

# Problematyka modelowania zależności prędkość – gęstość – natężenie w warunkach ruchu miejskiego<sup>1</sup>

## PAULINA MATUSZ

mgr inż., Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej, 80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12, tel. +48 58 347-22-96, e-mail: Paulina.Matusz13@gmail.com

## GRZEGORZ RUDECKI

mgr inż., Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej, 80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12, tel. +48 58 347-22-96, e-mail: grzegorzrud@gmail.com

## JACEK OSKARBSKI

dr inż., Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej, 80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12, tel. +48 58 347-22-96, e-mail: joskar@pg.gda.pl

## KAZIMIERZ JAMROZ

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej, 80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12, tel. +48 58 347-22-96, e-mail: kjamroz@pg.gda.pl

**Streszczenie.** Pierwszy model charakteryzujący zależność prędkość – gęstość – natężenie powstał ponad 80 lat temu. Od tego czasu naukowcy z całego świata pracowali nad opracowaniem własnych modeli ruchu drogowego, które kompleksowo opisywać będą fundamentalny wykres. Prace nad doбором odpowiednich parametrów, niezbędnych do stworzenia modelu, dokonywano głównie na drogach szybkiego ruchu. Problem poruszony w niniejszym referacie odnosi się do niedostatecznej ilości przeprowadzonych badań nad zagadnieniem zależności prędkość – gęstość – natężenie w warunkach miejskich w Polsce. Celem artykułu jest ocenienie możliwości implementacji istniejących modeli ruchu w sieci ulicznej na przykładzie Trójmiasta, wraz z opracowaniem autorskiej metodologii badań, adekwatnej do posiadanych narzędzi. Podjęto próbę opracowania modeli dla ruchu przerywanego w celu lepszego poznania wpływu sygnalizacji świetlnej i innych utrudnień w warunkach miejskich na kształt fundamentalnego wykresu.

**Słowa kluczowe:** ruch drogowy, ruch miejski, modele ruchu drogowego, teoria przepływów ruchu

## Wprowadzenie

Inżynieria ruchu drogowego jest dziedziną wiedzy dynamicznie się rozwijającą. Największą popularnością cieszy się w Stanach Zjednoczonych, skąd się wywodzi jako dziedzina nauki, a także w krajach Europy Zachodniej i rozwiniętych krajach azjatyckich. Poznanie podstawowych własności występujących w ruchu drogowym jest jednym z kluczowych elementów, potrzebnych do stworzenia narzędzi umożliwiających efektywne zarządzanie siecią drogową. Mowa jest tu głównie o matematycznych modelach teoretycznych, które następnie można wykorzystać do symulacji wykorzystując odpowiednie oprogramowanie komputerowe.

Większość istniejących modeli ruchu powstała w oparciu o dane pochodzące z dróg amerykańskich, których charakter oraz standardy znacznie odbiegają od polskich. Kolejnym aspektem jest postęp technologiczny w budowie

dróg i pojazdów, który dokonał się od opracowania konkretnego modelu.

Dostępne w literaturze modele zależności prędkość – gęstość – natężenie (QVK) głównie odnoszą się do nieprzerwanego ruchu pojazdów. Niniejsza analiza ma na celu sprawdzenie użyteczności opracowanych przez lata modeli w warunkach miejskich. Modele zostały opracowane na podstawie danych o ruchu pozyskanych w kilku przekrojach ulic w Gdyni, Gdańsku i Sopocie.

## Fundamentalny wykres ruchu drogowego

Teoria przepływów ruchu umożliwia opisanie zależności pomiędzy makroskopowymi parametrami ruchu drogowego. Zależność ta odnosi się do założenia, iż pojazdy w określonych warunkach drogowo-ruchowych będą zachowywać się w analogiczny sposób. Przykładowo kierowcy poruszający się w strumieniu ruchu o określonej gęstości będą utrzymywać podobną prędkość i odstęp czasu między pojazdami. W związku z powiązaniem pomiędzy mikroskopowymi i makroskopowymi parametrami ruchu średnia prędkość i średnie natężenie mogą zostać ustalone.

Struktura trzech podstawowych charakterystyk ruchu drogowego została opisana w tabeli 1.

Fundamentalny wykres to graficzna forma zaprezentowania omawianych zależności. Najczęściej opisywany jest jako zależność pomiędzy:

Tabela 1

Zestawienie mikroskopowych i makroskopowych parametrów ruchu drogowego		
Charakterystyka ruchu	Parametr w skali mikroskopowej	Parametr w skali makroskopowej
Natężenie ruchu	Odstępy czasu między pojazdami	Średnie natężenie ruchu
Gęstość ruchu	Odstępy między pojazdami (odległość)	Średnia gęstość ruchu
Prędkość ruchu	Prędkość chwilowa	Średnia prędkość ruchu

Źródło: [9]

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2016. Wkład autorów w publikację: P. Matusz 35%, G. Rudecki 35%, J. Oskarbski 15%, K. Jamroz 15%.

- natężeniem a gęstością  $q=Q(k)$ ,
- prędkością a gęstością  $v=V(k)$ ,
- prędkością a natężeniem  $v=V(q)$ .

Fundamentalny wykres najczęściej bazuje na danych empirycznych otrzymanych bezpośrednio z pomiarów ruchu. Uzyskany zbiór danych poddawany jest analizie statystycznej, dzięki której definiuje się krzywe opisujące omawiane zależności. Innym ze sposobów jest opieranie się na teorii zachowania kierowców, np. modelu jazdy za liderem lub do porównania strumienia ruchu do zjawisk z innych dziedzin nauki, np. analogii hydrodynamicznej.

