

# Makrosymulacyjny model transportowy miasta Kielce oraz Kieleckiego Obszaru Funkcjonalnego<sup>1</sup>

## MICHAŁ PYZIK

mgr inż., absolwent Politechniki Krakowskiej, niezależny konsultant  
email: [michal.pyzik@gradiens.pl](mailto:michal.pyzik@gradiens.pl)

## ARKADIUSZ DRABICKI

mgr inż., Politechnika Krakowska, Katedra Systemów Transportowych  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków,  
email: [adrabicki@pk.edu.pl](mailto:adrabicki@pk.edu.pl)

## MAREK BAUER

dr inż., Politechnika Krakowska, Katedra Systemów Transportowych,  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków,  
email: [mbauer@pk.edu.pl](mailto:mbauer@pk.edu.pl)

## ANDRZEJ SZARATA

dr hab. inż., prof. PK, Politechnika Krakowska, Katedra Systemów Transportowych, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, email: [aszarata@pk.edu.pl](mailto:aszarata@pk.edu.pl)

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodykę tworzenia makrosymulacyjnego modelu systemu transportowego obejmującego obszar Kielc oraz gmin ościennych, wchodzących w skład Kieleckiego Obszaru Funkcjonalnego (KOF). Model ten został opracowany na podstawie wyników Kompleksowych Badań Ruchu przeprowadzonych w Kielcach w 2015 roku, co pozwoliło na stworzenie aktualnego i kompleksowego modelu czterostadiowego podróży, odwzorowującego specyfikę podróży na terenie miasta. W ramach rozszerzenia modelu podróży o ruch źródło-docelowy oraz tranzytowy wykorzystano dostępne bazy danych, w tym np. informacje o dojazdach do pracy gromadzone przez GUS, co było istotne dla dokładniejszego odwzorowania podróży aglomeracyjnych w obszarze KOF. W pracy przedstawiono szczegółowy opis i parametryzację poszczególnych etapów budowy modeli popytu i sieci transportowej, co może stanowić cenny materiał opisujący specyfikę podróży w miastach podobnej wielkości w Polsce – także w kontekście obecnie zachodzących zmian w zachowaniach komunikacyjnych i procesów demograficznych. Przedstawiono także wyniki opracowanych modeli prognostycznych dla lat 2025 i 2035, uwzględniających planowane zmiany w układzie transportowym w najbliższych latach – a wnioski z tych analiz mogą dostarczać ważnych przesłanek do kształtowania przyszłej strategii rozwoju transportu w obszarze Kielc i KOF.

**Słowa kluczowe:** Kielce, Kielecki Obszar Funkcjonalny, makrosymulacja, modelowanie podróży, Kompleksowe Badań Ruchu.

## Wprowadzenie

W procesie planowania sieci transportowych podstawowe i kluczowe narzędzie analityczne stanowią modele transportowe, które pozwalają na odwzorowanie symulacyjne systemów transportowych oraz szeregu zachodzących w nich zależności i interakcji. Modele te, opracowywane na podstawie szerokiej bazy danych wejściowych – danych demograficznych i socjoekonomicznych, informacji GIS, badań dot. zachowań komunikacyjnych i przepływu podróży, pomiarów terenowych itd. – stanowić powinny możliwie wiarygodny i dokładny obraz funkcjonowania systemu transportowego w stanie istniejącym. Dzięki temu możliwe jest dalsze wykorzystanie ich jako cennego narzędzia analitycznego w prognozowaniu przyszłego funkcjonowania

systemu w wyniku reakcji popytu (tj. zapotrzebowania na podróże) na zmiany w strukturze urbanistycznej podaży (tj. sieci transportowej).

Badania nad rozwojem modeli transportowych trwają już od kilkudziesięciu lat, a wraz z rozwojem narzędzi obliczeniowych i symulacyjnych wzrasta coraz bardziej przydatność – i także konieczność – stosowania takich modeli w planowaniu systemów transportowych, zarówno w ujęciu długofalowym (tj. na szczeblu strategicznym), jak i dla potrzeb bieżącego planowania operacji (tj. na szczeblu taktycznym). Według zaleceń Niebieskiej Księgi JASPERS [1] modele symulacyjne powinny być współcześnie wykorzystywane w ocenie efektywności wszelkich inwestycji transportowych, które mogą mieć istotne (widoczne) znaczenie dla długofalowego funkcjonowania systemu. Wyniki uzyskanych obliczeń symulacyjnych stanowią podstawę dalszej analizy kosztów i korzyści, a w konsekwencji przesądzają o ostatecznej efektywności ekonomicznej lub funkcjonalnej danej inwestycji.

W niniejszym artykule przedstawiono opis prac nad opracowaniem modelu makrosymulacyjnego dla miasta Kielce oraz Kieleckiego Obszaru Funkcjonalnego, który został stworzony w 2016 roku na bazie najnowszych wyników badań ruchu oraz aktualnych danych wejściowych.

## Wykorzystanie narzędzi symulacyjnych i danych wejściowych do budowy modelu transportowego Kielc i KOF

W powszechnej praktyce planowania transportowego wykorzystuje się modele analityczne opisujące system transportu na poziomie tzw. makroskopowym [2], tj. na poziomie szczegółowości wystarczającym dla weryfikacji z danymi pomiarowymi oraz dla celów strategicznego prognozowania i planowania. W ogólnym ujęciu odwzorowanie systemu transportowego w modelach symulacyjnych można rozdzielić na 2 zasadnicze elementy, opisujące elementy popytu (tj. model podróży) oraz podaży transportowej (tj. model sieci). Model podaży stanowi odwzorowanie sieci transportowej – tj. sieci drogowej, sieci transportu zbiorowego – w formie sparametryzowanego i skierowanego grafu matematycznego, składającego się z węzłów połączo-

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2018. Wkład autorów w publikację: M. Pyzik 50%, A. Drabicki 30%, M. Bauer 10%, A. Szarata 10%.

nych odcinkami. Model popytu stanowi z kolei matematyczny opis modelu generacji i przepływu podróży w sieci transportowej, a w powszechnej praktyce jest on opisany za pomocą tzw. algorytmu czterostadiowego [3], który obejmuje następujące etapy: generację podróży, rozkład przestrzenny podróży, podział zadań przewozowych i rozkład ruchu na sieć. Wynikiem analiz symulacyjnych jest rozkład modelu podróży na model sieci transportowej, w którego rezultacie otrzymuje się obraz przepływu potoków ruchu (drogowego, pasażerskiego) oraz parametry wyjściowe opisujące stan i funkcjonowanie sieci – tj. czasy (prędkości) podróży, obciążenie elementów systemu transportowego, informacje o warunkach ruchu w sieci itd.

Opisana powyżej metodyka budowy modeli makrosymulacyjnych pozwala na stworzenie narzędzia, dzięki któremu możliwe jest prognozowanie i symulowanie zmian, jakie mogą zajść w funkcjonowaniu układu transportowego w zależności od zmian w parametrach demograficznych, społeczno-ekonomicznych, danych dot. zagospodarowania przestrzennego itp. Współcześnie modele makrosymulacyjne są już coraz powszechniej opracowywane w średnich i dużych miastach w Polsce, a także na poziomie regionalnym czy wojewódzkim. Ważnym aspektem jest wykorzystanie aktualnych i wysokiej jakości danych wejściowych w budowie modeli transportowych, a zwłaszcza Kompleksowe Badania Ruchu (KBR), które stanowią kluczowe źródło informacji o bieżących zachowaniach komunikacyjnych w mieście czy regionie [4], [5].

