

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Typ dokumentu	Dokumentacja projektowa		
Numer dokumentu	A24705-S700-K207		
 Wskaźniki efektywności funkcjonowania Inteligentnego Systemu Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach – stan po inwestycyjny			
Nazwa projektu	Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach		
Numer Umowy	Umowa 87/DDA/2019 z dn. 08.08.2019 r.		
	Imię i Nazwisko	Data	Podpis
Zatwierdził		15.12.2023	
Opracował	dr inż. Daniel Kubek		

Wersja 2.2

Niniejszy dokument został utworzony na potrzeby projektu ITS Tychy. Z chwilą przekazania przez Yunex Sp. z o.o. (Wykonawca) dokumentacji projektowej, Gmina Miasto Tychy (Zamawiający) nabywa prawa autorskie majątkowe do przekazanej dokumentacji projektowej wyłącznie na polach eksploatacji wskazanych w paragrafie 14 Umowy 87/DDA/2019 z dnia 08.08.2019 roku. Wykonawca zastrzega, że wykorzystywanie dokumentacji przez Zamawiającego na innych polach eksploatacji jest niedozwolone."

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Historia zmian:

Historia zmian		
DATA WYDANIA	ZATWIERDZONY PRZEZ	PODSUMOWANIE ZMIAN
09.08.2023	Daniel Kubek	Wersja 1.0
27.08.2023	Daniel Kubek	Wersja 1.1
13.11.2023	Daniel Kubek	Wersja 2.0
04.12.2023	Daniel Kubek	Wersja 2.1
15.12.2023	Daniel Kubek	Wersja 2.2

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Spis treści

1. Cel i zakres opracowania	4
2. Uwagi dotyczące realizacji badań czasu przejazdu po inwestycji	5
3. Wskaźnik rzeczywistego czasu przejazdu	14
3.1. Analiza ogólna empirycznego czasu przejazdu	14
3.2. Oszacowanie wskaźka A (metoda prosta).....	20
3.3. Dopasowanie postaci funkcyjnej do empirycznego czasu przejazdu (metoda zaawansowana)	25
3.3.1. Główne założenia.....	25
3.3.2. Agregacja danych pomiarowych	28
3.3.3. Oszacowanie i wybór funkcji oporu.....	28
3.4. Porównanie teoretycznych czasów przejazdu.....	36
4. Wskaźnik poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego	44
5. Wskaźnik zużycia energii elektrycznej i paliw płynnych	72
6. Podsumowanie i wnioski z przeprowadzonej analizy wskaźnikowej	79
7. Spis rysunków.....	81
8. Spis tabel	81
9. Wykaz literatury	84
Załącznik 1.....	85
Załącznik 2.....	88
Załącznik 3.....	105
Załącznik 4.....	117

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Wykaz skrótów

ANPR (Automatic Number Plate Recognition) - Automatyczne Rozpoznawanie Tablic Rejestracyjnych

BRD – Bezpieczeństwo Ruchu Drogowego

ITS – Inteligentny System Transportowy

ITS Tychy - Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach

QVK – model wiążący natężenie, prędkość i gęstość potoku ruchu

RMSE – pierwiastek błędu średniokwadratowego

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

1. Cel i zakres opracowania

Celem niniejszego dokumentu jest prezentacja wyników obliczeń wskaźników efektywności, jakimi charakteryzuje się system transportu miasta Tychy w maju 2023 r. po realizacji inwestycji pt. „*Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach*”. Zakres analizy obejmuje oszacowanie wartości wskaźników efektywności wdrożonego systemu ITS, czyli:

- rzeczywistego czasu przejazdu w sieci drogowej – wskaźnik A,
- poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego – wskaźnik B,
- zużycia energii elektrycznej i paliw płynnych – wskaźnik D.

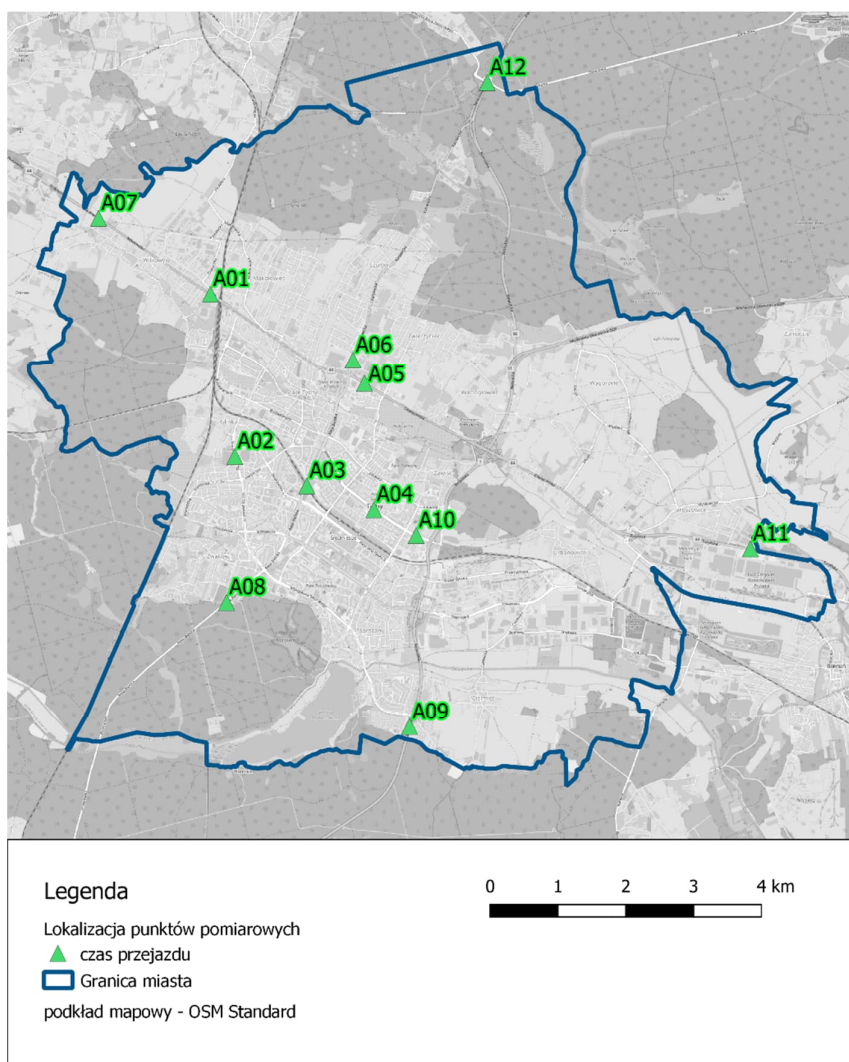
Obliczenia zostały wykonane zgodnie z metodyką wyznaczania poszczególnych wskaźników opisaną w dokumencie pt. „Dokumentacja projektowa nr A24705-S700-K13”, Siemens Mobility (dalej „metodyka”). Drugim dokumentem źródłowym jest raport pt. „*Wskaźniki efektywności funkcjonowania Inteligentnego Systemu Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach – stan przed inwestycyjny*” (dokument przekazany wraz pismem MOL4578/573/21 z dnia 24.11.2021), w którym zostały zaprezentowane wyniki analizy wartości bazowych wymaganych dla wskaźników efektywności systemu ITS Tychy dla stanu przed inwestycyjnego (dalej „raport przed inwestycyjny”). Ostatnim dokumentem źródłowym jest raport pt. „*Wskaźniki efektywności funkcjonowania Inteligentnego Systemu Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach – stan między inwestycyjny*” (dokument przekazany wraz pismem MOL4578/005/22 z dnia 03.01.2022), w którym zaprezentowano wskaźniki efektywności systemu ITS dla częściowego etapu wdrożenia systemu ITS, dla tzw. kwartału miasta (dalej „raport między inwestycyjny”).

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

2. Uwagi dotyczące realizacji badań czasu przejazdu po inwestycji

Podobnie jak dla stanu przed inwestycyjnego, po wdrożeniu systemu ITS Tychy zostały przeprowadzone badania czasu przejazdu w sieci drogowej. Badanie polegało na wykorzystaniu kamer ANPR zainstalowanych w punktach pomiarowych, które miały za zadanie rejestrację czasu przejazdu pomiędzy wybranymi punktami pomiarowymi. Łącznie, wskazano 12 punktów pomiarowych i zbadano 34 relacje pomiędzy punktami pomiarowymi (poprzez relację rozumie się dowolną trasę przejazdu łączącą dwa punkty pomiarowe). Dodatkowo we wskazanych punktach pomiarowych dokonano trzygodzinne pomiary ruchu z podziałem na 7 kategorii pojazdów w interwale 15-sto minutowym. Oba badania przeprowadzono dla pory porannej (od 06:15 do 09:15) i popołudniowej (od 14:15 do 17:15). Lokalizacja kamer ANPR prezentuje rysunek 1.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



Rysunek 1 Lokalizacja punktów pomiarowych

Źródło: Opracowanie własne

Badania czasu przejazdu z 16 maja 2023 roku

Badania czasu przejazdu w sieci drogowej zostały przeprowadzone 16 maja 2023 roku i zostały one wykonane metodą identyfikacji tablic rejestracyjnych. Jednakże przed włączeniem tych pomiarów do analiz należy uwzględnić następujące obserwacje i uwagi, które istotnie mogą wpłynąć na wyniki:

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

1. Zakłócenie ruchu na odcinku A09-A12 – czasy przejazdu oscylujące wokół 50 min w szczycie porannym, podczas gdy średni czas przejazdu tego odcinka to około 9 min (ten odcinek stanowi w przeważającej części droga krajowa DK1 oraz droga krajowa DK86). Na tym odcinku nie ma wdrożonej żadnej sygnalizacji świetlnej, są zainstalowane jedynie znaki VMS oraz stacje METEO. Nagrania z kamery w punkcie 12 wskazują na zator w miejscu pomiaru, w związku z czym odcinek jest niemiarodajny. Z uwagi na wskazaną sytuację odcinek A09-A12 został wykluczony z analizy porannej oraz popołudniowej.
2. Z uwagi na opisane powyżej zdarzenie na odcinku A09-A12 widać wyraźnie pogorszenie się warunków ruchowych na odcinku A06-A12 (przez większość czasu trwania pomiarów średnie czasy przejazdu oscylowały wokół 6-7 min, natomiast na czas zatoru wzrosły do ponad 20 min dla wielu pojazdów). Z uwagi na wskazaną sytuację odcinek A06 – A12 został wykluczony z analizy porannej oraz popołudniowej.
3. W dniu wykonywania pomiarów na ul. Mikołowskiej na wiadukcie nad torami kolejowymi (odcinek A01-A05 i A05-A01) z obydwu stron funkcjonuje zawężenie do 1 pasa ze względu na zły stan obiektu, ponadto na tym fragmencie wprowadzono ograniczenie do 30 km/h (długość odcinka około 500m). Opisana sytuacja ma wpływ na zwiększenie czasu przejazdu na tym odcinku.
4. Na ul. Mikołowskiej pomiędzy ul. Burshego oraz ul. Powstańców (odcinki A01-A05 oraz A05-A01) jest zainstalowany fotoradar, który wpływa na zachowania kierowców (ponadnormatywne hamowania w okolicy fotoradaru). Powoduje to zwiększenie czasu przejazdu na tym odcinku.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

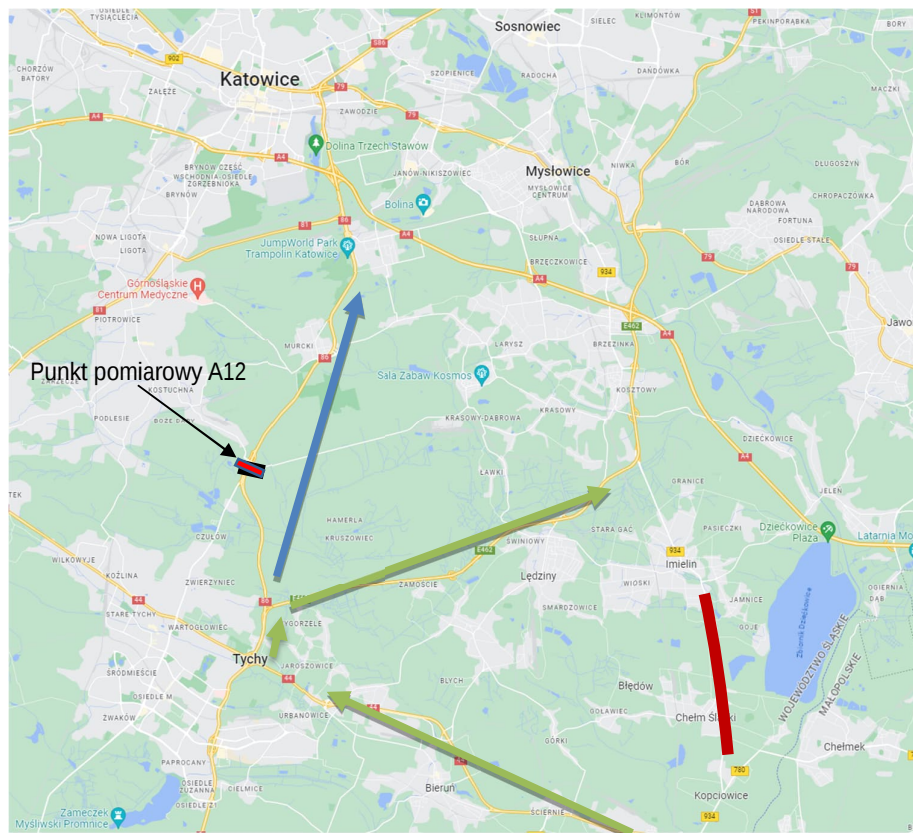
Badania czasu przejazdu z 30 maja 2023 roku dla odcinków A06-A12 oraz A09-A12 (dodatkowo uwzględnione w raporcie na wniosek Inwestora)

Badania te były zrealizowane 30.05.2023 roku i były wykonane tą samą technologią pomiarową co wcześniejszy pomiar. Dla odcinka pomiarowego A06-A12 nie zaobserwowano istotnych anomalii, dlatego w dalszej analizie dane pomiarowe zostały uzupełnione o te wyniki (szczegółowe wyniki zaprezentowano w kolejnych sekcjach raportu). Natomiast dla relacji A09-A12 czasy przejazdu ponownie znacząco odbiegały od stanu przed inwestycją, a średnie czasy przejazdu w szczycie popołudniowym oscylowały na poziomie pomiarów z 16 maja 2023 r. (w szczycie porannym nie zaobserwowano jedynie przejazdów o czasie przejazdu około 50min, co wskazuje na brak dodatkowego zatoru w okolicy punktu A12). Dodatkowo zgodnie z pomiarami w okresie porannym zarejestrowano 7202 pojazdy (w 2019 r. było 4516 pojazdów, czyli wzrost natężenia ruchu o 59,5%), a w szczycie popołudniowym zarejestrowano 6120 pojazdów (w 2019 r. było 3797 pojazdów, czyli wzrost natężenia ruchu o 60,7%). Z tego powodu konieczne było dokonanie szerszej analizy, w celu identyfikacji czynników, które mogą wpływać na ten stan rzeczy.

Jak wspomniano wcześniej odcinek pomiarowy A09-A12 w całości leży w ciągu dróg krajowych DK1 oraz DK86, zatem dokonano analizy w szerszym kontekście układu sieci drogowej wokół miasta Tychy. Od 30.09.2022 roku są prowadzone prace remontowe na DW934 (etap 1) w wyniku których został poprowadzony objazd drogami DK44 oraz DK1 i S1. Zgodnie z informacją na stronie jednostki realizującej inwestycję, czyli Zarząd Dróg Wojewódzkich w Katowicach, remont i wyznaczony objazd ma pozostać do września 2024 roku¹. Poglądowo na rysunku zaprezentowano układ drogowy wokół miasta Tychy oraz zaprezentowano wdrożony objazd (rysunek 2).

¹ Źródło: <http://www.edrogi.pl/raporty.html?view=marker> [data odczytu: 13.11.2023]

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

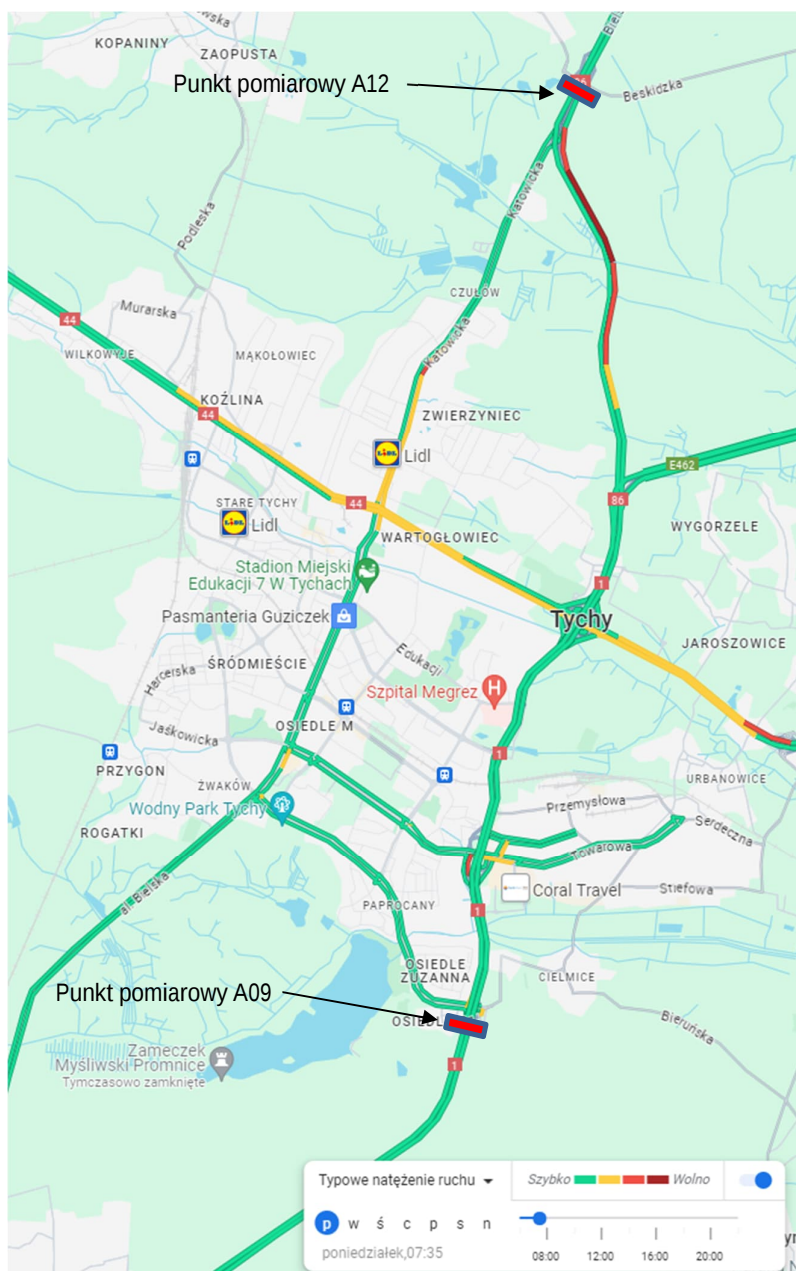


Rysunek 2 Układ drogowy wokół miasta Tychy oraz objazd wdrożony (zielone strzałki) w wyniku prac na DW934 (czerwona linia)

Źródło: www.google.com

Jak można zauważyć wdrożony objazd poprzez drogę DK1 oraz S1 znacząco wydłuża drogę podróży w przypadku pojazdów, których cel podróży znajduje się w Katowicach (lub dalej w kierunku metropolii). Objazd w praktyce może być nie realizowany przez kierowców, na rzecz przejazdu drogą DK86 (niebieska strzałka na rysunku 1). Oznaczałoby to, że w punkcie pomiarowym A12 będzie rejestrowana większa liczba pojazdów. Przedstawioną tezę popierają zarówno wyniki pomiarów jakie zostały zarejestrowane przez kamerę ANPR zabudowaną w ramach systemu ITS Tychy w punkcie A12 jak i dane w serwisie bazującym na danych z sondowania pojazdów (pojęcie z literatury anglojęzycznej : Floating Car Data) Typowe natężenie ruchu w obu szczytach z serwisu GoogleMaps zaprezentowano na rysunkach 3 i 4 poniżej.

