

**SYLWIA POGODZIŃSKA**

mgr inż., Instytut Inżynierii Drogowej,  
Kolejowej i Transportu, Politechnika  
Krakowska, ul. Warszawska 24,  
31-155 Kraków, tel.: 12 628 2158,  
e-mail: spogodzinska@pk.edu.pl

# Szacowanie natężenia ruchu rowerowego na podstawie danych z systemu rowerów miejskich<sup>1</sup>

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodę szacowania natężenia ruchu rowerowego na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich. Badania wykonano na przykładzie miasta Krakowa, wykorzystując dane o dobowym natężeniu ruchu rowerowego z 5 pętli pomiaru automatycznego oraz dane GPS z systemu rowerów miejskich Wavelo. Na podstawie dwuczynnikowej analizy wariancji (ANOVA) oraz testu post-hoc Tukey'a określono wpływ czynników „lokalizacja” i „dzień tygodnia” na udział rowerów systemu miejskiego w całym potoku rowerzystów. Wykazano, że badany udział zmienia się statystycznie istotnie pomiędzy analizowanymi lokalizacjami. W przypadku udziału szacowanego w poszczególnych dniach tygodnia zmiana jest nieistotna. Wyznaczona zależność pomiędzy ogólnym natężeniem ruchu rowerowego i natężeniem ruchu rowerów systemu Wavelo charakteryzuje się wysokimi współczynnikami determinacji  $R^2$  (przekraczającymi wartość 0,90) oraz średnim błędem oszacowania nie większym od 11,5%. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na możliwość szacowania natężenia całości ruchu rowerowego na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich. Praktyczne wdrożenie takiego sposobu szacowania natężenia ruchu rowerowego wymaga jednak przeprowadzenia pomiarów kontrolnych weryfikujących opracowane zależności wraz z określeniem wpływu lokalizacji przekroju pomiarowego.

**Słowa kluczowe:** natężenie ruchu rowerowego, system rowerów miejskich, dane GPS, Wavelo.

## Wprowadzenie<sup>1</sup>

Od wielu lat prowadzone są działania promujące rower jako atrakcyjną alternatywę dla ruchu zmotoryzowanego, budowane są nowe obiekty infrastruktury rowerowej, a standard istniejących jest stopniowo podnoszony. W następstwie tych starań rower staje się coraz bardziej popularnym środkiem transportu. Konieczne jest zatem nowe i szersze spojrzenie na ruch rowerowy, jego bezpieczeństwo, planowanie oraz projektowanie infrastruktury rowerowej, której standard powinien być dostosowany do rosnących potrzeb i wymagań tej grupy użytkowników.

Podstawową charakterystyką ruchu rowerowego, określającą m.in. wymagany standard techniczny infrastruktury, jest jego natężenie. W odróżnieniu od ruchu zmotoryzowanego pozyskanie danych o natężeniu ruchu rowerowego i jego prognozowanie nie jest zagadnieniem prostym i nastrocza badaczom wiele problemów. Przyczyną jest silna zależność natężenia ruchu rowerowego m.in. od obecności i standardu infrastruktury rowerowej, parametrów ruchu pojazdów poruszających się po danej drodze (m.in. natęże-

nia ruchu, prędkości pojazdów, udziału pojazdów ciężkich), warunków atmosferycznych. Oznacza to trudności w przyjmowaniu takich samych charakterystyk ruchu rowerowego w różnych lokalizacjach. Ponadto ruch rowerowy może odbywać się po jezdni, chodniku, dedykowanej infrastrukturze, co stanowi przeszkodę w stosowaniu automatycznych technik pomiaru ruchu. Stacje ciągłego pomiaru ruchu rowerowego wciąż są niestety rzadkością. Z kolei trudnością w zastosowaniu technik manualnych i wyrwykowych pomiarów automatycznych jest często brak adekwatnych danych o dobowej, tygodniowej i sezonowej zmienności ruchu rowerowego, a tym samym niemożność wykorzystania wyników pomiarów krótkotrwałych do szacowania np. natężeń dobowych.

Opisane powyżej trudności w pozyskiwaniu danych o natężeniu ruchu rowerowego skłaniają do poszukiwania nowych, bardziej efektywnych sposobów jego szacowania. Od kilkunastu lat bardzo popularne są metody wykorzystujące technikę GPS. Takie dane, pochodzące ze specjalnych aplikacji na telefon komórkowy, były wykorzystane m.in. w pracach [1], [2], [3]. W artykule przedstawiono metodę szacowania natężenia ruchu rowerowego opartą na danych GPS z systemu rowerów miejskich. Analizę wykonano na podstawie danych z 5 stacji ciągłego automatycznego pomiaru ruchu rowerowego w Krakowie oraz danych geolokalizacyjnych z systemu rowerów miejskich Wavelo, funkcjonującego na obszarze miasta. Zbadano wpływ lokalizacji przekroju, w którym szacowane jest natężenie ruchu i dnia tygodnia, na udział rowerów systemu miejskiego w całym potoku rowerzystów. Badania przedstawione w artykule stanowią wstęp do bardziej złożonych analiz nad zmiennością natężenia ruchu rowerowego i możliwościami jego szacowania bez pracochłonnych pomiarów.

## Przegląd literatury

### Stosowane metody szacowania natężenia ruchu rowerowego

Natężenie jest podstawowym parametrem ruchu wykorzystywanym w pracach planistycznych, projektowych, analizach bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz wpływu danej inwestycji na środowisko. Studia literatury zagranicznej wskazują, że natężenie ruchu rowerowego jest najczęściej szacowane na podstawie pomiarów krótkotrwałych, których wyniki przemnażane są przez odpowiednie współczynniki dobowej, tygodniowej i sezonowej zmienności ruchu.

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2018.

