

Transport Miejski i Regionalny (skrót TMiR)

Czasopismo wydawane od 2004 roku jako kontynuacja tytułu „Transport Miejski”, wydawanego od 1982 r. ISSN-1732-51-53

Redaktor naczelny

Prof. dr hab. inż. Wiesław Starowicz (Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Oddział w Krakowie)
starowicz@sitk.org.pl

Sekretarz redakcji

Mgr Janina Mrowińska (Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Oddział w Krakowie)
mrowinska@sitk.org.pl

Rada naukowo-programowa

Prof. PK dr hab. inż. Andrzej Szarata (Politechnika Krakowska) – przewodniczący, członkowie: profesor Tom Rye (Transport Research Institute, Edynburg, Wielka Brytania), prof. dr hab. inż. Antoni Szydło (Politechnika Wrocławska), profesor Igor Taran (Narodowy Górniczy Uniwersytet, Katedra Zarządzania w Transporcie, Dniepropietrowsk, Ukraina), profesor Ming Zhong (Intelligent Transport Systems Research Center, Wuhan, Chiny)

Redaktorzy tematyczni

prof. dr hab. inż. Stanisław Gaca (Politechnika Krakowska – inżynieria ruchu), dr inż. Ryszard Janecki (Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Oddział w Krakowie), mgr inż. Mariusz Szałkowski (Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne SA w Krakowie – transport miejski), prof. UE dr hab. Robert Tomanek (Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach – ekonomika transportu), dr inż. Jacek Malasek – aktualności ze świata

Redaktor statystyczny

Dr inż. Jolanta Zurowska (Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Oddział w Krakowie)

Redaktor językowy i streszczenia w języku angielskim

Mgr Agata Mierzyńska (Urząd Miasta Krakowa)

Projekt graficzny okładki

Mgr inż. arch. Lucyna Starowicz

Adres redakcji

ul. Siostrzana 11, 30-804 Kraków
tel./fax 12 658 93 74
e-mail: tmir@sitkrp.org.pl
Strona w Internecie: <http://tmir.sitk.org.pl>

Wydawca

Wydawnictwa SITK RP Sp. z o.o.
ul. Czackiego 3/5, 00-043 Warszawa
www.sitkrp.org.pl

Nakład

500 egzemplarzy

Skład

Tomasz Wojtanowicz

Druk

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji
ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom

Deklaracja o wersji pierwotnej czasopisma

Główną wersją czasopisma jest wersja papierowa
Artykuły w wersji elektronicznej są dostępne na stronie czasopisma z półrocznym opóźnieniem

Bazy indeksujące artykuły TMiR

Baza BAZTECH – <http://baztech.icm.edu.pl/>
Baza Index Copernicus – <http://indexcopernicus.com/>

Prawa autorskie

Copyright © Transport Miejski i Regionalny, 2022

Informacje dodatkowe

Za treść i formę ogłoszeń oraz reklam Redakcja nie odpowiada.

Spis treści

Maciej Kaczorek, Marianna Jacyna	3
<i>Model decyzyjny rozwoju systemu transportowego z zastosowaniem logiki rozmytej</i>	
<i>Fuzzy logic-based decision model for transport system development</i>	
Jan Aleksandrowicz	11
<i>Wielokryterialna optymalizacja przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego</i>	
<i>Multi-criteria optimization of the allocation of vehicles to urban public transport lines</i>	
Szymon Klemba	17
<i>Prognoza zużycia paliw płynnych w transporcie kolejowym do roku 2040</i>	
<i>Forecast of the consumption of liquid fuels in railway transport until 2040</i>	
Piotr Chyliński	23
<i>Prognozowanie potencjału popytowego dla miejscowości nie posiadających dostępu do sieci kolejowej</i>	
<i>Forecasting the demand potential for towns without access to the railway network</i>	

Reklama w „Transportie Miejskim i Regionalnym”

Koszt reklamy w czasopiśmie wynosi:

4. strona okładki (kolor)	5000 zł + VAT
2., 3. strona okładki (kolor)	3500 zł + VAT
jedna strona wewnątrz numeru (cz.-b.)	1500 zł + VAT
jedna strona wewnątrz numeru (kolor)	2500 zł + VAT

Cena tekstów sponsorowanych oraz wkładek tematycznych do uzgodnienia.

W przypadku reklam w kilku kolejnych numerach możliwy upust do 20%.

Zgłoszenia w sekretariacie redakcji – Janina Mrowińska, tel. (12) 658-93-74

Punktacja artykułów

Nowy Komunikat Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 31 lipca 2019 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych wraz z przypisaną liczbą punktów w obszarze transportu obejmuje tylko niektóre wydawane w Polsce anglojęzyczne czasopisma. *Transport Miejski i Regionalny* nie znajduje się na liście, ale był poprzednio punktowany zatem ma przypisane 5 punktów.

Prenumerata TMiR w 2022 roku

Cena egzemplarza – **25 zł** (zagraniczna – **12 euro** z kosztami przesyłki)
Koszt prenumeraty półrocznej – **150 zł** (zagraniczna – **72 euro** z kosztami przesyłki)
Koszt prenumeraty rocznej – **300 zł** (zagraniczna – **144 euro** z kosztami przesyłki)
Studenci – 50% zniżki (na podstawie kserokopii aktualnej legitymacji studenckiej)
Zamówienia: Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej Oddział w Krakowie
Sklep internetowy: <http://www.sitk.org.pl/sklep> (prenumerata oraz sprzedaż numerów archiwalnych)
Płatność: konto: 43 1240 4722 1111 0000 4859 0666

Streszczenia angielskie – Abstracts in English

Maciej Kaczorek, Marianna Jacyna

Fuzzy logic-based decision model for transport system development

Abstract: The selection of infrastructure projects proposed for implementation that will ensure the achievement of development objectives is one of the key planning issues. In Poland, in the area of strategic planning of infrastructure development, methods of supporting decision-making, are currently not applied comprehensively. The article aims to address this gap with Fuzzy Logic-based Decision Model for Transport System Development. The presented method allows to assess infrastructure development projects in road and rail transport against a number of criteria corresponding to the main development directions, i.e. sustainable development and quality of life. To allow practical application of fuzzy logic, the Fuzzy Logic Toolbox package available in the MATLAB environment has been employed. The developed model contains defined linguistic variables reflecting the decision-making criteria, membership functions, inference rules as well as assessment results. Model was applied in two real-life project evaluation cases of rail and road infrastructure projects. The deliberations described in this paper indicate the applicability of fuzzy logic for supporting decision-making in planning transport development.

Key words: fuzzy logic, transport planning, development policy, decision support.

Jan Aleksandrowicz

Multi-criteria optimization of the allocation of vehicles to urban public transport lines

Abstract: The article is about multi-criteria optimization of allocation of vehicles to urban public transport lines. The paper presents a proposal of a four-criteria model applicable to urban public transport systems served by electric and diesel vehicles. The paper defines the current requirements for public transport and the conditions for allocation of vehicles to lines. There are presented limitations of the decision-making process for vehicle allocation and four optimization criteria are indicated (travel comfort, energy consumption of vehicles, harmful substances emission and expectations of the urban public transport organizer). The article presents and explains the developed optimization model for vehicle allocation with constraints. The paper presents the results of model testing and practical application using the author's program in the MATLAB environment. The article concludes with deductions from the work carried out and a plan for further work on the topic.

Key words: vehicle allocation, optimization model, urban public transport.

Szymon Klemba

Forecast of the consumption of liquid fuels in railway transport until 2040

Abstract: The subject of the article is the preparation of forecasts of the energy value of used diesel oil in railway transport in Poland. The forecast was made using an index model, which took into account variables such as the electrification of the railway network, use of diesel rolling stock on electrified lines, the replacement ratio of diesel rolling stock with zero-emission vehicles or improvement of the efficiency of railway transport. The model was based on public statistical data, as well as specially captured data from the national railway infrastructure manager and railway operators. The forecast was made for three scenarios: "zero" scenario, scenario A "without additional actions" and scenario B "with additional actions". The results of the forecasts indicate that in the most optimistic B scenario from the point of view of reducing the consumption of fuels, the demand for such fuels may decrease by 31% until 2040. According to the more likely scenario A, fuel consumption will increase slightly by 2040. The electrification of the railway network is only one of the means of eliminating diesel traction. The reduction of fuel consumption requires significant changes in the rolling stock market, and an implementation of zero-emission vehicles.

Key words: railway transport, fuels, emissions, forecasting.

Piotr Chyliński

Forecasting the demand potential for towns without access to the railway network

Abstract: The article presents the economic background of the closure of passenger service by rail in some county towns at the turn of the 1990s and the first decade of the 21st century, and the chances and opportunities for their reintroduction into the rail transport network. In connection with the process of realisation of pre-project documentation for the Kolej Plus programme including the restoration of passenger connections, the problem of forecasting the demand potential in railway transport was discussed. A simple method of estimating the potential was presented for towns, which have never had such a connection or have lost it as a result of liquidation of local lines.

Key words: rail transport, demand, demand potential.

Konferencja naukowo-techniczna

NOWOCZESNE TECHNOLOGIE I SYSTEMY ZARZĄDZANIA W TRANSPORCIE SZYNOWYM NOWKOL

Zakopane, Hotel Nosalowy Dwór Resort & Spa, 30 listopada – 02 grudnia 2022 roku

Organizatorzy

Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej Oddział w Krakowie

we współpracy z

Politechniką Krakowską – Katedrą Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.,
Małopolską Okręgową Izbą Inżynierów Budownictwa w Krakowie

Kontakt: Biuro Oddziału SITKRP w Krakowie, tel. 12 658 93 74, e-mail: krakow@sitkrp.org.pl

MACIEJ KACZOREK

dr inż., ORCID: 0000-0001-7973-1110,
Politechnika Warszawska,
Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75,
00-662 Warszawa, e-mail:
maciej.kaczorek@pw.edu.pl

MARIANNA JACYNA

prof. dr hab. inż., ORCID: 0000-0002-
7582-4536, Politechnika Warszawska,
Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75,
00-662 Warszawa, e-mail:
marianna.jacyna@pw.edu.pl

Model decyzyjny rozwoju systemu transportowego z zastosowaniem logiki rozmytej^{1,2}

Streszczenie: Wybór proponowanych do realizacji projektów infrastrukturalnych, które zapewnią osiągnięcie celów rozwojowych, jest jednym z kluczowych zagadnień planowania. W Polsce, w obszarze strategicznego planowania rozwoju infrastruktury transportowej, metody wspomagania decyzji nie są kompleksowo stosowane. Artykuł ten ma na celu wypełnienie tej luki za pomocą modelu decyzyjnego rozwoju transportu z zastosowaniem logiki rozmytej. Zaprezentowana metoda umożliwia ocenę projektów kolejowych i drogowych względem grupy kryteriów odpowiadających głównym paradygmatom rozwoju, tj. zrównoważonemu rozwojowi i jakości życia. W celu praktycznego zastosowania logiki rozmytej wykorzystano moduł *Fuzzy Logic Toolbox* dostępny w pakiecie MATLAB. Model rozwoju obejmuje definicję zmiennych lingwistycznych odpowiadających kryteriom decyzyjnym, funkcje przynależności, reguły wnioskowania oraz ocenę wyników. Model został zastosowany do oceny dwóch rzeczywistych projektów infrastrukturalnych w zakresie linii kolejowej i drogi. Rozważania przeprowadzone w tym artykule wskazują na przydatność logiki rozmytej do wspomagania decyzji w planowaniu rozwoju transportu.

Słowa kluczowe: logika rozmyta, planowanie transportu, polityka rozwoju, wspomaganie decyzji.

Wprowadzenie

Ostatnie dwie dekady badań i analiz wskazują jednoznacznie, że głównym paradygmatem współczesnego rozwoju jest zrównoważony rozwój [20], w tym jakość życia [4], [28]. W zakresie systemu transportowego i jego infrastruktury kształtowanie zrównoważonego rozwoju i jakości życia wiąże się z jednej strony z zapewnieniem realizacji prognozowanych potrzeb transportowych oraz harmonizacji standardów infrastruktury w UE, z drugiej zaś z zapewnieniem osiągnięcia celów ekologicznych [13], [28].

Rozważania dotyczące rozwoju transportu wskazują na planowanie jako jego najistotniejszy aspekt. Planowanie polega na określaniu ram działania ukierunkowanego na osiągnięcie konkretnych celów rozwojowych. W skali ogólnokrajowej w zakresie planowania rozwoju transportu wdrażanie planów do realizacji odbywa się m.in. poprzez przygotowanie i realizację projektów infrastrukturalnych, tj. projektów budowy, rozbudowy i przebudowy infrastruktury transportowej. Kluczową kwestią planowania jest zatem wybieranie do realizacji tych projektów infrastrukturalnych, które będą przyczyniały się do osiągnięcia celów rozwojowych.

W Polsce, w obszarze strategicznego planowania rozwoju infrastruktury, nie są obecnie kompleksowo stosowane metody wspomagania decyzji, których celem byłby wybór do realiza-

cji projektów infrastrukturalnych uwzględniający stopień ich zgodności z celami strategicznymi [18].

Mając na uwadze powyższe, autorzy artykułu przedstawili propozycję modelu decyzyjnego rozwoju systemu transportowego z zastosowaniem logiki rozmytej. W pierwszej części dokonano analizy literatury w obszarze planowania rozwoju systemów transportowych, wskazując na główne dokumenty strategiczne w tym zakresie oraz narzędzia i metody wspomagania decyzji wykorzystywane w różnych obszarach planowania rozwoju lub zmian w infrastrukturze systemów transportowych. W kolejnej części przedstawiono istotne elementy modelu opartego na logice rozmytej, przy czym przyjęto założenie, że model będzie wspomagał decyzje na poziomie strategicznym. Ostatnia część artykułu to weryfikacja zaproponowanego podejścia na danych rzeczywistych dotyczących dwóch projektów: kolejowego i drogowego.

Planowanie rozwoju systemów transportowych w literaturze – wybrane zagadnienia

Polityka rozwoju w dokumentach strategicznych

Planowanie rozwoju infrastruktury jest zadaniem wieloaspektowym, wymagającym ujęcia zagadnień technicznych, ekonomicznych i środowiskowych, w tym społecznych [7]. Tak szerokie ujęcie zagadnienia oraz fakt, iż dotyczy ono głównie infrastruktury zarządzanej przez podmioty rządowe lub samorządowe powoduje, iż staje się ono domeną zarządzania publicznego.

Ze względu na szerokie spektrum zagadnień problem planowania rozwoju systemów transportowych omawiany jest przez wielu badaczy, nie tylko w ujęciu stricte naukowym lub technicznym, ale również badawczo-aplikacyjnym. Autorzy artykułu skupili się przede wszystkim na dokumentach strategicznych omawiających problem planowania infrastruktury transportowej oraz na metodach i narzędziach wspomagających decydenta w podejmowaniu decyzji.

W Polsce planowanie rozwoju prowadzone jest w oparciu o Ustawę o zasadach prowadzenia polityki rozwoju [27], która **politykę rozwoju** definiuje jako „zespół wzajemnie powiązanych działań podejmowanych i realizowanych w celu zapewnienia trwałego i zrównoważonego rozwoju kraju [...]”. Nadto ustawa [27] wymaga, aby strategie zawierały sprecyzowane cele rozwojowe.

Do głównych dokumentów strategicznych obejmujących problematykę planowania rozwoju, w tym planowania rozwoju infrastruktury transportowej, można zaliczyć:

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2022.

² Wkład autorów w publikację: M. Kaczorek – 50%, M. Jacyna – 50%.

- Długookresową Strategię Rozwoju Kraju – Polska 2030. Trzecia fala nowoczesności [17],
- Strategię na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030) [19],
- Białą Księgę Komisji Europejskiej z roku 2011 dot. sektora transportu [13],
- Strategię Zrównoważonego Rozwoju Transportu [18].

Przegląd dokumentów strategicznych dotyczących planowania rozwoju infrastruktury transportu w Polsce [12], [18], [19] oraz własne obserwacje zawodowe autorów wskazują na brak szerokiego wykorzystania metod i narzędzi wspomagania decyzji w trakcie planowania w skali kraju. Odnotować należy punktowe zastosowanie takich narzędzi, chociażby w zakresie prognoz popytu na transport [18], w zakresie wskaźników dostępności transportowej [14], [18] czy analizy wielokryterialnej. Obserwacja obecnej praktyki w zakresie planowania infrastruktury transportowej w Polsce wskazuje, iż zwiększeniu zasięgu terytorialnego planowania towarzyszy zmniejszenie poziomu szczegółowości prowadzonych prac analitycznych [25].

Metody i narzędzia wspomagania decyzji planowania rozwoju

Proces planowania, ze względu na charakter projektów infrastrukturalnych obejmujący zagadnienia techniczne, społeczne, gospodarcze, środowiskowe czy polityczne [7], wyklucza przyjęcie jednego kryterium optymalizacji. W tej sytuacji nie jest możliwe znalezienie jednego rozwiązania optymalnego z punktu widzenia wszystkich uwarunkowań, co jest kluczową trudnością w podejmowaniu decyzji.

Systemy wspomagania decyzji można podzielić na dwie zasadnicze grupy: oparte na analizie pojedynczego kryterium decyzyjnego oraz uwzględniające wiele kryteriów. Do pierwszego rodzaju analizy można zaliczyć analizę kosztów i korzyści (AKK). Jest to metoda ilościowa bazująca na kwantyfikacji i monetyzacji wszystkich ocenianych aspektów [1]. AKK jest szeroko stosowana w projektach infrastruktury transportowej do oceny i porównywania wariantów realizacji projektu. W tym obszarze ma zdecydowaną ugruntowaną pozycję pod względem metodycznym [5], [8] oraz jest obowiązkowa przy finansowaniu UE i Banku Światowego [5], [22]. Zauważa się jednak, że w przypadku wielu projektów transportowych ocena jednokryterialna może być nieadekwatna oraz praktycznie wyklucza możliwość odzworowania priorytetów strategicznych państwa [26].

W przypadku ocen dotyczących złożonych problemów decyzyjnych problem decyzyjny jest zdefiniowany przez więcej niż jedno kryterium. W takiej sytuacji cele mogą też być od siebie uzależnione (również nieliniowo [7]) czy wręcz ze sobą sprzeczne [1]. Do tego rodzaju systemów wspomagania decyzji można zaliczyć analizę wielokryterialną (AWK) [1]. Metoda ta pozwala wyznaczyć rozwiązania kompromisowe [31], a więc takie, w przypadku których nie można ustalić rozwiązania korzystniejszego w odniesieniu do jednego kryterium, bez pogorszenia w odniesieniu do innego kryterium. W tym sensie w AWK nie ma jednego rozwiązania,

które będzie najkorzystniejsze z punktu widzenia wszystkich kryteriów [26], co jest zgodne z naturą problemów decyzyjnych w planowaniu transportu.

Na szczególną uwagę w zakresie systemów wspomagania decyzji w planowaniu transportu zasługuje modelowanie systemów transportowych. Autorzy wielu prac np. [21], [28] zgodnie twierdzą, że prognozowanie przyszłych wielkości przewozów jest podstawowym zagadnieniem planowania transportu. Modele transportowe obejmujące zasięgiem całą Polskę wskazano w tabeli 1.

Tabela 1

Modele transportowe obejmujące zasięgiem terytorium Polski		
Nazwa modelu	Gestor	Źródło
Pasażerski Model Transportowy	Centralny Port Komunikacyjny sp. z o.o.	[2]
Model Ruchu i Kolejowy Model Towarowy	PKP Polskie Linie Kolejowe SA	[9], [15]
Intermodalny Krajowy Model Ruchu INMOP 3	Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad	[23]
Krajowy Model Ruchu	Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad	[23]
EMITRANSYS	Politechnika Warszawska, Wydział Transportu	[6]
Zintegrowany Model Ruchu	Centrum Unijnych Projektów Transportowych	[3]

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2], [3], [6], [9], [15], [23]

Logika rozmyta jako narzędzie wspomagania decyzji planowania rozwoju

W ujęciu matematycznym logika rozmyta jest uogólnieniem logiki dwuwartościowej, pozwalającej na określenie stopnia, w jakim dane zdanie jest prawdziwe [25]. Łączy się ona z pojęciem zbiorów rozmytych L. Zadeha [30]. Określają one klasy obiektów bez ustalania jednoznacznych (ostrzych) granic zbiorów. Dzięki temu elementy do danego zbioru mogą przynależeć w określonym stopniu.

