

PROBLEMY MODELOWANIA LICZBY PODRÓŻY GENEROWANYCH I ABSORBOWANYCH NA PRZYKŁADZIE GDAŃSKA¹

Aleksandra Romanowska

mgr inż., Katedra Inżynierii Drogowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, 80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12

Kazimierz Jamroz

dr hab. inż., Katedra Inżynierii Drogowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, 80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12, tel. +48 58 347 1147, e-mail: kjamroz@pg.gda.pl

Tomasz Budziszewski

mgr, Biuro Rozwoju Gdańska, 80-855 Gdańsk, Wały Piastowskie 24, e-mail: tomaszbudziszewski@o2.pl

Streszczenie. *Jedną z podstawowych danych niezbędnych do planowania elementów systemu transportowego jest informacja o liczbie podróży odbywanych na analizowanym obszarze. Dane te uzyskiwane są najczęściej za pomocą symulacyjnych modeli transportowych. Jednym z istotnych elementów i pierwszym etapem najczęściej stosowanego, klasycznego modelu czterostopniowego jest modelowanie liczby podróży generowanych i absorbowanych, podczas którego to etapu uzależnia się liczbę podróży mieszkańców od charakterystyk demograficznych, społeczno-ekonomicznych, obszarowych, transportowych analizowanego obszaru. W klasycznym podejściu do modelowania liczby podróży generowanych i absorbowanych w rejonach transportowych buduje się modele regresyjne dla poszczególnych motywacji podróży w oparciu o podstawowe zmienne, tj. liczbę mieszkańców, liczbę miejsc pracy oraz liczbę miejsc w szkołach. Celem artykułu jest przedstawienie podejścia do modelowania liczby podróży generowanych i absorbowanych zastosowanego przy budowie Transportowego modelu symulacyjnego dla miasta Gdańska. W zastosowanych modelach uwzględniono wpływ dodatkowych zmiennych demograficznych, społeczno-ekonomicznych oraz zmiennych charakteryzujących rejon transportowy, pozwalających na uwzględnienie różnic w zagospodarowaniu przestrzennym tych rejonów.*

Słowa kluczowe: *model transportowy miasta, model czterostopniowy, generacja podróży, modelowanie podróży generowanych i absorbowanych*

1. Wprowadzenie

Modelowanie generacji i absorpcji podróży (pierwszy etap modelu czterostopniowego) umożliwia matematyczne określenie związku pomiędzy liczbą podróży generowanych i absorbowanych w analizowanym obszarze, a jego zagospodarowaniem przestrzennym czy charakterystykami demograficznymi i społeczno-ekonomicznymi zamieszkujących go mieszkańców. Wyniki modelowania pozwalają na

¹ Wkład autorów w publikację: Romanowska A. 60%, Jamroz K. 20%, Budziszewski T. 20%

zdefiniowanie wielkości zapotrzebowania na podróże w ciągu doby w całym systemie transportowym analizowanego obszaru, na odpowiednim poziomie agregacji danych (np. rejonów transportowych lub gospodarstw domowych), dla różnych celów podróży (motywacji), które to informacje następnie wykorzystuje się do prognozowania popytu na podróże.

W roku 2011 przystąpiono w Gdańsku do budowy nowego Transportowego modelu symulacyjnego dla miasta Gdańska [1]. W modelu tym zastosowano także klasyczne czterostopniowe podejście. Jednym z etapów budowy tego modelu był problem modelowania liczby podróży generowanych i absorbowanych w poszczególnych rejonach transportowych. Korzystając z wyników badań kompleksowych przeprowadzonych w Gdańsku w roku 2009 [2] zostały opracowane matematyczne modele prognostyczne pozwalające na oszacowanie liczby podróży wjazdowych i wyjazdowych z poszczególnych obszarów (rejonów transportowych) w oparciu o dane demograficzne, społeczno-ekonomiczne, itp. W artykule przedstawiono informacje teoretyczne dotyczące modelowania podróży generowanych i absorbowanych oraz proponowane dla Gdańska podejście do modelowania, w oparciu o dostępne dane i przeprowadzone analizy. W końcowej części porównano także wyniki szacowania liczby podróży generowanych i absorbowanych za pomocą modeli zastosowanych w Gdańsku i prostych modeli opartych na czterech podstawowych zmiennych [3].

2. Stan zagadnienia

Każdą podróż wykonywaną przez mieszkańców miasta definiuje się poprzez jej początek i koniec lub odpowiednio źródło i cel podróży - podróż jest produkowana z jednego jej końca (źródła), a następnie jest przyciągana przez określony rejon, gdzie znajduje się jej drugi koniec - cel podróży [4] (rys. 1). Podróże wychodzące z danego rejonu transportowego nazywa się podróżami generowanymi lub produkowanymi przez rejon, podróże wchodzące natomiast podróżami absorbowanymi lub przyciąganymi przez rejon transportowy (odpowiednio generacją i absorbcją lub produkcją i atrakcją).