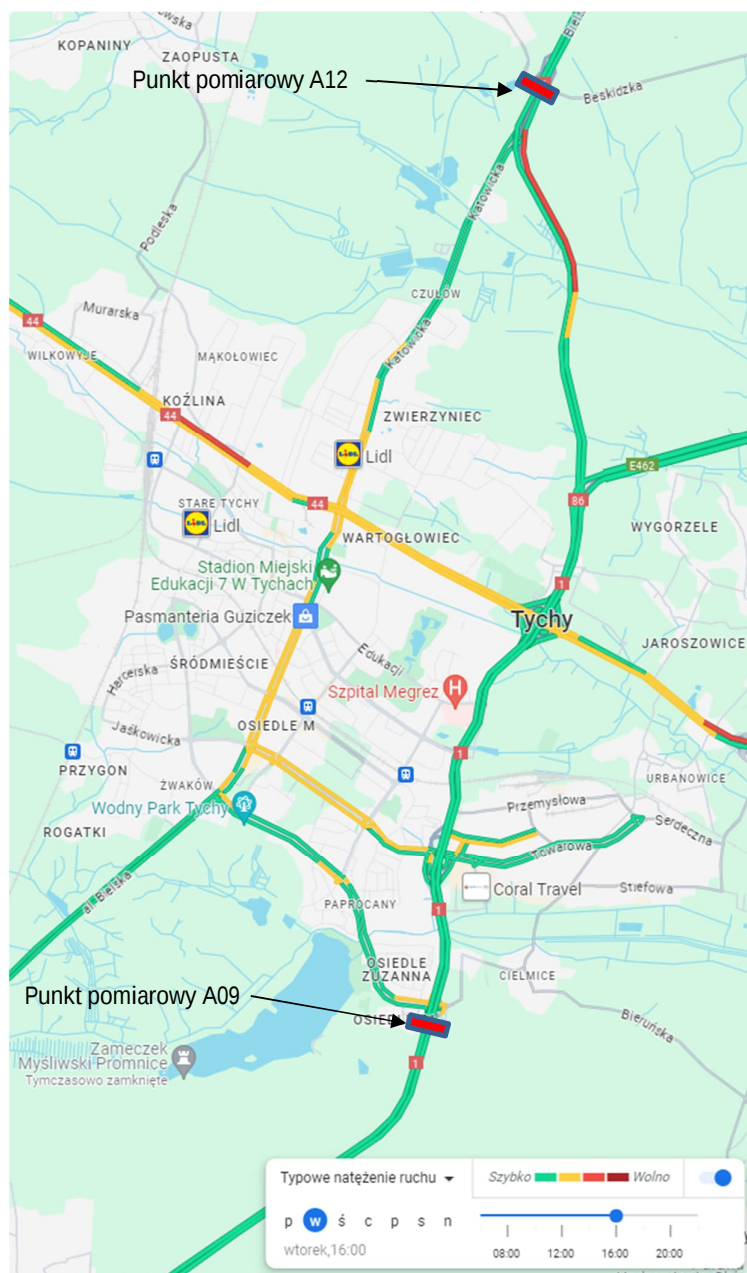
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



Rysunek 3 Typowe natężenie ruchu na fragmencie odcinka A09-A12 w szczycie porannym

Źródło: www.google.com

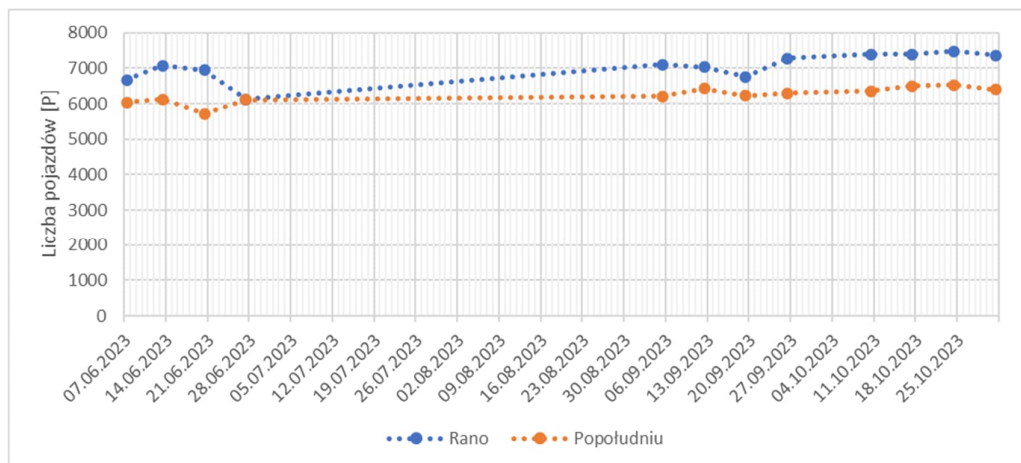
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



Rysunek 4 Typowe natężenie ruchu na fragmencie odcinka A09-A12 w szczycie popołudniowym
Źródło: www.google.com

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Natomiast zarejestrowane wielkości natężeń (bez struktury pojazdów) zostały zaprezentowane na wykresie poniżej (rysunek 5). Jak można zauważyć poziom natężenia ruchu w późniejszych dniach, po badaniach z 30 maja 2023 roku, jest porównywalny z natężeniem zarejestrowanym w dniu 30 maja. Świadczy to o tym, że remont DW934 istotnie wpływa na ruch drogowy w punkcie pomiarowym A12.



Rysunek 5 Liczba pojazdów zarejestrowana w wybranych dniach w punkcie A12

Źródło: opracowanie własne

Zgodnie z fundamentalnym równaniem ruchu, zwiększanie się natężenia ruchu drogowego przy jednoczesnym zwiększaniu gęstości ruchu istotnie wpływa na zmniejszenie prędkości potoku pojazdów. Taka sytuacja ma miejsce na ulicy Beskidzkiej przed punktem pomiarowym A12, co istotnie wpływa na czas przejazdu tym fragmentem drogi, co z kolei istotnie wpływa na czas przejazdu na relacji A09-A12. Analizując powyższe nie można uznać pomiaru czasu przejazdu na odcinku A09-A12 za miarodajny. Dodatkowo, uwzględnianie w analizie relacji A09-A12, wzdłuż DK1, bezpośrednio nie wykaże poprawności działania systemu ITS Tychy, ponieważ na tym odcinku nie ma wdrożonej żadnej sygnalizacji świetlnej, są zainstalowane jedynie znaki VMS oraz stacje METEO. Z tego też powodu nie uwzględnienie tego odcinka w dalszej analizie, nie wpłynie negatywnie na cel opracowania, czyli wykazanie wpływu systemu ITS Tychy na rzeczywisty czas przejazdu pojazdów.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Dodatkowo przy interpretacji wszystkich wyników należy mieć na uwadze, że od początku 2023 roku drastycznie zaostrzono kary za wykroczenia drogowe. Ma to zasadniczy wpływ na zachowania kierowców (bardzo ostrożne przejeżdżanie przez nie sygnalizowane przejścia dla pieszych, ogólnie wolniejsza i bardziej zachowawcza jazda). Zjawisko to można zaobserwować na wykresie prezentującym rozkład prawdopodobieństwa prędkości dla całości pomiarów (rysunek 7) – dla pomiarów czasu przejazdu dla stanu przed inwestycją obserwowalne było więcej przejazdów o prędkościach większych niż 100 km/h, niż po inwestycji.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

3. Wskaźnik rzeczywistego czasu przejazdu

3.1. Analiza ogólna empirycznego czasu przejazdu

Poniższa analiza bazuje na danych z pomiarów ruchu, które były realizowane w dniu 16 maja 2023 oraz danych uzupełnionych z dnia 30 maja 2023 roku. Zgodnie z założeniami i analizą zaprezentowaną w rozdziale 2, zostały pominięte pomiary dla odcinka A09-A12 dla stanu przed i po inwestycji (odcinek ten został wyłączony z analizy). Liczba wykonanych obserwacji, łącznie dla obu szczytów komunikacyjnych, to 26 501 pomiarów czasu przejazdów, które odbyły się w analizowanym okresie (dane pierwotne zawierały również ponadwymiarowe pomiary dla przejazdów realizowanych poza okresem analizy). Podobnie jak w badaniach przed inwestycyjnych, należało zweryfikować pomiary o wartości odstające, które nie będą reprezentować tylko czasu przejazdu, ale przejazd wraz z np. tymczasowym parkowaniem pomiędzy punktami pomiarowymi ANPR. W związku z tym zakresy pomiarów zostały zawężone do przejazdów miarodajnych, czyli takich, przy których można przyjąć, że nie występowały zatrzymania nie wynikające z przepisów ruchu drogowego lub warunków ruchu drogowego (szczegółowy opis założeń zawarto w opisie podrozdziale 3.3). Przy tych założeniach, dla wybranej próby badawczej, dla każdej relacji oraz osobno dla każdego szczytu komunikacyjnego, wyznaczono ogólną statystykę, tj. wartość średnią, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności czasu przejazdu oraz pierwszy, drugi i trzeci kwartył. Wyniki zaprezentowano w tabelach 1 oraz 2. Zapis relacja A01-A02 oznacza przejazd pomiędzy punktem pomiarowym A01, z punktem pomiarowym A02.

Przyjęte oznaczenia (zgodnie z opisem metodyki):

R^{R-ITS} – zbiór relacji dla szczytu porannego,

R^{P-ITS} – zbiór relacji dla szczytu popołudniowego,

$\bar{P}_i^{R-ITS}$ – wartość średnia czasu przejazdu dla i-tej relacji dla szczytu porannego [min],

$\bar{P}_j^{P-ITS}$ – wartość średnia czasu przejazdu dla j-tej relacji dla szczytu popołudniowego [min],

$\bar{S}_i^{R-ITS}$ – wartość odchylenia standardowego pomiarów dla i-tej relacji dla szczytu porannego [min],

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

$\bar{S}_j^{P-ITS}$ – wartość odchylenia standardowego pomiarów dla j-tej relacji dla szczytu popołudniowego [min],

$Q1_i^{R-ITS}$ – pierwszy kwartył czasu przejazdu dla i-tej relacji dla szczytu porannego [min],

$Q1_j^{P-ITS}$ – pierwszy kwartył przejazdu dla j-tej relacji dla szczytu popołudniowego [min],

Me_i^{R-ITS} – mediana czasu przejazdu dla i-tej relacji dla szczytu porannego [min],

Me_j^{P-ITS} – mediana czasu przejazdu dla j-tej relacji dla szczytu popołudniowego [min],

$Q3_i^{R-ITS}$ – trzeci kwartył czasu przejazdu dla i-tej relacji dla szczytu porannego [min],

$Q3_j^{P-ITS}$ – trzeci kwartył przejazdu dla j-tej relacji dla szczytu popołudniowego [min],

V_i^{R-ITS} – wartość współczynnika zmienności czasu przejazdu dla i-tej relacji dla szczytu porannego [%],

V_j^{P-ITS} – wartość współczynnika zmienności czasu przejazdu dla j-tej relacji dla szczytu popołudniowego [%].

Tabela 1 Statystyka opisowa dla pomiaru czasu przejazdu dla szczytu porannego po inwestycji

Relacja	$\bar{P}_i^{R-ITS}$ [min]	$\bar{S}_i^{R-ITS}$ [min]	$Q1_i^{R-ITS}$ [min]	Me_i^{R-ITS} [min]	$Q3_i^{R-ITS}$ [min]	V_i^{R-ITS} [%]
A01-A02	4,90	0,55	4,48	4,88	5,24	11,2%
A01-A03	7,66	0,91	6,96	7,98	8,32	11,9%
A01-A04	10,11	1,75	8,80	10,41	11,47	17,3%
A01-A05	4,54	0,91	3,68	4,66	5,25	20,1%
A01-A06	4,45	0,91	3,65	4,49	5,15	20,5%
A01-A07	2,90	0,35	2,67	2,95	3,17	12,0%
A02-A01	8,62	2,27	6,69	8,35	10,31	26,3%
A02-A05	10,92	1,75	9,29	10,72	12,79	16,0%
A02-A06	10,75	1,61	9,73	11,26	11,43	15,0%
A03-A01	10,88	2,20	9,56	11,03	12,58	20,2%
A03-A05	5,47	1,59	4,54	5,31	6,56	29,0%
A03-A06	4,91	1,09	3,94	5,06	5,81	22,2%
A03-A08	3,86	0,63	3,45	3,78	4,27	16,4%
A04-A01	11,29	2,04	9,17	11,61	13,38	18,0%
A04-A05	6,53	1,77	5,45	6,35	8,08	27,1%
A04-A06	7,28	1,61	5,90	6,93	8,09	22,2%
A04-A10	2,00	0,58	1,52	1,98	2,39	29,2%
A05-A01	6,30	1,06	5,43	6,41	7,20	16,8%
A05-A02	9,24	0,54	8,82	9,09	9,65	5,9%
A05-A03	5,30	0,67	4,95	5,31	5,68	12,7%
A05-A04	4,58	0,98	3,95	4,34	5,25	21,3%
A05-A06	1,51	0,50	1,08	1,42	1,94	33,5%
A06-A01	5,62	0,66	5,13	5,61	6,10	11,8%
A06-A02	9,40	2,37	7,85	8,99	11,76	25,3%
A06-A03	4,12	0,90	3,34	4,06	4,86	21,9%

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

A06-A04	5,62	0,81	5,30	5,66	6,38	14,4%
A06-A05	2,56	1,11	1,67	2,52	3,35	43,4%
A06-A12	4,96	0,30	4,74	5,00	5,20	6,10%
A07-A01	2,85	0,41	2,56	2,87	3,17	14,4%
A08-A03	4,08	0,75	3,52	3,94	4,56	18,4%
A10-A04	2,01	0,55	1,61	1,99	2,40	27,2%
A12-A06	5,53	0,54	5,18	5,53	5,89	9,8%
A12-A09	6,93	0,81	6,27	6,90	7,57	11,7%
Średnia	5,99	1,08	5,18	5,98	6,83	19,1%

Źródło: opracowanie własne

Tabela 2 Statystyka opisowa dla pomiaru czasu przejazdu dla szczytu popołudniowego po inwestycji

Relacja	$\bar{P}_j^{P-ITS}$ [min]	$\bar{S}_j^{P-ITS}$ [min]	$Q1_j^{P-ITS}$ [min]	Me_j^{P-ITS} [min]	$Q3_j^{P-ITS}$ [min]	V_j^{P-ITS} [%]
A01-A02	5,62	0,51	5,20	5,68	6,04	9,1%
A01-A03	7,47	0,72	6,95	7,62	7,99	9,6%
A01-A04	10,73	1,48	9,96	10,60	11,98	13,8%
A01-A05	4,50	0,77	3,88	4,66	5,12	17,2%
A01-A06	3,99	0,53	3,61	4,03	4,48	13,2%
A01-A07	3,00	0,28	2,83	3,05	3,21	9,3%
A02-A01	11,08	1,67	9,66	11,34	12,48	15,1%
A02-A05	16,29	2,14	14,75	17,51	17,54	13,1%
A02-A06	10,97	1,62	9,41	11,34	12,45	14,7%
A03-A01	12,77	2,22	10,71	13,09	14,65	17,4%
A03-A05	4,76	0,79	4,17	4,91	5,36	16,7%
A03-A06	4,99	0,98	4,22	5,17	5,82	19,6%
A03-A08	5,24	0,78	4,68	5,28	5,82	14,9%
A04-A01	14,89	2,10	12,72	15,01	16,69	14,1%
A04-A05	5,69	0,84	5,26	5,54	6,17	14,7%
A04-A06	8,16	1,51	7,11	8,15	9,29	18,5%
A04-A10	2,18	0,50	1,82	2,18	2,59	23,0%
A05-A01	6,14	0,86	5,42	6,24	6,80	14,0%
A05-A02	12,38	3,30	9,56	12,29	15,80	26,7%
A05-A03	5,23	0,65	4,79	5,29	5,77	12,4%
A05-A04	5,01	0,97	4,20	5,13	5,75	19,5%
A05-A06	1,33	0,39	1,03	1,22	1,60	29,2%
A06-A01	6,03	0,76	5,42	6,01	6,57	12,6%
A06-A02	10,55	1,93	9,15	10,49	12,12	18,2%
A06-A03	5,18	0,93	4,47	5,25	5,95	18,0%
A06-A04	7,66	2,04	6,34	7,40	8,80	26,6%
A06-A05	2,70	0,70	2,24	2,74	3,36	26,0%
A06-A12	4,71	0,34	4,48	4,77	4,98	7,3%
A07-A01	5,27	1,73	3,74	5,23	6,74	32,9%
A08-A03	4,26	0,38	3,98	4,35	4,57	9,0%
A10-A04	1,98	0,43	1,65	1,98	2,31	21,7%
A12-A06	5,89	0,46	5,53	5,91	6,25	7,9%

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

A12-A09	6,50	0,47	6,15	6,48	6,86	7,2%
Średnia	6,76	1,08	5,91	6,85	7,63	16,5%

Źródło: opracowanie własne

Analizując wyniki można zauważyć, że generalnie pora popołudniowa charakteryzuje się zwiększonym średnim czasem przejazdu, średnio czas przejazdu w sieci transportowej zwiększa się o 15,0% (porównując średnią median), natomiast różnica ta wyrażona w jednostce czasu, to niespełna 1 minuta. Pora popołudniowa charakteryzuje się też nieznacznie mniejszą zmiennością. W porze porannej tylko 2 badane relacje charakteryzowały się średnią zmiennością większą niż 30%, natomiast w porze popołudniowej była to tylko jedna relacja. Największą zmiennością w porze porannej w czasie przejazdu charakteryzują się trasy przejazdu określone relacjami: A05 – A06 oraz A06 – A05. W porze popołudniowej relacjami o największej zmienności w czasie przejazdu była A07 – A01.

Kolejna statystyka prezentuje liczbę pojazdów, które zostały zarejestrowane przez układ pomiarowy oraz które zostały wybrane do analizy, zgodnie z opisem powyżej. Wyniki prezentuje tabela 3.

Tabela 3 Liczba pojazdów poddana analizie w ujęciu na relację i w zależności od pory doby

Relacja	Liczba pojazdów [Poj.]	
	Pora poranna	Pora popołudniowa
A01-A02	188	436
A01-A03	55	52
A01-A04	24	28
A01-A05	997	930
A01-A06	136	182
A01-A07	1862	1508
A02-A01	233	67
A02-A05	10	8
A02-A06	9	13
A03-A01	51	60
A03-A05	30	30
A03-A06	292	175
A03-A08	85	127
A04-A01	19	32
A04-A05	23	25
A04-A06	43	31

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

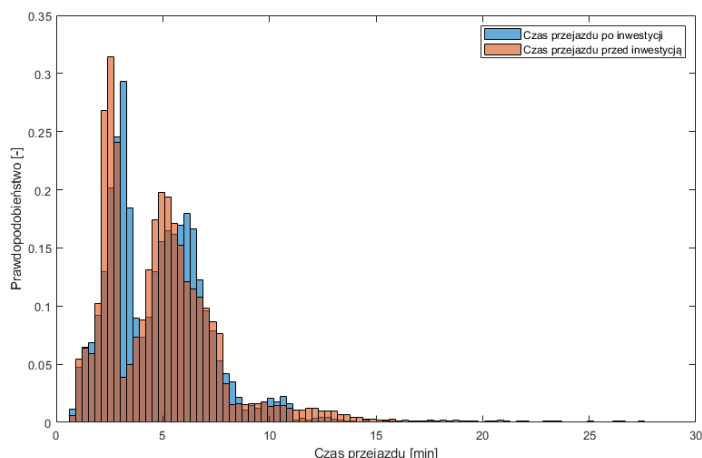
Relacja	Liczba pojazdów [Poj.]	
	Pora poranna	Pora popołudniowa
A04-A10	321	400
A05-A01	649	851
A05-A02	5	24
A05-A03	33	53
A05-A04	18	21
A05-A06	349	339
A06-A01	124	112
A06-A02	11	12
A06-A03	183	285
A06-A04	19	15
A06-A05	281	238
A06-A12	239	336
A07-A01	1779	1847
A08-A03	199	117
A10-A04	487	666
A12-A06	614	959
A12-A09	1137	1681
SUMA	10 505	11 660

Źródło: opracowanie własne

Najbardziej obciążonymi odcinkami są odcinki A01-A07 oraz A07-A01, gdzie natężenie ruchu wynosi około 1800 pojazdów, co może wskazywać na chwilowe zbliżanie się natężenia do przepustowości odcinka. Dodatkowo powyższe wyniki wskazują, że w sieci drogowej są odcinki, które charakteryzują się niskim natężeniem ruchu drogowego. Dla analizy prostej (bezpośredniej) należy przyjąć, że jest to charakterystyka tych odcinków, natomiast dla analizy zaawansowanej będzie to stosowane jako kryterium wyboru danej relacji do dalszych analiz. Wynika to z założeń metodyki modelowania matematycznego, gdzie jest wymagana liczba minimalna obserwacji. Szczegóły w dalszej części analizy.

