowane modele nie opisują bezpośrednich związków z warunkami transportowymi w tym sensie, że nie uwzględniają istniejących połączeń środkami komunikacji publicznej, ich jakości i wygody użycia dla podróżnego. Związki takie pojawiają się jednak pośrednio, pozostając poniekąd „zagregowane” w analizowanych zachowaniach podróżnych w poprzednich okresach.

W wypadku prognoz związanych na przykład z budową całkowicie nowej linii metra (a zatem kiedy $x_k^c = 0$) podejście musi być całkowicie odmienne i powinno opierać się na wspomnianych uprzednio badaniach zachowań indywidualnych. Przykład modelu określającego częstość podróży przedstawił Daly [2], który zaproponował

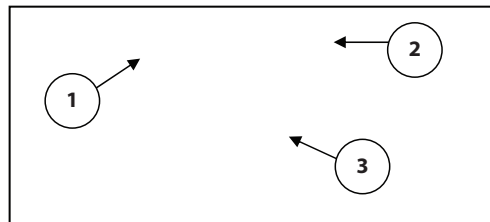
następujący wzór na określenie prawdopodobieństwa η_k , że pojedynczy mieszkaniec strefy k podejmie podróż w rozpatrywanym okresie:

$$\eta_k = \frac{1}{1 + \exp(-\lambda)}, \quad (3)$$

gdzie λ oznacza użyteczność podejmowanej podróży. Zakłada się przy tym, że w wypadku nie podjęcia podróży $\lambda = 0$. Jednocześnie λ określa się jako liniową funkcję szeregu parametrów ψ_k (związanych ze strefą k) takich, jak dochód indywidualny, motoryzacja, zasobność gospodarstw itp., postaci:

$$\lambda_k = \sum_k \theta_k \psi_k. \quad (4)$$

Wielkość θ jest parametrem wymagającym skalowania. Model ten nawiązuje zatem do założenia, że zachowania poszczególnych osób zmierzają do maksymalizacji użyteczności dóbr i usług, co stanowi fundamentalną tezę neoklasycznej teorii mikroekonomicznej wyborów konsumenckich [3] i jest podstawą budowania wielu modeli przewozowych o charakterze ekonometrycznym. Moduł generowania potoków można zatem przedstawić graficznie na rysunku 2.



Rys. 2. Moduł I – generowanie potoków

Strzałki oznaczają potoki x_k generowane wypływające z rozpatrywanych stref. Na tym etapie nie następuje jeszcze określenie dokąd zdążają prognozowane potoki, co jest przedmiotem rozważań w module II.

MODUŁ II

Dystrybucja przewozów – alokacja potoków

Moduł dystrybucji (alokacji) potoków stanowi drugi etap w modelu czteroetapowym, a jego celem jest skojarzenie (dopasowanie, zestawienie) początków (źródła) i końców (ujść) potoków wygenerowanych na poprzednim etapie, a zatem określenie liczby przemieszczeń pomiędzy rozpatrywanymi strefami k . Tworzy się w ten sposób macierz kwadratową⁵ $X_{z \times z}$ następującej postaci:

5. Macierz ta nazywana jest potocznie „tablicą podróży”.

$$X = [x_{kl}]_{Z \times Z} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1Z} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2Z} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{Z1} & x_{Z2} & \dots & x_{ZZ} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

gdzie:

x_{kl} – potoki ze źródła k do ujścia l ; $k = 1, \dots, Z$, $l = 1, \dots, Z$.

Należy w tym miejscu poczynić istotne rozróżnienie pomiędzy modelami odnoszącymi się do przewozów wewnątrz aglomeracji oraz międzymiastowych. W wypadku podróży w miastach mamy bowiem zazwyczaj $x_{kl} \neq 0$ także w przypadku, gdy $k = l$, co oznacza, że istnieją także przewozy rozpoczynające się i kończące wewnątrz każdej strefy. Ponadto zazwyczaj $x_{kl} \neq x_{lk}$. Natomiast w wypadku modeli odnoszących się do podróży pomiędzy miastami (lub regionami), podróże wewnątrz tych miast (regionów) nie są istotne z punktu widzenia budowanego modelu, a zatem dla każdego $k = l$ mamy $x_{kl} = 0$. Ponadto można przyjąć niewielkie uproszczenie, że dla każdego $k \neq l$ wielkość $x_{kl} = x_{lk}$, a zatem potoki x^* w obu kierunkach są jednakowe⁶.

W wypadku przewozów międzymiastowych, elementy na głównej przekątnej są zatem równe zero, a sama macierz jest symetryczna, czyli $X = X^T$, gdzie X^T oznacza macierz transponowaną (wiersze i kolumny zostały zamienione). W wypadkach macierzy dotyczących obu rodzajów przewozów mamy natomiast:

$$O_k = \sum_{l=1}^Z x_{kl} \text{ – oznacza sumę potoków generowanych ze źródła } k,$$

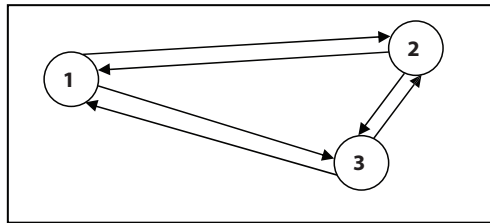
$$D_l = \sum_{k=1}^Z x_{kl} \text{ – oznacza sumę potoków wpływających do ujścia } l.$$

Z oczywistych względów suma potoków wychodzących ze wszystkich źródeł jest równa sumie potoków wpływających do wszystkich ujść. Jest to nazywane tzw. warunkiem brzegowym dla macierzy X , który można zapisać jako:

$$O_k = D_k. \quad (6)$$

Moduł dystrybuowania potoków (dla modelu międzymiastowego) można zatem przedstawić graficznie [2], jak na rysunku 3. Strzałki oznaczają potoki przepływające pomiędzy źródłami (ujściami) 1, 2 i 3. W modelu aglomeracyjnym rysunek należałoby uzupełnić o strzałki wchodzące oraz wychodzące do każdego z węzłów.

6. W celu osiągnięcia jeszcze większej precyzji można przyjąć średnią arytmetyczną potoków w obu kierunkach, tj. $x^* = 0,5 \cdot (x_{kl} + x_{lk})$.



Rys. 3. Moduł II – dystrybucja potoków

Podstawowym elementem modeli opisujących dystrybucję potoków jest koszt przemieszczania. Może on przyjmować postać odległości, ale najczęściej jest mierzony za pomocą wartości kosztu generalizowanego G :

$$G = \sum_{i=1}^M c_i + \left(\sum_{j=1}^N \beta_j \cdot t_j \right) \cdot h_r, \quad (7)$$

gdzie:

- c_i – składniki kosztu podróży (cena biletu, koszt paliwa, opłaty za autostradę itd.),
- M – liczba składników kosztu podróży, $i = 1, 2, \dots, M$,
- β_j – współczynnik,
- t_j – składnik czasu podróży,
- N – liczba składników czasu podróży, $j = 1, 2, \dots, N$,
- h_r – koszt jednostkowy czasu podróźnego r .

Klasyfikacja podstawowych modeli służących do alokowania potoków obejmuje następujące rodziny [2]:

- modele oparte na współczynnikach wzrostu (wg metod: stałej, Funesa lub Fratara),
- modele grawitacyjne,
- maksymalizacja entropii,
- modele celowości.

Z uwagi na przydatność niektórych z powyższych modeli w obszarze prognozowania przewozów międzymiastowych zostaną one skrótowo omówione.

Modele **oparte na współczynnikach wzrostu** polegają na prostym przekształceniu macierzy X^c z postaci wyjściowej (potoki z okresu bazowego) w macierz wynikową X^d (potoki prognozowane). W tym celu należy ustalić wszystkie prognozowane wielkości O_k i D_r . Następnie odpowiednio przekształcana jest macierz X poprzez zmianę elementów x_{kl}^c w x_{kl}^d w ten sposób, aby sformułowany powyżej warunek brzegowy (6) został zachowany. W wypadku najprostszym (tzw. metoda stałej) zależność pomiędzy elementami macierzy X^c i X^d (wyjściowej i wynikowej) jest liniowa. W metodzie Funesa liniowe współczynniki wzrostu odnoszone są w kolejnych iteracjach do wierszy i do

kolumn w ten sposób, aby warunek brzegowy został zachowany. Zazwyczaj metoda kończy się na 3 – 5 iteracjach. Formułę iteracji można zapisać jako:

$$x_{kl}^d = \gamma_k \delta_l O_k D_l \cdot x_{kl}^c, \quad (8)$$

gdzie γ oraz δ są nazywane współczynnikami równoważącymi i są obliczane kolejno w każdej iteracji.

Zasada metody Frataro jest podobna do poprzedniej, z tym że wiersze i kolumny są prze-liczane równocześnie z wykorzystaniem współczynników wzrostu α_k oraz α_l , a ponadto zastosowanie znajduje współczynnik μ_{kl} służący do powiązania zmian w różnych strefach:

$$x_{kl}^d = x_{kl}^c \cdot \alpha_k \cdot \alpha_l \cdot \mu_{kl}. \quad (9)$$

Modele grawitacyjne znajdujące zastosowanie do alokacji potoków, wywodzą się z prawa ciężenia Newtona. Intuicyjna analogia tego prawa w zastosowaniu do (reprezentowanego potokami podróży) „przyciągania się” pomiędzy miastami (układami osadniczymi) prowadzi do budowy modelu, w którym wielkość takich potoków jest wprost proporcjonalna do zaludnienia tych miast, a odwrotnie proporcjonalna do dzielącej ich odległości⁷.

Zdobyte od końca XIX wieku doświadczenia w rozwoju modelu grawitacyjnego pokazały, że dokładniejsze wyniki modelowania (w stosunku do wielkości rzeczywistych) uzyskuje się charakteryzując rozważane aglomeracje nie tylko przez liczbę ich mieszkańców, ale również przez włączenie poziomu dochodów ludności. Podobnie odległość wyrażaną bezpośrednio (np. w kilometrach) zastąpiono kosztem generalizowanym, przedstawianym w postaci (7). W ten sposób otrzymuje się równanie:

$$x_{ij} = \frac{K * (P_i + P_j)^\alpha * (R_i + R_j)^\beta}{G_{ij}^\gamma}, \quad (10)$$

gdzie:

x_{ij} – wielkość potoku pomiędzy miastami i oraz j ,

P_i oraz P_j – populacje tych miast,

R_i oraz R_j – przychody,

G_{ij} – koszt generalizowany przejazdu pomiędzy i oraz j ,

K – stała,

α , β , γ – współczynniki elastyczności, związane odpowiednio z wielkością zaludnienia ($\alpha \approx 1$), przychodami i kosztem generalizowanym.

7. Analogia „międzymiastowa”, jakkolwiek najbardziej oczywista, nie jest jednak jedyną. Modele grawitacyjne znajdują również zastosowanie do szacowania przewozów wewnątrz aglomeracji pomiędzy jej poszczególnymi strefami.

Wymienione uprzednio modele oparte na **maksymalizacji entropii** oraz **modele celowości** znajdują wyłączone zastosowanie w modelowaniu przewozów aglomeracyjnych, stąd zostają pominięte w niniejszym opisie.