Z matematycznego punktu widzenia proces modelowania liczby podróży wewnętrznych polega na tym, że tworzy się oddzielne modele (tj. funkcje matematyczne) do szacowania produkcji (liczby podróży generowanych) i atrakcji (liczby podróży absorbowanych) dla każdej motywacji podróży, co ogólnie można zapisać w postaci:

$$LPG_i^p = f^p(X_i) \quad (1)$$

$$LPA_i^p = f^p(X_i) \quad (2)$$

gdzie:

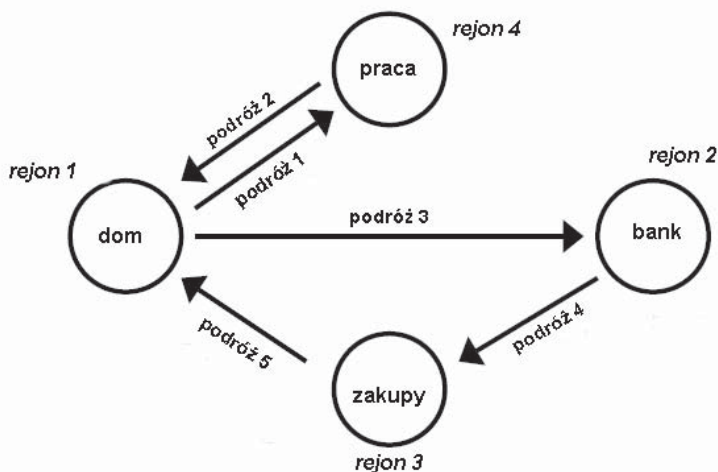
LPG_i^p - liczba podróży generowanych (produkcja) przez rejon i , dla motywacji p ,

LPA_i^p - liczba podróży absorbowanych (atrakcja) przez rejon i , dla motywacji p ,

X_i - zbiór zmiennych opisujących rejon transportowy i ,



- i - numer rejonu transportowego (gdzie: $i=1, 2, 3, \dots, n$),
 p - cel/ motywacja podróży.



Rys. 1. Produkcja i atrakcja rejonów transportowych
 Źródło: [5]

Stworzone modele generowania podróży powinny być tak zbudowane, aby na podstawie dostępnych danych możliwe było uzyskanie wielkości potoków ruchu jak najbliższym danym empirycznym zebranych dla poszczególnych rejonów transportowych. Większą dokładność może dać na przykład podział podróży ze względu na cele (motywacje) podróży czy modelowanie liczby podróży generowanych podróży dla określonej pory dnia. Zawsze jednak zastosowanie wymienionych podziałów zależy od charakterystyki obszaru, pożądanej dokładności wyników czy po prostu dostępności danych.

Spośród najczęściej wymienianych w literaturze, wyróżnia się następujące metody modelowania liczby podróży generowanych i absorbowanych w modelu czterostopniowym:

- metoda analizy regresji,
- metoda analizy kategorii.

Metody regresyjne pozwalają na opisanie w sposób statystyczny zależności występującej pomiędzy liczbą generowanych podróży (zmienna zależna) a zmiennymi charakteryzującymi podróżujących, rejon transportowy, czy sieć transportową (zmiennie niezależne lub zmiennie objaśniające) [6]. W analizie regresji liniowej rozpatruje się zbiór obserwacji y_i (gdzie $i=1,2,\dots,n$) określonej zmiennej y , która jest zależna od szeregu zmiennych x_1, \dots, x_{ki} dla których zostały zaobserwowane wartości y_i . Dla znanych zmiennych niezależnych dla obserwacji i metodą regresji liniowej szacuje się wartości parametrów przy zmiennych niezależnych w równaniu regresji [7]:

$$y_i = a_1 + a_2 * x_{1i} + a_3 * a_{2i} + \dots + a_m * x_{ki} + \varepsilon_i \quad (3)$$

gdzie:

y_i – zbiór obserwacji zmiennej zależnej y (gdzie: $i=1,2,\dots,n$),
 x_{1i}, \dots, x_{ki} – zmienne niezależne, dla których zaobserwowane zostały wartości y_i ,
 a_1, \dots, a_m – parametry modelu szacowane metodą regresji liniowej,
 ε_i – błąd, którego wartość oczekiwana jest równa 0.

Najczęściej wykorzystywaną metodą wyznaczania współczynników modelu jest metoda najmniejszych kwadratów oraz pochodne tej metody. Pierwszym krokiem modelowania jest dobór zmiennych objaśniających na podstawie analizy korelacji występujących pomiędzy zmiennymi modelowanymi (liczbą podróży) a zmiennymi charakteryzującymi rejon transportowe (zmienne demograficzne, społeczno-ekonomiczne, charakterystyka rejonów). Wyniki tej analizy oraz ogólna ocena możliwości występowania tych zmiennych w modelach pozwalają na budowę funkcji matematycznych opisujących dane zależności oraz pozwalających na szacowanie/prognozowanie wartości zmiennych objaśnianych (wielkości podróży). Przedstawione analizy można wykonywać w programach statystycznych, takich jak, np. STATSoft Statistica czy innych.

W przypadku stosowania metody analizy regresji konieczne jest sprawdzenie dopasowania wygenerowanego modelu, które można osiągnąć wykorzystując odpowiednie wskaźniki i statystyki, m.in.:

Współczynnik determinacji R^2 – „informuje, jaka część danego zjawiska jest wyjaśniona przez obserwowane w próbie zmiany w wartościach zmiennych objaśniających” [7]:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{y})^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (4)$$

gdzie:

y_t - wartość obserwowana zmiennej y w chwili t ,
 \hat{y}_t - wartość przewidywana zmiennej y w chwili t (obliczona na podstawie modelu),
 \bar{y} - średnia arytmetyczna obserwowanych wartości zmiennej objaśnianej.