Należy zauważyć, że logika rozmyta jest zaliczana do tzw. *soft computing*, co oznacza zaakceptowanie braku precyzji i częściowej prawdy [25]. Naśladuje ona ludzki sposób wnioskowania i pozwala uzyskać korzystny kompromis między precyzją a istotnością zagadnień.

Zastosowanie logiki rozmytej w modelach wielu obszarów badań pozwala na stosowanie zmiennych lingwistycznych, tj. takich, których wartości są wyrażone nie liczbowo, lecz za pomocą słów (w języku naturalnym). W przypadku modelowania rozwoju systemu transportowego na poziomie strategicznym jest to szczególnie korzystne. Cele rozwojowe są bowiem wyrażone w języku naturalnym, co jest mniej precyzyjne, jednak bliższe ludzkiej percepcji i komunikacji.

Kluczowym elementem systemu logiki rozmytej jest stosowanie reguł wnioskowania rozmytego. Skonstruowane są one w oparciu o wartości lingwistyczne i umożliwiają odzworowanie wiedzy i doświadczenia ekspertów. Budowa reguł wnioskowania nie jest oryginalną cechą systemów logiki rozmytej. Charakterystyczna jest jednak możliwość zastosowania poprzedników i następników wyrażonych w języku naturalnym. Możliwe jest zatem de facto dokonywanie operacji matematycznych na słowach, które są nieprecyzyjne.

Związki przyczynowo skutkowe w logice rozmytej są formułowane za pomocą reguł o konstrukcji [24]:

IF x_1 jest A AND x_2 jest B THEN y jest C

gdzie:

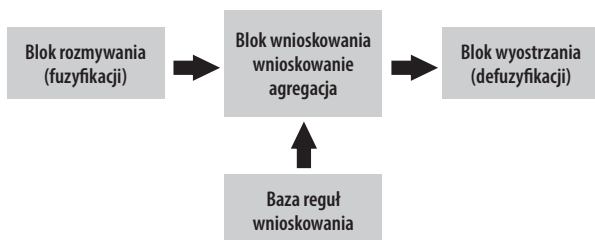
x_1, x_2, y – zmienne lingwistyczne wyrażone w języku naturalnym,

A, B, C – terminy lingwistyczne,

AND, THEN – operacje mnogościowe na funkcjach przynależności.

Zaproponowany system wielokryterialnego wspomaganie decyzji oparty na logice rozmytej składa się z następujących elementów [24], [25] (rys.1):

- blok rozmywania (fuzyfikacji),
- blok wiedzy – baza reguł wnioskowania,
- blok wnioskowania,
- blok wyostrzania (defuzyfikacji).



Rys. 1. Schemat rozmytego systemu wspomaganie decyzji
Źródło: opracowanie własne na podstawie [24], [25]

Model planowania rozwoju i jego elementy

Założenia wstępne

Strukturalnie model będzie składał się z bloku celów strategicznych, który odpowiada dokumentom strategicznym określającym cele rozwojowe. Następnie dokonany zostanie podział na trzy tematyczne obszary definiowania celów. Obszary te reprezentują trzy główne strefy wpływu infrastruktury transportu, tj. oddziaływanie na gospodarkę (w tym transport), oddziaływanie na środowisko oraz oddziaływanie na społeczeństwo. Celom w danym obszarze przyporządkowane zostaną kryteria decyzyjne.

Założono, że model będzie oparty na wnioskowaniu rozmytym, w związku z tym kryteria decyzyjne zostaną opisane przez zmienne lingwistyczne, którym przyporządkowane będą poszczególne terminy lingwistyczne i ich funkcje przynależności. Pozwoli to na metamatematyczne opisanie celów strategicznych wyrażonych semantycznie. Na tym etapie opracowana została również baza reguł wnioskowania definiująca sposób podejmowania decyzji przez decydenta.

Szerszy opis modelu przedstawiony jest w pracach [10], [11].

Kryteria decyzyjne a struktura funkcjonalna modelu

Z analizy dokumentów strategicznych [18], [19], a także z doświadczeń zawodowych autorów wynika, że decyzje

w obszarze planowania strategicznego opierają się często na podejściu eksperckim lub są motywowane politycznie. Niekoniecznie oznacza to, że są one pozbawione podstaw merytorycznych i zasadności, jednak nie sposób jest wiarygodnie stwierdzić, że są obiektywne i adekwatne do stanu wiedzy oraz, że najlepiej wpisują się w zdefiniowane cele rozwojowe. W tej sytuacji wskazano na logikę rozmytą jako narzędzie przydatne do wyboru projektów rozwoju infrastruktury transportowej w sytuacji, w której cele rozwojowe sformułowane są w języku naturalnym.

Poszukując kryteriów podejmowania decyzji w planowaniu rozwoju infrastruktury, należy zatem uwzględnić wspomniane wcześniej cele rozwojowe obejmujące zrównoważony rozwój i jakość życia. Do istotnych cech procesu planowania na poziomie strategicznym można zaliczyć ogólne sformułowanie celów oraz skąpy zasób informacji na temat planowanych działań. Można zatem wskazać na trzy zasadnicze obszary formułowania celów [16], [29]:

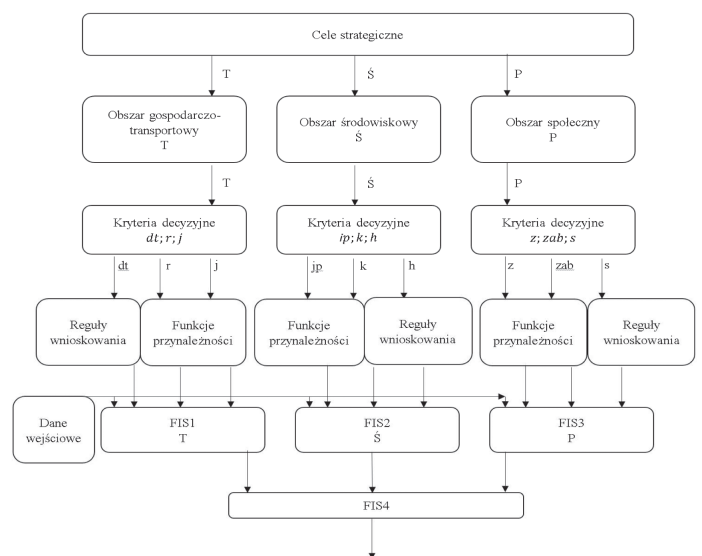
- gospodarczy (ekonomiczny),
- środowiskowy,
- społeczny.

Mając na uwadze cele strategiczne rozwoju infrastruktury transportowej, sformułowano kryteria podejmowania decyzji: dostępność transportową (dt), popyt na transport (ruch) (r), jakość infrastruktury (j), ingerencję w przyrodę (ip), wpływ na klimat (k), hałas (h), ingerencję w zabudowę (z), oddziaływanie na zabytki (zab), oddziaływanie na społeczeństwo (s).

Dla potrzeb formalnego zapisu powyższe kryteria zapisano jako zbiór KR o elementach:

$$KR = \{kr: kr = dt, r, j, ip, k, h, z, zab, s\}.$$

W ujęciu funkcjonalnym model wspomaganie decyzji w planowaniu rozwoju infrastruktury transportu będzie składał się z elementów przedstawionych na rysunku 2.



Rys. 2. Struktura funkcjonalna modelu
Źródło: opracowanie własne

Blok danych wejściowych z charakterystykami poszczególnych projektów dostarcza danych wejściowych do trzech modułów wnioskowania FIS₁, FIS₂ i FIS₃. Dane wynikowe z poszczególnych modułów wnioskowania odpowiadających kolejnym obszarom definiowania celów zwracają dane wyjściowe. Dane wyjściowe są następnie przekazywane na wejście modułu wnioskowania FIS₄ odpowiadającego za ocenę syntetyczną.

Zmienne lingwistyczne oraz reguły wnioskowania

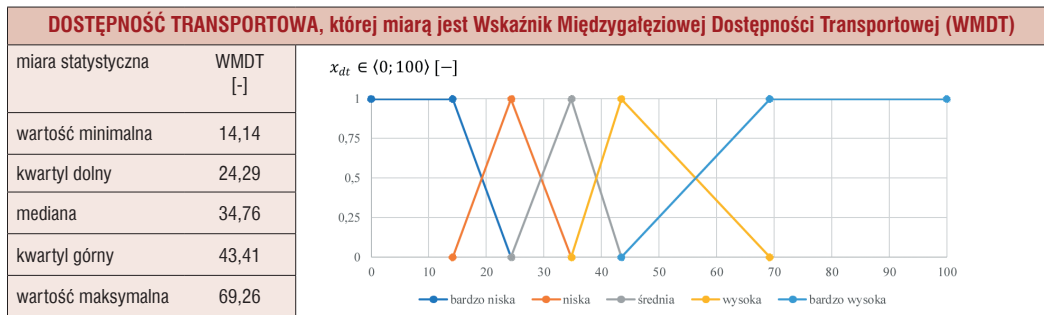
Każdemu zdefiniowanemu wcześniej kryterium decyzyjnemu odpowiada zmienna lingwistyczna pozwalająca dokonać odwzorowania uwarunkowań określonych w języku naturalnym na wartości liczbowe. Podczas definiowania kryteriów określono ich wartość minimalną oraz wartość maksymalną.

Kluczowym zagadnieniem formułowania zmiennych lingwistycznych jest odpowiedni dobór kształtu funkcji przynależności dla terminów lingwistycznych poszczegól-

nych zmiennych. Mając na uwadze, że model ma być wykorzystywany do ocen strategicznych, zastosowano funkcje o podstawowych kształtach, tj. trójkątnych i trapezowych. W rozpatrywanym przypadku mają one tę zaletę, że mogą być niesymetryczne. W przypadku zmiennych jakość infrastruktury i oddziaływanie na społeczeństwo zastosowano funkcje nieciągłe – ze względu na zastosowaną w tych kryteriach ocenę punktową.

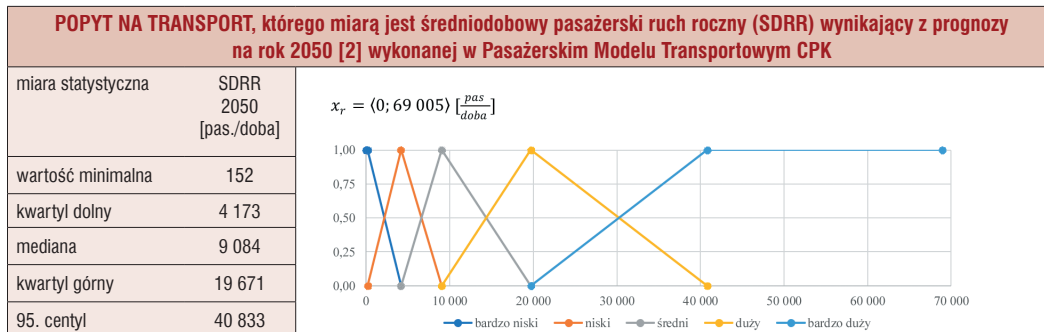
Do wyznaczenia parametrów funkcji przynależności posłużono się analizą statystyczną prognozowanych wartości wskaźników WMDT i SDRR oraz danych ze zrealizowanych projektów. Niesymetryczny kształt funkcji przynależności korzystniej odpowiada nieliniowej zmienności wartości kryteriów. Funkcje przynależności dla zmiennych lingwistycznych modułu wnioskującego FIS₁ przedstawiono w tabelach 2–4. Kompletny opis kryteriów i odpowiadających im zmiennych lingwistycznych przedstawiony jest w pracach [10], [11].

Tabela 2



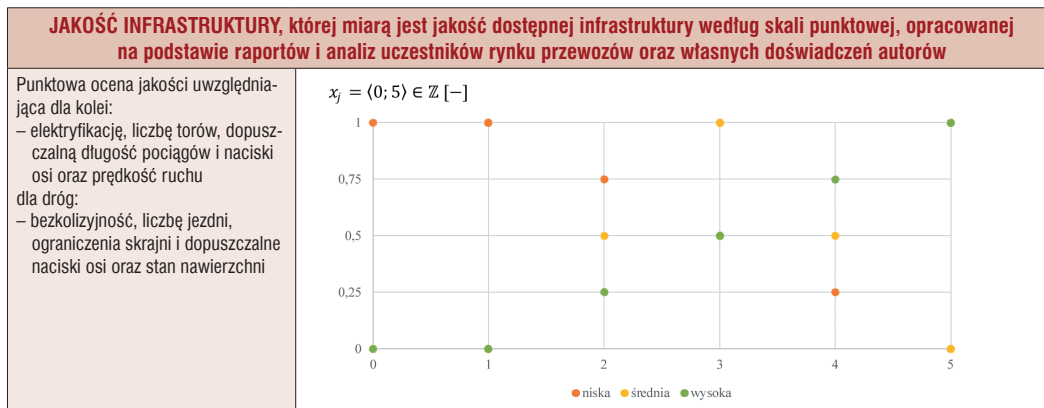
Źródło: opracowanie własne

Tabela 3



Źródło: opracowanie własne

Tabela 4



Źródło: opracowanie własne

Arkusz odpowiedzi: obszar środowisko						1	2
L.p.	Ingerencja w przyrodę jest	Wpływ na klimat jest	Hałas jest	Stożek negatywnego oddziaływania na środowisko jest			
48	niska	bardzo duży	średni	duży		duży	
49	niska	bardzo duży	duży	bardzo duży		duży	
50	niska	bardzo duży	bardzo duży	bardzo duży		bardzo duży	
51	średnia	bardzo niski	bardzo mały	umiarkowany		umiarkowany	
52	średnia	bardzo niski	mały	umiarkowany		umiarkowany	
53	średnia	bardzo niski	średni	umiarkowany		umiarkowany	
54	średnia	bardzo niski	duży	duży		duży	
55	średnia	bardzo niski	bardzo duży	duży		bardzo duży	
56	średnia	niski	bardzo mały	umiarkowany		umiarkowany	
57	średnia	niski	mały	umiarkowany		umiarkowany	
58	średnia	niski	średni	umiarkowany		umiarkowany	
59	średnia	niski	duży	duży		duży	
60	średnia	niski	bardzo duży	duży		bardzo duży	
61	średnia	średni	bardzo mały	umiarkowany		umiarkowany	
62	średnia	średni	mały	umiarkowany		umiarkowany	
63	średnia	średni	średni	duży		duży	
64	średnia	średni	duży	duży		duży	
65	średnia	średni	bardzo duży	duży		bardzo duży	
66	średnia	duży	bardzo mały	umiarkowany		umiarkowany	
67	średnia	duży	mały	duży		umiarkowany	
68	średnia	duży	średni	duży		umiarkowany	
69	średnia	duży	duży	duży		duży	

Rys. 3. Fragment arkusza odpowiedzi ekspertów
 Źródło: opracowanie własne

Reguły wnioskowania zostały określone na podstawie badania przeprowadzonego wśród ekspertów. Udzielali oni odpowiedzi w arkuszach (rys. 3) w czterech grupach, odpowiadających modułom wnioskowania rozmytego. Do grup eksperci zostali zakwalifikowani stosownie do swojego wykształcenia i doświadczenia zawodowego. Odpowiedzi udzielane były poprzez wybór z listy wniosku dla zdefiniowanych poprzedników reguły.

Zgodnie z założeniami opracowano łącznie 400 reguł wnioskowania, w tym:

- 75 reguł dla FIS1,
- 125 reguł dla FIS2,
- 75 reguł dla FIS3,
- 125 reguł dla FIS4.

Implementacja modelu w środowisku MATLAB

Do komputerowej implementacji modelu, tj. opracowania systemu ekspertowego, wykorzystano środowisko MATLAB w wersji R2021b, w ramach którego zastosowano dodatek logiki rozmytej (ang. Fuzzy Logic Toolbox). *Fuzzy Logic Toolbox* dla MATLAB jest jednym ze środowisk pozwalającym na stworzenie systemu ekspertowego umożliwiającego modelowanie złożonych systemów behawioralnych przy użyciu prostych zasad logicznych, które można zaadoptować do wnioskowania rozmytego. Na rysunku 4 przedstawiono wygląd oprogramowania po przygotowaniu modelu dla jednego z wybranych modułów wnioskujących (FIS1).

Wyniki zamodelowania w oprogramowaniu zmiennych lingwistycznych, ich funkcji przynależności oraz reguł wnioskowania przedstawiono, dla wybranych modułów wnioskujących, w postaci wykresów powierzchniowych.

Weryfikacja modelu na danych rzeczywistych

Do analizy wybrano po cztery projekty rozwoju infrastruktury kolejowej i drogowej. Dla wszystkich projektów przygotowano dane określające ich charakterystykę, tj. wartości zmiennych lingwistycznych. Poniżej przedstawiono bardziej szczegółowo wyniki dla jednego z projektów. Dane dla projektu pn. *Przebudowa drogi krajowej nr 7 na odcinku Kraków (A4) – Myślenice* umieszczono w tabeli 11.

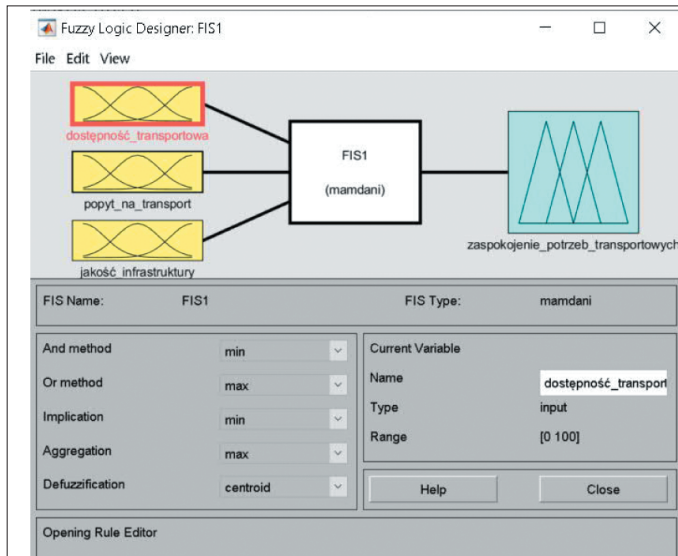
Ustalenie poszczególnych wartości obejmowało różne zdefiniowane źródła. Przykładowo, ustalenia wartości kryterium hałas zostało przeprowadzone na podstawie analizy przestrzennej w oprogramowaniu GIS. Zobrazowanie zabudowy narażonej na oddziaływanie akustyczne przedstawiono na rysunku 6.

Dane te wprowadzono do modelu i uzyskano wyniki modelowania dla poszczególnych modułów wnioskujących, które przedstawiono na rysunku 7.

