

MARIUSZ WASIAK

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel. +48 22 2346017, e-mail: mwa@wt.pw.edu.pl

MARIANNA JACYNA

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel. +48 22 2346017, e-mail: maja@wt.pw.edu.pl

MICHAŁ KŁODAWSKI

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel. +48 22 2346017, e-mail: mkłoda@wt.pw.edu.pl

PIOTR GOŁĘBIOWSKI

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel. +48 22 2346017, e-mail: pgolebiowski@wt.pw.edu.pl

Model ruchu towarowego dla aglomeracji warszawskiej według Warszawskiego Badania Ruchu 2015¹

Streszczenie: W artykule scharakteryzowano model ruchu towarowego, który został przygotowany w ramach Warszawskiego Badania Ruchu 2015. Przedstawiono założenia, które przyjęto na etapie prac koncepcyjnych oraz opisano model w sposób ogólny, wraz z jego implementacją w środowisku PTV VISUM. Szczegółowo scharakteryzowano model sieci oraz model popytu. Zaprezentowano problematykę kalibracji modelu. Opracowany model jest w pełni funkcjonalnym narzędziem do modelowania ruchu pojazdów ciężarowych w obszarze aglomeracji warszawskiej. Dodatkowo dzięki współpracy z modelem ruchu pasażerów w komunikacji indywidualnej i zbiorowej, a także modelem ruchu rowerów stanowi integralny element kompleksowego narzędzia do modelowania, analizy i oceny zachowań komunikacyjnych mieszkańców aglomeracji warszawskiej, jak również podmiotów gospodarczych zlokalizowanych na tym obszarze.

Słowa kluczowe: model ruchu towarowego, WBR 2015, modelowanie podróży.

Wprowadzenie

Model ruchu towarowego przedstawiony w niniejszym artykule jest elementem projektu wykonanego na zamówienie m.st. Warszawy „Warszawskie Badanie Ruchu wraz z opracowaniem modelu ruchu” (WBR 2015). Głównym celem projektu było zbudowanie i skalibrowanie komputerowego modelu ruchu dla aglomeracji warszawskiej, z wykorzystaniem wyników badań wykonanych w ramach WBR 2015 oraz danych pochodzących z innych źródeł. Wykonawcami projektu byli uczestnicy konsorcjum, w skład którego weszli: PBS Sp. z o.o. oraz Politechnika Krakowska i Politechnika Warszawska.

Opracowany w ramach projektu model ruchu jest matematycznym opisem interakcji pomiędzy zapotrzebowaniem mieszkańców na przemieszczanie oraz popytu na przewozy ładunków, tj. popytem transportowym i siecią transportową – podażą transportową. Dzięki temu jest to narzędzie symulacyjne pozwalające na przeprowadzenie analiz transportowych w modelowanym obszarze, ocenę efektów zmian w sieci transportowej i zagospodarowaniu przestrzennym miasta, takich jak np.: budowa nowej drogi

lub zamknięcie istniejącej, uruchomienie nowej linii lub re-marszrutyzacja istniejącej siatki linii transportu zbiorowego, budowa nowego osiedla mieszkaniowego, zakładu przemysłowego lub centrum handlowego.

W modelu ruchu dla aglomeracji warszawskiej uwzględniono podróże w komunikacji indywidualnej, komunikacji zbiorowej, przewozy towarowe oraz podróże rowerowe. Dodatkowo w modelu dla ruchu pasażerskiego wyróżniono trzy niezależne modele popytu. W konsekwencji otrzymano:

- **model podróży mieszkańców Warszawy**, który obejmuje podróże mieszkańców Warszawy w obrębie aglomeracji realizowane pieszo, transportem zbiorowym i samochodem osobowym;
- **model podróży mieszkańców gmin aglomeracji poza Warszawą**, który obejmuje ich podróże w obrębie aglomeracji realizowane pieszo, transportem zbiorowym i samochodem osobowym;
- **model zewnętrzny**, który obejmuje podróże docelowe do obszaru modelu (zarówno do Warszawy, jak i do pozostałej części aglomeracji) oraz źródłowe poza obszar modelu (z aglomeracji), jak również podróże tranzytowe. Podróże te realizowane są transportem zbiorowym i samochodem osobowym;
- **model towarowy**, który obejmuje drogowe przewozy ładunków w obrębie obszaru modelu wraz z podróżami zewnętrznymi, tj. przewozami źródłowymi, docelowymi oraz tranzytowymi w stosunku do aglomeracji. Podróże te realizowane są samochodami dostawczymi o dopuszczalnej masie całkowitej (DMC) do 3,5 t oraz innymi samochodami ciężarowymi o DMC powyżej 3,5 t;
- **model rowerowy**, który obejmuje podróże realizowane rowerami.

W modelu odwzorowane są rzeczywiste przemieszczenia podróży i pojazdów w obrębie obszaru modelu zidentyfikowane na podstawie danych uzyskanych w ramach badań ankietowych w gospodarstwach domowych oraz pomiarów natężeń ruchu i potoków pasażerskich, a także danych ze źródeł wtórnych, tj. danych statystycznych oraz

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2016. Wkład autorów w publikację: M. Wasiak 30%, M. Jacyna 30%, M. Kłodawski 20%, P. Gołębiowski 20%.

wyników badań i pomiarów ruchu przeprowadzonych przez inne podmioty.

Dane podstawowe do modelowania pozyskano z [9]: badań zachowań komunikacyjnych mieszkańców Warszawy, pomiarów natężenia ruchu w analizowanym obszarze, pomiarów liczby pasażerów w pojazdach komunikacji zbiorowej, badań pasażerów autobusów komunikacji regionalnej, pomiarów natężeń i prędkości ruchu wykonanych dla potrzeb aktualizacji parametrów funkcji oporu drogi, badań ruchu towarowego w aglomeracji.