W badaniach aktywności i bezpieczeństwa rowerzystów prowadzonych w Montrealu [4] wykorzystano profile zmienności ruchu rowerowego opracowane na podstawie danych z 5 stacji pomiarów ciągłych funkcjonujących na obszarze miasta [5]. Dane z przekrojowych pomiarów automatycznych wykorzystano również m.in. w analizach ryzyka wystąpienia wypadku z udziałem rowerzystów wykonywanych w Los Angeles [6] oraz w pracach nad programem monitorowania ruchu niechronionych użytkowników dróg w Blacksburg (Wirginia, USA) [7]. W analizach bezpieczeństwa rowerzystów prowadzonych w Holandii [8] i Szwecji [9] współczynniki zmienności natężenia ruchu rowerowego w czasie zaczerpnięto z badań krajowych. Z kolei w modelach szacowania ryzyka wypadków z udziałem rowerzystów opracowanych dla stanu Queensland w Australii średniodobowe natężenie ruchu rowerowego wyznaczono na podstawie współczynników zmienności ruchu wyznaczonych w Nowej Zelandii [10]. Sami autorzy raportu stwierdzili, że nie wiadomo w jakim stopniu współczynniki te odpowiadają warunkom panującym w Australii.

Celem pracy [11] było ustalenie postaci modeli ryzyka wypadków z udziałem niechronionych uczestników ruchu w stanie Victoria w Australii. W badaniach wykorzystano wartości średniodobowego natężenia ruchu rowerowego wyznaczone w pomiarach prowadzonych na obszarze całego stanu. Pomiarami objęte były tylko główne trasy sieci drogowej. Natężenie ruchu rowerowego na pozostałych odcinkach obliczono na podstawie danych socjoekonomicznych, tj. udziału podróży wykonywanych rowerem do pracy w całkowitej liczbie podróży realizowanych w tym celu.

Wyznaczenie relatywnych wskaźników wypadkowych odnoszących się do różnych typów infrastruktury rowerowej było przedmiotem badań opisanych w [12]. Ze względu na brak szczegółowych danych o ruchu rowerowym, autor posłużył się w obliczeniach wynikami dwugodzinnych manualnych pomiarów natężenia ruchu rowerowego prowadzonych w czasie szczytu popołudniowego. Uznał, że porównawczy charakter analizy (wyznaczenie wskaźników relatywnych, nie bezwzględnych) pozwala na zastosowanie takiego uproszczenia. Inną metodę przyjęto w analizach bezpieczeństwa niechronionych użytkowników dróg prowadzonych w stanie Michigan w USA [13]. Z uwagi na brak danych o natężeniach ruchu pieszych i rowerzystów dla całego stanu, tzw. podstawową funkcję bezpieczeństwa (tzw. Safety Performance Functions, SPF) zbudowano jedynie w oparciu o dane o natężeniu ruchu pojazdów silnikowych.

### Dane GPS w analizach ruchu rowerowego

W ostatnich latach coraz większą popularność w procesie pozyskiwania danych o ruchu drogowym zyskują metody oparte na technice GPS. W porównaniu do tradycyjnych metod pomiaru ruchu (jak metody manualne, automatyczne z wykorzystaniem detektorów pneumatycznych lub kamer video) technologia GPS pozwala na gromadzenie w krótkim czasie ogromnych ilości danych o ruchu, nie tylko w pojedynczych przekrojach lub na krótkich odcinkach

drogi, ale także w ciągu całej podróży. Metoda wymaga wprowadzenia wyposażenia pojazdu w rejestrator GPS, jednak stosowanie tego typu urządzeń staje się obecnie w przypadku rowerów miejskich normą. Dostępne są także darmowe aplikacje na telefon komórkowy pozwalające na rejestrowanie danych geolokalizacyjnych pojedynczych podróży. Technika GPS nie wymaga zastosowania dodatkowego sprzętu i specjalistycznego oprogramowania, a obliczenia parametrów ruchu na podstawie danych GPS można wykonać przy użyciu powszechnie stosowanych arkuszy kalkulacyjnych.

W analizach ruchu rowerowego dane GPS zostały po raz pierwszy wykorzystane w 2007 roku [14]. Celem tych badań było wyznaczenie modelu wyboru trasy przejazdu przez rowerzystów z uwzględnieniem wpływu infrastruktury rowerowej. W pomiarach wzięło udział 51 ochotników (wybranych na podstawie płci, wieku, miejsca zamieszkania i miejsca pracy), którzy wykonali łącznie 938 podróży. Podobne badania prowadzono m.in. w Zurichu (Szwajcaria) [15] i Portland (Stan Oregon w USA) [16], [17] na podstawie odpowiednio około 2500 i 1500 podróży.

Możliwość pozyskania danych GPS o ruchu rowerowym za pomocą specjalnej aplikacji na telefon komórkowy była po raz pierwszy testowana w 2010 roku w Los Angeles [18]. Od tamtej pory powstało wiele podobnych aplikacji m.in. w San Francisco [19], Austin [20], Madrycie [21] i Holandii [22]. Obecnie popularne są takie serwisy jak Endomondo, Strava, Map My Ride, Ride with GPS, które umożliwiają rejestrowanie aktywności fizycznej ich użytkowników (w tym jazdę na rowerze).

W 2013 roku w Reykjavíku dane z serwisu Strava zostały wykorzystane do utworzenia tzw. *beat* mapy, czyli mapy rozkładu ruchu rowerowego w sieci ulicznej, oraz analizy wyboru trasy przejazdu przez rowerzystów [1]. Dane ze Stravy były również podstawą badań zależności pomiędzy poziomem stresu komunikacyjnego (tzw. Level Of Traffic Stress, LTS) a częstością występowania wypadków z udziałem rowerzystów i ich ciężkością w New Hampshire w USA [3].

Dane GPS o ruchu rowerowym wykorzystywane były m.in. w modelach wyboru trasy przejazdu przez rowerzystów [23], analizach bezpieczeństwa i identyfikacji parametrów ruchu rowerowego (takich jak prędkość, przyspieszenia, opóźnienia) [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], szacowaniu natężenia ruchu rowerowego [2], analizach możliwości zastosowania modeli symulacji mikroskopowej ruchu pojazdów silnikowych w badaniach ruchu rowerowego [31], analizach wpływu infrastruktury rowerowej na stopień aktywności fizycznej ludności [32]. Liczba podróży uwzględnianych w ww. badaniach wynosiła od kilkunastu do ponad 10 000.