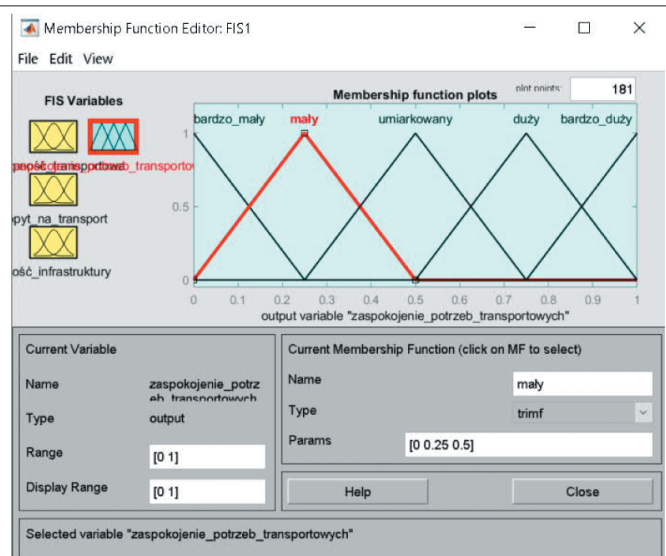
Tabela 11

Wartości kryteriów decyzyjnych dla projektu <i>Przebudowa drogi krajowej nr 7 na odcinku Kraków (A4) – Myślenice</i>		
Nazwa kryterium	Jednostka	Wartość
Dostępność transportowa	[-]	51,33
Popyt na transport	[pas./doba]	46 000
Jakość infrastruktury	[-]	3
Ingerencja w przyrodę	[-]	0,00
Wpływ na klimat	(kgCO ₂ e)/km	6 026
Hałas	(szt.)/km	10 (71)
Ingerencja w zabudowę	ha/km	0,36
Oddziaływanie na zabytki	[szt.]	0,18
Oddziaływanie na społeczeństwo	[-]	2

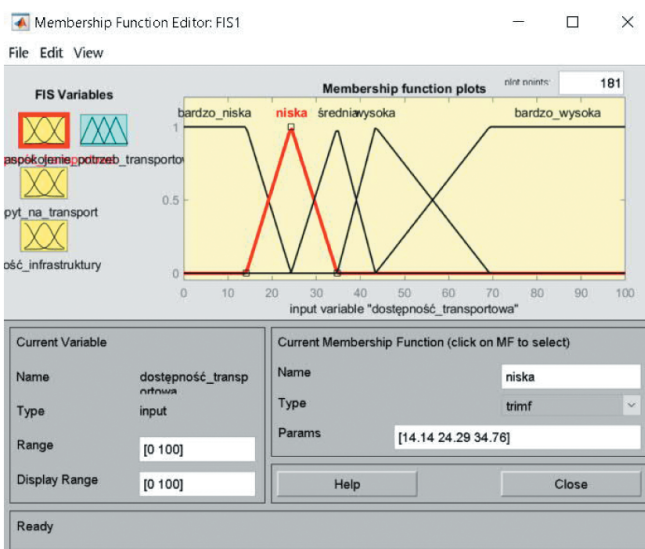
Źródło: opracowanie własne



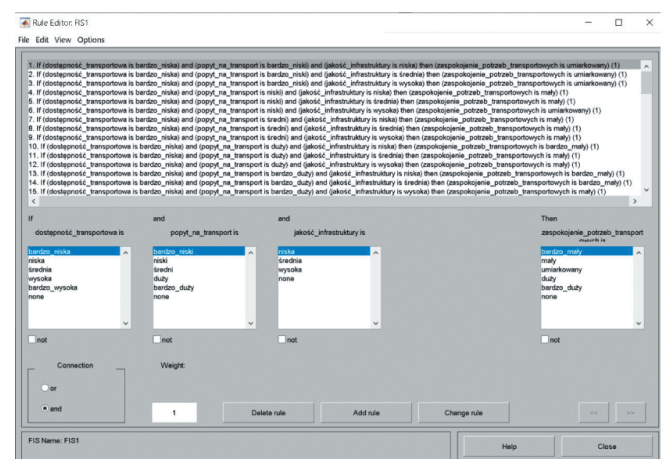
Widok okna dialogowego projektowania systemu logiki rozmytej dla modułu FIS₁



Widok okna dialogowego edytora funkcji przynależności dla zmiennej lingwistycznej wyjściowej *stopień zaspokojenia potrzeb transportowych*

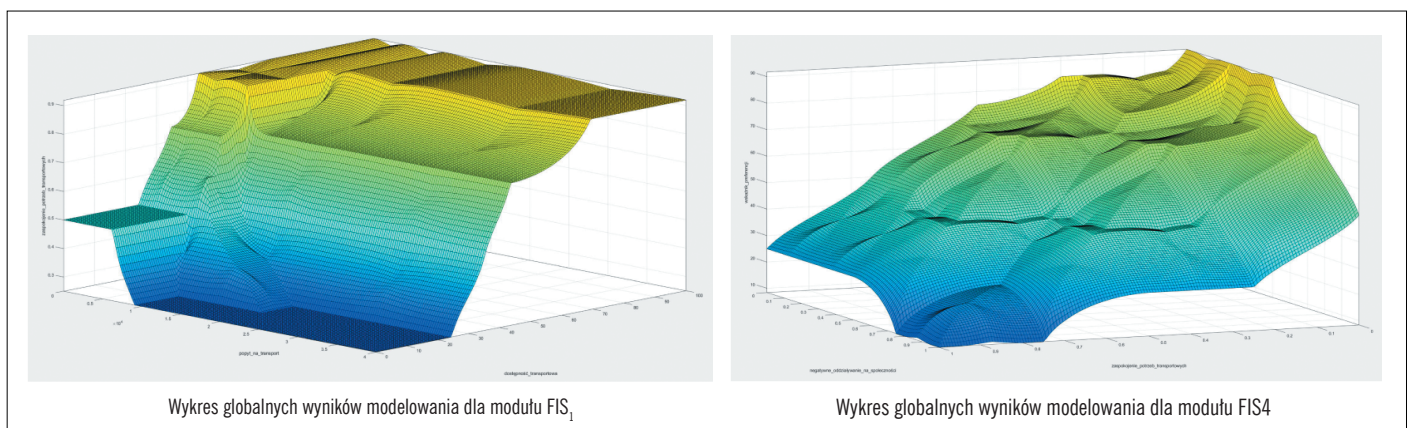


Widok okna dialogowego edytora funkcji przynależności dla zmiennej lingwistycznej *dostępność transportowa*



Widok okna dialogowego edytora reguł dla modułu FIS₁

Rys. 4. Wygląd oprogramowania dla jednego z modułów wnioskowania
Źródło: opracowanie własne



Wykres globalnych wyników modelowania dla modułu FIS₁

Wykres globalnych wyników modelowania dla modułu FIS₄

Rys. 5. Wykresy globalnych wyników modelowania dla wybranych modułów
Źródło: opracowanie własne

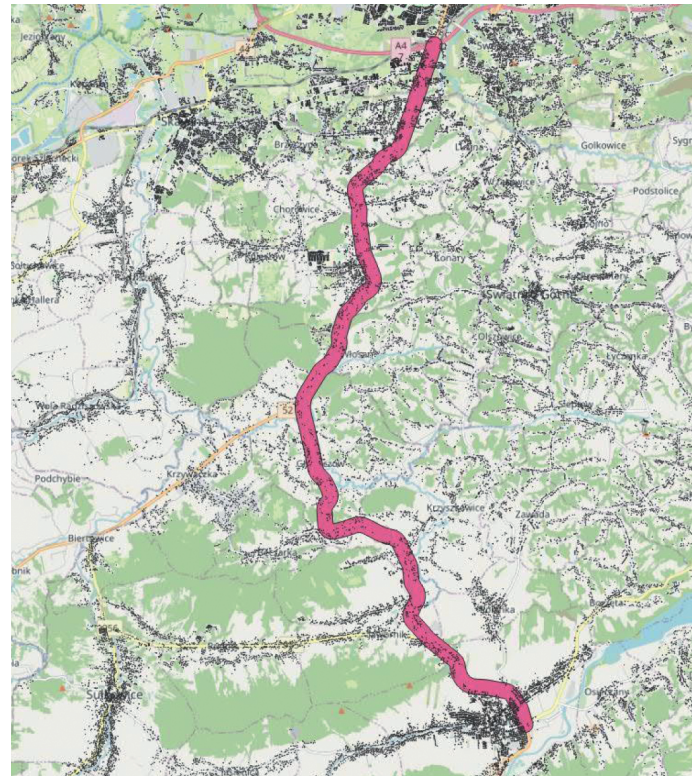
W tożsamy sposób uzyskano wyniki dla pozostałych projektów. Ostatnim etapem metody jest uszeregowanie projektów według preferencji decydenta. Zgodnie z założeniami globalny wskaźnik preferencji decydenta przyjmuje wartości od 0 do 100, gdzie 100 reprezentuje najwyższą preferencję. Dla porównania w tabeli przedstawiono wyniki modelowania dla dwóch projektów (tab. 12):

1. Przebudowa drogi krajowej nr 7 na odcinku Kraków (A4) – Myślenice,
2. Budowa linii kolejowej na odcinku Kraków Swozowice – Myślenice

Tabela 12

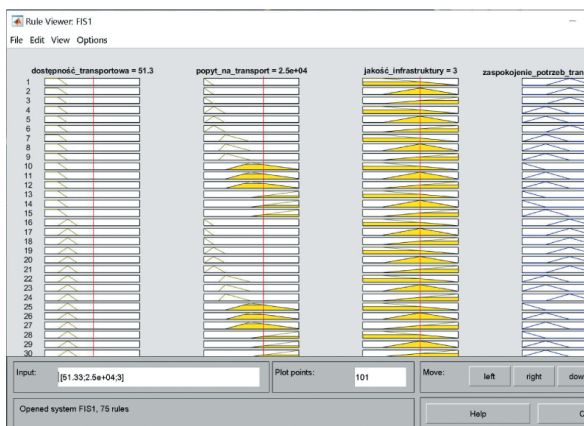
Wyniki oceny preferencji decydenta					
Lp.	Nazwa projektu	stopień zaspokojenia potrzeb transportowych	stopień negatywnego oddziaływania na środowisko	stopień negatywnego oddziaływania na społeczności lokalne	globalny wskaźnik preferencji decydenta
1.	Budowa linii kolejowej na odcinku Kraków Swozowice – Myślenice	0,500	0,324	0,561	42,7
2.	Przebudowa drogi krajowej nr 7 na odcinku Kraków (A4) – Myślenice	0,624	0,920	0,806	21,8

Źródło: opracowanie własne

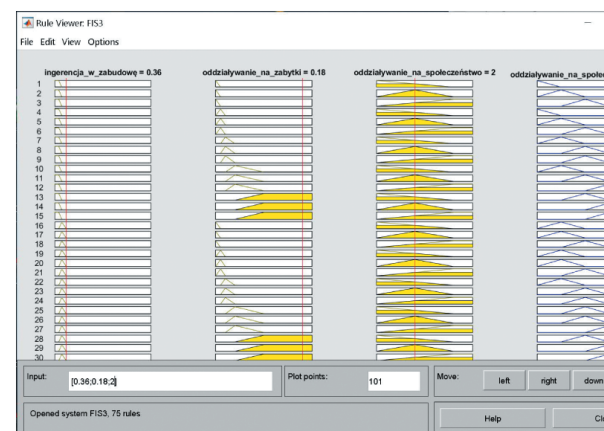


Rys. 6. Zabudowa mieszkaniowa narażona na hałas

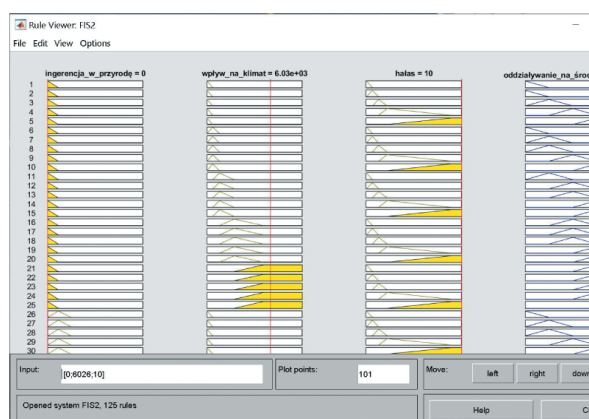
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych geoportal.gov.pl



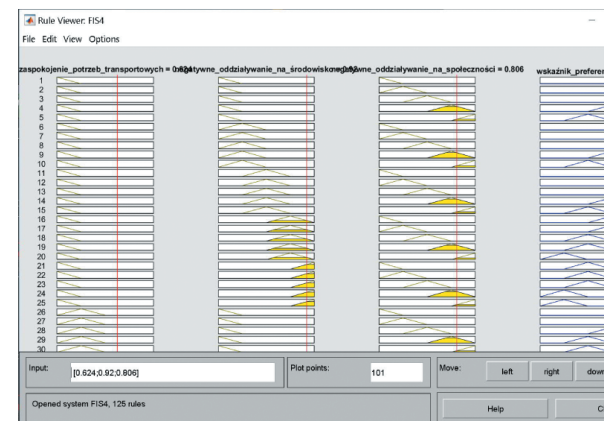
Wyniki oceny dla modułu FIS1



Wyniki oceny dla modułu FIS3



Wyniki oceny dla modułu FIS2



Wyniki oceny dla modułu FIS4

Rys. 7. Wyniki modelowania dla projektu pn. *Przebudowa drogi krajowej nr 7 na odcinku Kraków (A4) – Myślenice*

Źródło: opracowanie własne

Podsumowanie

Przedstawiony model rozwoju systemu transportowego opiera się na ocenie planowanych projektów infrastrukturalnych w ujęciu międzygałęziowym. Dla weryfikacji modelu dokonano porównania projektów drogowego i kolejowego zlokalizowanych w tym samym regionie i realizujących częściowo tożsame zadania transportowe.

Wynikiem analizy jest ocena projektów względem kryteriów odpowiadających zdefiniowanym celom rozwojowym oraz ustalenie rankingu preferencji decydenta względem realizacji poszczególnych projektów. Uznając, iż preferencje decydenta obejmują nie tylko zaspokajanie potrzeb transportowych, ale także wpływ planowanych inwestycji na jakość życia mieszkańców oraz poszanowanie zasady zrównoważonego rozwoju, zdecydowanie bardziej pożądana jest realizacja projektu budowy nowej linii kolejowej na odcinku Kraków–Myślenice. Projekt przebudowy drogi krajowej nr 7 uzyskał wynik preferencji decydenta o niemal połowę niższy. Rezultaty te winny skłaniać do poważnej i merytorycznej refleksji nad przyszłym podziałem zadań transportowych w regionie Krakowa i ich wpływem na jakość życia obecnych i przyszłych pokoleń.

Warto podkreślić, że prezentowany model może być z powodzeniem stosowany w administracji publicznej w zakresie zadań związanych z planowaniem rozwoju infrastruktury. Znajdzie on zastosowanie zarówno na poziomie planowania strategicznego, podstawowo w skali całego kraju, jak również do rozważania lokalnych problemów decyzyjnych z uwzględnieniem szerszego (ponadregionalnego) kontekstu rozważanych decyzji.

Literatura

- Beria P., Maltese I., Mariotti I., *Multicriteria versus Cost Benefit Analysis: A comparative perspective in the assessment of sustainable mobility*, "European Transport Research Review", vol. 4, 2012, nr 3.
- Centralny Port Komunikacyjny sp. z o.o., *Pasażerski Model Transportowy*, Skrócony Raport Techniczny, 2020.
- Centrum Unijnych Projektów Transportowych: *Zintegrowany Model Ruchu*, <https://www.cupt.gov.pl/cupt/zmr-zintegrowany-model-ruchu>. – abgerufen am 2021-05-19.
- Cieśla M., Sobota A., Jacyna M., *Multi-Criteria decision making process in metropolitan transport means selection based on the sharing mobility idea*, "Sustainability" (Switzerland), vol. 12, MDPI AG, 2020, nr 17.
- European Commission, *Guide to Cost-benefit Analysis of Investment Projects: Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020*, 2014.
- Jacyna M., Merksiz J., *Proecological approach to modelling traffic organization in national transport system*, "Archives of Transport", vol. 30, Warsaw University of Technology, 2014, Nr 2.
- Jacyna-Golda I., Zak J., Gołębiowski P., *Models of traffic flow distribution for various scenarios of the development of proecological transport system*, "Archives of Transport", vol. 32, Warsaw University of Technology, 2014, nr 4.
- JASPERS: *Niebieska Księga – Sektor Transportu Publicznego w miastach, aglomeracjach, regionach*, 2015.
- Kaczorek M., Klikowski M., Konarski A., Lenart S., Mikulski B., Mokrzański M., Pyzik M., *Kolejowy Model Towarowy – model ruchu na potrzeby PKP Polskich Linii Kolejowych SA*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2018, nr 6.
- Kaczorek M., *Model wielokryterialnego wspomagania decyzji w planowaniu rozwoju infrastruktury transportowej z uwzględnieniem aspektów zagospodarowania przestrzennego*, Warszawa, Politechnika Warszawska, Rozprawa Doktorska, 2022.
- Kaczorek M., Jacyna M., *Fuzzy logic as a decision-making support tool in planning transport development*, "Archives of Transport", vol. 1, Index Copernicus, 2022, nr 61.
- Kancelaria Prezesa Rady Ministrów, *Koncepcja przygotowania i realizacji inwestycji Port „Solidarność” – Centralny Port Komunikacyjny dla Rzeczypospolitej Polskiej 2017*, nr 173.
- Komisja Europejska, *Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu* – Biała Księga. vol. KOM(2011), 2011.
- Komornicki T., Rosik P., Stępnia M., Śleszyński P., Goliszek S., Pomianowski W., Kowalczyk K., *Ewaluacja i monitoring zmian dostępności transportowej w Polsce z wykorzystaniem wskaźnika WMDT*, Warszawa 2018.
- Konarski A., Klikowski M., Mikulski B., Mokrzański M., Pyzik M., *Model ruchu na potrzeby PKP Polskich Linii Kolejowych SA – komponent pasażerski*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2018, nr 6.
- Koźlak A., *Nowoczesny system transportowy jako czynnik rozwoju regionów w Polsce*, Gdańsk, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, 2012.
- Ministerstwo Administracji i Cyfryzacji, *Polska 2030, Trzecia fala nowoczesności. Długookresowa Strategia Rozwoju Kraju*, 2013.
- Ministerstwo Infrastruktury, *Strategia Zrównoważonego Rozwoju Transportu do 2030 roku*, 2019.
- Ministerstwo Rozwoju, *Strategia na rzecz odpowiedzialnego rozwoju: do roku 2020 (z perspektywą do 2030 r.)*, vol. 2020, Warszawa, Ministerstwo Rozwoju, Departament Strategii Rozwoju, 2017.
- Organizacja Narodów Zjednoczonych, *Przekształcamy nasz świat, Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju do roku 2030*. vol. 16301, 2015.
- Ortúzar J. de D., Willumsen L. G., *Modelling Transport*, 2011.
- Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2015/207 z dnia 20 stycznia 2015 r. ustanawiające szczegółowe zasady wykonania rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 1303/2013 w odniesieniu do wzoru sprawozdania z postępów, formatu dokumentu służąc, 2015.
- Suchorzewski W., Waltz A., Brzeziński A., *Modelowanie i prognozowanie ruchu – od liczydła do big data*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2020, nr 12.
- Szarata A., *Modelowanie podróży wzbudzonych oraz tłumionych zmianą stanu infrastruktury transportowej*, Monografia / Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Inżynieria Lądowa, Kraków, Wydawnictwo PK, 2012.
- The MathWorks Inc, *User's Guide R2021b*, 2021.
- Tsamboulas D., Yiotis G.S., Panou K.D., *Use of multicriteria methods for assessment of transport projects*, "Journal of Transportation Engineering", vol. 125, 1999, nr 5.
- Ustawa z dnia 6 grudnia 2006 r. o zasadach prowadzenia polityki rozwoju.
- Vuchic V. R., *Transportation for livable cities*, 3rd print., New Brunswick, Center for Urban Policy Research, 2017 .
- Wojewódzka-Król K., Rydzkowski W., *Transport*, 6. ed., Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016 .
- Zadeh L.A., *Fuzzy sets*, *Information and Control*, vol. 8, 1965, nr 3.
- Zak J., Redmer A., Sawicki P., *Wielokryterialne wspomaganie decyzji w transporcie drogowym*, vol. 56, 2003.