Pierwszy model zaproponowany przez Greenshields'a w 1934 roku bazował jedynie na siedmiu uśrednionych wartościach pomiarowych. Autor wskazał na liniowy związek pomiędzy prędkością a gęstością [5]. Podstawiając równanie stanu strumienia ruchu według wzoru (1), można uzyskać paraboliczne zależności pomiędzy pozostałymi parametrami.

$$q = v \cdot k \tag{1}$$

gdzie:

- $q$  – natężenie ruchu drogowego [poj/h]
- $v$  – prędkość potoku ruchu drogowego [km/h]
- $k$  – gęstość potoku ruchu drogowego [poj/km].

Na rys. 1 przedstawiono fundamentalny wykres zaproponowany przez Greenshields'a. W celu zachowania przejrzystości wykresy zostały rozstawione adekwatnie do wspólnych osi.

Od czasu pionierskiego modelu wielu badaczy próbowało opisać zależności poprzez zwiększanie zbioru danych pomiarowych, na których zostały opracowane, lub ulepszając metody dopasowania funkcji. Niemniej ze względu na empiryczny charakter zagadnienia i szeregu czynników wpływających na osiągnięte rezultaty najczęściej sukces w odzwierciedleniu warunków ruchu sprowadzał się do konkretnych dróg w określonym czasie. W Polsce zagadnieniem modelowania

opisującego fundamentalny wykres, zajął się prof. R. Krystek, podejmując próbę opisanie ruchu drogowego na ulicach Warszawy [7].

Model zależności prędkość – gęstość – natężenie związany jest z jakościową miarą warunków ruchu, gdzie może posłużyć do estymacji poziomów swobody ruchu (tzw. PSR). Ponadto pozwala ustalić czasy podróży i maksymalne wartości natężenia odpowiadających przepustowości przekroju. Wreszcie omawiana zależność jest podstawowym elementem w bardziej zaawansowanych modelach ruchu, w tym modelach symulacyjnych.

W tabeli 2 przedstawiono modele wykorzystane w niniejszych badaniach. Swoją uwagę skupiono na modelach deterministycznych, opisanych za pomocą jednej krzywej. Do analiz przyjęto siedem stosowanych dotychczas modeli zależności QVK; są to modele: Greenshields'a [5], Greenberg'a [4], Underwood'a [11], Northwestern [1], Pipes-Munjal [9], Krystka [7] i van Aerde [12].

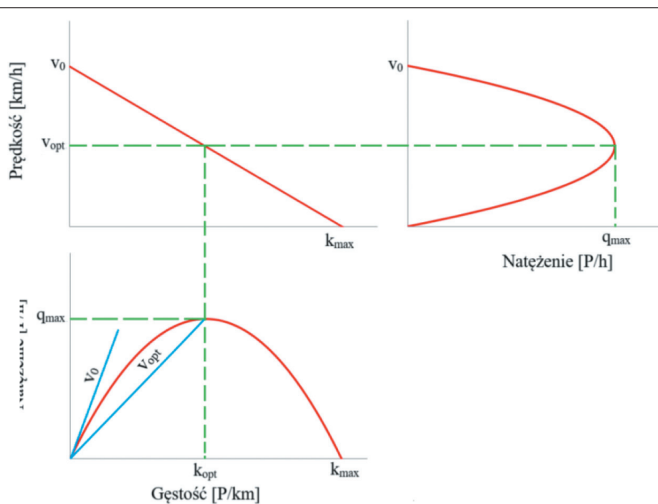
Tabela 2

Zestawienie modeli zależności QVK wykorzystanych w przeprowadzonych badaniach		
Model	Reprezentacyjna funkcja	Parametry
Model Greenshields'a [5]	$v(k) = v_0 - \left(\frac{v_0}{k_{max}}\right) \cdot k$ (2)	$v_0, k_{max}$
Model Greenberg'a [4]	$v(k) = v_{opt} \ln\left(\frac{k_{max}}{k}\right)$ (3)	$v_{opt}, k_{max}$
Model Underwood'a [11]	$v(k) = v_0 e^{-\frac{k}{k_{opt}}}$ (4)	$v_0, k_{opt}$
Model Northwestern [1]	$v(k) = v_0 e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{k}{k_{opt}}\right)^2}$ (5)	$v_0, k_{opt}$
Model Pipes-Munjal [9]	$v(k) = v_0 \left(1 - \left(\frac{k}{k_{max}}\right)^n\right)$ (6)	$v_0, k_{max}$
Model prof. Krystka [7]	$v(k) = v_0 \left(1 - \frac{k}{k_{max}}\right)^4$ (7)	$v_0, k_{max}$
Model van Aerde [12]	$k(v) = \frac{1}{c_1 + \frac{c_2}{v_0 - v} + c_3 \cdot v}$ (8)	$v_0, k_{opt}, q_{max}, k_{max}$

Oznaczenia użyte w tabelicy 2:

- $q$  – natężenie ruchu drogowego [P/h/pas]
- $q_{max}$  – natężenie maksymalne [P/h/pas]
- $v$  – prędkość potoku pojazdów [km/h]
- $v_0$  – prędkość pojazdów w ruchu swobodnym [km/h]
- $v_{opt}$  – prędkość optymalna potoku pojazdów [km/h]
- $k$  – gęstość potoku pojazdów [P/km/pas]
- $k_{opt}$  – gęstość optymalna [P/km/pas]
- $k_{max}$  – gęstość maksymalna/zatoru [P/km/pas]
- $c_1$  – współczynnik odstępu między pojazdami [km], obliczany wg wzoru 2
- $c_2$  – współczynnik odstępu między pojazdami [km<sup>2</sup>/h], obliczany wg wzoru 3
- $c_3$  – współczynnik odstępu między pojazdami [1/h], obliczany wg wzoru 4.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



