

**WOJCIECH SUCHORZEWSKI**

prof. dr inż., Politechnika Warszaw-  
ska, Instytut Dróg i Mostów,  
e-mail: wsu@il.pw.edu.pl

**ANDRZEJ BRZEZIŃSKI**

dr inż., Politechnika Warszawska,  
Instytut Dróg i Mostów, e-mail:  
a.brzezinski@il.pw.edu.pl

**ANDRZEJ WALTZ**

dr inż., Projekty-Konsultacje-Opro-  
gramowanie.

# Modelowanie i prognozowanie ruchu – od liczydła do Big Data<sup>1</sup>

**Streszczenie:** W artykule opisano historię modelowania i prognozowania ruchu w Polsce. W końcu lat 50. opracowano pierwsze prognozy ruchu z zastosowaniem modelu grawitacyjnego i komputerów produkcji krajowej (ZAM1 i ZAM2). W latach 60., modele i prognozy ruchu wykorzystywano nie tylko w planowaniu systemu transportowego, ale także rozwoju miast. Przykładem jest metoda optymalizacji warszawskiej, wykorzystywana w miastach polskich oraz zagranicznych. W latach 70. uzyskano dostęp do programów amerykańskich UTPS dla komputerów IBM360/370 i RIAD32 i zastosowano je w wielu miastach polskich. Wiarygodność modeli i prognoz ruchu wzbogacono przez badania zachowań komunikacyjnych. W roku 1996, w ramach „Studium układu autostrad i dróg ekspresowych”, zbudowano pierwszy model ruchu na sieci drogowej. Model ten był aktualizowany w kolejnych studiach dotyczących rozwoju dróg krajowych. W latach 2007–2008, w ramach prac nad „Master Plan dla transportu kolejowego w Polsce do 2030 roku”, zbudowano krajowy model ruchu kolejowego. W roku 2012, na konferencji „Modelling”, przedstawiono koncepcję połączenia modelu drogowego i kolejowego w jeden wspólny system prognozowania ruchu na poziomie krajowym. W ramach zrealizowanego w latach 2016–2019 projektu „Zasady prognozowania ruchu drogowego z uwzględnieniem innych środków transportu – INMOP 3” zbudowano krajowy multimodalny drogowo-kolejowy model transportowy. W ostatnich latach do zbierania danych o ruchu oraz w budowie modeli ruchu wykorzystywane są zaawansowane metody pozyskania danych o ruchu wykorzystujące BIG DATA. W artykule nie omawiano prac nad modelami ruchu pieszego i rowerowego, ale w spisie literatury wymieniono pozycje opublikowane w ostatnich latach.

**Słowa kluczowe:** modelowanie ruchu drogowego, modelowanie ruchu kolejowego, prognozowanie ruchu, badania ruchu, BIG DATA.

## Wprowadzenie

W artykule skoncentrowano się na makroskopowych modelach ruchu. Opisują one przemieszczanie osób i ładunków oraz środków transportu przez wielkości zagregowane, np. natężenie ruchu mierzone liczbą osób lub pojazdów w jednostce czasu. Pierwsze metody służące modelowaniu i prognozowaniu ruchu opracowano w pierwszej połowie lat 50. Były to metoda Fratara [8] oraz model grawitacyjny. W Polsce pierwsze modele i prognozy ruchu opracowano wkrótce potem, w drugiej połowie lat 50. Dotyczyły one wyłącznie przewozów transportem zbiorowym. Obliczenia wykonywano ręcznie, co wymuszało ograniczanie liczby rejonów komunikacyjnych do kilkunastu [1].

Autorem polskiej metody modelowania ruchu między rejonami miasta był Z. Lilpop. W metodzie zastosowano

wyznaczony eksperymentalnie współczynnik rozproszenia. Metoda ta nie brała pod uwagę wpływu odległości albo czasu podróży, wskutek czego dla relacji między rejonami odległymi uzyskiwano zawyżone wartości potoków ruchu, a dla rejonów leżących blisko siebie – zaniżone.

## Maszyny cyfrowe – modelowanie ruchu miejskiego

W wielu krajach bodźcem do podjęcia prac nad bardziej ambitnymi metodami analiz i prognoz ruchu osób i przewozu ładunków był dostęp do pierwszych maszyn cyfrowych. Już na początku lat 60. w Warszawie opracowano pierwsze programy służące do obliczania macierzy podróży z zastosowaniem modelu grawitacyjnego. Wykorzystywano komputery produkcji krajowej ZAM1 i ZAM2. Wydajność komputerów nadal ograniczała możliwą liczbę rejonów do 110. Dla 100 rejonów czas obliczeń rozkładu ruchu na sieć przekraczał 10 godzin [1]. Opracowany został również program dla obliczania rozkładu ruchu metodą Lilpopa. Poza Warszawą komputery wykorzystano również w prognozowaniu ruchu w innych miastach, m.in. w Gdańsku i Wrocławiu. Prognozy obejmowały w ograniczonym zakresie rozkład ruchu między rejonami na sieć transportową.

Modele i prognozy ruchu wykorzystywano nie tylko w planowaniu/projektowaniu systemów transportowych, ale także rozwoju miast. Przykładem jest metoda optymalizacji warszawskiej [2]. Powstała ona w latach 1961–1963 w Warszawie jako wynik pracy interdyscyplinarnego zespołu urbanistów, ekonomistów, inżynierów i informatyków. Celem była wielokryterialna ocena wariantowych koncepcji rozwoju miasta (zagospodarowania przestrzennego) z punktu widzenia kosztów budowy i eksploatacji zabudowy, infrastruktury (wodociągi, kanalizacja, ciepłownictwo, drogi) oraz transportu zbiorowego<sup>2</sup>). Opracowywane uproszczonymi metodami prognozy ruchu umożliwiały uwzględnienie kosztów podróży. W latach 1961–1978 metodę optymalizacji zastosowano w 28 miastach polskich oraz zagranicznych, w tym w opracowanym przez zespół polski planie odbudowy Skopje po trzęsieniu ziemi w 1963 roku [24]. Przeanalizowano 10 modeli zagospodarowania przestrzennego: trzy warianty struktury przestrzennej (układ zwarty, rozluźniony i satelitarny), warianty koncentracji zatrudnienia i zamieszkania. Jednym z kryteriów była „wielkość dojazdów do pracy, obliczona przy zastosowaniu modelu grawitacyjnego” [12].

