

# NARZĘDZIE WSPOMAGAJĄCE ZARZĄDZANIE PASAŻERSKIM SYSTEMEM TRANSPORTOWYM

Joanna GĄBKA, Sławomir SUSZ

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia model symulacyjny do zarządzania systemem transportowym. Opracowane narzędzie wspomaga proces podejmowanie decyzji i generuje prognozy. W modelu uwzględniono zarówno publiczne jak i prywatne środki transportu. Umożliwia on obserwację efektów zmian dokonywanych w sieci transportowej takich, jak wprowadzenie nowego środka transportu, modyfikacje rozkładu jazdy, zmiany technologiczne wpływające na prędkość pojazdów. Narzędzie pozwala również generować prognozy dotyczące przyszłego obciążenia dla poszczególnych środków transportu. System opracowano po obszernej analizie zależności zachodzących w środowisku transportowym. Testy przeprowadzone na danych rzeczywistych wykazały, że jest on bardzo skutecznym, przydatnym i elastycznym narzędziem.

**Słowa kluczowe:** Model symulacyjny, system transportowy, prognozy.

## 1. Wprowadzenie

Rozwijanie i utrzymywanie zrównoważonego systemu transportowego w dzisiejszym dynamicznym środowisku stanowi duże wyzwanie. Jednostki organizacyjne odpowiedzialne za planowanie i rozbudowę dużej liczby szlaków transportowych obsługiwanych przez różne środki transportu mają do czynienia z ogromną złożonością zagadnienia. Metody i systemy wspomagające ich decyzje powinny być elastyczne i dawać możliwość weryfikacji efektów potencjalnych zmian w określonych fragmentach sieci transportowej i/lub rozkładach jazdy. Modyfikacje w tym zakresie muszą być dokonywane w sposób kontrolowany i przewidywalny w stosunku do całości systemu. Inną istotną funkcją dla decydentów zarządzających konfiguracją transportu jest możliwość dokładnego prognozowania popytu. Te wymagania mogą zostać spełnione przez odpowiednio dostosowany model symulacyjny. Instrument doradczy tego rodzaju pozwoli sprawdzić możliwe efekty zmian przed ich dokonaniem i wygenerować prognozy oraz scenariusze na przyszłość.

## 2. Systemy wspomagające zarządzanie siecią transportową

Model jest definiowany jako uproszczona reprezentacja systemu w pewnym określonym punkcie czasu i przestrzeni. Ma on pomóc w zrozumieniu sposobu działania rzeczywistego systemu. Symulacja to manipulacja modelem w czasie i przestrzeni (ich kompresja) umożliwiająca obserwację interakcji, których nie można inaczej zaobserwować gdyż są oddzielone w czasie i przestrzeni [1].

Model symulacyjny na ogół charakteryzuje bardzo złożona struktura. Jej kluczowymi elementami są procedury i reguły sterujące wewnętrznymi mechanizmami modelu. Mogą to być równania, modele matematyczne, statystyczne, ekonometryczne, sztuczne sieci neuronowe. Innym krytycznym elementem związanym z modelem symulacyjnym jest

poprawny i kompletny zestaw danych. Tylko implementacja efektywnych procedur i kompletnej bazy informacji zapewnia właściwe działanie modelu polegające na poprawnym odzwierciedlaniu zjawisk, które symuluje.

Rozwój technologii informatycznych zintensyfikował badania związane z modelowaniem złożonych systemów, włączając w to sieci transportowe i przepływ pasażerów. W literaturze wskazuje się trzy podstawowe kategorie modeli symulacyjnych. Pierwsza reprezentowana przez makro-modele opisujące w sposób ogólny strumień transportowy jako populację obiektów. Po drugiej stronie skali znajdują się mikro-modele zawierające indywidualne obiekty zdefiniowane szczegółowo wraz z ich charakterystyką. Pomiędzy tymi dwoma skrajnymi grupami znajdują się modele w skali mezo zalecane dla symulacji strumienia pasażerskiego. Ten rodzaj modeli składa się zarówno z obiektów zdefiniowanych w sposób ogólny jak i szczegółowy [2]. Bardziej wyczerpująco można systematyzować modele według: [3, 4, 5]:

- Podejścia do modelowania (automat komórkowy, modele cząsteczek hopping, mikroskopowe modele sytuacyjne, modele kolejkowe, modele oparte na kinetyce gazów, modele kontinuum;
- Reprezentacji ruchu (indywidualny pasażer, zagregowany strumień pasażerski)
- Rodzaju reguł dotyczących zachowania, które mogą być indywidualne dla obiektów lub wspólne.
- Interpretacji zmiennych zaimplementowanych w modelu. Miary takie jak np. położenie czy prędkość mogą być opisywane w sposób ciągły lub dyskretny. Niektóre modele mogą być klasyfikowane jako mieszane w tym zakresie.
- Interpretacji niepewności wykorzystanej w modelu (deterministyczna z dokładną definicją wszystkich zależności, stochastyczna ze zmiennymi losowymi);
- Formalnych założeń dotyczących systemu operacyjnego. Są modele złożone z szeregu równań używane tylko w analizie teoretycznej i modele symulacyjne o charakterze praktycznej aplikacji, których silnik stanowi zwykle zbiór równań przekształconych w kod programu.
- Obszaru przeznaczenia modelu (miasto, między miastami, między regionami, między krajami).

## 2. Charakterystyka proponowanego modelu symulacyjnego

Tradycyjne podejście do analizy popytu na transport publiczny ma charakter statyczny z naciskiem na równowagę stanów. Obecnie duży nacisk jest położony na dynamikę procesu, która pozwala osiągać stany równowagi lub w pewnych okolicznościach zapobiegać im. Użyteczność modeli symulacyjnych w praktyce jest w dużym stopniu zależna od zaimplementowanych algorytmów, procedur przetwarzania danych i baz wypełnionych kompletnymi danymi. Biorąc pod uwagę wyniki otrzymane z analizy zbudowanych wcześniej modelu ekonometrycznego oraz sieci neuronowych zaproponowano architekturę modelu symulacyjnego z odpowiednimi formułami i równaniami.

Model ten jest dedykowany do dokładnego przewidywania liczba podróżujących na danych terasach w określonym środku transportu. Odzwierciedla on zależności pomiędzy czynnikami wpływającymi na wolumen osób przemieszczających się i prezentuje alternatywne scenariusze dotyczące tras, które byłyby wybierane w danych okolicznościach. Dzięki temu istnieje możliwość właściwego zaplanowania liczby środków transportu publicznego, a także przewidywania obciążenia wynikającego z ruchu samochodowego. Opracowane narzędzie wspomagające zarządzanie systemem

transportowym zostało zbudowane w oparciu o standardowe elementy niezbędne w systemie logistycznym i procedury wykorzystywane do budowy prognoz popytu. Zaletą proponowanego rozwiązania jest jego adaptacyjność i elastyczność. Umożliwia ono wprowadzenie dowolnej konfiguracji punktów transportowych zgodnie z charakterystyką sieci transportowej, która ma być poddana analizie.

## 2.1. Ogólne informacje na temat zmiennych

**Punkt transportowy** jest definiowany jako miejsce które generuje przyływ i/lub odpływ ze strumienia pasażerskiego oraz kieruje go w różne strony. W większości przypadków jest to miasto, miejscowość lub wieś stanowiąca źródło albo cel dla strumienia pasażerów. Każdy punkt jest opisany przez liczbę mieszkańców i ich średni przychód. Model zawiera również **specjalne punkty transportowe** reprezentowane przez główne skrzyżowania dystrybuujące ruch. W tym przypadku obie charakterystyki (liczba mieszkańców i średni przychód) wynoszą 0. To sprawia, że punkty specjalne nie mają możliwości generowania lub przyjmowania pasażerów. Są jednak niezbędne do właściwego opisanie tras podróży w modelu.

**Środek transportu** - możliwy sposób podróżowania pomiędzy dwoma punktami transportowymi. Środki transportu uwzględnione podczas testów modelu to: kolej, autobus i samochód. Zostały one podzielone na dwie kategorie transport publiczny dofinansowany przez lokalne władze (kolej, autobus) i prywatny (samochód). Model symulacyjny umożliwia wprowadzenie dowolnych środków transportu o ile trasy po, których się przemieszczają są znane.