MODUŁ III

Podział zadań przewozowych

Trzeci etap modelowania transportowego – podział zadań przewozowych pomiędzy gałęzie (lub środki) transportu polega na modelowaniu wyboru środka transportu, a zatem prowadzi do powstania macierzy źródło-ujście dla każdego z nich. Jak stwierdza zgodnie wielu autorów [3, 5, 8] wybór gałęzi transportu jest prawdopodobnie jednym z najważniejszych, klasycznych problemów w obszarze planowania transportu. Wynika to z kluczowej roli odgrywanej przez transport publiczny w polityce transportowej. Przewaga tego transportu nad motoryzacją indywidualną jest oczywista, zarówno dla przemieszczeń w obszarze aglomeracji, jak i pomiędzy nimi. Istnieje wiele metod służących do modelowania podziału zadań przewozowych. Mogą one wykorzystywać narzędzia badań operacyjnych lub na przykład modele ekonometryczne, które opierają się na trzech następujących hipotezach [1].

- (a) Dokonując wyboru trasy przejazdu lub środka transportu podróżni kierują się kilkoma czynnikami, które określono mianem preferencji. Do najważniejszych z nich i najbardziej powszechnie stosowanych w modelowaniu należą cena i czas. Szczegółową analizę preferencji wraz z ustaleniem ich listy i zastosowaniami nawiązującymi do warunków polskich przedstawiono w pracach [12] i [13].
- (b) Zgodnie z teorią mikroekonomiczną, klienci dokonują wyboru takiego wariantu podróży lub środka transportu, który maksymalizuje tzw. użyteczność, czyli pozwala na osiągnięcie maksymalnych korzyści (pożytków) z dokonanego wyboru. Podejściem równoważnym jest minimalizacja „nie-użyteczności”, co zapisać można jako minimum funkcji postaci:

$$N_w = N(s_w, t_w, c_w, \mu_w) \rightarrow \min, \quad (11)$$

gdzie:

- N_w – funkcja „nie-użyteczności” dla wariantu w ,
- s_w – odległość przejazdu,
- t_w – czas podróży,
- c_w – koszt podróży,
- μ_w – inne czynniki (preferencje).

- (c) W ogólności można założyć, że funkcja „nie-użyteczności” ma charakter liniowy i addytywny⁸. W ten sposób przyjmuje ona postać tzw. kosztu generalizowanego, czyli funkcji pozwalającej za pomocą jednej wielkości objaśnić związki pomiędzy wielkościami o różnej naturze. Ma ona postać ogólną:

8. Własność funkcji matematycznej, polegająca na zachowaniu dodawania w zbiorze wartości.

$$G = \sum_{m=1}^M c_m + \left(\sum_{n=1}^N \alpha_n \cdot t_n \right) \cdot h_r, \quad (12)$$

gdzie:

G – koszt generalizowany,

c_m – składniki kosztu podróży (cena biletu, koszt paliwa, opłaty za autostradę itd.),

M – liczba składników kosztu podróży, $m = 1, 2, \dots, M$,

α_n – współczynnik,

t_n – składnik czasu podróży,

N – liczba składników czasu podróży, $n = 1, 2, \dots, N$,

h_r – koszt jednostkowy czasu podróжного r .

Dysponując pewnym zbiorem konkurencyjnych wariantów, podróżny dokonuje wyboru środka transportu lub trasy przejazdu (w wypadku wyboru samochodu), z którym związany jest najniższy koszt generalizowany.

Sformułowane w ten sposób hipotezy (a) – (c) umożliwiają budowę modeli matematycznych o zróżnicowanej postaci. Ich syntetyczną klasyfikację przedstawia C. Abraham [1] w następującym ujęciu:

- modele „wszystko lub nic”, które polegają na przydzielaniu całego zapotrzebowania do wariantu o najniższym koszcie generalizowanym; takie radykalne podejście jest jednak sporym uproszczeniem,
- model „cena – czas”, który zostanie szczegółowo opisany,
- model logitowy, stosowany bardzo często i wykorzystujący tradycyjną zależność pomiędzy rozdziałem potoku pasażerskiego na środki transportu a stosunkiem dobranych empirycznie funkcji wykładniczych kosztów generalizowanych,
- modele oparte na tzw. „prawie Abrahama”, które stanowi odmianę modelu logitowego; jako wartość odchylenia standardowego σ w rozkładzie normalnym przyjmuje się w nim wartość kosztu generalizowanego, a nie stałą.

Modelowanie wyboru środka transportu może dotyczyć ogólnie całej rozpatrywanej sieci transportowej – w aglomeracji lub pomiędzy miastami. W tym drugim wypadku najczęściej jednak zagadnienie to dotyczy konkretnego korytarza [9, 12, 13]. Jak już wcześniej stwierdzono, wybory dokonywane przez klientów (podróżnych) w zasadniczej mierze zależą od ich preferencji oraz od odpowiedzi na te preferencje ze strony dostawców usług (przewoźników) w postaci oferty przewozowej. Lista potencjalnych preferencji może być bardzo długa. W praktyce podróżni podejmują decyzje o wyborze środka transportu kierując się ceną i czasem przejazdu, wygodą, bezpieczeństwem komunikacyjnym i osobistym, punktualnością oraz minimalizacją liczby ewentualnych przesiadek [12]. Opracowanie zbioru preferencji dla konkretnych warunków powinno odwoływać się do aktualnych badań marketingowych.

W ogólności udział gałęzi transportu q w przewozach realizowanych w badanym korytarzu transportowym ma postać modelu logitowego:

$$U_q = \frac{e^{v_q}}{\sum_{q=1}^Q e^{v_q}}, \quad (13)$$

gdzie:

U_q – udział w przewozach gałęzi transportu q ,

Q – liczba środków transportu funkcjonujących w badanym korytarzu:

$q = 1, \dots, Q$,

v_q – funkcja wyboru określona na zbiorze ustalonych preferencji.

Szczególnym przypadkiem stosowanym do modelowania wyboru gałęzi transportu w korytarzu transportowym jest sygnalizowany już uprzednio model cena – czas. Służy on zazwyczaj do modelowania podziału zadań przewozowych pomiędzy kolejami dużych prędkości a transportem lotniczym i znajduje liczne zastosowania praktyczne [2]. Model ten jest oparty zatem na hipotezie [1, 2], że przy wyborze gałęzi transportu nabywcy usług biorą pod uwagę tylko dwa podstawowe czynniki (preferencje), zawarte w jego nazwie oraz że dokonują wyboru spośród dwu alternatywnych gałęzi transportu. Model ten nie służy bezpośrednio do rozwiązywania zagadnienia optymalizacyjnego, ale do przewidywania wpływu zmiennych objaśniających, tj. ceny i czasu na udziały w rynku poszczególnych gałęzi transportu. Zadanie optymalizacyjne wykorzystujące ten model musi zatem uwzględniać dodatkowo włączenie funkcji realizującej zadany cel. Biorąc pod uwagę, że w działalności transportowej ważny jest także efekt ekonomiczny, zadanie takie można sformułować z punktu widzenia dostawcy usług zainteresowanego maksymalizacją swojego zysku [12].

W wypadku inwestycji infrastrukturalnej, której celem jest podniesienie prędkości drogowej na linii kolejowej, można w ten sposób wyznaczyć dokładnie prędkość optymalną (np. 186 km/h). Wynik taki nie miałby jednak skutków praktycznych, ponieważ w transporcie kolejowym z przyczyn technicznych stosuje się określone progi prędkości, będące wielokrotnością liczby 20 (np. 120, 160, 180 czy 200 km/h). Poszukiwanie wariantu optymalnego sprowadza się zatem do porównania kilku rozwiązań dopuszczalnych, tzn. mających rzeczywiste praktyczne zastosowanie. Sposób takiego postępowania zostanie wyjaśniony na przykładzie w dalszej części artykułu.

MODUŁ IV

Przydział do dróg przewozu

Moduł przydziału do dróg przewozu sprowadza się do ustalenia tras przemieszczania poszczególnych części potoku przypadających na rozpatrywane gałęzie transportu. Z punktu widzenia pojedynczego podróźnego odpowiada on zatem etapowi wyboru trasy przejazdu w związku z wybraną uprzednio gałęzią transportu. Zagadnienie rozpatrywane w IV module dotyczy przede wszystkim modelowania przewozów we-

wnątrz aglomeracji. Stąd też rozważane są tutaj takie specyficzne problemy jak podział całego obszaru na strefy czy kodyfikacja sieci transportowej w miastach (linie transportu szynowego, układ ulic, linie autobusowe, parkingi itp.). Każdy z tych problemów dorobił się bogatej literatury opisującej wypracowane modele matematyczne. Przedstawienie chociażby ich ogólnej systematyki zdecydowanie przekracza zakres niniejszego artykułu. W wypadku przewozów pomiędzy miastami (aglomeracjami) przydział do dróg przewozu (wybór trasy przejazdu) ma charakter wtórny i jest zdeterminowany takimi czynnikami, jak:

- **czas przejazdu**, wynikający z oferty poszczególnych przewoźników; przykładowo czas przejazdu pociągiem kwalifikowanym z Warszawy do Wrocławia jest krótszy niż pociągiem pospiesznym, chociaż przejazd następuje dłuższą trasą (przez Poznań lub Katowice),
- **cena przejazdu**, podróżny dostosowuje swój wybór do trasy proponowanej przez tego przewoźnika, który oferuje najniższą cenę,
- **czas oczekiwania**, zazwyczaj nadrzędnym czynnikiem wyboru jest godzina wyjazdu, stąd też pasażer rozpoczyna podróż po takiej trasie, która jest związana z najdogodniejszym dla niego rozkładowym odjazdem (odlotem).

Ponadto osoby podróżujące samochodem osobowym mogą dokonywać wyboru na podstawie spodziewanego zatłoczenia niektórych tras przejazdu i wynikających stąd niedogodności. Modelowanie takich wyborów napotyka zazwyczaj na pewne trudności związane z możliwie precyzyjnym określeniem kryteriów, które dotyczyłyby pewnej populacji podróżnych. W ten sposób został skrótowo opisany czteroetapowy model transportowy. W następnych rozdziałach dokładniej zostanie przedstawiony sposób jego wykorzystania do najważniejszych zagadnień związanych z modelowaniem przewozów międzyaglomeracyjnych.

5. MODELOWANIE PRZEWOZÓW MIĘDZYAGLOMERACYJNYCH

Jak wskazano we wprowadzeniu oraz w części związanej z przeglądem historycznym, wobec zdecydowanie mniejszego zainteresowania współczesnych badaczy zagadnieniami przewozów międzyaglomeracyjnych (w porównaniu do przewozów wewnątrz aglomeracji) istnieje wiele obszarów wymagających pogłębionego rozpoznania. Dotyczy to na przykład modelowania przewozów pasażerskich w określonym korytarzu transportowym. Zagadnienie takie można rozważać na przykład z dwu następujących punktów widzenia:

- polityki transportowej (krajowej lub regionalnej), która powinna koncentrować się m.in. na kształtowaniu racjonalnego – zależnie od wybranego kryterium (lub kryteriów) – podziału zadań transportowych pomiędzy poszczególne gałęzie transportu,
- z pozycji poszczególnych przewoźników, którzy – zależnie od zakładanego udziału w rynku – mogą w różny sposób kształtować swoje oferty przewozowe.