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2020. Procentowy udział wkładu autorów w publikację: W. Suchorzewski 40%, A. Brzeziński 30%, A. Walz 30%

<sup>2</sup> W artykule termin transport zbiorowy obejmuje usługi transportu osób przez operatorów i przewoźników.

Przełomowe były lata 70. Dzięki współpracy z ONZ (UNDP) uzyskano dostęp do programów amerykańskich UTPS dla komputerów IBM360/370 i RIAD32. System UTPS, opracowany na zlecenie jednostek amerykańskiego Federalnego Ministerstwa Transportu UMTA i FHA, wspierał opracowywanie krótko- i długoterminowych planów miejskich systemów transportu z zastosowaniem metod komputerowych. Programy komputerowe i podręczniki/instrukcje obejmowały: analizę sieci drogowej i transportu zbiorowego, prognozę zapotrzebowania na transport, zbieranie i przetwarzanie danych oraz uproszczoną, wielokryterialną analizę wariantów zagospodarowania przestrzennego i systemu transportowego.

Możliwość korzystania z programów na zasadach niekomercyjnych spowodowała działania mające na celu dostosowanie pakietu programów do warunków krajowych oraz ułatwienie ich wykorzystania. W roku 1977, w Instytucie Kształtowania Środowiska (IKŚ), opracowano 4-tomowy podręcznik pt. *Prognozowanie ruchu miejskiego* [22]. Organizowano także szkolenia, w wyniku których kilkudziesięciu specjalistów uzyskało wiedzę na temat narzędzi systemu UTPS. Do roku 1978 system został wykorzystany w ponad 30 opracowaniach planistycznych i projektach dla aglomeracji i miast różnej wielkości [30].

Niestety liczba miast, w których zainstalowano komputery IBM 369/370 lub RIAD32, była ograniczona. Podjęto prace nad oryginalnymi, uproszczonymi systemami. W Instytucie Kształtowania Środowiska, wspólnie z Biurem Planowania Rozwoju Warszawy i Stołecznym Ośrodkiem ETO (SOETO), w drugiej połowie lat 70. opracowano system APROM, przeznaczony na popularne wówczas komputery ODRA 1305 i 1325. Wykorzystano w nim elementy systemu UTPS. System, ukończony w maju 1978 roku, był udostępniony nieodpłatnie, łącznie ze szkoleniami. Wykorzystano go w wielu miastach. Jego spójność z systemem UTPS spowodowała, że użytkownicy systemu APROM nabyli doświadczenia umożliwiające, w momencie zainstalowania sprzętu komputerowego o większej wydajności, korzystanie z bardziej rozwiniętego systemu UTPS. W roku 1985 programy systemu UTPS były zainstalowane m.in. w Gdańsku, Krakowie, Łodzi i Warszawie. Inne, oryginalne polskie systemy oprogramowania opracowano w Krakowie i Wrocławiu [18].

Wiarygodność modeli i prognoz wzbogacono przez badania zachowań komunikacyjnych. W latach 70. badania przeprowadzono w Warszawie, Gdańsku, Krakowie, Łodzi, Wrocławiu oraz wielu miastach średnich i małych. Dostęp do nowoczesnego oprogramowania umożliwił również budowę pierwszych sieciowych modeli dróg krajowych.

W latach 80. powstały nowe narzędzia wspierania planowania przestrzennego analizami efektywności. Opracowano procedury analiz optymalizacji zagospodarowania przestrzennego z punktu widzenia obsługi komunikacyjnej, wykorzystujących dostępne programy komputerowe, w tym UTPS [32].

Tematem zasługującym na szczególną uwagę okazało się udostępnianie oprogramowania i baz danych jednost-

kom sektora publicznego i wykonawcom opracowań planistycznych i projektowych, realizowanych na zlecenia tych jednostek. Rosnące koszty były powodem postulatów finansowania przez państwo opracowań takich jak modele ruchu dla elementów systemu transportowego, udostępniane nieodpłatnie wszystkim użytkownikom [31].

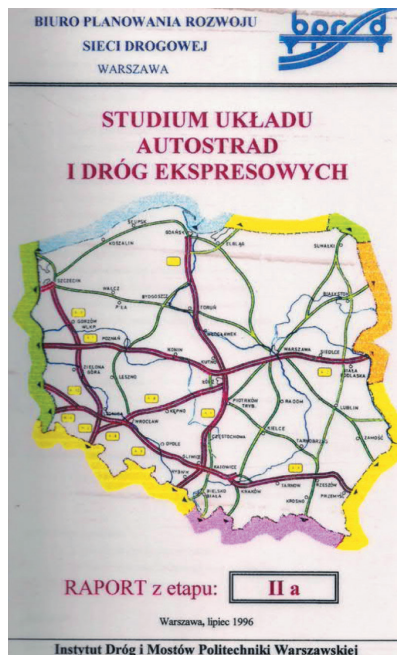
### Modele i prognozy ruchu dla sieci dróg krajowych