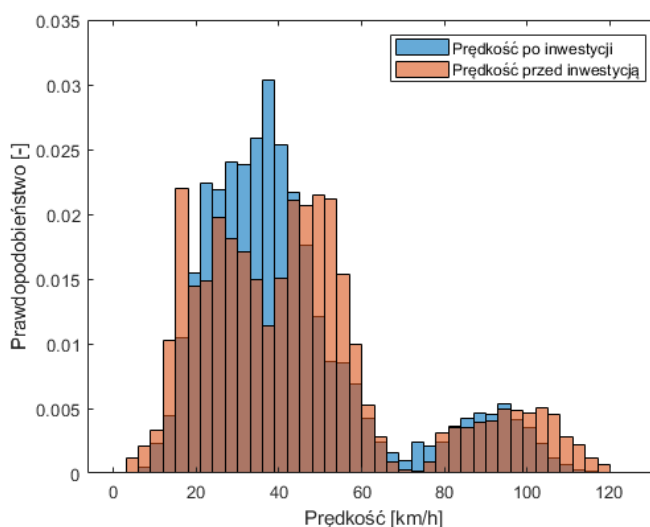
Inny rodzaj analizy jaki może dawać informację na temat empirycznego czasu przejazdu i jego charakterystyki to analiza rozkładu prawdopodobieństwa. Z uwagi, że pomiary dotyczą odcinków o różnej długości należy przeanalizować dodatkowo rozkład prawdopodobieństwa dla prędkości. Wyniki prezentują rysunki 6 oraz 7. Dodatkowo na wykresach umieszczono rozkład prędkości i czasu przejazdu dla stanu przed inwestycyjnego.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



Rysunek 6 Rozkład prawdopodobieństwa czasu przejazdu dla wszystkich pomiarów objętych analizą

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 7 Rozkład prawdopodobieństwa prędkości dla wszystkich pomiarów objętych analizą

Źródło: opracowanie własne

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Zaprezentowane wykresy umożliwiają wizualną ocenę rozkładu wybranych parametrów. W analizowanym przypadku można zauważyć, że ponad 90% podróży jest realizowanych w przeciągu 10 min. Natomiast prawie 80% podróży odbywa się z prędkością mniejszą niż 40 km/h. Analizując profil prędkości dla rozkładu prawdopodobieństwa można zauważyć, że dla pomiaru po inwestycyjnego zwiększyła się grupa przejazdów o nieznacznie większej prędkości średniej niż to było zarejestrowane w pomiarach przed inwestycją. Dodatkowo można zaobserwować wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia prędkości z zakresu 20 – 45 km/h, natomiast zmniejszyło się prawdopodobieństwo wystąpienia prędkości z zakresu 50 – 70 km/h oraz powyżej 90 km/h. Pierwsza obserwacja może sugerować poprawę płynności ruchu, ponieważ zmniejszyło się prawdopodobieństwo wystąpienia mniejszych prędkości niż 20 km/h. Natomiast druga obserwacja może potwierdzać wpływ zmiany legislacji o prawie drogowym wspomnianej w rozdziale 2.

3.2. Oszacowanie wskaźka A (metoda prosta)

Otrzymane pomiary czasu przejazdu dla stanu przed (szczegółowe wyniki zawarto w załączniku 1) i po inwestycyjnego zostały porównane w celu oszacowania wskaźnika skrócenia rzeczywistego czasu przejazdu zgodnie z założeniami metodyki. Obliczone współczynniki zmienności dla stanu po inwestycyjnego wskazują na niedużą zmienność w czasie przejazdu na poszczególnych relacjach. W związku z tym, zgodnie z metodyką, do analizy porównawczej jako miarę centralną należy wybrać średnią arytmetyczną. Zatem wybrany parametr opisujący i-tą relację dla pomiaru porannego dla stanu przed inwestycyjnego W_i^{R-ITS} będzie równy wartości średniej, czyli formalnie można to zapisać: $W_i^{R-ITS} = \bar{P}_j^{R-ITS}, \forall i \in R^{R-ITS}$ oraz $W_j^{P-ITS} = \bar{P}_j^{P-ITS}, \forall j \in R^{P-ITS}$. Natomiast dla stanu przed inwestycyjnego zostały przyjęte następujące oznaczenia: $W_i^R = \bar{P}_j^R, \forall i \in R^R$ oraz $W_j^P = \bar{P}_j^P, \forall j \in R^P$. Wartości przeciętne dla stanu przed i po inwestycyjnego zaprezentowano w tabeli 4.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Tabela 4 Średnie czasy przejazdu dla stanu przed i po inwestycyjnego dla obu szczytów komunikacyjnych (R – rano, P – popołudniu)

Relacja	$\bar{P}_f^{R-ITS}$ [min]	$\bar{P}_f^R$ [min]	$\bar{P}_f^{P-ITS}$ [min]	$\bar{P}_f^P$ [min]
A01-A02	4,90	4,90	5,62	5,14
A01-A03	7,66	7,95	7,47	8,88
A01-A04	10,11	10,33	10,73	11,70
A01-A05	4,54	5,12	4,50	4,58
A01-A06	4,45	4,58	3,99	4,44
A01-A07	2,90	2,60	3,00	2,64
A02-A01	8,62	8,27	11,08	9,30
A02-A05	10,92	13,68	16,29	18,55
A02-A06	10,75	12,39	10,97	10,97
A03-A01	10,88	11,38	12,77	13,80
A03-A05	5,47	4,86	4,76	4,32
A03-A06	4,91	4,14	4,99	4,35
A03-A08	3,86	3,53	5,24	6,49
A04-A01	11,29	13,25	14,89	15,13
A04-A05	6,53	11,84	5,69	15,86
A04-A06	7,28	7,97	8,16	7,09
A04-A10	2,00	1,78	2,18	1,88
A05-A01	6,30	8,24	6,14	11,35
A05-A02	9,24	14,90	12,38	17,72
A05-A03	5,30	5,37	5,23	5,46
A05-A04	4,58	14,89	5,01	15,43
A05-A06	1,51	1,34	1,33	1,24
A06-A01	5,62	7,19	6,03	10,02
A06-A02	9,40	15,17	10,55	14,93
A06-A03	4,12	4,52	5,18	4,80
A06-A04	5,62	6,93	7,66	7,77
A06-A05	2,56	2,73	2,70	2,32
A06-A12	4,96	5,14	4,71	5,06
A07-A01	2,85	2,58	5,27	6,31
A08-A03	4,08	3,85	4,26	4,31
A10-A04	2,01	1,78	1,98	1,91
A12-A06	5,53	5,09	5,89	5,07
A12-A09	6,93	6,84	6,50	6,35
Średnia	5,99	7,13	6,76	8,04

Źródło: opracowanie własne

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Zgodnie z metodyką do oszacowania wskaźnika redukcji czasu przejazdu należy obliczyć: wielkość zmiany dla szczytu porannego Z_i^R i szczytu popołudniowego Z_j^P oraz stopień zmiany czasu przejazdu W_A^R oraz W_A^P . Rezultaty obliczeń zaprezentowano w tabeli 5. Wartość pozytywna oznacza pogorszenie czasu przejazdu, natomiast wartość ujemna oznacza poprawę. Poza procentową wartością zmiany zaprezentowano również zmianę w średnim czasie przejazdu wyrażoną w wartościach bezwzględnych.

Tabela 5 Wielkość zmian dla każdej relacji oraz wskaźniki zmiany w czasie przejazdu dla obu pór doby

Relacja	Różnica: $\bar{P}_j^{R-ITS} - \bar{P}_j^R$ [min]	Różnica: $\bar{P}_j^{P-ITS} - \bar{P}_j^P$ [min]	Z_i^R	Z_j^P	Średnia z Z_i^R i Z_j^P
A01-A02	-0,01	0,48	-0,13%	9,34%	4,61%
A01-A03	-0,29	-1,40	-3,64%	-15,81%	-9,73%
A01-A04	-0,22	-0,97	-2,17%	-8,30%	-5,24%
A01-A05	-0,58	-0,09	-11,35%	-1,88%	-6,62%
A01-A06	-0,13	-0,44	-2,86%	-10,00%	-6,43%
A01-A07	0,29	0,36	11,31%	13,46%	12,38%
A02-A01	0,35	1,78	4,26%	19,15%	11,70%
A02-A05	-2,76	-2,26	-20,16%	-12,18%	-16,17%
A02-A06	-1,64	0,00	-13,22%	0,03%	-6,60%
A03-A01	-0,50	-1,03	-4,39%	-7,49%	-5,94%
A03-A05	0,61	0,45	12,52%	10,35%	11,44%
A03-A06	0,77	0,64	18,65%	14,67%	16,66%
A03-A08	0,33	-1,25	9,47%	-19,24%	-4,88%
A04-A01	-1,96	-0,24	-14,78%	-1,56%	-8,17%
A04-A05	-5,31	-10,18	-44,86%	-64,15%	-54,51%
A04-A06	-0,69	1,08	-8,65%	15,22%	3,28%
A04-A10	0,22	0,30	12,11%	15,80%	13,95%
A05-A01	-1,94	-5,21	-23,55%	-45,91%	-34,73%
A05-A02	-5,67	-5,35	-38,02%	-30,17%	-34,09%
A05-A03	-0,07	-0,24	-1,30%	-4,36%	-2,83%
A05-A04	-10,30	-10,42	-69,21%	-67,55%	-68,38%
A05-A06	0,17	0,09	12,35%	7,27%	9,81%
A06-A01	-1,57	-3,99	-21,90%	-39,86%	-30,88%
A06-A02	-5,78	-4,38	-38,07%	-29,31%	-33,69%
A06-A03	-0,41	0,38	-9,00%	7,90%	-0,55%
A06-A04	-1,31	-0,11	-18,90%	-1,39%	-10,14%
A06-A05	-0,17	0,39	-6,08%	16,75%	5,33%
A06-A12	-0,43	-0,35	-3,57%	-6,92%	-5,25%

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

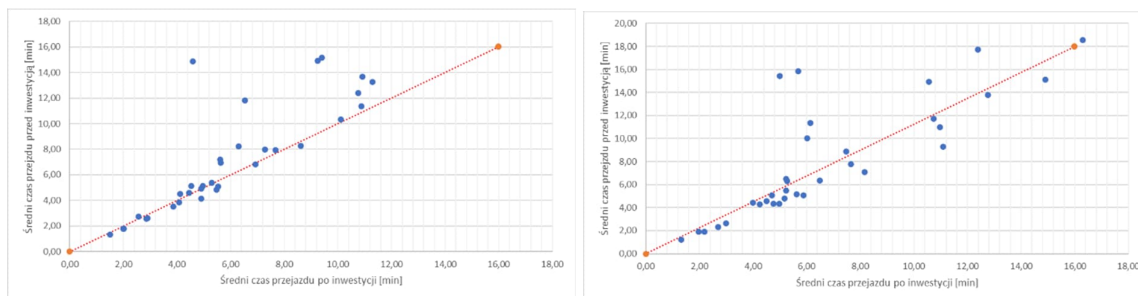
Relacja	Różnica: $\bar{P}_j^{R-ITS} - \bar{P}_j^R$ [min]	Różnica: $\bar{P}_j^{P-ITS} - \bar{P}_j^P$ [min]	Z_i^R	Z_j^P	Średnia z Z_i^R i Z_j^P
A07-A01	0,27	-1,04	10,55%	-16,46%	-2,96%
A08-A03	0,23	-0,05	6,02%	-1,22%	2,40%
A10-A04	0,24	0,07	13,23%	3,81%	8,52%
A12-A06	0,44	0,82	8,74%	16,14%	12,44%
A12-A09	0,09	0,14	1,29%	2,27%	1,78%
Średnia	-1,14	-1,27	$W_A^R = -7,13\%$	$W_A^P = -7,02\%$	$W_A = -7,07\%$

Źródło: opracowanie własne

Analizując wyniki opracowane zgodnie z założeniami metodyki, przeciętna redukcja czasu przejazdu w sieci drogowej wynosi prawie 7,07%.

Stopień zmiany dla wskaźnika A bazuje na wartościach względnych wyrażonych w procentach. Z tego powodu powinno się dokonać dodatkowej analizy porównania redukcji czasu przejazdu w wartościach bezwzględnych. Wielkości te można odnaleźć w kolumnie 2 i 3 powyższej tabeli. Średni globalny czas przejazdu dla szczytu porannego wyniósł 5,99 minuty, a dla szczytu popołudniowego 6,76 minuty (szczegóły w tabeli 4). Odpowiednio dla pomiarów przed inwestycyjnych te wartości wynosiły: 7,19 i 8,13 minuty (pominięto odrzuconą relację A09-A12). Redukcja przeciętnego czasu przejazdu wyniosła: 1,14 dla szczytu porannego oraz 1,27 minuty dla szczytu popołudniowego. Odnosząc to do wartości średnich globalnych dla wykonanych pomiarów przed inwestycyjnych można wykazać redukcję w czasie przejazdu o 15,93% oraz 15,85%. Natomiast ten wynik wskazuje średnią redukcję dla przeciętnego przejazdu w sieci transportowej, zatem tras krótkich oraz długich. Wyniki z tabeli 4 można również zaprezentować w postaci wykresów (rysunek 8), co lepiej zobrazuje jakie różnice występują w bezpośrednim porównaniu czasu przejazdu.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



Rysunek 8 Średnie czasy przejazdu dla stanu przed i po inwestycyjnego dla obu szczytów komunikacyjnych (rano – po lewej, popołudniu – po prawej)

Źródło: opracowanie własne

Linia czerwona przerywana poglądowo pokazuje sytuację kiedy czasy przejazdu przed i po inwestycji byłyby identyczne. Punkty znajdujące się nad tą linią oznaczają, że nastąpiła redukcja czasu przejazdu w stosunku do stanu przed inwestycyjnego. Punkty pod linią oznaczają pogorszenie się parametru jakim jest średni czas przejazdu. Im większa jest odległość punktów od prostej tym większa jest zmiana w średnim czasie przejazdu: nad linią, oznacza dużą redukcję, a pod linią oznacza duży wzrost. Analizując te wykresy można zaobserwować znaczącą poprawę, ponieważ wiele punktów znajduje się w okolicach prostej, czyli niewielkie zmiany w czasie przejazdu, natomiast jest kilka relacji dla których czas przejazdu znacząco zredukował się. W przypadku szczytu popołudniowego występuje nieznacznie więcej relacji dla których odnotowano wzrost przeciętnego czasu przejazdu. Jednakże średnia redukcja dla średnich czasów przejazdu dla obu szczytów komunikacyjnych wyniosła ponad 16%. Natomiast wartości te powinny być interpretowane jako kierunek zmian, ponieważ tak samo traktują każdy przejazd.

Podobną analizę można dokonać na bazie innych miar statystycznych jakimi są kwartyle. Dla szczytu porannego średnia wartość pierwszego kwartyla wyniosła 5,18, wartość drugiego kwartyla (mediana) wyniosła 5,98, a wartość trzeciego kwartyla wyniosła 6,83 minuty. Natomiast dla pomiarów przed inwestycją wartości te wynosiły odpowiednio: 5,34, 6,79 i 8,59 minuty. Oznacza to, że miary te wykazują średnią redukcję o 3,00%, 11,93% oraz 20,49%. Dla szczytu popołudniowego dla stanu po inwestycyjnego wartości te wyniosły: 5,91, 6,85 oraz 7,63 minuty, a dla stanu przed inwestycyjnego: 6,28, 7,83 oraz 9,65 minuty. Dla tego szczytu komunikacyjnego redukcja również jest widoczna dla wszystkich miar i wyniosła ona: 5,89%, 12,52% oraz 20,93%. Wyniki te wskazują, że redukcja rzeczywistego czasu przejazdu jest tym

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

większa im dłuższa jest podróż w sieci transportowej. Wniosek ten potwierdza również wykres rozkładu prędkości i czasu przejazdu zaprezentowany wcześniej.

Podsumowując, analizując otrzymane dane dla pomiarów zrealizowanych przed i po inwestycji, zgodnie z założeniami metodyki, można zaobserwować, że wystąpiła średnia redukcja na poziomie 7,07% dla średnich zmian czasu przejazdu w relacjach objętych analizą opracowania.

3.3. Dopasowanie postaci funkcyjnej do empirycznego czasu przejazdu (metoda zaawansowana)

3.3.1. Główne założenia

Na podstawie opracowanej metodyki, pierwszym krokiem jest przygotowanie założeń do analizy dopasowania popularnych funkcyjnych postaci wiążących czas przejazdu (prędkość przejazdu) z natężeniem oraz z gęstością ruchu drogowego. Przyjęto następujące założenia:

Z1. Poligonem badawczym są ciągi ulic i/lub wybrany obszar sieci drogowej. Oznacza to, że badając parametry ruchu dla wybranych ciągów drogowych i wyznaczając relacje pomiędzy nimi, należy przyjąć, że dla kolejnych odcinków drogowych składających się na dany ciąg ulic/obszar sieci, wyznaczone charakterystyki będą takie same. Wyznaczona funkcyjna postać będzie opisywać opór dla danej relacji w sieci drogowej pomiędzy wybraną parą punktów pomiarowych.

Z2. Ze względu na niemożliwość określenia dokładnego przebiegu trasy przejazdu pomiędzy punktami pomiarowymi założono, że agregacja danych empirycznych będzie się odnosić do zbadanych relacji pomiędzy punktami pomiarowymi. Oznacza to, że w dalszej analizie pomiary czasu przejazdu w ramach danej relacji nie były łączone z innymi. Wynika to ze zróżnicowanej kategoryzacji odcinków drogowych występujących w ciągu danej relacji oraz różnych oporów tworzonych przez skrzyżowania. Zaleca się, aby to grupowanie było tożsame dla wariantów między inwestycyjnego i po inwestycyjnego.

Z3. Analizie zostały poddane tylko pomiary spełniające warunki opisane w pkt. 2.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Z4. Ze względu braku pomiaru chwilowego natężenia (lub gęstości) ruchu w trakcie pomiarów, przyjęto jako typową reprezentację tych wartości, natężenie zmierzone w ramach pomiaru ruchu dla każdego 15 minutowego interwału. Oznacza to, że dla każdego pomiaru czasu przejazdu wartość natężenia jest taka sama.

Z5. Wstępnie dla każdej relacji i każdej pory dnia określono:

- a. Prędkość potoku pojazdów w ruchu swobodnym V_0 [km/h] została wyznaczona przez wartość dla percentyla 0,85 empirycznej prędkości,
- b. Prędkość optymalna potoku pojazdów V_{opt} [km/h] została wyznaczona przez wartość dla percentyla 0,50 empirycznej prędkości,
- c. Natężenie ruchu q [P/h] dla danej relacji zostało przypisane na podstawie pomiaru ruchu, który został zrealizowany w trakcie badań czasu przejazdu. Ze względu na zróżnicowaną strukturę ruchu drogowego, natężenie to zostało przeliczone na wartość natężenia w pojazdach umownych $\hat{q}$ [E/h],
- d. Natężenie ruchu dla jednego pasa ruchu $\hat{q}^p$ [E/h/pas] zostało wyznaczone na podstawie przeciętnej liczby pasów ruchu dla danej relacji,
- e. Gęstość potoku pojazdów $\hat{k}$ [E/km] została wyznaczona na podstawie fundamentalnego równania ruchu,
- f. Gęstość potoku ruchu na pas ruchu $\hat{k}^p$ [E/km/pas] została wyznaczona na podstawie przeciętnej liczby pasów ruchu dla danej relacji,
- g. Przyjęto, że maksymalna gęstość potoku na pas ruchu $\hat{k}_{max}^p$ w danej relacji to 150 E/km/pas.
- h. Prędkość minimalna V_{min} [km/h] to 5 km/h (lub przyjęto, że czas przejazdu jest mniejszy niż 90 percentyl próby badawczej).

Z6. Dopasowanie funkcyjnej postaci do empirycznych pomiarów ruchu zostało zrealizowane na podstawie minimalizacji błędu RMSE.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Z7. W ramach analiz testowano trzy postacie funkcyjne dla funkcji oporu relacji:

- a. Funkcję BPR,
- b. Funkcję Overgaard'a,
- c. Funkcję Inrets.

Z8. W ramach analiz testowano trzy postacie funkcyjne dla funkcji QVK:

- a. Funkcję Underwood'a,
- b. Funkcję vanAndere,
- c. Funkcję prof. Krystka.

Należy zaznaczyć, że większość założeń z pkt. Z5 miała charakter wstępny, tzn. optymalne wartości dla danego zbioru danych empirycznych zostały określone w ramach procesu optymalizacji funkcji błędu dopasowania (parametry te były zmiennymi w modelu optymalizacyjnym). Oznacza to, że dla każdej relacji określono wartości punktów charakterystycznych opisujących parametry ruchu drogowego oraz określono parametry modelu (parametry opisujące punkty charakterystyczne ruchu oraz parametry modelu były zmiennymi i były określane w ramach procesu optymalizacji).

Powyższe założenia zostały dobrane na podstawie dostępnej literatury dziedzinowej, z której wynika również, że sposób doboru makro parametrów ruchu (średnia prędkość ruchu w przestrzeni, natężenie ruchu, gęstość ruchu) powinny być dopasowane do danych empirycznych. Z uwagi, że pomiary przed i po inwestycji obejmowały tylko jeden wybrany dzień pomiarów, zmieniły się zakresy maksymalne wartości tychże parametrów. Aby analiza była porównywalna dokonano ponownej re-optymalizacji parametrów wybranych modeli (z modyfikacją szerokości przedziałów dla makro-parametrów ruchu drogowego) oraz ponownie określono, które modele są adekwatne dla danej relacji. Wyniki analizy dla stanu przed inwestycyjnego zaprezentowano w załączniku 2. Taką samą procedurę zastosowano do danych po inwestycyjnych, natomiast wyniki załączono poniżej.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

3.3.2. Agregacja danych pomiarowych

Analogicznie jak dla danych pomiarowych przed inwestycją, ze względu na specyfikę rezultatów badań ANPR nie jest wskazane łączenie danych uzyskanych dla danej relacji pomiarów, tzn. nie powinno się agregować np. danych pomiarowych z relacji A01-A02 z danymi A03-A05. Opór danego segmentu sieci wyznaczonej przez punkty pomiarowe jest sekwencją poszczególnych odcinków sieci drogowej oraz kolejnych skrzyżowań. O ile w wyniku klasyfikacji odcinków drogowych możliwe byłoby połączenie zestawów danych dla różnych relacji pomiarowych, to zakładanie jednakowej generacji dla skrzyżowań mogłoby być błędem. Pomimo podobnej geometrii, skrzyżowania mogą generować różny opór, wynikający z innego sterowania, co wpływa na czas przejazdu. Stąd przyjęto założenie Z2 opisane w sekcji 2.