Błąd średniokwadratowy względny – „informuje, jaką część wartości średniej modelowanej zmiennej stanowi średni błąd dopasowania modelu” [7]:

$$BKW = \sqrt{\frac{\sum (y_p - y_o)^2}{n}} * 100 \quad (5)$$

gdzie:

BKW - błąd średniokwadratowy względny [%],



- y_p - wartość pomierzona,
 y_o - wartość obliczona na podstawie modelu,
 Y_t - wartość średnia badanej zmiennej,
 n - liczebność wyników.

Wartości prawdopodobieństwa testowego p przy oszacowanych wartościach współczynników modelu – informują o prawdopodobieństwie popełnienia błędu polegającego na odrzuceniu hipotezy zerowej, kiedy jest ona prawdziwa. Jeżeli wartość p jest mniejsza od przyjętego poziomu istotności (najczęściej wynosi on 0,05), to otrzymany wynik uznawany jest za istotny statystycznie, co oznacza, że wynika on z występowania pewnej prawidłowości i nie jest jedynie skutkiem spłotu przyczyn losowych [8].

Ocena logiczności modelu – wykorzystanie praktyki inżynierskiej do oceny istotności czy prawdziwości związków zachodzących między danymi, oceny możliwości pozyskania danych, itd.

Metoda analizy kategorii (lub inaczej metoda klasyfikacji krzyżowej) polega na szacowaniu liczby generowanych podróży oddzielnie dla jednorodnych wewnętrznie (społeczno-ekonomicznych) grup społecznych – osób lub gospodarstw domowych na modelowanym obszarze. Na podstawie zagregowanych lub niezagregowanych zestawów danych dla każdej klasy społeczno-ekonomicznej otrzymuje się wskaźniki generowania podróży, czyli oszacowaną liczbę podróży wykonywanych przez osobę lub generowanych przez gospodarstwo domowe. Otrzymane wskaźniki mnoży się przez udziały konkretnych kategorii w populacji oraz dodaje do siebie celem otrzymania wyników dla populacji generalnej [9]. Najczęściej wykorzystywanymi oraz zalecanymi w metodzie kategorii zmiennymi są: dochód mieszkańców oraz liczba posiadanych samochodów (mimo silnej korelacji występującej między zmiennymi). W warunkach polskich, gdzie zdobycie danych o dochodach w gospodarstwach domowych jest trudne, stosuje się częściej zmienne dotyczące liczby osób w gospodarstwie domowym oraz liczby posiadanych samochodów.

W metodzie analizy kategorii ze względu na podział każdego rejonu na kilka klas, do szacowania liczby generowanych podróży w każdym rejonie transportowym wykorzystuje się więcej niż jeden średni wskaźnik generowania podróży. Liczba generowanych podróży przez rejon transportowy i będzie obliczana za pomocą wzoru (6).

$$T_i^p = \sum_b N_{bi} \cdot t_b^p \quad (6)$$

gdzie:

- T_i^p - liczba podróży generowanych przez rejon i ,
 N_{bi} - liczba gospodarstw domowych w danej klasie b w rejonie i ,
 t_b^p - wskaźnik ruchliwości dla klasy b ,
 i - numer rejonu transportowego (gdzie: $i=1, 2, 3, \dots, n$),
 p - cel/ motywacja podróży.



Wybór metody modelowania liczby generowanych podróży zależy od poziomu agregacji danych, który ma istotny wpływ na przydatność modelu. W przypadku wyboru rejonu transportowego jako jednostkę zachowania transportowego, model wyjaśnia różnice w wielkości generowanych podróży pomiędzy rejonami, natomiast modele wykorzystujące gospodarstwo domowe jako jednostkę zachowania transportowego objaśniają różnice w zachowaniach transportowych pomiędzy grupami rodzin [9].

Wymienione metody dotyczą modelowania rejonów wewnętrznych (podróży mieszkańców obszaru, których źródła i cele znajdują się w granicach analizowanego obszaru). Podróże zewnętrzne modeluje się z osobna. Najczęściej stosowaną praktyką jest przyjęcie danych empirycznych jako wielkości produkcji i atrakcji oraz przyjęcie odpowiednich wskaźników wzrostu ruchu dla celów prognostycznych.