### Dane z systemu rowerów miejskich w badaniach ruchu rowerowego

Poza urządzeniami geolokalizacyjnymi i aplikacjami na telefon komórkowy źródłem danych GPS o ruchu rowerowym jest system rowerów miejskich. Dane o podróżach

z systemu rowerów miejskich były podstawą badań wpływu systemu na bezpieczeństwo rowerzystów i ich zdrowie [33] oraz analiz wpływu infrastruktury rowerowej na komfort podróżowania i bezpieczeństwo tej grupy użytkowników [34], [35]. W Waszyngtonie (USA) dane te zostały wykorzystane w ocenie różnic demograficznych i socjoekonomicznych pomiędzy rowerzystami korzystającymi z rowerów miejskich okazjonalnie i codziennie oraz rowerzystami niekorzystającymi z systemu [36]. Dane GPS z systemu rowerów miejskich posłużyły również do kwantyfikacji zależności natężenia ruchu rowerowego od warunków pogodowych [37], a wraz z informacjami o zagospodarowaniu terenu umożliwiły analizę oddziaływania tego zagospodarowania na natężenie ruchu rowerowego [38].

Krakowski system rowerów miejskich poddany był analizie pod kątem zmienności liczby wypożyczeń w poszczególnych miesiącach, dniach tygodnia, godzinach doby oraz czasie wypożyczenia [39]. Autorzy badań wyznaczyli, które stacje wypożyczenia i zwrotów wykorzystywane są najczęściej, oraz wskazali trasy, które są najczęściej wybierane przez użytkowników rowerów miejskich podczas podróży.

### Podsumowanie z przeglądu literatury

Najprostszymi i wciąż najbardziej popularnymi metodami wyznaczania natężenia ruchu rowerowego są doraźne, kilkugodzinne pomiary manualne i automatyczne. Szacowanie np. natężeń dobowych na ich podstawie jest niestety obciążone dużym prawdopodobieństwem błędu, co wynika z braku wiarygodnych danych o dobowej, tygodniowej czy sezonowej zmienności ruchu rowerowego. Jak wynika z przeglądu literatury, w badaniach wykorzystuje się zwykle współczynniki zmienności ruchu opracowane na podstawie kilku wybranych lokalizacji w danym mieście, niekiedy również w całym regionie czy kraju. Należy zwrócić uwagę na fakt, że w zależności m.in. od funkcji drogi, zagospodarowania jej otoczenia, obecności i standardu infrastruktury rowerowej zmienność ruchu rowerowego w czasie może być inna w poszczególnych lokalizacjach i to w obrębie jednego miasta, nie mówiąc już o całym regionie czy kraju.

Opisany powyżej problem może być rozwiązany poprzez wykorzystanie w analizach danych z systemu rowerów miejskich. Wymaga to jednak założenia, że rowerzyści korzystający z rowerów systemu miejskiego stanowią losową próbę całej populacji rowerzystów w danym mieście, a charakterystyki ruchu tej grupy rowerzystów pozostają w związku z charakterystykami ruchu całej populacji rowerzystów.

Jak do tej pory nie analizowano możliwości szacowania natężenia ruchu rowerowego w sieci ulicznej w oparciu o natężenie ruchu rowerów systemu miejskiego. Metoda ta, na tle innych wykorzystujących dane geolokalizacyjne, wyróżnia się stosunkowo niskim nakładem finansowym oraz lepszym odzwierciedleniem rzeczywistych charakterystyk całego potoku rowerzystów. Nie ma bowiem konieczności zakupu danych GPS, które powinny obejmować dużą próbę badawczą w skali całego miasta. Takie dane mogą po-

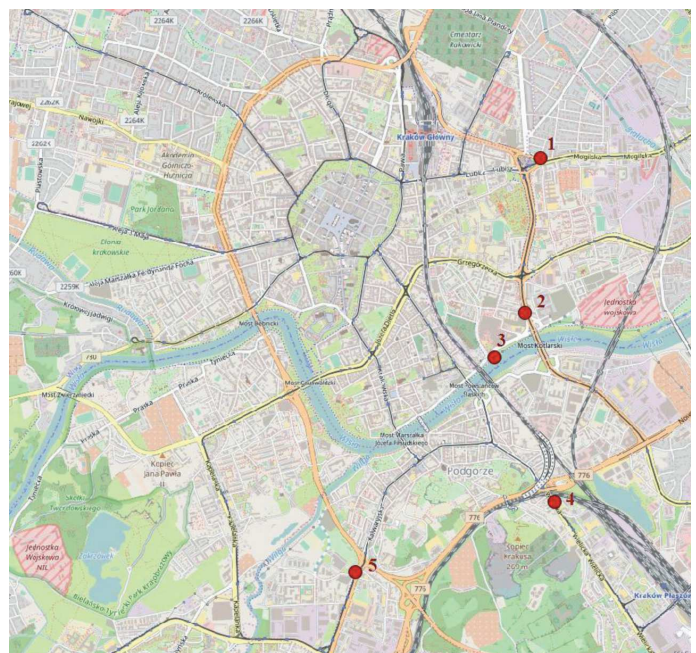
chodzić z dużych i popularnych serwisów takich jak np. Strava. Należy zwrócić uwagę na fakt, że osoby korzystające z dedykowanych serwisów i aplikacji na telefon komórkowy często jeżdżą na rowerze w sposób wycynowy. Wynika stąd, że prędkości czy przyspieszenia osiągnięte przez taką grupę rowerzystów mogą się istotnie różnić od parametrów osiąganych przez pozostałych rowerzystów.

Celem własnych badań było znalezienie zależności pomiędzy całkowitym natężeniem ruchu rowerowego a natężeniem ruchu rowerów systemu miejskiego. Takie badania mogą być częściową odpowiedzią na pytanie, czy można traktować użytkowników rowerów miejskich jako losową próbę z ogólnego zbioru rowerzystów.