Wraz z uzyskaniem dostępu do programów umożliwiających stosowanie nowoczesnych metod planowania sieci drogowej już w latach 70. tworzone były pierwsze sieciowe modele ruchu dla dróg krajowych w Polsce. Modele były budowane przy wykorzystaniu pakietu programów opracowanych dla Federalnej Administracji Drogowej w Stanach Zjednoczonych. Był to w tych czasach najbardziej zaawansowany zestaw programów do prognozowania ruchu drogowego, przeznaczony do analiz kierunków rozwoju sieci dróg i autostrad w USA. Programy te zastosowano do analiz kierunków rozwoju sieci drogowej w Polsce w tym również do opracowania projektu układu autostrad. Intensyfikacja prac nad krajowymi modelami ruchu nastąpiła w latach 90., gdy powstały możliwości uzyskania funduszy europejskich na rozbudowę infrastruktury transportowej. W latach 1990–1991, a następnie w roku 1996, na zamówienie ówczesnej Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych (i jego agendy Biura Planowania Rozwoju Sieci Drogowej), wykonano pierwsze dwa kompleksowe Studia Autostrad i Dróg Ekspresowych [25, 26]. Niezbędne stało się wykorzystanie modelowania ruchu w celu uzasadnienia proponowanych projektów rozwoju sieci drogowej. Do oceny wariantów rozwiązań zastosowano kryteria ruchowe i ekonomiczne.

Budowa modeli wymagała wówczas zarówno danych o natężeniu ruchu, jak i danych opisujących zachowania i potrzeby komunikacyjne użytkowników dróg. Wielkość natężeń ruchu na sieci drogowej była rejestrowana dzięki prowadzonemu regularnie co pięć lat Generalnemu Pomiarowi Ruchu. Dane dotyczące przemieszczeń na sieci drogowej, określające skąd dokąd odbywane są podróże, jakie są ich długości, jakie są napelnienia pojazdów czy przewożone towary zbierano bezpośrednio na sieci drogowej, wykonując pionierskie w tamtych latach ankietowe pomiary ruchu drogowego.

W roku 1996 został zbudowany pełny model sieci drogowej oparty na bazach danych o sieci drogowej. Badania ankietowe wykonano w około 100 punktach pomiarowych na drogach krajowych i przejściach granicznych. Wykorzystano także wyniki badań ankietowych wykonywanych w ramach korytarzowych studiów ruchu dla poszczególnych autostrad. Dzięki temu pozyskano informacje o źródłach i celach przemieszczeń w ruchu pasażerskim i towarowym, strukturze ruchu pojazdów, motywacjach podróży, napelnieniach pojazdów, strukturze przewożonych towarów. Opracowane zostały modele ruchu pozwalające na budowę macierzy przemieszczeń pasażerskich i towarowych. Jako narzędzia wykorzystywano model UTPS AutoCada do wizualizacji wyników graficznych i arkusz kalkulacyjny

Lotus123 do obliczeń ekonomicznych. Modele zostały skalibrowane w oparciu o pomiar generalny z 1995 roku. W ramach Studium [26] opracowana została prognoza ruchu, umożliwiającą zweryfikowanie obowiązującego ówczesnie planu rozwoju sieci autostrad i dróg ekspresowych w Polsce. Wyniki analizy wykazały, że prognozy ruchu uzasadniały racjonalność planowanego wcześniej, podstawowego układu sieci tych dróg. Układ ten jest realizowany, co można stwierdzić, porównując mapę wykonanych inwestycji z mapą z tego opracowania.



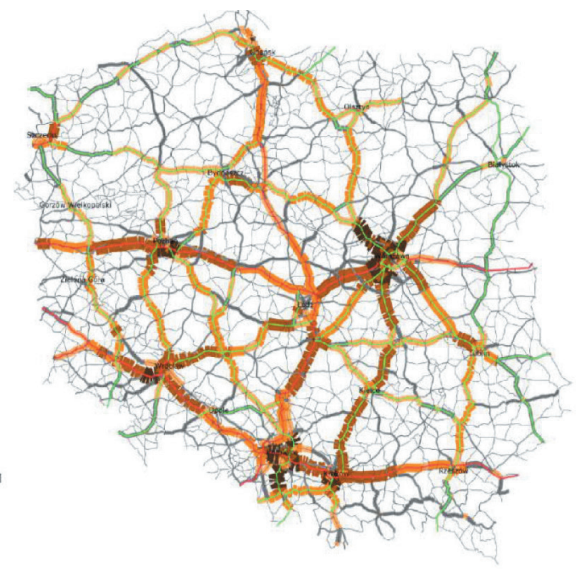
Rys. 1. Projekt układu krajowej sieci autostrad i dróg ekspresowych oparty na wynikach prognozy ruchu w opracowaniu z 1996 roku  
Źródło: [25]

## Polska w Unii Europejskiej

Po przystąpieniu Polski do Unii Europejskiej w 2004 roku pojawiły się nowe możliwości finansowania infrastruktury transportowej. Ruch samochodów osobowych wzrastał bardzo szybko jako rezultat wzrostu gospodarczego, a co za tym idzie również wskaźnika motoryzacji. Transport ładunków rósł gwałtownie w wyniku wzrostu wymiany gospodarczej. Zmieniały się również kierunki ruchu, szczególnie w relacjach tranzytowych. Konieczna stała się weryfikacja i aktualizacja ówczesnie obowiązującego planu rozwoju sieci dróg. Na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg i Autostrad w latach 2006–2008, w Instytucie Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej powstało trzecie kolejne *Studium układu dróg szybkiego ruchu w Polsce* [27]. Studium dotyczyło okresu do 2025 roku i obejmowało analizę podziału funkcjonalnego całej sieci drogowej Polski. Opracowany został nowy model sieci drogowej dla roku 2005, w programie VISUM PTV, oparty na bazie danych o odcinkach sieci drogowej GDDKiA. Wykonane zostały dodatkowe badania ankietowe na większości przejść granicznych oraz na wybranych drogach krajowych i wojewódzkich. Na tej podstawie opracowano modele generacji ruchu i rozkładu przestrzennego, zarówno dla ruchu samochodów osobowych, jak i ciężarowych. Zbudowane zostały macierze ruchu pomiędzy rejonami

komunikacyjnymi według podziału na powiaty i przejścia graniczne. Sprawdzenie i kalibracja modeli ruchu oparte były na wynikach GPR 2005. Łącznie przeanalizowano siedem wariantów rozwoju sieci, uwzględniając również postulaty zgłaszane przez samorządy, administrację drogową i parlamentarzystów. Warianty ocenione zostały zarówno prognozą potoków ruchu na sieci, jak i analizą ekonomiczną. Po analizie wyników przedstawiona została optymalna koncepcja rozwoju sieci autostrad i dróg ekspresowych, która do chwili obecnej jest prawie w całości zrealizowana. Model został udostępniany nieodpłatnie wszystkim zainteresowanym i był wykorzystany w kilkuset projektach związanych z rozwojem sieci drogowej.