W ogólności model transportowy powinien umożliwić udzielenie odpowiedzi między innymi na następujące, podstawowe pytania:

- jakie potoki podróżnych będą się przemieszczać na rozpatrywanej sieci transportowej lub na jej części, czyli np. w rozważanym korytarzu transportowym,
- jaki jest związek wielkości przewozów z istniejącym lub zakładanym stanem infrastruktury oraz środków przewozowych w poszczególnych gałęziach transportu,
- jak będzie się kształtował podział zadań przewozowych pomiędzy poszczególne gałęzie transportu (lub pomiędzy przewoźników) w zależności od ich oferty przewozowej?

5.1. Definicje

Przed przystąpieniem do szczegółowego opisu zagadnień modelowania warto zdefiniować podstawowe pojęcia, które będą dalej stosowane, takie jak potok podróżnych, korytarz transportowy, preferencje podróżnych oraz podział modalny⁹. Jakkolwiek są one znane i powszechnie używane, to jednak wielu autorów stosuje je w sposób bardzo dowolny.

Potokiem pasażerskim (ang.: *traffic flow*, franc. *trafic de voyageur*) w odniesieniu do przewozów kolejowych¹⁰ nazywa się liczbę pasażerów, przypadającą w określonym czasie na każdy odcinek linii kolejowej i dzieli się przy tym na:

- **potoki dobowe**, oznaczające liczbę pasażerów przejeżdżających w ciągu 24 godzin na danym odcinku linii kolejowej,
- **potoki pociągowe**, oznaczające liczbę pasażerów jadących określonym pociągiem na każdym umownym odcinku jego biegu.

Wyróżnia także **potoki stacyjne**, oznaczające liczbę pasażerów odprawionych w ciągu doby z danej stacji oraz **strugi relacyjne**, oznaczające liczbę pasażerów podróżujących (w ciągu doby) pomiędzy dwiema ustalonymi stacjami (odjazdu i przyjazdu). Pojęcie strug relacyjnych, jakkolwiek w pełni zasadne i systematyzujące słownictwo transportowe, nie znalazło niestety szerszego zastosowania w literaturze przedmiotu. Autorzy – ze stratą dla precyzji rozważań – stosują zatem określenie „potoki” w każdym wypadku odnoszącym się do analizy przewozów pasażerskich. Wszystkie wymienione rodzaje potoków zostały odniesione do okresu 24-godzinnego. Podejście to w świetle późniejszej praktyki, należałoby zatem nieco rozbudować. Podstawowa, minimalna informacja o potokach podróżnych powinna zawierać określenie:

- rozpatrywanego obiektu związanego z potokiem (stacja, pociąg, linia kolejowa lub jej odcinek, relacja przewozu itp.),
- kierunku „przepływu” potoku; w nazewnictwie transportowym stosuje się powszechnie określenie „w jednym kierunku” lub „w obu kierunkach”,

9. Wykorzystując te pojęcia w dotychczasowym opisie założono, że są one intuicyjnie zrozumiałe.

10. Nazewnictwo wprowadzone przez prof. W. Wyrzykowskiego w fundamentalnych pracach na temat ruchu kolejowego na przełomie lat 50-tych i 60-tych XX wieku.

– okresu (czasu) przepływu potoku, którym może być godzina, doba, tydzień, miesiąc.

Pojęcie potoków rozszerza się oczywiście na wszystkie gałęzie transportu. Korygując zatem przedstawioną, klasyczną terminologię (i pozostając jednocześnie w zgodzie z intencjami jej twórcy), należałoby zatem zastąpić określenie **potoki dobowe** nazwą **potoki odcinkowe**, rezerwując słowo „dobowe” (lub inne określające czas „przepływu” potoku) do jego doprecyzowania. Podsumowując powyższe rozważania można przyjąć następującą definicję: **Potok pasażerski** to liczba podróży przemieszczających się w danym czasie pomiędzy dwoma rozpatrywanymi miejscami (początkiem – źródłem; końcem – ujściem) w jednym lub obu kierunkach przejazdu.

Sformalizowany zapis potoku ruchu, właściwy do zastosowania w procesach modelowania transportowego znajduje się w wielu opracowaniach. W najnowszych pracach [5] potok ruchu jest definiowany jako odwzorowanie przemieszczania się osób i (lub) ładunków przez węzły i połączenia składające się na strukturę sieci transportowej. Zakładając dalej, że osoby przemieszczane są w umownych jednostkach ruchu („umownych pojazdach”), to liczba tych jednostek wyrażana np. liczbą przewożonych osób, odwzorowuje wielkość (wartość) przemieszczania – potoki pasażerskie.

Potok stanowi jeden z podstawowych elementów systemu transportowego (MST), który stanowi uporządkowaną czwórkę postaci [5, 6]:

$$MST = \langle G, F, P, O \rangle, \quad (14)$$

dla której:

G – jest grafem struktury,

F – jest zbiorem funkcji określonych na węzłach i (lub) łukach grafu struktury,

P – jest potokiem ruchu,

O – jest organizacją.

Koncentrując się obecnie tylko na jednym elemencie MST, tj. na potoku ruchu zakłada się, że w zbiorze W wierzchołków grafu G wyróżniono wierzchołki A , będące zbiorem źródeł potoku oraz wierzchołki B , będące zbiorem ujść potoku. Zakłada się zatem dalej, że na iloczynie kartezjańskim $A \times B$ zadane jest odwzorowanie e , które elementom iloczynu przyporządkowuje elementy ze zbioru $\{0, 1\}$, tj.:

$$e : A \times B \rightarrow \{0, 1\}, \quad (15)$$

przy czym $e(a, b) = 1$ wtedy i tylko wtedy, gdy ze źródła o numerze a skierowany jest potok do ujścia o numerze b ; w przeciwnym wypadku $e(a, b) = 0$. Para $e(a, b)$, dla której $e(a, b) = 1$ nosi nazwę relacji przewozu.

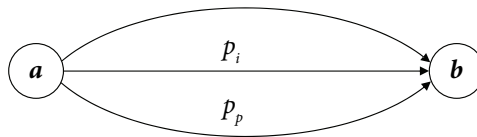
Jeżeli zatem w zbiorze E relacji przewozów zadane jest odwzorowanie x takie, że elementom tego zbioru przyporządkowane są liczby rzeczywiste dodatnie, tj.:

$$x : E \rightarrow R^+, \quad (16)$$

to $x(a, b) \equiv x^{ab} \in \mathbf{R}^+$ interpretuje się jako wielkość potoku przemieszczanego w sieci transportowej w relacji $x(a, b)$. Wielkość zapotrzebowania na przewóz w źródle A scharakteryzowana zostaje liczbą x^a , natomiast wielkość potoku ruchu pojawiająca się w ujściu B scharakteryzowana zostaje liczbą x^b . Oczywiście $x^a = x^b$.

Dla każdej pary $(a, b) \in E$ wielkość potoku będzie równa $x(a, b) \equiv x^{ab}$.

Korytarz transportowy w ujęciu opisowym oznacza ogół tras, po których mogą przemieszczać się potoki podróży pomiędzy miastami w wybranej relacji. W ujęciu formalnym przyjmuje się założenie, że w sieci transportowej wyróżnione zostaje połączenie pomiędzy wierzchołkami a i b , nazywane korytarzem transportowym. Ponadto, dla jednoznaczności należy założyć, że w wyróżnionym korytarzu występują ustalenia dostawcy usług transportowych p_i . Model przyjmuje wówczas postać grafu, jak na rysunku 4.



Rys. 4. Model korytarza transportowego (a, b) , w którym funkcjonują dostawcy p_i

Dokonując wyboru trasy przejazdu lub środka transportu, podróżni kierują się kilkoma przesłankami, które określa się mianem **preferencji**. Termin ten w powszechnym języku oznacza „uprzywilejowanie, przedkładanie czegoś nad coś”¹¹. Do najważniejszych z nich należą: długość trasy, czas przejazdu, koszty przemieszczania, bezpieczeństwo, komfort itp. Szczegółową analizę preferencji wraz z ustaleniem ich listy nawiązującej do warunków polskich przedstawiono i zastosowano w pracy [13]. Bardziej szczegółowe informacje znajdują się także w podrozdziale 5.3.

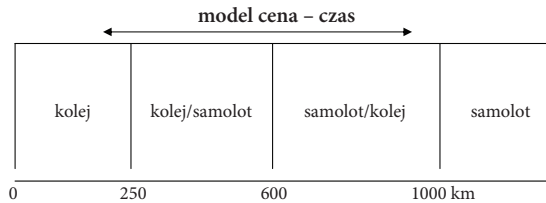
Ostatnim pojęciem wymagającym zdefiniowania jest **podział modalny (struktura gałęziowa)**. Z definicji [2, 4, 8] podział modalny (ang. *modal split* lub *modal share*¹², franc. *répartition modale*) oznacza proporcję (udział) w całkowitym wolumenie przejazdów (przewozów) przypadający na poszczególne środki transportu (drogowe, kolejowe, lotnicze, wodne, morskie), wyrażoną wielkością przewozów (mln pasażerów) lub pracy przewozowej (mln pasażerokilometrów, tonokilometrów, pojazdokilometrów). Podział modalny (struktura gałęziowa) może być zatem w skrócie zdefiniowany jako udział w rynku różnych środków transportu lub podział pracy między środkami transportu. Z podziałem modalnym jest związany szereg zagadnień teoretycznych, dotyczących w szczególności wyboru przez podróżnego gałęzi transportu. Problematyka

11. W. Kopaliński „Słownik wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych”, Wiedza Powszechna, Warszawa 1994.

12. Oba określenia używane są w literaturze anglojęzycznej zamiennie; dosłowne tłumaczenie: *split* – podział, *share* – udział.

ta będzie szerzej przedstawiona w podrozdziale 5.3. W tym miejscu warto natomiast zasignalizować związek pomiędzy wyborem (czy raczej: właściwym zastosowaniem) gałęzi transportu w funkcji długości podróży.

W warunkach europejskiego systemu transportowego podstawową rolę w przewozach pasażerskich odgrywają: transport drogowy (samochody, autobusy), transport kolejowy (w tym KDP – Koleje Dużych Prędkości) oraz transport lotniczy (w tym tzw. przewoźnicy niskokosztowi). Podział międzygałęziowy z punktu widzenia odległości przejazdu jest następujący. W Europie około 50% podróży do 700 km realizuje się transportem drogowym, ale już w relacjach powyżej 1 200 km ponad połowa potoku pasażerskiego jest przewożona samolotami¹³. Konkurencja pomiędzy transportem lotniczym a kolejami dużych prędkości w funkcji odległości przejazdu została przedstawiona na rysunku 5. Kolejną zdecydowanie szybciej można się przemieścić pomiędzy miastami odległymi do 250 km. Relacje od 250 do 1000 km to obszar konkurowania KDP i samolotu w funkcji dwu parametrów: ceny i czasu podróży (model cena – czas). Odległość 1000 km jest powszechnie uznawana jako granica zdecydowanej kompetencji transportu lotniczego¹⁴.



Rys. 5. Konkurencja pomiędzy kolejami dużych prędkości a samolotami w funkcji odległości

Powyżej granicy 1000 km samolot staje się zatem jedynym racjonalnym środkiem transportowym w przewozach pasażerskich. Ewentualne wyjątki są związane z uwarunkowaniami geograficznymi, takimi jak góry czy duże zbiorniki wodne (morza, jeziora), gdzie odległość kolejowa czy drogową – z uwagi na konieczność ich objazdu – oznacza nieporównanie dłuższą podróż, podobnie jak korzystanie z przeprawy promowej, którą charakteryzuje zazwyczaj niska częstotliwość połączeń i relatywnie niewielka prędkość komunikacyjna¹⁵.