Obliczenia przeprowadzono na przykładzie miasta Krakowa, gdzie system rowerów miejskich funkcjonuje od 2008 roku. Od wiosny 2017 system nosi nazwę Wavelo, a jego operatorem jest firma BikeU. Badania przeprowadzono w 4 krokach: 1) ustalono dobowe natężenie ruchu rowerowego w 5 miejscach usytuowania stacji ciągłego pomiaru ruchu w okresie od 1 do 23 czerwca 2016; 2) na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich wyznaczono natężenie ruchu rowerów Wavelo w miejscach lokalizacji pętli pomiarowych w przyjętym okresie analizy; 3) za pomocą dwuczynnikowej analizy wariancji określono wpływ lokalizacji przekroju pomiarowego i dnia tygodnia na badaną zależność; 4) wyznaczono postać funkcji opisującej związek pomiędzy całkowitym natężeniem ruchu rowerowego i natężeniem ruchu rowerów systemu Wavelo.

### Dane wykorzystywane w analizach

Na obszarze Krakowa działa obecnie 5 stacji automatycznego pomiaru ruchu rowerowego. Są one zlokalizowane na: Bulwarach Wiślanych, ulicach: Kotlarskiej, Mogiłskiej, Wadowickiej i Wielickiej (rys. 1). Informacje o dobowym



Rys. 1. Lokalizacja stacji ciągłego automatycznego pomiaru ruchu rowerowego w Krakowie: 1) ul. Mogiłska, 2) ul. Kotlarska, 3) Bulwary Wiślane, 4) ul. Wielicka, 5) ul. Wadowicka  
Źródło: opracowanie własne na podstawie [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)

natężeniu ruchu rowerowego w ww. lokalizacjach są dostępne na stronie internetowej Zarządu Infrastruktury Komunalnej i Transportu w Krakowie. Powyższe dane obejmują okres od 18 listopada 2016 roku i są na bieżąco aktualizowane.

Szczegółowe dane GPS z systemu Wavelo z okresu od 1 czerwca do 23 czerwca 2017 roku zostały udostępnione przez Zarząd Infrastruktury Komunalnej i Transportu w Krakowie. Długość przyjętego okresu analizy wynikała ze znacznej liczby danych GPS rejestrowanych przez system oraz żmudnego i czasochłonnego procesu ich przetwarzania. Okres analizy dobrano w taki sposób, aby obejmował wyłącznie dni przypadające w czasie trwania roku szkolnego.

Udostępnione dane geolokalizacyjne pozwoliły na wyznaczenie dobowego natężenia ruchu rowerów systemu Wavelo w miejscach lokalizacji pętli pomiarowych w każdym dniu analizowanego okresu osobno. Zebrane informacje wraz z danymi o całkowitym natężeniu ruchu rowerowego zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Natężenie ruchu wszystkich rowerów i rowerów systemu Wavelo w okresie 01.06.2017 r.–23.06.2017 r. w miejscach lokalizacji stacji pomiaru automatycznego											
Data	Dzień tygodnia	ul. Mogilska		ul. Kottlarska		Bulwary Wiślane		ul. Wielicka		ul. Wadowicka	
		Q <sub>wavelo</sub>	Q <sub>całk</sub>	Q <sub>wavelo</sub>	Q <sub>całk</sub>	Q <sub>wavelo</sub>	Q <sub>całk</sub>	Q <sub>wavelo</sub>	Q <sub>całk</sub>	Q <sub>wavelo</sub>	Q <sub>całk</sub>
2017-06-01	Czw	251	4631	223	3415	309	3623	78	1460	97	1115
2017-06-02	Pt	219	4399	225	3263	283	3494	75	1333	88	1041
2017-06-03	Sob	198	2802	191	2255	296	4020	55	1115	52	593
2017-06-04	Ndz	86	1905	109	1513	197	2961	46	799	28	338
2017-06-05	Pon	205	3894	211	2835	228	2552	76	1131	86	992
2017-06-06	Wt	239	4227	210	3098	285	2579	95	1322	98	1052
2017-06-07	Śr	243	4213	236	3087	292	2728	82	1245	104	1099
2017-06-08	Czw	247	4522	224	3460	284	3125	100	1553	108	1024
2017-06-09	Pt	256	4310	223	3370	303	3109	73	1431	94	1026
2017-06-10	Sob	81	1301	77	913	90	1084	40	492	28	379
2017-06-11	Ndz	158	2690	189	2305	340	4043	72	1096	46	522
2017-06-12	Pon	208	3391	182	2450	201	1963	72	1287	89	987
2017-06-13	Wt	250	4329	238	3091	247	2179	103	1370	111	1158
2017-06-14	Śr	236	3686	211	2610	186	1931	75	1166	79	913
2017-06-15	Czw	180	2662	148	2363	365	4658	89	1311	66	606
2017-06-16	Pt	100	1484	103	1089	105	948	29	628	41	463
2017-06-17	Sob	67	661	49	449	77	454	26	221	17	181
2017-06-18	Ndz	146	2024	141	1607	290	2936	65	860	60	447
2017-06-19	Pon	275	4546	248	3338	236	2835	107	1529	83	1131
2017-06-20	Wt	300	4995	261	3749	313	3559	111	1572	105	1005
2017-06-21	Śr	333	5047	290	3835	333	3146	100	1605	108	991
2017-06-22	Czw	316	4956	285	3619	375	3179	106	1593	112	1003
2017-06-23	Pt	205	2746	166	1838	155	1283	70	790	66	699

## Metodologia analiz

Udział rowerów Wavelo w całym potoku rowerzystów może być inny w poszczególnych lokalizacjach, dniach tygodnia, w okresie wakacji (w stosunku do okresu trwania roku szkolnego), w dniach ustawowo wolnych od pracy (w stosunku do pozostałych dni). Przyjęto zatem, że jeżeli udział ten, np. w dniach powszednich i dniach wolnych od pracy, nie będzie statystycznie istotnie różny (przy pewnym

przyjętym poziomie ufności), to można zbudować jeden model opisujący badaną zależność. W przeciwnym wypadku (tj. jeżeli w analizowanych przypadkach udział rowerów Wavelo w całym potoku rowerów będzie się statystycznie istotnie różnił) należy wyznaczyć osobne modele badanej zależności, gdyż model zbudowany na podstawie całości danych będzie generować istotne błędy.