Wejście Polski do Unii Europejskiej było również impulsem do opracowania planów rozwoju sieci kolejowej. W latach 2007–2008 opracowany został przez Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa wraz z grupą ekspertów z innych instytucji, „Master Plan dla transportu kolejowego



Rys. 2. Wynik prognozy ruchu dla roku 2025 według proponowanego układu krajowej sieci autostrad i dróg ekspresowych przedstawionego w studium z 2008 roku i bieżący stan realizacji układu  
Źródło: [26]

w Polsce do 2030 roku” [19]. Dla potrzeb prognozowania ruchu zbudowany został, po raz pierwszy w programie VISUM, model dla całej krajowej sieci kolejowej. Model oparty był na odcinkach ze zbioru OBLIKO (obecnie SOLK), który od wielu lat stanowi bazę do zbierania danych statystycznych o wielkości ruchu pociągów, pracy eksploatacyjnej i pracy przewozowej na krajowej sieci kolejowej. Wykorzystano dostępne dane o wielkości ruchu pociągów, zarówno pasażerskich, jak i towarowych, wielkość potoków pasażerskich, liczbie pasażerów na stacjach, macierze podróży ze statystyk biletowych i macierze przewozu towarów. Macierze ruchu opracowane zostały przy podziale na rejony komunikacyjne oparte na głównych stacjach kolejowych. Dysponowano praktycznie pełnym zestawem danych potrzebnych do budowy i kalibracji modelu. Do oceny wielkości ruchu samochodowego wykorzystano model sieci drogowej udostępniony przez GDDKiA. Wyniki tych analiz przez wiele lat stanowiły podstawę programów rozwoju sieci kolejowej w Polsce.

Wieloletnie doświadczenia z budowy modeli ruchu drogowego w Polsce (m.in. z kolejnych prac badawczo-rozwojowych, wykonanych w latach 1990–2008 na zlecenie krajowej administracji drogowej dotyczącej modelowania i prognozowaniu ruchu na sieci dróg krajowych i wojewódzkich) wykazały, że metodyka budowy modeli ruchu i prognozowania ruchu wymaga udoskonalenia. Postulat ten dotyczył zwiększenia zakresu i wiarygodności danych wykorzystywanych w modelowaniu oraz funkcjonalności modeli (różnorodność zastosowań). Ze względu na zgłaszane zapotrzebowanie zarządców infrastruktury i dostępność danych do planowania, projektowania i eksploatacji systemu transportowego dotychczas stosowano najczęściej modele i metody prognozowania ruchu, w których:

- systemy transportowe traktowane były odrębnie (stosowano głównie tzw. pierwotny podział zadań przewozowych);
- obszary modelowania i prognozowania nie były ze sobą powiązane (nie stosowano metody hierarchizacji modeli, umożliwiającej wymianę danych pomiędzy poziomem lokalnym, regionalnym i krajowym);
- wykorzystywano dostępne dane lub dane zbierano specjalnie na potrzeby budowy określonego modelu dla określonego okresu, z czasem stało się to bardzo trudne ze względu na ograniczenia możliwości wykonywania badań ruchu bezpośrednio na sieci drogowej.

Model budowano też dla ustalonego horyzontu czasowego, bez zaplanowania takiej aktualizacji modelu, aby możliwe było jego stosowanie w kolejnych latach. Coraz wyraźniej dawał się także we znaki brak zintegrowanego podejścia do modelowania ruchu (modelowanie intermodalne). Skutkowało to słabością baz danych wykorzystywanych w modelowaniu (np. bazy danych były tworzone odrębnie na potrzeby budowy modeli ruchu wykorzystywanych przez GDDKiA lub na potrzeby PKP). Budowanie modeli sektorowych (drogowy, kolejowy itd.) siłą rzeczy skutkowa-

ło niedokładnym rozpoznaniem: liczby podróży odbywanych w sieciach transportowych, rozkładu przestrzennego podróży, mechanizmów wyboru środków transportu czy też niedokładnymi zasadami wyboru określonych tras przejazdu. Ograniczona dostępność danych wykorzystywanych w modelowaniu (zazwyczaj pomiary ruchu i przewozów wykonywane były dla poszczególnych projektów) uniemożliwiała także hierarchizację modeli, rozumianą jako łączenie modeli lokalnych z regionalnymi i krajowymi, a także cykliczną aktualizację modeli i prognoz ruchu. Ograniczało to możliwość dostosowywania modeli do bieżących i długofalowych potrzeb użytkowników oraz weryfikację ich poprawności. Było to niekorzystne w kontekście znaczących środków publicznych przeznaczanych na budowę, modernizację i eksploatację infrastruktury transportowej oraz kosztów użytkowników tej infrastruktury (koszty eksploatacyjne, straty czasu).

Dotychczasowe próby strukturalnego łączenia modeli w ujęciu konkurencyjnych środków transportu czy też skali modelowania (lokalnej, regionalnej i krajowej) były nieliczne i często bardzo uproszczone. W rezultacie nie powstał Krajowy Model Ruchu, łączący co najmniej ruch drogowy, kolejowy i lotniczy, w tym osobowy i towarowy. Nie powstały także ogólnodostępne mechanizmy hierarchicznego tworzenia modeli umożliwiających przejście z analiz ruchu na szczeblu krajowym na szczebel regionalny (i odwrotnie) oraz ze szczebla regionalnego na lokalny (i odwrotnie). W rezultacie w analizach dotyczących regionalnych sieci transportowych, a nawet lokalnych (aglomeracyjnych), często stosowano uproszczone modele ruchu, co odbijało się na jakości i dokładności prognozowania ruchu.