1. Przykładowy model zależności prędkość – gęstość – natężenie z oznaczeniem punktów charakterystycznych

$$c_1 = \frac{2v_{opt} - v_0}{(v_0 - v_{opt})^2} \cdot c_2 \quad (2)$$

$$c_2 = \frac{1}{k_{max} \left( \frac{2v_{opt} - v_0}{(v_0 - v_{opt})^2} + \frac{1}{v_0} \right)} \quad (3)$$

$$c_3 = \frac{-c_1 + \frac{v_{opt}}{q_{max}} \cdot \frac{c_2}{v_0 - v_{opt}}}{v_{opt}} \quad (4)$$

## Metoda badań

### Charakterystyka obszaru badań

Badania przeprowadzono na wybranych odcinkach ulic Trójmiasta. Do badań zostało wybranych łącznie sześć ulic, o różnych przekrojach, znajdujących się na terenie całego Trójmiasta [8]. Wszystkie objęte są zintegrowanym systemem zarządzania ruchem, z którego zostały pozyskane dane. Ostateczny wybór przekrojów poprzedzono analizą czynników wpływających na fundamentalną zależność między badanymi parametrami oraz danymi pomiarowymi. Zasadniczym założeniem było wystąpienie więcej niż jednego stanu ruchu, by móc zebrać dane dla względnie całego zakresu gęstości. Częstym zjawiskiem było otrzymywanie rozproszonych wyników ze względu na występującą sygnalizację świetlną w pobliżu danego przekroju i znaczący udział relacji skrajnych. Z tego względu wybrano lokalizacje, gdzie w największym stopniu można było wyróżnić stacjonarny ruch pojazdów, a przypadkowość w jego dynamice nie jest decydującym czynnikiem w kształcie wykresu.

### Dane o ruchu

Na potrzeby niniejszych badań należało pozyskać zbiór danych, stanowiący podstawę do modelowania ruchu drogowego. W związku z szeroko dostępnymi detektorami ruchu w postaci tzw. pętli indukcyjnych postanowiono ograniczyć się do pomiaru mikroskopowych parametrów ruchu na krótkim odcinku drogi.

Wdrożony Zintegrowany System Zarządzania Ruchem TRISTAR na ulicach Trójmiasta stosuje kompleksowe systemy pomiarowe w postaci między innymi pary detektorów rozstawionych na niedużą odległość. Zważając na problematykę zagadnienia w niniejszej pracy, wzorowo detektory ruchu powinny być zlokalizowane pomiędzy skrzyżowaniami. Niemniej z powodu ich braku wszystkie detektory ruchu na ulicach zostały wybrane spośród tych, które zostały umieszczone przed sygnalizacją świetlną, oddalone od linii zatrzymań o kilkadziesiąt metrów.

Zebrany zbiór danych powinien stanowić wartości parametrów ruchu dla całego zakresu gęstości, zważając jednocześnie na potrzebę zniwelowania przypadkowości pomiarach. W związku z wysoką częstotliwością występowania dużych wartości gęstości ruchu w warunkach miejskich, zastosowano okres 1–2 tygodni jako wystarczający, by uzyskać wiarygodne rezultaty.

### Metodyka analizy i budowy makroskopowych modeli ruchu ulicznego

Uzyskany zbiór danych pomiarowych należy przeliczyć na makroskopowe parametry ruchu w zadanych interwałach czasu, uwzględniając potrzeby modelowania zależności pomiędzy prędkością, gęstością i natężeniem. Natężenie ruchu jest uzyskiwane poprzez zliczenie liczby pojazdów przejeżdżających przez detektor. Prędkość została estymowana, używając wzoru 5 na średnią harmoniczną prędkości poszczególnych pojazdów, co pozwoliło uzyskać średnią prędkość w przestrzeni. Natomiast gęstość ruchu jest obliczana z równania stanu strumienia ruchu wg równania (1).

$$v_s = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i}} \quad (5)$$

gdzie:

- $v_s$  – średnia prędkość w przestrzeni [km/h]
- $v_i$  – prędkość chwilowa  $i$ -tego pojazdu [km/h]
- $N$  – liczba pojazdów [poj.].

Opracowanie modeli polegało na zdefiniowaniu współczynników funkcji, które przedstawiają wartości punktów charakterystycznych na fundamentalnym wykresie (prędkość swobodna, gęstość zatoru itp.). Współczynniki te można uzyskać poprzez określenie wyłącznie wartości tychże punktów lub ich estymację, używając regresji liniowej lub nieliniowej, która uwzględnia cały zakres gęstości. Pierwszy ze sposobów nie wymaga przeprowadzania długookresowych pomiarów ruchu. Niemniej takie podejście do opracowania modelu, który nie został stworzony dla konkretnie obowiązujących czynników, zazwyczaj przejawia się niezadowolającym dopasowaniem.

Ze względu na chęć otrzymania najwyższej możliwej wartości dopasowania dla całego zakresu gęstości, parametry modeli zostały dobrane za pomocą regresji nieliniowej metodą najmniejszych kwadratów. Przy obliczeniach wykorzystano algorytm Levenberga-Marquardta, będący modyfikacją algorytmu Gaussa-Newtona. Wybór został poddyktowany ze względu na umiarkowaną złożoność obliczeniową, szybką zbieżność i prostą implementację.

Ocena poprawności odwzorowania warunków ruchu w analizowanych przekrojach została uargumentowana poprzez osiągnięte rezultaty w dopasowaniu modelu do danych pomiarowych, zwracając szczególną uwagę na wartości punktów charakterystycznych i spełnienie warunków brzegowych. Inną istotną cechą powinien być względnie prosty opis matematyczny modelu, który jako współczynniki funkcji przyjmuje wartości znajdujące jednoznacznie swoje uzasadnienie na fundamentalnym wykresie.