W celu oceny wpływu poszczególnych czynników na udział rowerów Wavelo w całym potoku rowerzystów wykonano analizę wariancji ANOVA [40]. Uwzględniono w niej dwa czynniki, tj. lokalizację przekroju pomiarowego i dzień tygodnia. Czwartek, 15 czerwca, był dniem ustawowo wolnym od pracy (święto Bożego Ciała) i z uwagi na możliwość występowania odmiennego charakteru ruchu w tym czasie zdecydowano się na wykluczenie z obliczeń tego dnia wraz z dniem przypadającym bezpośrednio po nim, tj. piątkiem 16 czerwca.

W tabeli 2 zestawiono wartości średniego udziału rowerów Wavelo w całym potoku rowerzystów w poszczególnych lokalizacjach i dniach tygodnia. Z przedstawionych danych wynika, że badany udział osiąga średnią wartość na poziomie 8%.

Wyniki dwuczynnikowej analizy wariancji przedstawiono w tabeli 3. Na ich podstawie można stwierdzić, że udział rowerów Wavelo w całym potoku rowerzystów jest zbliżony we wszystkich dniach tygodnia. Różni się on jednak istotnie pomiędzy poszczególnymi lokalizacjami przekro-

Tabela 2

Udział rowerów Wavelo w całym potoku rowerzystów w poszczególnych lokalizacjach i dniach tygodnia – wartości średnie		
	Wielkość próby	Średnia $Q_{wavelo}/Q_{całkowite}$
Lokalizacja		
Bulwary Wiślane	21	0.0983
ul. Kottlarska	21	0.0774
ul. Mogilska	21	0.0621
ul. Wadowicka	21	0.0938
ul. Wielicka	21	0.0681
<b>Suma</b>	<b>105</b>	<b>0.0800</b>
Dzień tygodnia		
Pon.	15	0.0776
Wt.	15	0.0783
Śr.	15	0.0895
Czw.	15	0.0781
Pt.	15	0.0744
Sob.	15	0.0808
Ndz.	15	0.0808
<b>Suma</b>	<b>105</b>	<b>0.0800</b>

Tabela 3

Wyniki analiz wariancji ANOVA						
	SS	Df	MS	F	p	Fcrit (dla $\alpha=0,05$ )
Lokalizacja	0.020912	4	0.005228	21.999	< 0.001	2.503
Dzień tygodnia	0.002028	6	0.000338	1.422	0.214	2.231
Lokalizacja x Dzień tygodnia	0.003301	24	0.000138	0.579	0.937	1.674
Błąd	0.017152	70	0.000245			
Całość	0.043393					

jów pomiarowych. Nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o braku interakcji pomiędzy czynnikami lokalizacja i dniem tygodnia.

Aby ocenić, pomiędzy którymi lokalizacjami przekroju pomiarowego opisywany udział różni się istotnie, wykonano test post hoc Tukey'a [40]. Polega on na porównaniu bezwzględnej wartości różnicy pomiędzy dwoma średnimi (w badanym przypadku są to średnie wartości błędu oszacowania całkowitego natężenia ruchu rowerowego na podstawie natężenia rowerów systemu miejskiego dla porównywanych lokalizacji) z tzw. najmniejszą istotną różnicą NIR. O statystycznej istotności porównywanych średnich można mówić wówczas, gdy ich bezwzględna różnica jest większa od wartości NIR. W teście Tukey'a wartość NIR wyznacza się z poniższej zależności:

$$NIR = q_{\alpha,k,N-k} \cdot \sqrt{MS_{bład}/n} \quad (1)$$

gdzie:

- $q_{\alpha,k,N-k}$  – kwantyl rozkładu studentyzowanego rozstępu wyznaczony z tablic dla poziomu istotności  $\alpha$ ;
- $k, N-k$  – stopnie swobody dla rozkładu studentyzowanego rozstępu;  $N$  – liczebność całkowita (w badanym przypadku  $N=105$ );  $k$  – liczba grup (lokalizacji, w badanym przypadku  $k=5$ );
- $MS_{bład}$  – średni kwadrat dla błędu z analizy wariancji (tab. 3);
- $n$  – liczebność grup (w badanym przypadku  $n=21$ ).

Wyniki testu Tukey'a, dla poziomu ufności równego 0,95 zaprezentowano w tabeli 4.

Z testu Tukey'a wynika, że na poziomie istotności równym 0,05 różnica udziału rowerów systemu miejskiego w całkowitej liczbie wszystkich rowerów nie jest statystycznie istotna na: Bulwarach Wiślanych i ulicy Wadowickiej, na ulicy Kotlarskiej i ulicy Wielickiej, na ulicy Mogilskiej i ulicy Wielickiej. W pozostałych przypadkach różnice te są statystycznie istotne.

Na podstawie uzyskanych wyników analizy wariancji i testu Tukey'a oraz zgodnie z przyjętym wcześniej założeniem o wpływie istotności różnic stwierdzonych za pomocą analizy wariancji ANOVA na sposób budowania modeli

Tabela 4

Wyniki testu Tukey'a dla czynnika „Lokalizacja”		
$q_{\alpha,k,N-k}$	3.94	
NIR	0.0135	
	$ x_i - x_j $	$ x_i - x_j  > NIR$
Bulwary Wiślane – ul. Kotlarska	0.0210	Tak
Bulwary Wiślane – ul. Mogilska	0.0363	Tak
Bulwary Wiślane – ul. Wadowicka	0.0046	Nie
Bulwary Wiślane – ul. Wielicka	0.0302	Tak
ul. Kotlarska – ul. Mogilska	0.0153	Tak
ul. Kotlarska – ul. Wadowicka	0.0164	Tak
ul. Kotlarska – ul. Wielicka	0.0092	Nie
ul. Mogilska – ul. Wadowicka	0.0317	Tak
ul. Mogilska – ul. Wielicka	0.0061	Nie
ul. Wadowicka – ul. Wielicka	0.0256	Tak

zdecydowano o konieczności wyznaczenia osobnej zależności opisującej związek pomiędzy całkowitym natężeniem ruchu rowerowego a natężeniem rowerów systemu miejskiego w przypadku Bulwarów Wiślanych i ulicy Wadowickiej. W przypadku pozostałych lokalizacji test Tukey'a nie daje jednoznacznej odpowiedzi co do właściwego sposobu budowania modeli. Wyznaczono zatem sześć zależności na podstawie prób z następujących miejsc:

- ul. Kotlarskiej,
- ul. Mogilskiej,
- ul. Wielickiej,
- ul. Kotlarskiej i ul. Wielickiej,
- ul. Mogilskiej i ul. Wielickiej,
- łącznie z wszystkich trzech lokalizacji.