Badając wybory gałęzi transportu dokonywane przez odbiorców usług w danym korytarzu transportowym, mamy do czynienia z różnymi odległościami pomiędzy miastami w badanej relacji, zależnie od trasy po której następuje przemieszczanie. Różnice te nie są jednak większe niż kilka, kilkanaście procent, a zatem wszystkie te odległości mieszczą się w jednej strefie, np. 250 – 600 km. Tym samym czynnik odległości nie jest

13. Na podstawie danych ITA (Institut du Transport Aérien) w Paryżu.

14. Podróże do 1000 km noszą angielską nazwę *short-haul*, a powyżej *long-haul travel* [3].

15. Typowym przykładem ilustrującym tę sytuację było połączenie Europy kontynentalnej z Wielką Brytanią do czasu otwarcia tunelu pod kanałem La Manche w 1994 roku.

w takim wypadku podstawową determinantą wyboru gałęzi transportu. Jednocześnie stosowane metody, oparte na analizowaniu innych preferencji znajdują swoje zastosowanie tylko w tych wypadkach, w których zastosowanie rozpatrywanego zbioru środków transportu jest racjonalne, to znaczy że mogą one wzajemnie się zastępować.

5.2. Modele prognozowania przewozów

Podsumowując dotychczasowe uwagi na temat modeli transportowych dotyczących przewozów wewnątrz aglomeracji oraz pomiędzy nimi można stwierdzić, że w tym drugim wypadku ogólny czteroetapowy model transportowy nie powinien być stosowany w sposób bezpośredni. Jeśli przyjmiemy, że zagadnienie sprowadza się do modelowania przewozów pomiędzy dwiema aglomeracjami (w korytarzu transportowym), to za najważniejsze elementy (etapy) modelowania uznać można:

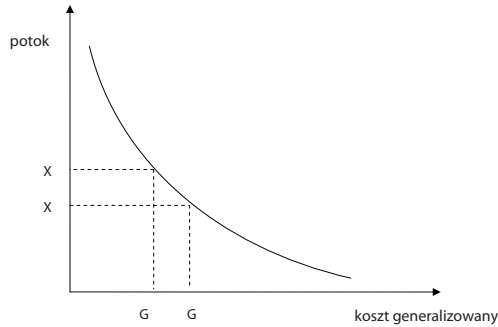
- (a) określenie perspektywicznej wielkości potoków podróży w zależności od zmieniających się uwarunkowań społeczno-gospodarczych (strona popytowa) oraz w kontekście oferty przewozowej zgłaszanej przez przewoźników działających obecnie lub przygotowywanej przez przewoźników (strona podaży),
- (b) badanie wpływu preferencji podróży na rozłożenie potoku w korytarzu transportowym, również w nawiązaniu do ofert przewozowych.

Odnosząc powyższe uwagi do modeli sekwencyjnych (tabl. 2) łatwo zauważyć, że etap (a) oznacza powiązanie modułów I i II, natomiast etap (b) – modułów III i IV. To zagadnienie można rozwijać na gruncie modeli możliwych teoretycznie do zastosowania. W wypadku każdego rozpatrywanego korytarza transportowego należy zakładać podejście indywidualne, dostosowane do przeanalizowanych uwarunkowań lokalnych oraz możliwości ich odwzorowania. W przypadku ogólnym, ukierunkowanym na zastosowania praktyczne [9] etapy (a) oraz (b) można sprowadzić do zagadnienia wyboru modeli prognozowania potoków oraz podziału zadań przewozowych.

Najczęściej stosowanym modelem do określania wielkości przyszłych potoków jest model grawitacyjny, którego zasadnicza konstrukcja została zaprezentowana w rozdziale 2. Modele budowane do konkretnych zastosowań różnią się przede wszystkim zbiorem wykorzystywanych zmiennych, których wybór powinien zależeć od warunków badanego korytarza transportowego. W praktyce sytuacja często ogranicza możliwość pozyskania konkretnych wartości, zarówno historycznych (brak danych), jak i bieżących, wymagających kosztownych badań marketingowych. Zmusza to oczywiście użytkowników modeli do przyjmowania trudnych kompromisów, niewątpliwie ze szkodą dla precyzji wyników modelowania.

Występujący w mianowniku koszt generalizowany G_{ij}^{γ} , opisany wzorem (10) występuje w większości modeli grawitacyjnych. Wykorzystując tę wielkość można się powołać na klasyczne prawo ekonomii, wiążące wolumen usług z ich ceną (rys. 6). Poprawa oferty (podaż) oznacza jednocześnie zmniejszenie się kosztu generalizowanego, a tym samym wzrost zapotrzebowania (popyt). Jako przykłady konkretnych formuł matematycznych, opisujących koszty generalizowane G_{ij}^{γ} dla warunków francuskich, można

przytoczyć wzory opracowane na zlecenie SNCF [9] i nazwane kolejno modelami PIANO [12] oraz INTERCITÉS [13].



Rys. 6. Potok pasażerski w funkcji kosztu generalizowanego

$$G_{ij} = t_p + \left[\frac{18 - t_p}{f - 1} \right] \cdot \alpha_1 + \left[\frac{f}{l_p} \right]^\beta \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3, \quad (17)$$

$$G_{ij} = t_p + \left[\frac{18 - t_p}{f - 1} \right] \cdot \gamma_1 + t_d \cdot \gamma_2 + t_o \cdot \gamma_3, \quad (18)$$

gdzie:

- t_p – czas przejazdu pociągiem,
- t_d – średni czas na dojazd do dworca,
- t_o – średni czas na przejazd z dworca do celu podróży,
- f – liczba połączeń na dobę w rozważanej relacji,
- l_p – liczba przesiadek w przypadku, gdy nie ma połączeń bezpośrednich,
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta, \gamma_1, \gamma_2$ oraz γ_3 – współczynniki stosowne w modelach.

Prognozowanie wielkości przewozów może się odbywać również z wykorzystaniem innych metod. Większość z nich zakłada jednak, że znane są zarówno obecne przewozy, jak i funkcje trendu odwzorowujące wielkość przewozów w okresach minionych. Wyczerpujący przegląd takich metod zawiera praca J. Żurowskiej [14], stąd też nie będą one tutaj szerzej analizowane. Dysponując wielkością potoku w korytarzu transportowym, można przejść do etapu modelowania rozłożenia potoków ruchu.

5.3. Modelowanie podziału zadań przewozowych

Zgodnie z poczynionymi dotychczas uwagami, wybór przez podróżnych środka transportu odbywa się na zasadzie konfrontacji **preferencji** nabywców usług, które można opisać jako model odbiorcy usług oraz **ofert** dostawców usług w postaci modeli, które charakteryzują świadczone przez nich usługi (model dostawcy usług). Mode-

lowanie podziału zadań przewozowych polega na badaniu wzajemnego oddziaływania obu modeli i w konsekwencji na określeniu rozłożenia potoków. Opisane zostaną dwa sposoby rozwiązania tego zagadnienia. Pierwszym z nich jest tzw. model cena – czas, stosowany szczególnie często w praktyce modelowania przewozów lotniczych i KDP [1, 2]. Drugi model został opracowany przez autora artykułu i może służyć do badania wpływu dowolnej liczby preferencji podróżnych na rozłożenie potoku ruchu w korytarzu transportowym [12, 13].

Model cena – czas

W modelu cena – czas kluczowym elementem wyboru środka transportu jest wartość h_r , czyli tzw. jednostkowy koszt czasu podróznego (inaczej „walor” albo „wartość czasu” podróznego). Jest to zatem wartość (wyrażona na przykład w zł/h), jaką przypisuje on swojemu czasowi poświęcanemu na podróż¹⁶. W ten sposób użytkownik k wybiera tę gałąź transportu, której koszt generalizowany G jest mniejszy.

Jeśli zatem c_p oraz c_s są odpowiednio kosztami przejazdu pociągiem i przelot samolotem oraz jeśli t_p i t_s są czasami podróży (z uwzględnieniem wszystkich składników), to koszty generalizowane odnoszące się do użytkownika r zgodnie ze wzorem (5) są następujące:

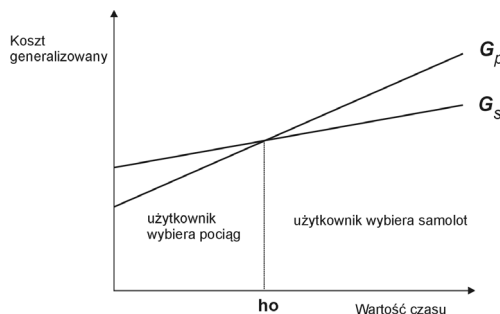
$$\begin{aligned} G_p^r &= c_p + h_r t_p, \\ G_s^r &= c_s + h_r t_s \end{aligned} \quad (19)$$

gdzie:

G_p^r – koszt generalizowany przejazdu pociągiem podróznego r ,

G_s^r – koszt generalizowany przelotu samolotem podróznego r .

Koszty te dla określonej relacji i można zilustrować następująco (rys. 7). Grubsza linia oznacza koszt generalizowany związany z samolotem.



Rys. 7. Funkcje kosztu generalizowanego pociąg – samolot

16. Ocena kosztu jednostkowego (wartości czasu) ma charakter indywidualny (zdezagregowany). Definicja przenosząca to pojęcie na pewną populację podróżnych (agregacja) jest następująca: jeżeli jedna godzina wydłużenia czasu podróży daje taki sam efekt w postaci zmniejszenia zapotrzebowania na przewozy, jak wzrost ceny biletu o h złotych, to h nazywamy wartością (walorem) czasu.

Zatem w rozważanej relacji (a, b) istnieje wartość czasu h_0 taka, że:

$$G_p^r = G_s^r, \quad (20)$$

a stąd:

$$h_0 = \frac{c_s - c_p}{t_p - t_s}. \quad (21)$$

Wartość h_0 nazywana jest obojętną dla relacji (a, b) . Jeżeli $h_r < h_0$ to oznacza, że użytkownik wybrał pociąg; w przeciwnym wypadku użytkownik wybrał samolot.

Postać rozkładu wartości czasu h_r w populacji użytkowników r w relacji (a, b) nie jest zazwyczaj znana. Przyjmuje się zatem hipotezę, że jest ona taka sama (analogiczna) jak rozkład przychodów w społeczeństwie. Rozkład taki przyjmuje postać [2]:

- rozkładu logarytmiczno-normalnego dla przychodów najniższych,
- rozkładu Pareto (w formule $\frac{1}{x^\alpha}$) dla przychodów o wyższej wartości.

Przyjmując dla uproszczenia odwzorowanie w całości rozkładem logarytmiczno-normalnym można to zapisać w postaci funkcji:

$$f(h) = \frac{1}{h\sigma\sqrt{2\pi}} * \exp\left(\frac{-(\ln(h) - m)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (22)$$

W rozkładzie tym występują dwa parametry o nieznanych wartościach: odchylenie standardowe σ , odwzorowujące rozrzut indywidualnych wartości czasu wśród użytkowników oraz średnia m .