3. Modelowanie liczby podróży generowanych i absorbowanych w modelu transportowym Gdańska

Podczas tworzenia prognostycznego modelu transportowego dla Miasta Gdańska [3] do opracowania modelu liczby podróży generowanych i absorbowanych, posłużono się metodą analizy regresji. W związku z tym, że w Gdańsku podjęta została już wcześniej próba stworzenia modelu transportowego, w dalszych pracach zastosowano istniejący podział miasta na 161 wewnętrznych rejonów transportowy i 35 rejonów zewnętrznych i dzięki temu w łatwy sposób udało się uzyskać wiele danych demograficznych charakteryzujących rejon i mieszkańców w nich zamieszkujących (w tym cztery podstawowe zmienne wykorzystane do szacowania generacji i absorpcji podróży w poprzednim modelu Gdańska: liczba mieszkańców, liczba miejsc pracy ogółem i w usługach oraz liczba miejsc w szkołach wyższych i średnich). Dane o podróżach dla poszczególnych rejonów wewnętrznych i zewnętrznych uzyskano z Kompleksowych Badań Ruchu wykonanych w Gdańsku w 2009 roku [2]. Przeprowadzone badania zachowań transportowych mieszkańców Gdańska objęły badaniem próbę stanowiącą niespełna 2,6% populacji (badania ankietowe przeprowadzono w ponad 5000 gospodarstwach domowych w Gdańsku). Rozszerzenie próby do populacji dokonane zostało z zastosowaniem wagi analitycznej dopasowującej strukturę próby do struktury populacji ze względu na zamieszkiwaną dzielnicę oraz wiek respondentów [10].

W modelu transportowym dla Miasta Gdańska [3] wykorzystano podział podróży na siedem motywacji: dom – praca, praca – dom, dom – nauka, nauka – dom, dom – inne, inne – dom, nie związane z domem. Wskaźniki ruchliwości osób w podróżach ogółem uzyskane z KBR dla poszczególnych motywacji wyniosły [10]:

- dom-praca: 0,3
- praca-dom: 0,3
- dom-nauka: 0,1
- nauka-dom: 0,1



- dom-inne: 0,4
- inne-dom: 0,4
- nie związane z domem: 0,2 podróży.

Produkcję i atrakcję rejonów transportowych modelowano dla doby, natomiast wartości dla szczytu popołudniowego, wykorzystane w następnych krokach modelowania, uzyskano ze stosunku podróży w godzinie szczytu popołudniowego do podróży w dobie, na podstawie wyników Kompleksowych Badań Ruchu w Gdańsku w 2009 roku [2].

W celu doboru zmiennych objaśniających do modeli wykonana została analiza statystyczna korelacji występujących pomiędzy tymi zmiennymi, a zmiennymi objaśnianymi (liczbą podróży) dla poszczególnych motywacji podróży. Analizowano ok. 20 zmiennych objaśniających, m.in.: powierzchnia rejonu, liczba mieszkańców, liczba i powierzchnia lokali mieszkaniowych, liczba miejsc pracy, liczba miejsc w szkołach, liczba miejsc noclegowych, powierzchnie handlowe i biurowe, liczba miejsc parkingowych przy wielko-powierzchniowych obiektach handlowych, liczba obiektów kulturalnych (muzea, biblioteki, teatry, kina, itp.) w rejonie. Zaobserwowano, że liczba podróży wyjazdowych z domu lub wjazdowych do domu jest silnie powiązana z liczbą mieszkańców, liczbą lokali mieszkaniowych, powierzchnią lokali czy w przypadku podróży związanych z pracą – liczbą zawodowo czynnych. W przypadku podróży wjazdowych do pracy i wyjazdowych z pracy wysokie współczynniki korelacji występowały dla zmiennych liczby miejsc pracy ogółem oraz liczby miejsc pracy w usługach. Analogiczna sytuacja wystąpiła w podróżach związanych z nauką (wysokie współczynniki korelacji dla liczby studentów zamieszkujących rejon transportowy oraz liczby miejsc w szkołach). W przypadku innych podróży, w tym nie związanych z domem, główną zmienną wysoce skorelowaną z liczbą podróży była liczba miejsc pracy w usługach, jednak wysokie zależności zauważono również dla powierzchni wielkopowierzchniowych obiektów handlowych, powierzchni biurowych czy też liczby banków (współczynnik korelacji ok. 0,8!) [1]. Ostatecznie do budowy modeli liczby podróży generowanych i absorbowanych wykorzystano 11 zmiennych niezależnych, część z wcześniej analizowanych zmiennych odrzucono m.in. ze względu na zbyt niskie skorelowanie ze zmienną objaśnianą, w przypadku liczby i powierzchni lokali mieszkaniowych ze względu na lepsze wyniki modelowania dla liczby mieszkańców i/lub liczby zawodowo czynnych czy w przypadku liczby miejsc parkingowych przy wielkopowierzchniowych obiektach handlowych lepsze wyniki modelowania dla powierzchni tych obiektów. Zmienne wykorzystane podczas tworzenia modeli absorpcji i generacji podróży przedstawiono poniżej:

- O - powierzchnia rejonu [km^2],
- LM - liczba mieszkańców [tys.],
- LME - liczba miejsc w szkołach średnich i wyższych [tys.],
- LS - liczba studentów zamieszkałych w rejonie [tys.],
- LZC - liczba zawodowo czynnych [tys.],
- UZC - udział zawodowo czynnych ($UZC=LZC/LM$),
- LPO - liczba miejsc pracy ogółem [tys.],



LPU - liczba miejsc pracy w usługach [tys.],
POWH - powierzchnia handlowa wielkopowierzchniowych obiektów handlowych [tys. m²],
POWB - powierzchnia usługowa biurów [tys. m²],
LB - liczba banków.