Postaci uzyskanych zależności, które dobrano na podstawie największej wartości współczynnika determinacji  $R^2$  oraz z pominięciem danych odstających, wraz ze statystykami opisowymi i miarami dopasowania poszczególnych modeli, przedstawiono w tabeli 5.

Porównując zestawione w tabeli 5 zależności, zdecydowano się na przyjęcie dwóch modeli, tj. jednego w przypadku danych z ul. Kotlarskiej oraz osobnego w przypadku danych z ul. Mogilskiej i ul. Wielickiej. Modele te charakteryzują się największymi wartościami współczynnika determinacji  $R^2$  oraz najniższą wartością współczynnika zmienności  $v$ . Największy średni błąd względny oszacowania natężenia rowerzystów na podstawie natężenia rowerów Wavelo charakteryzuje model utworzony na podstawie danych ze wszystkich 3 lokalizacji i wynosi on 12,8%. Błąd ten jest statystycznie istotnie większy (na poziomie ufności równym 0,95) od błędu dla zależności opracowanej tylko

Tabela 5

Modele oszacowania natężenia ruchu rowerów na podstawie natężenia rowerów miejskich – dane z ul. Kotlarskiej, ul. Mogilskiej i ul. Wielickiej						
lokalizacja	ul. Kotlarska	ul. Mogilska	ul. Wielicka	ul. Kotlarska + ul. Wielicka	+ ul. Mogilska ul. Wielicka	ul. Kotlarska ul. Mogilska + ul. Wielicka
postać modelu	$a \cdot Q_{wavelo}^b$	$a \cdot Q_{wavelo}^b$	$a \cdot Q_{wavelo}^b$	$a \cdot Q_{wavelo} + b$	$a \cdot Q_{wavelo}^2 + b \cdot Q_{wavelo}$	$a \cdot Q_{wavelo}^b$
A	<b>4.2919</b>	23.1279	20.0954	12.7074	<b>0.0001</b>	16.3486
B	<b>1.2122</b>	0.9398	0.9389	191.3597	<b>16.5255</b>	0.9837
wielkość próby	<b>19</b>	20	20	40	<b>38</b>	60
$R^2$	<b>0.976</b>	0.896	0.746	0.949	<b>0.958</b>	0.925
$\varphi^2$	<b>0.024</b>	0.104	0.254	0.051	<b>0.042</b>	0.075
błąd średni [%]	<b>0.074</b>	0.093	0.116	0.098	<b>0.106</b>	0.128
$\Sigma$	<b>0.033</b>	0.076	0.101	0.087	<b>0.072</b>	0.093
$\Upsilon$	<b>0.452</b>	0.822	0.865	0.892	<b>0.679</b>	0.724
błąd min [%]	<b>0.006</b>	0.002	0.006	0.001	<b>0.001</b>	0.002
błąd max [%]	<b>0.124</b>	0.253	0.374	0.368	<b>0.254</b>	0.358

gdzie:  $R^2$  – współczynnik determinacji,

$\varphi^2$  – współczynnik zbieżności,

$\sigma$  – odchylenie standardowe błędów oszacowania,

$v$  – współczynnik zmienności błędów oszacowania.

Uwaga: pogrubioną czcionką oznaczono modele przyjęte do dalszych analiz

na podstawie danych z ulicy Kotlarskiej. W przypadku ulic Mogilskiej i Wielickiej średnie wartości błędu oszacowania natężenia rowerzystów dla wszystkich zbudowanych zależności nie różnią się istotnie na poziomie ufności równym 0,95.

## Wyniki analiz

Na rysunku 2 przedstawiono wyznaczone zależności natężenia ruchu rowerowego od natężenia ruchu rowerów systemu Wavelo dla 3 wyróżnionych przypadków, tj. Bulwarów Wiślanych i ulic Wadowickiej, Kotlarskiej Mogilskiej i Wielickiej oraz (do celów porównawczych) dla wszystkich 5 lokalizacji razem. W tabeli 6 zestawiono postaci, statystyki opisowe i miary jakości dopasowania dla wszystkich zbudowanych zależności. We wszystkich opracowanych modelach natężenie ruchu rowerów systemu miejskiego w ponad 90% opisuje zmienność całko-

witego natężenia ruchu rowerzystów. Średni procentowy błąd oszacowania natężenia rowerzystów na podstawie natężenia rowerów Wavelo wynosi 7,4%, 10,4% i 10,6% odpowiednio w przypadku ul. Kotlarskiej, Bulwarów Wiślanych i ulic Wadowickiej, Mogilskiej i Wielickiej. Dla modelu opracowanego dla wszystkich 5 lokalizacji błąd ten jest znacznie większy i wynosi niemal 18%. Niemniej jednak, w przypadku niektórych analiz błąd oszacowania natężenia ruchu na takim poziomie może nie wpływać istotnie na wyniki tychże badań, dlatego zdecydowano się na zaprezentowanie również tej zależności.