Model transportowy miasta Kielce oraz przyległego obszaru KOF, opisany w niniejszym artykule, został opracowany w 2016 roku w ramach Planu Mobilności dla obszaru miasta Kielce oraz KOF [6], a rozwijany był w ramach prac jednego ze współautorów [7]. Wykorzystano szereg danych wejściowych, które pozwoliły na szczegółowe odwzorowanie modelu sieci i modelu podróży (np. dane GUS [9], dane z systemu informacji przestrzennych miasta Kielce), a do opracowania modelu wykorzystano oprogramowanie makrosymulacyjne VISUM niemieckiej firmy PTV AG [10]. W rezultacie prac stworzono model transportowy, który stanowi dokładne i aktualne narzędzie pozwalające na analizę symulacyjną systemu transportowego na terenie miasta Kielce oraz otaczającej aglomeracji (Kieleckiego Obszaru Funkcjonalnego).

W opracowaniu modelu transportowego bardzo ważnym źródłem informacji były Kompleksowe Badania Ruchu przeprowadzone w Kielcach w 2015 roku. [8] Badania te stanowiły szeroką i przydatną bazę informacji nt. obecnych zachowań komunikacyjnych mieszkańców Kielc, typowego obrazu przepływu podróży w mieście, a także pozwalały na analizę czynników determinujących podróże wykonywane poszczególnymi środkami transportu na terenie Kielc. Wyniki badań KBR są podstawą do opracowania matematycznego modelu podróży (popytu transportowego) w mieście, a wśród najbardziej istotnych informacji opisujących specyfikę podróży wykonywanych przez mieszkańców Kielc (wg stanu na 2015) można wymienić następujące aspekty:

- motywacje podróży: 34% podróży wykonywanych w ciągu doby to podróże w relacji dom-praca-dom (DPD); 9% to podróże w relacji dom-nauka-dom (DND); 52% stanowią podróże w relacji dom-inne-dom (DID), a 5% to podróże niezwiązane z domem (NZD);
- największa liczba rozpoczynanych podróży (na godz.) w ciągu doby przypada: w szczycie porannym na godz. 7–8 (szacowana liczba około 40 000 podr./godz.), a w szczycie popołudniowym na godz. 15–16 (około 36 500 podr./godz.);
- podział zadań przewozowych w podróżach miejskich: 34,0% to podróże piesze; 42,0% to podróże wykonywane samochodem (tj. 33% jako kierowca, a 9% jako pasażer); udział środków transportu zbiorowego wynosi około 22,2% (z czego na miejską komunikację autobusową przypada około 21,5%, a komunikację mikrobusową około 0,6% podróży; uwagę zwraca praktycznie znikomy udział komunikacji szynowej); udział podróży rowerowych wynosi około 1,2% wszystkich podróży w mieście;
- wyniki KBR dostarczają także potwierdzenia, że liczba samochodów osobowych w gospodarstwie domowym ma zdecydowany wpływ na wybierany środek transportu (tabela 1) – wyraźne są różnice zwłaszcza w przypadku gospodarstw nie posiadających własnego samochodu;
- średni czas podróży mieszkańców Kielc wynosi 24 minuty; podróże piesze trwają średnio 15 minut, podróże samochodami osobowymi – 23 minuty, a miejską komunikacją zbiorową – 39 minut (w tym wypadku wynika to z uwzględnienia m.in. czasów dojeżdżania oraz czasów przesiadki); wartość średnia czasu podróży zmienia się bardzo nieznacznie tylko w trakcie szczytu popołudniowego, kiedy to wzrasta do 28 minut – a w szczycie porannym pozostaje w zasadzie bez zmian.

Tabela 1

Wpływ liczby samochodów w gosp. domowym na podział zadań przewozowych				
Liczba samochodów osobowych w gospodarstwie domowym	Podział zadań przewozowych wg deklaracji respondentów [%]			
	pieszo	rower	transport indywidualny	transport zbiorowy
0 (brak)	52,2%	2,3%	10,6%	34,9%
1	29,4%	0,9%	50,6%	19,1%
2 (lub więcej)	20,8%	0,6%	65,4%	13,2%

Źródło: KBR Kielce z 2015 r. [8]

### Odwzorowanie modelu podaży

W ramach modelu podaży dokonano odwzorowania – w formie wcześniej już opisanego grafu węzłów i odcinków – sieci drogowej na obszarze Kielc oraz gmin wchodzących w skład KOF. Zakodowany model sieci drogowej obejmuje wszystkie drogi krajowe, wojewódzkie i powiatowe, a także ważniejsze drogi gminne (tj. z pewnym uproszczeniem dla obszaru gmin ościennych). W modelu sieci drogowej założono szczegółową parametryzację sieci drogowej z podziałem na około

35 kategorii odcinków (*LinkTypes*). Przy różnicowaniu i klasyfikacji kategorii odcinków kierowano się głównie kryteriami klasy funkcjonalno-technicznej, stopnia dostępności oraz charakteru zagospodarowania otoczenia (drogi w obszarze i poza obszarem zabudowy); jako oddzielne kategorie wyróżniono także łącznice w obrębie węzłów drogowych oraz odcinki specjalnie przeznaczone tylko dla pojedynczych systemów transportowych, np. linie kolejowe, łączniki piesze, jezdnie autobusowe. Każda kategoria *LinkType* charakteryzuje się parametrami opisującymi: przepustowość, maks. prędkość w ruchu swobodnym oraz dopuszczone do ruchu podsystemy transportu drogowego i zbiorowego. Dla odcinków przeznaczonych dla ruchu drogowego przypisano funkcje oporu odcinka, które opisują matematyczną zależność pomiędzy wzrostem natężeniem ruchu a spadkiem prędkości przejazdu – tzw. funkcje VDF (*volume-delay function*) [11]. W opracowanym modelu wykorzystano funkcje VDF kategorii BPR2, które pozwalają zamodelować większy przyrost kary czasowej (tj. spadek prędkości) po przekroczeniu nominalnej granicy przepustowości odcinka. Dodatkowo dokonano przypisania prędkości minimalnej na odcinkach sieci drogowej – jest to zabieg techniczny, który pozwala na uniknięcie ewentualnego błędu mogącego wystąpić w algorytmie makrosymulacyjnym, gdzie w wyniku zaokrąglenia wartości straty czasu oszacowane na bardzo krótkich odcinkach sieci (o długości rzędu 50–100 metrów) mogą rażąco zniekształcić statystyki końcowe dot. pracy przewozowej i pracy eksploatacyjnej. Szczegółową parametryzację modelu sieci drogowej wraz z opisem funkcji oporu odcinków zestawiono w [6] oraz [7].

W dalszej kolejności w modelu sieci dokonano odwzorowania układu połączeń transportu zbiorowego na obszarze Kielc oraz gmin KOF. W pierwszej kolejności oznaczało to uzupełnienie powyżej opisanego grafu sieci o układ połączeń autobusowych i kolejowych wraz z lokalizacją punktów dostępności, tj. stacji kolejowych oraz dworców i przystanków autobusowych. Model podaży transportu zbiorowego uwzględniał wszystkie gałęzie transportu oferujące przewozy pasażerskie na terenie Kielc i gmin KOF – wg stanu aktualnego na pierwszą połowę 2016 roku, tj.:

- transport autobusowy miejski i podmiejski organizowany przez ZTM Kielce;
- transport mikrobusowy działający na obszarze KOF, obsługujący przewozy pasażerskiego pomiędzy miastem Kielce a gminami ościennymi;
- transport kolejowy regionalny i dalekobieżny rozumiany jako połączenia realizowane przez przewoźnika POLREGIO oraz PKP Intercity.