**Połączenie** – trasa podróży z jednego miejsca do innego (bezpośrednio pomiędzy dwoma sąsiadującymi punktami transportowymi). Każde połączenie ma swoją długość podaną w kilometrach, czas podróży określony w minutach, a także dostępne środki transportu (kolej, autobus, samochód). Połączenia również są podzielone na dwie kategorie (publiczne i prywatne).

**Potencjał punktu transportowego** – potencjał punktu transportowego  $i$  w kierunku punktu transportowego  $l$  określony jako  $C_{il}$ . Jest to możliwość danego punktu związana z przyjmowaniem i generowaniem określonej liczby podróży. Oblicza się go jako wskaźnik wielkości całej populacji żyjącej w punkcie  $i$  pomnożonej przez tę samą wartość dla punktu  $l$  i podzielonej przez kwadrat odległości między tymi punktami. Równanie dla  $C_{il}$  prezentuje (1).

**Sieć transportowa** – jest definiowana jako zestaw punktów transportowych i ich bezpośrednich połączeń umożliwiających pasażerom przemieszczanie się.

**Trasa** – jest to uporządkowany zbiór połączeń będący elementem sieci, który łączy dwa dowolnie wybrane punkty transportowe. Trasy są podzielone na dwie kategorie (publiczne i prywatne).

**Wskazywanie trasy** – procedura wyboru optymalnej trasy pomiędzy dwoma punktami. Optymalna trasa to taka, która pozwala osiągnąć najwyższy poziom satysfakcji klienta (2). To kryterium będzie dokładniej opisane w dalszej części artykułu.

**Potencjał pasażerski** – jest to maksymalna liczba pasażerów, którzy chcą podróżować pomiędzy dwoma punktami transportowymi. Wartość ta jest obliczana w modelu matematycznym zbudowanym dla potrzeb modelu symulacyjnego.

**Maksymalny popyt pasażerski** (dla wybranego połączenia) – suma potencjałów pasażerskich z wszystkich tras wykorzystujących dane połączenie.

Zaleca się budowę modeli sumacyjnych na bazie modelu matematycznego, który opisuje wszystkie zależności w postaci równań. Takie podejście pozwala uniknąć błędów, które mogą wystąpić w przypadku aproksymacji dokonywanych dla modeli numerycznych. Proponowane narzędzie zbudowano na podstawie wielopoziomowego modelu matematycznego dostarczającego danych na odpowiednich etapach analizy. Wyróżniono następujące etapy:

1. Określenie maksymalnej liczby pasażerów, którzy chcą się przemieszczać z każdego punktu transportowego w określonym czasie.
2. Obliczenie potencjału pasażerskiego pomiędzy jednym punktem transportowym i wszystkimi pozostałymi punktami (określenie gdzie chcą się przemieszczać osoby z poszczególnych punktów).
3. Wskazanie trasy w sieci transportowej, oznacza wskazanie optymalnej publicznej i prywatnej trasy pomiędzy każdą parą punktów przyjmujących i generujących ruch.
4. Wskazanie jak obliczone potencjały pasażerskie będą się rozkładały w kategoriach: transport publiczny/prywatny.
5. Obliczenie maksymalnego popytu na każde połączenie w sieci. To operacja sumująca wszystkie potencjały wynikające z tras używających wybranego połączenia.

Wymienione wyżej fazy kalkulacji realizowane w modelu są opisane szerzej w kolejnej sekcji.

## 2.2. Model matematyczny zależności i warunków zawartych w narzędziu symulacyjnym

Plan transportu sugerowany przez system jest skoncentrowany na maksymalizacji satysfakcji klienta/pasażera. Został on zdefiniowany jako czynnik bezpośrednio wpływający na to jaki środek transportu i które połączenie będzie wybrane przez podróżującego. Wybrane podejście zakłada, że najważniejszym czynnikiem motywującym podróżnego do wyboru danego sposobu przemieszczania się jest generalizowany koszt podróży pomiędzy dwoma punktami transportowymi [6]. Kryterium satysfakcji jest zatem głównie zależne od kosztu podróży, czasu i wartości czasu dla danego pasażera. Sposób obliczania danych niezbędnych dla poprawnego funkcjonowania modelu w poszczególnych fazach przedstawiono poniżej. Zostały ujęte zgodnie z kolejnością przedstawioną w poprzedniej sekcji.