Dane dodatkowe do modelowania uzyskano ze źródeł wtórnych, czyli na podstawie analizy: wyników „Badań ruchu i przewozów w transporcie zbiorowym i indywidualnym w województwie mazowieckim” z 2014 roku (badanie wojewódzkie), wyników Generalnego Pomiaru Ruchu 2015 oraz danych Głównego Urzędu Statystycznego, Zarządu Dróg Miejskich, Zarządu Transportu Miejskiego i przewoźników kolejowych.

Założenia do modelu ruchu towarowego w aglomeracji warszawskiej

Model ruchu towarowego został przygotowany przy uwzględnieniu klasycznego czterostadiowego modelu transportowego [1], [3], [4], [5], [6], [8], [11], [12], [14], [15], [16], [18], [19]. Z uwagi na zakres modelowania i przyjęte podejście trzeci etap klasycznego modelu, tj. podział modalny przewozów, w modelu ruchu towarowego nie był realizowany. Wobec tego koniecznym było wyznaczenie: potencjałów ruchotwórczych dla poszczególnych rejonów komunikacyjnych (czyli w jakich rejonach ile rozpoczyna i kończy się przewozów towarów), przestrzennego rozkładu ruchu pomiędzy tymi rejonami (czyli skąd i dokąd wykonywane są przewozy), a także rozkładu ruchu na sieć transportową (czyli którymi drogami wykonywane są przewozy).

Przy opracowywaniu modelu ruchu towarowego przyjęto następujące założenia:

- podstawą do budowy modelu są dane ze źródeł pierwotnych i wtórnych;
- zasięg terytorialny modelu to obszar aglomeracji warszawskiej;
- w modelu uwzględniono ruch pojazdów ciężarowych w podziale na ruch samochodów dostawczych (o DMC do 3,5 tony) i pozostałych ciężarowych (o DMC powyżej 3,5 tony);
- model obejmuje przewozy, które rozpoczynają się i kończą na terenie aglomeracji warszawskiej (ruch wewnętrzny), rozpoczynają się na terenie aglomeracji warszawskiej i kończą na terenie poza obszarem badań i odwrotnie (ruch źródłowy i docelowy) oraz podróże rozpoczynające się i kończące poza obszarem badań (ruch tranzytowy w stosunku do aglomeracji warszawskiej);
- w modelu uwzględniono niezależne zasady generacji i absorpcji podróży oraz ich rozkład przestrzenny oddzielnie dla ruchu wewnętrznego oraz źródłowego, docelowego i tranzytowego,

- w modelu ruchu towarowego wewnętrznego uwzględniono 16 różnych motywacji podróży;
- model odwzorowuje ruch dla typowego dnia roboczego;
- model zawiera ruch towarowy dla całej doby, dla godziny szczytu porannego (07:00–08:00) oraz dla godziny szczytu popołudniowego (16:00–17:00);
- model uwzględnia taką samą strukturę rejonów komunikacyjnych, jak model ruchu pasażerskiego;
- model jest modelem makroskopowym (ruch pojazdów ciężarowych modelowany jest w ujęciu ciągłym), statycznym (nie jest uwzględniany wpływ czasu, potok jedynie jest agregowany do wartości godzinowych) i deterministycznym (uwzględniony został oczekiwany, typowy stan sieci);
- model umożliwi prowadzenie analiz prognostycznych w horyzontach czasowych 2016, 2020, 2030 i 2050.

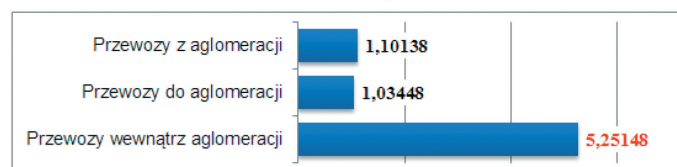
Badania ruchu towarowego

Badania ruchu towarowego w aglomeracji przeprowadzono przez okres dwóch miesięcy (od 9 maja do 27 czerwca 2015). W badaniu wzięło udział 1519 kierowców samochodów przewożących ładunki, którzy w codziennych trasach poruszają się po obszarze aglomeracji warszawskiej lub przynajmniej rozpoczynają albo kończą swoje trasy na tym obszarze. W ten sposób pozyskano dane dotyczące 6952 podróży zrealizowanych przez kierowców samochodów dostawczych oraz innych ciężarowych, które miały związek z aglomeracją warszawską (ruch wewnętrzny, ruch źródłowy, ruch docelowy).

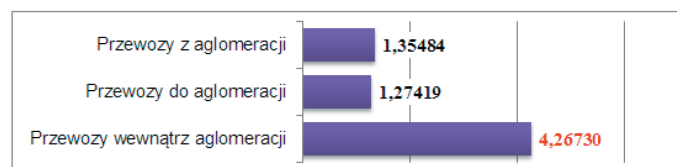
Przeprowadzone analizy wykazały, iż średnia liczba podróży wewnętrznych wykonanych przez jeden pojazd o DMC do 3,5 t wyniosła około 5,25 oraz 4,26 dla pojazdów cięższych. Ruchliwość pojazdów ze względu na rodzaj wykonywanej podróży przedstawiono na rysunku 1.

W badaniach ruchu towarowego wyszczególniono 49 różnych motywacji podróży. Na potrzeby dalszych badań w modelu ruchu towarowego aglomeracji warszawskiej motywacje te zostały zagregowane do 16 (tab. 1). Dla tych motywacji oszacowano wewnątrzaglomeracyjne przejazdy samochodów dostawczych oraz ciężarowych, co zestawiono w tabeli 1.