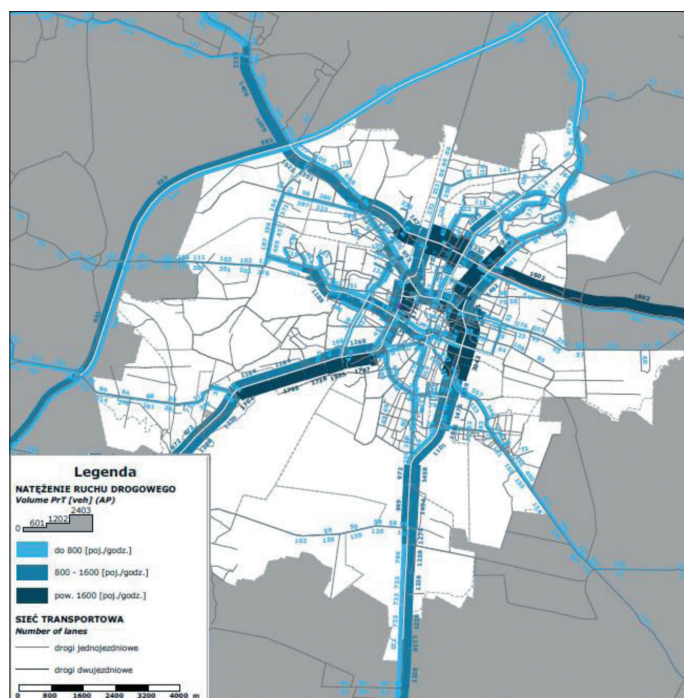
W kodowaniu punktów zatrzymań linii autobusowych i mikrobusowych uwzględniono szczegółową lokalizację (pojedynczych) punktów przystankowych na obszarze miasta Kielce, a na obszarze gmin ościennych KOF dokonano tego w sposób bardziej zagregowany, tj. na poziomie ważniejszych węzłów przystankowych. W dalszym kroku wprowadzone przebiegi linii autobusowych, mikrobusowych i kolejowych zostały uzupełnione o profile czasów przejazdu,

które odzwierciedlają prędkości komunikacyjne założone w rozkładach jazdy – przy czym prędkości komunikacyjne wprowadzono i weryfikowano na poziomie kategorii odcinków *LinkTypes*, a nie pojedynczych linii. Następnie dla poszczególnych linii transportu zbiorowego dokonano odwzorowania rozkładów jazdy na poziomie pojedynczych kursów (tzw. *timetable-based model*) dla typowego dnia roboczego w szczycie porannym (6:00–9:00) oraz szczycie popołudniowym (14:00–17:00). Dla linii autobusowych ZTM Kielce oraz połączeń kolejowych wprowadzono wszystkie kursy w tych godzinach wg dokładnych godzin odjazdu zawartych w rozkładach jazdy (wg stanu aktualnego na pierwszą połowę 2016 roku). W kodowaniu linii mikrobusowych dokonano agregacji wszystkich zidentyfikowanych połączeń do kilkunastu korytarzy, dla których wprowadzono kursy (odjazdy) wg średniej częstotliwości kursowania w godzinie.

Obszar modelu sieci został podzielony na rejonów komunikacyjnych (tj. obszary o jednorodnych zachowaniach i cechach komunikacyjnych), które będą stanowić zasadniczy punkt odniesienia dla modelu popytu. Podział obszaru miasta Kielce miał charakter bardziej szczegółowy, a w jego wyniku wyznaczono w sumie 175 rejonów wewnątrzmiastkich. Oprócz tego w modelu zdefiniowano 16 rejonów zewnętrznych odpowiadającym poszczególnym gminom wchodzącym (poza Kielcami) w skład KOF; a także 28 wlotów zewnętrznych, które odnoszą się do poszczególnych dróg krajowych, dróg wojewódzkich i linii kolejowych przecinających granicę (zakres) obszaru opracowania modelu.

### Odzworowanie modelu popytu

Model popytu dla miasta Kielce oraz gmin KOF składa się z modelu pasażerskiego oraz modelu ruchu towarowego. Model popytu jest opisany w formie macierzy źródło-cel, która określa liczbę podróży – wykonywanych danym środkiem



Rys. 1. Wyniki symulacji modelu Kieleckiego Obszaru Funkcjonalnego – potoki ruchu samochodowego [poj./godz.] w szczycie porannym w modelu bazowym 2016 r.

transportu i w danej jednostce czasu – dla każdej możliwej relacji podróży pomiędzy dwoma danymi rejonami komunikacyjnymi (tj. źródłem i celem podróży). Modele podróży zostały opracowane zgodnie z (opisaną powyżej) procedurą czterostadiową, a także z rozróżnieniem formuł generacji i rozkładu podróży wg kategorii: podróży miejskich (wewnątrz miasta Kielce), podróży źródłowych i docelowych (pomiędzy Kielcami a gminami KOF oraz pomiędzy gminami KOF) oraz podróży tranzytowych (zewnętrznych, tj. których zarówno źródło, jak i cel znajdują się poza obszarem analizy). W niniejszym rozdziale przedstawiono najważniejsze elementy i parametry modelu popytu, które w sposób bardziej szczegółowy zostały opisane w pracach [6], [7]. Model popytu został przygotowany na podstawie danych wejściowych z:

- Kompleksowych Badań Ruchu, przeprowadzonych na terenie miasta Kielce w 2015 roku przez firmę Rubika Consulting [8] – podstawowe źródło informacji do opracowania modelu podróży miejskich i formuł modelu czterostadiowego;
- danych z Narodowego Spisu Powszechnego z 2011 roku dot. dojazdów do pracy [12] – wykorzystane do opracowania modelu podróży w obszarze KOF oraz aktualizacji modelu podróży miejskich;
- zbiorów miejskiego systemu informacji przestrzennej i danych GIS udostępnionych przez miasto Kielce – źródło informacji o zmiennych objaśniających dla każdego rejonu komunikacyjnego miasta Kielce (demografia, zagospodarowanie przestrzenne, informacje ekonomiczno-gospodarcze itd.);
- w opracowaniu modelu ruchu towarowego – wnioski z analiz prowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej [13], [15];
- wyników Generalnego Pomiaru Ruchu z 2015 roku [14] udostępnionych przez GDDKiA – wykorzystane do opracowania więzby podróży tranzytowych.