1. Określenie maksymalnej liczby pasażerów, którzy chcą się przemieszczać z każdego punktu transportowego w określonym czasie. Proponowany model symulacyjny używa modelu Daly'ego dystrybucji podróżnych. Umożliwia on obliczenie prawdopodobieństwa, że dany mieszkaniec punktu transportowego podejmie podróż, [7]. Następujące formuły służą obliczeniu wartości prawdopodobieństwa  $\eta_i$ , że pojedynczy mieszkaniec punkt transportowego  $i$  zdecyduje się na rozpoczęcie podróży.

$$\eta_i = \frac{a}{1 + e^{(-\lambda_i)}} \quad (1)$$

$$\lambda_i = \sum_k c_k \cdot p_k \quad (2)$$

Gdzie:

- $Z = \{1, \dots, z\}$  - zbiór punktów transportowych wprowadzonych do modelowanej sieci,

- $z$  - całkowita liczba punktów transportowych w analizowanym modelu,
- $\lambda$  - użyteczność podróży – zależy od takich parametrów jak przychód mieszkańca, poziom motoryzacji w regionie, zamożność mieszkańców wyrażone przez  $p_k$ .
- $a$  – parametr, który jest szacowany w celu skorelowania modelu z historycznymi danymi rzeczywistymi,
- $k$  – indeks oznaczający parametry składające się na zmienną  $p$ ,
- $c_k$  – parametr korelacji wskazujący wpływ na prawdopodobieństwo. W tym przypadku ma on stałą wartość  $c_k = 1$

Wynik mnożenia wartości prawdopodobieństwa ( $\eta_i$ ) oraz liczby mieszkańców w danym punkcie transportowym wskazuje ile osób będzie się przemieszczać poza ten punkt w danym przedziale czasu (3).

$$T_i = P_i \cdot \eta_i \quad (3)$$

Gdzie:

- $T_i$  – potencjał dla punktu transportowego  $i$ .
  - $P_i$  – liczba mieszkańców w punkcie transportowym  $i$ .
2. Obliczenie potencjału pasażerskiego pomiędzy jednym punktem transportowym i wszystkimi pozostałymi punktami (określenie gdzie chcą się przemieszczać osoby z poszczególnych punktów). Ten etap przetwarzania danych w modelu opiera się na bardzo popularnym modelu grawitacyjnym, [8]. W tej fazie model musi określić cel podróży dla pasażerów z punktu  $i$ . W tym momencie można określić jak duży jest strumień pasażerski w zależności od kierunku podróży.

$$G_{il} = \frac{P_i + P_l}{(s_{il})^2} \quad (4)$$

Gdzie:

- $G_{il}$  - grawitacja punktu  $i$  w stosunku do punktu  $l$ . Ile osób chce się przemieścić z punktu  $i$  do punktu  $l$ .
- $P_i$  – liczba mieszkańców w punkcie  $i$ .
- $P_l$  – liczba mieszkańców w punkcie  $l$ .
- $S_{il}$  – odległość między punktami  $i$  i  $l$  podana w kilometrach.

Model określa potencjał pomiędzy punktem  $i$  oraz dowolnym innym punktem dzieląc proporcjonalnie udział potencjałów poszczególnych punktów w całości (5).

$$T_{il} = T_i \cdot \frac{G_{il}}{\sum_{j=1}^k g_{jl}} \quad (5)$$

3. Wskazanie trasy w sieci transportowej, oznacza wskazanie optymalnej publicznej i prywatnej trasy pomiędzy każdą parą punktów przyjmujących i generujących ruch. Na tym etapie model określa dwie kategorie tras (publiczną, prywatną) pomiędzy każdą parą punktów wprowadzonych do sieci transportowej. Narzędzie do symulacji przeprowadza analizę każdej możliwej kombinacji połączeń, które wiodą od punktu  $i$  do punktu  $l$ . Algorytm typu 'brute-force' poszukuje optymalnego rozwiązania w sekwencjach zgodnie z wprowadzonymi warunkami i regułami. Trasa jest określana jako optymalna z punktu widzenia kryterium satysfakcji. Jest to funkcja minimalizacji kosztu i czasu.