Mając na uwadze inny charakter ruchu drogowego w porannej porze dnia i popołudniowej oraz powyższe, zbiór indeksów dla danych dla stanu przed inwestycyjnego można opisać:

$$TD = \{1, 2, \dots, 66\}$$

Indeksy $\{1, 2, \dots, 33\}$ są indeksami dla pory porannej, a indeksy $\{34, 36, \dots, 66\}$ korespondują do kolejnych pomiarów dla pory popołudniowej.

3.3.3. Oszacowanie i wybór funkcji oporu

Zgodnie z krokiem 3 metodyki, należy wybrać minimum 3 funkcje oporu, które będą opisywać funkcyjną zależność $f_i(q)$, $i \in TD$ dla każdego zbioru danych. Na podstawie analizy literatury [3,4,5,6], wybrano trzy funkcje, które są stosowane do opisu ruchu w sieciach miejskich. Są to:

- funkcja BPR,
- funkcja Overgaard'a,
- funkcja Inrets.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Jak wspomniano to wcześniej, dane otrzymane z pomiaru zakładają różne wartości czasu przejazdu, a co za tym idzie różne wartości prędkości (zakłada się stałą wartość dystansu pomiędzy punktami pomiarowymi). Natomiast natężenia ruchu wyrażone w pojazdach umownych są zróżnicowane do 15 minutowego kwantu czasu. Z tego powodu zdecydowano się na aproksymację modelu do danych empirycznych szukając zależności postaci: $f_i(k)$, $i \in TD$. Gęstość ruchu została obliczona na podstawie fundamentalnego równania ruchu, czyli:

$$q = V \cdot k$$

gdzie:

q – natężenie ruchu drogowego [E/h/pas],

V – prędkość potoku ruchu drogowego [km/h],

k – gęstość potoku ruchu drogowego [E/km/pas].

Prędkość poruszania się pojazdów V_j^i dla każdej próby badawczej została obliczona na podstawie zmierzonych czasów przejazdu z formuły:

$$V_j^i = \frac{S^i}{t_j^i}, \forall i \in TD \wedge \forall j \in N^i$$

Gdzie: N^i jest liczebnością i-tej próby badawczej (relacji), S^i [km] jest dystansem pomiędzy punktami pomiarowymi, a t_j^i [h] jest empirycznym czasem podróży dla j-tego pojazdu w każdej i-tej próbie badawczej należącej do zbioru TD .

Z uwagi, że celem nadrzędnym metodyki jest wybór najlepszej postaci funkcyjnej, kroki 3 i 4 metodyki zostały zrealizowane równolegle, tzn. jakość dopasowania była porównywana dla modelu funkcji oporu i funkcji QVK łącznie (a nie w następujących po sobie warunkowych etapach, jak wskazuje to metodyka). Zastosowane modele QVK to:

- funkcja Underwood'a,

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

- funkcja vanAerde,
- funkcja prof. Krystka.

Modele te wiążą funkcyjnie prędkość i gęstość ruchu w postaci: $V(k)$ oraz $k(V)$, w przypadku modelu vanAerde.

Funkcyjna postać relacji pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu, czyli prędkość chwilowa V , natężenie q oraz gęstość ruchu k , została dobrana na podstawie wyników procesu minimalizacji funkcji błędu pomiędzy pomiarami empirycznymi a wartościami teoretycznymi wynikającymi z danego modelu. Kryterium akceptacji danej funkcji oporu było spełnienie warunku statystycznej istotności wyników estymacji na poziomie $p=0,95$. W przypadku spełnienia tego warunku, wybór funkcji oporu odbywał się na wyborze największej wartości współczynnika determinacji R^2 . Współczynnik ten przyjmuje wartości z zakresu $[0,1]$ i im większa wartość, tym lepsze jest dopasowanie wyników modelu do danych empirycznych. Wyniki prezentuje tabela 6. Są to wskaźniki jakości dopasowania teoretycznego czasu przejazdu, wynikającego z wybranego modelu, do danych empirycznych.

Wszystkie oszacowane wartości współczynnika determinacji są statystycznie istotne na zakładanym poziomie (wartości p dla parametrów strukturalnych modelu dla wszystkich relacji pomiarowych były bliskie zera). Zdecydowanie najlepszym modelem okazał się model vanAerde, który średnio dla prób badawczych uzyskał stopień zgodności modelu na poziomie 83,94%. Porównując każdą próbę danych dla relacji pomiaru, model ten był najlepszy w 38 przypadkach. Natomiast drugą najliczniej występującą funkcją jest funkcja Overgaard'a – 15 przypadków (średnie dopasowanie równe 80,98%), a trzecim typem funkcji jest model BPR – 12 przypadków (średni poziom dopasowania wyniósł 81,82%). Jednak należy zaznaczyć, że różnice w wynikach w obrębie danej próby badawczej są nie duże, zatem można wskazać model vanAerde jako wiodący. Analogiczne wnioski można było zaobserwować w badaniach dla stanu przed inwestycyjnego.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Tabela 6 Wartości współczynnika determinacji R^2 dla wybranych postaci funkcyjnych dla czasu przejazdu

Relacja	Funkcja BPR	Funkcja Overgaard'a	Funkcja Inrets	Funkcja Underwood'a	Funkcja vanAerde	Funkcja prof. Krystka
A01-A02-1	67,74%	68,64%	66,06%	68,32%	69,80%	68,52%
A01-A02-2	88,96%	89,45%	86,38%	88,27%	91,65%	89,64%
A01-A03-1	90,10%	90,55%	88,21%	89,82%	91,90%	89,53%
A01-A03-2	94,92%	95,53%	91,24%	92,51%	97,86%	92,87%
A01-A04-1	86,83%	87,09%	83,32%	85,52%	86,59%	84,69%
A01-A04-2	95,43%	95,82%	93,49%	94,12%	98,14%	94,18%
A01-A05-1	78,35%	83,89%	71,63%	81,77%	84,25%	81,81%
A01-A05-2	80,06%	87,97%	72,38%	84,94%	86,47%	85,19%
A01-A06-1	79,74%	88,89%	71,84%	85,67%	89,42%	85,85%
A01-A06-2	81,75%	89,15%	72,34%	81,57%	94,52%	82,46%
A01-A07-1	67,22%	78,89%	61,29%	76,69%	76,77%	77,47%
A01-A07-2	76,28%	82,20%	70,35%	80,19%	80,57%	80,94%
A02-A01-1	84,65%	84,97%	84,13%	83,21%	79,44%	81,49%
A02-A01-2	93,75%	93,73%	93,06%	91,07%	92,47%	90,73%
A02-A05-1	79,30%	79,34%	79,36%	79,13%	85,26%	78,25%
A02-A05-2	96,89%	96,92%	96,54%	95,31%	96,61%	94,12%
A02-A06-1	76,46%	76,36%	76,02%	74,66%	85,76%	71,23%
A02-A06-2	95,09%	94,64%	92,81%	91,13%	96,15%	81,51%
A03-A01-1	79,68%	79,62%	79,22%	77,01%	64,92%	76,64%
A03-A01-2	93,93%	93,87%	93,71%	93,41%	93,96%	93,86%
A03-A05-1	92,49%	93,40%	87,35%	90,06%	90,34%	80,65%
A03-A05-2	96,41%	96,76%	92,18%	94,02%	98,70%	88,01%
A03-A06-1	78,27%	0,84%	77,46%	74,90%	74,93%	70,43%
A03-A06-2	89,13%	90,60%	86,43%	87,67%	91,25%	84,34%
A03-A08-1	47,82%	NaN	47,87%	46,69%	53,66%	2,22%
A03-A08-2	91,47%	92,25%	88,30%	89,19%	97,05%	83,14%
A04-A01-1	81,18%	81,36%	81,20%	80,30%	83,07%	79,86%
A04-A01-2	74,09%	74,13%	73,87%	73,10%	74,83%	73,64%
A04-A05-1	82,64%	8,76%	81,55%	77,15%	76,52%	69,81%
A04-A05-2	88,38%	88,82%	88,76%	88,14%	89,64%	87,38%

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Relacja	Funkcja BPR	Funkcja Overgaard'a	Funkcja Inrets	Funkcja Underwood'a	Funkcja vanAerde	Funkcja prof. Krystka
A04-A06-1	93,01%	92,80%	92,25%	91,48%	83,41%	84,01%
A04-A06-2	93,75%	93,64%	92,04%	90,99%	97,18%	87,61%
A04-A10-1	48,28%	-	46,96%	48,01%	53,95%	7,10%
A04-A10-2	64,65%	-	62,06%	63,34%	64,60%	60,43%
A05-A01-1	80,78%	83,42%	78,07%	79,61%	78,18%	81,08%
A05-A01-2	72,96%	72,90%	72,76%	72,83%	75,25%	72,52%
A05-A02-1	94,34%	94,12%	92,74%	92,26%	89,66%	91,68%
A05-A02-2	91,84%	91,60%	91,40%	91,31%	88,68%	91,32%
A05-A03-1	94,75%	94,86%	94,54%	94,48%	97,64%	94,23%
A05-A03-2	86,67%	86,89%	86,28%	86,12%	93,60%	85,59%
A05-A04-1	90,29%	93,40%	80,70%	85,28%	97,77%	85,03%
A05-A04-2	82,49%	84,10%	78,02%	82,76%	90,05%	82,44%
A05-A06-1	90,60%	93,82%	84,97%	88,27%	92,96%	85,86%
A05-A06-2	88,51%	89,25%	83,20%	85,83%	94,22%	84,53%
A06-A01-1	71,97%	71,93%	71,69%	70,98%	78,36%	70,44%
A06-A01-2	88,47%	89,03%	85,31%	86,60%	95,13%	87,90%
A06-A02-1	94,49%	94,35%	93,79%	93,91%	93,58%	90,17%
A06-A02-2	96,51%	96,31%	95,09%	94,32%	96,48%	92,58%
A06-A03-1	73,54%	-	67,67%	72,74%	76,13%	72,67%
A06-A03-2	88,21%	88,87%	84,81%	86,90%	86,07%	84,74%
A06-A04-1	88,51%	87,81%	87,41%	87,81%	95,47%	85,89%
A06-A04-2	94,64%	95,16%	92,25%	91,87%	98,01%	88,69%
A06-A05-1	80,60%	80,94%	79,69%	78,68%	86,47%	75,14%
A06-A05-2	92,28%	93,84%	87,82%	88,07%	89,88%	81,19%
A06-A12-1	93,49%	93,30%	93,31%	92,98%	91,66%	92,36%
A06-A12-2	60,63%	60,82%	60,45%	59,93%	62,44%	59,78%
A07-A01-1	59,15%	72,35%	53,11%	69,37%	71,43%	70,56%
A07-A01-2	88,33%	90,79%	85,11%	88,18%	83,88%	89,45%
A08-A03-1	58,91%	-	58,86%	58,84%	64,07%	58,34%
A08-A03-2	79,36%	5,79%	78,25%	78,22%	81,97%	77,05%
A10-A04-1	47,74%	1,35%	46,40%	46,04%	46,01%	43,27%

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Relacja	Funkcja BPR	Funkcja Overgaard'a	Funkcja Inrets	Funkcja Underwood'a	Funkcja vanAerde	Funkcja prof. Krystka
A10-A04-2	69,42%	71,05%	67,20%	69,09%	72,70%	68,20%
A12-A06-1	59,16%	59,51%	58,98%	58,29%	56,14%	59,36%
A12-A06-2	90,29%	90,40%	89,46%	90,00%	89,86%	90,71%
A12-A09-1	50,10%	56,42%	44,66%	55,90%	55,63%	56,09%
A12-A09-2	74,69%	84,01%	70,73%	83,95%	85,66%	84,16%
Średnia	81,82%	80,98%	79,20%	81,31%	83,94%	78,61%

Uwaga: Zastosowana kolorystyka ma na celu ułatwienie interpretacji wyników dla każdej z relacji z osobna, tzn. kolory zostały przypisane na podstawie porównania poszczególnych wartości R^2 , w odniesieniu do ogółu wyników, legenda:

minimum mediana maksimum

Brak wartości oznacza, że model nie mógł być oszacowany.

Źródło: opracowanie własne

Oszacowane wartości poszczególnych modeli prezentują tabele poniżej (tabele 7,8,9 oraz 10).

Tabela 7 Parametry funkcji oporu BPR dla poszczególnych relacji pomiarowych

Relacja	Parametry modelu BPR			
	V_o	$\hat{k}_{max}$	a	b
A02-A01-2	50,00	43,40	4,33	1,15
A03-A01-1	50,00	59,17	3,57	1,09
A03-A06-1	50,00	39,14	4,58	1,19
A04-A05-1	50,00	33,19	4,85	1,20
A04-A06-1	48,79	31,81	4,77	1,23
A04-A10-2	50,00	27,46	4,46	1,64
A05-A02-1	50,00	45,60	3,88	1,46
A05-A02-2	35,32	59,46	3,51	1,78
A06-A02-1	45,81	38,17	4,36	1,55
A06-A02-2	50,00	36,46	3,91	1,45
A06-A12-1	75,11	53,14	3,66	1,39
A10-A04-1	50,00	41,88	4,24	1,43

Objaśnienia: V_o – oszacowana prędkość w ruchu swobodnym [km/h]; $\hat{k}_{max}$ – oszacowana maksymalna gęstość ruchu [poj./km/pas];
 a, b – parametry funkcji BPR [-];

Źródło: opracowanie własne

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Tabela 8 Parametry funkcji oporu Overgaard'a dla poszczególnych relacji pomiarowych

Relacja	Parametry modelu Overgaard'a			
	V_o	$\hat{k}_{max}$	α	β
A01-A04-1	20,98	140,76	5,49	0,51
A01-A05-2	20,24	150,00	4,75	0,68
A01-A07-1	23,39	150,00	3,78	0,52
A01-A07-2	24,11	150,00	3,97	0,56
A02-A01-1	16,64	149,99	6,40	0,35
A02-A05-2	8,08	149,98	7,87	0,31
A03-A05-1	11,90	150,00	6,83	0,41
A05-A01-1	33,62	150,00	5,55	0,45
A05-A06-1	17,77	150,00	5,46	0,52
A06-A03-2	14,96	150,00	5,85	0,54
A06-A05-2	15,44	150,00	5,93	0,49
A07-A01-1	24,54	150,00	3,72	0,53
A07-A01-2	23,87	150,00	4,19	0,48
A12-A06-1	44,88	150,00	3,18	0,41
A12-A09-1	31,22	150,00	4,08	1,00
Objaśnienia: V_o – szacowana prędkość w ruchu swobodnym [km/h]; $\hat{k}_{max}$ – szacowana maksymalna gęstość ruchu [poj./km/pas]; α, β – parametry modelu Overgaard'a [-];				

Źródło: opracowanie własne

Tabela 9 Parametry modelu QVK dla funkcji vanAerde dla poszczególnych relacji pomiarowych

Relacja	Parametry modelu vanAerde			
	V_{opt}	V_o	$\hat{q}_{max}$	$\hat{k}_{max}$
A01-A02-1	43,06	42,73	1054,77	45,96
A01-A02-2	33,80	33,80	1258,31	69,98
A01-A03-1	44,75	44,74	541,32	118,70
A01-A03-2	14,18	14,07	619,93	1,00
A01-A04-2	17,21	17,04	625,22	1,00
A01-A05-1	39,59	39,58	531,36	24,15
A01-A06-1	27,30	26,90	541,58	92,05
A01-A06-2	17,40	15,47	620,30	150,00
A02-A05-1	14,47	14,17	222,93	1,00
A02-A06-1	17,08	17,07	214,99	37,88

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Relacja	Parametry modelu vanAerde			
	V_{opt}	V_o	$\hat{q}_{max}$	$\hat{k}_{max}$
A02-A06-2	10,61	10,42	201,52	6,61
A03-A01-2	18,37	18,23	583,64	1,12
A03-A05-2	6,72	5,86	290,43	150,00
A03-A06-2	38,79	38,79	298,41	77,70
A03-A08-1	42,80	42,35	223,10	59,46
A03-A08-2	44,78	44,78	341,62	4,59
A04-A01-1	23,88	23,88	462,32	52,21
A04-A01-2	22,79	22,79	697,55	67,62
A04-A05-2	33,70	33,21	402,77	1,90
A04-A06-2	15,78	15,78	329,66	89,16
A04-A10-1	31,61	31,58	200,47	19,85
A05-A01-2	27,68	27,21	1023,53	119,69
A05-A03-1	23,64	23,41	478,80	1,11
A05-A03-2	29,95	26,26	539,39	143,97
A05-A04-1	33,64	33,63	522,22	55,47
A05-A04-2	36,17	34,33	536,20	10,43
A05-A06-2	7,98	7,03	493,69	104,30
A06-A01-1	47,65	47,65	650,64	22,60
A06-A01-2	12,46	12,45	749,03	135,57
A06-A03-1	16,69	16,54	328,21	1,03
A06-A04-1	24,80	24,79	326,22	67,49
A06-A04-2	13,61	13,41	399,26	1,08
A06-A05-1	18,30	18,30	318,73	50,51
A06-A09-2	29,53	29,53	794,76	35,09
A08-A03-1	44,01	44,00	178,59	29,47
A08-A03-2	27,92	27,38	191,17	1,01
A10-A04-2	24,62	24,40	437,72	24,49

Objaśnienia: V_{opt} – szacowana prędkość optymalna [km/h]; V_o – szacowana prędkość w ruchu swobodnym [km/h];
 $\hat{q}_{max}$ – szacowane natężenie maksymalne [poj./h/pas]; $\hat{k}_{max}$ – szacowana maksymalna gęstość ruchu [poj./km/pas];
 Źródło: opracowanie własne

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Tabela 10 Parametry modelu QVK dla funkcji prof. Krystka dla poszczególnych relacji pomiarowych

Relacja	Parametry modelu Krystka	
	$\hat{k}_{max}$	V_o
A12-A06-2	150	90

Objaśnienia: $\hat{k}_{max}$ – szacowana maksymalna gęstość ruchu [poj./km/pas]; V_o – szacowana prędkość w ruchu swobodnym [km/h];

Źródło: opracowanie własne

Przebieg i dopasowanie poszczególnych modeli zaprezentowano w załączniku 3.

3.4. Porównanie teoretycznych czasów przejazdu

Na podstawie opracowanych modeli dla stanu przed i po inwestycyjnym kolejnym krokiem jest oszacowanie teoretycznego czasu przejazdu. Dla obu analiz wiodącym modelem okazał się model vanAerde, jednak dla części relacji typ modelu opisującego matematyczną zależność pomiędzy natężeniem – gęstością – prędkością ruchu jest różny dla stanu przed i po inwestycji. Zmiana postaci funkcji może świadczyć o zmianie specyfiku ruchu drogowego, który jest na danej relacji. Wskazanie czynników, które miały wpływ na tę zmianę, jest trudne do wskazania na bazie zrealizowanych pomiarów. Natomiast w celu zagwarantowania poprawności porównania oraz mając na uwadze, że różnice w jakości dopasowania pomiędzy typami modeli nie są znacząco różne (w obrębie danej relacji), do analizy porównawczej zostały wybrane takie same modele dla danej relacji i dla danego szczytu komunikacyjnego. Listę wybranych modeli wraz z ich przypisaniem do danej relacji prezentuje tabela 11.

Tabela 11 Przypisanie typów funkcji oporu i QVK wykorzystanych w analizie porównawczej

Relacja	Funkcja	Relacja	Funkcja	Relacja	Funkcja	Relacja	Funkcja
A01-A02-1	Funkcja vanAerde	A04-A06-2	Funkcja vanAerde	A02-A01-2	Funkcja BPR	A05-A01-1	Funkcja Overgaarda
A01-A02-2	Funkcja vanAerde	A04-A10-1	Funkcja vanAerde	A03-A01-1	Funkcja BPR	A05-A06-1	Funkcja Overgaarda
A01-A03-1	Funkcja vanAerde	A05-A01-2	Funkcja vanAerde	A03-A06-1	Funkcja BPR	A06-A03-2	Funkcja Overgaarda
A01-A03-2	Funkcja vanAerde	A05-A03-1	Funkcja vanAerde	A04-A05-1	Funkcja BPR	A06-A05-2	Funkcja Overgaarda
A01-A04-2	Funkcja vanAerde	A05-A03-2	Funkcja vanAerde	A04-A06-1	Funkcja BPR	A07-A01-1	Funkcja Overgaarda
A01-A05-1	Funkcja vanAerde	A05-A04-1	Funkcja vanAerde	A04-A10-2	Funkcja BPR	A07-A01-2	Funkcja Overgaarda
A01-A06-1	Funkcja vanAerde	A05-A04-2	Funkcja vanAerde	A05-A02-1	Funkcja BPR	A12-A06-1	Funkcja Overgaarda
A01-A06-2	Funkcja vanAerde	A05-A06-2	Funkcja vanAerde	A05-A02-2	Funkcja BPR	A12-A09-1	Funkcja Overgaarda
A02-A05-1	Funkcja vanAerde	A06-A01-1	Funkcja vanAerde	A06-A02-1	Funkcja BPR	A12-A06-2	Funkcja prof. Krystka
A02-A06-1	Funkcja vanAerde	A06-A01-2	Funkcja vanAerde	A06-A02-2	Funkcja BPR		

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Relacja	Funkcja	Relacja	Funkcja	Relacja	Funkcja	Relacja	Funkcja
A02-A06-2	Funkcja vanAerde	A06-A03-1	Funkcja vanAerde	A06-A12-1	Funkcja BPR		
A03-A01-2	Funkcja vanAerde	A06-A04-1	Funkcja vanAerde	A10-A04-1	Funkcja BPR		
A03-A05-2	Funkcja vanAerde	A06-A04-2	Funkcja vanAerde	A01-A04-1	Funkcja Overgaarda		
A03-A06-2	Funkcja vanAerde	A06-A05-1	Funkcja vanAerde	A01-A05-2	Funkcja Overgaarda		
A03-A08-1	Funkcja vanAerde	A08-A03-1	Funkcja vanAerde	A01-A07-1	Funkcja Overgaarda		
A03-A08-2	Funkcja vanAerde	A08-A03-2	Funkcja vanAerde	A01-A07-2	Funkcja Overgaarda		
A04-A01-1	Funkcja vanAerde	A10-A04-2	Funkcja vanAerde	A02-A01-1	Funkcja Overgaarda		
A04-A01-2	Funkcja vanAerde	A12-A09-2	Funkcja vanAerde	A02-A05-2	Funkcja Overgaarda		
A04-A05-2	Funkcja vanAerde	A06-A12-2	Funkcja vanAerde	A03-A05-1	Funkcja Overgaarda		

Źródło: opracowanie własne

Zgodnie z metodyką czasy przejazdu zostały obliczone wg zależności:

1. Obliczenie teoretycznego czasu przejazdu na podstawie modeli QVK:

- $\hat{t}_i = \frac{L_i}{f_i(k^{ITS})}$, $\forall i \in TP$ – czyli teoretyczny czas przejazdu $\hat{t}_i$ oszacowany z funkcji QVK $f_i(k)$, $i \in TD$ dla gęstości ruchu zmierzonego po realizacji inwestycji k^{ITS} dla danego typu odcinka o długości L_i ,
- $\hat{t}_j^{ITS} = \frac{L_i}{f_j^{ITS}(k)}$, $\forall j \in TP$ – czyli teoretyczny czas przejazdu $\hat{t}_j$ oszacowany z funkcji oporu $f_j^{ITS}(k)$, $j \in TD^{ITS}$ dla gęstości ruchu zmierzonego przed realizacją inwestycji k dla danego typu odcinka o długości L_i .