Pierwszym etapem w obliczeniach modelu ruchu pasażerskiego jest generacja podróży. Na tym etapie szacowane są wielkości potencjałów ruchotwórczych, tj. podróży rozpoczynających się (produkcja) i kończących się (atrakcja) w danym rejonie komunikacyjnym w jednostce czasu. Podstawowym zestawem danych są tutaj zmienne objaśniające dla każdego rejonu komunikacyjnego, którymi są dane demograficzne (liczba ludności, liczba aktywnych zawodowo, liczba uczących się) oraz informacje o strukturze funkcjonalno-przestrzennej (liczba miejsc pracy, liczba miejsc w szkołach i na uczelniach, struktura wykorzystania powierzchni zabudowy) dla danego rejonu. W szacowaniu liczby podróży pod uwagę brany jest także współczynnik ruchliwości, który wg wyników KBR w Kielcach w 2015 roku wynosił średnio 2,12 podróży<sup>2</sup>/dobę na każdego mieszkańca miasta. Następnie potencjały ruchotwórcze są szacowane jako funkcja (w formie regresji liniowej) zmiennych objaśniających, z podziałem na motywacje podróży – przyjęto tutaj rozróżnienie na 7 motywacji, wykorzystywane powszechnie w praktyce modelowania transportowego. Określono także współczynniki przeliczeniowe liczby podróży z wartości dobowych na zidentyfikowaną w badaniach KBR godzinę szczytu porannego, która przypada na godz. 7:00–8:00. Wynikowe formuły generacji podróży dla modelu popytu Kielc przedstawiono w tabeli 2. Można zauważyć, że uzyskane wyniki zgodności z ankietami KBR są na bardzo dobrym poziomie i to nawet w przypadku motywacji dość „trudnych” w modelowaniu, takich jak np. dom-nauka-dom czy podróże niezwiązane z domem: współczynniki determinacji wahają się w przedziale 0,78–0,97. Przyczyny dla tak wysokich współczynników determinacji należy upatrywać przede wszystkim w wysokiej jakości danych wejściowych: wysokiej jakości badań ankietowych [8],

<sup>2</sup> W podróżach uwzględniono również podróże piesze.

Tabela 2

Wzory na generację podróży wewnętrznych w rejonach miejskich Kielc					
Motywacja		Produkcja – wzór	R <sup>2</sup>	Atrakcja – wzór	R <sup>2</sup>
DPD	dom-praca	0,523949*[LUD_19-65_All]	0,97	0,736384*[McaPracy]	0,94
	praca-dom	0,685296*[McaPracy]	0,94	0,493409 * [LUD_19-65_All]	0,98
DND	dom-nauka (uczniowie)	1,16344*[LUD_13-18]	0,97	0,357822*[McaSzkoły_GimnLic]	0,80
	nauka-dom (uczniowie)	0,348792*[McaSzkoły_GimnLic]	0,80	1,12539*[LUD_13-18]	0,96
	dom-nauka (studenci)	0,474978*[LUD_19-24_All]	0,80	0,360426*[McaSzkoły_StudDzienne]	0,96
	nauka-dom (studenci)	0,3078*[McaSzkoły_StudDzienne]	0,96	0,428133*[LUD_19-24_All]	0,83
DID	dom-inne	0,570474*[LUD]	0,89	0,354743*[LUD] + 0,499156*[McaPracy]	0,81
	inne-dom	0,217248*[LUD] + 0,537618*[McaPracy]	0,78	0,449771*[LUD]	0,91
NZD	niezwiązane z domem	0,0363961*[LUD] + 0,0981901*[McaPracy] + 0,16356*[McaSzkoły_StudDzienne] + 0,164052*[McaSzkoły_GimnLic]	0,90	0,197133*[McaPracy] + 0,0352469*[LUD]	0,78
oznaczenia skrótów:					
<ul style="list-style-type: none"> <li>• [LUD] – ludność ogółem, wraz z niezameldowanymi</li> <li>• [LUD_13-18] – ludność w wieku 13-18 lat</li> <li>• [LUD_19-24_All] – ludność w wieku 19-24 lat, wraz z niezameldowanymi</li> <li>• [LUD_19-65_All] – ludność w wieku 19-65 lat, wraz z niezameldowanymi</li> <li>• [McaPracy] – liczba miejsc pracy w przedsiębiorstwach zatrudniających pow. 9 osób</li> <li>• [McaSzkoły_GimnLic] – liczba miejsc w szkołach gimnazjalnych i ponadgimnazjalnych (bez szkół wyższych i policealnych)</li> <li>• [McaSzkoły_StudDzienne] – liczba miejsc na studiach stacjonarnych oraz w szkołach policealnych</li> </ul>					

Źródło: opracowanie własne na podst. KBR Kielce z 2015 r. [1]

a także wysokiej jakości zbiorów dostarczonych przez miasto Kielce do wyznaczenia zmiennych objaśniających. Wpływ na uzyskane wyniki mogły mieć też z pewnością stosunkowo duże rejonu komunikacyjne wykorzystane przy badaniu ankietowym, w którym badania wykonano w podziale miasta Kielce na 49 rejonów komunikacyjnych, co z kolei było podyktowane wielkością próby badawczej (n=2200 gospodarstw domowych).

Kolejnym etapem w czterostadiowym modelu popytu jest rozkład przestrzenny podróży. W tym kroku otrzymuje się więźbę (macierz) ruchu, która opisuje liczbę wykonywanych podróży w każdej możliwej relacji źródło-cel, czyli pomiędzy dowolną parą rejonów komunikacyjnych. Rozkład przestrzenny podróży jest opisywany za pomocą tzw. funkcji oporu, która opisuje malejącą liczbę podróży wraz ze wzrostem odległości pomiędzy rejonami. W modelu transportowym Kielce wyznaczono osobne funkcje oporu przestrzennego dla poszczególnych motywacji w postaci funkcji wykładniczej (1):

$$f(l_{ij}) = a \cdot l_{ij}^b \cdot e^{-c \cdot l_{ij}} \quad (1)$$

gdzie:

$l_{ij}$  – odległość pomiędzy rejonem źródłowym  $i$  oraz docelowym  $j$  mierzona po sieci [km],

$a, b, c$  – parametry funkcji oporu przestrzeni [-].

Tabela 3

Parametry funkcji rozkładu przestrzennego podróży w modelu transportowym Kielce i KOF					
Zasięg podróży	Motywacja podróży	Parametry funkcji oporu			R <sup>2</sup>
		a	b	c	
podróże wewnętrzne (Kielce – Kielce)	DPD (dom- praca-dom)	0,047	2,667	-0,951	0,93
	DND (dom-nauka-dom)	0,113	0	-0,365	0,70
	DID (dom-inne-dom)	0,066	1,223	-0,690	0,92
	NZD (niezwiązane z domem)	0,100	-0,273	-0,224	0,83
podróże źródłowo-docelowe (Kielce – KOF)	wszystkie	0,0001	3,368	-0,229	0,70

źródło: opracowanie własne na podst. KBR Kielce z 2015 r. [8]

W następnym etapie modelu czterostadiowego następuje podział zadań przewozowych, czyli oszacowanie macierzy podróży wykonywanych poszczególnymi środkami transportowymi. Podział zadań przewozowych przebiega w 2 krokach: w pierwszym kroku z ogólnej macierzy podróży wydzielane są podróże piesze. Wyniki badań KBR wykazały silną zależność pomiędzy długością podróży a udziałem podróży pieszych; dodatkowo zaobserwowano pewne różnice w udziale podróży pieszych w motywacji DND (dom-nauka-dom) w porównaniu z pozostałymi motywacjami. W wyniku tego zaproponowano następującą formułę oraz parametry wydziałania podróży pieszych (2):

$$u_p = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } l_{ij} < d_{\min} \\ a \cdot e^{-c \cdot l_{ij}}, & \text{jeżeli } d_{\min} \leq l_{ij} \leq d_{\max} \\ 0, & \text{jeżeli } d_{\max} < l_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

$l_{ij}$  – odległość pomiędzy rejonami źródłowym  $i$  oraz docelowym  $j$  mierzona po sieci [km];

$a, c$  – parametry funkcji udziału podróży pieszych [-];

$d_{\min}$  – graniczna odległość, poniżej której 100% podróży odbywa się pieszo [km];

$d_{\max}$  – graniczna odległość, powyżej której 0% podróży odbywa się pieszo [km].