Zdefiniujmy graf  $G = \langle W, U \rangle$  gdzie  $W$  jest zbiorem węzłów, a  $U$  zbiorem uporządkowanych par węzłów (linii) należących do  $W$ . Załóżmy, że  $w_1, w_2, \dots, w_n$  ( $n \geq 2$ ) jest sekwencją pojedynczych węzłów takich, że  $u_i = \langle w_i, w_{i+1} \rangle$  jest linią dla każdego  $i = 1, \dots, n-1$ . Sekwencję  $u_1, u_2, \dots, u_{n-1}$  nazywamy trasą  $z_{\langle 1, n \rangle}$  pomiędzy punktami 1 i  $n$ . Załóżmy  $Z_{\langle 1, n \rangle}$  jest zbiorem wszystkich tras pomiędzy punktem 1 a  $n$ . Wówczas dla każdej linii  $w_i$  definiujemy następujące funkcje:

$$\begin{aligned} t_i(u_i): u_i &\rightarrow Z^+ \cup \{0\} - \text{koszt biletu na linię } u_i & (6) \\ d_i: u_i &\rightarrow Z^+ \cup \{0\} \rightarrow \text{długość linii } u_i & (7) \end{aligned}$$

Definiujemy funkcję kosztu dla transport publicznego pomiędzy punktem 1 i trasami przez niego przebiegającymi  $z_{\langle 1, n \rangle} \in Z_{\langle 1, n \rangle}$  jako:

$$\text{kosztZ1} = \sum_{z_{\langle 1, n \rangle}} t_i \quad (8)$$

Podobnie określamy funkcję kosztu dla transport prywatnego pomiędzy punktem 1 i trasami przez niego przebiegającymi  $z_{\langle 1, n \rangle} \in Z_{\langle 1, n \rangle}$  jako:

$$\text{kosztZ2} = \sum_{z_{\langle 1, n \rangle}} d_i \theta \quad (9)$$

Kryterium satysfakcji na tym etapie jest obliczane osobno dla kategorii tras (publiczne, prywatne) jako:

$$K1 = \min_{z_{\langle 1, n \rangle}} (\text{costZ1} * \text{timeZ1}) \quad (10)$$

$$K2 = \min_{z_{\langle 1, n \rangle}} (\text{costZ2} * \text{timeZ2}) \quad (11)$$

Gdzie:

- $\text{kosztZ1}$  - koszt podróży w przypadku tras publicznych,
- $\text{kosztZ2}$  - koszt podróży w przypadku tras prywatnych,
- $\delta_{i,l}$  - odległość między punktem transportowym  $i$  oraz  $l$  podana w kilometrach,
- $\theta$  – koszt transport prywatnego na jednostkę (kilometr), wartość tego parametru zależy od wielkości silnika w pojeździe, rodzaju paliwa i jego średniej ceny.

Wartość wskaźnika satysfakcji wynika z liczby połączeń zawartych w danej trasie, a także liczby punktów transportowych na tej trasie. Zwykle trasy obsługiwane przez jeden środek transportu (bez przesiadek) są preferowane, ponieważ czas podróży jest wówczas krótszy. Jednak w przypadku gdy brak bezpośredniego połączenia jednym środkiem transportu rozwiązania mieszane są dopuszczalne i wskazywane jako optymalne ze względu na kryterium satysfakcji. W niektórych przypadkach funkcja kosztu dla transportu publicznego jest znacznie bardziej złożona. Jeżeli są dopłaty dla wybranych grup pasażerów (np. studenci) wówczas równanie powinno uwzględnić bilet ulgowy, normalny i liczbę pasażerów uprawnionych do ich kupna.