2. Obliczenie teoretycznego czasu przejazdu na podstawie funkcji oporu:

- $\hat{t}_i = f_i(q)$, $\forall i \in TP$ – czyli teoretyczny czas przejazdu $\hat{t}_i$ oszacowany z funkcji oporu $f_i(q)$, $i \in TD$ dla natężenia ruchu zmierzonego przed realizacją inwestycji q dla danego typu odcinka,
- $\hat{t}_j^{ITS} = f_j^{ITS}(q)$, $\forall j \in TP$ – czyli teoretyczny czas przejazdu $\hat{t}_j$ oszacowany z funkcji oporu $f_j^{ITS}(q)$, $j \in TD^{ITS}$ dla natężenia ruchu zmierzonego przed realizacją inwestycji q dla danego typu odcinka.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Na podstawie teoretycznych wartości czasu przejazdu danym typem drogi należy obliczyć różnice czasu, korzystając z formuły:

$$T_i^{dif} = \hat{t}_i - t_j^{TS}$$

Wyniki szacowania wartości prędkości w relacji do gęstości ruchu dla danej relacji i dla danego oszacowanego modelu zostało zaprezentowane na wykresach w załączniku nr 4. Na tych wykresach można porównać, jak kształtowałyby się przeciętna prędkość przejazdu przed inwestycją, gdyby ruch drogowy był taki jak po realizacji inwestycji oraz jak wyglądałaby przeciętna prędkość po inwestycji. Natomiast syntetyczną analizę porównawczą zaprezentowano poniżej, tabela 12 oraz 13.

Tabela 12 Syntetyczne porównanie teoretycznych średnich czasów przejazdu dla szczytu porannego

Relacja	Średni czas przejazdu po [min]	Średni czas przejazdu przed [min]	Różnica [min] - T_i^{dif}	Różnica w odn. do rzeczyw. średniej po [min]	Różnica w odn. do rzeczyw. średniej przed [min]
A01-A02-1	4,80	4,95	-0,15	-0,10	0,05
A01-A03-1	9,36	8,77	0,59	1,69	0,81
A01-A04-1	12,30	11,57	0,73	2,19	1,24
A01-A05-1	4,81	4,47	0,34	0,27	-0,65
A01-A06-1	4,26	4,30	-0,04	-0,19	-0,28
A01-A07-1	2,95	2,55	0,41	0,06	-0,06
A02-A01-1	8,22	7,58	0,65	-0,39	-0,69
A02-A05-1	16,12	31,81	-15,69	5,20	18,13
A02-A06-1	10,28	21,04	-10,77	-0,47	8,65
A03-A01-1	11,51	13,37	-1,86	0,64	1,99
A03-A05-1	5,81	8,16	-2,35	0,35	3,30
A03-A06-1	4,51	4,84	-0,33	-0,40	0,71
A03-A08-1	3,79	3,78	0,00	-0,08	0,26
A04-A01-1	14,50	15,58	-1,09	3,21	2,34
A04-A05-1	17,11	8,85	8,26	10,58	-2,99
A04-A06-1	9,04	8,10	0,94	1,76	0,13
A04-A10-1	1,76	1,70	0,06	-0,24	-0,09
A05-A01-1	5,55	7,53	-1,99	-0,75	-0,71
A05-A02-1	14,50	17,83	-3,34	5,26	2,93
A05-A03-1	5,08	7,69	-2,61	-0,22	2,32
A05-A04-1	19,39	7,27	12,13	14,81	-7,62
A05-A06-1	1,09	2,54	-1,45	-0,42	1,20
A06-A01-1	7,25	6,11	1,14	1,64	-1,08
A06-A02-1	21,15	19,20	1,95	11,76	4,03
A06-A03-1	4,15	4,35	-0,19	0,04	-0,18

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Relacja	Średni czas przejazdu po [min]	Średni czas przejazdu przed [min]	Różnica [min] - T_i^{dif}	Różnica w odn. do rzeczyw. średniej po [min]	Różnica w odn. do rzeczyw. średniej przed [min]
A06-A04-1	7,21	9,12	-1,91	1,59	2,19
A06-A05-1	2,03	2,26	-0,23	-0,54	-0,47
A06-A12-1	5,36	6,87	-1,51	-0,27	1,72
A07-A01-1	2,90	2,54	0,36	0,05	-0,04
A08-A03-1	3,40	3,85	-0,45	-0,68	0,01
A10-A04-1	1,53	1,86	-0,32	-0,48	0,08
A12-A06-1	4,41	6,37	-1,96	-1,12	1,29
A12-A09-1	5,47	10,37	-4,91	-1,46	3,53
Średnia	7,63	8,40	-0,77	1,61	1,27
Średnia redukcja	-9,22 %				

Źródło: opracowanie własne

Tabela 13 Syntetyczne porównanie teoretycznych średnich czasów przejazdu dla szczytu popołudniowego

Relacja	Średni czas przejazdu po [min]	Średni czas przejazdu przed [min]	Różnica [min] - T_i^{dif}	Różnica w odn. do rzeczyw. średniej po [min]	Różnica w odn. do rzeczyw. średniej przed [min]
A01-A02-2	4,31	7,00	-2,69	-1,31	1,86
A01-A03-2	8,84	10,12	-1,29	1,36	1,24
A01-A04-2	14,71	15,12	-0,41	3,98	3,41
A01-A05-2	3,97	5,53	-1,56	-0,53	0,94
A01-A06-2	4,00	5,73	-1,74	0,00	1,29
A01-A07-2	2,86	3,01	-0,14	-0,13	0,37
A02-A01-2	10,84	15,51	-4,67	-0,24	6,21
A02-A05-2	32,12	34,92	-2,80	15,83	16,36
A02-A06-2	26,91	15,44	11,47	15,94	4,47
A03-A01-2	17,39	15,72	1,67	4,63	1,92
A03-A05-2	5,49	6,63	-1,14	0,73	2,32
A03-A06-2	4,94	5,33	-0,39	-0,05	0,98
A03-A08-2	7,26	4,94	2,33	2,02	-1,55
A04-A01-2	18,21	19,48	-1,27	3,32	4,35
A04-A05-2	14,41	10,44	3,97	8,72	-5,42
A04-A06-2	11,23	10,73	0,50	3,07	3,64
A04-A10-2	2,08	1,85	0,23	-0,10	-0,03
A05-A01-2	9,97	7,48	2,49	3,83	-3,87
A05-A02-2	17,77	24,96	-7,19	5,39	7,23
A05-A03-2	6,44	7,86	-1,43	1,21	2,40
A05-A04-2	16,16	6,52	9,64	11,15	-8,91

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Relacja	Średni czas przejazdu po [min]	Średni czas przejazdu przed [min]	Różnica [min] - T_i^{dif}	Różnica w odn. do rzeczyw. średniej po [min]	Różnica w odn. do rzeczyw. średniej przed [min]
A05-A06-2	1,12	1,63	-0,51	-0,21	0,39
A06-A01-2	10,42	7,49	2,93	4,40	-2,53
A06-A02-2	16,14	23,86	-7,72	5,59	8,93
A06-A03-2	4,85	5,81	-0,97	-0,33	1,01
A06-A04-2	19,49	34,21	-14,72	11,84	26,44
A06-A05-2	2,30	3,51	-1,21	-0,41	1,19
A06-A12-2	4,46	6,27	-1,80	-1,28	1,20
A07-A01-2	7,31	4,97	2,34	2,04	-1,35
A08-A03-2	5,88	4,62	1,26	1,62	0,32
A10-A04-2	1,69	2,23	-0,54	-0,29	0,32
A12-A06-2	3,84	9,38	-5,54	-2,05	4,31
A12-A09-2	3,81	9,10	-5,29	-2,69	2,75
Średnia	9,73	10,53	-0,79	2,94	2,49
Średnia redukcja	-7,53%				

Źródło: opracowanie własne

Dla obu szczytów komunikacyjnych można zaobserwować redukcję czasu przejazdu, jednakże nie można tego wyniku uznać za ostateczny. Wynika to ze zbyt dużych różnic pomiędzy: teoretycznym przeciętnym czasem przejazdu, a rzeczywistym przeciętnym czasem przejazdu (ostatnie dwie kolumny) dla obu stanów: przed i po inwestycji. Można zaobserwować, że wielkość różnicy jest zależna od liczebności próby. Siłę tej zależności można zbadać współczynnikiem korelacji liniowej Pearsona. I dla szczytu porannego wynosi ona -0,35, a dla szczytu popołudniowego -0,54. Oznacza to, że jest nieznaczna tendencja ujemna, czyli jeśli liczebność próby jest większa, różnica pomiędzy wynikami teoretycznymi a empirycznymi maleje. Z tego powodu należy dokonać jeszcze jednego etapu w analizie, co opisano poniżej.

Dla niektórych relacji różnice te są znaczące (na plus i na minus) i wynika to z mało licznej próby badawczej (w raporcie dla stanu przed inwestycyjnego wskazywano na taką możliwość działania). Przyjmując literaturę minimalną liczebność próby na poziome $n \geq 30$, należy z analizy odrzucić relacje: A02-A05, A02-A06, A04-A05, A05-A02, A05-A04, A06-A02 oraz A06-A04. Są to relacje, dla których liczebność próby wzięta do analiz była mniejsza niż 30 dla któregośkolwiek ze zbiorów danych pomiarowych. Minimalna liczebność próby jest podyktowana przyjętą metodyką modelowania matematycznego, którego nie można zastosować dla mało licznych zbiorów, ponieważ interpretacja takich wyników wiązała by się z popełnieniem dużego błędu szacunkowego. Usuając te relacje z analizy w rezultacie otrzyma się następujące wyniki (tabela 14 oraz tabela 15).

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Tabela 14 Zweryfikowane syntetyczne porównanie teoretycznych średnich czasów przejazdu dla szczytu porannego

Relacja	Średni czas przejazdu po [min]	Średni czas przejazdu przed [min]	Różnica [min] - T_i^{dif}	Różnica w odn. do rzeczyw. średniej po [min]	Różnica w odn. do rzeczyw. średniej przed [min]
A01-A02-1	4,80	4,95	-0,15	-0,10	0,05
A01-A03-1	9,36	8,77	0,59	1,69	0,81
A01-A04-1	12,30	11,57	0,73	2,19	1,24
A01-A05-1	4,81	4,47	0,34	0,27	-0,65
A01-A06-1	4,26	4,30	-0,04	-0,19	-0,28
A01-A07-1	2,95	2,55	0,41	0,06	-0,06
A02-A01-1	8,22	7,58	0,65	-0,39	-0,69
A03-A01-1	11,51	13,37	-1,86	0,64	1,99
A03-A05-1	5,81	8,16	-2,35	0,35	3,30
A03-A06-1	4,51	4,84	-0,33	-0,40	0,71
A03-A08-1	3,79	3,78	0,00	-0,08	0,26
A04-A01-1	14,50	15,58	-1,09	3,21	2,34
A04-A06-1	9,04	8,10	0,94	1,76	0,13
A04-A10-1	1,76	1,70	0,06	-0,24	-0,09
A05-A01-1	5,55	7,53	-1,99	-0,75	-0,71
A05-A03-1	5,08	7,69	-2,61	-0,22	2,32
A05-A06-1	1,09	2,54	-1,45	-0,42	1,20
A06-A01-1	7,25	6,11	1,14	1,64	-1,08
A06-A03-1	4,15	4,35	-0,19	0,04	-0,18
A06-A05-1	2,03	2,26	-0,23	-0,54	-0,47
A06-A12-1	5,36	6,87	-1,51	-0,27	1,72
A07-A01-1	2,90	2,54	0,36	0,05	-0,04
A08-A03-1	3,40	3,85	-0,45	-0,68	0,01
A10-A04-1	1,53	1,86	-0,32	-0,48	0,08
A12-A06-1	4,41	6,37	-1,96	-1,12	1,29
A12-A09-1	5,47	10,37	-4,91	-1,46	3,53
Średnia	5,61	6,23	-0,62	0,18	0,64
Średnia redukcja	-10,00%				

Źródło: opracowanie własne

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Tabela 15 Zweryfikowane syntetyczne porównanie teoretycznych średnich czasów przejazdu dla szczytu popołudniowego

Relacja	Średni czas przejazdu po [min]	Średni czas przejazdu przed [min]	Różnica [min] - T_i^{dif}	Różnica w odn. do rzeczyw. średniej po [min]	Różnica w odn. do rzeczyw. średniej przed [min]
A01-A02-1	4,31	7,00	-2,69	-1,31	1,86
A01-A03-1	8,84	10,12	-1,29	1,36	1,24
A01-A04-1	14,71	15,12	-0,41	3,98	3,41
A01-A05-1	3,97	5,53	-1,56	-0,53	0,94
A01-A06-1	4,00	5,73	-1,74	0,00	1,29
A01-A07-1	2,86	3,01	-0,14	-0,13	0,37
A02-A01-1	10,84	15,51	-4,67	-0,24	6,21
A03-A01-1	17,39	15,72	1,67	4,63	1,92
A03-A05-1	5,49	6,63	-1,14	0,73	2,32
A03-A06-1	4,94	5,33	-0,39	-0,05	0,98
A03-A08-1	7,26	4,94	2,33	2,02	-1,55
A04-A01-1	18,21	19,48	-1,27	3,32	4,35
A04-A06-1	11,23	10,73	0,50	3,07	3,64
A04-A10-1	2,08	1,85	0,23	-0,10	-0,03
A05-A01-1	9,97	7,48	2,49	3,83	-3,87
A05-A03-1	6,44	7,86	-1,43	1,21	2,40
A05-A06-1	1,12	1,63	-0,51	-0,21	0,39
A06-A01-1	10,42	7,49	2,93	4,40	-2,53
A06-A03-1	4,85	5,81	-0,97	-0,33	1,01
A06-A05-1	2,30	3,51	-1,21	-0,41	1,19
A06-A12-2	4,46	6,27	-1,80	-1,28	1,20
A07-A01-1	7,31	4,97	2,34	2,04	-1,35
A08-A03-1	5,88	4,62	1,26	1,62	0,32
A10-A04-1	1,69	2,23	-0,54	-0,29	0,32
A12-A06-1	3,84	9,38	-5,54	-2,05	4,31
A12-A09-1	3,81	9,10	-5,29	-2,69	2,75
Średnia	6,86	7,58	-0,72	0,87	1,27
Średnia redukcja	-9,55%				

Źródło: opracowanie własne

Weryfikacja wyników wynikająca z liczebności próby wpłynęła nieznacznie na zwiększenie poziomu redukcji czasu przejazdu wynikającego z opracowanych funkcji oporu i funkcji QVK (odniesieniem są wyniki z tabel 12 i 13). Natomiast został zmniejszony poziom prawdopodobnego błędu. Wartości redukcji metodą zaawansowaną ostatecznie wyniosły: 10,00% oraz 9,55% odpowiednio dla szczytu porannego i popołudniowego. Wartości te zostały opracowane na modelach teoretycznych, które

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

charakteryzują się bardzo dobrym dopasowaniem do danych empirycznych. Dodatkowo różnice pomiędzy wartościami oszacowanymi nie są znaczące w odniesieniu do wartości średniej czasu przejazdu dla danych empirycznych. Potwierdza to słuszność przyjętej metodyki dla tego typu analiz. Powiązanie trzech głównych charakterystyk ruchu drogowego, czyli prędkość, natężenie i gęstość ruchu, poprzez zastosowania funkcyjnych relacji pozwala na uwzględnienie nieliniowej zależności występującej pomiędzy tymi parametrami. W praktyce przekłada się to na możliwość sprawdzenia, czy tak zwany opór odcinka sieci drogowej zmalał, czy zwiększył się poprzez realizację inwestycji, niezależnie od tego czy struktura i wielkość ruchu zmieniła się na przestrzeni czasu. Jest to związane z faktem, że można określić czasy przejazdu nie mając danych empirycznych dla zadanych warunków ruchu. Na przykład w badaniach po inwestycji nie zmierzono tak dużej gęstości ruchu, jak przed inwestycją, lub sytuacja na odwrót – taka sytuacja ruchowa nie powinna być porównywana. Natomiast funkcje oporu dają taką możliwość, co pokazała analiza przeprowadzona dla inwestycji ITS Tychy.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

4. Wskaźnik poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego

Na potrzeby wyznaczenia wartości wskaźnika poziomu bezpieczeństwa używane pojęcie *wypadkowości* będzie rozumiane jako miara częstotliwości występowania wypadków i kolizji drogowych w określonym obszarze i obejmuje ono analizę liczbę wypadków przypadających na określoną jednostkę czasu. W rozpatrywanym przypadku okres analizy obejmuje czas od lipca 2022 do czerwca 2023 roku (pełne 12 miesięcy). Uzyskane wyniki będą odnoszone do stanu przed inwestycją który obejmował cały rok 2019. Przy wyznaczaniu wartości wskaźnika uwzględniono zarówno zdarzenia drogowe kwalifikowane jako wypadki oraz kolizje. Analiza obu typów zdarzeń pozwala lepiej zrozumieć ogólne zagrożenia w ruchu drogowym i identyfikować potencjalne przyczyny problemów bezpieczeństwa. Wypadek Jest to zdarzenie, które zwykle powoduje poważne szkody lub obrażenia. W kontekście ruchu drogowego, wypadek odnosi się do sytuacji, w której dochodzi do uszkodzenia pojazdów, infrastruktury drogowej lub innych mieni, a także do obrażeń ciała lub śmierci uczestników ruchu drogowego. Kolizja to zdarzenie, które odnosi się do mniej poważnych incydentów, takich jak drobne stłuczki czy zderzenia, w których nie ma poważnych obrażeń ciała, a szkody materialne są ograniczone.

Zgodnie z przyjętą metodyką badawczą wartość wskaźnika poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego wyraża się wzorem:

$$W_B = \alpha \cdot W_o + \beta \cdot W_s + \gamma \cdot W_{p_{kol}} + \delta \cdot W_{stat}$$

Gdzie:

W_B — względny wskaźnik oceny poziomu bezpieczeństwa,

W_s — składowa wskaźnika dla skrzyżowań,

W_o — składowa wskaźnika dla odcinków drogowych,

$W_{p_{kol}}$ — składowa wskaźnika dla przejazdów kolejowych,

W_{stat} — składowa wskaźnika na podstawie danych statystycznych,

α, β, γ — wagi.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Przyjęte wagi dla komponentów muszą spełniać poniższe warunki:

$$\alpha + \beta + \gamma = 1$$

$$\alpha, \beta, \gamma \in R_+$$

Wyznaczenie wartości elementów składowej wskaźnika dla odcinków drogowych

$$W_o = v_{o1} \cdot \frac{S_{w_o}^a}{S_{w_o}^b} + v_{o2} \cdot \left(\frac{S_{k_o}^a}{S_{k_o}^b} \right)^{-1}$$

Gdzie:

$S_{w_o}^a$ – składnik opisujący wypadkowość dla odcinków drogowych w po inwestycyjnym okresie analizy,

$S_{w_o}^b$ – składnik opisujący wypadkowość dla odcinków drogowych w przed inwestycyjnym okresie analizy,

$S_{k_o}^a$ – składnik opisujący stan nawierzchni analizowanych odcinków drogowych odpowiednio w okresie po inwestycyjnym,

$S_{k_o}^b$ – składnik opisujący stan nawierzchni analizowanych odcinków drogowych odpowiednio w okresie przed inwestycyjnym,

v_{o1}, v_{o2} – wewnętrzne wagi korygujące.