JAN ALEKSANDROWICZ

dr inż., Politechnika Krakowska,
Katedra Systemów Transportowych,
31-155 Kraków, ul. Warszawska 24,
e-mail: jaleksandrowicz@pk.edu.pl

Wielokryterialna optymalizacja przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego¹

Streszczenie: Artykuł poświęcony jest tematyce wielokryterialnej optymalizacji przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego. W artykule przedstawiono propozycję modelu czterokryterialnego mającego zastosowanie w systemach miejskiego transportu zbiorowego obsługiwanych pojazdami elektrycznymi i spalinowymi. W opracowaniu zdefiniowano aktualne wymagania względem transportu zbiorowego oraz uwarunkowania przydziału taboru do linii. Przedstawiono ograniczenia procesu decyzyjnego przydziału taboru oraz wskazano cztery kryteria optymalizacji (komfort podróży, energochłonność pojazdów, emisja szkodliwych substancji oraz oczekiwania organizatora miejskiego transportu zbiorowego). W pracy przedstawiono i objaśniono opracowany model optymalizacji przydziału taboru wraz z ograniczeniami. W artykule przedstawiono wyniki testów modelu wraz z praktycznym zastosowaniem z wykorzystaniem autorskiego programu w środowisku MATLAB. Artykuł zakończono wnioskami z przeprowadzonych prac i planem dalszych prac nad tematem.

Słowa kluczowe: przydział taboru, model optymalizacyjny, miejski transport zbiorowy.

Wprowadzenie

Miejskie systemy transportu zbiorowego borykają się z następującymi problemami:

- nierównomiernością wykorzystania miejsc w kursujących pojazdach ze względu na zmieniające się potoki pasażerskie i różnorodność typów taboru,
- wzrostem kosztów wykonywania kursów ze względu na spadek liczby pasażerów,
- nadmierną emisją spalin spowodowaną wykorzystywaniem taboru niespełniającego najwyższych norm emisji szkodliwych substancji,
- pogarszającym się stanem infrastruktury transportowej z powodu zbyt wolnego procesu modernizacji infrastruktury.

Problemy te powodowane są przez sposób zarządzania systemem miejskiego transportu zbiorowego, a w szczególności uwzględniania w procesie decyzyjnym aktualnych danych (np. na temat liczby pasażerów korzystających z poszczególnych linii). Rozwiązaniem wymienionych problemów jest wykorzystanie w miejskim systemie transportu zbiorowego narzędzi umożliwiających: zaobserwowanie aktualnych potrzeb pasażerów, dopasowanie elementów systemu do nich przy: utrzymaniu lub zmniejszeniu kosztów funkcjonowania systemu, ograniczeniu oddziaływania na środowisko oraz dostosowaniu się do stanu infrastruktury.

Dopasowania elementów systemu dokonuje się z wykorzystaniem różnego rodzaju modeli optymalizacyjnych.

Modele tego typu umożliwiają m.in. określenie: przydziału taboru do obsługi linii, przebiegu linii oraz częstotliwości kursowania. Obliczenia wykonuje się na dwa sposoby: jednokryterialnie, uwzględniając jedynie potrzeby pasażerów lub koszty realizacji przewozów, oraz wielokryterialnie. Z powodu zmieniających się wymagań względem miejskiego transportu zbiorowego, charakteryzujących się m.in.:

- wzrostem wymagań pasażerów dotyczących komfortu podróży,
- zmniejszeniem energochłonności systemu,
- ograniczeniem negatywnego oddziaływania transportu na otoczenie,

coraz istotniejszą rolę odgrywa wielokryterialne zarządzanie transportem. Wymagania te można uwzględnić w modelu wielokryterialnym poprzez kryteria:

- energochłonności (zużycia paliwa lub energii elektrycznej),
- emisji spalin (substancji szkodliwych dla zdrowia i środowiska naturalnego),
- oczekiwań organizatora miejskiego transportu zbiorowego.

Ograniczone środki finansowe przeznaczane na transport zbiorowy w miastach zmuszają organizatorów i operatorów transportu zbiorowego do stosowania rozwiązań mających spełnić wymagania przy zachowaniu tych samych kosztów lub ich obniżeniu. Osiągnięte jest to poprzez zmiany w:

- rozkładach jazdy,
- siatce połączeń,
- przydziale taboru.

Dwa pierwsze rozwiązania wiążą się z ryzykiem sprzeciwu społecznego, ponieważ przy stałych środkach finansowych zwiększenie liczby kursów na jednej linii lub zmiana jej trasy powoduje pogorszenie obsługi transportowej na innej linii. Trzecie rozwiązanie, ze względu na różnorodność typów taboru, umożliwia osiągnięcie celu poprzez zmiany w przydziale taboru do linii. Dodatkową zaletą tego rozwiązania jest możliwość dopasowania taboru w sposób wielokryterialny, uwzględniający nie tylko potrzeby pasażerów, ale także kryteria środowiskowe, jak redukcję emisji spalin czy zmniejszenie energochłonności taboru. W ramach artykułu przedstawiono propozycję optymalizacji przydziału taboru do linii w sposób wielokryterialny, uwzględniający zaobserwowane wymagania względem miejskiego transportu zbiorowego.

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2022.

Uwarunkowania przydziału taboru

Zarządzanie przydziałem taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego odgrywa bardzo ważną rolę w efektywności funkcjonowania miejskiego systemu transportowego. Determinantami problemu przydziału taboru są m.in.: jakość obsługi pasażerskiej, koszty przewozu [5, 6, 7, 12, 13, 14, 15], obciążenie środowiskowe [8, 10, 11] czy oczekiwania organizatora miejskiego transportu zbiorowego. Przewoźnicy, przygotowując plany przydziału, muszą zwracać uwagę na wiele różnych ograniczeń problemu decyzyjnego, takich jak:

- liczbę i typy dostępnego taboru,
- popyt na usługi transportowe dla każdego kursu na każdej linii,
- parametry techniczne dostępnego taboru (liczba miejsc w pojeździe, charakterystyki: zużycia paliwa, zużycia energii elektrycznej oraz emisji szkodliwych substancji),
- parametry infrastruktury punktowej i liniowej sieci transportowej (w tym dopuszczenie wjazdu na poszczególne odcinki drogowe i torowe dla poszczególnych typów taboru),
- kształt sieci miejskiego transportu zbiorowego,
- obowiązujące rozkłady jazdy.

Wybór taboru do realizacji poszczególnych zadań realizowany jest na dwa sposoby. W pierwszym przypadku zadania są przedstawiane w formie brygad, których liczba i przypisanie do linii jest stałe. Wyboru typu taboru do obsługi poszczególnych brygad dokonuje się, uwzględniając przyjęte kryteria i ograniczenia. Ten sposób przydziału taboru do linii ma zastosowanie w systemach, w których każda brygada wykonuje kursy tylko na jednej linii miejskiego transportu zbiorowego.

Drugi sposób wymaga przeprowadzenia procedury przypisania taboru do brygad w dwóch etapach. W pierwszym etapie na podstawie określonej liczby kursów, rozkładów jazdy oraz kształtu sieci transportu zbiorowego, przydziela się do brygad kursy, które będą wykonywane na liniach transportu zbiorowego. W ten sposób można określić dokładną liczbę brygad niezbędnych do zrealizowania wszystkich zadań przewozowych. Następnie określone są wybrane charakterystyki dla każdej brygady oraz, uwzględniając przyjęte kryteria i ograniczenia, wyznaczany jest przydział typów taboru do brygad. Drugi sposób przydziału taboru do linii ma zastosowanie w przypadku systemów, w których brygady w ciągu jednego dnia mogą wykonywać kursy na różnych liniach.

Złożoność procesu decyzyjnego związanego z przydziałem taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego jest ściśle związana ze zróżnicowaniem taboru i wielkością sieci transportowej [12, 13]. Złożoność jest istotnie większa dla drugiego sposobu wyznaczania przydziału taboru ze względu na etapowość procedury przydziału.

Różnice pomiędzy poszczególnymi typami taboru i pomiędzy brygadami miejskiego transportu zbiorowego określa się za pomocą wybranych charakterystyk. Dla typów taboru charakterystykami są między innymi:

- całkowita liczba miejsc w pojeździe,
- zużycie energii,
- wielkość emisji szkodliwych substancji na kilometr przejechanej trasy.

Brygady charakteryzuje się za pomocą:

- łącznej długości trasy,
- liczby pasażerów podróżujących brygadą podczas pomiarów.

Przydział taboru do linii wyznaczany jest z uwzględnieniem kryteriów określonych na podstawie wybranych charakterystyk taboru i brygad. Wybór kryteriów powinien odpowiadać celowi, jaki ma zostać osiągnięty poprzez proces wyznaczania przydziału taboru. Przykładem celu jest zmniejszenie łącznego zużycia paliwa przy zachowaniu tego samego lub poprawie poziomu komfortu podróży.

Klasyczne zagadnienie przydziału

Klasyczne zagadnienie przydziału [9, 16] rozumiane jest jako funkcja:

$$f(xp, zp) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} xp_{i,j} * zp_{i,j} \rightarrow \min_{xp} / \max_{xp}$$

gdzie:

- $xp_{i,j}$ – zmienna decyzyjna określająca połączenie pomiędzy i -tym wykonawcą a j -tym zadaniem, zmienna zdefiniowana jako zmienna binarna, gdzie $xp_{i,j} = 1$ oznacza przydział i -tego wykonawcy (pojazdu lub typu pojazdu) do j -tego zadania (linii lub brygady transportu zbiorowego), a $xp_{i,j} = 0$ oznacza brak przydziału,
- $zp_{i,j}$ – znormalizowana wartość maksymalizowanych zysków lub minimalizowanych kosztów związanych z przydziałem i -tego wykonawcy do j -tego zadania,
- i – zmienna indeksująca definiująca numer wykonawcy zadania w zagadnieniu przydziału,
- j – zmienna indeksująca definiująca numer zadania w zagadnieniu przydziału.

W zagadnieniu klasycznym określone są dwa ograniczenia. Pierwsze z nich to ograniczenie wynikające z wymogu realizacji przez wykonawcę tylko jednego zadania:

$$\forall i \in I: \sum_{j \in J} xp_{i,j} = 1$$

Drugie ograniczenie związane z przydziałem zadania tylko do jednego wykonawcy:

$$\forall j \in J: \sum_{i \in I} xp_{i,j} = 1$$

W przypadku miejskiego transportu zbiorowego problem przydziału jest bardziej rozbudowany. Występują w nim ograniczenia związane z marszrutą, ograniczeniami infrastruktury, popytem na usługi transportowe oraz ograniczenia związane z kosztami funkcjonowania.

Model przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego

Proces przydziału taboru do brygad w miejskim systemie transportu zbiorowego determinowany jest przez:

- popyt na usługi transportowe,
- dostępność pojazdów,
- trasę przejazdu,
- stan infrastruktury,
- lokalizację zajezdni (stacji obsługi).

Wykorzystanie danych zbieranych w sposób ciągły zmieniło podejście do procesu przydziału taboru. Dane te umożliwiają dopasowanie przydziału taboru do aktualnych lub prognozowanych potrzeb miejskiego transportu zbiorowego. Jako założenia dla opracowanych modeli optymalizacji przydziału taboru przyjęto, że:

- tabor jest tak przydzielany, aby umożliwić przewóz wszystkich pasażerów – nie można przydzielać taboru, który ma mniejszą pojemność niż aktualna lub prognozowana liczba pasażerów;
- popyt jest prognozowany na podstawie zebranych danych przez automatyczny system zliczania pasażerów;
- przydział taboru organizowany jest z uwzględnieniem dnia tygodnia oraz miesiąca (np. czwartek w grudniu);
- liczba dostępnego taboru jest większa niż liczba zleconych zadań (brygad);
- droga dojazdu na linię z każdej zajezdni jest uwzględniana w długościach tras każdej z brygad, ale nie uwzględnia się innych manewrów wykonywanych pojazdem poza regularną trasą przejazdu (np. operacje na zajezdni związane z wyjazdem pojazdu na linię).

Uniwersalnym rozwiązaniem spełniającym przedstawione założenia jest czterokryterialny model hybrydowy (dla mieszanej spalinowo-elektrycznej floty pojazdów). Model ten zapisano w następujący sposób:

$$MPTMTZ = \langle DTO, ZP, CT, OP \rangle$$

gdzie:

- DTO** – zbiór dostępnego taboru spalinowego i elektrycznego,
- ZP** – zbiór zadań przewozowych,
- CT** – zbiór charakterystyk tras,
- OP** – zbiór organizacji przydziału taboru.

W przedstawionym w pracy modelu przydziału taboru przyjęto następujące kryteria oceny uzyskiwanych rozwiązań:

- kryterium komfortu podróży i wykorzystania przepustowości pojazdów,
- kryterium energochłonności taboru,
- kryterium wielkości emisji szkodliwych substancji (tylko dla systemów, w których kursują pojazdy spalinowe),
- kryterium oczekiwań organizatora miejskiego transportu zbiorowego.

Pomiędzy kryteriami obliczono współczynniki korelacji w celu sprawdzenia ich niezależności. Analiza ta wykazała brak korelacji pomiędzy kryteriami.

Model optymalizacji przydziału taboru opracowano dla systemów, w których kursują pojazdy spalinowe i elektryczne oraz pojazdy te mogą kursować zamiennie na tych samych liniach (np. w przypadku autobusów spalinowych i elektrycznych). W funkcji kryterium użyto znormalizowane kryteria cząstkowe: f_1, f_2, f_3, f_4 zapisane w formie: f'_1, f'_2, f'_3, f'_4 . Funkcję kryterium modelu zapisano w następującej formie:

$$f(f'_1, f'_2, f'_3, f'_4) = wg_1 * f'_1 + wg_2 * f'_2 + wg_3 * f'_3 + wg_4 * f'_4 \rightarrow \min$$

$$\sum_{k=1}^4 wg_k = 1$$

gdzie:

wg_1, wg_2 , – wagi dla poszczególnych kryteriów,
 wg_3, wg_4

- f'_1 – znormalizowana funkcja kryterium cząstkowego komfortu podróży i wykorzystania miejsc w pojeździe,
- f'_2 – znormalizowana funkcja kryterium cząstkowego energochłonności taboru,
- f'_3 – znormalizowana funkcja kryterium cząstkowego emisji szkodliwych substancji,
- f'_4 – znormalizowana funkcja kryterium cząstkowego oczekiwań przydziału taboru organizatora miejskiego transportu zbiorowego.

Pierwsze kryterium cząstkowe służące do minimalizowania różnicy rzeczywistego poziomu napełnienia pojazdu, a przyjętego akceptowalnego poziomu napełnienia (dla przyjętego poziomu komfortu), wykorzystuje dane na temat:

- prognozowanej liczby pasażerów,
- przyjętego poziomu komfortu,
- liczby miejsc w pojazdach poszczególnych typów taboru.

Pierwsze kryterium cząstkowe przedstawiono w następującej formie:

$$f_1 = \sum_{a \in A} \left| pk - \frac{\widehat{pn}_a}{\sum_{b \in B} (wp_{a,b} * lms_b)} \right| \rightarrow \min_{wp}$$

gdzie:

- A** – zbiór indeksów brygad linii miejskiego transportu zbiorowego,
- B** – zbiór indeksów dostępnych typów taboru,
- pk – akceptowalne napełnienie pojazdu dla przyjętego poziomu komfortu [%],
- \widehat{pn}_a – prognozowana liczba pasażerów dla a-tej brygady [pas.],
- wp_{ab} – macierz przydziału taboru spalinowego i elektrycznego dla każdej brygady w danym dniu tygodnia i miesiącu, obejmujący numery typów taboru,
- lms_b – liczba miejsc w b-tym typie taboru.

Drugie kryterium cząstkowe opracowano do minimalizowania łącznego zużycia energii. W przypadku systemów wykorzystujących pojazdy spalinowe i elektryczne kryterium cząstkowe wykorzystuje przeliczenie zużytego paliwa na jednostkę energii elektrycznej. Kryterium wykorzystuje dane na temat:

- długości trasy przejazdu każdej brygady,
- długości dróg dojazdu z i zjazdu do zajezdni,
- średniej energochłonności pojazdu,
- wartości współczynników wpływu czynników zewnętrznych na zmianę średniej energochłonności pojazdu.

Drugie kryterium cząstkowe przedstawiono w następujący sposób:

$$f_2 = ppne * d_1 \left(\sum_{a \in A} \sum_{b \in B} (wp_{a,b} * (w_a + dd_{a,b}) * wszp_b (wzp_{a,b} + wpp_{p,b} + wwp_{a,b} - 2)) \right) + d_2 \left(\sum_{a \in A} \sum_{b \in B} (wp_{a,b} * (w_a + dd_{a,b}) * wsze_b (wze_{a,b} + wwpe_{p,b} + wwe_{a,b} - 2)) \right) \rightarrow \min_{wp}$$

gdzie:

$$d_1 = \begin{cases} 1 - \text{gdy pojazd jest spalinowy} \\ 0 - \text{gdy pojazd nie jest spalinowy} \end{cases}$$

$$d_2 = \begin{cases} 1 - \text{gdy pojazd jest elektryczny} \\ 0 - \text{gdy pojazd nie jest elektryczny} \end{cases}$$

A – zbiór indeksów brygad linii miejskiego transportu zbiorowego,

B – zbiór indeksów dostępnych typów taboru,

ppne – przelicznik wartości energetycznej paliwa z litrów na kilowatogodziny,

wp_{a,b} – macierz przydziału taboru spalinowego i elektrycznego dla każdej brygady w danym dniu tygodnia i miesiącu, obejmujący numery typów taboru,

w_a – liczba kilometrów realizowanych przez a-tą brygadę miejskiego transportu zbiorowego [km],

dd_{a,b} – liczba kilometrów realizowanych przez b-ty typ pojazdu podczas zjazdów do zajezdni z a-tej trasy [km],

wszp_b – wartość średniego zużycia paliwa na 1 wozokilometr dla b-tego typu taboru,

wzp_{a,b} – współczynnik wpływu liczby zatrzymań na 1 wozokilometr dla a-tej brygady i b-tego typu taboru,

wpp_{p,b} – współczynnik wpływu pogody na zużycie paliwa dla p-tego typu pogody i b-tego typu taboru,

wwp_{a,b} – współczynnik wpływu profilu podłużnego trasy a-tej brygady na zużycie paliwa b-tego typu taboru,

wsze_b – wektor wartości średniego zużycia energii elektrycznej na 1 wozokilometr dla b-tego typu taboru,

wze_{a,b} – współczynnik wpływu liczby zatrzymań na 1 wozokilometr dla a-tej brygady i b-tego typu taboru,

wwpe_{p,b} – współczynnik wpływu p-tego typu pogody na zużycie energii elektrycznej b-tego typu taboru,

wwe_{a,b} – współczynnik wpływu profilu podłużnego a-tej trasy na zużycie energii elektrycznej b-tego typu taboru.

Trzecie kryterium cząstkowe – wielkości emisji szkodliwych substancji – opracowano wyłącznie dla pojazdów spalinowych. W ramach kryterium minimalizowana jest łączna wielkość emisji spalin pochodząca od pojazdów miejskiego transportu zbiorowego. W kryterium wykorzystano dane na temat:

- długości trasy przejazdu każdej brygady,
- długości dróg dojazdu z i zjazdu do zajezdni,
- średniej emisji szkodliwych substancji pojazdu,
- wartości współczynników wpływu czynników zewnętrznych na zmianę średniej emisji szkodliwych substancji.

Kryterium cząstkowe zapisano w następujący sposób:

$$f_3 = \sum_{a \in A} \sum_{b \in B} (wp_{a,b} * (w_a + dd_{a,b}) * wsem_b * (wpes_{p,b} + wws_{a,b} + wzs_{a,b} - 2)) \rightarrow \min_{wp}$$

gdzie:

A – zbiór indeksów brygad linii miejskiego transportu zbiorowego,

B – zbiór indeksów dostępnych typów taboru,

wp_{a,b} – macierz przydziału taboru spalinowego i elektrycznego dla każdej brygady w danym dniu tygodnia i miesiącu, obejmujący numery typów taboru,

w_a – liczba kilometrów realizowanych przez a-tą brygadę miejskiego transportu zbiorowego [km],

dd_{a,b} – liczba kilometrów realizowanych przez b-ty typ pojazdu podczas zjazdów do zajezdni z a-tej trasy [km],

wsem_b – wartość średniej wielkości emisji wybranych szkodliwych substancji do środowiska na 1 wozokilometr dla b-tego typu taboru,

wpes_{p,b} – współczynnik wpływu p-tego typu pogody na wielkość emisji spalin b-tego typu taboru,

wws_{a,b} – współczynnik wpływu profilu podłużnego a-tej trasy na wielkość emisji spalin b-tego typu taboru,

wzs_{a,b} – współczynnik wpływu liczby zatrzymań na 1 wozokilometr a-tej trasy na wielkość emisji spalin b-tego typu taboru.