Dobór najlepiej dopasowanych do danych rzeczywistych funkcji matematycznych do opisanja liczby podróży generowanych i absorbowanych przez rejony transportowe przeprowadzono na bazie analizy wielu zależności matematycznych. Brano pod uwagę trzy grupy modeli zapisane w postaci ogólnej i czynnikowej. W pierwszym przypadku funkcję matematyczną dobierano bezpośrednio dla liczby podróży (wzór 7). W pozostałych przypadkach dla wskaźnika gęstości demograficznej podróży (wzór 8) i wskaźnika gęstości obszarowej podróży wzór (9).

$$P_i^p = f^p(X_i) \quad (7)$$

$$P_i^p = WPo_i^p * O \quad (8)$$

$$P_i^p = WPo_i^p * O \quad (9)$$

gdzie:

P_i^p - suma podróży wyjazdowych (produkcja) z rejonu transportowego *i*,
X_i - zbiór zmiennych niezależnych opisujących rejon transportowy *i*,
WPd_i^p - wskaźnik gęstości demograficznej liczby podróży (podróży/tys. m²),
WPO_i^p - wskaźnik gęstości obszarowej liczby podróży (podróży/km²),
i - numer rejonu transportowego (gdzie: *i* = 1, 2, 3, ..., *n*),
p - cel/ motywacja podróży.

Najlepsze wyniki uzyskano wskutek zastosowania modeli w postaci ogólnej (wzór 7), stąd też w dalszej analizie odrzucono modele w postaci czynnikowej (wzory 8 i 9).

W tabeli 1 zestawiono modele liczby podróży generowanych i absorbowanych uzyskane w wyniku prowadzonych analiz [1, 2]. Podstawą wyboru modeli były kryteria opisane w punkcie 2. Zestawiono ze sobą proste (modele podstawowe) i rozbudowane (modele alternatywne) modele liczby podróży generowanych (produkcji) i podróży absorbowanych (atrakcji) w każdej z przyjętych motywacji i na podstawie wartości współczynnika determinacji czy wartości błędu analizowano w jaki sposób zastosowanie dodatkowych zmiennych pozwoliło na poprawę dopasowania modeli.



Tab. 1. Modele generacji i absorpcji podróży w Gdańsku

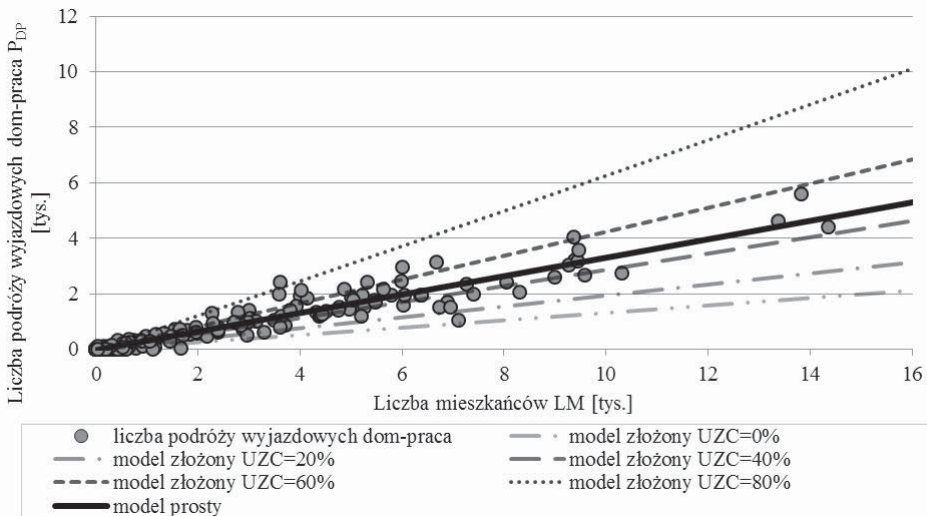
Podróż	Modele podstawowe	R ²	BKW [%]	Modele alternatywne	R ²	BKW [%]
Produkcja dom-praca	$P_{DP_0} = 0,33 * LM - 0,02$	0,90	36	$P_{DP_1} = 0,32 * LM^{1,02}$	0,90	36
				$P_{DP_2} = 0,41 * LM^{0,66} * e^{0,12 * LZC}$	0,93	31
				$P_{DP_3} = 0,12 * LM^{1,02} * e^{1,95 * UZC}$	0,97	21
				$P_{DP_4} = 0,71 * LZC^{0,99}$	0,97	19
Atrakcja dom-praca	$A_{DP_0} = 0,63 * LPO + 0,001$	0,77	71	$A_{DP_1} = 0,6 * LPO^{1,03}$	0,77	71
				$A_{DP_2} = 0,56 * LPO^{0,9} + 0,03 * POWB + 0,09 * LB$	0,82	62
Produkcja pracadom	$P_{PD_0} = 0,56 * LPO + 0,02$	0,76	73	$P_{PD_1} = 0,56 * LPO^{1,01}$	0,76	73
				$P_{PD_2} = 0,52 * LPO^{0,87} + 0,02 * POWB + 0,08 * LB$	0,81	64
Atrakcja pracadom	$A_{PD_0} = 0,3 * LM - 0,03$	0,89	39	$A_{PD_1} = 0,27 * LM^{1,04}$	0,89	39
				$A_{PD_2} = 0,37 * LM^{0,62} * e^{0,13 * LZC}$	0,92	33
				$A_{PD_3} = 0,11 * LM^{1,04} * e^{2,02 * UZC}$	0,96	25
				$A_{PD_4} = 0,63 * LZC^{1,02}$	0,96	23
Produkcja dom-nauka	$P_{DN_0} = 0,11 * LM + 0,01$	0,77	58	$P_{DN_1} = 0,12 * LM^{0,96}$	0,77	58
				$P_{DN_2} = 0,08 * LM^{0,98} + 0,46 * LS$	0,80	54
Atrakcja dom-nauka	$A_{DN_0} = 0,33 * LME + 0,18$	0,76	90	-	-	-
Produkcja naukadom	$P_{ND_0} = 0,29 * LME + 0,17$	0,72	92	-	-	-
Atrakcja naukadom	$A_{ND_0} = 0,1 * LM + 0,01$	0,75	62	$A_{ND_1} = 0,11 * LM^{0,99}$	0,75	62
				$A_{ND_2} = 0,07 * LM^{1,03} + 0,47 * LS$	0,78	57
Produkcja dom-inne	$P_{DI_0} = 0,3 * LM + 0,01$	0,80	53	$P_{DI_1} = 0,36 * LM^{0,91}$	0,81	52
Atrakcja dom-inne	$A_{DI_0} = 0,6 * LPU + 0,2$	0,54	96	$A_{DI_1} = 0,93 * LPU^{0,77}$	0,54	97
				$A_{DI_2} = 0,45 * LPU + 0,05 * POWH + 0,09 * LB$	0,73	76
				$A_{DI_3} = 0,83 * LPU^{0,63} * e^{0,03 * POWH + 0,02 * POWB + 0,04 * LB}$	0,75	71
Produkcja inne-dom	$P_{ID_0} = 0,64 * LPU + 0,23$	0,49	95	$P_{ID_1} = 0,99 * LPU^{0,78}$	0,49	95
				$P_{ID_2} = 0,85 * LPU^{0,58} * e^{0,03 * POWH + 0,04 * POWB + 0,05 * LB}$	0,78	72
Atrakcja inne-dom	$A_{ID_0} = 0,31 * LM + 0,02$	0,81	52	$A_{ID_1} = 0,39 * LM^{0,89}$	0,81	51
Produkcja nie związ. z domem	$P_{NZD_0} = 0,38 * LPU + 0,08$	0,73	72	$P_{NZD_1} = 0,47 * LPU^{0,89} * e^{0,02 * POWH + 0,02 * POWB + 0,01 * LB}$	0,81	61
Atrakcja nie związ. z domem	$A_{NZD_0} = 0,36 * LPU + 0,1$	0,56	98	$A_{NZD_1} = \left(\frac{25,09 * LM + 265,43 * LPU}{1000} \right)^{0,83} * e^{0,05 * LB + 0,03 * POWH + 0,01 * POWB}$	0,83	63