Wewnętrzne wagi korygujące spełniają warunki:

$$v_{o1} + v_{o2} = 1$$

$$v_{o1}, v_{o2} \in R_+$$

Wyznaczenie wartości elementów składowej opisującej wypadkowość dla odcinków drogowych

$$S_{w_o}^a = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^n c_j \cdot w_{oij}^a}{\sum_{i=1}^l L_i \cdot \sqrt{q_i^a}}$$

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

$$S_{w_o}^b = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^n c_j \cdot w_{o_{ij}}^b}{\sum_{i=1}^I L_i \cdot \sqrt{q_i^b}}$$

$S_{w_o}^a$ – składnik opisujący wypadkowość dla odcinków drogowych w poinwestycyjnym okresie analizy,

$S_{w_o}^b$ – składnik opisujący wypadkowość dla odcinków drogowych w przed inwestycyjnym okresie analizy,

$(i = 1, 2, 3, \dots, I)$ – indeks opisujący liczbę odcinków drogowych wziętych do analizy,

$(j = 1, 2, 3, \dots, J)$ – indeks opisujący kategorię wypadków i zdarzeń drogowych uwzględnionych w analizie,

$w_{o_{ij}}^a$ – liczba zdarzeń drogowych kategorii j-tej na i-tym odcinku drogowym w po inwestycyjnym okresie analizy,

$w_{o_{ij}}^b$ – liczba zdarzeń drogowych kategorii j-tej na i-tym odcinku drogowym w przed inwestycyjnym okresie analizy,

L_i – długość i-tego odcinka drogowego [km],

q_i^a, q_i^b – uśrednione natężenia ruchu pojazdów w okresie szczytu porannego i popołudniowego na i-tym odcinku drogowym odpowiednio w okresie analizy po inwestycyjnym i przed inwestycyjnym,

c_j –waga korygująca dla j-tej kategorii zdarzeń drogowych.

Wagi korygujące dla tego składnika spełniają warunek:

$$\sum_{j=1}^n c_j = 1$$

$$c_j \in [0,1]$$

Okres czasu brany pod uwagę w analizie stanu po inwestycyjnego obejmował okres od lipca 2022 do czerwca 2023 włącznie. W celu wyznaczenia wartości wskaźnika oraz określenia poziomu odniesienia do okresu przed inwestycyjnego, składowe cząstkowe zostały ponownie obliczone w rozpatrywanym obszarze

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

dla badanego okresu. Do wyznaczenia składników cząstkowych wskaźnika wybrano następujące kategorie zdarzeń drogowych oraz odpowiadające im wagi korygujące (Tab. 16). Przyjęte wartości oraz kategorie są tożsame z wagami dla okresu przed inwestycyjnego.

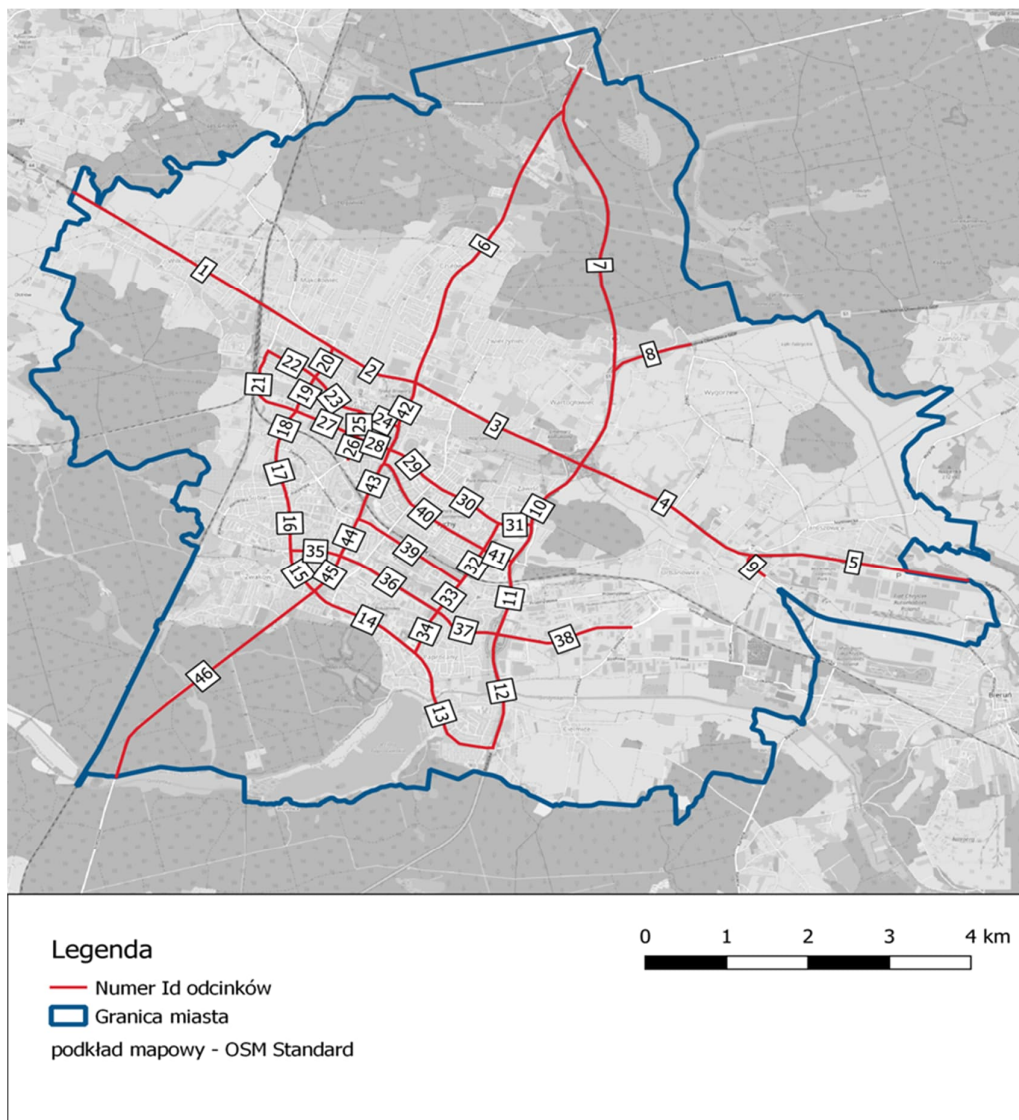
Tabela 16 Kategorie rozpatrywanych zdarzeń drogowych

Lp.	Kategoria	Oznaczenie	Waga c_j
1	Kolizje drogowe	$w_{o_{i1}}$	0,01
2	Zdarzenia z udziałem lekko rannych	$w_{o_{i2}}$	0,01
3	Zdarzenia z udziałem ciężko rannych	$w_{o_{i3}}$	0,57
4	Zdarzenia ze skutkiem śmiertelnym	$w_{o_{i4}}$	0,41

Źródło: opracowanie własne

Lokalizację poszczególnych odcinków branych pod uwagę w analizie przedstawia rysunek 9. Szczegółowy wykaz odcinków drogowych objętych analizą wraz z wymaganymi parametrami niezbędnymi do wyznaczenia składowych wskaźnika odpowiednio w okresie przed oraz po inwestycyjnym przedstawiają tabela 17 oraz tabela 18. Natomiast w tabeli 19 zaprezentowano wartości cząstkowe składowej wypadkowości odcinków drogowych dla stanu po oraz przed inwestycją.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



Rysunek 9 Lokalizacja odcinków drogowych rozpatrywanych w analizie
Źródło: opracowanie własne

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Tabela 17 Wykaz oraz wypadkowość dla analizowanych odcinków drogowych w okresie przed inwestycyjnym

Lp.	Odcinek	dł. odcinka [km]	L. kolizji	L. lekko rannych	L. ciężko rannych	L. zabitych	Uśrednione natężenie ruchu [poj.]
1	Mikołowska I	3,844	52	1	0	0	2004
2	Mikołowska II	1,109	16	0	0	0	1560
3	Oświęcimska I	2,324	31	2	1	0	1650
4	Oświęcimska II	2,243	32	2	0	0	1178
5	Turyńska	2,747	15	0	0	0	1163
6	Katowicka	4,197	32	1	0	0	1157
7	Beskidzka I	6,025	54	0	0	1	1157
8	Wschodnia Obwodnica GOP	1,459	18	0	0	0	1157
9	Oświęcimska III	0,315	11	0	0	0	1045
10	Beskidzka II	1,639	28	0	0	0	1882
11	Beskidzka III	0,9	49	0	0	0	2280
12	Beskidzka IV	1,909	13	0	1	0	2280
13	Władysława Sikorskiego I	1,508	16	0	0	0	1299
14	Władysława Sikorskiego II	1,721	21	2	0	2	1067
15	Stoczniowców I	0,657	8	0	0	0	1084
16	Stoczniowców II	0,75	6	0	0	0	1327
17	Stoczniowców III	0,66	3	0	0	0	1345
18	Glińczańska	0,554	13	0	0	0	1276
19	Biskupa Burschego I	0,523	7	0	0	0	784
20	Biskupa Burschego II	0,47	2	0	0	0	864
21	Budowlanych I	1,136	15	0	0	0	1086
22	Gen. Władysława Andersa	0,663	8	0	0	1	707
23	Ks. Augusta Hlonda	0,734	8	0	0	0	494
24	Boczna, Sienkiewicza	0,52	8	0	0	0	494
25	Innocentego Bocheńskiego	0,369	11	0	0	0	591
26	Begonii	0,319	8	1	0	0	843
27	Budowlanych II	0,825	9	0	0	0	778
28	Budowlanych III	0,438	8	0	0	0	1053
29	Edukacji I	0,707	12	1	1	0	1039
30	Edukacji II	0,968	6	1	0	0	915
31	Edukacji III	0,392	3	0	0	0	849
32	Kardynała Wyszyńskiego	0,941	20	0	0	0	1062
33	Armii Krajowej I	0,494	12	0	0	0	1062

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Lp.	Odcinek	dł. odcinka [km]	L. kolizji	L. lekko rannych	L. ciężko rannych	L. zabitych	Uśrednione natężenie ruchu [poj.]
34	Armii Krajowej II	0,614	9	1	0	1	1062
35	Jaśkowicka	0,615	4	0	0	0	1256
36	Al. Józefa Piłsudskiego I	1,423	28	0	0	0	1251
37	Al. Józefa Piłsudskiego II	0,759	19	1	0	0	2044
38	Towarowa	1,68	52	4	0	0	2391
39	al. Jana Pawła II	1,552	16	0	0	0	1032
40	al. Niepodległości I	1,736	28	2	0	0	974
41	al. Niepodległości II	0,397	6	0	0	0	1257
42	al. Bielska I	0,959	44	4	0	0	1731
43	al. Bielska II	1,032	16	0	0	0	1292
44	al. Bielska III	0,528	11	2	0	0	813
45	al. Bielska IV	0,596	6	0	0	0	813
46	al. Bielska V	0,859	10	0	0	0	1111

Źródło: opracowanie własne

Tabela 18 Wykaz oraz wypadkowość dla analizowanych odcinków drogowych w okresie po inwestycyjnym

Lp.	Odcinek	dł. odcinka [km]	L. Kolizji	L. lekko rannych	L. ciężko rannych	L. zabitych	Uśrednione natężenie ruchu [poj.]
1	Mikołowska I	3,844	47	0	0	1	2205
2	Mikołowska II	1,109	6	0	0	0	1700
3	Oświęcimska I	2,324	28	0	0	0	1733
4	Oświęcimska II	2,243	30	0	0	0	1249
5	Turyńska	2,747	12	1	0	0	1221
6	Katowicka	4,197	33	2	0	0	1261
7	Beskidzka I	6,025	43	0	0	0	1249
8	Wschodnia Obwodnica GOP	1,459	11	1	0	0	1145
9	Oświęcimska III	0,315	2	0	0	0	972
10	Beskidzka II	1,639	12	0	0	0	1995
11	Beskidzka III	0,9	18	0	0	0	2394
12	Beskidzka IV	1,909	15	1	0	0	2235
13	Władysława Sikorskiego I	1,508	35	3	0	0	1416
14	Władysława Sikorskiego II	1,721	23	0	0	0	1035

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Lp.	Odcinek	dł. odcinka [km]	L. Kolizji	L. lekko rannych	L. ciężko rannych	L. zabitych	Uśrednione natężenie ruchu [poj.]
15	Stoczniowców I	0,657	1	0	0	0	1019
16	Stoczniowców II	0,75	10	1	0	0	1301
17	Stoczniowców III	0,66	2	0	0	0	1278
18	Glińczańska	0,554	9	0	0	0	1251
19	Biskupa Burschego I	0,523	4	1	0	0	706
20	Biskupa Burschego II	0,47	4	0	0	0	925
21	Budowlanych I	1,136	7	0	0	0	1053
22	Gen. Władysława Andersa	0,663	5	1	0	0	714
23	Ks. Augusta Hlonda	0,734	3	0	0	0	499
24	Boczna, Sienkiewicza	0,52	4	0	0	0	484
25	Innocentego Bocheńskiego	0,369	1	0	0	0	608
26	Begonii	0,319	4	0	0	0	776
27	Budowlanych II	0,825	14	0	0	0	715
28	Budowlanych III	0,438	8	0	0	0	1158
29	Edukacji I	0,707	9	1	0	0	935
30	Edukacji II	0,968	10	1	0	0	887
31	Edukacji III	0,392	4	0	0	0	899
32	Kardynała Wyszyńskiego	0,941	5	0	0	0	1126
33	Armii Krajowej I	0,494	11	1	0	0	1030
34	Armii Krajowej II	0,614	7	0	0	0	1009
35	Jaśkowicka	0,615	3	0	0	0	1143
36	Al. Józefa Piłsudskiego I	1,423	33	0	0	1	1201
37	Al. Józefa Piłsudskiego II	0,759	22	2	0	0	2167
38	Towarowa	1,68	26	1	0	0	2224
39	al. Jana Pawła II	1,552	15	0	0	0	1135
40	al. Niepodległości I	1,736	23	1	0	0	1071
41	al. Niepodległości II	0,397	4	0	0	0	1169
42	al. Bielska I	0,959	13	1	0	0	1713
43	al. Bielska II	1,032	20	0	0	0	1331
44	al. Bielska III	0,528	1	0	0	0	748
45	al. Bielska IV	0,596	0	0	0	0	845
46	al. Bielska V	0,859	22	0	0	0	1133

Źródło: opracowanie własne

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Tabela 19 Wartości cząstkowe składowej wypadkowości odcinków drogowych dla stanu po oraz przed inwestycją

Lp.	Odcinek	Stan po inwestycji		Stan przed inwestycją	
		$\sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{oij}^a$	$L_i \cdot \sqrt{q_i^a}$	$\sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{oij}^b$	$L_i \cdot \sqrt{q_i^b}$
1	Mikołowska I	0,88	181	0,53	172
2	Mikołowska II	0,06	46	0,16	44
3	Oświęcimska I	0,28	97	0,9	94
4	Oświęcimska II	0,3	79	0,34	77
5	Turyńska	0,13	96	0,15	94
6	Katowicka	0,35	149	0,33	143
7	Beskidzka I	0,43	213	0,95	205
8	Wschodnia Obwodnica GOP	0,12	49	0,18	50
9	Oświęcimska III	0,02	10	0,11	10
10	Beskidzka II	0,12	73	0,28	71
11	Beskidzka III	0,18	44	0,49	43
12	Beskidzka IV	0,16	90	0,7	91
13	Władysława Sikorskiego I	0,38	57	0,16	54
14	Władysława Sikorskiego II	0,23	55	1,05	56
15	Stoczniowców I	0,01	21	0,08	22
16	Stoczniowców II	0,11	27	0,06	27
17	Stoczniowców III	0,02	24	0,03	24
18	Glińczańska	0,09	20	0,13	20
19	Biskupa Burschego I	0,05	14	0,07	15
20	Biskupa Burschego II	0,04	14	0,02	14
21	Budowlanych I	0,07	37	0,15	37
22	Gen. Władysława Andersa	0,06	18	0,49	18
23	Ks. Augusta Hlonda	0,03	16	0,08	16
24	Boczna, Sienkiewicza	0,04	11	0,08	12
25	Innocentego Bocheńskiego	0,01	9	0,11	9
26	Begonii	0,04	9	0,09	9
27	Budowlanych II	0,14	22	0,09	23
28	Budowlanych III	0,08	15	0,08	14
29	Edukacji I	0,1	22	0,7	23
30	Edukacji II	0,11	29	0,07	29
31	Edukacji III	0,04	12	0,03	11
32	Kardynała Wyszyńskiego	0,05	32	0,2	31
33	Armii Krajowej I	0,12	16	0,12	16

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Lp.	Odcinek	Stan po inwestycji		Stan przed inwestycją	
		$\sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{oij}^a$	$L_i \cdot \sqrt{q_i^a}$	$\sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{oij}^b$	$L_i \cdot \sqrt{q_i^b}$
34	Armii Krajowej II	0,07	20	0,51	20
35	Jaśkowicka	0,03	21	0,04	22
36	Al. Józefa Piłsudskiego I	0,74	49	0,28	50
37	Al. Józefa Piłsudskiego II	0,24	35	0,2	34
38	Towarowa	0,27	79	0,56	82
39	al. Jana Pawła II	0,15	52	0,16	50
40	al. Niepodległości I	0,24	57	0,3	54
41	al. Niepodległości II	0,04	14	0,06	14
42	al. Bielska I	0,14	40	0,48	40
43	al. Bielska II	0,2	38	0,16	37
44	al. Bielska III	0,01	14	0,13	15
45	al. Bielska IV	0	17	0,06	17
46	al. Bielska V	0,22	29	0,1	29

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie powyższych danych wartości cząstkowe składowej dla odcinków drogowych odpowiednio dla stanu przed oraz po inwestycyjnego wynoszą:

$$S_{w_o}^b = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{oij}^b}{\sum_{i=1}^I L_i \cdot \sqrt{q_i^b}} = \frac{12,05}{2038} = 0,005913$$

$$S_{w_o}^a = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{oij}^a}{\sum_{i=1}^I L_i \cdot \sqrt{q_i^a}} = \frac{7,2}{2072} = 0,003475$$

Wyznaczenie elementów składowej opisującej stan nawierzchni

$$S_{k_o}^b = \frac{\sum_{i=1}^I k_i^b L_i}{k_{max} \cdot \sum_{i=1}^I L_i}$$

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

$$S_{k_o}^a = \frac{\sum_{i=1}^I k_i^a L_i}{k_{max} \cdot \sum_{i=1}^I L_i}$$

Gdzie:

$S_{k_o}^a$ – składnik opisujący stan nawierzchni analizowanych odcinków drogowych objętych projektem, odpowiednio w okresie po inwestycyjnym,

$S_{k_o}^b$ – składnik opisujący stan nawierzchni analizowanych odcinków drogowych objętych projektem, odpowiednio w okresie przed inwestycyjnym,

k_i^b, k_i^a – punktowa ocena stanu i-tego odcinka drogowego odpowiednio w okresie analizy przed inwestycyjnym oraz po inwestycyjnym,

k_{max} – maksymalna ocena stanu nawierzchni,

L_i – długość i-tego odcinka drogowego [km].

Na podstawie przeprowadzonej oceny stanu nawierzchni analizowanych odcinków drogowych zgodnie z przyjętą metodyką projektu uzyskano wartości cząstkowe składowych odpowiednio dla stanu przed oraz po inwestycyjnego, przedstawione w tabeli 20. Ocena stanu nawierzchni analizowanych odcinków została przeprowadzona w ramach przejazdu technicznego w dniu 02.07.2023.