Czwarte kryterium cząstkowe opracowano dla oczekiwań przydziału taboru organizatora miejskiego transportu zbiorowego. W kryterium wykorzystano funkcję tangens liczoną z iloczynu współczynników oczekiwań przydziału taboru i połowy liczby pi. W kryterium minimalizowana jest suma wszystkich wartości. Czwarte kryterium cząstkowe zapisano w następujący sposób:

$$f_4 = \sum_{a \in A} \sum_{b \in B} (wp_{a,b} * \tan(wpo_{a,b} * \frac{\pi}{2})) \rightarrow \min_{wp}$$

gdzie:

A – zbiór indeksów brygad linii miejskiego transportu zbiorowego,

B – zbiór indeksów dostępnych typów taboru,

$wp_{a,b}$ – macierz przydziału taboru spalinowego i elektrycznego dla każdej brygady w danym dniu tygodnia i miesiącu, obejmujący numery typów taboru,

$wpo_{a,b}$ – współczynnik preferencji przydziału b-tego typu taboru do a-tej brygady miejskiego transportu zbiorowego.

W opracowanym modelu optymalizacji przydziału taboru przyjęto następujące ograniczenia:

- do każdej brygady musi być przydzielony jeden typ taboru:

$$\forall a \in A \sum_{b \in B} wp_{a,b} = 1$$

- liczba przydzielonych pojazdów b-tego typu nie może być wyższa niż liczba eksploatowanych pojazdów tego typu:

$$\sum_{a \in A} \sum_{b \in B} wp_{a,b} \leq lpt_b$$

gdzie:

lpt_b – liczba eksploatowanych pojazdów b-tego typu

- przydzielony typ pojazdu nie może mieć mniejszej liczby miejsc niż przewidywana liczba pasażerów dla a-tej brygady:

$$\widehat{pn}_a \leq \sum_{b \in B} (wp_{a,b} * lms_b)$$

- energochłonność przydzielonego taboru nie może być wyższa niż przyjęty przez przewoźnika poziom dopuszczalny:

$$\sum_{a \in A} \sum_{b \in B} (wps_{a,b} * (w_a + dd_{a,b}) * wszp_b (wzp_{a,b} + wwp_{p,b} + wwp_{a,b} - 2)) \leq pdzp$$

gdzie:

$pdzp$ – poziom dopuszczalny zużycia paliwa [litry],

$pdze$ – poziom dopuszczalny zużycia energii elektrycznej [kWh].

- łączna emisja szkodliwych substancji dla przydzielonego taboru nie może być wyższa od przyjętego dopuszczalnego poziomu:

$$\sum_{a \in A} \sum_{b \in B} (wps_{a,b} * (w_a + dd_{a,b}) * wsem_b * (wpes_{p,b} + wws_{a,b} + wzs_{a,b} - 2)) \leq pdn$$

gdzie:

pdn – dopuszczalny poziom łącznej emisji szkodliwych substancji od pojazdów miejskiego transportu zbiorowego [g].

Praktyczne zastosowanie opracowanego modelu

Opracowany model przetestowano w autorskim programie w środowisku MATLAB. Program umożliwił, z wykorzystaniem danych rzeczywistych, wyznaczenie przydziału taboru do linii autobusowych w Krakowie. Jako dane wejściowe wykorzystano wyniki pomiarów przeprowadzonych w sposób automatyczny i ciągły w 2018 roku [1, 2, 3, 4]. Wyznaczony przydział taboru (uzyskaną wartość funkcji celu) porównano z rzeczywistym przydziałem taboru, obowiązującym w czasie realizacji pomiarów. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Porównanie wartości funkcji celu dla przydziału rzeczywistego i modelu		
Znormalizowana wartość dla rzeczywistego przydziału taboru	Znormalizowana wartość dla modelu	Poprawa względem rzeczywistego przydziału taboru [%]
11,53	9,17	20,49

W ramach testów modelu przeprowadzono również obliczenia dla innych zbiorów danych wejściowych (także dla całego podsystemu autobusowego i tramwajowego w Krakowie). Wyznaczone przydziały taboru umożliwiły jednoczesną poprawę trzech z czterech kryteriów względem przydziału rzeczywistego. Wykazano istotne zmniejszenie energochłonności taboru – od 7,2% dla podsystemu autobusowego do 11,1% dla tramwajowego. Uzyskano zmniejszenie łącznej emisji szkodliwych substancji względem przydziału rzeczywistego – o 36,1% dla całego systemu. Wyznaczony przydział taboru był lepiej dopasowany do potrzeb pasażerów (wzrósł komfort podróży) – poprawa dopasowania taboru o 37,9%.

Podsumowanie

Opracowany model optymalizacji przydziału taboru jest narzędziem, w którym uwzględniono jednocześnie parametry niewykorzystywane do tej pory w tego typu modelach. Zaprezentowane w literaturze metody operują na danych uśrednionych lub z góry ustalonych wartościach dla kosztów przewozu poszczególnymi typami taboru. Opracowany model wielokryterialny wykorzystuje dane zbierane automatycznie w sposób ciągły. W przypadku braków w tego typu zbiorach danych lub dysponowania wyłącznie danymi z pomiarów przeprowadzonych klasycznie opracowany model także ma zastosowanie. Dzięki temu jest uniwersalnym narzędziem, jakie można zastosować do optymalizowania

przydziału taboru do linii, niezależnie od wielkości systemu transportu zbiorowego oraz źródła danych wejściowych.

Przedstawiony w pracy model optymalizacji przydziału taboru wyróżnia się względem przedstawionych w literaturze także szczegółowością wykorzystanych danych wejściowych. W modelu miejsce stałych wartości kosztów wykonywania poszczególnych kursów zastąpiono kosztem zmiennym zależnym od trzech czynników zewnętrznych: profilu podłużnego trasy, liczby zatrzymań oraz warunków pogodowych. Wykonany przegląd literatury wykazał, że istnieją metody wyznaczania współczynników wpływu powyższych czynników na: zużycie paliwa i energii elektrycznej oraz wielkość emisji szkodliwych substancji. Współczynniki te uwzględniono w modelu, jako metodę skorygowania wartości średnich określonych dla każdej brygady i typu taboru.

Prace związane z testowaniem modelu optymalizacji przydziału taboru wykonano przy użyciu dedykowanego programu komputerowego. Narzędzie opracowano w środowisku MATLAB bez używania wbudowanych narzędzi oprogramowania, co umożliwia w przyszłości przekonwertowanie programu na dowolny inny język. W programie wykonano interfejs użytkownika oraz zaprogramowano wybrane algorytmy optymalizujące: algorytm genetyczny i algorytm zachłanny. Program przygotowano uniwersalnie dla dowolnego systemu miejskiego transportu zbiorowego, dzięki czemu w programie można przeprowadzać optymalizację dla systemów miejskiego transportu zbiorowego o dowolnej liczbie brygad i pojazdów.

Wykonane analizy wykazały obszerne zastosowanie opracowanego modelu i programu komputerowego. Na podstawie badań stwierdzono, że za pomocą opracowanych narzędzi możliwe jest przeprowadzanie testów umożliwiających ocenę wpływu zmian w przydziale taboru na miejski system transportu zbiorowego oraz podpowiadanie planistom zmian w przypisaniu pojazdów do poszczególnych zajezdni autobusowych lub tramwajowych. W pierwszym przypadku opracowany program należałoby zmodyfikować w taki sposób, aby jako dane wejściowe można było wprowadzać dwie macierze przydziału taboru – pierwszą z obowiązującym przydziałem oraz drugą z wprowadzonymi zmianami. Z wykorzystaniem modelu program oceniałby wpływ wprowadzonych zmian na przyjęte kryteria oceny. W drugim przypadku program sugerowałby zmiany w przypisaniu pojazdów do zajezdni, wskazując te pozycje w macierzy przydziału taboru, gdzie zmiana przypisania pojazdu do zajezdni umożliwiłaby zmniejszenie kosztów. W ramach dalszych badań nad modelem i programem komputerowym obie te funkcje będą rozwijane.

Przeprowadzone prace wykazały, że wykorzystanie danych zbieranych automatycznie w sposób ciągły ma zastosowanie w procesie zarządzania i organizowania miejskiego transportu zbiorowego, a w szczególności w wyznaczaniu przydziału taboru. Zauważono istotny brak badań naukowych związanych z szerokim zastosowaniem

tego typu danych. W ramach dalszych prac badawczych planuje się realizację badań mających na celu rozszerzenie opracowanego modelu optymalizacji przydziału taboru o dodatkowe kryteria (m.in. kryterium uciążliwości transportu zbiorowego dla mieszkańców) oraz jeszcze szersze wykorzystanie danych zbieranych w sposób automatyczny (po wcześniejszej ich weryfikacji).

Literatura

1. Aleksandrowicz J., *Modele optymalizacji przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego*, praca doktorska, Politechnika Krakowska 2022.
2. Aleksandrowicz J., Starowicz W., Automatyczne systemy zliczania pasażerów, „Transport Miejski i Regionalny”, 2020, nr 6.
3. Aleksandrowicz J., *Informowanie pasażerów o wolnych miejscach w pojazdach miejskiego transportu zbiorowego z wykorzystaniem automatycznych systemów zliczania pasażerów*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2019, nr 8.
4. Aleksandrowicz J., *Przydatność automatycznych systemów zliczania pasażerów w celach predykcji popytu na usługi transportowe*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2018, nr 4.
5. Eliiyi U., Nasibov E., Ozkilcik M., Kuvvetli U., *Minimization of Fuel Consumption in City Bus Transportation: A Case Study for Izmir*, “Procedia – Social and Behavioral Sciences”, Volume 54, 4 October 2012.
6. Gavish B., Schweitzer P., Shlifer E., *Assigning buses to schedules in a metropolitan area*, “Computers & Operations Research”, Volume 5, Issue 2, 1978.
7. Gavish B., Shlifer E., *An approach for solving a class of transportation scheduling problems*, “European Journal of Operational Research”, Volume 3, Issue 2, 1979.
8. Jimenez F., Roman A., *Urban bus fleet-to-route assignment for pollutant emissions minimization*, “Transportation Research Part E”, 85/2016.
9. Kisielewski P., *Optymalizacja przydziału zadań transportowych*, „Problemy Eksploatacji”, 2/2007.
10. Li J.Q., Head K.L., *Sustainability provisions in the bus-scheduling problem*, “Transport Research Part D: Transportation and Environment”, vol. 14, 1/2009.
11. Li L., Lo H.K., Cen X., *Optimal bus fleet management strategy for emissions reduction*, “Transportation Research Part D”, 41/2015.
12. Oziomek J., Rogowski., *Optymalny przydział autobusów do pozamiejskich linii komunikacyjnych w Ostrowcu Świętokrzyskim*, „Autobusy”, 2016, nr 4.
13. Oziomek J., Rogowski., *Planowanie przydziału autobusów do linii w aspekcie minimalizacji zużycia paliwa na przykładzie MPK w Ostrowcu Świętokrzyskim*, „TTS Technika Transportu Szybowego”, 2015, nr 12.
14. Pinto Paixao J., Branco I.M., *A Quasi-Assignment Algorithm for Bus Scheduling*, Networks, Vol. 17, 1987.
15. Rabbi E., Tomhave D., Alrasheed A., Yang C.X., *Fuel consumption model for optimal transit bus assignment of gasoline, diesel and hybrid diesel-electric buses to each service route*, Proceedings of The Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress 2016.
16. Sahu A., Tapadar R., *Solving the Assignment problem using Genetic Algorithm and Simulated Annealing*, IAENG International Journal of Applied Mathematics 36, 2007.

SZYMON KLEMB

mgr inż., Instytut Kolejnictwa,
ul. Chłopickiego 50, 04-275
Warszawa, tel. 22 47 31354,
email: sklemba@ikolej.pl

Prognoza zużycia paliw płynnych w transporcie kolejowym do roku 2040^{1,2}

Streszczenie: Artykuł jest poświęcony opracowaniu prognoz wartości energetycznej zużytego oleju napędowego wykonanego na potrzeby realizacji ustawowych zadań Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami. Prognozy zostały wykonane za pomocą opracowanego modelu wskaźnikowego, który uwzględniał zmienne, takie jak stan elektryfikacji poszczególnych odcinków sieci kolejowej, stopień wykorzystania taboru spalinowego na liniach zelektryfikowanych oraz wskaźnik zastępowalności taboru spalinowego taboriem bezemisyjnym czy poprawa sprawności pojazdów spalinowych. Model bazował na ogólnodostępnych danych GUS oraz UTK, jak również specjalnie pozyskanych danych narodowego zarządcy infrastruktury kolejowej PKP PLK SA oraz przewoźników kolejowych. Opracowany model dla roku bazowego cechuje się błędem wynoszącym 2% obliczanego zużycia paliwa. Prognozy wykonano dla trzech scenariuszy: „zerowego”, scenariusza A „bez dodatkowych działań” (względem planowanych w momencie opracowywania prognozy) oraz scenariusza B „z dodatkowymi działaniami”, gdzie jako działania rozumie się inwestycje podejmowane w zakresie modernizacji infrastruktury i taboru kolejowego, jak również wprowadzanie zmian w organizacji przewozów kolejowych. Wyniki prognoz wskazują, że w najbardziej optymistycznym z punktu widzenia redukcji zużycia paliw płynnych w transporcie kolejowym scenariuszu B, do roku 2040 może nastąpić spadek zapotrzebowania na takie paliwa o około 31%. Według bardziej prawdopodobnego scenariusza A zużycie paliwa do 2040 nieznacznie wzrośnie. Elektryfikacja sieci kolejowej jest tylko jednym ze środków eliminowania pracy przewozowej realizowanej trakcją spalinową. Redukcja zużycia oleju napędowego wymaga znaczących zmian na rynku taboru kolejowego zmierzających w kierunku wdrażania pojazdów bezemisyjnych.

Słowa kluczowe: transport kolejowy, paliwa płynne, emisje, prognozowanie.

Geneza pracy

Genezą opracowania prognozy zużycia paliw płynnych (oleju napędowego) są zadania Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami (dalej KOBiZE), określone w ustawie o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji [1]. Ustawa ta stanowi wdrożenie szeregu dyrektyw i decyzji Parlamentu Europejskiego związanych z celami dotyczącymi poziomów emisji zanieczyszczeń oraz europejskim systemem handlu emisjami. Na mocy ustawy utworzono Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, do którego zadań należy m.in. prowadzenie Krajowej bazy o emisjach gazów cieplarnianych i innych substancji, administrowanie systemem handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych, wykonywanie, na potrzeby modelowania matematycznego zadań związanych z prowadzeniem bazy emisji powierzchniowych, liniowych

i punktowych, opracowywanie metodyk ustalania wielkości tych emisji, zbieranie danych niezbędnych do ich ustalenia, jak również sporządzanie raportów, sprawozdań i prognoz dotyczących wielkości emisji.

Krajowy ośrodek co pięć lat sporządza prognozy zmian aktywności (rozumie się przez to parametry charakteryzujące działalność, której skutkiem jest emisja, takie jak: wielkość produkcji, wielkość zużycia surowców lub paliw, ilość wytworzonych odpadów [1]) dla różnych sektorów gospodarki, w tym transportu. Zgodnie z ustawą, minister właściwy do spraw transportu ustala, w porozumieniu z KOBiZE, założenia do sporządzenia prognoz zmian aktywności oraz udostępnia dane niezbędne do sporządzenia tych prognoz. Instytut Kolejnictwa, jako jednostka podlegająca ministrowi właściwemu do spraw transportu, otrzymał zadania wykonania prognoz zmian aktywności w branży transportu kolejowego do roku 2040 (ze stanami pośrednimi w 2025 i 2030 roku), co sprowadzało się do wykonania prognozy zużycia paliwa płynnego przez spalinowy tabor trakcyjny (emisje związane z produkcją prądu elektrycznego z węgla traktowane są jako aktywność sektora elektroenergetyki).

Poruszany temat ma również znaczenie w kontekście oczekiwanej europejskiej transformacji energetycznej, która ma nastąpić w ciągu kilku najbliższych dekad.

Zużycie paliwa w transporcie kolejowym w latach 2000–2019

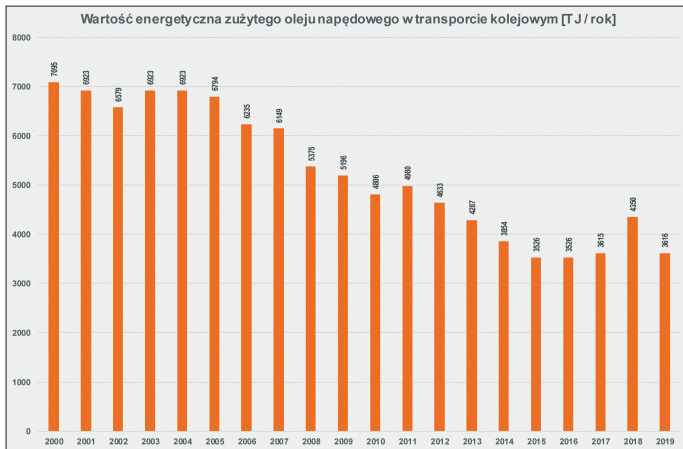
Przed dokonaniem wyboru metody opracowania prognoz przeanalizowano dostępne dane historyczne dotyczące wielkości zużycia paliwa w transporcie kolejowym oraz wielkości pracy transportu kolejowego w celu zidentyfikowania związków pomiędzy tymi wielkościami. Od 1993 roku [2], kiedy to nie eksploatowano już parowozów do obsługi regularnych połączeń w Polsce, emisje z transportu kolejowego pochodzą z pojazdów napędzanych silnikami spalinowymi wykorzystującymi olej napędowy. Z tego względu w opracowaniu związanym z prognozowanymi na kolei emisjami skupiono się jedynie na analizie tego źródła zanieczyszczeń, pomijając okresowe przewozy realizowane pociągami prowadzonymi trakcją parową na liniach z Wolsztyna.

Na rysunku 1 przedstawiono wartość energetyczną zużytego oleju napędowego w latach 2000–2019. O ile na przełomie XX i XXI wieku zużycie wynosiło około 7 tys. TJ rocznie, o tyle w latach 2015–2019 (z wyjątkiem roku 2018) stanowiło około połowy tej wartości (3,5–3,6 tys. TJ). Analizując wielkość pracy przewozowej realizowanej przez transport kolejowy, można stwierdzić, że w przypadku przewozów pasażerskich następował ich spadek po roku 2000 (zawieszenie przewozów na ponad tysiącu km linii

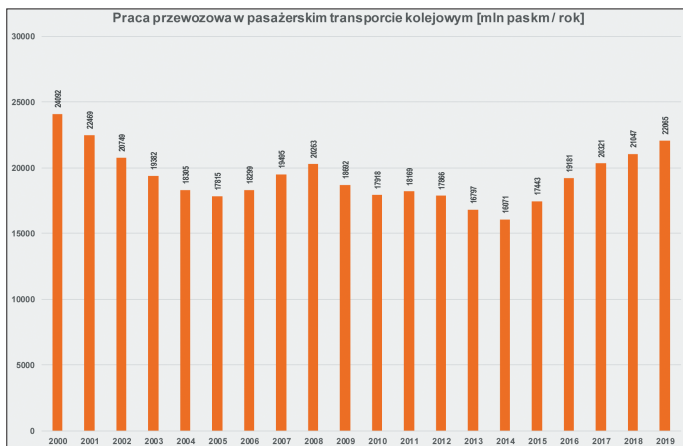
¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2022.

² Autor dziękuje panom Marcelemu Lalikowi oraz Jakubowi Piergiesowi z Instytutu Kolejnictwa za współpracę przy pozyskaniu danych źródłowych dotyczących wielkości zużycia paliwa i planów taborowych przewoźników kolejowych, bez których to danych opracowanie prognozy nie byłoby możliwe.