W modelach rozbudowanych poza standardowymi, wykorzystywanymi podczas modelowania liczby podróży generowanych i absorbowanych, za pomocą prostych zależności, zmiennymi (liczba mieszkańców, liczba miejsc w szkołach wyższych i średnich, liczba miejsc pracy ogółem oraz w usługach) wykorzystano dodatkowe zmienne, takie jak: liczba i udział zawodowo czynnych, liczba studentów zamieszkujących w rejonach, liczba banków, powierzchnia handlowa wielkopowierzchniowych obiektów handlowych, powierzchnia usługowa biurowców. Modele te zostały porównane z modelami prostymi wykorzystującymi 4 podstawowe zmienne za pomocą wskaźników determinacji, błędu średniokwadratowego oraz wykresów wartości przewidywanych i obserwowanych. Powyższa tabela i inne wyniki analizy pokazały, że w przypadku modeli związanych z domem, pracą i nauką modele złożone (rozbudowane) poprawiają dopasowania modeli o 3-7%



(R^2 jest większe o 0,03-0,07), ale pozwalają zmniejszyć błąd średniokwadratowy względny o 4-17%. W przypadku modelowania podróży dla motywacji: dom-inne, inne-dom i nie związanych z domem różnica jest już istotna i daje o 20-30 % lepsze dopasowanie analizowanych funkcji do danych rzeczywistych i błąd średniokwadratowy względny niższy o nawet 35% (model atrakcji dla motywacji nie związane z domem).

Dla przykładu przeanalizowano modele (podstawowy i alternatywny) liczby podróży wyjazdowych dla motywacji dom-praca. W standardowym podejściu przedstawionym w tabeli zależność ta modelowana jest z wykorzystaniem liczby mieszkańców jako jedynej zmiennej niezależnej. Analiza wykazała, że uzupełnienie prostego modelu o dodatkową zmienną, jaką jest udział zawodowo czynnych poprawia dopasowanie funkcji, dając R^2 bliskie 1. Różnice w obu funkcjach wyraźnie pokazują wykresy przedstawione na rysunku 2 (wykres liczby podróży w zależności od liczby mieszkańców) – w przypadku modelu prostego rzeczywiste wartości podróży są odwzorowywane przez model tylko za pomocą jednej prostej, w przypadku modelu złożonego, w zależności od udziału zawodowo czynnych w rejonie funkcja dopasowuje się do zmiennych za pomocą wielu krzywych.