Funkcja gęstości $f(h)$ takiego rozkładu ma postać:

$$F(h) = \int_0^h f(x)dx. \quad (23)$$

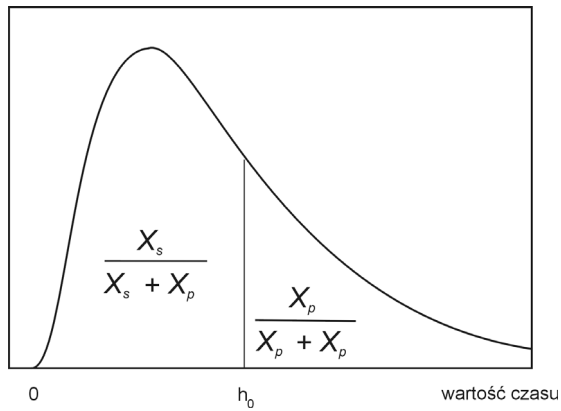
Jeśli przez X_p oraz X_s oznaczymy liczbę pasażerów (potok podróżnych) korzystających odpowiednio z pociągu i z samolotu, to:

$$X_p = F(h_0) = \int_0^{h_0} f(x)dx, \quad (24)$$

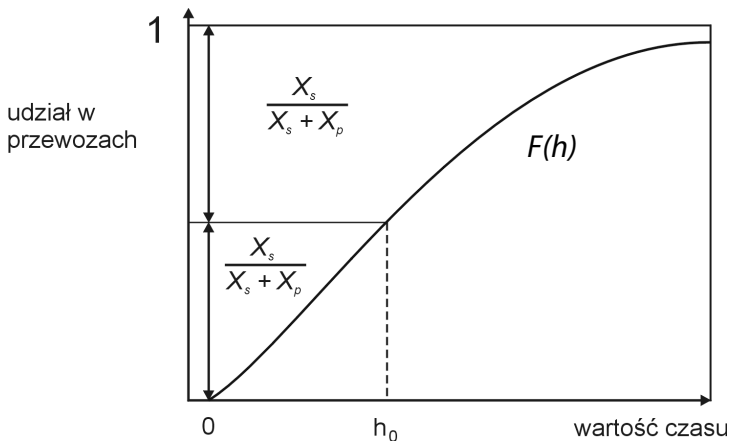
oraz

$$X_s = 1 - F(h_0) = \int_{h_0}^{\infty} f(x) dx . \quad (25)$$

Powierzchnie odpowiadające proporcji (udziałowi) w rynku przypadające na pociąg oraz na samolot, znajdujące się poniżej wykresu funkcji $f(h)$ przedstawiono na rysunku 8. Dystrybuenta rozkładu logarymiczno–normalnego $F(h)$ ze wskazaniem liczby podróżnych, którzy skorzystają z pociągu lub samolotu, zależnie od oceny wartości swojego czasu, została przedstawiona na rysunku 9.



Rys. 8. Funkcja gęstości rozkładu wartości czasów podróży



Rys. 9. Dystrybuenta rozkładu wartości czasów podróży

5.4. Przykładowe aplikacje

PRZYKŁAD 1

Model cena – czas wykorzystywany jest najczęściej do analizowania podziału modalnego kolej – samolot w wybranych korytarzach transportowych [1, 2], w których funkcjonują w szczególności połączenia KDP¹⁷. Bardzo praktycznych wniosków dostarcza zwłaszcza badanie wpływu oferty cenowej tzw. przewoźników lotniczych niskokosztowych na sytuację rynkową. W warunkach polskich możliwe są oczywiście podobne rozważania, ale z uwagi na bardziej powszechny dylemat, przed którym stoi najwięcej podróżnych, za bliższe rzeczywistości należy uznać rozpatrywanie podziału modalnego kolej – samochód.

Model cena – czas został zatem zastosowany do warunków korytarza transportowego Warszawa – Kraków. Kontekstem tych rozważań była ocena potencjalnych korzyści prowadzonych właśnie prac modernizacyjnych na linii CMK i dalej na odcinku Psary – Kraków oraz testy nowej lokomotywy elektrycznej ES64U4 na 200 km/h. W efekcie jest planowane skrócenie czasu przejazdu pociągów, a związane z tym pytanie dotyczy zbadania efektów rynkowych z punktu widzenia przewozów pasażerskich. Wyznaczone za pomocą programu symulacyjnego (przejazdy teoretyczne) czasy przejazdu w tej relacji w funkcji prędkości maksymalnej (drogowej) podano w tablicy 3.

Tablica 3

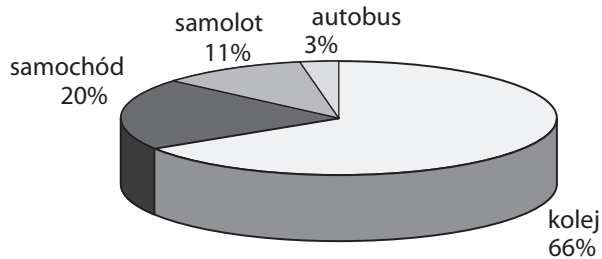
Czasy przejazdu pociągu w relacji Warszawa – Kraków (w minutach)

Odcinek		Prędkości maksymalne [km/h]				
od	do	160	200	220	250	300
Warszawa Centralna	Grodzisk Mazowiecki	22,0	15,6	15,6	15,6	15,6
Grodzisk Mazowiecki	Psary	71,0	54,9	50,5	45,4	39,4
Psary	Kraków Główny	82,0	51,0	51,0	51,0	30,5
Warszawa Centralna	Kraków Główny	175,0	121,5	117,1	112,0	85,5

[Źródło: A. Massel, „Modernizacja CMK – zagadnienia ruchowe”, Konferencja SITK, Lublin, 2008]

Obecny podział modalny w korytarzu transportowym Warszawa – Kraków przedstawiono na rysunku 10. Potoki pasażerskie w tej relacji to ok. 3,03 mln podróżnych rocznie w obu kierunkach. Przewozy kolejną i samochodami stanowią 86%, a zatem jest to około 2,6 mln podróżnych, z czego na kolej przypada 2 mln.

17. Skrót KDP – Koleje Dużych Prędkości; odpowiednik angielskiego skrótu HST (*High Speed Trains*) oraz francuskiego TGV (*Trains à Grande Vitesse*).



Rys. 10. Udział środków transportu w przewozach pasażerskich Warszawa – Kraków [Źródło: opracowanie własne na podstawie danych RBF/SGH, PKP Intercity S.A.]

Dane przyjęte do budowy modelu cena – czas przedstawiono w tabelicy 4. Przyjmując wartość czasu podróжного w wysokości np. 30 zł/h otrzymuje się równania kosztu generalizowanego w postaci (21).

Tablica 4

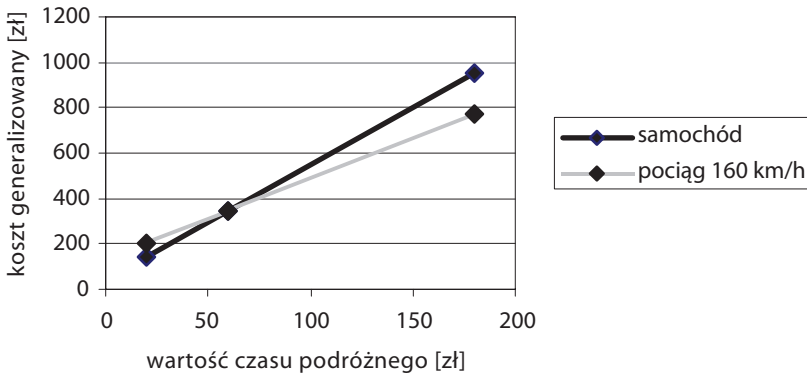
Parametry podróży w relacji Warszawa – Kraków

Czasy i cena przejazdu	Pociąg	Samochód
Czas przejazdu	2 h 55	4 h 55
Czas dostępu	0 h 10	0 h 30
Czas odprawy	0	0 h 10
Cena przejazdu	40,00 zł	130,00 zł

$$\begin{aligned}
 G_p &= 130zB + 30zB \cdot 3,58h = 238zB, \\
 G_s &= 40zB + 30zB \cdot 5,08h = 193zB.
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Dla tak ustalonych danych wybór środka transportu w funkcji wartości czasu podróжного przedstawiono na rysunku 11. Obojętna wartość czasu (h_0), dla której koszty generalizowane przejazdu pociągiem G_p i samochodem G_s (dla danych z tabelicy) są jednakowe, wynosi 60 zł/h.

Wybór środka transportu



Rys. 11. Wybór środka transportu w funkcji wartości czasu podróznego

Powstaje teraz pytanie o to, jak obecny podział rynku pomiędzy pociągiem a samochodem (odpowiednio 2 i 0,6 mln osób w roku, czyli 77% i 23%), ustalony dla aktualnego rozkładu wartości czasu podróznego w populacji osób podróżujących na trasie Warszawa – Kraków zmieni się w wypadku:

- zmniejszenia ceny biletów np. o 30 zł,
- skrócenia czasu przejazdu pociągu z 2h55 do 2h02.

W celu uzyskania wiarygodnych danych dotyczących rozkładu wartości czasu należałoby przeprowadzić szczegółowe (i kosztowne) badania marketingowe. W celu zilustrowania działania modelu cena – czas. Załóżmy teoretycznie, że zgodnie z powołanymi w literaturze modelami teoretycznymi [2] rozkład ten można odwzorować w postaci rozkładu Pareto, opisanego funkcją gęstości (22) i dla ustalonego na podstawie danych z przykładu $\alpha = 0,1$. Zakłada się jednocześnie, co wykorzystano uprzednio na rys. 11, że wartość czasu podróжных korzystających z kolei i samochodu mieści się w przedziale od 20 do 180 zł/h.

$$f(x) = \frac{1}{x^{0,1}} \cdot \quad (27)$$

Ocena skutków obniżenia ceny biletu na pociąg o 30 złotych oraz skrócenia czasu przejazdu wymagają kolejno obliczenia kosztów generalizowanych dla obu środków transportu oraz pola na wykresie funkcji gęstości rozkładu Pareto według wzorów (19) i (20). Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono w tabelicy 5.

Tablica 5
 Udział w przewozach Warszawa – Kraków dla różnych parametrów modelu cena – czas

Parametry przejazdu pociągu			h_0 [zł/h]	Udział w rynku [%]	
V_{max}	Cena biletu [zł]	Czas jazdy godz. min		Pociąg	Samochód
160 km/h	130,00	2,55	60	77	23
	100,00	2,55	40	88	12
200 km/h	130,00	2,02	38	90	10
	100,00	2,02	25	97	3

Przedstawiony przykład kończy opis modelu cena – czas w zastosowaniu do badania podziału zadań przewozowych w korytarzu transportowym. Zgodnie ze swoją nazwą zakłada on, że podróżni podejmują decyzje o wyborze środka transportu biorąc pod uwagę dwa czynniki – preferencje. Jak już wcześniej stwierdzono, lista takich preferencji może być dłuższa. Zastosowanie znajduje wówczas wzór (8).