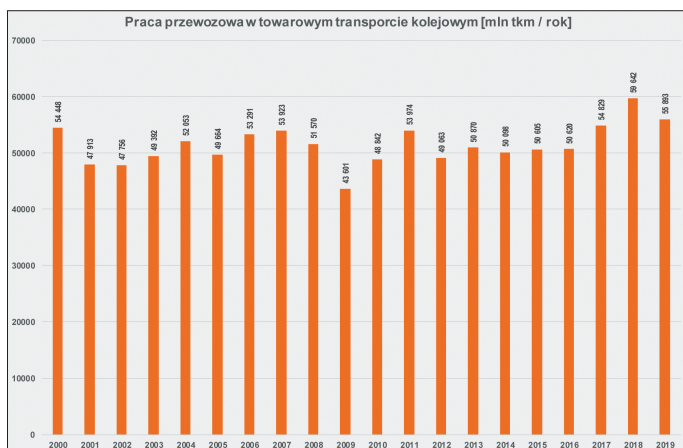
kolejowych), po czym, po niewielkim odbiciu w roku 2005, nastąpił ponowny ich spadek po roku 2008 (reforma przeprowadzona przez wiceministra infrastruktury Juliusza Engelhardta, skutkująca m.in. przekazaniem przewozów międzyregionalnych do spółki PKP IC, połączonym z likwidacją wielu połączeń i dezintegracją taryfową, jak również przekazaniem taboru spalinowego do spółki PKP CARGO, powodującego problem z realizacją przewozów pasażerskich na odcinkach niezelektryfikowanych) oraz wzrost od roku 2015, jednakże do poziomu nie przekraczającego przewozy w roku 2000 (rys. 2). Z kolei praca prze-



Rys. 1. Wartość energetyczna zużytego oleju napędowego w transporcie kolejowym
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych (niepublikowanych) KOBIZE



Rys. 2. Praca przewozowa w pasażerskim transporcie kolejowym
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych UTK [4]



Rys. 3. Praca przewozowa w towarowym transporcie towarowym
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych UTK [4]

wozowa kolejowego transportu ładunków kształtowała się na stabilnym poziomie (rys. 3). Z przytoczonych danych wynika, że nie istniał bezpośredni związek pomiędzy ogólną wielkością przewozów a zużyciem oleju napędowego i że zmiany zależą od innych czynników.

Czynnikami, które mogą wpływać na spadek zużycia oleju napędowego, mogły być zatem inne zjawiska mające miejsce w systemie przewozów kolejowych:

- zmiana wielkości przewozów na liniach niezelektryfikowanych, zwłaszcza wobec braków taborowych oraz stosunkowo złego stanu technicznego infrastruktury tych linii w porównaniu do linii zelektryfikowanych;
- poprawa sprawności lokomotyw spalinowych na przestrzeni lat, między innymi poprzez stopniowe wycofywanie najbardziej energochłonnych pojazdów trakcyjnych, co umożliwiło realizację tej samej pracy przewozowej przy mniejszym zużyciu paliwa;
- zmiana struktury ruchu pojazdów trakcyjnych (spalinowe/elektryczne) wykorzystywanych na liniach zelektryfikowanych w transporcie towarowym;
- prawie całkowite odejście od wykorzystywania lokomotyw spalinowych do obsługi pasażerskich połączeń regionalnych na rzecz wagonów silnikowych lub spalinowych zespołów trakcyjnych;
- poprawa w zakresie zarządzania zasobami paliwa u przewoźników.

Wyżej wskazane czynniki były brane pod uwagę podczas budowy modelu prognostycznego.

Metoda prognozowania

Metoda prognozowania musi odpowiadać celowi prowadzonej analizy i brać pod uwagę dane, które są dostępne lub które można zebrać w celu jej wykonania. Na podstawie przeprowadzonej kwerendy zdecydowano o zastosowaniu modelu wskaźnikowego biorącego pod uwagę następujące zmienne:

- wielkość pracy eksploatacyjnej [pockm] pociągów pasażerskich dla poszczególnych kategorii pociągów na liniach zelektryfikowanych (a dokładniej liczby pociągów na poszczególnych odcinkach sieci oraz długości tych odcinków),
- wielkość pracy eksploatacyjnej [pockm] pociągów pasażerskich dla poszczególnych kategorii pociągów na liniach niezelektryfikowanych (a dokładniej liczby pociągów na poszczególnych odcinkach sieci oraz długości tych odcinków),
- wielkość pracy przewozowej brutto [brtkm] pociągów towarowych dla poszczególnych kategorii pociągów na liniach zelektryfikowanych (dla poszczególnych odcinków sieci),
- wielkość pracy przewozowej brutto [brtkm] pociągów towarowych dla poszczególnych kategorii pociągów na liniach niezelektryfikowanych (dla poszczególnych odcinków sieci),
- wskaźnik wykorzystania trakcji spalinowej na liniach zelektryfikowanych (w odniesieniu do pockm pociągów pasażerskich i brtkm pociągów towarowych),

- współczynnik zastępowalności pasażerskiego taboru spalinowego taborem alternatywnym („bezemisyjnym”),
- współczynnik zastępowalności spalinowych pojazdów trakcyjnych prowadzących składy towarowe taborem alternatywnym („bezemisyjnym”),
- współczynnik poprawy sprawności taboru spalinowego,
- wartość binarna związana z elektryfikacją poszczególnych odcinków sieci kolejowej.

Model oparto również na przyjętych wartościach stałych:

- średnie jednostkowe zużycia paliwa dla poszczególnych rodzajów pociągów (w odniesieniu do pockm pociągów pasażerskich i brtkm pociągów towarowych),
- jednostkowa wartość energetyczna paliwa (oleju napędowego),
- długości poszczególnych odcinków sieci kolejowej.

Głównymi źródłami danych wykorzystywanymi podczas budowy modelu oraz przy sporządzaniu prognozy były:

- statystyka SOLK³ PKP PLK S.A. za rok 2019,
- dane GUS z opracowania „Transport – wyniki działalności w 2019 roku” [2],
- dane dotyczące zużycia paliw pozyskane od przewoźników kolejowych,
- dane UTK dotyczące ilostanu taboru kolejowego oraz planów taborowych przewoźników [3],
- dane KOBiZE dotyczące wartości energetycznej zużytego paliwa w transporcie kolejowym.

Przy sporządzaniu prognozy, na etapie przyjmowania założeń do scenariuszy, kierowano się krajowymi dokumentami strategicznymi związanymi z dziedziną transportu, takimi jak:

- Strategia Zrównoważonego Rozwoju Transportu do 2030 roku,
- Krajowy Program Kolejowy do 2023 roku.

W wyniku analizy danych uzyskanych od przewoźników kolejowych stwierdzono, że najbardziej miarodajne będzie zastosowanie różnej bazy dla prognoz dla transportu pasażerskiego i towarowego. W przypadku przewozów pasażerskich zużycie paliwa było obliczane na podstawie pracy eksploatacyjnej [pockm], natomiast dla przewozów towarowych na podstawie pracy przewozowej brutto [brtkm]. Takie podejście wynika z faktu, że zużycie paliwa zależy w dużej mierze od masy pociągu, a ta jest zależna od masy ładunku, co ma istotne znaczenie w przypadku pociągów towarowych. W przypadku pociągów pasażerskich masa pasażerów nie ma już tak dużego wpływu.

Dla scenariusza s w roku r prognozy wartość energetyczną zużytego paliwa $P^{s,r}$ określono jako sumę wartości dla przewozów pasażerskich i towarowych następującymi wzorami:

$$P^{s,r} = P_{pas}^{s,r} + P_{tow}^{s,r}$$

$$P_{pas}^{s,r} = \left(\sum_i z_i^{s,r} p_{e,i}^{s,r} \right) (1 - \gamma_{pas}^{s,r}) (1 - \mu^{s,r}) \varepsilon$$

gdzie:

- $z_i^{s,r}$ – średnie zużycie paliwa dla i -tej kategorii pociągu pasażerskiego [litr/pockm],
- $p_{e,i}^{s,r}$ – praca eksploatacyjna dla i -tej kategorii pociągu pasażerskiego realizowana taborem spalinowym [pockm],
- $\gamma_{pas}^{s,r}$ – współczynnik zastępowalności trakcyjnego taboru spalinowego taborem bezemisyjnym dla przewozów pasażerskich [-],
- $\mu^{s,r}$ – współczynnik poprawy sprawności trakcyjnego taboru spalinowego [-],
- ε – wartość energetyczna zużytego paliwa [TJ/litr].

$$P_{tow}^{s,r} = \left(\sum_j z_j^{s,r} p_{b,j}^{s,r} \right) (1 - \gamma_{tow}^{s,r}) (1 - \mu^{s,r}) \varepsilon$$

gdzie:

- $z_j^{s,r}$ – średnie zużycie paliwa dla j -tej kategorii pociągu towarowego [litr/brtkm],
- $p_{b,j}^{s,r}$ – praca przewozowa brutto dla j -tej kategorii pociągu towarowego realizowana taborem spalinowym [brtkm],
- $\gamma_{tow}^{s,r}$ – współczynnik zastępowalności trakcyjnego taboru spalinowego taborem bezemisyjnym dla przewozów towarowych [-],

Pracę eksploatacyjną pociągów pasażerskich $p_{e,i}^{s,r}$ i pracę przewozową brutto pociągów towarowych $p_{b,j}^{s,r}$ na liniach spalinowych określono w następujący sposób:

$$p_{e,i}^{s,r} = \alpha_{pas}^{s,r} \sum_{o \in OE} l_{o,i}^{s,r} d_o + \sum_{o \in ON} l_{o,i}^{s,r} d_o$$

$$p_{b,j}^{s,r} = \alpha_{tow}^{s,r} \sum_{o \in OE} l_{o,j}^{s,r} d_o m_{o,j} + \sum_{o \in ON} l_{o,j}^{s,r} d_o m_{o,j}$$

gdzie:

- OE – zbiór odcinków zelektryfikowanych, ON – zbiór odcinków niezelektryfikowanych (indeksy s i r dotyczących scenariusza oraz roku prognozy dla większej czytelności),
- $\alpha_{pas}^{s,r}$ – wskaźnik procentowy pracy eksploatacyjnej pociągów pasażerskich na liniach zelektryfikowanych realizowanej trakcją spalinową,
- $\alpha_{tow}^{s,r}$ – wskaźnik procentowy pracy przewozowej brutto pociągów towarowych na liniach zelektryfikowanych realizowanej trakcją spalinową,
- $m_{o,j}$ – średnia masa pociągu towarowego kategorii j na odcinku o .

³ SOLK – Statystyka Obciążenia Linii Kolejowych

Kalibracja modelu

Jako bazowy przyjęto dla prognozy rok 2019. Na podstawie bazy danych PKP PLK (SOLK) określono, dla każdej kategorii pociągów pasażerskich i towarowych, na podstawie danych dla poszczególnych odcinków sieci kolejowej, sumaryczne prace eksploatacyjne (pockm) dla pociągów pasażerskich oraz sumaryczne prace przewozowe brutto (brtkm) dla pociągów towarowych. Dzięki przyporządkowaniu każdemu odcinkowi wartości zmiennej binarnej określającej jego elektryfikację uzyskano dane o pracy transportu kolejowego z podziałem na linie zelektryfikowane i nieelektryfikowane. Dane te nie uwzględniają jednak faktu, że część transportu na liniach zelektryfikowanych odbywa się za pomocą spalinowych pojazdów trakcyjnych. Z tego względu uzyskane sumy zestawiono z danymi GUS, które dotyczą pracy transportu kolejowego nie z podziałem na rodzaj linii, tylko na rodzaj trakcji.

Na podstawie tych danych określono współczynniki wykorzystania trakcji spalinowej na liniach zelektryfikowanych ($\alpha_{pas}^{s,r}$, $\alpha_{tow}^{s,r}$), dzięki którym można określać, na podstawie danych dotyczących odcinków linii kolejowych, wielkości dotyczące poszczególnej trakcji (elektrycznej oraz spalinowej). Za pomocą wyznaczonych współczynników obliczono, dla roku bazowego, na podstawie danych dotyczących odcinków linii, liczbę pockm dla transportu pasażerskiego i liczbę brtkm dla transportu towarowego wykonywanych przez poszczególne trakcje. Zestawiono wyniki z danymi GUS i określono wielkość błędu, który wynosi:

- 0,71% dla pociągów pasażerskich trakcji elektrycznej,
- 1,78% dla pociągów pasażerskich trakcji spalinowej,
- 1,3% dla pociągów towarowych trakcji elektrycznej,
- 15,4% dla pociągów towarowych trakcji spalinowej.

Wyróżniająca się wartość błędu dla pociągów towarowych trakcji spalinowej prawdopodobnie wiąże się z pracą manewrową.

Następnie, dla określonej w ten sposób wielkości pracy eksploatacyjnej i pracy przewozowej brutto realizowanej trakcją spalinową, określono zużycie paliwa (za pomocą dobranych wskaźników średniego jednostkowego zużycia), obliczono modelowe zużycie paliwa dla roku bazowego oraz jego wartość energetyczną. Uzyskano błąd modelowego wyniku względem danych rzeczywistych wynoszący 0,2%.

Należy podkreślić, że przyporządkowanie wskaźników jednostkowych zużycia paliwa do poszczególnych rodzajów lub kategorii pociągów nie odzwierciedla wiernie rzeczywistości z uwagi na różnorodność taboru kolejowego obsługującego połączenia w ramach poszczególnych kategorii. Z tego względu istnieje ryzyko występowania błędów w podziale zużycia pomiędzy transport pasażerski i transport towarowy, mimo dużej zgodności, jeśli chodzi o zużycie ogółem. Nie ma jednak danych pozwalających na dokładne skalibrowanie modelu w tym zakresie. Podsumowując, należy uznać, że mimo opisanych nieścisłości model może być wykorzystany do sporządzenia prognozy z wystarczającą dokładnością, biorąc pod uwagę cel prowadzonych analiz.

Scenariusze prognozy

Bazą do określenia prognozy zużycia paliwa jest przygotowana prognoza wielkości pracy eksploatacyjnej [pockm] dla pociągów pasażerskich, którą uzyskano poprzez korektę liczby połączeń kolejowych na wybranych odcinkach sieci (kierując się planami transportowymi poszczególnych województw oraz tzw. krajowym planem transportowym). W przypadku pociągów towarowych opracowano, według metody i wskaźników opracowanych w [5], ogólnosieciową prognozę wskaźnikową pracy przewozowej brutto [brtkm], z podziałem na odcinki linii zelektryfikowane i nieelektryfikowane.

Innymi zmiennymi, które określano przy sporządzeniu prognozy dla poszczególnych scenariuszy, są:

- elektryfikacja wybranych odcinków sieci kolejowej, co powodowało zmianę podziału pracy transportu kolejowego pomiędzy trakcją elektryczną i spalinową (z uwzględnieniem wskaźnika jazdy pojazdami trakcji spalinowej na liniach zelektryfikowanych), elektryfikację definiowaną za pomocą zmiennej binarnej przyjmującą wartość 0 w przypadku elektryfikacji oraz 1 w przypadku braku elektryfikacji, wartości zmienne przyporządkowano poszczególnym odcinkom sieci kolejowej, w wyniku czego obliczana jest praca eksploatacyjna / przewozowa brutto w podziale na linie zelektryfikowane i nieelektryfikowane;
- wskaźnik jazdy pojazdami trakcji spalinowej na liniach zelektryfikowanych dla transportu pasażerskiego i towarowego (procent realizowanej w ten sposób pracy eksploatacyjnej / przewozowej brutto);
- zastępowalność pasażerskiego taboru spalinowego taborem alternatywnym („bezemisyjnym”), jako odzwierciedlenie rozwoju rynku bezemisyjnych pojazdów trakcyjnych;
- zastępowalność spalinowych pojazdów trakcyjnych prowadzących składy towarowe taborem alternatywnym („bezemisyjnym” lub hybrydowym), jako odzwierciedlenie rozwoju rynku bezemisyjnych pojazdów trakcyjnych;
- poprawa sprawności taboru spalinowego, jako odzwierciedlenie wprowadzania nowych rozwiązań w spalinowych pojazdach trakcyjnych.

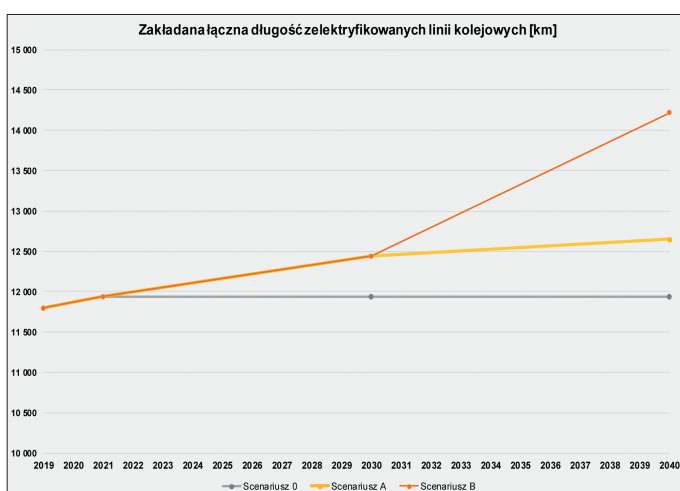
Prognozę opracowano dla lat 2025, 2030, 2035 oraz 2040 dla trzech scenariuszy:

- scenariusza 0 „zero”, zakładającego wartość zmiennych taką, jak dla roku bazowego prognozy, z wyjątkiem liczby pociągów na poszczególnych odcinkach, którą opracowano według wcześniej wspomnianej metody;
- scenariusza A „bez dodatkowych działań”, zakładającego, ponad scenariusz „zero”, ukończenie zaplanowanych obecnie działań w zakresie elektryfikacji sieci, pewną poprawę w zakresie zmniejszenia wykorzystania taboru spalinowego na liniach nieelektryfikowanych oraz wymianę części taboru na bezemisyjny;
- scenariusza B „z dodatkowymi działaniami”, zakładającego, w stosunku do scenariusza „bez dodatkowych działań”, większy stopień zachodzących zmian.

I tak w scenariuszu B założono, że do roku 2040 zostaną zelektryfikowane następujące odcinki polskiej sieci kolejowej:

- linia kolejowa nr 14 na odcinku Ostrów Wielkopolski – Głogów,
- linia kolejowa nr 24,
- linia kolejowa nr 25 na odcinku Tomaszów Mazowiecki – Skarżysko-Kamienna,
- linia kolejowa nr 30,
- linia kolejowa nr 31 na odcinku Siedlce – Hajnówka,
- linia kolejowa nr 32,
- linia kolejowa nr 36,
- linia kolejowa nr 38 na całym niezelektryfikowanym obecnie odcinku,
- linia kolejowa nr 40,
- linia kolejowa nr 49,
- linia kolejowa nr 52,
- linia kolejowa nr 71 (już zrealizowano),
- linia kolejowa nr 106,
- linia kolejowa nr 137 na odcinku Kędzierzyn-Koźle – Legnica,
- linia kolejowa nr 182,
- linia kolejowa nr 201 na całym niezelektryfikowanym obecnie odcinku,
- linia kolejowa nr 203 na odcinku Piła – Kostrzyn,
- linia kolejowa nr 213,
- linia kolejowa nr 274 na całym niezelektryfikowanym obecnie odcinku,
- linia kolejowa nr 287,
- linia kolejowa nr 288,
- linia kolejowa nr 299,
- linia kolejowa nr 301,
- linia kolejowa nr 358 na całym niezelektryfikowanym obecnie odcinku,
- linia kolejowa nr 402 na całym niezelektryfikowanym obecnie odcinku.

Łączną długość linii zelektryfikowanych założoną w poszczególnych scenariuszach przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Zakładana długość zelektryfikowanych linii kolejowych
Źródło: Opracowanie własne

W zakresie pracy eksploatacyjnej (przewozy pasażerskie), realizowanej na liniach zelektryfikowanych taborem spalinowym, przyjęto spadek udziału tej pracy z 4% w roku bazowym do 2,8% w scenariuszu A oraz do 1,2% w scenariuszu B. Całkowite wyeliminowanie jazdy taborem spalinowym na tych liniach nie jest możliwe z uwagi na odcinki w obrębie zelektryfikowanych węzłów kolejowych, do których wbiegają linie niezelektryfikowane.