Tabela 20 Punktowa ocena odcinków drogowych dla stanu przed oraz po inwestycyjnego

Lp.	Odcinek	dł. odcinka [km]	Stan po inwestycyjny		Stan przed inwestycyjny	
			Punktowa ocena stanu nawierzchni k_i^a	$k_i^a L_i$	Punktowa ocena stanu nawierzchni k_i^b	$k_i^b L_i$
1	Mikołowska I	3,844	3	11,53	3	11,53
2	Mikołowska II	1,109	5	5,55	4	4,44
3	Oświęcimska I	2,324	3,5	8,13	3	6,97
4	Oświęcimska II	2,243	3,5	7,85	3	6,73
5	Turyńska	2,747	4	10,99	3	8,24
6	Katowicka	4,197	3	12,59	4	16,79
7	Beskidzka I	6,025	4	24,10	4	24,10
8	Wschodnia Obwodnica GOP	1,459	4	5,84	5	7,30
9	Oświęcimska III	0,315	4	1,26	5	1,58
10	Beskidzka II	1,639	4,5	7,38	4	6,56
11	Beskidzka III	0,9	5	4,50	3	2,70
12	Beskidzka IV	1,909	5	9,55	5	9,55
13	Władysława Sikorskiego I	1,508	4,5	6,79	2	3,02

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Lp.	Odcinek	dł. odcinka [km]	Stan po inwestycyjny		Stan przed inwestycyjny	
			Punktowa ocena stanu nawierzchni k_i^a	$k_i^a L_i$	Punktowa ocena stanu nawierzchni k_i^b	$k_i^b L_i$
14	Władysława Sikorskiego II	1,721	4	6,88	3	5,16
15	Stoczniovców I	0,657	4	2,63	3	1,97
16	Stoczniovców II	0,75	3	2,25	2	1,50
17	Stoczniovców III	0,66	4	2,64	4	2,64
18	Glińczańska	0,554	3,5	1,94	3	1,66
19	Biskupa Burschego I	0,523	5	2,62	3	1,57
20	Biskupa Burschego II	0,47	5	2,35	2	0,94
21	Budowlanych I	1,136	4	4,54	3	3,41
22	Gen. Władysława Andersa	0,663	1	0,66	2	1,33
23	Ks. Augusta Hlonda	0,734	5	3,67	2	1,47
24	Boczna, Sienkiewicza	0,52	5	2,60	4	2,08
25	Innocentego Bocheńskiego	0,369	5	1,85	3	1,11
26	Begonii	0,319	5	1,60	3	0,96
27	Budowlanych II	0,825	5	4,13	3	2,48
28	Budowlanych III	0,438	5	2,19	3	1,31
29	Edukacji I	0,707	3,5	2,47	2	1,41
30	Edukacji II	0,968	3	2,90	3	2,90
31	Edukacji III	0,392	4	1,57	4	1,57
32	Kardynała Wyszyńskiego	0,941	3,5	3,29	3	2,82
33	Armii Krajowej I	0,494	4	1,98	5	2,47
34	Armii Krajowej II	0,614	3,5	2,15	4	2,46
35	Jaśkowicka	0,615	4	2,46	3	1,85
36	Al. Józefa Piłsudskiego I	1,423	4	5,69	3	4,27
37	Al. Józefa Piłsudskiego II	0,759	4	3,04	4	3,04
38	Towarowa	1,68	4	6,72	4	6,72
39	al. Jana Pawła II	1,552	2	3,10	2	3,10
40	al. Niepodległości I	1,736	3	5,21	2	3,47
41	al. Niepodległości II	0,397	3,5	1,39	3	1,19
42	al. Bielska I	0,959	5	4,80	3	2,88
43	al. Bielska II	1,032	5	5,16	2	2,06
44	al. Bielska III	0,528	4,5	2,38	3	1,58
45	al. Bielska IV	0,596	4	2,38	2	1,19
46	al. Bielska V	0,859	4,5	3,87	2	1,72

Źródło: opracowanie własne

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Na podstawie danych z tabeli 18 wartości cząstkowe składowej opisującej stan nawierzchni w okresie przed oraz po inwestycyjnym są równe:

$$S_{k_o}^b = \frac{\sum_{i=1}^I k_i^b L_i}{k_{max} \cdot \sum_{i=1}^I L_i} = \frac{185,772}{284,05} = 0,654$$

$$S_{k_o}^a = \frac{\sum_{i=1}^I k_i^a L_i}{k_{max} \cdot \sum_{i=1}^I L_i} = \frac{219,136}{284,05} = 0,771$$

Na podstawie zbiorczych danych o wypadkowości dla miasta Tychy w badanym okresie można stwierdzić, iż udział zdarzeń drogowych ze względu na stan nawierzchni był niewielki. Zdarzenia mające miejsce na odcinkach wskazujących na zły stan nawierzchni stanowiły znikomy udział. W związku z powyższym analogicznie jak dla okresu przed inwestycyjnego wagi korygujące v_{o1} , v_{o2} przyjmują te same wartości wynoszące odpowiednio $v_{o1} = 0,99$ oraz $v_{o2} = 0,01$.

Obliczona wartość składowej wskaźnika bezpieczeństwa dla odcinków drogowych jest równa:

$$W_o = v_{o1} \cdot \frac{S_{w_o}^a}{S_{w_o}^b} + v_{o2} \cdot \left(\frac{S_{k_o}^a}{S_{k_o}^b} \right)^{-1} = 0,99 \cdot \frac{0,003475}{0,005913} + 0,01 \cdot \left(\frac{0,771}{0,654} \right)^{-1} = 0,59$$

Wartość składowej W_o jest mniejsza od 1 zatem wskazuje na poprawę względem stanu przed inwestycyjnego.

Wyznaczenie wartości elementów składowej wskaźnika dla skrzyżowań drogowych oraz skrzyżowań z ruchem pieszych (przebieg dla pieszych)

$$W_s = \left(\frac{S_{pk}^a}{S_{pk}^b} \right)^{-1} + \frac{S_{w_s}^a}{S_{w_s}^b} + \frac{S_{Lcz}^a}{S_{Lcz}^b} + \frac{S_{t_o}^a}{S_{t_o}^b}$$

Gdzie:

S_{pk}^a , S_{pk}^b – składnik opisujący liczbę relacji realizowanych bezkolizyjnie na skrzyżowaniach odpowiednio w okresie po inwestycyjnym oraz przed inwestycyjnym,

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

$S_{w_s}^a, S_{w_s}^b$ – składnik opisujący wypadkowość dla skrzyżowań odpowiednio w okresie po inwestycyjnym oraz przed inwestycyjnym,

S_{Lcz}^b, S_{Lcz}^a – składnik opisujący liczbę przejazdów na sygnale czerwonym na przejściach dla pieszych na wybranych skrzyżowaniach odpowiednio w okresie przed inwestycyjnym oraz po inwestycyjnym,

$S_{t_o}^a, S_{t_o}^b$ – składnik opisujący rodzaj oświetlenia oraz dodatkowe wyposażenie w elementy infrastruktury BRD na skrzyżowaniach z ruchem pieszym i przejściach dla pieszych, w tym przejściach dla pieszych odpowiednio w okresie po inwestycyjnym oraz przed inwestycyjnym

Wykaz skrzyżowań drogowych oraz skrzyżowań z ruchem pieszym objętych analizą wraz z wymaganymi parametrami niezbędnymi do wyznaczenia składowych wskaźnika odpowiednio dla stanu przed oraz po inwestycyjnego przedstawia tabela 21 oraz tabela 22. Analiza wypadkowości obejmowała kategorie zdarzeń drogowych tożsame z przyjętymi dla odcinków drogowych wraz z odpowiadającymi im wagami.

Tabela 21 Wykaz rozpatrywanych skrzyżowań oraz wartości cząstkowe składowej wskaźnika dla stanu przed inwestycyjnego

ID	Opis	L. Kolizji	L. lekko rannych	L. ciężko rannych	L. zabitych	pk_m^b	t_{on}^b	$\sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{s_{mj}}^b$
1	Mikołowska, Wierzbowa	1	0	0	0	4	4	0,01
46	Mikołowska, Dojazdowa	3	0	0	0	3	1	0,03
2	Mikołowska, Leśna	4	0	0	0	4	4	0,04
3	Mikołowska, Podleska	2	1	0	0	3	-	0,03
4	Mikołowska, Wałowa	5	0	0	0	4	1	0,05
52	Mikołowska, A. Asnyka	1	0	0	0	3	4	0,01
5	Mikołowska - Tyskie Browary Książęce	2	0	0	0	5	4	0,02
6	Mikołowska, Burschego	6	1	0	0	4	4	0,07
7	Mikołowska, Powstańców	0	0	0	0	2	1	0
8	Mikołowska, Fiolków	0	0	0	0	2	4	0
9	Mikołowska, Katowicka	3	0	0	0	11	4	0,03
45	Katowicka, Tulipanów	1	0	0	0	8	2	0,01
17	Katowicka, Zwierzyniecka	1	0	0	0	3	4	0,01

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

ID	Opis	L. Kolizji	L. lekko rannych	L. ciężko rannych	L. zabitych	pk_m^b	t_{on}^b	$\sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{smj}^b$
16	Katowicka, Grabowa	0	0	0	0	4	1	0
10	Oświęcimska, Sadowa	3	1	1	0	3	4	0,61
49	Oświęcimska, Marzanny	2	1	0	0	3	2	0,03
11	Oświęcimska, Długa	3	0	0	0	12	2	0,03
12	Oświęcimska, Urbanowicka	2	0	0	0	4	-	0,02
13	Oświęcimska, Pogodna	1	0	0	0	4	1	0,01
14	Turyńska Oświęcimska	0	0	0	0	4	-	0
15	Turyńska, Samochodowa	2	0	0	0	2	-	0,02
44	Dworcowa, Browarowa	0	0	0	0	6	-	0
43	Bursczego, Andersa	1	0	0	0	5	4	0,01
42	Budowlanych, Glinczańska	1	0	0	0	8	4	0,01
41	Budowlanych, Begonii	2	0	0	0	3	4	0,02
18	Budowlanych, al. Bielska,(Edukacji)	1	0	0	0	8	4	0,01
40	Edukacji, Stefana Grota Roweckiego	6	0	0	0	3	4	0,06
39	Edukacji, Filaretów	0	0	0	0	4	2	0
38	Edukacji, Wejhertów	1	0	0	0	2	2	0,01
38	Edukacji, Wyszyńskiego	1	0	0	0	4	2	0,01
19	Cienista, al. Bielska,(Niepodległości)	4	0	0	0	6	4	0,04
35	Al. Niepodległości, Stefana Grota Roweckiego	7	0	0	0	2	4	0,07
33	Al. Niepodległości, Fitelberga	0	0	0	0	3	1	0
36	Al. Niepodległości, Wyszyńskiego	5	0	0	0	4	4	0,05
34	Żwakowska, Kopernika	4	0	0	0	4	2	0,04
48	Al. Bielska, Hierowskiego	4	0	0	0	3	4	0,04
23	Stoczniowców, Reymonta	1	0	0	0	2	1	0,01
31	Al. Piłsudskiego, Tishnera	2	0	0	0	3	4	0,02
29	Al. Piłsudskiego, Paprociańska	0	0	0	0	8	1	0
30	Al. Piłsudskiego, Jordana	2	0	0	0	2	2	0,02
32	Towarowa	2	0	0	0	3	2	0,02
51	Bielska, Wjazd do Obi	2	0	0	0	4	2	0,02

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

ID	Opis	L. Kolizji	L. lekko rannych	L. ciężko rannych	L. zabitych	pk_m^b	t_{on}^b	$\sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{smj}^b$
22	Stoczniewców, Legionów Polskich	6	0	0	0	2	4	0,06
21	Al. Bielska, W. Sikorskiego	12	0	0	0	10	4	0,12
24	Sikorskiego, Wodny park Tychy	1	0	0	0	8	1	0,01
25	Sikorskiego, Uczniowska	0	0	0	0	6	2	0
26	Sikorskiego, Wieniawskiego	0	0	0	0	4	4	0
27	Sikorskiego Paprociańska	0	0	0	0	6	4	0
50	Sikorskiego, Hotel Piramida	1	0	0	0	2	4	0,01
28	Sikorskiego, Zaczysze,	1	0	0	0	10	1	0,01
20	Al. Bielska, S. Czarnieckiego	11	0	0	0	4	1	0,11
53	Katowicka, Sadowa	6	1	0	0	2	1	0,07

Źródło: opracowanie własne

Tabela 22 Wykaz rozpatrywanych skrzyżowań oraz wartości cząstkowe składowej wskaźnika dla stanu po inwestycyjnego

ID	Opis	L. kolizji	L. lekko rannych	L. ciężko rannych	L. zabitych	pk_m^a	t_{om}^a	$\sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{smj}^a$
1	Mikołowska, Wierzbowa	1	0	0	0	6	4	0,01
46	Mikołowska, Dojazdowa	1	0	0	0	4	4	0,01
2	Mikołowska, Leśna	1	0	0	0	2	4	0,01
3	Mikołowska, Podleska	1	0	0	0	7	4	0,01
4	Mikołowska, Wałowa	1	0	0	0	5	4	0,0k1
52	Mikołowska, A. Asnyka	1	0	0	0	7	4	0,01
5	Mikołowska - Tyskie Browary Książęce	2	0	0	0	5	5	0,02
6	Mikołowska, Burschego	2	0	0	0	11	4	0,02
7	Mikołowska, Powstańców	0	0	0	0	3	2	0
8	Mikołowska, Fiolków	0	0	0	0	3	4	0
9	Mikołowska, Katowicka	6	0	0	0	12	4	0,06
45	Katowicka, Tulipanów	1	0	0	0	3	4	0,01
17	Katowicka, Zwierzyniecka	1	0	0	0	3	4	0,01
16	Katowicka, Grabowa	0	0	0	0	5	4	0
10	Oświęcimska, Sadowa	5	0	0	0	6	4	0,05

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

ID	Opis	L. kolizji	L. lekko rannych	L. ciężko rannych	L. zabitych	pk_m^a	$t_{o_m}^a$	$\sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{s_{mj}}^a$
49	Oświęcimska, Marzanny	1	0	0	0	5	4	0,01
11	Oświęcimska, Długa	2	0	0	0	12	4	0,02
12	Oświęcimska, Urbanowicka	1	0	0	0	4	5	0,01
13	Oświęcimska, Pogodna	1	0	0	0	4	5	0,01
14	Turyńska Oświęcimska	5	0	0	0	4	5	0,05
15	Turyńska, Samochodowa	2	0	0	0	2	5	0,02
44	Dworcowa, Browarowa	0	0	0	0	6	4	0
43	Burschego, Andersa	2	0	0	0	5	5	0,02
42	Budowlanych, Glinczańska	1	0	0	0	8	4	0,01
41	Budowlanych, Begonii	3	0	0	0	6	4	0,03
18	Budowlanych, al. Bielska, (Edukacji)	5	0	0	0	8	5	0,05
40	Edukacji, Stefana Grota Roweckiego	1	1	0	0	6	4	0,02
39	Edukacji, Filaretów	0	0	0	0	4	4	0
37	Edukacji, Wejherców	0	0	0	0	3	4	0
38	Edukacji, Wyszyńskiego	0	0	0	0	4	4	0
19	Cienista, al. Bielska, (Niepodległości)	2	0	0	0	6	5	0,02
35	Al. Niepodległości, Stefana Grota Roweckiego	1	0	0	0	4	5	0,01
33	Al. Niepodległości, Fitelberga	0	0	0	0	3	4	0
36	Al. Niepodległości, Wyszyńskiego	1	0	0	0	8	5	0,01
34	Żwakowska, Kopernika	3	0	0	0	5	4	0,03
48	Al. Bielska, Hierowskiego	0	0	0	0	3	5	0
23	Stoczniowców, Reymonta	2	0	0	0	3	4	0,02
31	Al. Piłsudskiego, Tischnera	1	0	0	0	3	4	0,01
29	Al. Piłsudskiego, Paprociańska	0	0	0	0	2	4	0
30	Al. Piłsudskiego, Jordana	4	1	0	0	5	4	0,05
32	Towarowa	0	0	0	0	6	4	0
51	Bielska, Wjazd do Obi	1	0	0	0	2	5	0,01
22	Stoczniowców, Legionów Polskich	0	0	0	0	4	4	0
21	Al. Bielska, W. Sikorskiego	3	0	0	0	10	4	0,03
24	Sikorskiego, Wodny park Tychy	0	0	0	0	8	4	0
25	Sikorskiego, Uczniowska	0	0	0	0	6	4	0

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

ID	Opis	L. kolizji	L. lekko rannych	L. ciężko rannych	L. zabitych	pk_m^a	$t_{o_m}^a$	$\sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{s_{mj}}^a$
26	Sikorskiego, Wieniawskiego	1	0	0	0	4	4	0,01
27	Sikorskiego Paprociańska	1	2	0	0	2	4	0,03
50	Sikorskiego, Hotel Piramida	0	0	0	0	2	5	0
28	Sikorskiego, Zacisze,	0	0	0	0	10	4	0
20	Al. Bielska, S. Czarnieckiego	2	0	0	0	4	4	0,02
53	Katowicka, Sadowa	0	0	0	0	2	5	0

Źródło: opracowanie własne

Wyznaczenie wartości składnika opisującego liczbę relacji realizowanych bezkolizyjnie na skrzyżowaniach odpowiednio dla stanu przed oraz po inwestycyjnego

$$S_{pk}^b = \sum_{m=1}^M pk_m^b = 233$$

$$S_{pk}^a = \sum_{m=1}^M pk_m^a = 265$$

Wyznaczenie wartości składnika opisującego wypadkowość na skrzyżowaniach dla stanu przed oraz po inwestycyjnego

$$S_{w_s}^b = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{s_{mj}}^b = 1,88$$

$$S_{w_s}^a = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J c_j \cdot w_{s_{mj}}^a = 0,73$$

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Wyznaczenie wartości składnika opisującego rodzaj oświetlenia oraz dodatkowe wyposażenie w elementy infrastruktury brd na skrzyżowaniach z ruchem pieszym i przejściach dla pieszych dla stanu przed oraz po inwestycyjnego

$$S_{t_o}^b = 1 - \frac{\sum_{m=1}^M t_{o_m}^b}{\sum_{m=1}^M t_{o_max}} = 1 - \frac{130}{260} = 1 - 0,5 = 0,5$$

$$S_{t_o}^a = 1 - \frac{\sum_{m=1}^M t_{o_m}^a}{\sum_{m=1}^M t_{o_max}} = 1 - \frac{220}{260} = 1 - 0,85 = 0,15$$

Wyznaczenie wartości składnika opisującego liczbę przejazdów na sygnale czerwonym dla stanu po inwestycyjnego

W tabeli 23 przedstawiono liczbę przejazdów na czerwonym świetle dla trzech rozpatrywanych skrzyżowań odpowiednio w okresie przed oraz po inwestycyjnym. Dla okresu przed inwestycyjnego liczba przejazdów na sygnale czerwonym została zidentyfikowana na podstawie obserwacji nagrań wideo, które były zarejestrowane podczas wykonywania badań ruchu przed inwestycją. Odpowiednio przeszkoleni obserwatorzy odnotowywali sytuację, w których pojazdy przekraczały linie zatrzymań wyznaczone na danym skrzyżowaniu na sygnale czerwonym.

Tabela 23 Wartości cząstkowe składowej wskaźnika dotyczącej liczby przejazdów na czerwonym świetle

ID	Opis	Przejazdy na czerwonym świetle	
		Stan po inwestycyjny	Stan przed inwestycyjny
9	Mikołowska, Katowicka	112	252
29	Al. Piłsudskiego, Paprociańska	65	40
16	Katowicka, Grabowa	14	23
suma		$S_{L_{cz}}^a = \sum_{k=1}^K L_{cz_k}^a = 191$	$S_{L_{cz}}^b = \sum_{k=1}^K L_{cz_k}^b = 315$

Źródło: opracowanie własne

Wyznaczenie wartości składowej wskaźnika bezpieczeństwa dla skrzyżowań

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Na podstawie wyznaczonych wartości składników, składowa wskaźnika dla stanu po inwestycyjnego jest odpowiednio równa:

$$W_s = \left(\frac{S_{pk}^a}{S_{pk}^b} \right)^{-1} + \frac{S_{w_s}^a}{S_{w_s}^b} + \frac{S_{L_{cz}}^a}{S_{L_{cz}}^b} + \frac{S_{t_o}^a}{S_{t_o}^b} = \left(\frac{265}{233} \right)^{-1} + \frac{0,73}{1,88} + \frac{191}{315} + \frac{0,15}{0,5} = 2,18$$

Otrzymana wartość składowej W_s jest mniejsza od wartości referencyjnej równej 4 (sytuacja, w której każdy ze składników nie wskazuje zarówno na poprawę jak i pogorszenie względem stanu przed inwestycyjnego). W związku z tym, dla składowej wskaźnika dotyczącej skrzyżowań w okresie po inwestycyjnym odnotowano znaczącą poprawę względem stanu przed inwestycyjnego.

Wyznaczenie wartości elementów składowej wskaźnika dla skrzyżowań z przejazdami kolejowymi

W ramach realizowanego projektu na rozpatrywanych przejazdach kolejowych zaproponowano rozwiązanie poprawiające bezpieczeństwo dla ruchu drogowego w detekcji pociągu. Przejazd pociągu wiąże się z włączeniem sygnału czerwonego na sygnalizatorach dla kierunków kolizyjnych względem pociągu. Z uwagi na to iż klasa przejazdu nie uległa zmianie (obecnie w dalszym ciągu klasa D) na podstawie² oraz przedstawione rozwiązanie nie funkcjonowało w okresie oceny, zgodnie z metodyką badawczą wartość współczynnika φ dla składowej wskaźnika bezpieczeństwa, która odnosi się do przejazdów kolejowych przyjmuje wartość równą 1. Wartość składowej wskaźnika wyznaczono jak poniżej:

$$W_{p_{kol}} = \frac{(\varphi * S_{r_p}^a)}{S_{r_p}^b}$$

Gdzie:

² Warunki techniczne elementów infrastruktury drogowej stosowanych w organizacji ruchu na drogach, umowa nr DTD/KF/BDG-VIII-32018-U-103/14

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

$S_{r_p}^b, S_{r_p}^a$ – składnik opisujący typ przejazdu kolejowego odpowiednio w okresie przed inwestycyjnym oraz po inwestycyjnym,

φ – współczynnik poprawy bezpieczeństwa w ramach tej samej kategorii przejazdu kolejowo-drogowego.

$$0,1 \leq \varphi \leq 1$$

$$\varphi \in \mathbb{R}_+$$

$$S_{r_p}^b = 1 - \frac{\sum_{h=1}^H r_{p_h}^b}{\sum_{h=1}^H r_{p_{max}}}$$

$$S_{r_p}^a = 1 - \frac{\sum_{h=1}^H r_{p_h}^a}{\sum_{h=1}^H r_{p_{max}}}$$

$r_{p_h}^b, r_{p_h}^a$ – ocena punktowa h-tego przejazdu kolejowego odpowiednio w okresie przed inwestycyjnym oraz po inwestycyjnym,

$r_{p_{max}}$ – maksymalna wartość oceny przejazdu kolejowego,

($h = 1, 2, 3, \dots, H$) – indeks opisujący numer analizowanego przejazdu kolejowego,

Ocena punktowa rozpatrywanych przejazdów kolejowych została wyznaczona na podstawie wzoru:

$$r_{p_h} = 1 - (IZW_{\Omega} + IZ\acute{S}_{\Omega} + IZP_{\Omega})$$

Gdzie:

($\Omega = A, B, C, D$) –indeks opisujący kategorię przejazdu kolejowego,

IZW_{Ω} – indywidualne zagrożenie wypadkiem dla Ω kategorii przejazdu,

$IZ\acute{S}_{\Omega}$ – indywidualne zagrożenie śmiercią dla Ω kategorii przejazdu,

IZP_{Ω} – indywidualne zagrożenie poranieniem dla Ω kategorii przejazdu.