Rozłożenie potoku metodą preferencji

Druga z rozpatrywanych metod opracowana przez autora artykułu zakłada, że w rozważanym multimodalnym korytarzu transportowym, charakteryzującym się mierzalnymi i obiektywnymi parametrami, funkcjonują dostawcy usług (przewoźnicy) o znanych charakterystykach jakości usług. Znane są również parametry preferencji odbiorców usług (użytkowników, klientów). Opracowana metoda tzw. interakcji międzygałęziowych¹⁸ umożliwia:

- modelowanie podziału zadań przewozowych pomiędzy dostawców usług w funkcji ustalonych parametrów preferencji użytkownika,
- badanie relacji nabywca – dostawca usług przewozowych, odwzorowujących rzeczywiste warunki systemu transportowego oraz pozwalających na objaśnienie obecnego oraz określenie przyszłego (prognozowanego) podziału zadań.

Do zbadania powyższej interakcji jest zatem konieczne zbudowanie dwu modeli: dostawcy oraz odbiorcy usług transportowych. Konfrontacja **preferencji nabywców** oraz **ofert dostawców** prowadzi ostatecznie do rozłożenia potoku ruchu w badanym korytarzu transportowym.

Praktyczne zastosowanie tych modeli wymaga określenia zbioru czynników (nazwanych preferencjami), mających wpływ na wybór przez podróżnego środka transportu. Każdy indywidualny podróżny jest konfrontowany ze zbiorem Ω wariantów ω ($\omega \in \Omega$)

18. Następuje wzajemne oddziaływanie (interakcja) nabywców usług, biorących pod uwagę własne oczekiwania (preferencje) oraz działania dostawców tych usług (przewoźników), próbujących sprostać tym oczekiwaniom.

możliwych wyborów. Każdy wariant zostaje opisany funkcją wyboru $\pi(\omega)$ (w najbardziej oczywistym przypadku liniową) zawierającą wszystkie (istotne) zmienne związane z podażą i popytem. Wybór wariantu ω^* ma miejsce wtedy, gdy $\pi(\omega^*)$ uzyskuje wartość maksymalną. Stosując opisaną funkcję wyboru do pewnej populacji osób, z których każda dokonuje wyboru spośród zbioru Ω wariantów, można przenieść zbudowany model na poziom zagregowanego modelu rynkowego. W opracowanej metodzie indywidualizacja odniesień została zagregowana w postaci czterech wyodrębnionych umownie segmentów nabywców usług: biznesmenów, studentów, seniorów oraz rodzin. Szczegółowa analiza przesłanek, jakimi kierują się podróżni prowadzi do określenia pewnego zbioru preferencji, które mogą być rozpatrywane przy konstruowaniu opisanych dwu modeli (tablica 6).

Ostatecznie, o wyborze określonego środka transportu przez podróżnego, decyduje walor użyteczności, który – zgodnie z teorią mikroekonomiczną – jest przez niego maksymalizowany. Obiektywnym sposobem wyboru zmiennych, mających szczególne znaczenie z punktu widzenia podróżnych przy wyborze oferty transportowej, są badania marketingowe. Na podstawie badań przeprowadzonych w Polsce w ostatnich latach, można wyróżnić pięć najczęściej wymienianych cech jakościowych oferty przewozowej (preferencji):

Tablica 6

Zbiór preferencji podróżnych

Lp.	Nazwa preferencji (czynnika wyboru)	Znaczenie (opis)
1	Cena	Koszt podróży odczuwany przez pasażera
2	Czas przejazdu	Czas podróży odczuwany przez pasażera
3	Bezpośredniość	Możliwość odbycia podróży bez przesiadania się
4	Dostępność geograficzna	Odległość do najbliższego terminala (dworzec, przystanek, lotnisko)
5	Dostępność czasowa	Zgodność godzin kursowania z oczekiwaniem podróżnych
6	Bezpieczeństwo komunikacyjne	Prawdopodobieństwo szczęśliwego zrealizowania podróży
7	Bezpieczeństwo osobiste	Ocena zagrożeń typu przestępczego
8	Komfort	Wygoda podróżowania
9	Planowość	Zgodność podróży z rozkładem jazdy lub przewidywaniem (samochód)
10	Zawodność	Prawdopodobieństwo unieruchomienia środka transportowego
11	Elastyczność	Możliwość modyfikowania trasy podróży

- czas trwania podróży,
- bezpieczeństwo osobiste i komunikacyjne,
- koszt podróży,
- wygoda podróżowania,
- regularność i punktualność.

Konieczne jest tutaj przyjęcie założenia, że dla danego korytarza transportowego, znani są potencjalnym podróżnym wszyscy funkcjonujący przewoźnicy pasażerscy, charakterystyki ich ofert przewozowych oraz kategorie nabywców usług przewozowych wraz z odpowiadającymi im preferencjami. W metodzie założono także, że wszystkich nabywców w funkcji oczekiwań można pogrupować, otrzymując w ten sposób skończony zbiór grup nabywców usług o ustalonych preferencjach. Przykładowy podział na grupy dokonany na podstawie wyników badań marketingowych wyróżnia cztery tzw. kategorie nabywców usług: biznesmeni, studenci, seniorzy i rodziny.

Problem **rozłożenia potoku ruchu** polega na ustaleniu, ilu nabywców usług poszczególnych kategorii skorzysta z oferty kolejnych dostawców usług. W tym celu kolejno:

- wyznacza się tzw. współczynniki konkurencyjności (funkcja liniowa opisana na zbiorze ofert przewozowych z uwzględnieniem preferencji podróżnych),
- określa się udział kolejnych dostawców w realizacji popytu,
- wyznacza się liczbowe rozłożenie nabywców usług przewozowych na dostawców.

Podróżny dokonuje wyboru na podstawie oceny porównawczej ofert przewoźników nadając poszczególnym cechom jakości usług określone wagi, będące liczbami dodatnimi w przedziale od 0 (waga nieistotna) do 5 (waga najbardziej istotna). W celu osiągnięcia porównywalności ocen przeprowadzane jest ich normowanie. Unormowany model dostawcy odnoszący się do sytuacji rzeczywistej (początkowej), nazwany zostaje **modelem bazowym** w celu odróżnienia od kolejnych **modeli wariantowych**.

Badanie wpływu zmian wyboru dostawcy usług przez potencjalnego nabywcę usług polega na modyfikacji preferencji nabywców lub oferty (wybranych) dostawców usług. Z metodologicznego punktu widzenia zmianie ulegną zatem relacje pomiędzy cechami jakościowymi poszczególnych ofert dostawców usług. Należy zatem wyznaczyć nowe współczynniki konkurencyjności oraz dokonać ponownego rozłożenia potoku ruchu.

Praktycznym zastosowaniem powyższej metody jest jej implementacja komputerowa – program „Preferencje”, napisany w języku DELPHI oraz działający w środowisku Windows (rys. 12).

Funkcje realizowane przez program „Preferencje” obejmują:

1. Wprowadzanie, zapis, odczyt, drukowanie i edycję danych.
2. Wyznaczanie rozłożenia potoku ruchu pasażerskiego dla zdefiniowanych wariantów wartości cech jakościowych ofert dostawców usług przewozowych.



Rys. 12. Strona tytułowa programu „Preferencje”

3. Badanie wpływu zmian wartości cech jakościowych ofert dostawców usług przewozowych na rozłożenie potoku ruchu. W ramach tej funkcji jest możliwe uzyskanie, zapis do pliku i drukowanie:
 - zestawień dla poszczególnych dostawców usług oraz wartości cech jakościowych pozwalających określić wpływ zmian wartości cech jakościowych ofert dostawców na rozłożenie potoku ruchu,
 - wykresów rozłożenia potoku ruchu ogółem oraz podróżnych wybranej kategorii dla kolejnych dostawców usług przewozowych w funkcji zmian wartości poszczególnych cech jakościowych ich ofert,
 - wykresów wrażliwości nabywców usług przewozowych na zmiany wartości cech jakościowych ofert poszczególnych dostawców.
4. Optymalizacja cen usług przewozowych z punktu widzenia wybranego dostawcy. Po realizacji obliczeń prezentowany jest wynik w formie tekstowej, który może zostać zapisany do pliku oraz wydrukowany. Możliwe jest także uzyskanie wykresu funkcji celu (przychodów danego dostawcy usług) oraz wykresu wielkości potoku ruchu w funkcji ceny za usługę. Wykresy mogą być także zapisywane do pliku oraz drukowane.

Program „Preferencje” wyposażony jest we własny, funkcjonalny edytor służący do wprowadzania, zapisywania, odczytywania oraz edycji danych (rys. 13).

Badanie preferencji pasażerów - [DANE z pliku L:\Preferencje\Aktualne pliki\Przykład exp1.dprt]

Dane Badanie preferencji Analiza wrażliwości Optymalizacja Pomoc Zakończ

DANE OGÓLNE WARIANTY CECH DOSTAWCÓW

Cechy jakościowe Dostawcy usług transportowych Nabywcy usług transportowych Ulgi dla nabywców

Liczba cech jakościowych Wprowadź domyślne nazwy

Lp.	Nazwa cechy	Ekstremum	Jednostka
C1	Koszt podróży	Minimum	PLN
C2	Bezpieczeństwo osobiste i komunikacyjne	Maksimum	punkty
C3	Czas trwania podróży	Minimum	godz.min
C4	Wygoda podróżowania	Maksimum	punkty
C5	Regularność i punktualność	Maksimum	punkty

Rys. 13. Wprowadzanie danych – blok identyfikacji cech jakościowych

W efekcie obliczeń realizowanych przez program „Preferencje” otrzymuje się zbiory wyników w trzech podstawowych zakresach, tj.:

- rozłożenia potoku ruchu,
- badania wpływu zmian wartości cech jakościowych ofert dostawców usług przewozowych na rozłożenie potoku ruchu,
- optymalizacji cen usług przewozowych z punktu widzenia wybranego dostawcy.

Wyniki uzyskiwane w poszczególnych zakresach mogą być prezentowane w postaci raportu szczegółowego lub uproszczonego. W raporcie uproszczonym, z uwagi na wymiar ekranu, mogą być porównane z wariantem bazowym dwa inne dowolnie wybrane warianty (rys. 14).

W części analitycznej program „Preferencje” umożliwia:

- badanie wpływu zmian wartości cech jakościowych ofert dostawców usług przewozowych na rozłożenie potoku ruchu pasażerskiego.
- optymalizację cen usług przewozowych z punktu widzenia wybranego dostawcy,
- analizę wrażliwości.