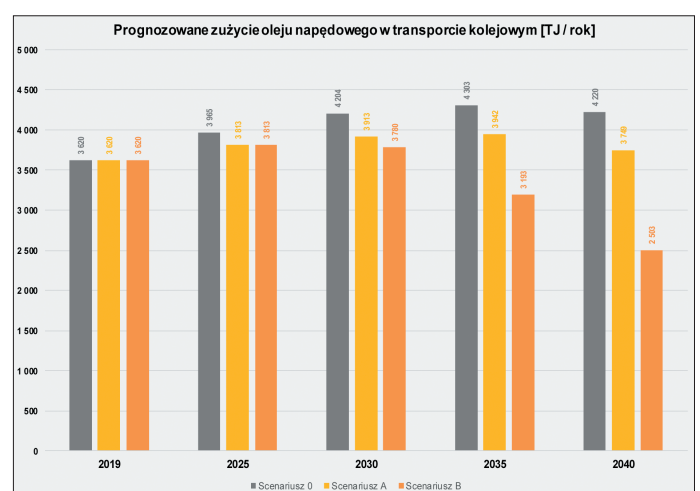
Jeśli chodzi o pracę przewozową brutto (przewozy towarowe) na liniach zelektryfikowanych realizowaną trakcją spalinową, przyjęto spadek udziału tej pracy z 16,3% w roku bazowym do 15,5% w scenariuszu A oraz do 13% w scenariuszu B. Specyfika przewozów towarowych oraz fakt istnienia wielu małych operatorów tych przewozów może nie pozwolić na taką organizację pracy pojazdów, która w znaczącym stopniu ograniczy wykorzystywanie trakcji spalinowej na liniach zelektryfikowanych. Istnieją również podmioty, w których posiadaniu nie ma pojazdów innych niż spalinowe.

W obydwu scenariuszach – A i B – przyjęto poprawę sprawności spalinowych pojazdów trakcyjnych o 5% względem roku bazowego. Jest to założenie wyłącznie eksperckie mające na celu uwzględnienie rozwoju technologicznego, który jednak trudno przewidzieć.

Na podstawie obecnych planów taborowych przewoźników i ich projekcji założono: w scenariuszu A – brak znaczącego udziału pojazdów bezemisyjnych do roku 2040, natomiast w scenariuszu B – zastąpienie do 2040 roku 30% pasażerskich spalinowych pojazdów trakcyjnych oraz 10% spalinowych pojazdów trakcyjnych w ruchu towarowym pojazdami bezemisyjnymi (lub hybrydowymi, których zastosowanie w praktyce redukuje „pracę spalinową” na liniach zelektryfikowanych).

Wyniki i wnioski

Uzyskane wyniki w wartościach bezwzględnych zaprezentowano na rysunku 5. Wartości względne, odnoszące się do roku bazowego 2019, przedstawiono w tabeli 1. Wartości względne odnoszące się do scenariusza „0” przedstawiono



Rys. 5. Prognozowane zużycie oleju napędowego w transporcie kolejowym
Źródło: opracowanie własne

Tabela 1

Wyniki prognozy w ujęciu względnym (100% = rok 2019)					
Scenariusz / Rok	2019	2025	2030	2035	2040
Scenariusz 0	100%	110%	116%	119%	117%
Scenariusz A	100%	105%	108%	109%	104%
Scenariusz B	100%	105%	104%	88%	69%

Źródło: opracowanie własne

Tabela 2

Wyniki prognozy w ujęciu względnym (100% = scenariusz 0)					
Scenariusz / Rok	2019	2025	2030	2035	2040
Scenariusz 0	100%	100%	100%	100%	100%
Scenariusz A	100%	96%	93%	92%	89%
Scenariusz B	100%	96%	90%	74%	59%

Źródło: opracowanie własne

Tabela 3

Prognoza pracy eksploatacyjnej pociągów pasażerskich [mln pockm / rok]					
Scenariusz / Rok	2019	2025	2030	2035	2040
Scenariusz 0	167,1	167,1	167,1	167,1	167,1
Scenariusz A	167,1	168,6	170,1	170,8	171,5
Scenariusz B	167,1	168,6	170,1	175,9	181,6

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4

Prognoza pracy przewozowej brutto pociągów towarowych [mld brtkm / rok]					
Scenariusz / Rok	2019	2025	2030	2035	2040
Scenariusze 0, A, B	112,6	121,6	130,5	133,5	131,0

Źródło: opracowanie własne

w tabeli 2. Jako tło dla prognozy zużycia paliwa (ściślej: wartości energetycznej zużytego oleju napędowego) przedstawiono prognozowaną pracę eksploatacyjną pociągów pasażerskich (tab. 3) oraz prognozowaną pracę przewozową brutto dla przewozów towarowych (tab. 4).

Prognoza przedstawiona w tabeli 3 nie uwzględnia ruchu po liniach powstałych w ramach komponentu kolejowego CPK, jako że będą w całości zelektryfikowane i nie będzie się po nich odbywał ruch pojazdów spalinowych.

Nie różnicowano prognoz wielkości ruchu towarowego ze względu na przyjęte scenariusze.

Z opracowanych prognoz wynika, że prawdopodobne jest (scenariusz A), że zużycie oleju napędowego w perspektywie roku 2035 będzie rosło, głównie w związku z rosnącymi przewozami towarowymi. Jednocześnie w scenariuszu A do roku 2040 prognozuje się spadek zużycia paliwa w transporcie pasażerskim o 15%, przy 10% wzroście zużycia paliwa w przewozach towarowych (przy ponad trzykrotnie większym zużyciu bazowym).

W scenariuszu B, zakładającym istotne zmiany na rynku taboru kolejowego, prognozuje się spadek zużycia paliwa o 31% do roku 2040, przy czym w kolejowych przewozach pasażerskich wynosiłby on aż 69% w stosunku do roku bazowego 2019.

Przewozy towarowe realizowane są przez wiele stosunkowo niewielkich podmiotów, dla których inwestycje w nowy

tabor kolejowy mogą być nieosiągalne i wymiana na tabor bezemisyjny nastąpi prawdopodobnie dopiero w momencie pojawienia się takich pojazdów na „rynku wtórnym”. Wydaje się więc, że osiągnięcie poziomu określonego według scenariusza B, przy spodziewanym wzroście przewozów, jest celem bardzo ambitnym.

Wyniki przedstawione w artykule dotyczące przewidywanego zużycia oleju napędowego przez transport kolejowy (oraz jego wartości energetycznej) należy odczytywać, mając jednocześnie na uwadze to, że bazują na założeniach, które z niezerowym prawdopodobieństwem mogą nie sprawdzić się w przyszłości. W szczególności dotyczy to:

- kierunku i tempa rozwoju techniki w zakresie nowych rodzajów napędów pojazdów kolejowych oraz czasu i zakresu ich wdrożenia na polskiej sieci kolejowej, w chwili obecnej wdrażane są pierwsze rozwiązania, które należy uznać za pilotażowe;
- kierunku rozwoju transportu towarowego, w tym intermodalnego – wobec przewidywanego spadku masowych przewozów węgla, istnieje zagrożenie, że udział kolei w przewozach ładunków będzie spadał, jeżeli polityka transportowa państwa nie będzie ukierunkowana na zwiększenie wykorzystania kolei w innych rodzajach przewozów;
- ostatecznego zakresu działań związanych z elektryfikacją sieci kolejowej;
- sytuacji na rynku paliw;
- regulacji polityczno-prawnych na szczeblu europejskim i krajowym dotyczących wykorzystywania paliw w transporcie.

Z uwagi na fakt, iż zasoby surowców nieodnawialnych, z których wytwarzane są paliwa płynne na potrzeby transportu, prędzej czy później się wyczerpią, kwestią czasu wydaje się ich całkowite zastąpienie alternatywnymi źródłami energii. Wdrażanie nowych technologii będzie następowało stopniowo, i choć perspektywa całkowitego odejścia od stosowania oleju napędowego wydaje się dość odległa, to w praktyce jedyną, alternatywą dla tej drogi jest poważny kryzys światowy związany z brakiem paliw.

Literatura

1. Ustawa z dnia 17 lipca 2009 r. o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji, tekst jednolity z dnia z dnia 7 maja 2020 r.: Dz. U. 2020 r. poz. 1077.
2. Bebenow E., *Współczesne wykorzystanie trakcji parowej do obsługi transportu kolejowego w Polsce*, Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG 2017, 20(3).
3. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/transport-i-lacznosc/transport/transport-wyniki-dzialalnosci-w-2019-roku,9,19.html>
4. <https://www.utk.gov.pl/pl/dokumenty-i-formularze/opracowania-urzedu-tran/16553,Tabor-kolejowy-2019.html>
5. Kruk R., Brona P., *Metoda wskaźnikowa prognozowania przewozów towarowych w oparciu o wskaźniki makroekonomiczne*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2018, nr 6.

PIOTR CHYLIŃSKI

mgr inż., Instytut Kolejnictwa,
tel. 601 381 511
e-mail: pchylinski@ikolej.pl

Prognozowanie potencjału popytowego dla miejscowości nie posiadających dostępu do sieci kolejowej¹

Streszczenie: W artykule przedstawiono tło gospodarcze zaniku obsługi pasażerskiej kolejną niektórych miast powiatowych na przełomie lat 90. ubiegłego stulecia i pierwszej dekady XXI wieku oraz szanse i możliwości na ponowne ich włączenie w sieć przewozów kolejowych. W związku z procesem realizacji dokumentacji przedprojektowych dla programu Kolej Plus obejmującego przywracanie połączeń pasażerskich, omówiono problematykę prognozowania potencjału popytowego w transporcie kolejowym. Przedstawiono prostą metodę szacowania potencjału dla miejscowości, które nigdy takiego połączenia nie miały bądź utraciły je w wyniku likwidacji linii lokalnych.

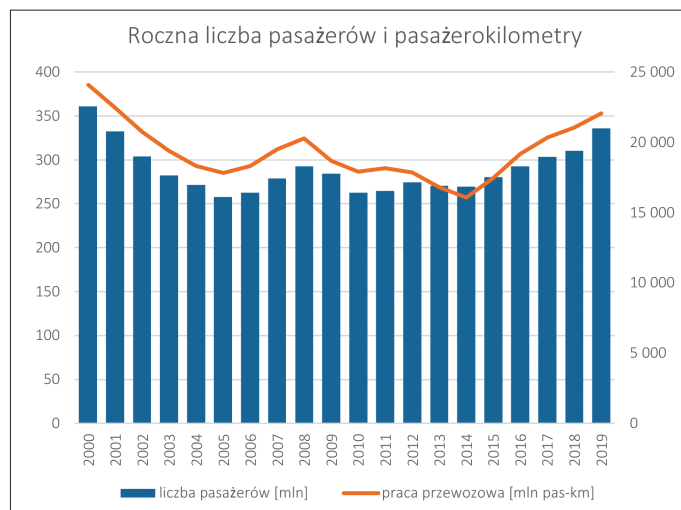
Słowa kluczowe: transport kolejowy, popyt, potencjał popytowy.

Tło zaniku regionalnych przewozów pasażerskich na początku XXI wieku

Przemiany gospodarcze w sektorze transportu kolejowego i przemysłu regionalnego na przełomie wieków przyczyniły się do redukcji sieci kolejowej w Polsce. Proces ten dotknął przede wszystkim linie o znaczeniu regionalnym i lokalnym oraz miasta, które w wyniku reformy samorządowej po 1999 roku straciły status siedziby województwa. Miasta te straciły na znaczeniu gospodarczym i ekonomicznym, a także wiele z nich doświadczyło kryzysu objawiającego się odpływem ludności, wynikającego z kurczącego się rynku pracy. Te procesy i ich efekty społeczne zostały omówione w [1]. Na tle tych procesów gospodarczych i demograficznych, analizując roczne ogólnosięciowe statystyki przewozów kolejowych, możemy wręcz mówić o wystąpieniu głębokiej zapaści kolejnictwa w latach 2000–2005 oraz nieco mniejszej w latach 2009–2014. Na wykresie nie uwzględniono lat 2020 i 2021 z powodu wystąpienia czynnika niezależnego – epidemii COVID-19, która przyczyniła się do czasowego spadku przewozów nawet o 50–70% w porównaniu z tym samym miesiącem roku ubiegłego (rys. 1).

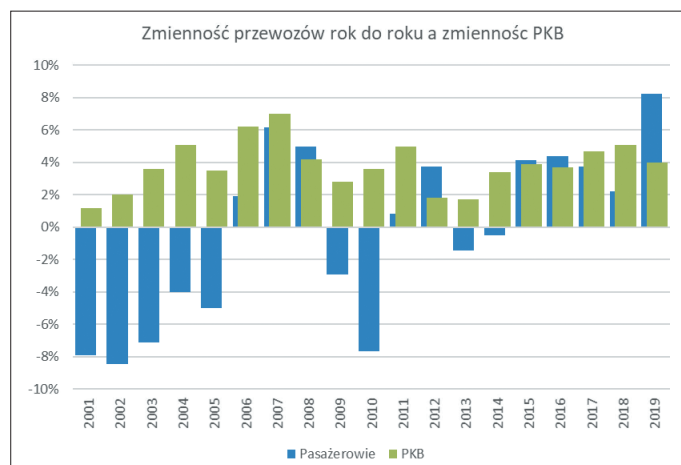
Zmiany liczby przewiezionych pasażerów koleją w tych latach nie były skorelowane ze wzrostem produktu krajowego brutto, którego wartość od wielu lat, zgodnie z metodyką przejętą przez GDDKiA wykorzystywana jest jako podstawa do prognozowania ruchu drogowego [5]. Znamienne jest, że w latach 2001–2004 PKB rósł on z roku na rok, a przewozy kolejowe malały nawet w tempie 8% rok do roku. Podobnie było w latach 2009 i 2010 (rys. 2).

Zjawisko wykluczenia komunikacyjnego i przyczyny zaniku sieci połączeń kolejowych na obszarach pozamiejskich zostało szeroko opisane w pracy [2] oraz [3]. Na potrzeby niniejszego artykułu należy jedynie wspomnieć, że zidentyfikowanie tego zjawiska i próba przeciwdziałania



Rys. 1. Roczne statystyki przewozów pasażerskich dla lat 2000–2019

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych UTK



Rys. 2. Zmienność przewozów pasażerskich kolejną rok do roku a zmienność PKB

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych UTK

mu leżą u podstaw prac planistycznych obejmujących wznowienie ruchu kolejowego do miast powiatowych, które takiego połączenia nie posiadają.

Program odbudowy połączeń regionalnych

W ostatnich latach w wielu regionach następuje odbudowa sieci linii lokalnych i pasażerskiej oferty przewozowej. Dodatkowym czynnikiem wspierającym odbudowę siatki połączeń regionalnych jest program budowy tak zwanych szprych kolejowych powiązanych z projektem Centralnego Portu Komunikacyjnego oraz program rządowy Kolej Plus adresowany do lokalnych samorządów. W ramach tego programu zgłoszonych zostało do odbudowy szereg linii kolejowych, których eksploatacja w ruchu pasażerskim

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2022.

zakończyła się w latach 1995–2014, a z braku potrzeb na ruch towarowy wiele z tych linii zostało poddane procesowi fizycznej likwidacji. Zostały złożone również propozycje doprowadzenia kolei do miejscowości, które nigdy nie były obsługiwane tą gałęzią transportu:

- Szastarka – Janów Lubelski – Biłgoraj,
- Lublin – Łęczna – Bogdanka,
- Wieluń – Chorzew Siemkowice,
- Kraków – Myślenice,
- Zegrze – Serock – Przasnysz,
- Kozienice – Warka,
- Konin – Turek.

Spśród 47 projektów zgłoszonych do tego programu, 34 będzie zrealizowanych za łączną kwotę 11 mld złotych [9]. W związku z tym istnieje realne zapotrzebowanie na prognostyczne określenie potencjału popytowego miejscowości, które przez wiele lat nie były włączone w system kolejowych przewozów pasażerskich.

Problem oszacowania potencjału popytowego

W przypadku obszaru, do którego od wielu lat nie docierają pociągi, prognosta staje przed problemem braku potoków początkowych, danych historycznych i braku możliwości dokonania pomiarów potoków ruchu w transporcie kolejowym, na których może zostać oparta prognoza. W związku z tym, dla projektu odtworzenia połączenia kolejowego, niefunkcjonującego obecnie w pasażerskim ruchu kolejowym, zachodzi konieczność przyjęcia metodą ekspercką założeń do potoku początkowego, gdyż dane początkowe nie są dla takiej linii dostępne. Oczywiście można i powinno się wykonać pomiary ruchu drogowego i napełnień w transporcie autobusowym na ciągu drogowym równoległym do planowanego przebiegu nowego połączenia kolejowego. Będą to jednak dane niewystarczające do oszacowania, ile procent z obecnych pasażerów samochodów i autobusów będzie skłonna przesiąść się do transportu kolejowego.

Badania ankietowe przeprowadzone pośród „nie pasażerów” są w tym przypadku jedyną metodą dotarcia do potencjalnych użytkowników nowego systemu transportowego lub nowej trasy (oferty przewozowej). Jednakże, jak wykazuje dotychczasowe doświadczenie, przeprowadzenie badania ankietowego pośród mieszkańców obarczone jest ryzykiem uzyskania wyników dużo bardziej optymistycznych, niż będą się kształtowały realne potoki pasażerskie. Pytanie o korzystanie z przyszłego połączenia zazwyczaj daje odpowiedź pozytywną u większości ankietowanych mieszkańców, lepiej jest w takiej sytuacji zapytać o coś bardziej realnego, na przykład: Czy kiedy zostaną uruchomione pociągi, to zostawi Pan/Pani samochód przed dworcem na parkingu P+R?. Pytanie o konkretne zachowania komunikacyjne i rezygnację z dotychczasowych przyzwyczajeń lepiej przybliżają potencjalną skalę zainteresowania. Nawet przy umiejętnie skonstruowanej ankiecie deklaratywny entuzjazm społeczny dla wznowienia ruchu kolejowego będzie zazwyczaj dużo większy niż rzeczywiste zapotrzebowanie na codzienne dojazdy do miejsc pracy i nauki.

Istnieje jednak metoda obiektywnego określenia potencjału popytowego miejscowości, które mają być włączone w sieć obsługi transportem kolejowym, oparta na wykorzystaniu znanych, sztywnych danych demograficznych i statystycznych. Oszacowanie średniodobowej liczby pasażerów, którzy będą korzystać z nowego połączenia, można oprzeć na potencjale przewozowym jednostek administracyjnych znajdujących się w bezpośrednim obszarze oddziaływania. Potencjał ten może zostać wyznaczony na podstawie liczby ludności danej jednostki administracyjnej pomnożonej przez średnią liczbę podróży na mieszkańca województwa, w którym się ona znajduje, wyznaczoną na podstawie danych GUS o wielkości przewozów kolejowych w podziale na województwa oraz liczby ludności województw i podzielonej na średnią liczbę dni w roku.

$$P_r = \frac{L_{ja} * K_r}{360} \quad (1)$$

gdzie:

- P_r – potencjalny ruch z danego obszaru,
- L_{ja} – liczba ludności jednostki administracyjnej (analizowanego obszaru bezpośredniego oddziaływania),
- K_r – współczynnik ruchliwości na poziomie wojewódzkim wyznaczony na podstawie danych UTK,
- 360 – średnia liczba dni w roku, z uwzględnieniem dni „niepodróżnych”, typu wigilia, Boże Narodzenie, Nowy Rok, Wielkanoc.

Wartości współczynników ruchliwości dla poszczególnych województw dla roku 2020 i 2021 przedstawia tabela 1.