Miarodajną statystyczną oceną dopasowania poszczególnych modeli do danych rzeczywistych jest błąd średni modelu  $S$ , inaczej nazywany średnim błędem szacunku równania regresji. Jest to pierwiastek kwadratowy z wariancji resztkowej. Do analiz przyjęto ten błąd jako różnicę między wartościami empirycznymi a teoretycznymi, prędkości wyrażonej w km/h.

Nierównomierność rozłożenia wyników pomiarów dla całego zakresu gęstości powoduje duży rozrzut błędów przy zastosowaniu metod regresji. W związku z powyższym uśredniono dane pomiarowe w zależności od gęstości z zadaną dokładnością. W niniejszej pracy przyjęto wartość 1 P/km/pas. Chcąc zachować warunki brzegowe fundamentalnego wykresu, dane uśredniono z zaokrągleniem w górę do najbliższej całkowitej wartości gęstości.

Dopasowanie poszczególnych modeli teoretycznych do rzeczywistych warunków i danych pomiarowych zostało opracowane na podstawie zależności prędkość – gęstość. Pozostałe zależności zostały oszacowane z wykorzystaniem równania stanu strumienia ruchu 1.

## Analiza i ocena wybranych modeli zależności QVK na przykładzie sieci ulicznej Trójmiasta

### Analiza danych pomiarowych

Modelowanie zależności prędkość – gęstość – natężenie na drogach miejskich jest uwarunkowane poprzez występującą sygnalizację świetlną oraz skrzyżowania ulic z relacjami skrętnymi. Niemniej postanowiono zbadać kształt zależności QVK na ulicach Trójmiasta w celu lepszego poznania zjawisk występujących w przerywanym ruchu pojazdów. Do analizy zostały wybrane przekroje ulic, gdzie wymienione zakłócenia będą miały znikome znaczenie lub są dobrze rozpoznane.

Ze względu na występującą dużą różnorodność pomiędzy kierunkami ruchu w jednym przekroju ulicy zostały one rozdzielone. Każdy zbiór danych zawiera wyłącznie wartości estymowane dla jednej jezdni. W badaniach wzięto pod uwagę interakcję pomiędzy pojazdami poprzez agregację danych z dwóch pasów ruchu.

W wybranych do badań przekrojach ulic przepustowość ograniczona jest przez sygnalizację świetlną. Różny dobór programu sygnalizacji świetlnej powoduje, iż dla innych wartości natężenia czy gęstości należy wyróżnić odmienne stany ruchu. W przypadku sygnalizacji stałoczasowej możliwe byłoby wyliczenie trwania efektywnego światła zielonego, a w konsekwencji przepustowości przekroju. W przypadku ciągów skrzyżowań włączonych do systemu TRISTAR jest to złożony problem ze względu na zmianę parametrów planów sygnalizacji w czasie rzeczywistym.

W związku z powyższym stacjonarność ruchu przy wyborze stałego interwału czasu nie jest zachowana. Poszczególne punkty pomiarowe mogą przedstawiać uśrednione wartości z dwóch stanów ruchu, co następnie warunkuje wartości położone poza fundamentalnym wykresem. Oznaczając stan ruchu swobodnego może zostać odierciedlony dla sygnału zielonego, natomiast zator drogowy (przy  $k=k_{\max}$  i  $v=0$ ) występuje dla światła czerwonego. W istocie zator drogowy jest reprezentowany przez lekkę pojazdów oczekujących na zmianę sygnału.

Problematyka tego zagadnienia jest wieloaspektowa. Wykonane pomiary strumienia pojazdów mają miejsce kilkadziesiąt metrów przed linią zatrzymania. Ponadto zastosowane detektory nie są w stanie wykryć pojazdów o ni-

skich prędkościach ruchu, to znaczy poniżej 10 km/h. Skutkiem tego jest brak punktów pomiarowych o bardzo dużych gęstościach ruchu, które w większości odzwierciedlają sygnał czerwony na sygnalizatorze na najbliższym skrzyżowaniu lub przejściu dla pieszych. W konsekwencji znaczna część zakłóceń w ruchu nie jest brana pod uwagę, co rzutuje na estymację wyników pomiarów. Jednakże należy stwierdzić, iż przy braku pojazdów na linii zatrzymania, przy pojawieniu się światła czerwonego pojazdy w kolumnie zaczynają zwalniać, zaniżając średnią prędkość strumienia. Natomiast przy zmianie na sygnał zielony pojazdy mogą rozpocząć przyspieszanie, zależnie od ilości pojazdów przed skrzyżowaniem. Niemniej ze względu na charakter niniejszych badań postanowiono wstrzymać się od dalszych dyskusji nad tym zagadnieniem, mając jedynie na uwadze wymienione czynniki.

Po przeprowadzeniu wstępnych analiz do badań wybrano 10-minutowe interwały do procesu modelowania ruchu. Taki zabieg pozwolił na uzyskanie ponad 1000 punktów (jednostek pomiarowych) dla przekrojów ulic w Gdyni oraz 2000 punktów (jednostek pomiarowych) dla przekrojów ulic w Gdańsku i w Sopocie.