Czas podróży dla tras transportu publicznego (kolej, autobus) jest obliczany następująco:

$$\text{czasZ1} = t_{DS} + t_p + t_{ch} + t_{SD} \quad (12)$$

Gdzie:

- *czasZ1* - czas podróży dla tras transport publicznego,
- $t_{DS}$  - czas ‘drzwi – przystanek autobusowy’ – średni czas dotarcia do przystanku autobusowego/stacji kolejowej i oczekiwania na odjazd środka transportu,
- $t_p$  – określony czas podróży pomiędzy przystankiem/stacją początkową, a końcową,
- $t_{ch}$  - całkowity czas przesiadki/transferu z autobusu na pociąg lub odwrotnie,
- $t_{SD}$  – czas ‘przystanek-drzwi’ – średni czas dotarcia z przystanku/stacji końcowej do celu podróży.

Czas podróży dla tras transportu prywatnego jest obliczany za pomocą formuły (13):

$$\text{czasZ2} = t_{DC} + t_c + t_{CD} \quad (13)$$

Gdzie:

- *czasZ2* - czas podróży dla tras transport prywatnego,
- $t_{DC}$  – czas ‘drzwi-auto’ – średni czas dotarcia do samochodu,
- $t_c$  – określony czas podróży samochodem,
- $t_{CD}$  – czas ‘samochód-drzwi’ – średni czas parkowania samochodu i dotarcia do celu podróży.

4. Wskazanie jak obliczone potencjały pasażerskie będą się rozkładały w kategoriach: transport publiczny/prywatny.

Algorytm zaimplementowany w proponowanym narzędziu symulacyjnym określa rozmiar strumienia pasażerów dla każdej grupy tras (publicznych, prywatnych) na bazie generalizowanej funkcji kosztów [6].

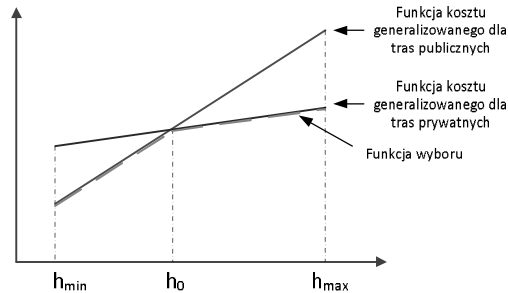
$$G = \sum_{j=1}^n c_j + (\sum_{\tau=1}^r \beta_{\tau} \cdot t_{\tau}) \cdot h_s \quad (14)$$

Gdzie:

- $G$  - rozmiar strumienia pasażerów;
- $J = \{1, \dots, a\}$  - zbiór elementów kosztów podróży  $j, a \in J$ ;
- $j$  – indeks oznaczający dany element kosztu podróży;
- $a$  - całkowita liczba składników kosztu podróży;
- $c_j$  – elementy kosztu podróży dla danej trasy;
- $L = \{1, \dots, r\}$  – zbiór elementów czasu podróży  $o, r \in L$ ;
- $\tau$  – indeks oznaczający dany element czasu podróży;
- $r$  – całkowita liczba elementów czasu podróży;
- $\beta_j$  – wskaźnik dla czasu podróży (wskaźnik wynosi 1 w modelu)
- $t_j$  – element czasu podróży dla danej trasy;
- $h_s$  – koszt jednostkowy danego czasu podróży  $s$ .

Przy obliczaniu kosztu jednostkowego czasu podróży dla każdego podróźnego kluczowe znaczenie ma właściwie dobrana metoda. Formuła określająca jak strumień pasażerski rozdziela się pomiędzy dwoma kategoriami tras ma charakter funkcji liniowej. W przypadku gdy czas podróży jest różny dla kategorii tras istnieją dwie wartości kosztu generalizowanego. Funkcja ta przecina się w punkcie  $h_0$  (rysunek 1). Ten punkt określa neutralny koszt podróży. Jeżeli czas podróży dla trasy publicznej jest dłuższy niż czas dla trasy prywatnej (co ma miejsce w większości przypadków) wówczas pasażerowie dla których wartość jednostkowa ( $h_s$ ) jest mniejsza od  $h_0$  (osoby mające niższy dochód) wybiorą transport publiczny. Pozostali pasażerowie zdecydują

się na prywatny środek transportu. Na rysunku 1  $h_{min}$  oznacza najniższy jednostkowy koszt dla czasu podróży, natomiast  $h_{max}$  wskazuje najwyższy koszt dla czasu podróży (ta wartość jest charakterystyczna dla mieszkańców o najwyższym dochodzie, których czas ma największą wartość).