Samochody dostawcze (DMC do 3,5 t)



Samochody ciężarowe o DMC powyżej 3,5 t



Rys. 1. Ruchliwość pojazdów ciężarowych

Tabela 1

Oszacowane dla poszczególnych motywacji wewnątrzaglomeracyjne przejazdy samochodów ciężarowych wg ich DMC (przemieszczeń/dobę)				
Motywacja	Samochody dostawcze		Pozostałe samochody ciężarowe	
	Podróże na dobę	%	Podróże na dobę	%
HANDEL_USŁUGI – HANDEL_USŁUGI	50 441	41,19%	1 988	3,46%
HANDEL_USŁUGI – WOH	3 469	2,83%	127	0,22%
HANDEL_USŁUGI – MAGAZYNY_PRZEMYSŁ	1 239	1,01%	127	0,22%
HANDEL_USŁUGI – POZOSTAŁE	11 564	9,44%	1 015	1,77%
WOH – HANDEL_USŁUGI	2 919	2,38%	254	0,44%
WOH – WOH	1 322	1,08%	42	0,07%
WOH – MAGAZYNY_PRZEMYSŁ	193	0,16%	0	0,00%
WOH – POZOSTAŁE	2 340	1,91%	169	0,29%
MAGAZYNY_PRZEMYSŁ – HANDEL_USŁUGI	854	0,70%	211	0,37%
MAGAZYNY_PRZEMYSŁ – WOH	633	0,52%	169	0,29%
MAGAZYNY_PRZEMYSŁ – MAGAZYNY_PRZEMYSŁ	2 698	2,20%	592	1,03%
MAGAZYNY_PRZEMYSŁ – POZOSTAŁE	3 745	3,06%	12 053	21,00%
POZOSTAŁE – HANDEL_USŁUGI	9 334	7,62%	1 015	1,77%
POZOSTAŁE – WOH	1 156	0,94%	0	0,00%
POZOSTAŁE – MAGAZYNY_PRZEMYSŁ	4 295	3,51%	12 137	21,15%
POZOSTAŁE – POZOSTAŁE	26 267	21,45%	27 488	47,90%
RAZEM	122 469	100%	57 387	100%

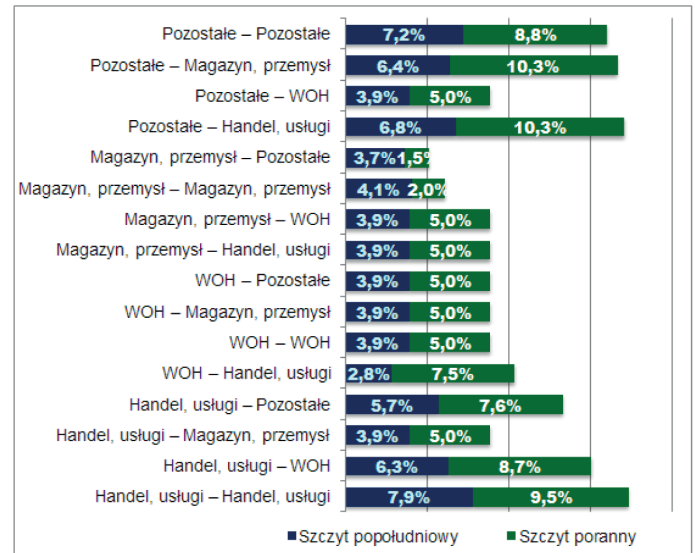
Dla pojazdów lżejszych najczęstszym źródłem i celem podróży było miejsce handlu i usług poza dużymi centrami handlowymi – taki cel miało około 41% podróży pojazdów z tej grupy. Natomiast źródłem i celem prawie połowy (około 48%) podróży pojazdów o DMC przekraczającej 3,5 t było miejsce budowy, miejsce stałego postoju lub inny obiekt (zagregowane jako pozostałe). Pojazdy cięższe częściej od pojazdów lżejszych wykonują podróże, których celem jest zakład przemysłowy, magazyn, skład lub hurtownia.

W badaniach uwzględniono również dystanse pokonywane przez pojazdy obsługujące aglomerację warszawską. Średnia długość trasy dla wszystkich badanych pojazdów wyniosła około 26 kilometrów, przy czym wielkość ta dla pojazdów o DMC do 3,5 t wyniosła 16,1 km, a dla pojazdów cięższych 52,6 km. Najkrótsze trasy pokonują pojazdy firm kurierskich. Średnia długość przejazdu pojazdu firmy kurierskiej to blisko 19 kilometrów. Średnia długość podróży pojazdów firm zaopatrujących lub obsługujących małe obiekty handlowe to około 22 km. Pojazdy firm zaopatrujących duże obiekty handlowe oraz pojazdy firm o innej działalności pokonują średnio powyżej 30 kilometrów w każdej podróży.

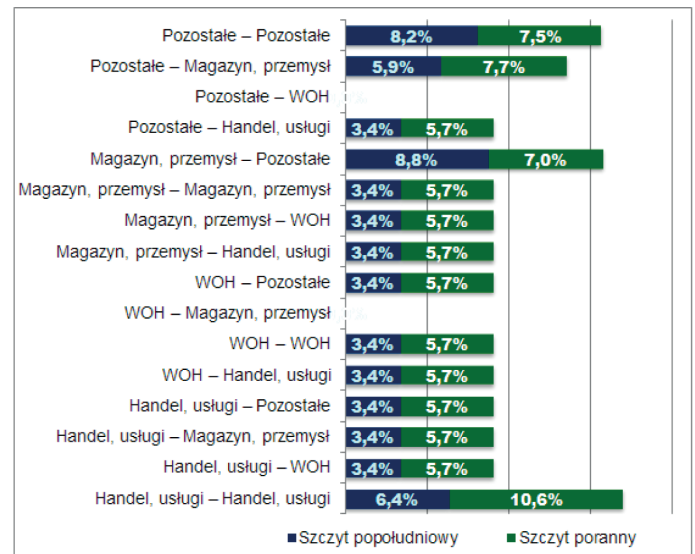
Przeprowadzone badania wykazały, iż w ruchu towarowym najwięcej podróży rozpoczyna się między 7:00 a 8:00. W kolejnych godzinach, od 9:00 do 17:00, w przypadku pojazdów o DMC powyżej 3,5 t liczba rozpoczynanych podróży utrzymuje się na poziomie 8–10%. Inaczej rzecz ma się dla pojazdów dostawczych, dla których większa część podróży realizowanych jest w godzinach przedpołudniowych, a następnie wraz z upływem czasu odsetek tych podróży konsekwentnie spada.