Tabela 4

Parametry funkcji wydziałania podróży pieszych w podrózach wewnętrznych Kielce				
Motywacja podróży	Parametry funkcji wydziałania podróży pieszych			
	D <sub>min</sub>	D <sub>max</sub>	a	c
pozostałe	0,5	3,8	1,29457	0,597329
DND (dom-nauka-dom)	0,5	3,2	1,25000	0,433765

źródło: opracowanie własne na podst. KBR Kielce z 2015 r. [8]

W drugim kroku podziału zadań przewozowych pozostała macierz podróży pieszych, czyli tzw. podróży zmotoryzowanych, rozdzielana jest na macierze podróży wykonywanych transportem indywidualnych oraz transportem zbiorowym. Wykorzystuje się tutaj następującą funkcję wydziałania zadań przewozowych sparametryzowaną o wartości uzyskane w badaniach KBR (3)

$$u_{ij}^{KI} = a \cdot e^{c \cdot \frac{t_{ij}^{KI}}{t_{ij}^{KZ}}} \quad (3)$$

gdzie:

$u_{ij}^{KI}$  – udział podróży wykonywanych transportem indywidualnym (tj. samochodem) w relacji podróży z rejonu źródłowego  $i$  do docelowego  $j$  [-];

$a, c$  – parametry funkcji podziału zadań przewozowych [-];

$t_{ij}^{KI}, t_{ij}^{KZ}$  – czas podróży w obciążonym modelu sieci VISUM odpowiednio: transportem indywidualnym (KI – macierz  $TTC$ ) oraz transportem zbiorowym (KZ – macierz  $JRT$ ) z rejonu źródłowego  $i$  do docelowego  $j$  [min].

Tabela 5

Parametry funkcji wydziałania podziału zadań przewozowych w modelu transportowym Kielce i KOF			
Zasięg podróży	Motywacja podróży	Parametry funkcji podziału zadań przewozowych	
		a	c
podróże wewnętrzne (Kielce – Kielce)	pozostałe	0,85	-0,255
podróże źródłowo-docelowe (Kielce – KOF)	wszystkie	0,80	-0,125

źródło: opracowanie własne na podst. KBR Kielce z 2015 r. [8]

Wydzielenie zadań przewozowych z podróży zmotoryzowanych przebiega w sposób iteracyjny, tj. po uzyskaniu macierzy ruchu i obciążeniu sieci ponownie wyliczane są macierze czasów przejazdu  $TTC$  i  $JRT$ , na podstawie których szacowany jest znowu podział podróży zmotoryzowanych. Procedura ta jest powtarzana 5-krotnie aż do uzyska-

nia stabilnego rozkładu liczby podróży pomiędzy macierze transportu indywidualnego oraz zbiorowego – wówczas sumaryczny podział podróży miejskich na środki transportu indywidualnego i zbiorowego w modelu symulacyjnym (udział KI: 62%) jest w przybliżeniu równy wartości empirycznemu uzyskanym w KBR (udział KI: 63%).

Udział podróży komunikacją indywidualną (zbiorową) jest obliczany jako funkcja ilorazu czasów podróży poszczególnymi systemami transportu w danej relacji podróży *ij*. Wyjątek stanowi tutaj motywacja podróży miejskich związanych z nauką (DND), jako że wśród uczniów i studentów nie znaleziono istotnego wpływu czasu podróży na wybór danego środka transportu – stąd też zdecydowano się na zastosowanie stałego podziału zadań przewozowych (udział KI w podróży w motywacji DND: 28% wśród uczniów oraz 20% wśród studentów). Jest to zależność, którą można obserwować w wynikach badań ruchu w innych miastach Polski (np. Warszawskim Badaniu Ruchu z 2015 roku [7]). Analogicznie obserwuje się, że dla podróży źródłowo-docelowych podział zadań przewozowych jest mniej wrażliwy na różnice w czasach podróży, stąd też dla podróży w relacji Kielce–KOF skalibrowano odrębne parametry tejże funkcji.

Ostatni etap modelu czterostadiowego obejmuje modelowanie rozkładu ruchu w sieci. W tym etapie wyniki obliczeń modelu popytu, tj. macierze podróży w systemach transportu indywidualnego (liczba pojazdów/godz. szczytu) oraz transportu zbiorowego (liczba pasażerów/godz. szczytu), są rozkładane w modelu sieci transportowej z wykorzystaniem algorytmów symulacyjnych modelujących wybory i rozkłady tras podróży. Dla transportu indywidualnego zastosowano standardową procedurę tzw. *equilibrium assignment*, w której ostateczny rozkład potoków wszystkich pojazdów w sieci (osobowych, dostawczych, ciężarowych) uzyskiwany jest po 100 krokach iteracyjnych. Wówczas sieć osiąga względny stan równowagi, tzw. *user equilibrium* [16], w którym sumaryczna wartość kosztów (czasów) podróży w sieci osiągnęła globalne minimum i niemożliwa jest już dalsza zmiana trasy przejazdu bez pogorszenia kosztów (czasów) przejazdu dla innych użytkowników. Dla transportu zbiorowego zastosowano procedurę rozkładu podróży bazującą na zakodowanych rozkładach jazdy, tzw. *timetable-based assignment*, w której potoki pasażerskie są rozkładane metodą wielościeżkową [17] na dostępne alternatywy (trasy) podróży w sieci.

Oprócz opisanego powyżej modelu pasażerskiego, w ramach modelu transportowego Kielc i KOF, opracowano również model ruchu towarowego. Macierze ruchu towarowego zostały oszacowane na podstawie wniosków z pracy badawczej [13], a generacja ruchu ciężarowego opisana za pomocą formuł regresji liniowej – gdzie liczba podróży ciężarowych jest szacowana analogicznie jak w modelu pasażerskim, czyli w odniesieniu do zmiennych objaśniających w danym rejonie komunikacyjnym. Szczegółową parametryzację modelu generacji ruchu ciężarowego przedstawiono w tabelach 6 i 7. Następnie obliczone potencjały ruchotwórcze zostały przeliczone na macierze ruchu ciężarowego

wg 3 kategorii pojazdów – samochodów dostawczych (SD), ciężarowych (SC) oraz ciężarowych z przyczepą (SCP) – z wykorzystaniem modelu grawitacyjnego rozkładu podróży. Z macierzy ruchu dobowego wyliczono macierze ruchu ciężarowego odpowiadające godzinie szczytu porannego, które ostatecznie są rozkładane w sieci drogowej – wg tej samej procedury *equilibrium assignment* jak macierze ruchu samochodowego (SO) w modelu pasażerskim.