Rys. 1. funkcja kosztu generalizowanego, [6].

Algorytm oblicza liczbę pasażerów dla których  $h_s < h_0$  oraz liczbę pozostałych. Rozkład  $h_s$  jest przyjmowany jako taki sam jak rozkład przychodów w społeczeństwie. Rozkład funkcji jest przybliżany przez rozkład Pareto. Dla proponowanego modelu jest to rozkład (gęstość) wartości  $h_s$  opisany za pomocą następujących funkcji.

$$f(x) = \frac{1}{x^\alpha} \quad (15)$$

Gdzie:

$\alpha$  – współczynnik rozkładu w przedziale  $[0,1]$

Liczba pasażerów dla których  $h_s < h_0$  jest proporcjonalna do  $P_1$ .

$$P_1 = \int_{h_{min}}^{h_0} f(x) dx \quad (16)$$

Liczba pasażerów dla których  $h_s > h_0$  jest proporcjonalna do  $P_2$ .

$$P_2 = \int_{h_0}^{h_{max}} f(x) dx \quad (17)$$

5. Obliczenie maksymalnego popytu na każde połączenie ( $D_{il}$ ) w sieci. To operacja sumująca wszystkie potencjały wynikające z tras używających wybranego połączenia ( $f_{il}$ ).

$$D_{il} = \sum_{j=1}^k P_{jl} \cdot f_{jl} \quad (18)$$

Gdzie:

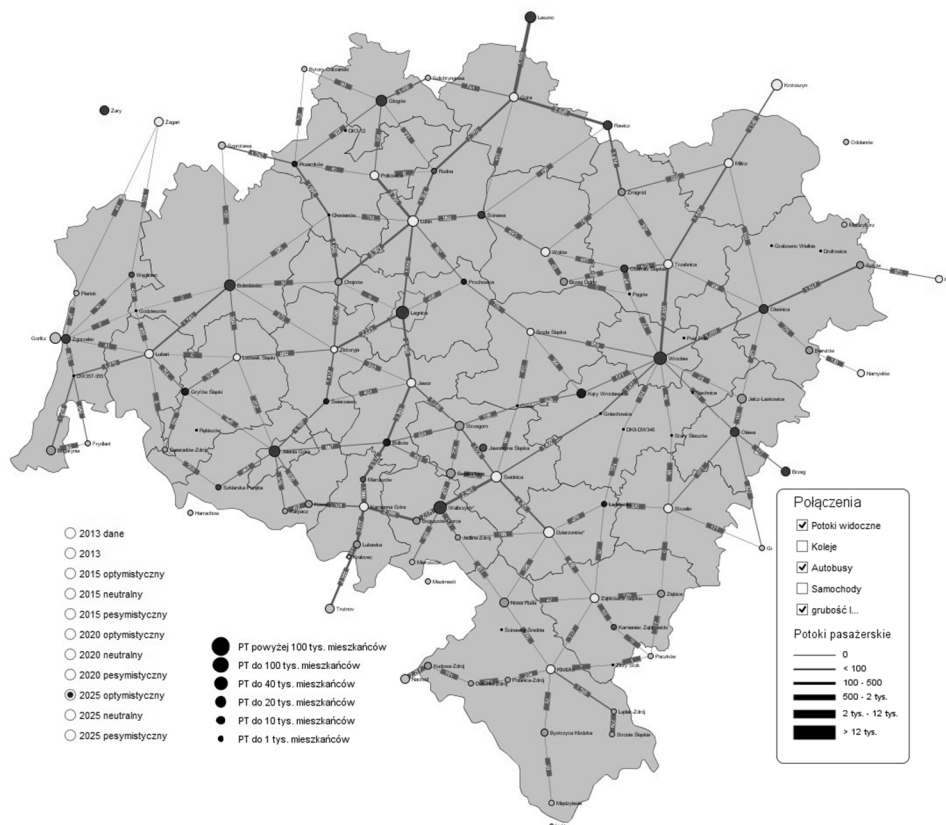
$D_{il}$  – maksymalny popyt na połączenie pomiędzy punktami  $i$  oraz  $l$ .