## Podsumowanie i wnioski

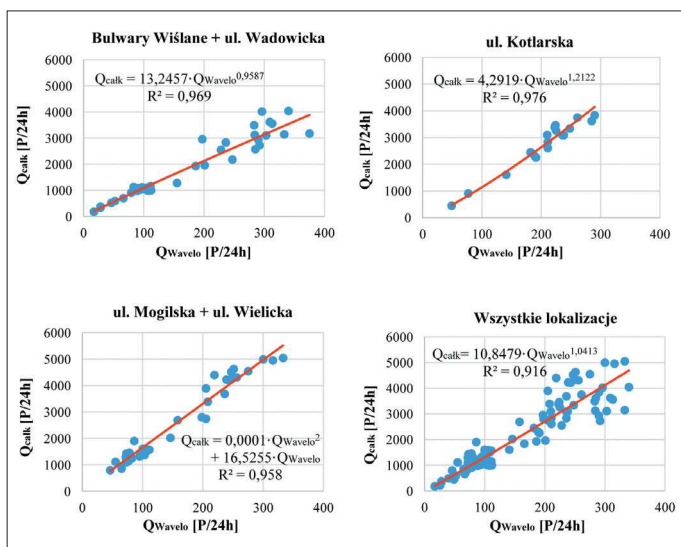
Celem artykułu było pokazanie możliwości szacowania natężenia ruchu rowerowego na podstawie danych o ruchu rowerów miejskich. Analizy wykonano na podstawie danych z 5 stacji ciągłego automatycznego pomiaru ruchu rowerowego w Krakowie oraz danych GPS z systemu rowerów miejskich Wavelo. Wykazano, że udział rowerów Wavelo w całym potoku rowerzystów nie jest zależny od dnia tygodnia i wynosi średnio 8%. Udział ten różni się jednak statystycznie istotnie pomiędzy poszczególnymi lokalizacjami przekrojów pomiarowych. Może to wynikać z charakteru ruchu odbywającego się po danej ulicy, jej funkcji w sieci ulicznej, gęstości stacji roweru miejskiego w pobliżu danej lokalizacji i innych czynników. W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczono 3 postaci modelu szacowania natężenia ruchu rowerowego, tj. w odniesieniu do Bulwarów Wiślanych i ulicy Wadowickiej, ulicy Kotlarskiej, ulicy Mogilskiej i ulicy Wielickiej. Opracowane zależności charakteryzuje wysoki współczynnik determinacji  $R^2$ , większy od 0.90. Wyniki prac wskazują, że dane GPS z systemu rowerów miejskich mogłyby być stosowane do szacowania całkowitego natężenia ruchu rowerowego.

Artykuł jest wstępem do bardziej złożonych analiz zmienności natężenia ruchu rowerowego w sieci ulicznej oraz ocen możliwości jego szacowania na podstawie natężenia rowerów systemu miejskiego. Niezbędnym jest przeprowadzenie pomiarów kontrolnych weryfikujących opracowane modele wraz z badaniami wpływu charakterystyk i funkcji ulic na szacowane zależności. W tym miejscu należy wspomnieć, że od 2015 roku prowadzone są w Krakowie coroczne pomiary ruchu rowerowego. Są to jednak doraźne, kilkugodzinne pomiary, dlatego ich rezultaty nie zostały uwzględnione ani w bazie danych wejściowych do analizy, ani w celu walidacji opracowanych modeli. Dalsze prace powinny być ukierunkowane na ocenę wpływu dni ustawowo wolnych od pracy i okresu wakacji na badaną zależność oraz wykonane w odniesieniu do natężeń godzinowych. Wyznaczenie zależności natężenia ruchu rowerowego od natężenia rowerów systemu miejskiego pozwoli na szybkie szacowanie natężenia ruchu rowerowego w dowolnym punkcie sieci ulicznej przy ograniczonych nakładach finansowych.

Tabela 6

Modele oszacowania natężenia ruchu rowerów na podstawie natężenia rowerów miejskich				
lokalizacja	Bulwary Wiślane + ul. Wadowicka	ul. Kotlarska	ul. Mogilska + ul. Wielicka	Wszystkie lokalizacje
postać modelu	$a \cdot Q_{wavelo}^b$	$a \cdot Q_{wavelo}^b$	$a \cdot Q_{wavelo}^2 + b \cdot Q_{wavelo}$	$a \cdot Q_{wavelo}^b$
A	13.2457	4.2919	0.0001	10.8479
B	0.9587	1.2122	16.5255	1.0413
wielkość próby	40	19	38	99
$R^2$	0.969	0.976	0.958	0.916
$\varphi^2$	0.031	0.024	0.042	0.084
błąd średni [%]	0.104	0.074	0.106	0.178
$\Sigma$	0.078	0.033	0.072	0.121
Y	0.757	0.452	0.679	0.680
błąd min [%]	0.003	0.006	0.001	0.001
błąd max [%]	0.299	0.124	0.254	0.472

gdzie:  $R^2$  – współczynnik determinacji,  
 $\varphi^2$  – współczynnik zbieżności,  
 $\sigma$  – odchylenie standardowe błędów oszacowania,  
 $v$  – współczynnik zmienności błędów oszacowania.



Rys. 2. Modele szacowania natężenia ruchu rowerów na podstawie natężenia rowerów miejskich