PRZYKŁAD 2

Weryfikacji podejścia proponowanego w omówionej metodzie, dokonano na przykładzie korytarza transportowego Warszawa – Wrocław z wykorzystaniem programu „Preferencje”. Do badań został wybrany korytarz transportowy Warszawa – Wrocław z uwagi na fakt, że funkcjonują w nim wszystkie podstawowe środki transportu, a dodatkowym atutem prowadzonych analiz jest perspektywa budowy linii szybkiego ruchu (tzw. „Y”), wprowadzająca element prognozy zachowania podróżnych oraz perspektywicznego podziału zadań przewozowych. Korytarz ten składa się z kilku, niekiedy od-

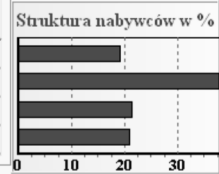
BADANIE PREFERENCJI PASAŻERÓW - L:\Preferencje\Aktualne pliki\Przykład exp1b.dprt
WARIANT BAZOWY 0; LICZBA WARIANTÓW 1

PREFERENCJE ODBIORCÓW

NABYWCY USŁUG	PREFERENCJE				
	Koszt poc	Bezpiecz	Czas trwa	Wygodą f	Regulame
Biznesmeni	1	4	5	4	5
Studenci	4	0,5	0,5	0,5	2
Seniorzy	2	5	1	3	3
Rodziny	3	5	3	4	4

POPYT NA PRZEWOZY PAS. W KORYTARZU

NABYWCY USŁUG	POPYT
Biznesmeni	504
Studenci	985
Seniorzy	558
Rodziny	546

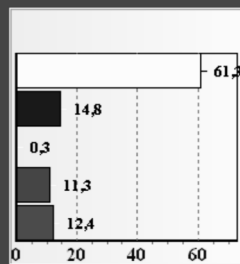
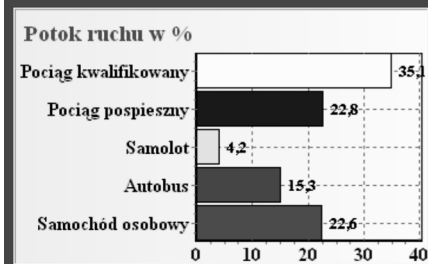


CHARAKTERYSTYKA OFERT DOSTAWCÓW

DOSTAWCY USŁUG	WARIANT 0					WARIANT 1				
	Koszt poc	Bezpiecz	Czas trwa	Wygodą f	Regulame	Koszt poc	Bezpiecz	Czas trwa	Wygodą f	Regulame
Pociąg kwalifikowany	92	85	5,1	80	82	92	85	1,5	80	82
Pociąg pospieszny	47	75	6,2	78	80	47	75	6,2	78	80
Samolot	950	92	3,2	90	88	950	92	3,2	90	88
Autobus	46	80	7,3	68	78	46	80	7,3	68	78
Samochód osobowy	70	72	4,8	74	82	70	72	4,8	74	82

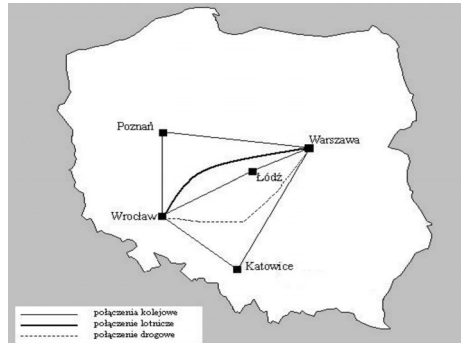
WYNIKI OBLICZEŃ - ROZŁOŻENIE POTOKU RUCHU

DOSTAWCY USŁUG	WARIANT 0					WARIANT 1				
	Biznesme	Studenci	Seniorzy	Rodziny	RAZEM	Biznesme	Studenci	Seniorzy	Rodziny	RAZEM
Pociąg kwalifikowany	221	183	239	267	910	490	251	350	499	1590
Pociąg pospieszny	46	307	129	109	590	2	280	84	18	383
Samolot	109	0	1	0	109	6	0	0	0	7
Autobus	10	256	88	42	396	0	231	55	6	292
Samochód osobowy	118	239	101	128	587	5	223	69	24	321



Rys. 14. Wyniki rozłożenia potoku ruchu – raport uproszczony z programu „Preferencje”

ległych od siebie tras przejazdu. Dotyczy to na przykład połączeń kolejowych, gdzie relacje pociągów przebiegają przez Poznań lub Katowice (pociągi *InterCity*) oraz przez Łódź i Kalisz (pociągi pospieszne). Z oczywistych względów trasy drogowe i lotnicze są jeszcze inne. Przebieg tras przejazdu w korytarzu Warszawa – Wrocław przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 15. Korytarz transportowy Warszawa – Wrocław

W rozważanym korytarzu funkcjonują następujące środki transportu (dostawcy usług):

- **kolej** (pociągi kwalifikowane IC i Ex oraz pospieszne),
- **samolot** (kilku przewoźników),
- **autobus** (kilku przewoźników),
- **samochód** (motoryzacja indywidualna).

Spośród powyżej zdefiniowanych przewoźników pasażerowie (nabywcy usług) dokonują wyboru sposobu przejazdu. Wszystkich podróżnych przemieszczających się w korytarzu Warszawa – Wrocław pogrupowano umownie na cztery wymienione uprzednio kategorie, różniące się preferencjami w zakresie wyboru środka transportu. Powyższy podział odpowiada pięciu następującym kryteriom wyboru (preferencjom):

- **czas** trwania podróży,
- **bezpieczeństwo** osobiste i komunikacyjne,
- **koszt** podróży,
- **wygoda** podróżowania,
- **regularność** i punktualność.

Opis poszczególnych cech jakościowych przedstawiono opisowo w tabelicy 7.

W obliczeniach uwzględniono mające zastosowanie w rozpatrywanym wypadku ulgi ustawowe oraz taryfowe przewoźników. Macierz ważności cech jakościowych z punktu widzenia poszczególnych nabywców usług transportowych, będących miarą preferencji danej grupy nabywców przedstawiono w tabelicy 8.

Wektor zapotrzebowania na przewóz zgłaszanego przez poszczególnych nabywców usług transportowych zawiera tablica 9.

Tablica 7

Charakterystyki ofert dostawców usług transportowych

Dostawcy usług	Cechy jakościowe usługi transportowej				
	Czas [h]	Bez-pieczęństwo*)	Koszt [zł, gr]	Wygoda*)	Punktualność*)
Pociąg kwalifikowany kl. I	5,83	4,0	131,00	3,8	4,5
Pociąg kwalifikowany kl. II	5,83	3,8	94,00	3,6	4,5
Pociąg pospieszny kl. I	7,25	3,2	77,60	3,5	4,4
Pociąg pospieszny kl. II	7,25	3,1	51,75	3,3	4,4
Samolot	2,17	4,9	440,00	3,8	4,2
Autobus	7,67	3,4	47,00	2,4	3,8
Samochód	5,75	3,8	90,00	4,9	4,1

*) Skala ocen od 0 do 5 (0 – jakość nie odpowiada pasażerom, 5 – jakość w pełni satysfakcjonująca)

Tablica 8

Wagi poszczególnych cech jakościowych

Nabywcy usług transportowych	Cechy jakościowe usługi transportowej				
	Czas	Bezpieczeństwo	Koszt	Wygoda	Punktualność
Biznesmeni	5	4	1	4	5
Studenci	0,5	0,5	6	0,2	1
Seniorzy	2	5	3	4	3
Rodziny	0,5	4	5	3	2

Tablica 9

Wektor zapotrzebowania na przewozy

Nabywcy usług transportowych	Zapotrzebowanie
Biznesmeni	904
Studenci	585
Seniorzy	458
Rodziny	646
Razem	2 593

Kolejnym krokiem w procesie obliczeniowym jest unormowanie charakterystyk ofert dostawców usług oraz ważności cech jakościowych dla nabywców usług. W ten sposób ustalono wskaźniki konkurencyjności, pozwalające na rozłożenie potoku ruchu w badanym korytarzu transportowym (tabl. 10).

Tablica 10

Rozłożenie potoku ruchu na poszczególnych dostawców dla wariantu bazowego

Dostawcy usług	Nabywcy usług transportowych			
	Biznesmeni	Studenci	Seniorzy	Rodziny
Pociąg kwalifikowany kl. I	157	17	77	103
Pociąg kwalifikowany kl. II	147	81	96	153
Pociąg pospieszny kl. I	50	78	47	103
Pociąg pospieszny kl. II	45	218	51	128
Samolot	279	0	4	0
Autobus	13	180	20	42
Samochód	212	10	163	117

Dla przedstawionych danych dokonano analizy wielu wariantów ofert dostawców związanych, np. ze zmianą wybranych parametrów na rozłożenie potoku ruchu. Przedstawione zostaną dwa przypadki. Wariant I będzie dotyczyć skutków eksploatacyjnych i ekonomicznych, związanych ze zmianą ceny benzyny o 10%, przekładającą się na koszty podróży samochodem osobowym, natomiast wariant II będzie polegać na skróceniu czasu przejazdu pociągów kwalifikowanych z obecnych 5,83 h do 2,0 h, co nastąpi po uruchomieniu linii szybkiego ruchu kolejowego w relacji Warszawa – Wrocław. Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono w tablicach 11 i 12.

Tablica 11

Rozłożenie potoku ruchu na poszczególnych dostawców dla I wariantu

Dostawcy usług	Nabywcy usług transportowych			
	Biznesmeni	Studenci	Seniorzy	Rodziny
Pociąg kwalifikowany kl. I	158	18	80	108
Pociąg kwalifikowany kl. II	147	82	100	159
Pociąg pospieszny kl. I	51	79	49	107
Pociąg pospieszny kl. II	45	219	53	132
Samolot	284	0	4	0
Autobus	14	180	21	44
Samochód	205	7	151	97

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że w wyniku wzrostu cen benzyny nastąpiło zwiększenie kosztów przejazdu samochodem osobowym na trasie Warszawa – Wrocław średnio o 10%, co w konsekwencji spowodowało, że 8% podróżnych korzystających dotychczas z samochodu zgodnie ze swoimi preferencjami (w tym dotyczącymi ceny) zmieni środek transportu. W ten sposób udział w rynku usług przewozowych wzrośnie na korzyść kolei oraz lotnictwa¹⁹ odpowiednio o 8 oraz 2%.

Tablica 12

Rozłożenie potoku ruchu na poszczególnych dostawców dla II wariantu

Dostawcy usług	Nabywcy usług transportowych			
	Biznesmeni	Studenci	Seniorzy	Rodziny
Pociąg kwalifikowany kl. I	361	26	124	121
Pociąg kwalifikowany kl. II	337	121	155	180
Pociąg pospieszny kl. I	13	70	28	91
Pociąg pospieszny kl. II	11	197	31	113
Samolot	117	0	3	0
Autobus	3	161	12	37
Samochód	62	10	105	105

W wyniku obliczeń okazuje się, że radykalne skrócenie czasu przejazdu pociągów kwalifikowanych w korytarzu transportowym Warszawa – Wrocław, dzięki uruchomieniu linii szybkiego ruchu kolejowego skutkuje znaczącymi zmianami na rynku usług przewozowych. Przewozy kolejowe zostają przejęte przez pociągi dużych szybkości, zwiększając jednocześnie udział kolei w rynku z 32% do 55%. Największe spadki przewozów (równe 58%) są przewidywane dla połączenia lotniczego.

Program „Preferencje” umożliwi również wykonywanie badania wrażliwości zachowań nabywców w wielu przekrojach. Dla badanego korytarza transportowego szczególnym badaniom podano wpływ kosztu przejazdu samochodem osobowym na zachowania komunikacyjne pasażerów. Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń, osoby korzystające z samochodów osobowych są bardziej wrażliwe na spadek kosztów niż na ich wzrost. I tak na przykład spadek o 50% kosztu przejazdu samochodem osobowym powoduje wzrost liczby jego użytkowników o nieco ponad 80%, analogiczny zaś wzrost tego kosztu skutkuje niespełna 33% ograniczeniem liczby osób korzystających z komunikacji indywidualnej.