W roku 2012 na konferencji „Modelling” w Krakowie przedstawiona została koncepcja połączenia modelu drogowego i kolejowego w jeden wspólny system do prognozowania ruchu na poziomie krajowym [35]. Zaproponowany został sposób połączenia modelu drogowego GDDKiA z sieciowym modelem kolejowym, oparty na wspólnym podziale na rejony komunikacyjne (powiaty), pozwalający na przeprowadzanie wspólnych analiz z możliwością badania przepływu potoków pasażerskich i towarowych pomiędzy transportem kolejowym i drogowym.

Na kolejnej konferencji w 2014 roku zaprezentowano praktyczne wykorzystanie modelu krajowej sieci transportowej do prognozowania pasażerskiego ruchu kolejowego [35]. Przedstawione zostały możliwości wykorzystania modelu w sytuacji, gdy możliwe jest uzyskanie dokładnych danych, pozwalające na budowę modelu uwzględniającego rzeczywiste rozkłady jazdy oraz rzeczywiste macierze podróży oparte na statystykach biletowych. Niestety, dane tego typu są traktowane przez przewoźników jako poufne, co utrudnia ich wykorzystywanie w budowie modeli ruchu kolejowego.

Przykładem wykorzystania zaawansowanych narzędzi w budowie modeli ruchu i ich zastosowania w zarządzaniu transportem/ruchem w obszarze metropolitalnym jest system TRISTAR, rozwijany od wielu lat w Trójmieście [20].

Doskonalenie metodyki modelowania i prognozowania ruchu było w znaczącym stopniu możliwe dzięki rozwojowi metod badań przemieszczania osób i ładunków. Przykładami są rozwiązania scharakteryzowane w publikacjach [5, 10, 14 i 15].

### Projekt INMOP 3

Próbie radykalnego udoskonalenia metodyki modelowania i prognozowania ruchu podjęto w ramach pracy badawczej *Zasady prognozowania ruchu drogowego z uwzględnieniem innych środków transportu* (RID-I/62 2A – projekt INMOP3), zleconej przez Generalną Dyрекcyję Dróg Krajowych i Autostrad oraz Narodowe Centrum Badań i Rozwoju [39]. Pracę zrealizowało w latach 2016–2019 konsorcjum wyższych uczelni (Instytut Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej – lider projektu, Politechnika Krakowska – partner). Głównym celem projektu było zbudowanie, w oparciu o dane dla roku 2015, modelu krajowej sieci transportowej zawierającego wszystkie środki transportu, pozwalającego na wspólną analizę przepływu osób i towarów.

W ramach projektu:

- opracowano ujednoliczoną metodę modelowania podróży i prognozowania ruchu na sieci drogowej z uwzględnieniem innych środków transportu (drogi, kolej, ruch lotniczy);
- opracowano Intermodalny Krajowy Model Ruchu (KMR), w podziale na zadania przewozowe ruchu pasażerskiego i towarowego realizowane na sieci dróg krajowych i wojewódzkich oraz sieci kolejowej (przewozy regionalne, międzyregionalne i międzyaglomeracyjne). Model jest opracowany w programie VISUM PTV;
- stworzono zasady i wytyczne budowy Regionalnych Modeli Ruchu (RMR) i Lokalnych (także Metropolitalnych) Modeli Ruchu (LMR);
- opracowano zasady standaryzacji analiz i prognoz ruchu.

Wprowadzono zasadnicze zmiany podejścia do sposobu budowy modeli ruchu i prognozowania, polegające na:

- budowie modeli w sposób hierarchiczny, umożliwiający wymianę danych pomiędzy szczeblami lokalnym, regionalnym i krajowym;
- uwzględnieniu konkurencyjności środków transportu;
- uwzględnieniu poszerzonego dostępu do danych. Oprócz danych zbieranych w pomiarach zleczanych przez zarządców dróg uwzględnienie danych lokalizacyjnych pozyskanych z sieci operatora telefonii komórkowej.

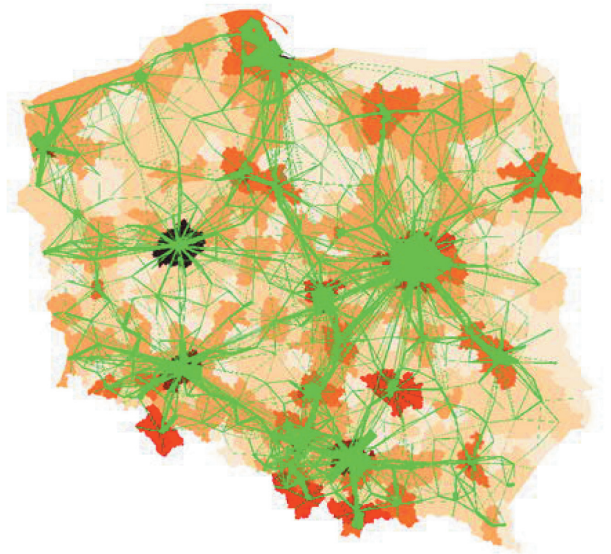
Innowacyjnością systemu INMOP 3 było także to, że do modelowania podróży wykorzystano dwa rodzaje danych typu Big Data:

- dane z tzw. sondowania pojazdów (rys. 3), czyli dane o użytkownikach nawigacji satelitarnej i systemów GPS zamontowanych w pojazdach, nie zawierające