Na potrzeby budowy modelu ruchu towarowego określono również udziały podróży wewnętrznych realizowanych w godzinach szczytu porannego (07:00–08:00) oraz popołudniowego (16:00–17:00). Wyniki przedstawiono na rysunku 2.

Samochody dostawcze (DMC do 3,5 t)



Samochody ciężarowe o DMC powyżej 3,5 t



Rys. 2. Udział poszczególnych motywacji podróży w godzinach szczytowych

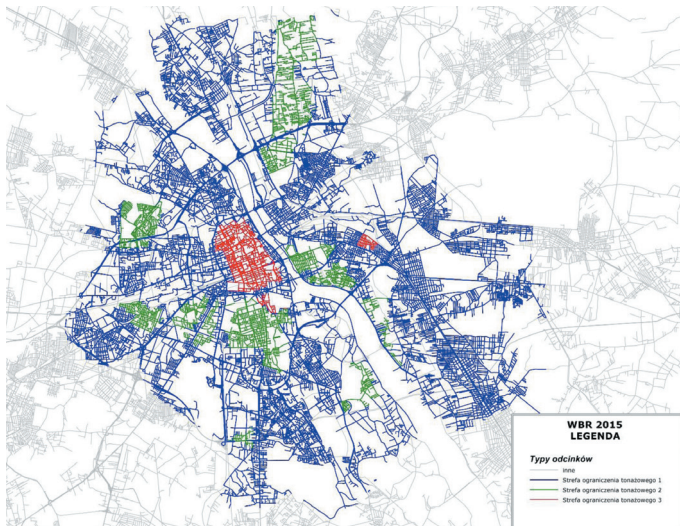
Model ruchu towarowego

Model sieci

Model ruchu towarowego, przygotowywany w ramach Warszawskiego Badania Ruchu 2015, został opracowany dla obszaru aglomeracji warszawskiej, a więc dla miasta stołecznego Warszawy oraz następujących gmin: Łomianki, Izabelin, Stare Babice, Ożarów Mazowiecki, Pruszków, Piastów, Michałowice, Raszyn, Lesznowola, Piaseczno, Konstancin-Jeziorna, Józefów, Otwock, Karczew (część miejska), Wiązowna, Sulejówek, Halinów, Ząbki, Zielonka, Kobyłka, Wołomin, Marki, Nieporęt, Legionowo i Jabłonna. W ramach prac nad modelem sieci w zakresie ruchu towarowego odwzorowano wszystkie drogi, po których mogą

poruszać się samochody ciężarowe. Do każdego z odcinków oraz węzłów sieci przypisano szereg charakterystyk, m.in. zdolność przepustowa, prędkość w ruchu swobodnym czy też obsługiwane systemy transportowe.

Ponadto wprowadzono specjalne parametry dla poszczególnych odcinków sieci transportowej Warszawy dotyczące stref ograniczonego ruchu samochodów ciężarowych w mieście. Zostały one przedstawione na rysunku 3.



Rys. 3. Parametryzacja sieci transportowej Warszawy na potrzeby modelowania ruchu towarowego

Źródło: opracowanie własne na podstawie <https://zdm.waw.pl/sprawy-w-zdm/ruch-ciężarówek> z wykorzystaniem Modelu WBR 2015 w PTV VISUM

Warszawa jest podzielona na trzy strefy ograniczenia tonażowego [20]. Do I z tych stref zakwalifikowano odcinki, na których zakazany jest ruch pojazdów ciężarowych o DMC powyżej 16 t w godzinach 07:00–10:00 oraz 16:00–22:00. Do strefy II zakwalifikowano odcinki, na których występuje zakaz wjazdu pojazdów o DMC powyżej 10 t, natomiast do strefy III – pojazdy ciężarowe o DMC powyżej 5 t.

W opracowanym modelu sieci, korzystając z bazy EDiOM /Ewidencji Dróg i Obiektów Mostowych/ (dla Warszawy) oraz BDOO /Baza Danych Obiektów Ogólnogeograficznych/ i OSM /Open Street Map/ (dla pozostałej części aglomeracji), odwzorowano zasady organizacji ruchu, które dotyczyły także ruchu towarowego. Dodatkowo w modelu odwzorowano ograniczenia tonażowe poprzez podział odcinków sieci drogowej na:

- odcinki, po których nie mogą poruszać się samochody ciężarowe;
- odcinki, po których nie mogą poruszać się tylko samochody ciężarowe o DMC powyżej 3,5 t;
- odcinki pozostałe.

Ponadto na potrzeby badania ruchu towarowego w modelu na odcinkach zadano dodatkowe ograniczenia dla samochodów ciężarowych o DMC powyżej 3,5 t powodujące zmniejszenie atrakcyjności wybranych dróg, ze względu na istniejące w aglomeracji ograniczenia tonażowe. Nałożenie dodatkowego ograniczenia powoduje wydłużenie czasu podróży, co skutkuje zmniejszeniem liczby pojazdów ciężarowych na odpowiednich połączeniach. Dodatkowo na rela-

cjach skrajnych odcinków wejściowych do poszczególnych stref ograniczenia tonażowego zadano opór w celu zmniejszenia liczby przejazdów tranzytowych samochodów dostawczych i ciężarowych przez te strefy.

Model popytu

Zgodnie z przyjętymi założeniami, przygotowując model popytu na przewozy towarowe, charakteryzujący wielkość zgłaszanego zapotrzebowania na transport, odwzorowano:

- ruch towarowy wewnątrz aglomeracji (źródło i cel podróży zlokalizowane na obszarze objętym badaniami);
- ruch towarowy źródłowy i docelowy (źródło podróży zlokalizowane na terenie objętym badaniami, natomiast cel poza obszarem badawczym i odwrotnie);
- ruch towarowy tranzytowy (źródło i cel podróży zlokalizowane poza obszarem objętym badaniami).