Tabela 6

Wzory na generację ruchu towarowego w modelu transportowym Kielc i KOF				
Typ pojazdu	Formuły generacji ruchu ciężarowego – potencjały dobowe		Kierunek równoważenia	
	Produkcja	Atrakcja		
SD	$a*[P\_ZBIORNIKI\_I\_MAGAZYNY] + b*[P\_PRZEMYSLOWE] + c*[P\_HANDLOWO\_USLUGOWE]$		Produkcja	
SC			[REGON]	Produkcja
SCP			[REGON]	Produkcja
oznaczenia skrótów: • [REGON] – liczba podmiotów zarejestrowanych w systemie REGON ogółem w rejonie komunikacyjnym • [P_ZBIORNIKI_I_MAGAZYNY] – suma powierzchni użytkowej dla zbiorników, silosów i budynków magazynowych (zgodnie z BDOT) • [P_PRZEMYSLOWE] – suma powierzchni użytkowej budynków o przeznaczeniu przemysłowym • [P_HANDLOWO_USLUGOWE] – suma powierzchni użytkowej o przeznaczeniu handlowo-usługowym				

Źródło: opracowanie własne na podst. [13], [15]

Tabela 7

Wyjściowe parametry generacji ruchu towarowego w modelu transportowym Kielc i KOF			
Typ pojazdu	Parametry modelu		
	a	b	c
SD	0,0026	0,0007	0,0019
SC	0,0019	0,0004	0,0012
SCP	0,0022	0,0009	0,0004

Źródło: opracowanie własne na podst. [13], [15]

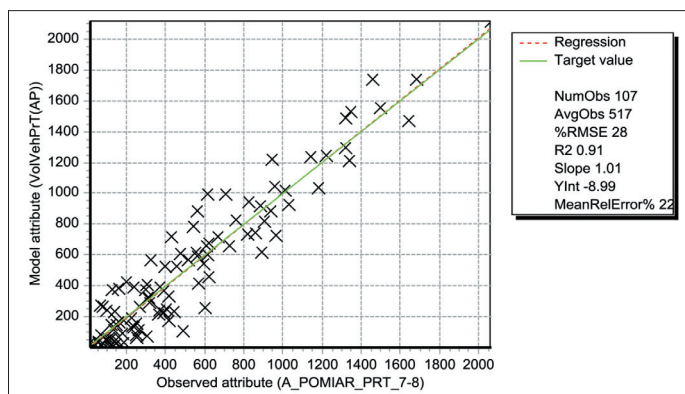
## Wyniki prac – model stanu istniejącego systemu transportowego Kielc i KOF

Po opracowaniu modelu podróży i modelu sieci, a także uzyskaniu pierwszych wyników rozkładu ruchu na sieć, model systemu transportowego Kielc i KOF został poddany pracom kalibracyjnym. Kryterium kalibracji było uzyskanie możliwie wysokiej zgodności pomiędzy modelowanymi (symulowanymi) a pomierzonymi (rzeczywistymi) wartościami natężenia ruchu drogowego i pasażerskiego.

W zakresie transportu indywidualnego model był kalibrowany w odniesieniu do następujących danych pomiarowych z lat 2015–2016:

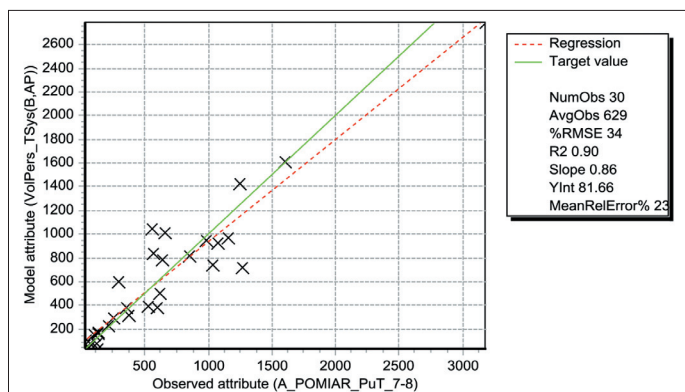
- kordon śródmieścia – pomiary ruchu wykonane w ramach KBR 2015 r. [8],
- kordon na granicy miasta – dane z pętli indukcyjnych pozyskane od MZD Kielce,
- obszar miasta – punkty pomiarowe na ważniejszych drogach i skrzyżowaniach na podstawie danych z pętli indukcyjnych MZD Kielce,
- obszar KOF – punkty pomiarowe na drogach krajowych i wojewódzkich na podstawie danych z GPR 2015 [14].

Model był również kalibrowany pod kątem potoków pasażerskich w miejskim transporcie zbiorowym. W kalibracji wykorzystano punkty objęte pomiarem potoków pasażerskich w liniach autobusowych ZTM Kielce, wykonanych w ramach KBR 2015 – zlokalizowane głównie wzdłuż kordonu śródmieścia oraz na wybranych (istotnych) punktach w szerszym obszarze miasta.



Rys. 2. Wyniki kalibracji modelu stanu istniejącego – wykres korelacji pomiędzy modelowanym (oś pionowa) a rzeczywistym (oś pozioma) natężeniem ruchu [poj./godz.] w punktach pomiarowych sieci transportu indywidualnego

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Wyniki kalibracji modelu stanu istniejącego – wykres korelacji pomiędzy modelowanym (oś pionowa) a rzeczywistym (oś pozioma) natężeniem ruchu [pas./godz.] w punktach pomiarowych sieci transportu zbiorowego

Źródło: opracowanie własne

Kalibrację przeprowadzono dla bazy pomiarowej, która obejmowała 107 punktów pomiaru w sieci transportu indywidualnego oraz 30 punktów pomiarowych w sieci transportu zbiorowego. W procesie kalibracji uzyskano współczynnik determinacji  $R^2$  równy 0,91 dla punktów pomiarowych w transporcie indywidualnym oraz 0,90 dla punktów pomiarowych w transporcie zbiorowym – co można uznać za wartość satysfakcjonującą, świadczącą o wysokim dopasowaniu modelowych potoków ruchu z wartościami rzeczywistymi.

W wyniku kalibracji uzyskano usprawniony model symulacyjny, który stanowi bardziej wiarygodne odwzorowanie typowego obrazu systemu transportowego Kielc i KOF w stanie istniejącym na rok 2016, zweryfikowane o wyniki pomiarów terenowych. Model symulacyjny został opracowany dla godziny szczytu porannego w typowym dniu roboczym, którą na podstawie wyników pomiarów i KBR

wyznaczono w przedziale godz. 7:00–8:00. W tabeli 8 przedstawiono zestawienie najważniejszych parametrów wynikowych modelowanej sieci transportu, tj. parametrów pracy eksploatacyjnej i pracy przewozowej. Wynikowy podział zadań przewozowych wskazuje na przewagę komunikacji indywidualnej w podróżach wykonywanych na co dzień w obszarze analizy, gdzie udział KI wynosi odpowiednio blisko 62%. Co ciekawe, ocena prędkości średniej pojazdów w sieci drogowej pokazuje, że wartość uzyskana w modelu VISUM na obszarze Kielc – około 37 km/h – jest zbliżona z wynikami analiz empirycznych dla szczytu porannego [19] – około 38 km/h.

Tabela 8

Wyniki symulacji – parametry zbiorcze modelu systemu transportowego w granicach m. Kielce									
Horyzont czasowy	Obszar analizy	Transport indywidualny (PrT)				Transport zbiorowy (PuT)			
		liczba podróży	[poj.-km]	[poj.-godz.]	Vśr [km/h]	liczba podróży	[pas.-km]	[pas.-godz.]	Vśr <sup>3</sup> [km/h]
2016	Kielce	16 864	135 908	3 752	36,2	10 145	144 915	4 884	29,7
2025	Kielce	15 252	134 760	3 416	39,5	9 342	146 769	4 859	30,2
2035	Kielce	13 956	134 494	3 211	41,9	8 247	147 131	4 777	30,8