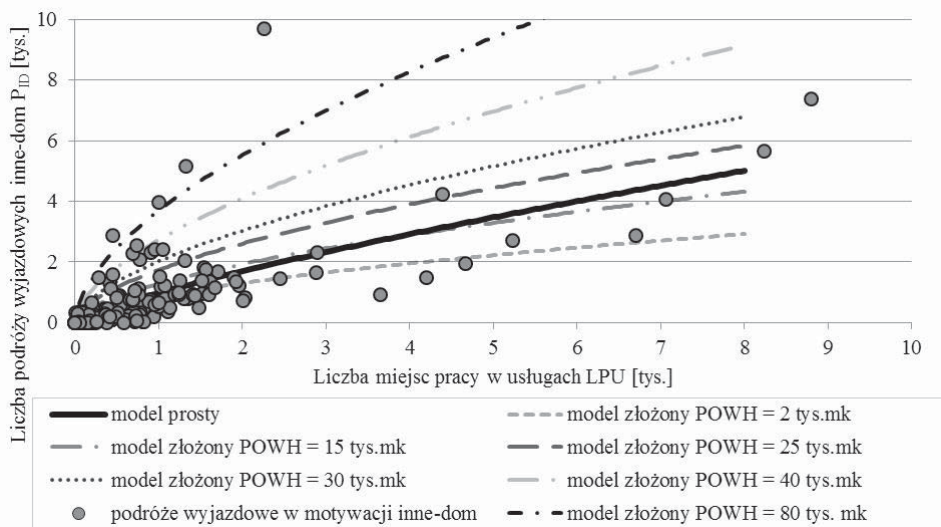
Rys. 2. Porównanie modeli podstawowych i alternatywnych na przykładzie produkcji w motywacji dom-praca - zależność liczby podróży od liczby mieszkańców dla różnych udziałów osób zawodowo czynnych

Źródło: opracowanie własne.

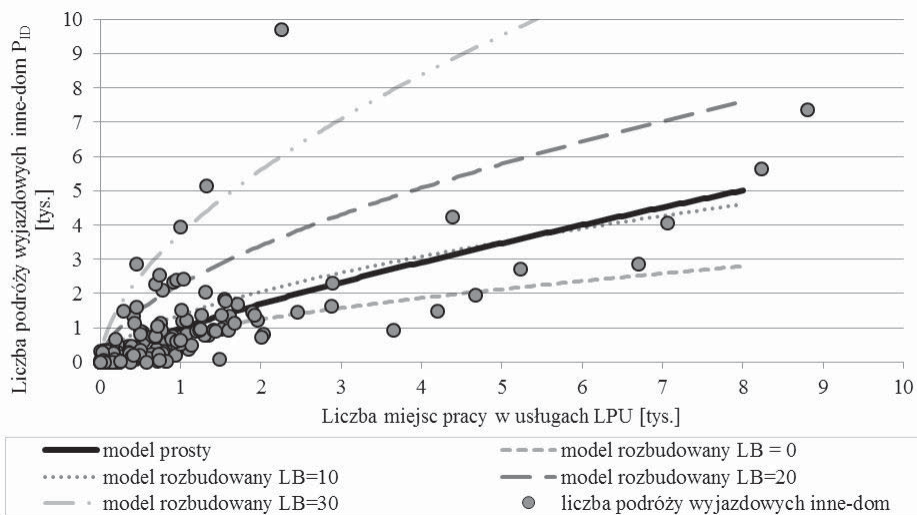
Inny przykład to model liczby podróży wyjazdowych w motywacji inne-dom. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wykresy rozrzutu liczby podróży w zależności od liczby miejsc pracy w usługach oraz wykresy krzywych uzyskanych z modelu podstawowego i rozbudowanego o dodatkowe zmienne, przedstawiające liczby podróży generowanych w zależności od liczby miejsc pracy w usługach i dodatkowo



powierzchni sprzedaży wielkopowierzchniowych obiektów handlowych oraz liczby banków (przy przyjęciu średnich wartości pozostałych zmiennych niezależnych).



Rys. 3. Porównanie modeli podstawowych i alternatywnych na przykładzie produkcji w motywacji inne-dom – zależność liczby podróży od liczby miejsc pracy dla różnych wielkości powierzchni handlowych
 Źródło: opracowanie własne



Rys. 4. Porównanie modeli podstawowych i alternatywnych na przykładzie produkcji w motywacji inne-dom – zależność liczby podróży od liczby miejsc pracy dla różnej liczby banków w
 Źródło: opracowanie własne

Jak pokazały analizy rzeczywistych liczby podróży w poszczególnych motywacjach w dokładniejszy sposób reprezentowane są przez złożone funkcje matema-

tyczne, wykorzystujące więcej niż jedną zmienną niezależną, które jednocześnie lepiej dopasowują się do rzeczywistych wartości zmiennych objaśnianych.