Model ruchu towarowego źródłowego i docelowego oraz tranzytowego opracowany został na podstawie wyników badań ruchu z kordonu zewnętrznego oraz wyników uzyskanych z krajowego modelu ruchu, modelu ruchu województwa mazowieckiego [17] i Warszawskiego Badania Ruchu 2015. W związku z tym w modelu zewnętrznym uwzględniono podział pojazdów ciężarowych na: lekkie samochody ciężarowe (tzw. dostawcze) ($DMC \leq 3,5$ t), samochody ciężarowe bez przyczep ($DMC > 3,5$ t) oraz samochody ciężarowe z przyczepami i ciągniki siodłowe z naczepami ($DMC > 3,5$ t). Motywacje podróży dla tych przewozów nie były rozróżniane.

Model ruchu towarowego wewnętrznego został przygotowany na podstawie analizy dzienniczek podróży samochodów ciężarowych, które zostały opracowane w ramach Warszawskiego Badania Ruchu 2015. W badaniach wydzielono 8 źródeł i celów podróży, na podstawie których można było wyodrębnić 64 motywacji podróży. Jednak ze względu na stosunkowo małą liczbę podróży opisanych w dzienniczkach podróży na potrzeby budowy modelu ruchu towarowego dokonano agregacji motywacji podróży do następujących²:

HANDEL_USŁUGI – HANDEL_USŁUGI,
 HANDEL_USŁUGI – WOH,
 HANDEL_USŁUGI – MAGAZYNY_PRZEMYSŁ,
 HANDEL_USŁUGI – POZOSTAŁE,
 WOH – HANDEL_USŁUGI,
 WOH – WOH,
 WOH – MAGAZYNY_PRZEMYSŁ,
 WOH – POZOSTAŁE,
 MAGAZYNY_PRZEMYSŁ – HANDEL_USŁUGI,
 MAGAZYNY_PRZEMYSŁ – WOH,
 MAGAZYNY_PRZEMYSŁ – MAGAZYNY_PRZEMYSŁ,
 MAGAZYNY_PRZEMYSŁ – POZOSTAŁE,
 POZOSTAŁE – HANDEL_USŁUGI,
 POZOSTAŁE – WOH,

² HANDEL_USŁUGI – miejsce handlu i usług poza wielkoprzestrzennymi obiektami handlowymi, WOH – wielkopowierzchniowy obiekt handlowy, MAGAZYNY_PRZEMYSŁ – centrum logistyczne, magazyn, skład, hurtownia, zakład przemysłowy) POZOSTAŁE – budowa, miejsce stałego postoju, inne.

POZOSTAŁE – MAGAZYNY_PRZEMYSŁ,
POZOSTAŁE – POZOSTAŁE.

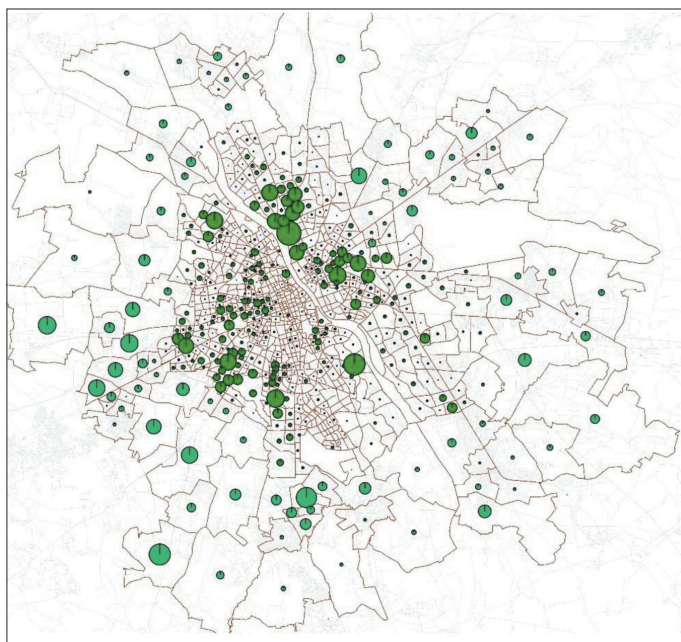
Oddzielnie dla każdej z wymienionych motywacji podróży opracowano modele potencjałów ruchotwórczych oraz modele rozkładu przestrzennego ruchu [7], [12], [13].

Kolejnym krokiem przy budowie modelu popytu na przewozy towarowe było zbudowanie modeli potencjałów ruchotwórczych. Do uzyskania liczby podróży rozpoczynanych i rozwiązywanych w poszczególnych rejonach wykorzystano następujące zmienne objaśniające generację i absorpcję potoku ruchu:

- dla pojazdów ciężarowych o DMC > 3,5 t dla źródła lub celu typu:
 - HANDEL_USŁUGI – powierzchnia całkowita budynków handlowych i usługowych,
 - WOH – powierzchnia całkowita wieloprzestrzennych obiektów handlowych (dla Warszawy) i powierzchnia WOH-ów (dla okolic Warszawy),
 - MAGAZYNY_PRZEMYSŁ – powierzchnia całkowita budynków produkcyjnych, magazynowych itp.
 - POZOSTAŁE – ważona powierzchnia budynków mieszkaniowych, obsługi transportu oraz obsługi technicznej;
- dla pojazdów dostawczych (o DMC ≤ 3,5 t) dla źródła lub celu typu:
 - HANDEL_USŁUGI – liczba miejsc pracy w handlu, usługach i pozostałych działalnościach (dla Warszawy) i liczba zatrudnionych w handlu, usługach i pozostałych dziedzinach (dla okolic Warszawy),
 - WOH – powierzchnia całkowita wieloprzestrzennych obiektów handlowych (dla Warszawy) i powierzchnia WOH-ów (dla okolic Warszawy),
 - MAGAZYNY_PRZEMYSŁ – liczba miejsc pracy w kategorii działalności rolnictwo, przemysł i budownictwo (dla Warszawy) i liczba zatrudnionych w przemyśle i budownictwie (dla okolic Warszawy).
 - POZOSTAŁE – dane o całkowitej liczbie mieszkańców na koniec roku według „zmodyfikowanych danych dla Warszawy” (dla Warszawy) i liczba mieszkańców na podstawie danych z Banku Danych Lokalnych GUS skorygowana według opracowania profesora Śleszyńskiego przez BDik (dla okolic Warszawy).