Zróznicowanie współczynnika ruchliwości mieszkańców z wykorzystaniem transportu kolejowego pomiędzy województwami wskazuje nie tylko na gęstość sieci kolejowej względem gęstości zaludnienia. Występują województwa – co potwierdzają również rozmowy z organiza-

Tabela 1

Zestawienie wskaźników wykorzystania kolei w latach 2020–2021 (liczba podróży przypadająca na jednego mieszkańca) według UTK				
województwo	2020	2021	różnica 2021–2020	zmiana 2021/2020 [%]
dolnośląskie	6,632	7,848	1,216	15,5
kujawsko-pomorskie	2,830	3,028	0,198	6,5
lubelskie	1,371	1,647	0,276	16,7
lubuskie	2,321	2,975	0,654	22,0
łódzkie	4,047	4,676	0,629	13,4
małopolskie	2,943	3,751	0,808	21,5
mazowieckie	12,423	13,643	1,220	8,9
opolskie	3,132	3,719	0,587	15,8
podkarpackie	1,342	1,804	0,462	25,6
podlaskie	1,342	1,467	0,125	8,5
pomorskie	15,913	19,897	3,985	20,0
śląskie	3,593	4,297	0,704	16,4
świętokrzyskie	1,757	2,194	0,437	19,9
warmińsko-mazurskie	2,284	2,765	0,481	17,4
wielkopolskie	5,408	6,282	0,874	13,9
zachodniopomorskie	3,733	4,577	0,844	18,4

Źródło: <https://dane.utk.gov.pl/sts/przewozy-pasazerskie/wskaznik-wykorzystania/18556/Wskaznik-wykorzystania-kolei.html>

torami przewozów i przewoźnikami – w których tradycje podróżowania koleją, czy też przyzwyczajenia społeczne są poniżej lub powyżej średniej dla całej Polski. Lokalne przyzwyczajenia ludności do wyboru środka transportu mają duże znaczenie dla planowania inwestycji. Warto zaznaczyć, że powiązanie tych przyzwyczajzeń z gęstością sieci kolejowej jest trudne do udowodnienia na podstawie analizy danych o przewozach w województwach i lokalnej gęstości sieci kolejowej. Znaczenie transportu kolejowego wyrażane tym wskaźnikiem jest największe w województwie mazowieckim i pomorskim, a najmniejsze w lubelskim, podlaskim i podkarpackim.

Zestawienie współczynnika ruchliwości dla lat 2019, 2020 oraz 2021 pokazuje również, jak bardzo ograniczenia epidemiczne w roku 2020 wpłynęły na zmniejszenie się tego wskaźnika we wszystkich województwach. Zatem nie zaleca się wykorzystywania danych statystycznych (w tym współczynnika ruchliwości) z tego roku do prognozowania.

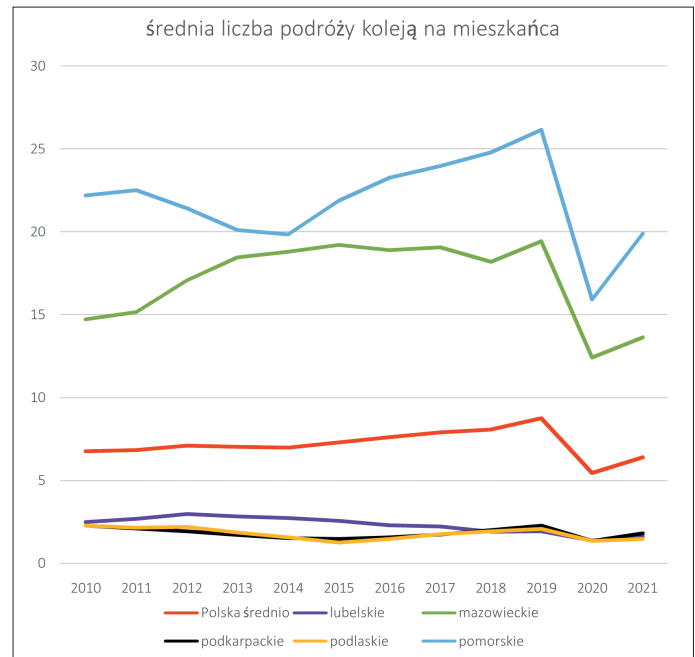
W tabeli 2 przedstawiono zestawienie długości i gęstości sieci kolejowej w województwach z przewozami pasażerskimi i wyznaczonymi dla województw współczynnikami ruchliwości (dane za rok 2019)

Dla danych z tabeli 2 wyznaczony został współczynnik korelacji pomiędzy gęstością sieci oraz liczbą pasażerów i wynosi on 0,02. Podobnie niski jest współczynnik korelacji pomiędzy gęstością sieci a współczynnikiem ruchliwości (0,039), pomimo tego, że województwa posiadające gęstszą sieć kolejową, z reguły mają również większą gęstość zaludnienia. Potwierdza to obserwację, że zróżnicowanie popytu na przewozy kolejowe pomiędzy poszczególnymi województwami nie jest powiązane z gęstością przestrzenną sieci kolejowej, a raczej z przyzwyczajeniami lokalnymi i jakością oraz dostępnością oferty przewozowej.

Tabela 2

Zestawienie długości i gęstości sieci w województwach z przewozami i współczynnikiem ruchliwości dla roku 2019				
Województwo	Długość sieci kolejowej [km]	Gęstość sieci kolejowej [km/100km ²]	Przewozy roczne (2019) [tys. pas]	Współczynnik ruchliwości (2019)
dolnośląskie	1 718	8,6	29 503	11,23
kujawsko-pomorskie	1 322	7,4	8 717	4,34
lubelskie	970	3,9	4 358	1,93
lubuskie	927	6,6	3 688	3,64
łódzkie	1 084	5,9	15 422	6,41
małopolskie	1 083	7,1	17 769	4,71
mazowieckie	1 723	4,8	105 943	19,42
opolskie	786	8,4	6 035	5,45
podkarpackie	978	5,5	4 694	2,28
podlaskie	757	3,7	2 347	2,07
pomorskie	1 194	6,5	62 359	26,14
śląskie	1 925	15,6	24 474	5,86
świętokrzyskie	721	6,2	3 017	2,48
warmińsko-mazurskie	1 138	4,7	5 364	3,49
wielkopolskie	1 889	6,3	31 850	9,06
zachodnio-pomorskie	1 183	5,2	9 723	5,78

Źródło: Opracowanie własne na podstawie publikacji GUS „Transport – wyniki działalności 2019”[10] oraz danych UTK



Rys. 3. Średnia liczba podróży koleją na mieszkańca

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych UTK

Dziesięcioletnią dynamikę zmian w województwach, których mieszkańcy najchętniej i najmniej korzystają z kolei na tle kraju pokazuje rysunek 3.

Korzystając z wyznaczonych w ten sposób potencjałów ruchowo-demograficznych, należy mieć na uwadze, że w praktyce ruchliwość osób zamieszkałych w strefie oddziaływania linii kolejowej będzie większa od mieszkańców nie mających dostępu do kolei. Szczególnie w sytuacji, gdy wraz ze wznowieniem przewozów zostaje wdrożona korzystna oferta przewozowa (więcej niż 10 par pociągów na dobę, w ruchu cyklicznym), oszacowanie potencjału przewozowego tylko na podstawie demografii jest obciążone błędem niedoszacowania. Przykładem realizacji, gdzie uzyskane potoki pasażerskie przekroczyły oczekiwania, jest wznowienie przewozów na trasie Trzebnica – Wrocław oraz modernizacja linii Poznań – Wągrowiec. Już w kilka lat po uruchomieniu nowej oferty okazało się, że obsługa pojedynczym wagonem silnikowym jest niewystarczająca w stosunku do powstałego popytu.

Ruch przejęty i wzbudzony

Ruch przejęty to ruch, który odbywał się przed realizacją inwestycji innymi środkami transportu indywidualnego lub zbiorowego. W przypadku prognozowania przejęcia istniejącego ruchu bezpiecznie jest przyjąć, że ruch ten rozłoży się pomiędzy transport samochodowy indywidualny a transport autobusowy na poziomie proporcjonalnym do obecnego podziału zadań przewozowych w drogowym transporcie lądowym.

W przypadku prognozowania przejęcia istniejącego ruchu bezpiecznie jest przyjąć, że ruch ten rozłoży się pomiędzy transport samochodowy indywidualny a transport autobusowy na poziomie proporcjonalnym do obecnego podziału zadań przewozowych w drogowym transporcie lądowym.

Długoletni brak połączeń kolejowych doprowadził do przeniesienia popytu na inne środki transportu oraz wygaszenia popytu w przypadku podróży nieobligatoryjnych (czyli podróży nie związanych z pracą i nauką, załatwianiem spraw urzędowych, korzystaniem z opieki zdrowotnej oraz podróży służbowych). Istnienie potencjału w postaci popytu wygaszonego determinuje możliwość pojawienia się ruchu wzbudzonego, w wyniku powstania nowych możliwości transportowych poprzez uruchomienie nowego, dotychczas nieobsługiwane połączenia. O ruchu wzbudzonym można mówić w przypadku, kiedy decyzja o podjęciu podróży podejmowana jest w wyniku powstania nowej możliwości odbycia podróży. Czyli – w przypadku braku realizacji inwestycji udostępniającej nowe połączenie – taka podróż nie zostanie wykonana.

Należy jednak pamiętać, że samo zjawisko istnienia ruchu wzbudzonego jest bardzo trudne do wychwycenia, bez przeprowadzenia kompleksowych postrealizacyjnych badań „źródło – cel” po ustabilizowaniu się potoków ruchu obciążających nową inwestycję. Obserwowane jest również chwilowe zainteresowanie przewozami w pierwszym okresie eksploatacji nowego połączenia transportowego, które po ustabilizowaniu się ruchu zanika [4]. Jest to tzw. ruch wzbudzony ciekawością nowego połączenia i tego typu ruch, w przypadku znaczącej inwestycji na sieci kolejowej, może wystąpić jako trwała tendencja. Za przyjęciem takiego założenia przemawia sytuacja, gdy po obu końcach analizowanego szeroko ciągu, jak i w bezpośrednim obszarze oddziaływania, znajdują się obiekty będące atraktorami podróży, a dotychczas nie było możliwości zrealizowania takich podróży koleją bez nadkładania drogi lub innym publicznym środkiem transportu.

Założenia przyjmowane w wytycznych do prognozowania ruchu wzbudzonego na nowych ciągach drogowych wskazują poziom ruchu wzbudzonego dla nowo budowanych dróg w wysokości 10% [5]. Dotychczasowe doświadczenia eksperckie [6], [7] w prognozowaniu ruchu w systemach komunikacji zbiorowej oraz obserwacje inwestycji kolejowych już zrealizowanych wykazują, że poziom tego rodzaju ruchu przy inwestycjach w systemy transportu publicznego jest znacznie mniejszy. Z drugiej zaś strony, całkowite wykluczenie ruchu wzbudzonego w przypadku inwestycji, która tworzy nowe możliwości podróżowania w rejonie atrakcyjnym turystycznie oraz zróżnicowanym gospodarczo i przestrzennie, stanowić może błąd metodyczny. Udowodniono bowiem w badaniach terenowych, że wybór miejsc pracy i nauki przez mieszkańców terenów niezurbanizowanych jest ściśle powiązany z istnieniem (dostępnością) sieci komunikacyjnej [2].

Biorąc pod uwagę powyższe opracowania i przesłanki, poziom ruchu wzbudzonego proponuję przyjmować konserwatywnie, w wysokości nie większej niż 3% łącznego wolumenu przewozów kolejowych, liczonego metodą oszacowania potencjału demograficznego dla popytu potencjalnego i wygaszonego. Uzyskane tą metodą wartości ruchu wzbudzonego zgodne są z wytycznymi Niebieskiej Księgi,

która wskazuje, że co do zasady, wielkość ruchu wzbudzonego nie powinna przekraczać 5% ruchu istniejącego [8], z tym, że w przypadku inwestycji obejmujących budowę (lub odbudowę) nowej linii kolejowej, za ruch istniejący należy przyjąć ruch drogowy indywidualny oraz w komunikacji autobusowej łącznie.

Podsumowanie

Wykorzystanie danej statystycznej, jaką jest średnia roczna liczba podróży na mieszkańca (współczynnik ruchliwości) w połączeniu z analizą demograficzną obszaru ciężenia nowego połączenia, pozwala z dość dużym przybliżeniem oszacować oczekiwany popyt na podróże kolejowe dla obszarów dotychczas pozbawionych połączenia z siecią kolejową. Metodę tę można zastosować w przypadku braku danych historycznych o przewozach oraz w sytuacji braku dostępu do wielogłęziowego modelu ruchu dla analizowanego obszaru, z rozróżnieniem rejonów na poziomie bardziej szczegółowym niż powiaty.

Przeanalizowanie danych demograficznych, przewozowych i o gęstości sieci dla województw pozwala na postawienie tezy, że zróżnicowanie ruchliwości mieszkańców pomiędzy województwami nie jest bezpośrednio powiązane z gęstością sieci kolejowej w danym województwie. Dlatego też zaleca się wykorzystywanie w prognozach wskaźników wojewódzkich opartych na danych historycznych dla okresu miarodajnego (z wykluczeniem roku 2020) zamiast wskaźnika ruchliwości wyznaczonego na poziomie krajowym.

Zaleca się jednakże przeprowadzenie badań napełnień pociągów nie wcześniej niż pół roku po wznowieniu połączenia, w celu weryfikacji wstępnej prognozy i dostosowania oferty przewozowej do potrzeb.

Literatura

1. Springer F., *Miasto Archipelag. Polska mniejszych miast*, Kraków 2016.
2. Gitkiewicz O., *Nie zdążyć*, Warszawa 2019.
3. Trammer K., *Ostre cięcie. Jak niszczone polską koleją*, Warszawa 2019.
4. Chyliński P., *Ruch wzbudzony ciekawością nowego połączenia*, <http://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/ruch-wzbudzony-76224.html>
5. *Zasady prognozowania ruchu drogowego na zamiejskiej sieci dróg krajowych do roku 2020*, GDDKiA, 2001.
6. Szarata A., *Modelowanie ruchu wzbudzonego w miastach*. Edroga.pl, wrzesień 2011
7. Szarata A., *Badania ankietowe dotyczące zjawiska ruchu wzbudzonego w podróżach transportem zbiorowym*, „Logistyka”, 2012, nr 3.
8. Niebieska Księga, Sektor Kolejowy, Infrastruktura Kolejowa, Jaspers, Warszawa 2015 (rozdział 2.1.3).
9. <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/morawiecki-bedzie-az-11-miliardow-zlotych-na-kolej-plus-107712.html>
10. *Transport – wyniki działalności w 2019 r.*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, Szczecin 2020.

OGÓLNOPOLSKA KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA

**AKTUALNE PROBLEMY
TRANSPORTU ZBIOROWEGO
W MIASTACH I AGLOMERACJACH PTZ'2022**
KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA | KRAKÓW 8 - 9.09. 2022 r.



ORGANIZATORZY KONFERENCJI

Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP Oddział w Krakowie

przy udziale:

Katedry Systemów Transportowych Politechniki Krakowskiej

oraz

Małopolskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa w Krakowie

TEMATYKA

1. Innowacyjne rozwiązania dla transportu publicznego wspierające integrację, dostępność przestrzenną i jakość obsługi.
2. Wykorzystanie pojazdów elektrycznych w obsłudze transportowej miast i aglomeracji: e-mobilność, energochłonność i bezpieczeństwo.
3. Transport zbiorowy w małych i średnich gminach.
4. Rola transportu zbiorowego w poprawie jakości życia w miastach.
5. Rola informacji w transporcie zbiorowym.
6. Transport publiczny w aspekcie nowej rzeczywistości po pandemii COVID-19

8-09 września 2022 roku | Hotel Ibis Styles Kraków East w Krakowie

Szczegółowe informacje i zgłoszenia:

<https://www.sitk.org.pl/aktualne-problemy-transportu-zbiorowego-w-miastach-i-aglomeracjach-2022/>

Kontakt: anna.karpierz@sitkrp.org.pl

STUDIA PODYPLOMOWE

nt. „MIEJSKI TRANSPORT ZBIOROWY – ZARZĄDZANIE, ORGANIZACJA, NOWOCZESNE TECHNOLOGIE I INFORMATYCZNE WSPOMAGANIE” – edycja IX

ORGANIZATOR STUDIÓW

Katedra Systemów Transportowych na Wydziale Inżynierii Lądowej w Politechnice Krakowskiej

CELE STUDIUM

Celem głównym studiów jest podniesienie kwalifikacji zawodowej uczestników studiów w zakresie zarządzania miejskim transportem zbiorowym.

Cele szczegółowe to usystematyzowanie i aktualizacja wiedzy z zakresu następujących zagadnień:

- uwarunkowania Unii Europejskiej w zakresie zarządzania miejskim transportem zbiorowym,
- aktualne problemy miejskiego transportu zbiorowego,
- struktury zarządzania miejskim transportem zbiorowym,
- planowanie sieci transportu zbiorowego, węzłów przesiadkowych,
- obsługa centrów miast transportem zbiorowym,
- integracja miejskiego i regionalnego transportu zbiorowego (porozumienia, związki międzygminne, związki metropolitalne),
- dostępność informacji o miejskim transporcie zbiorowym (Internet, planery podróży),
- konkurencja i taryfy w miejskim transporcie zbiorowym,
- jakość przewozów w miejskim transporcie zbiorowym (norma jakości, wzorce jakości, wskaźniki jakości, jakość w umowach przewozowych),
- priorytety w ruchu pojazdów transportu zbiorowego,
- systemy nadzoru ruchu w transporcie zbiorowym,
- zrównoważona mobilność w miastach,
- badania w transporcie zbiorowym (kompleksowe badania potoków pasażerskich, badania wyrwykowe i sprawdzające, technologia badań),
- modelowanie systemów transportu zbiorowego,
- logistyka miejska.

WYMAGANIA DLA KANDYDATÓW

Studia są przeznaczone dla osób, które ukończyły studia wyższe o kierunku transport lub pokrewnym, a także dla absolwentów innych kierunków studiów wyższych, którzy co najmniej trzy lata pracują w firmach lub urzędach zajmujących się transportem publicznym.

INFORMACJE PORZĄDKOWE

1. *Czas trwania studiów:* dwa semestry **01.10.2022 r. – 30.06.2023 r.**
2. *Liczba godzin:* **160**, w tym 118 godzin wykładów i 42 godzin laboratoriów.
3. *Planowana liczba uczestników:* **25 osób**. *Docelowa grupa uczestników* to pracownicy miejskich i regionalnych przedsiębiorstw transportowych oraz zarządów transportu w miastach z całej Polski.
4. *Tryb studiów:* stacjonarny, **zjazdy sobotnio–niedzielne**, 14 zjazdów (I semestr – 7 zjazdów, 82 godziny, II semestr – 7 zjazdów, 78 godzin). Na ostatnim zjeździe egzamin końcowy i obrona prac dyplomowych.
5. *Miejsce studiów:* Politechnika Krakowska, Kraków, ul. Warszawska 24.
6. *Organizator studiów:* Katedra Systemów Transportowych (L-6). Zajęcia prowadzone będą przez pracowników naukowych Politechniki Krakowskiej a także specjalistów spoza PK.
7. *Termin rozpoczęcia studiów:* **początek listopada 2022 r.**
8. Rekrutacja odbywać się będzie na podstawie zgłoszonych ankiet. Termin nadsyłanie zgłoszeń: **25.09.2022 r.**
9. *Opłata za udział w studiach* wynosi **5 200,00 PLN** płatne w dwóch ratach za każdy semestr z góry. (*W przypadku mniejszej liczby uczestników cena może się nieznacznie zwiększyć*).
10. *Studia kończą się* będą napisaniem pracy dyplomowej i jej obroną.
11. *Absolwenci otrzymują* świadectwo ukończenia studiów.

KIEROWNICTWO I ADMINISTRACJA STUDIÓW, INFORMACJE DODATKOWE

Kierownik studiów:

prof. dr hab. inż. Wiesław Starowicz,
e-mail: wstar@pk.edu.pl

Obsługa administracyjna:

mgr inż. Danuta Schwertner, tel. 12 628 30 93,
e-mail: dschwer@pk.edu.pl