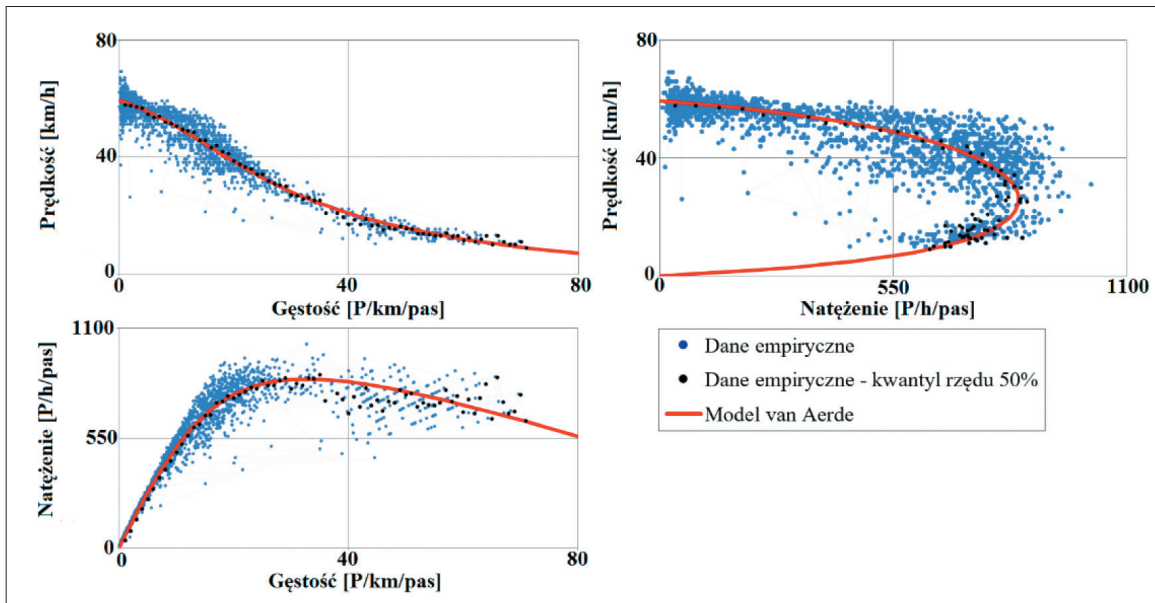
### Dobór parametrów analizowanych modeli

Analizując otrzymane wyniki pomiarów terenowych, nie stwierdzono występowania charakterystycznych gwałtownych spadków przepustowości, które świadczą o niejednostajnym przejściu ruchu ze stanu swobodnego, bądź częściowo-wymuszonego, w stan wymuszony, jak to zaobserwowano na drogach szybkiego ruchu. Może to być wynikiem małych różnic w prędkościach pojazdów lub także efektem uśredniania wartości parametrów w poszczególnych punktach (jednostkach pomiarowych) obejmujących dwa stany ruchu. W związku z powyższym do analizy wykorzystano modele opisane za pomocą jednej krzywej jako w pełni wystarczające do opisu dynamiki zmian parametrów ruchu.

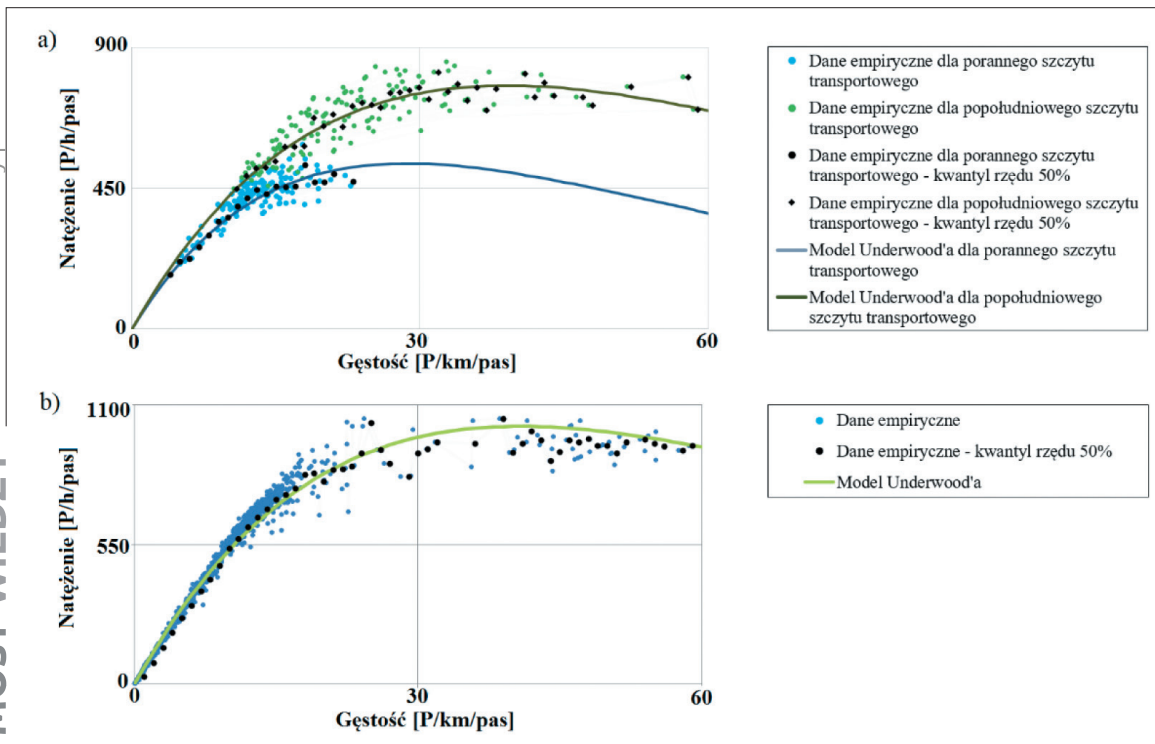
Miejska sieć ulic warunkuje występowanie szeregu czynników wpływających na kształt fundamentalnej zależności, które nie są tożsame dla różnych dróg, nawet rozważając tę samą aglomerację. Z tego względu należy rozpatrzyć reprezentatywną liczbę przekrojów. Badaniami objęto opracowanie modeli opisanych jedną krzywą dla sześciu przekrojów dróg. Zasadnicza analiza została dokonana dla siedmiu modeli, bazując na danych z całej doby. Ponadto wskazano zależność wpływu pory szczytu transportowego, a pośrednio doboru programów sygnalizacji świetlnej [8].