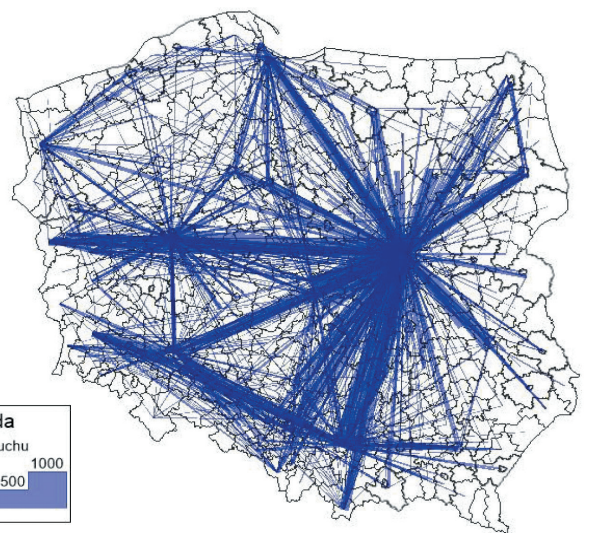
informacji osobowych i rzeczywistych identyfikatorów pojazdów (wykorzystano dane z ponad 80 tysięcy pojazdów flotowych wyposażonych we wbudowane urządzenia GPS oraz 275 tysięcy urządzeń i aplikacji do nawigacji osobistej opisujące około 11,7 mln podróży!);

- dane operatora telefonii komórkowej o podróżach/przemieszczeniach kart SIM opisujące około 192 mln podróży! (rys. 4);

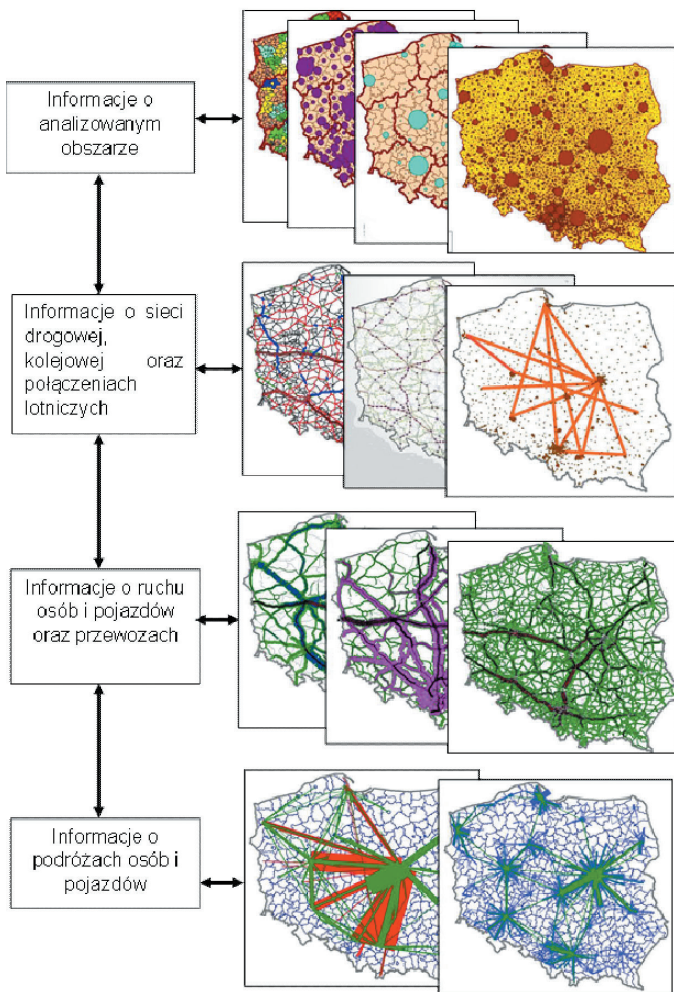
Umożliwiło to odtworzenie macierzy podróży pomiędzy poszczególnymi rejonami komunikacyjnymi w Polsce oraz macierzy podróży międzynarodowych dojazdowych i wyjazdowych z Polski i tranzytowych przez terytorium Polski.



Rys. 3. Dobowa więźba przemieszczeń na tle potencjału powiatów (rozpoczęte podróże) – długi weekend majowy 3.05.2016 – samochody osobowe – na podstawie danych z sondowania pojazdów  
Źródło: [39]



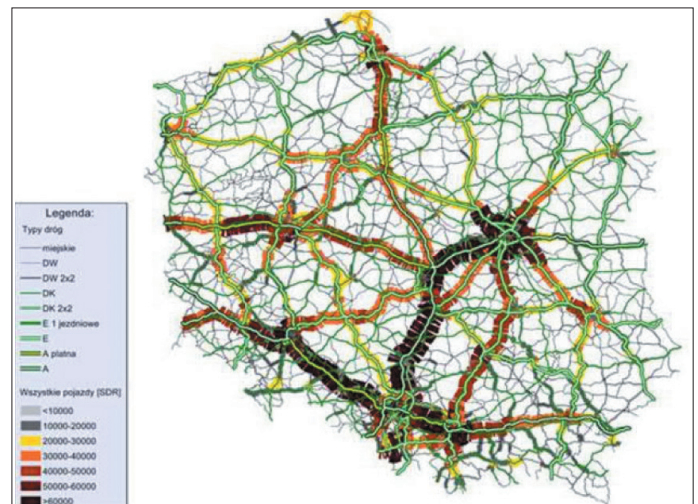
Rys. 4. Więźba przemieszczeń w ciągu doby wewnątrz kraju (> 100km), w dzień roboczy, w okresie zimowym. Na podstawie analizy kart SIM  
Źródło: [39]