## Literatura

1. Jónasson Á., Eiríksson H., Eðvarðsson I., Helgason K., Sæmundsson T., *Optimizing expenditure on cycling roads using cyclists' GPS data*, School of Computer Science, Reykjavik University, 2013.
2. Strauss J., Miranda-Moreno L.F., Morency P., *Mapping cyclist activity injury risk in a network combining smartphone GPS data bicycle counts*, „Accident Analysis Prevention”, vol. 83, 2015.
3. Chen C., Anderson J.C., Wang H., Wang Y., Vogt R., Hernandez S., *How bicycle level of traffic stress correlate with reported cyclist accidents injury severities: A geospatial mixed logit analysis*, „Accident Analysis Prevention”, vol. 108, 2017.
4. Strauss J., Miranda-Moreno L.F., Morency P., *Cyclist activity injury risk analysis at signalized intersections: A Bayesian modelling approach*, „Accident Analysis Prevention”, vol. 59, 2013.
5. Miranda-Moreno L.F., Nosal T., *Weather or not to cycle; whether or not cyclist ridership has grown: a look at weather's impact on cycling facilities temporal trends in an urban environment*, „Journal of the Transportation Research Board”, vol. 2247, 2011.
6. Liggett R., et al., *Bicycle Crash Risk: How Does It Vary, Why?*, Raport z projektu, 2016.
7. Lu T., Buehler R., Mondschein A., Hankey S., *Designing a bicycle pedestrian traffic monitoring program to estimate annual average daily traffic in a small rural college town*, „Transport and Environment”, vol. 53, 2017.
8. Schepers J.P., Kroeze P.A., Sweers W., Wüst J. C., *Road factors bicycle-motor vehicle crashes at unsignalized priority intersections*, „Accident Analysis Prevention”, vol. 43, no. 3, 2011.
9. Kröyer H.R.G., *Pedestrian bicyclist flows in accident modelling at intersections. Influence of the length of observational period*, „Safety Science”, vol. 82, 2016.
10. Beca Pty Ltd, *Queensland Cycle Crash Models*, Raport z projektu, 2013.
11. Amoh-Gyimah R., Saberi M., Sarvi M., *Macroscopic modeling of pedestrian bicycle crashes: A cross-comparison of estimation methods*, „Accident Analysis Prevention”, vol. 93, 2016.
12. Minikel E., *Cyclist safety on bicycle boulevards parallel arterial routes in Berkeley, California*, „Accident Analysis Prevention”, vol. 45, 2012.
13. Gates T.J., et al., *Development of Safety Performance Functions Other Decision Support Tools to Assess Pedestrian Bicycle Safety*, Transportation Research Center for Livable Communities (TRCLC), Report no. TRCLC 14-6, 2016.
14. Harvey F., Krizek K., *Commuter Bicyclist Behavior Facility Disruption*, Minnesota Department of Transportation, Report no. MN/RC-2007-15, 2007.
15. Menghini G., Carrasco N., Schüssler N., Axhausen K.W., *Route choice of cyclists in Zurich*, „Transportation Research Part A: Policy and Practice”, vol. 44, no. 9, 2010.
16. Broach J., Gliebe J., Dill J., *Bicycle route choice model developed using revealed preference GPS data*, TRB 2011 Annual Meeting, vol. 5464, 2011.
17. Broach J., Dill J., Gliebe J., *Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data*, „Transportation Research Part A: Policy and Practice”, vol. 46, no. 10, 2012.
18. Reddy S., Shilton K., Denisov G., Cenizal C., Estrin D., Srivastava M., *Biketastic: Sensing Mapping for Better Biking*, Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '10), vol. 3, 2010.
19. Hood J., Sall E., Charlton B., *A GPS-based bicycle route choice model for San Francisco, California*, „The International Journal of Transportation Research”, vol. 3, no. 1, 2011.
20. Hudson J.G., Duthie J.C., Rathod Y.K., Larsen K.A., Meyer J.L., *Using Smartphones to Collect Bicycle Travel Data in Texas*, Department of Transportation, Report no. UTCM 11-35-69, 2012.
21. Romanillos G., Zaltz Austwick M., *Madrid cycle track: visualizing the cyclable city*, „Journal of Maps”, vol. 12, no. 5, 2016.
22. Van de Coevering P., De Kruijff J., Bussche D., *Policy Renewal Innovation by means of Tracking technology*, Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk, November, 2014.
23. Zimmermann M., Mai T., Frejinger E., *Bike route choice modeling using GPS data without choice sets of paths*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 75, no. October, 2017.
24. Strauss J., Zangenehpour S., Miranda-Moreno L.F., Saunier N., *Cyclist deceleration rate as surrogate safety measure in Montreal using smartphone GPS data*, Accident Analysis Prevention, vol. 99, 2017.
25. Strauss J., Miranda-Moreno L.F., *Speed, travel time delay for intersections road segments in the Montreal network using cyclist Smartphone GPS data*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 57, 2017.
26. El-Geneidy A., Krizek K.J., Iacono M., *Predicting Bicycle Travel Speeds Along Different Facilities Using GPS Data: A Proof of Concept Model*, Transportation Research Board, 86th Annual Meeting, Washington D.C., 2007.
27. Ma X., Luo D., *Modeling cyclist acceleration process for bicycle traffic simulation using naturalistic data*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, vol. 40, 2016.
28. Parkin J., Rotheram J., *Design speeds acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design appraisal*, Transport Policy, vol. 17, no. 5, 2010.
29. Luo D., Ma X., *Modeling of Cyclist Acceleration Behavior Using Naturalistic GPS Data*, Transportation Research Board, 95th Annual Meeting, January, 2016.
30. Gustafsson L., Archer J., *A naturalistic study of commuter cyclists in the greater Stockholm area*, Accident Analysis Prevention, vol. 58, 2013.
31. Manar A., Cao G., *Adapting Car Traffic Models Concepts to Bicycle Traffic*, Circular E-C197: Celebrating 50 Years of Traffic Flow Theory, 2015.
32. Dill J., *Bicycling for Transportation Health: The Role of Infrastructure*, Journal of Public Health Policy, vol. 30, no. S1, 2009.
33. Woodcock J., Tainio M., Cheshire J., O'Brien O., Goodman A., *Health effects of the London bicycle sharing system: health impact modelling study*, BMJ, vol. 348, 2014.
34. Joo S., Oh C., Jeong E., Lee G., *Categorizing bicycling environments using GPS-based public bicycle speed data*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 56, 2015.
35. Fishman E., Schepers P., *Global bike share: What the data tells us about road safety*, Journal of Safety Research, vol. 56, 2016.
36. Buck D., Buehler R., Happ P., Rawls B., Chung P., Borecki N., *Are Bikeshare Users Different from Regular Cyclists? A First Look at Short-Term Users, Annual Members, Area Cyclists in the Washington DC Region*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2387, 2013.
37. Fournier N., Christofa E., Knodler M.A., *A sinusoidal model for seasonal bicycle demestimation*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 50, 2017.
38. Imani A.F., Eluru N., El-Geneidy A.M., Rabbat M., Haq U., *How does land-use and urban form impact bicycle flows: Evidence from the bicycle-sharing system (BIXI) in Montreal*, Journal of Transport Geography, vol. 41, 2014.
39. Łastowska A., Bryniarska Z., *Analiza funkcjonowania wypożyczalni rowerów miejskich w Krakowie*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2015, nr 12.
40. Stanisław A., *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny. Tom 2. Modele liniowe i nieliniowe*. StatSoft Polska Sp. z o.o., 2007.