Ze względu na objętość niniejszej pracy oraz pokrywanie się krzywych w najlepiej dopasowanych modelach na rysunku 2 przedstawiono wykres zależności QVK z naniessonym modelem van Aerde w przekroju alei Niepodległości w Sopocie. Natomiast na rysunku 3 zaprezentowano model Underwood'a w przekroju ulicy Morskiej oraz w przekroju ulicy Wielkopolskiej, z wyróżnieniem dwóch szczytów transportowych. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 3.

Zestawienie wyników opracowania wybranych modeli zależności QVK					
Przekrój	Okres pomiarów	Model	Zależne punkty charakterystyczne w funkcji modelu	Pozostałe punkty charakterystyczne	Średni błąd modelu
al. Niepodległości, Sopot	Cała doba	Van Aerde	$q_{max} = 845$ [poj./h/pas] $v_0 = 59$ [km/h] $v_{opt} = 26$ [km/h] $k_{max} = 143$ [poj./km/pas]	$k_{opt} = 33$ [poj./km/pas]	$S = 1,22$ [km/h]
ul. Wielkopolska, Gdynia	Szczyt poranny	Underwood'a	$v_0 = 53$ [km/h] $k_{opt} = 28$ [poj./km/pas]	$v_{opt} = 19$ [km/h] $q_{max} = 546$ [poj./h/pas] $k_{max} = \infty$ (111) [poj./km/pas]	$S = 1,65$ [km/h]
ul. Wielkopolska, Gdynia	Szczyt popołudniowy	Underwood'a	$v_0 = 57$ [km/h] $k_{opt} = 38$ [poj./km/pas]	$v_{opt} = 21$ [km/h] $q_{max} = 787$ [poj./h/pas] $k_{max} = \infty$ (153) [poj./km/pas]	$S = 1,05$ [km/h]
ul. Morska, Gdynia	Cała doba	Underwood'a	$v_0 = 68$ [km/h] $k_{opt} = 41$ [poj./km/pas]	$v_{opt} = 25$ [km/h] $q_{max} = 1020$ [poj./h/pas] $k_{max} = \infty$ (172) [poj./km/pas]	$S = 1,72$ [km/h]



Rys. 2. Wykres zależności QVK wraz z naniesionym modelem van Aerde w przekroju Alei Niepodległości w Sopocie



Rys. 3. Wykres zależności Q(K) według modelu Underwood'a: a) w przekroju ulicy Wielkopolskiej z rozróżnieniem szczytów transportowych; b) w przekroju ulicy Morskiej

## Dyskusja wyników

Dyskusje wyników przeprowadzono dla dwóch stanów średnich (dane estymowane do kwantyla rzędu 50%): dla całej doby i dla okresów szczytowych.

Analizy dla całej doby polegały na doborze optymalnych parametrów dla wszystkich siedmiu modeli dla przekroju alei Niepodległości w Sopocie oraz dwóch wybranych modeli dla pięciu pozostałych ulic.

Zależność liniowa w modelu Greenshield'a może w przybliżonym stopniu odzwierciedlić w pełni stan ruchu swobodnego i stan ruchu wymuszonego do pewnej granicznej wartości gęstości, zważając jednak na przeszacowanie m.in. natężenia maksymalnego. Model nie uwzględnia gęstości, powyżej których występuje tak zwany poruszający się zator. Większość wartości dla tego zjawiska nie została odnotowana przez detektory ruchu, co miało wpływ na opracowanie modelu. Niemniej ocenia się, iż nie jest możliwe opisanie warunków miejskich jednocześnie dla wszystkich stanów ruchu ze satysfakcjonującymi rezultatami ( $S=4,17$  km/h), bazując na krzywej liniowej w funkcji  $V(k)$ .

Powyższy problem dostrzeżono również we wcześniejszych badaniach i próbowano go rozwiązać poprzez kalibrację modelu liniowego, odpowiednio przyjmując wartość potęgi. Funkcję wielomianową czwartego stopnia zastosował profesor Krystek w swoim modelu, który opracował, analizując warunki panujące na ulicach Warszawy w latach 70. W rezultacie linia prosta ulegała zniekształceniu, co wówczas pozwoliło na odzwierciedlenie parametrów ruchu aż do rzeczywistych wartości gęstości maksymalnej. Natomiast odwołując się do niniejszych badań, wartość ta jest znacząco zawyżona dla dzisiejszych warunków ruchu i w związku z tym, bez odpowiedniej kalibracji, model nie może zostać wskazany jako wzorcowy dla analizowanych ulic. Niemniej zauważono znaczącą poprawę w wartości średniego błędu modelu  $S$  (z  $4,17$  km/h w modelu liniowym do  $1,83$  km/h) oraz estymacji pozostałych punktów charakterystycznych na fundamentalnym wykresie.

Model Underwood'a jest kolejnym modelem, który charakteryzuje się bardzo dobrym dopasowaniem do danych empirycznych o wartości  $S$  porównywalnej do modelu profesora Krystka. Zastosowana krzywa jest w stanie poprawnie oszacować punkty charakterystyczne przy zadowalającym przybliżeniu, z wyjątkiem gęstości maksymalnej. Jest to wada zastosowanej funkcji wykładniczej, która w konsekwencji uniemożliwia spełnienie warunku brzegowego ( $v=0$  dla  $k=k_{\max}$ ). Niemniej przy dążeniu  $k \rightarrow k_{\max}$  prędkość jest bliska wartości zero i dzięki zastosowaniu określonego przybliżenia możliwe jest jednoznaczne określenie wartości gęstości zatoru. Badania potwierdziły, iż model Underwood'a może zostać uznany za prosty model do opisu ruchu miejskiego, jednak z uwzględnieniem jego ograniczenia.