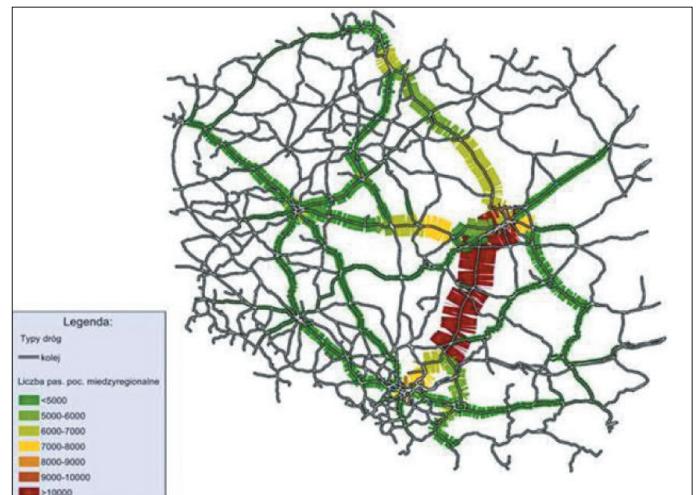
Rys. 5. Warstwy informacyjne krajowego modelu transportowego  
Źródło: [39]

Dużo dokładniej można było również rejestrować drogowy ruch ciężarowy dzięki nowym rodzajom badań o zasięgu krajowym. Prowadzone od ponad 10 lat przez GUS coroczne ankietowe badania ruchu pojazdów ciężarowych pozwalają na budowę macierzy przemieszczeń zarówno pojazdów ciężarowych, jak i ładunków w podziale na typy, a więc identyfikację głównych kierunków i rejonów generacji tego ruchu. Niestety, nie jest możliwe uzyskanie takich danych dla towarowego ruchu kolejowego. Nie pozwala to na analizę, tak jak ma to miejsce w przypadku ruchu pasażerskiego, wspólnych kolejowo-drogowych macierzy przewozu towarów. Dzięki temu jednak, że w modelu zastosowano jednolity dla ruchu kolejowego i drogowego system podziału na rejony komunikacyjne, możliwe jest analizowanie kierunków i skali ewentualnego przejmowania ruchu z dróg przez kolej. Mając dane o wielkości i głównych kierunkach przewozu towarów przez samochody ciężarowe, a także o rodzaju przewożonych towarów, można ocenić, na jakich trasach jest to możliwe i opłacalne.

Przewidziana była aktualizacja i kalibracja modelu w oparciu o dane z roku 2020, szczególnie z Generalnego Pomiaru Ruchu na drogach. Niestety, pomiar został przerwany ze względu na stan epidemii. Trudno przewidzieć, kiedy nastąpi stabilizacja zachowań komunikacyjnych, pozwalająca na wykonanie wiarygodnych pomiarów i ankie-



Rys. 6. Prognoza ruchu samochodów osobowych na planowanej sieci dróg ekspresowych i autostrad  
Źródło: [39].



Rys. 7. Prognoza kolejowego międzyregionalnego ruchu pasażerskiego na sieci kolejowej  
Źródło: [39].

towania podróżnych. Opracowany model i zawarte w nim dostępne obecnie modele zachowań komunikacyjnych pozwalają na wykonywanie prognoz ruchu towarowego i pasażerskiego na sieci dróg, oraz pasażerskiego na sieci kolejowej, w perspektywie do 2050 roku (rys. 6 i 7).

### Inne narzędzia modelowania i prognozowania ruchu

Zasługująca na uwagę, ambitna i oryginalna jest koncepcja *Modelowanie ruchu w Polsce z wykorzystaniem gminnego poziomu agregacji danych* [23]. Jest ona jednak ograniczona do „ruchu pojazdów osobowych” (SDR – samochody osobowe i mikrobusy).

Podstawowa część artykułu dotyczyła modelowania i prognozowania ruchu w sieciach transportu lądowego – dróg samochodowych i szynowych. Lista kategorii przemieszczania osób i transportu ładunków jest znacznie dłuższa i obejmuje także ruch pieszy, rowerowy, żegluga i transport lotniczy. Przykłady prób modelowania ruchu pieszego i rowerowego przez autorów polskich opisano w artykułach [11], [13] i [38]. Jednym z wyzwań jest modelowanie i prognozowanie transportu ładunków. Temu tematowi poświęcone są publikacje [4] i [15].

## Podsumowanie

W planowaniu rozwoju systemów transportowych, w tym sieci, kluczową rolę odgrywają prawidłowo wykonane prognozy ruchu oparte na wiarygodnych badaniach ruchu, pozwalających na określanie kierunków i wielkości ruchu pasażerskiego i towarowego. Wysoka jakość prognoz ma duży wpływ na trafność decyzji dotyczących inwestycji, które w dużym stopniu podejmowane są w oparciu o wyniki długoterminowych analiz kosztów i korzyści [9]. „Projekty, przedkładane do oceny Komisji Europejskiej w trwającej perspektywie finansowej są szczegółowo weryfikowane również pod kątem realności prezentowanych prognoz ruchu” [7]. Nowoczesne, zaawansowane systemy zbierania danych oraz oprogramowanie umożliwiają budowę zaawansowanych modeli transportowych, odwzorowujących zarówno kształt sieci, jak i zachowania komunikacyjne. W coraz większym stopniu dostępne są i wykorzystywane źródła danych, niekoniecznie przeznaczonych pierwotnie do celów analiz transportowych, z których można wyciągać pośrednio wnioski i dane dotyczące transportu.