Źródło: opracowanie własne

### Opracowanie modeli prognostycznych systemu transportowego Kielc i KOF

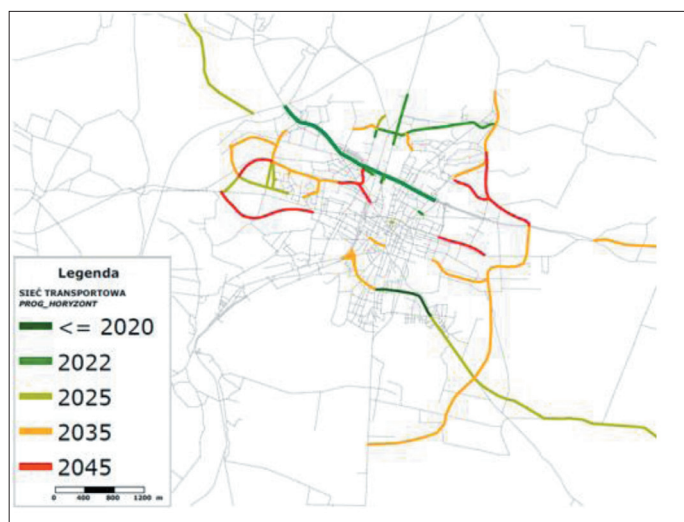
Oprócz modelu stanu istniejącego opracowano także modele prognostyczne systemu transportowego Kielc i KOF, które mają za zadanie odwzorować stan systemu w przyszłości w wyniku przewidywanych zmian po stronie modelu popytu oraz modelu sieci. Modele prognostyczne opracowano dla horyzontów czasowych roku 2025 oraz 2035, a najważniejsze założenia do prognoz opisano poniżej.

W przygotowaniu prognostycznych modeli popytu uwzględniono oddzielne założenia związane z macierzami ruchu wewnętrznego i docelowo-źródłowego, tj. podróży na terenie Kielc i w relacjach Kielce–KOF, oraz z macierzami ruchu zewnętrznego, tj. podróży tranzytowych. Pierwszym krokiem było opracowanie prognoz demograficznych na lata 2025 i 2035. Punktem wyjścia są prognozy GUS, z których pozyskano przewidywaną liczbę ludności miasta Kielce z podziałem na grupy wiekowe w horyzontach prognostycznych [9]: w ujęciu sumarycznym wskazują one, że liczba mieszkańców Kielc, wynosząca 198 046 osób w 2015 roku, będzie powoli maleć i w 2035 roku wynosić już będzie 168 225 osób. Związane jest to przede wszystkim z dalszym postępowaniem zjawiska suburbanizacji: jak prognozuje GUS, liczba mieszkańców powiatu kieleckiego (czyli obejmujące prawie wszystkie gminy ościenne KOF) wzrośnie w tym samym okresie z 208 974 (2015) do 216 241 osób (2035).

Oprócz zmian sumarycznej liczby ludności w prognozach wzięto pod uwagę także zmiany w wielkości zmiennych objaśniających poszczególnych rejonów Kielc, wynikające z prognozowanych zmian funkcjonalno-przestrzennych oraz

<sup>3</sup> Wysokie prędkości handlowe dla transportu zbiorowego wynikają m.in. z uwzględnienia przejazdów pociągami i autobusami dalekobieżnymi

migracji ludności w kierunku obszarów śródmiejskich. Uwzględniono przyrost liczby mieszkańców na obszarze nowych dzielnic mieszkaniowych (np. Ślichowice III, Niewachłów, Dąbrowa II) oraz pewien spadek ludności w obszarze śródmiejskim Kielc. Dla podróży wewnętrznych Kielc w prognozach przyjęto, że wskaźnik ruchliwości będzie minimalnie wzrastał, do 2,18 podróży/mieszkańca/dobę w 2025 roku oraz do 2,24 podróży/mieszkańca/dobę w 2035 – przy czym warto zwrócić uwagę, że zakładany wzrost ruchliwości dotyczy głównie podróży nieobligatoryjnych (motywacje DID oraz NZD). Dla podróży w relacji Kielce–KOF założenie wcześniej już wspomnianych kwestii prognoz demograficznych oznacza, że wynikowa liczba podróży w modelu 2025 roku wzrośnie o 3,6% względem roku 2015, a w modelu 2035 roku wzrośnie o 6,5% względem roku 2015.



Rys. 4. Wizualizacja inwestycji prognostycznych  
Źródło: opracowanie własne

W zakresie zmiennych prognostycznych modelu sieci zakodowano inwestycje drogowe przewidziane do realizacji w najbliższych latach oraz zmiany w systemie transportowym, jakie wynikają z obowiązujących dokumentów planistycznych miasta (m.in. SUiKZP) – które w przeważającej większości dotyczą dalszego rozwoju infrastruktury drogowej. Najistotniejszą zmianą w sieci drogowej będzie budowa drogi ekspresowej S74 (Piotrków Trybunalski – Kielce – Nisko) wraz z węzłami wielopoziomowymi i jezdniami zbiorczymi, która zostanie zrealizowana na odcinku od węzła Kielce-Zachód (powiązanie z drogą ekspresową S7) do węzła Kielce-Bocianek, tj. wzdłuż istniejącego przejścia drogi krajowej nr 74 przez m. Kielce – planowane oddanie do użytku w roku 2022. Wśród ważniejszych zmian w układzie drogowo-ulicznym Kielc i KOF planowane są m.in. następujące inwestycje:

- oddanie do użytku dalszych odcinków drogi ekspresowej S7 w kierunku północnym (Warszawa) oraz południowym (Kraków) na terenie woj. świętokrzyskiego – do roku 2022; a także kolejnych odcinków drogi ekspresowej S74 w kierunku zachodnim (Piotrków Trybunalski) i wschodnim (Nisko) – do roku 2027;

- budowa obwodnicy wschodniej Kielc w klasie jednojezdniowej drogi klasy GP – do roku 2030;
- dokończenie budowy południowego odcinka obwodnicy śródmieścia Kielc (odcinek Tarnowska – Husarska – Krakowska – proj. węzeł Pakosz);
- rozbudowa układu dróg zbiorczych i lokalnych w zachodnim obszarze Kielc: Trasa Nowogrunwaldzka, ulica Nowopiekoszowska, poszerzenie i przedłużenie ulicy Szajnowicza-Iwanowa;
- budowa dwujezdniowej północnej obwodnicy Ślichowic, a także rozbudowa korytarza ulicy Nowomalików w przekroju 2x2;
- budowa ulicy Pileckiego jako docelowego przełożenia DW 764 (odcinek Tarnowska – Wojska-Polskiego);
- uzupełnienie układu drogowego w obszarze północnym: połączenie ulic Witosa z Klonową, modernizacja ulic Zagnańskiej i Warszawskiej do granic miasta.

W wyniku powyższych prac otrzymano modele symulacyjne prognozujące stan systemu transportowego Kielc i KOF w horyzoncie czasowym 2025 oraz 2035 roku. Modele prognostyczne pozwalają na ocenę zmian, jakie zajądą w funkcjonowaniu układu transportu w wyniku planowanych działań i zamierzeń inwestycyjnych.

## Podsumowanie

W niniejszym artykule opisano metodykę i proces tworzenia modelu makrosymulacyjnego dla systemu transportowego miasta Kielce oraz Kieleckiego Obszaru Funkcjonalnego (KOF). W budowie modelu symulacyjnego wykorzystano szeroką bazę danych wejściowych, niezbędną dla lepszego odwzorowania charakterystyk związanych z podróżami wykonywanymi na terenie miasta Kielce, w relacjach aglomeracyjnych w obszarze KOF, a także podróży do/z obszarów zewnętrznych. Przykładowo, w ramach czterostadiowego modelu popytu baza danych z KBR wykorzystana do opracowania modelu ruchu wewnętrznego została rozszerzona o dane GUS dot. dojazdów do pracy, które stanowiły podstawę dla modelu podróży źródłowo-docelowych. Dzięki temu możliwe było opracowanie modelu o zwiększonej dokładności i odwzorowującego w większym stopniu specyfikę funkcjonowania systemu transportowego Kielc i KOF. W toku prac otrzymano skalibrowany model symulacyjny dla stanu istniejącego 2015 roku o wysokim stopniu zgodności z obserwowanymi potokami podróży: współczynniki determinacji kształtują się na poziomie około  $R^2 = 0,90$ , a w ponad 85% punktów pomiarowych rozbieżność pomiędzy modelowanymi i rzeczywistymi potokami podróży nie przekracza 20%.