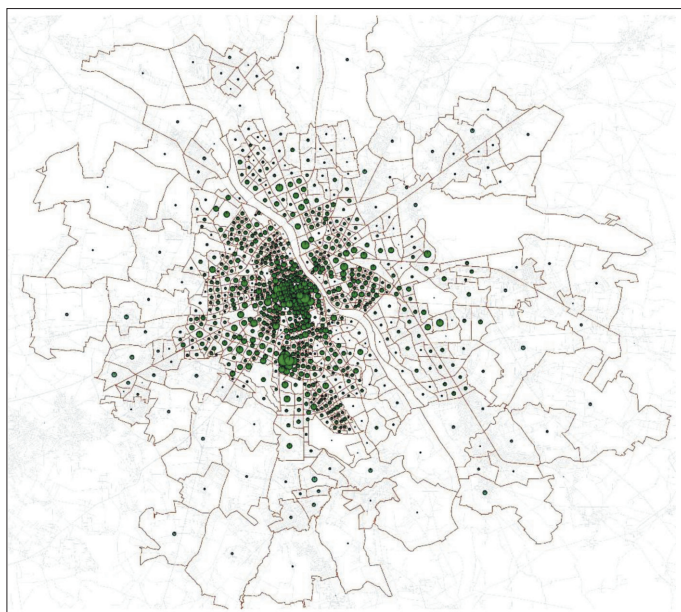
Jako zmienne objaśniające generację i absorpcję ruchu docelowego oraz źródłowego w odniesieniu do źródeł lub celów podróży położonych w aglomeracji dla pojazdów dostawczych (o DMC ≤ 3,5 t) przyjęto: liczbę miejsc pracy w handlu, usługach i pozostałych działalnościach (dla Warszawy) i liczbę zatrudnionych w handlu, usługach i pozostałych dziedzinach (dla okolic Warszawy). Dla pojazdów ciężarowych o DMC > 3,5 t wykorzystano powierzchnie całkowite różnego rodzaju obiektów i budynków.

Wartości zmiennych objaśniających dla poszczególnych rejonów komunikacyjnych dla źródła lub celu podróży MAGAZYNY_PRZEMYSŁ przedstawiono dla samochodów ciężarowych o DMC > 3,5 t na rysunku 4, natomiast dla samochodów dostawczych na rysunku 5.



Rys. 4. Wartości zmiennych objaśniających dla źródła lub celu podróży MAGAZYNY_PRZEMYSŁ dla samochodów ciężarowych o DMC > 3,5 t

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem Modelu WBR 2015 w PTV VISUM



Rys. 5. Wartości zmiennych objaśniających dla źródła lub celu podróży MAGAZYNY_PRZEMYSŁ dla samochodów dostawczych

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem Modelu WBR 2015 w PTV VISUM

Jak wynika z przedstawionych na rysunkach 4 i 5 map dla samochodów ciężarowych o DMC > 3,5 t, największe wartości zmiennych objaśniających generację oraz absorpcję dla źródła lub celu MAGAZYNY_PRZEMYSŁ uzyskane zostały dla obszaru okolic Warszawy, czyli miejsc, gdzie znajdują się obiekty logistyczne. Dla obszaru Warszawy wartości zmiennych objaśniających są zwykle niskie, co powoduje, że liczba podróży powiązanych z analizowanym źródłem lub celem uruchamianych i rozwiązywanych w tych rejonach jest mała. Natomiast dla samochodów dostawczych sytuacja jest odwrotna – wartości uwzględnionych zmiennych objaśniających powodują, że mało tych podróży generowanych jest w okolicach Warszawy, natomiast

dużo w Warszawie, a szczególnie w obszarze centralnym. Należy stwierdzić, że dobór typów zmiennych objaśniających, a co za tym idzie ich wartości, powoduje, że uzyskiwana liczba podróży generowanych lub absorbowanych w poszczególnych rejonach prawidłowo odwzoruje sytuację rzeczywistą.

Formuły opracowane do wyznaczenia potencjałów ruchotwórczych dla rejonów wewnętrznych i zewnętrznych w ruchu towarowym przedstawiono w opracowaniu [10]. Rozkład przestrzenny (więźba podróży) dla przewozów towarowych został opracowany z wykorzystaniem modelu grawitacyjnego [12].

Założenia dotyczące rozkładu przestrzennego podróży realizowanych samochodami ciężarowymi dla poszczególnych motywacji podróży opracowano, analizując wyniki badań ruchu towarowego. Dla części motywacji podróży, ze względu na małą liczbę ankiet, nie było możliwe ustalenie indywidualnych założeń dotyczących rozkładu przestrzennego podróży. Zatem uzyskane dla nich wyniki badań zagregowano oraz ustalono wspólny rozkład przestrzenny podróży. Wyniki tych obliczeń dla ruchu wewnętrznego przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

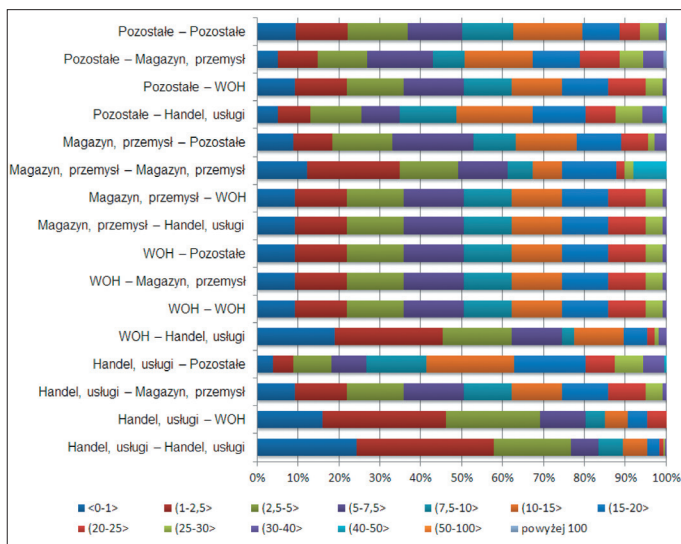
Parametry funkcji oporu przestrzeni zostały wyznaczone za pomocą modułu Kalibri pakietu PTV VISUM, przy uwzględnieniu wynikającego z ankiet przestrzennego rozkładu ruchu. Ich wartości przedstawiono w opracowaniu [10].