Na podstawie zbioru wyników analiz stwierdzono, że model van Aerde jest modelem o najlepszym dopasowaniu kształtu funkcji QVK do uzyskanych wyników pomiarów. Jest to najbardziej zaawansowany matematycznie model porównaniu do wcześniej opracowanych i nie można znaleźć z nimi podobieństwa pod tym względem. Wadą modelu może być potrzeba zdefiniowania większej liczby współczyn-

ników przy opracowaniu modelu docelowo, bez użycia regresji nieliniowej. Niemniej należy stwierdzić, iż jako jedyny jest w stanie oszacować wszystkie punkty charakterystyczne w zakładanym błędzie pomiarowym, wraz z problematyczną gęstością maksymalną. Badania wskazały model jako rekomendowany i uniwersalny dla wszystkich przekrojów ulic. Średni błąd modelu oszacowano na  $1,61$  km/h.

W związku z podobieństwami opisu matematycznego do innych modeli oraz gorszymi rezultatami w odwzorowaniu fundamentalnego wykresu dla warunków miejskich wstrzymano się od opisu modeli Greenberg'a ( $S=7,36$  km/h), North-western ( $S=3,89$  km/h) i Pipes-Munjaj ( $S=2,69$  km/h).

## Wnioski

Przeprowadzone badania nad modelowaniem zależności prędkość-gęstość-natężenie (QVK) w warunkach miejskich pozwoliły na sformułowanie kilku wniosków i rekomendacji odnoszących się do warunków miejskich.

1. Metodologia badań składająca się na wybór techniki pomiarów, analizy danych oraz wybór i sposób opracowania modelu ma kluczowe znaczenie dla dobrego opisu zależności QVK.
2. Występowanie sygnalizacji świetlnej oraz zróżnicowanych udziałach relacji skrętnych w ciągu doby na skrzyżowaniach powoduje, iż fundamentalny wykres dla dróg miejskich może ulec istotnym zmianom. W konsekwencji spośród otrzymanych danych pomiarowych z całej doby można wyróżnić kilka wykresów nałożonych na siebie.
3. Przerwany ruch pojazdów na drogach miejskich jest przyczyną niezachowania stacjonarności ruchu w czasie. Poszczególne punkty pomiarowe mogą przedstawiać uśrednione wartości z dwóch stanów ruchu. Ma to znaczący wpływ na kształt fundamentalnego wykresu, szczególnie rozważając otrzymany zakres gęstości odpowiadający warunkom ruchu bliskich przepustowości przekroju.
4. Większość modeli opisanych jedną krzywą jest w stanie w poprawny sposób odzwierciedlić pozyskane dane empiryczne na ulicach Trójmiasta. Model Underwood'a może zostać uznany za prosty model do opisu ruchu miejskiego, zważając jednak na jego ograniczenia.
5. Model profesora Krystka charakteryzuje się wysokimi współczynnikami dopasowania, lecz nie jest w stanie poprawnie przedstawić rzeczywistej wartości gęstości zatoru dla współczesnych długości pojazdów i innych czynników. Na tej podstawie należy przeprowadzić kalibrację modelu, co w konsekwencji może pozwolić na wskazanie modelu jako rekomendowanego dla warunków miejskich.
6. Model van Aerde jest rekomendowany jako najlepszy z analizowanych do opisu zależności QVK dla wszystkich przekrojów w warunkach miejskich. Należy zaznaczyć, iż model charakteryzuje się dużą uniwersalnością i jako jedyny jest w stanie dopasować kształt fundamentalnego wykresu dla różnego rodzaju ruchu.

Biorąc pod uwagę powyższe wnioski, zalecane jest kontynuowanie prac badawczych, rozszerzając je na więcej ulic, wraz z analizą wskazanych w pracy aspektów modelowania ruchu przerywanego.

*Dokończenie tekstu na stronie 28*

## Literatura

1. Brzeziński A., Rezwow M., *Tramwaj z Bemowa na Bielany, „Rynek Kolejowy”*, 2006, nr 9.
2. Chamier-Gliszczyński N., Krzyżyński T., *Zrównoważona mobilność w miastach, „Logistyka”*, 2011, nr 3.
3. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*, WKiŁ, Warszawa 2008.
4. Gondek S., *Czy tramwaj szybki skrócił czas podróży? „Logistyka”*, 2010 nr 4.
5. Witryna internetowa Tramwajów Warszawskich Sp. z o.o., <https://tw.waw.pl/inwestycje/> (odsłona z dnia 09.05.2016 r.).
6. Kaczmarek M., *Zintegrowana koordynacja tramwajów i pojazdów indywidualnych w korytarzach transportowych*, VIII Konferencja Naukowo-Techniczna z cyklu: Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego, Nowoczesny Transport Publiczny w Obszarach Zurbanizowanych, SITK Poznań, materiały konferencyjne, Poznań 15–17.06.2011 r.
7. Krych A., *Efektywne przyspieszenie transportu tramwajowego w sterowaniu z priorytetem*, Polski Kongres ITS, ITS Polska, Warszawa 2009 (CD).
8. Krych A. i in., *Systemy priorytetu dla tramwajów w sygnalizacji w zastosowaniach krajowych*, VIII Konferencja Naukowo-Techniczna z cyklu: Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego, Nowoczesny Transport Publiczny w Obszarach Zurbanizowanych, SITK Poznań, materiały konferencyjne, Poznań 15–17.06.2011 r.
9. Krych A., *Szybki i szybszy tramwaj – ewaluacja idei i aplikacji na przykładzie Poznania*, Międzynarodowa Konferencja i Wystawa „Transport publiczny w Warszawie kluczem harmonijnego rozwoju stolicy Polski”, Biuro Komunikacji UM st. Warszawy, materiały konferencyjne, tom II, Warszawa 10–11.10.2005 r..
10. PTV Vissim 5.40 User Manual, PTV AG, Karlsruhe 2012.
11. PTV VisVap 2.16 User Manual, PTV AG, Karlsruhe 2012.
12. Rychlewski J., *Doświadczenia ze stosowania priorytetu tramwajowego w Poznaniu*, „Przegląd Komunikacyjny”, 2010, nr 4–6.
13. *Strategia Zrównoważonego Rozwoju Systemu Transportowego Warszawy do 2015 r. i na lata kolejne*, Uchwała Nr LVIII/1749/2009 Rady m.st. Warszawy.
14. Szmagliński J., *Analiza odcinków generujących straty czasu w transporcie tramwajowym*, „Przegląd Komunikacyjny”, 2015, nr 6.
15. Tracz M. i in., *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*, opracowana na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, Politechnika Krakowska, Kraków 2004.
16. Uchwała Nr XXVI/193/95 Rady Miasta Stołecznego Warszawy z dnia 27 listopada 1995 r. w sprawie polityki transportowej dla m.st. Warszawy.
17. Rozporządzenie ministra infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach (Dz. U. z 2003 r. Nr 220, poz. 2181 z późn. zm.), Zał. nr 3.