Tak opracowany model symulacyjny stanowi wydajne i przydatne narzędzie analityczne, które pozwala nie tylko odpowiedzieć na pytanie, jakie mogą być zmiany obecnie w funkcjonowaniu systemu transportowego Kielc i KOF. Dzięki uwzględnieniu szeregu czynników prognostycznych, model symulacyjny może także wskazać, jaki będzie potencjalnie przyszły obraz systemu transportowego w wyniku postulowanych działań i zamierzeń inwestycyjnych. Wyniki



zaprezentowanych powyżej analiz prognostycznych wskazują na ważne trendy, jakie z dużym prawdopodobieństwem będą się ujawniać w funkcjonowaniu systemu transportowego Kielc i KOF – a wskutek tego wskazują, jakie powinny być kierunki podejmowanych przyszłych działań strategicznych. Jednym z istotnych wyzwań może być przeciwdziałanie zjawiskom suburbanizacji i odpływu ludności z obszarów miejskich Kielc – analiza wpływu tych zjawisk w kontekście transportowym sugeruje, że będzie to skutkowało zwiększoną presją na system transportu drogowego, wydłużeniem odległości i czasów przejazdu, a w konsekwencji – wzrostem uciążliwości (emisji hałasu, zanieczyszczeń itd.) związanych z ruchem drogowym. Wyniki symulacji ukazują skalę tego zjawiska – w perspektywie do roku 2035 średnia odległość podróży wykonywanych na terenie miasta wzrośnie o około 22%. Co więcej, widoczne pozytywne zmiany w średniej prędkości podróży w sieci nie znajdują potwierdzenia w wynikowych średnich czasach podróży, zarówno w transporcie indywidualnym (gdzie średni czas podróży wzrasta o około 3%), jak i w transporcie zbiorowym (wzrost o około 20%). Widać zatem, że podejmowane działania inwestycyjne mogą niekoniecznie stanowić właściwy sposób poprawy efektywności systemu transportowego miasta w obliczu prognozowanego nasilenia się efektów zjawiska suburbanizacji w Kielcach.

Co więcej, zamierzenia inwestycyjne w zakresie układu transportowego koncentrują się przede wszystkim na rozbudowie układu drogowego, co wobec braku działań po stronie transportu zbiorowego będzie jeszcze bardziej zwiększać rolę samochodu osobowego w codziennych podróżach na terenie Kielc. Znajduje to potwierdzenie w wynikach symulacji do roku 2035, gdzie wyraźnie wzrasta atrakcyjność podróżowania transportem indywidualnym (np. wzrost prędkości średniej o około 6 km/h) kosztem transportu zbiorowego (prędkość średnia wzrasta o około 1 km/h – ale należy jednocześnie zwrócić uwagę na wcześniej wspomniane pogorszenie średniego czasu podróży aż o 20%). W dłuższej perspektywie wskazuje to na ryzyko spadku efektywności miejskiego transportu zbiorowego, zgodnie z tzw. paradoksem Downs'a-Thomson'a [20], [21], który był już obserwowany w wielu miastach na świecie – gdzie na zasadzie „błędnej spirali” pogorszeniu ulega jakość zarówno systemu transportu zbiorowego (spadek oferty przewozowej), jak i transportu indywidualnego (wzrost kongestii drogowej). Konieczne jest zatem podjęcie działań zmierzających w kierunku rozwoju systemu transportowego Kielc i KOF w sposób efektywny i zrównoważony – a w tym świetle narzędzia analityczne, w tym modele symulacyjne, mogą mieć bardzo cenny i pozytywny wkład jako narzędzia efektywnie wspomagające procesy decyzyjne i planowanie strategiczne.

## Literatura

1. Niebieskie Księgi dla projektów w sektorze transportu publicznego, infrastruktury drogowej oraz kolejowej, JASPERS, 2016.
2. Cascetta E., *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*, Springer Science and Business Media, Vol. 49, 2013.
3. Hensher D., Button K., *Handbook of Transport Modelling*, Emerald Group Publishing Limited, 2007.
4. Szarata A., *Kalibracja i możliwości weryfikacji wyników Kompleksowych Badań Ruchu narzędziami symulacyjnymi*, „Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, Seria: Materiały Konferencyjne”, nr 93, z. 152, 2014.
5. Bauer M., *Standaryzacja subiektywnych badań jakości funkcjonowania transportu zbiorowego w ramach kompleksowych badań ruchu*, „Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, Seria: Materiały Konferencyjne”, nr 93, z. 152, 2014.
6. Szarata A. wraz z zespołem, *Plan mobilności dla miasta Kielce i Kieleckiego Obszaru Funkcjonalnego*, Politechnika Krakowska, Kraków, 2016.
7. Pyzik M., *Budowa modelu transportowego Kieleckiego Obszaru Funkcjonalnego i jego wykorzystanie do analizy symulacyjnej wprowadzenia kolei miejskiej w Kielcach*, Praca magisterska, Politechnika Krakowska, Kraków 2017.
8. Kompleksowe Badanie Ruchu Kielce 2015, Rubika Consulting, Gdańsk 2015.
9. Prognoza ludności na lata 2014–2050. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2014.
10. VISUM 17 – User Manual. Karlsruhe, PTV AG, 2017.
11. Kucharski R., Drabicki A., *Estimating Macroscopic Volume Delay Functions with the Traffic Density Derived from Measured Speeds and Flows*, „Journal of Advanced Transportation”, 2017.
12. Narodowy Spis Powszechny 2011 – Raport: Dojazdy do pracy. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2014.
13. Kulpa T., *Modelowanie potencjałów ruchotwórczych w drogowych przewozach ładunków w skali regionu*, rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2013.
14. Generalny Pomiar Ruchu 2015 na drogach krajowych i wojewódzkich, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2016.
15. Kostecka A. z zespołem, *Warszawskie Badanie Ruchu 2015 r. wraz z opracowaniem modelu ruchu – Raport*. Warszawa 2015
16. Wardrop J., *Some theoretical aspects of road traffic research*, Institute of Civil Engineers Proceedings, Londyn 1952.
17. Friedrich M., Hofsäß I., Wekeck S., *Timetable-based transit assignment using branch and bound techniques*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1752), 100-107, Washington DC 2001.
18. Kompleksowe Badanie Ruchu Kielce 2015 – raport z badań, Rubika Consulting, Gdańsk 2015.
19. Kielce – miasto bez korków. Korkowo.pl, Dostęp z dn. 13 kwietnia 2018 r.: <http://korkowo.pl/informacja-prasowa/kielce-miasto-bez-korkow-574>.
20. Downs A., *The law of peak-hour expressway congestion*, Traffic Quarterly, 16(3), 1962.
21. Thomson J., *Great cities and their traffic*, (Vol. 3), London 1977.
22. Baza danych obiektów topograficznych BDOT 10k, Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej, Warszawa 2012.
23. Gaca S., Tracz M. Suchorzewski W., *Inżynieria Ruchu Drogowego, Teoria i praktyka*, Warszawa 2008.