Rozłożenie potoku ruchu na sieć transportową i kalibracja modelu

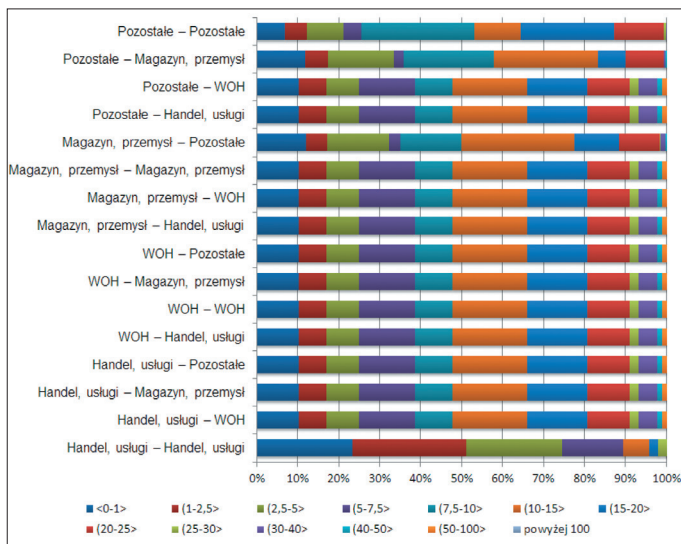
Odpowiednie sparometryzowanie modelu sieci drogowej i dostosowanie jej do obsługi pojazdów dostawczych i innych ciężarowych, a także opracowanie macierzy popytu dla różnych typów pojazdów w podziale na motywacje podróży umożliwiło przeprowadzenie pierwszych eksperymentów dotyczących rozkładu potoku pojazdów do przewozu ładunków na sieć transportową aglomeracji warszawskiej.

W modelu przyjęto, że samochody dostawcze i ciężarowe, korzystając z sieci, poszukują optymalnej dla siebie ścieżki dotarcia do celów, kierując się innym kryterium wyboru. Kryterium tym jest czas przejazdu liczony przy uwzględnieniu ważonego (inaczej dla samochodów dostawczych oraz cięższych) dodatkowego oporu zadanego na odcinkach i relacjach skrajnych sieci transportowej. Oczywiście podczas poszukiwań najlepszej drogi uwzględniane są ograniczenia i parametry sieci transportowej dotyczące ruchu towarowego (zakaz wjazdu samochodów ciężarowych, ograniczenia tonażowe na odcinkach uniemożliwiające poruszanie się po nich pojazdom o określonej DMC, kary dla pojazdów za wjazd do stref ograniczeń tonażowych zachęcające pojazdy ciężarowe do omijania centrum miasta itp.).

Uzyskane wyniki rozłożenia potoku pojazdów ciężarowych na sieć transportową umożliwiły rozpoczęcie procesu kalibracji modelu. W procesie kalibracji wykorzystano dwie grupy danych. Pierwsza z nich dotyczyła badań ankietowych wśród kierowców, na podstawie których spraw-



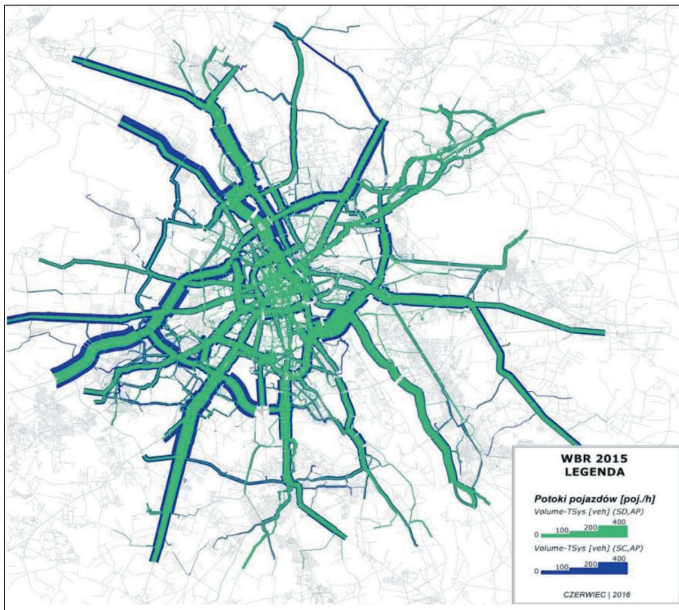
Rys. 6. Rozkład przestrzenny podróży wewnętrznych realizowanych samochodami dostawczymi



Rys. 7. Rozkład przestrzenny podróży wewnętrznych realizowanych samochodami ciężarowymi o DMC powyżej 3,5 t

dzano zgodność deklarowanej liczby podróży i rozkładu ich długości z liczbą podróży oraz ich długością wynikającą z modelu popytu. Drugi typ danych to wyniki pomiarów ruchu na odcinkach i skrzyżowaniach sieci transportowej. Model ruchu towarowego kalibrowany był przy uwzględnieniu wyników pomiarów z ponad 5000 punktów pomiarowych zlokalizowanych w aglomeracji warszawskiej. Wyniki pomiarów uwzględnione podczas kalibracji ruchu towarowego pochodziły przede wszystkim z badań przeprowadzonych w ramach WBR 2015, które w uzasadnionych przypadkach były korygowane przy uwzględnieniu baz danych opracowanych w ramach Generalnego Pomiaru Ruchu 2010, Generalnego Pomiaru Ruchu 2015, Warszawskiego Badania Ruchu 2015 oraz pomiarów ręcznych realizowanych przez Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie.