## Literatura

- Broniewski S., Suchorzewski W., *Metoda optymalizacji warszawskiej*, Zastosowanie analizy systemowej w modelowaniu rozwoju regionalnego, PWN Warszawa 1979.
- Brzeziński A., Dybicz T., Szymański Ł., *Doświadczenia z budowy modelu ruchu dla obszaru metropolitalnego Warszawy z wykorzystaniem innowacyjnych źródeł danych*, „Annale inżynierii ruchu i planowania transportu”, t. III, Planowanie ruchu a wyzwania globalne, SITK, 2009.
- Brzeziński A., Projekt INMOP3, *Intermodalny Krajowy Model Ruchu*, Konferencja Naukowo-Techniczna, Innowacyjne Metody Prognozowania Ruchu Krajowego – Regionalnego - Lokalnego, Warszawa, 28 maja 2019.
- Dorosiewicz S., *Potoki ładunków w sieciach transportowych*, Instytut Transportu Samochodowego, 2010.
- Drzał M., Ostaszewski P., *Niekonwencjonalne techniki pomiarowe w modelowaniu ruchu*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2018, nr 4.
- Dybicz T., *Modelowanie i symulacje ruchu, rys historyczny i aktualnie stosowane oprogramowanie*, „Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK”, 2009, nr 90.
- Engel P., *Modelowanie ruchu – konieczność czy fanaberia?*, Biuletyn Informacyjny CUPT, 2018, nr 8.
- Fratat T., *Forecasting Distribution of Interzonal Vehicular Trips by Successive Approximation*, Traffic and Operations, 1954. /8/
- Friedberg J., *Wykorzystanie analiz i prognoz ruchu w analizie marketingowej projektów transportowych*, „Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK”, 2009, nr 90.
- Helbin M., Wyszomirski O., *Możliwości wykorzystania Big Data w badaniach popytu i podaży w transporcie miejskim*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2019, nr 2.
- Jacyna M., Wasiak M., Gołębiowski P., *Model ruchu rowerowego dla aglomeracji warszawskiej według Warszawskiego Badania Ruchu 2015*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2016, nr 10.
- Jankowski S., *Plan ogólny Skopje*, „Miasto”, 1967, nr 4.
- Krych A., Thiem J., *Modelowanie makro ruchu pieszego*, „Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK”, seria: Materiały konferencyjne, 2014, nr 1(103).
- Kucharski R., Mielczarek J., Drabicki A., Szarata A., *Metoda aktualizacji modelu podróży z wykorzystaniem macierzy przemieszczeń telefonów komórkowych*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2018, nr 5.
- Kulpa T., *Drogowy transport ciężarowy w regionalnych modelach podróży i ruchu*, „Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK”, 2010, nr 94.
- Kulpa T., Banet K., Rogala S., *Tworzenie modeli podróży z wykorzystaniem baz danych GIS*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2016, nr 1.
- Ledworowski B., Suchorzewski W., *Próba syntezy i oceny metod prognozy ruchu miejskiego*, OITiEB, Materiały TUP, 1963, z. 7.
- Lilpop Z., *Stan prognozowania ruchu w Polsce i kierunki jego rozwoju*, Mat. konferencji SITK nt. Badania i modelowanie ruchu w planowaniu komunikacyjnym, Kraków-Muszyna 1985.
- Master Plan dla transportu kolejowego w Polsce do 2030 roku*, Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa, 2008.
- Oskarbski J., *Modele ruchu w nowoczesnym zarządzaniu transportem drogowym*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2020, nr 6.
- Planowanie systemów transportu miejskiego*, Materiały metodyczne, IKŚ, 1976.
- Prognozowanie ruchu miejskiego przy zastosowaniu systemu programów FHWA i UMTA na maszynę cyfrową IBM 360*. Cz. I–IV, IKŚ, 1977.
- Rosik P., Komornicki T., Goliszek S., Śleszyński P., Pomianowski W., *Modelowanie ruchu w Polsce z wykorzystaniem gminnego poziomu agregacji danych*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2018, nr 3.
- Skopje – Study of Master Plan*, Warsaw Town Planning Office, 1964.
- Studium układu autostrad i dróg ekspresowych*, zamawiający: Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, wykonawca: Instytut Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej, 1990–1991.
- Studium układu autostrad i dróg ekspresowych*, zamawiający: Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, wykonawca: Instytut Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej, 1996.
- Studium układu dróg szybkiego ruchu w Polsce. Układ kierunkowy horyzont 2025 rok wraz z analizą podziału funkcjonalnego całej sieci drogowej Polski*, Instytut Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej, 2008.
- Suchorzewski W., *Rozmieszczenie miejsc pracy i zamieszkania w mieście, a obciążenie sieci komunikacyjnej*, „Miasto”, 1962, nr 8–9.
- Suchorzewski W., *Metody obliczania przyszłych potoków ruchu*, Mat. konferencji naukowo-techn. SITK, Ministerstwo Gospodarki Komunalnej, IGK, Warszawa 1966.
- Suchorzewski W., Trochimowski A., *Komunikacja w planach miejscowych, cz. I., Zasady planowania systemu komunikacyjnego jednostek osadniczych*, mat. szkoleniowe, Ministerstwo Budownictwa i PMB, TUP, 1969.
- Suchorzewski W., *Czy programy muszą kosztować?*, „Komputer”, 1987, VII.
- Waltz A., *Systemy programów do projektowania sieci komunikacyjnych w miastach i aglomeracjach*, „Biuletyn Instytutu Środowiska”, 1978, nr 9.
- Waltz A., *System programów do optymalizacji zagospodarowania przestrzennego z punktu widzenia obsługi komunikacyjnej*, „Biuletyn Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej”, 1986, nr 9–10.
- Waltz A., *Metoda oceny wariantów w planowaniu systemów transportowych*, „Transport Miejski”, 1990, nr 8, 9, 11.
- Waltz A., *Wykorzystanie krajowych modeli sieci transportowych do prognozowania kolejowych przewozów pasażerskich*, „Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK”, seria: Materiały konferencyjne, 2012, nr 2(98).
- Waltz A., *Krajowy model transportowy i jego zastosowanie w prognozowaniu ruchu dla potrzeb PKP INTERCITY SA*, „Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK”, seria: Materiały konferencyjne, 2012, nr 1(103).
- Wasiak M., Jacyna M., Włodawski M., Gołębiowski P., *Model ruchu towarowego dla aglomeracji warszawskiej według Warszawskiego Badania Ruchu 2015*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2016, nr 12.
- Zalewski A., *Modele ruchu rowerowego w miastach i aglomeracjach*, „Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK”, 2009, nr 90.
- Zasady prognozowania ruchu drogowego z uwzględnieniem innych środków transportu*. Projekt DZP/RID-I-62/11/NCBR/2016, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej, 2019.