## Dokończenie tekstu ze strony 17

9. Karoń G., Krawiec S., Żochowska R., Sobota A., *Metodologia i szczegółowa koncepcja przeprowadzenia badań ruchu i sposobu opracowania modelu ruchu na obszarze działania Komunikacyjnego Związku Komunalnego GOP*, Praca naukowo-badawcza NB-179/RT5/2015, Politechnika Śląska, Katowice 2015.
10. Karoń G., Łazarz B., *Wybrane zagadnienia budowy modelu ruchu*, „Logistyka”, 2010, nr 4.
11. Larsen, O., *Estimating independent and simultaneous trip frequency models for all travel purposes with combined Logit/Poisson*, European Transport Conference, Strasbourg 2003.
12. Macioszek E., Żochowska R., Karoń G., *Problemy gromadzenia danych dla potrzeb modelowania podróży i prognozowania ruchu*, Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu”, Kraków 18–19 listopada 2010. Zeszyty naukowo-techniczne SITK RP o/Kraków, Kraków, 2010, Zeszyt nr 94.
13. Marvin L. Manheim, *Fundamentals of Transportation Systems Analysis*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts 1979.
14. Mitchell R.B., Rapkin C., *Urban Traffic: A Function of Land Use*. Columbia University Press, New York 1954.
15. Ortuzar J., Willumsen L.G., *Modelling transport*, 3rd Edition. Wiley, New York 2009.
16. Sobota A., Janecki R., Karoń G., Żochowska R. i in., *Zintegrowany system zarządzania transportem na obszarze miasta Bielska-Białej, etap I – wykonanie Modelu Ruchu*. Praca NB 148/RT-5/13/14. Politechnika Śląska, Katowice – Bielsko-Biała 2015.
17. *Strategia Rozwoju Bielska-Białej do 2020 roku*, Bielsko-Biała 2012.
- . *Strategia rozwoju subregionu południowego województwa śląskiego wraz ze strategią regionalnych inwestycji terytorialnych na lata 2014–2020. Projekt*, Bielsko-Biała 2014.
- . Supernak J., *Modele powstawania miejskiego ruchu osobowego*, WKiŁ, Warszawa 1980.
- . *Wieloletni plan rozwoju zintegrowanego systemu transportowego miasta Katowice*, Urząd Miasta Katowice 2015, wersja z konsultacji społecznych, luty 2016.
- . Witryna internetowa GUS <http://stat.gov.pl/> odsłona 12.09.2014.
- . Witryna internetowa [Wikipedia.pl.wikipedia.org/Wiki/Podgórze\\_Śląskie](http://Wikipedia.pl.wikipedia.org/Wiki/Podgórze_Śląskie), odsłona 7.08.2014.

## Dokończenie tekstu ze strony 23

Ponadto wskazane jest przeprowadzenie badań odmienną techniką pomiarową i/lub metodyką analizy danych. Pozwoli to na stosowną weryfikację otrzymanych wyników.

## Literatura

1. Drake J.S., Schofer J.L., May A.D., *A Statistical Analysis of Speed Density Hypotheses*, Third International Symposium on the Theory of Traffic Flow Proceedings, Elsevier North Holland, Inc. New York 1967.
2. Edie L.C., *Car-Following and Steady-State Theory for Noncongested Traffic*, Operation Research, 1961.
3. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego: teoria i praktyka*. WKiŁ, Warszawa 2011.
4. Greenberg H., *An analysis of traffic flow*, Operations Research, 1959.
5. Greenshields B.D., *A study of traffic capacity*, Ohio State Highway Department, 1935.
6. Hoogendoorn S., Knoop V.L., Taale H., *Traffic Flow Theory and Simulation*, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 2012.
7. Krystek R., *Syntetyczny wskaźnik jakości ruchu ulicznego jako kryterium sterowania*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1980.
8. Matusz P., Paluszkiwicz T., Rudecki G., *Modelowanie wybranych zależności między parametrami ruchu na drodze ekspresowej i ulicach na przykładzie Trójmiasta*, praca magisterska, Politechnika Gdańska, 2015.
9. May A.D., *Traffic Flow Fundamentals*, Wydawnictwo Prentice Hall, New Jersey 1990.
10. Transportation Research Board: *75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory*, Greenshields Symposium, Massachusetts 2008.
11. Underwood R.T.: *Speed, volume, and density relationships: Quality and theory of traffic flow*, Yale Bureau of Highway Traffic, 1961.
12. Van Aerde M., *Multivariate calibration of single regime speed-flow-density relationship*, Vehicle Navigation and Information Systems Conference, Seattle 1995.