Podczas kalibracji modelu sprawdzana była zgodność rozkładu ruchu (rys. 8) z pomiarami na poszczególnych odcinkach sieci (wg wskaźnika R^2), a także na uwzględnio-



Rys. 8. Szczyt poranny – samochody dostawcze i ciężarowe

nych w modelu kordonach (kordon Warszawy, kordon aglomeracji, ekran Wisły, kordon obszaru centralnego, ekran kolei średnicowej). Dodatkowo na podstawie graficznych prezentacji rozkładu ruchu analizowane były przebiegi wybieranych przez pojazdy ścieżek. Ścieżki te oceniane były w sposób ekspercki pod względem poprawności.

W wyniku przeprowadzonej kalibracji i oceny modelu ruchu towarowego uzyskano zakładaną zgodność pomiędzy modelowanymi a pomierzonymi potokami pojazdów, oraz uznano model za poprawny (największą równą 71% zgodność uzyskano dla ruchu samochodów dostawczych w szczycie porannym).

Podsumowanie

Model ruchu towarowego opracowany w ramach projektu wykonanego na zamówienie m.st. Warszawy „Warszawskie Badanie Ruchu wraz z opracowaniem modelu ruchu” (WBR 2015) jest w pełni funkcjonalnym narzędziem do modelowania ruchu pojazdów dostawczych i innych ciężarowych w obszarze aglomeracji warszawskiej. Dodatkowo dzięki współpracy z modelem ruchu pasażerów w komunikacji indywidualnej i zbiorowej, a także modelem ruchu rowerów, stanowi integralny element kompleksowego narzędzia do modelowania, analizy i oceny zachowań komunikacyjnych mieszkańców aglomeracji warszawskiej, jak również podmiotów gospodarczych zlokalizowanych na tym obszarze.

Skalibrowany model ruchu towarowego dla stanu istniejącego jest podstawą do wykonania prognoz ruchu, czyli analizy stanu systemu transportowego w przyszłości. Umożliwia uzyskanie odpowiedzi na pytania dotyczące wpływu zmian w sieci transportowej aglomeracji oraz popytu na przewozy na rozkład ruchu samochodów dostawczych oraz ciężarowych o DMC >3,5 t dla roku 2016, 2025, 2035 i 2050. W modelu ruchu uwzględniono realizację planowanych inwestycji drogowych, zmiany zatrudnienia mieszkańców w określonych działach gospodarki

oraz przeznaczenie nowych terenów pod inwestycje (np. przemysłowe, handlowe, mieszkaniowe). Analiza wariantów prognostycznych pozwala racjonalnie planować rozwój systemu transportowego miasta oraz oceniać kierunki zmian w zagospodarowaniu przestrzennym.

Literatura

1. Cascetta E., *Transport Systems Analysis. Models and Applications*, 2nd Edition, Springer Optimization and Its Application, cz. 29, New York 2009.
2. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*, WKiŁ, Warszawa 2008.
3. Hanson S., Hanson, P., *Problems in integrating bicycle travel into the urban transportation planning process*, Transportation research record, 1976, tom 570.
4. Jacyna M., Wasiak M., *Modelowanie podziału zadań przewoźnych w segmencie przewozów pasażerskich*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Oddział w Krakowie, 2014, nr 1.
5. Jacyna M., Wasiak M. (red.), *Simulation model to support designing a sustainable national transport system*, Index Copernicus International, Warszawa 2014.
6. Jacyna-Gołda I., Żak, J., Gołębiowski, P., *Models of traffic flow distribution for various scenarios of the development of proecological transport system*, Archives of Transport, 2014, Vol. 32, Iss. 4.
7. Jones I., S., *Gravity Models and Generated Traffic*, Journal of Transport Economics and Policy, 1970, cz. 6., nr 2.
8. Karoń G., Łazarz B., *Wybrane zagadnienia budowy modelu ruchu*, „Logistyka”, 2010, nr 4.
9. Kostelecka A. (red.), *Warszawskie Badanie Ruchu 2015 wraz z opracowaniem modelu ruchu. Raport z etapu III. Opracowanie wyników badań*, Sopot/Kraków/Warszawa, listopad 2015.
10. Kostelecka A. (red.), *Warszawskie Badanie Ruchu 2015 wraz z opracowaniem modelu ruchu. Raport z etapu IV. Model ruchu*, Sopot/Kraków/Warszawa, czerwiec 2016.
11. Ortuzar J., Willumsen L.G., *Modelling transport*, John Wiley & Sons Ltd, Santiago 2011.
12. Sawicki P., Kiciński M., Fierek S., *Selection of the most adequate trip-modelling tool for integrated transport planning system*, Archives of Transport, 2016, Vol. 37, Iss. 1.
13. Small K., Clifford W., *The demand for transportation: models and applications*, University of California, California 1998.
14. Steenbrink P.A., *Optymalizacja sieci transportowych*, WKiŁ, Warszawa 1978.
15. Supernak J., *Modele powstawania miejskiego ruchu osobowego*, WKiŁ, Warszawa 1980.
16. Szarata A., *The multimodal approach to the modelling of modal split*, Archives of Transport, 2014, Vol. 29, Iss. 1.
17. Szarata A. (red.), *Wykonanie modeli podróży w województwie mazowieckim w ramach projektu „Trendy rozwojowe Mazowsza”. Moduł III – Opracowanie modeli podróży na Mazowszu dla stanu istniejącego – edycja II*, Kraków, maj 2015.
18. Żochowska R., *Selected issues in modelling of traffic flows in congested urban networks*, Archives of Transport, 2014, Vol. 29, Iss. 1.
19. Żochowska R., *Wielokryterialne wspomaganie podejmowania decyzji w zastosowaniu do planowania tymczasowej organizacji ruchu w sieci miejskiej*, OWPW, Warszawa 2015.
20. <https://zdm.waw.pl/sprawy-w-zdm/ruch-ciezarowek>