Dla podróży wyjazdowych w motywacji inne-dom przeanalizowano dodatkowo, czy przyjęcie do modelu zmiennej „powierzchnia handlowa wielkopowierzchniowych obiektów handlowych” poprawia dopasowanie modelu w rejonach, gdzie takie obiekty występują. Wyniki analizy pokazały, że wyłącznie dla rejonów, gdzie występują takie powierzchnie w przypadku modelu rozbudowanego otrzymano $R^2=0,70$, natomiast model prosty wyjaśnił tylko 38% przypadków ($R^2=0,38$). Wynika stąd, że w przypadku rejonów, gdzie zlokalizowane są wielkopowierzchniowe obiekty handlowe rozbudowany model daje o ok. 30% lepsze dopasowanie niż model prosty. Podobnie w przypadku zmiennej „liczba banków”. Jest to dość nietypowa zmienna, mimo, że banki nie generują bezpośrednio znaczącej liczby podróży w rejonach transportowych, w zbudowanych modelach zmienna ta pozwoliła na uwzględnienie występowania centrów usługowych w Gdańsku – podczas gdy w większości rejonów transportowych występuje kilka lub żaden bank, to w rejonach centralnych i o charakterze typowo usługowym (Śródmieście, Wrzeszcz) występuje po 20-30 banków. Biorąc pod uwagę niską wartość parametrów przy tej zmiennej w modelach ma ona znaczenie jedynie w rejonach o dużej liczbie banków i w związku z tym pozwala ona uwzględnić atrakcyjność tych rejonów, a co za tym idzie poprawić dopasowanie modeli w przypadku tych obszarów. Prawidłowość tę potwierdza analiza wykonana dla dzielnic Gdańska: Śródmieście i Wrzeszcz. Analizując dla przykładu produkcję w motywacji inne-dom w tych rejonach transportowych w przypadku modelu złożonego uzyskano dopasowanie rzędu 88%, w przypadku zastosowania modelu prostego dopasowanie wynosi 41%.

4. Podsumowanie

Podstawowymi celami budowy modelu symulacyjnego są: prognozowanie wielkości ruchu i przewozów pasażerskich w zależności od kierunków i wielkości zmian zagospodarowania przestrzennego analizowanego obszaru, możliwość oceny i weryfikacji planów rozbudowy sieci transportowej, ocena realizacji założeń polityki transportowej miasta, czy też ocena wpływu zmian w strukturze przestrzennej miasta na warunki ruchu. Realizacja tych celów możliwa jest tylko dzięki stworzeniu kompletnego narzędzia, z uwzględnieniem wszystkich etapów jego budowy, przy czym pierwszym jego istotnym elementem jest stworzenie formuł matematycznych pozwalających na odzwierciedlenie procesu powstawania podróży.

Zastosowane w Gdańsku modele liczby podróży generowanych i absorbowanych pozwalają na szacowanie wielkości podróży w poszczególnych rejonach transportowych Gdańska, a zastosowane w nich zmienne dają możliwość uwzględnienia zarówno sytuacji demograficznej i społeczno-ekonomicznej, jak i występowania funkcji usługowych i handlowych w tych rejonach.



Wykonane analizy oraz uzyskane wyniki modelowania generacji i absorpcji podróży w Gdańsku wskazują, że warto jest skoncentrować się na temacie modelowania generacji i absorpcji podróży i kontynuować badania nad wykorzystaniem w modelach dodatkowych zmiennych m.in. społeczno-ekonomicznych czy przestrzennych charakteryzujących rejony transportowe. W przyszłych badaniach należy uwzględnić także dane z innych miast, aby sprawdzić czy zaproponowane modele można uogólnić dla obszaru całego kraju.

Literatura

- [1] Birr K., Maciasz K., Romanowska A., Zawisza M., *Metodyka budowy prognostycznego modelu transportowego na przykładzie Miasta Gdańska*. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Gdańska. Gdańsk, 2012.
- [2] Biuro Rozwoju Gdańska: *Badania Kompleksowe dla Gdańska*. Gdańsk. 2009.
- [3] Jamroz K., Kustra W., Budziszewski T., Birr K., Maciasz K., Romanowska A., Zawisza M., *Transportowy Model Symulacyjny Miasta Gdańska*. Biuro Rozwoju Gdańska, Fundacja Rozwoju Inżynierii Lądowej. Gdańsk, 2012.
- [4] Hensher, D.A., Button K.J., *Handbook of Transport Modelling*. First edition. Handbooks in Transport, Vol. 1. PERGAMON. Amsterdam, 2000.
- [5] Chatterjee A., Venigalla M.M., *Travel Demand Forecasting for Urban Transportation Planning*.
- [6] Bovy P.H.L., Bliemer M.C.J., Nes R.v., *Transportation Modelling*. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Transport & Planning Section. Delft, 2006.
- [7] Kot S.M., Jakubowski J., Sokołowski A., *Statystyka*. Wydanie drugie, poprawione. Difin. Warszawa, 2009.
- [8] Sokołowski A., *Przykłady prognozy ekonomicznej*.
- [9] Supernak J., *Modele powstawania miejskiego ruchu osobowego*. Biblioteka Drogownictwa. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa, 1980.
- [10] PBS: *Kompleksowe badania ruchu na terenie Miasta Gdańska 2009*. Raport V - opracowanie wyników. Sopot - Warszawa, 2009.