### 2.3. Zapytania, prognozy i scenariusze w testach modelu

W celu sprawdzenia jak model zachowuje się w różnych warunkach opracowano zestaw scenariuszy dla prognoz: optymistyczny, neutralny i pesymistyczny. Rysunek 2



przedstawia scenariusz neutralny prognozy strumienia pasażerskiego na rok 2020 dla autobusów.



Rys 2. Scenariusz neutralny prognozy strumienia pasażerskiego na rok 2020 dla autobusów

System wskazuje wielkość potoków pasażerskich w postaci liczbowej i za pomocą odpowiednich grubości linii zgodnie z legendą na rysunku 2.

Użytkownik może znajdować za pomocą proponowanego narzędzia optymalne trasy z miejsca A do miejsca B. Rysunek 3 przedstawia efekt wyszukiwania trasy dla mieszanych środków transportu (autobus, pociąg) z Wrocławia do Zgorzelec. Kryterium optymalizacji wybranym przez użytkownika jest w tym przypadku czas i cena.

Mimo wybrania przez użytkownika opcji mieszanych połączeń system proponuje połączenie w całości kolejowe, gdyż jest ono najkorzystniejsze z punktu widzenia czasu i kosztu.



Rys. 3. Wyszukiwanie trasy Wrocław Zgorzelec (kryterium koszt/czas)

### 3. Podsumowanie

Proponowane narzędzie jest przeznaczone do wspomaganie procesu decyzyjnego zachodzącego w instytucjach odpowiedzialnych za infrastrukturę transportową w regionach. Przeprowadzone testy na danych rzeczywistych wykazały jego użyteczność i elastyczność. Model ma kilka możliwych zastosowań. Można w nim sprawdzić efekty modyfikacji sieci transportowej związane z wprowadzaniem nowych środków transportu, zmianą rozkładów jazdy lub wdrożeniem nowej technologii wpływającej na czas podróży. Ponadto narzędzie służy do przewidywania jak obciążona będzie sieć transportowa w przyszłości. W tym przypadku użytkownik ma możliwość wyboru scenariusza (optymistyczny, neutralny, pesymistyczny). Model pozwala także znaleźć optymalne względem założonych kryteriów połączenie pomiędzy dwoma dowolnymi punktami sieci transportowej.

### Literatura

1. Banks J., Carson J., Nelson B., Nicol D. Discrete-Event System Simulation. Prentice Hall, 2001, s. 3.

2. Leszczyński J., Modelowanie procesów i systemów transportowych Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1994.
3. Smalko Z.: Modelowanie eksploatacji systemów transportowych. ITeE, Radom, 1996.
4. Woropay M., Kapnik L., Landowski B.: Modelowanie procesów eksploatacji w systemie transportowym, ITeE, Radom, 2001.
5. Ratajczak W.: Modelowanie sieci transportowych, Wydawnictwo UAM, Poznań, 1999.
6. Żurkowski A., Wybór metody prognozowania przewozów na linii szybkiego ruchu, Centrum Naukowo – Techniczne Kolejnictwa, 2010.
7. Daly H. E., Sustainable Development from Concept and Theory Toward Operational Principles, Population and Development review nr 16, 1990.
8. Bieńczyk M., Fierek S., Kiciński M. Regionalny model podróży na potrzeby planu zrównoważonego rozwoju transportu publicznego, Logistyka-nauka, 2014.

Dr inż. Joanna GĄBKA

Dr inż. Sławomir SUSZ

Katedra Technologii Laserowych, Automatykacji i Organizacji Produkcji

Politechnika Wroclawska

50-370 Wrocław, ul. wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27,

Tel. 71 320 41-84

e-mail: joanna.gabka@pwr.edu.pl

slawomir.susz@pwr.edu.pl