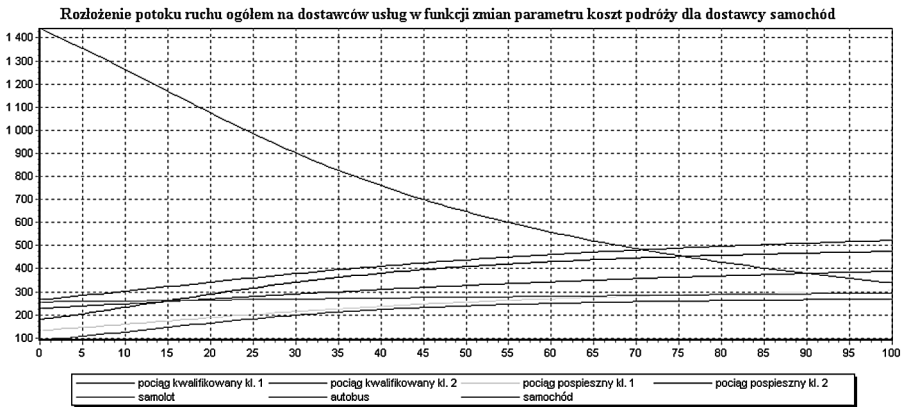
Na spadek kosztów użytkowania samochodów osobowych najbardziej wrażliwi są studenci, zaś na ich wzrost – rodziny. Porównując zmiany liczby pasażerów korzystających z pozostałych ofert przewozowych okazuje się, że najmniejszą wrażliwość na zmianę kosztu podróży samochodem osobowym wykazują przewozy komunikacją

19. W przykładowie założono, że wzrost cen benzyny nie spowoduje wzrostu ceny biletów lotniczych i autobusowych.

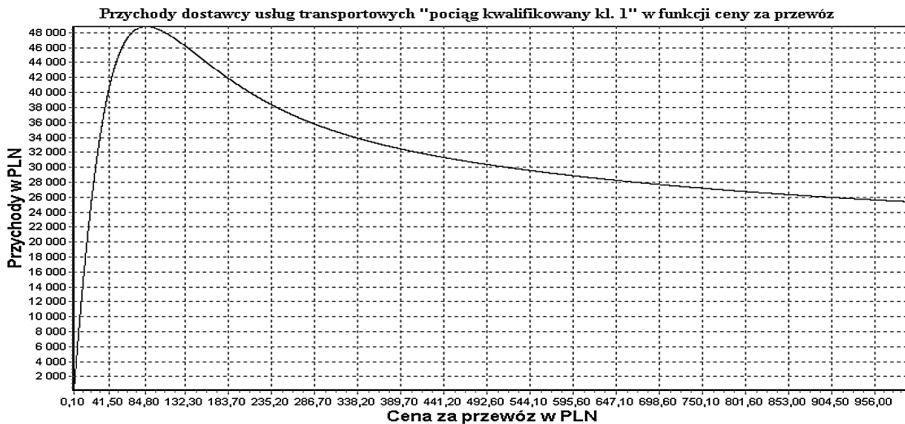
lotniczą, gdzie zmiana liczby pasażerów dla zmiany badanego parametru w granicach 50% nie przekracza 18,5%, czyli 52 pasażerów na dobę.

Wrażliwość przewozów komunikacją autobusową jest już znacznie wyższa i w granicach zmian badanego parametru $\pm 50\%$ wynosi ok. 19%. Podobnie kształtuje się wrażliwość przewozów w pociągach pospiesznych klasy 2 (ok. 22%). Natomiast wrażliwość przewozów w pociągach kwalifikowanych w wagonach klasy 1, pociągach kwalifikowanych w wagonach klasy 2 oraz w pociągach pospiesznych w wagonach klasy 1 jest porównywalna i przy zmianie parametru $\pm 50\%$ wynosi ok. 29%.

W programie „Preferencje” wizualizacja opisanych związków możliwa jest także za pomocą wykresów. Przykładowo na rysunku 16 przedstawiono wykres ukazujący wpływ zmiany ceny od wartości bliskiej zero do wartości przeciętnej – porównywalnej z ofertami innych dostawców usług (oś odciętych).

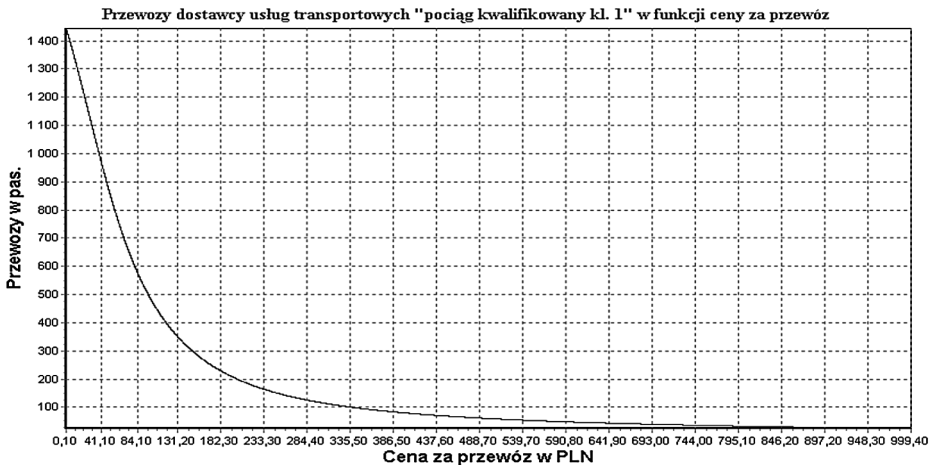


Rys. 16. Wykres rozłożenia potoku ruchu na dostawców usług w funkcji zmian kosztów podróży samochodem osobowym od kosztu minimalnego do przeciętneho



Rys. 17. Funkcja celu dla pociągów kwalifikowanych (klasa 1)

Korzystając z programu „Preferencje”, można także przeprowadzić m.in. poszukiwanie optymalnej ceny za przejazd. Badanie takie dla rozważanego korytarza Warszawa – Wrocław wykonano między innymi dla pociągów kwalifikowanych (wagony klasy 1). Przy obecnym ukształtowaniu ofert przewozowych oraz preferencjach pasażerów, optymalna cena za przejazd pociągiem kwalifikowanym w 1 klasie jest równa 86,50 PLN. Przy tej cenie z usług przewoźnika skorzysta 564 pasażerów, przynosząc przychód równy 48 786,0 PLN. Wykres funkcji celu dla pierwszego dostawcy usług przewozowych zamieszczono na rysunku 17, natomiast wykres wielkości potoku ruchu obsługiwanego przez tego dostawcę w funkcji ceny biletu zamieszczono na rysunku 18.



Rys. 18. Wielkość obsługiwanego potoku w funkcji ceny biletu dla pociągów kwalifikowanych

Jak wynika z przeprowadzonej optymalizacji, dla przewozów klasą 1 w pociągach kwalifikowanych cena optymalna jest niższa od obecnej aż o 34%. Jednak stosowanie takiej ceny, według obliczeń, pozwala osiągnąć przychód większy jedynie o niewiele ponad 5%. Należy jednak zaznaczyć, że obliczenia są realizowane przy założeniu, że pozostałe parametry są stałe. W praktyce taka zmiana ceny taryfowej prawdopodobnie spowodowałaby obniżenie cen u konkurencyjnych dostawców. A to z kolei wpłynęłoby na zachowania nabywców usług w ten sposób, że ustalony poziom przewozów dla rozpatrywanego dostawcy usług nie zostałby osiągnięty.

6. ZAKOŃCZENIE

W artykule przedstawiono ogólny zarys metod modelowania przewozów pasażerskich, ukierunkowany na omówienie klasycznego modelu czteroetapowego oraz najważniejszych zagadnień związanych z modelowaniem przewozów międzyaglomeracyjnych.

W tym kontekście przedstawiono także autorską metodę, pozwalającą na badanie wpływu preferencji nabywców pasażerskich usług transportowych na rozłożenie potoku ruchu w korytarzu transportowym. Zaproponowane podejście stanowi twórcze rozwinięcie propozycji metodologicznych, pochodzących ze źródeł literaturowych, co w szczególności dotyczy rozszerzenia zbioru parametrów kształtujących decyzje podróżnych. Odnosi się to zwłaszcza do warunków polskich oraz uwzględnia specyfikę techniczną i organizacyjną krajowego systemu transportowego.

Zaproponowana metoda badania wpływu preferencji nabywców usług na rozłożenie potoku ruchu pasażerskiego w korytarzu transportowym ma charakter uniwersalny, polegający na możliwości wykorzystania jej do badania wpływu oferty przewoźowej dostawców w aspekcie preferencji nabywców dla:

- wybranego fragmentu sieci transportowej,
- jednej lub wielu relacji przewoźowych,
- wielu wariantów ofert przewoźowych.

Przeprowadzone obliczenia z wykorzystaniem programu „Preferencje”, pozytywnie weryfikują poprawność przedstawionej metody badawczej. Potwierdzają one w szczególności tezę, że na wielkość współczynników podziału zadań przewoźowych istotny wpływ ma wartość tzw. **współczynnika konkurencyjności** danego dostawcy usług transportowych z punktu widzenia określonego nabywcy usług. Sposób obliczania tego współczynnika stanowi zasadniczy element i nowatorskie ujęcie. Zaproponowane podejście może mieć zastosowanie do badania zachowań rynkowych, a w szczególności do dalszego kształtowania systemu transportowego, np. w zakresie wariantowania decyzji inwestycyjnych zarówno modernizacyjnych jak i odnoszących się do całkowicie nowej infrastruktury transportowej (budowa linii kolejowych szybkiego ruchu, autostrad, lotnisk itp.).

BIBLIOGRAFIA

1. Abraham C.: *À la recherche de la valeur du temps perdue*, Transports n° 418, 3-4/2003.
2. Bonnel P.: *Prévoir la demande de transport*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paryż, 2004.
3. Dach Z.: *Mikroekonomia*. Wydawnictwo Naukowe SYNABA, Kraków, 2007.
4. Hensher D.A., Button K.J.: *Handbook of transport modeling*. Pergamon, Elsevier, 2000.
5. Jacyna M.: *Modelowanie wielokryterialne w zastosowaniu do oceny systemów transportowych*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza PW, 2001.
6. Jacyna M.: *Modelowanie i ocena systemów transportowych*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2009.
7. Kanafani A.: *Transportation Demand Analysis*, McGraw-Hill, 1983.
8. Ortúzar J. de D., Willumsen L. G.: *Modeling transport*, 3^o edition, John Wiley & Sons, UK, 2001.

9. Pradayrol J-P., Champeaux J.: *Études de dessertes*, „Intercités à Grande Vitesse”, Revue Générale des Chemins de Fer, 2007, nr 17.
10. Ratajczak W.: *Modelowanie sieci transportowych*, Poznań, Wydawnictwo Naukowe UAM, 1999.
11. Żurkowski A.: *Obecna i perspektywiczna oferta PKP w przewozach pasażerskich*, „Technika Transportu Szynowego”, 1998, nr 10.
12. Żurkowski A.: *Badanie wpływu preferencji nabywców usług na rozłożenie potoku ruchu pasażerskiego w korytarzu transportowym*, III Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna WT PW: Systemy logistyczne – systemy logistyczne, teoria i praktyka, Spała, 2008.
13. Żurkowski A.: *Research Influence of Preferences of Services Purchases on Selection of Supplier in Transport Channel*, The Archives of Transport, Vol. XX, No 3. Warszawa, 2008.
14. Żurowska J.: *Prognozowanie przewozów, modele, metody, przykłady*, Kraków, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2005.