Wartości $IZW_{\Omega}, IZ\acute{S}_{\Omega}, IZP_{\Omega}$, zostały przyjęte zgodnie z metodyką przedstawioną w opracowaniu³

³ Cieślakowski S., *Ocena bezpieczeństwa na przejazdach kolejowych w Polsce*, Technika Transportu Szynowego 3/2009

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

$$IZW_A = 1,44 \cdot 10^{-9} \frac{W}{OPPK}$$

$$IZW_B = 1,06 \cdot 10^{-8} \frac{W}{OPPK}$$

$$IZW_C = 3,36 \cdot 10^{-8} \frac{W}{OPPK}$$

$$IZW_D = 2,76 \cdot 10^{-8} \frac{W}{OPPK}$$

$$IZŚ_A = 3 \cdot 10^{-10} \frac{OŚ}{OPPK}$$

$$IZŚ_B = 10,86 \cdot 10^{-10} \frac{OŚ}{OPPK}$$

$$IZŚ_C = 78,8 \cdot 10^{-10} \frac{OŚ}{OPPK}$$

$$IZŚ_D = 44,38 \cdot 10^{-10} \frac{OŚ}{OPPK}$$

$$IZP_A = 2,9 \cdot 10^{-10} \frac{OR}{OPPK}$$

$$IZP_B = 3,26 \cdot 10^{-9} \frac{OR}{OPPK}$$

$$IZP_C = 2,26 \cdot 10^{-8} \frac{OR}{OPPK}$$

$$IZP_D = 7,73 \cdot 10^{-9} \frac{OR}{OPPK}$$

Jednostki poszczególnych zagrożeń podawane są w wypadkach (W), ofiarach śmiertelnych (OŚ) i ofiarach rannych (OR) na osobę przejeżdżającą przez przejazd kolejowy pojazdem kołowym (OPPK) w ciągu roku. Wykaz rozpatrywanych przejazdów kolejowych przedstawia tabela 24.

Tabela 24 Wykaz rozpatrywanych przejazdów kolejowych

Lp.	Lokalizacja	Klasa przejazdu
-----	-------------	-----------------

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

1	ul. Asnyka, Mikołowska	D
2	ul. Mikołowska, Burschego	D

Źródło: opracowanie własne

W związku z powyższym cząstkowe wartości składowej wskaźnika dla przejazdów kolejowych w okresie przed inwestycyjnym oraz po inwestycyjnym dla obydwu przejazdów są sobie równe (ze względu na brak zmiany kategorii przejazdu):

$$r_{p_h}^b = 1 - (IZW_D + IZ\dot{S}_D + IZP_D) = 1 - (2,76 \cdot 10^{-8} + 44,38 \cdot 10^{-10} + 7,73 \cdot 10^{-9})$$

$$= 1 - 3,98 \cdot 10^{-8} = 0,99999996$$

$$S_{r_p}^b = 1 - \frac{\sum_{h=1}^H r_{p_h}^b}{\sum_{h=1}^H r_{p_{max}}^b} = 1 - \frac{1,99999992}{1,99999996} = 3,77 \cdot 10^{-8}$$

$$S_{r_p}^b = S_{r_p}^a$$

Wobec powyższego składowa wskaźnika jest równa:

$$W_{p_{kol}} = \frac{(\varphi * S_{r_p}^a)}{S_{r_p}^b} = \frac{1 \cdot 3,77 \cdot 10^{-8}}{3,77 \cdot 10^{-8}} = 1$$

Wartość składowej wskaźnika bezpieczeństwa dla przejazdów kolejowych nie ma wpływu na końcową wartość wskaźnika bezpieczeństwa. Brak funkcjonowania rozwiązania w okresie przeprowadzenia oceny sprawia, iż w tym aspekcie nie uzyskano zarówno poprawy (wymagane $W_{p_{kol}} < 1$) jak i pogorszenia poziomu bezpieczeństwa w odniesieniu do stanu przed inwestycją.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Wyznaczenie składowej wskaźnika na podstawie danych statystycznych

$$W_{stat} = \frac{zd^a}{zd^b}$$

gdzie:

zd^a, zd^b – współczynnik zdarzeń drogowych w stanie po inwestycyjnym oraz przed inwestycyjnym.

Wyznaczone wartości współczynników zdarzeń drogowych w okresie przed oraz po inwestycyjnym przedstawia tabela 25. Poniższe zastawienie ma na celu prezentację zdarzeń w podziale na możliwe przyczyny zdarzeń drogowych odnotowane w bazie SEWIK i stanowi odpowiedź na potrzebę scharakteryzowania struktury zdarzeń drogowych, jeśli chodzi o przyczyny ich występowania. Oznacza to, że w przypadku wystąpienia kilku czynników jedno zdarzenie drogowe może być brane pod uwagę kilkakrotnie. Wynika to z szczególności opisu zdarzenia i zakresu danych odnotowanych w SEWIK. W związku z powyższym liczba zdarzeń nie bilansuje się w przypadku poszczególnych zestawień.

Tabela 25 Wartości cząstkowe współczynnika zdarzeń drogowych

				Liczba zdarzeń drogowych							
				Stan przed inwestycyjny (zd^b)				Stan po inwestycyjny (zd^a)			
				A	B	C	D	A	B	C	D
				kolizja	lekko ranny	ciężko ranny	zabity	kolizja	lekko ranny	ciężko ranny	zabity
		wiosna	1	384	10	0	2	349	15	1	2

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

				Liczba zdarzeń drogowych							
				Stan przed inwestycyjny (zd ^b)				Stan po inwestycyjny (zd ^a)			
				A	B	C	D	A	B	C	D
				kolizja	lekko ranny	ciężko ranny	zabity	kolizja	lekko ranny	ciężko ranny	zabity
Pora roku	C _{stat1}	lato	2	371	11	1	0	432	11	0	0
		jesień	3	478	16	2	2	333	11	0	1
		zima	4	369	4	1	2	281	3	0	0
Warunki oświetleniowe	C _{stat2}	Światło dzienne	5	1397	35	3	2	1080	32	1	3
		Noc - droga oświetlona	6	328	9	2	5	217	4	0	0
		Noc - droga nieoświetlona	7	57	1	0	1	42	2	0	0
		Świt, zmrok	8	92	5	0	0	56	2	0	0
Warunki atmosferyczne	C _{stat2}	Dobre warunki atmosferyczne	9	1296	36	5	2	952	24	1	3
		Opady deszczu	10	210	8	0	2	141	5	0	0
		Opady śniegu, gradu	11	43	0	0	0	50	0	0	0
		Silny wiatr	12	6	0	0	0	2	0	0	0
		Mgła, dym	13	14	0	0	0	5	0	0	0
		pozostałe	14	315	6	0	4	239	11	0	0
Stan nawierzchni	C _{stat3}	Mokra	15	384	9	0	4	294	8	0	0
		Sucha	16	1414	41	5	3	1007	30	1	3
		Oblodzenie, zaśnieżenie	17	63	0	0	0	65	2	0	0

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

				Liczba zdarzeń drogowych							
				Stan przed inwestycyjny (zd ^b)				Stan po inwestycyjny (zd ^a)			
				A	B	C	D	A	B	C	D
				kolizja	lekko ranny	ciężko ranny	zabity	kolizja	lekko ranny	ciężko ranny	zabity
		Kałuże, rozlewiska	18	7	0	0	1	0	0	0	0
		Koleiny, garby	19	2	0	0	0	0	0	0	0
		Dziury, wyboje	20	3	0	0	0	6	0	0	0
		Mokra; Dziury, wyboje	21	1	0	0	0	6	0	0	0
		pozostałe	22	0	0	0	0	0	0	0	0
Miejsce zdarzenia	C _{stat3}	Skrzyżowanie	23	410	12	1	1	245	12	0	1
		Odcinek prosty	24	1432	21	2	4	1150	28	1	1
		Przeście dla pieszych	25	22	14	2	3	26	4	0	1
		Przejazd dla rowerzystów	26	10	3	0	0	15	6	0	1
Ograniczenie prędkości	C _{stat4}	do 50 km/h	27	1678	49	4	6	1241	37	1	3
		51 do 70 km/h	28	81	1	1		66	0	0	0
		powyżej 70 km/h	29	115	0	0	2	77	2	0	0
Występowanie sygnalizacji świetlnej	C _{stat5}	tak	30	103	1	0	0	96	4	0	0
		nie	31	1763	49	5	8	1298	36	1	3
		sygnalizacja ostrzegawcza	32	8	0	0	0	0	0	0	0
		tak	33	1533	46	4	7	1093	33	1	3

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

			Liczba zdarzeń drogowych								
			Stan przed inwestycyjny (zd ^b)				Stan po inwestycyjny (zd ^a)				
			A	B	C	D	A	B	C	D	
			kolizja	lekko ranny	ciężko ranny	zabity	kolizja	lekko ranny	ciężko ranny	zabity	
Występowanie	C _{stat₆}	nie	34	341	4	1	1	302	7	0	0
	$\sum_{cstat_u=1}^U \sum_{n=1}^N lzd_{un}$			14730	391	39	62	11166	329	8	25
	c _j			0,01	0,01	0,57	0,41	0,01	0,01	0,57	0,41
	$q_j = \frac{lzd_j * c_j}{\sum ly}$			0,009677	0,000257	0,00146	0,00167	0,009686	0,000285	0,000396	0,000889
				zd^b = $q_{j=A} + q_{j=B}$ + $q_{j=C} + q_{j=D}$		0,0131		zd^a = $q_{j=A} + q_{j=B}$ + $q_{j=C} + q_{j=D}$		0,01126	

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie danych z tabeli 25 łączna wartość składowej W_{stat} jest równa:

$$W_{stat} = \frac{zd^a}{zd^b} = \frac{0,01126}{0,0131} = 0,862$$

Wartość składowej jest mniejsza od wartości referencyjnej równej 1, zatem można stwierdzić, iż odnotowano poprawę w porównaniu do okresu przed inwestycją.

Wyznaczenie łącznej wartości wskaźnika poziomu bezpieczeństwa

Na potrzeby obliczenia łącznej wartości wskaźnika poziomu bezpieczeństwa w oparciu o statystyki wypadkowości przyjęto wartości wag $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ przedstawione w tabeli 26.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Tabela 26 Przyjęte wartości wag dla składowych wskaźnika poziomu bezpieczeństwa

Waga	α	β	γ	δ
Wartość	0,76	0,22	0,01	0,01

Źródło: opracowanie własne

$$\begin{aligned}
 W_B &= \alpha \cdot W_o + \beta \cdot W_s + \gamma \cdot W_{p_{kol}} + \delta \cdot W_{stat} \\
 &= 0,76 \cdot 0,59 + 0,22 \cdot 2,182 + 0,01 \cdot 1 + 0,01 \cdot 0,862 = 0,947
 \end{aligned}$$

W celu przeprowadzenia oceny wpływu zastosowanych w projekcie rozwiązań na poprawę poziomu bezpieczeństwa konieczne było wyznaczenie wartości referencyjnej wskaźnika bezpieczeństwa $W_{B_{ref}}$ ⁴. Wartość referencyjna odnosi się do sytuacji, w której wartości wszystkich składników częściowych wskaźnika bezpieczeństwa dla okresu przed inwestycją oraz po inwestycji są sobie równe $W_{o_{ref}} = 1, W_{s_{ref}} = 4, W_{p_{kol_{ref}}} = 1, W_{stat_{ref}} = 1$ – oznacza to, iż porównując te dwa okresy nie można wskazać zarówno na pogorszenie jak i poprawę poziomu bezpieczeństwa. Wartość referencyjna wskaźnika została zatem wyznaczona jak poniżej:

$$\begin{aligned}
 W_{B_{ref}} &= \alpha \cdot W_{o_{ref}} + \beta \cdot W_{s_{ref}} + \gamma \cdot W_{p_{kol_{ref}}} + \delta \cdot W_{stat_{ref}} = 0,76 \cdot 1 + 0,22 \cdot 4 + 0,01 \cdot 1 + \\
 &0,01 \cdot 1 = 1,66
 \end{aligned}$$

Konstrukcja wskaźnika poziomu bezpieczeństwa zakłada, iż każda uzyskana wartość poniżej wartości referencyjnej $W_{B_{ref}}$ wskazuje na poprawę poziomu bezpieczeństwa względem okresu przed inwestycją. Dla okresu po inwestycji wartość wskaźnika bezpieczeństwa jest równa 0,947 co jest wartością o około 43% niższą od wartości referencyjnej wskaźnika. Uzyskany rezultat wskazuje zatem na zdecydowaną poprawę stanu bezpieczeństwa względem okresu przed inwestycją.

⁴ Wartość referencyjna $W_{B_{ref}}$ nie została obliczona w raporcie dla stanu przed inwestycją, ponieważ wynika to z konstrukcji wskaźnika, gdzie wszystkie składowe częściowe mają postać ułamków, w których licznik odnosi się do oceny danego czynnika w okresie po inwestycji.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

5. Wskaźnik zużycia energii elektrycznej i paliw płynnych

Zgodnie z przyjętą metodyką wartość wskaźnika zużycia energii elektrycznej i paliw płynnych wyraża się wzorem:

$$WBZEP = w_1 \frac{SF_o}{SF_p} + w_2 \frac{SE_o}{SE_p}$$

gdzie:

w_1, w_2 – wagi dla poszczególnych wskaźników pośrednich, przy założeniach, że $w_1 + w_2 = 1$ oraz $w_1, w_2 \in [0,1]$

SF_p – sumaryczne zużycie paliw płynnych dla stanu przed realizacją inwestycji,

SF_o – sumaryczne zużycie paliw płynnych dla stanu po realizacji inwestycji,

SE_p – sumaryczne zużycie energii elektrycznej dla stanu przed realizacją inwestycji,

SE_o – sumaryczne zużycie energii elektrycznej dla stanu po realizacji inwestycji.

Szacowanie wartości zużycia energii i paliw płynnych jest realizowane przy wykorzystaniu modelu symulacyjnego, w którym są zaimplementowane tożsame programy sygnalizacji i reguły sterowania, jakie zostały wdrożone w systemie ITS Tychy. W związku z tym efekty zastosowania priorytetu dla transportu zbiorowego mają odzwierciedlenie w prezentowanych w dalszej części opracowania analizach (efekt wdrożenia priorytetu został uwzględniony pośrednio w obliczeniach).

Model symulacyjny

Mikroskopowy model symulacyjny sieci transportowej miasta Tychy został opracowany w programie Aimsun Next 20. W ramach modelu dokładnie odwzorowano m.in.:

- infrastrukturę transportową,
- organizację ruchu,

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

- ruch drogowy,
- linie miejskiego transportu zbiorowego.

W modelu wykorzystano dane na temat ruchu drogowego z pomiarów ruchu drogowego zrealizowanych w ramach projektu. Na ich podstawie zostały przygotowane macierze ruchu dla każdej z kategorii pojazdów (samochody osobowe, samochody dostawcze, samochody ciężarowe, samochody ciężarowe z przyczepą oraz autobusy). Eksperymenty zostały przygotowane dla godziny szczytu porannego i popołudniowego w godzinach 7:15-8:15 oraz 15:15-16:15. Dla obu przedziałów czasu opracowane zostały odrębne scenariusze dla symulacji uwzględniające różnice w liczbie i strukturze rodzajowej pojazdów. Model został skalibrowany z wykorzystaniem danych z pomiarów przekrojowych.

Dzięki wykonaniu modelu symulacyjnego w skali mikroskopowej możliwe było bardzo szczegółowe odwzorowanie geometrii odcinków drogowych. Uwzględnione zostały klasy dróg, szerokości pasów ruchu oraz rozmiary skrzyżowań. W ramach modelu odwzorowane zostały skrzyżowania wielopoziomowe, ronda, lokalizacja przystanków autobusowych i trolejbusowych oraz infrastruktura kolejowa. Odwzorowana infrastruktura transportowa obejmuje obszar uzgodniony z Zamawiającym. Zakres modelu został przedstawiony na rysunku 10.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



Rysunek 10 Model sieci transportowej dla miasta Tychy
Źródło: opracowanie własne

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Odwzorowana w modelu symulacyjnym organizacja ruchu obejmuje takie elementy jak: zdefiniowanie prędkości dopuszczalnych dla każdego odcinka drogowego, zdefiniowanie pierwszeństwa przejazdu na skrzyżowaniach, sygnalizację świetlną wraz z opracowaniem sterowania ruchem, zdefiniowanie oznakowania poziome w tym lokalizację przejść dla pieszych. W ramach organizacji ruchu zdefiniowano także jednokierunkowe odcinki drogowe i wydzielone pasy dla autobusów.

Przygotowując dane do modelu symulacyjnego zrealizowano także przegląd wszystkich linii autobusowych i trolejbusowych kursujących w mieście Tychy w czasie, dla którego realizowany był model. Na podstawie rozkładów jazdy oraz przebiegu linii w modelu wykonano odwzorowanie sieci miejskiego transportu zbiorowego. Uwzględnione zostały tylko te linie, które w godzinach symulacji odbywały swoje kursy oraz przebieg ich tras można było odwzorować w modelu (ze względu na zakres modelu).

W modelu zaimplementowano również sterowniki sygnalizacji świetlnej wraz z programami tożsamymi do tych wdrożonych na sieci miejskiej miasta Tychy. Dzięki temu możliwe było dokładne odzwierciedlenie rzeczywistego sterowania wdrożonego w ramach ITS Tychy. W związku z tym również w ramach przeprowadzonych eksperymentów mikrosymulacyjnych podczas realizacji programu sterowania na skrzyżowaniach, funkcjonował priorytet dla pojazdów transportu publicznego.

Opracowanie modelu symulacyjnego w skali mikrosymulacyjnej umożliwiło miarodajne odwzorowanie zużycia paliw płynnych m.in. przez autobusy oraz uwzględnienie pośrednio wpływu priorytetu dla transportu zbiorowego. Ze względu na założenia metodyki oraz możliwości opracowanego modelu, w ramach szacowania zużycia paliw płynnych dla autobusów, nie było możliwości wyszczególnienia zużycia w ramach poruszania się po odcinkach prostych oraz zużycia paliwa wynikającego z przejazdu przez skrzyżowania gdzie działa priorytet. W związku z powyższym określenie bezpośredniego wpływu wdrożenia priorytetu dla transportu zbiorowego na redukcję zużycia paliw płynnych było niemożliwe.

Wskaźnik pośredni dla zużycia paliw płynnych

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Opracowany model symulacyjny w programie Aimsun wykorzystano do uzyskania wyników na temat zużycia paliw płynnych w systemie transportowym miasta Tychy. Wykorzystany został model Akcelika, który jest dostępny w programie. W modelu dla każdej z klas pojazdów utworzono pojazd ekwiwalentny oraz przypisano do niego charakterystyki niezbędne do wykonania obliczeń (zgodnie z przyjętą metodyką). Charakterystyki te zostały zaprezentowane w tabeli 27.

Tabela 27 Przyjęte charakterystyki dla pojazdów ekwiwalentnych dla każdej klasy pojazdów

	Samochód osobowy	Samochody dostawcze	Samochody ciężarowe	Samochody ciężarowe z przyczepą	Autobus miejski
F_1	5,2	6,3	16,2	21,6	27,5
F_2	7,0	8,4	21,8	29,0	36,9
v_m	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
F_i	0,3	0,4	1,1	1,4	1,8
c_1	0,4	0,5	1,3	1,8	2,3
c_2	0,3	0,3	0,8	1,1	1,4
Fd	0,5	0,7	1,7	2,3	2,9

Źródło: opracowanie własne

Po wprowadzeniu charakterystyk do programu oraz wykonaniu eksperymentu symulacyjnego dla godziny szczytu porannego i popołudniowego dla każdej z klas pojazdów uzyskano wyniki, będące łącznym zużyciem paliw płynnych w godzinie symulacji. Uzyskane wyniki zostały zaprezentowane w tabeli 28.

Tabela 28 Uzyskane wyniki zużycia paliw płynnych dla klas pojazdów dla szczytu porannego i popołudniowego

	Samochód osobowy	Samochody dostawcze	Samochody ciężarowe	Samochody ciężarowe z przyczepą	Autobus miejski
Zużycie paliw płynnych dla godziny szczytu porannego [litry]	7431,01	469,71	265,01	442,29	69,14
Zużycie paliw płynnych dla godziny szczytu popołudniowego [litry]	9779,22	618,14	348,75	582,06	90,99

Źródło: opracowanie własne

Największym szacowanym zużyciem paliw charakteryzuje się szczyt popołudniowy, co oczywiście bezpośrednio jest związane z występowaniem większego natężenia ruchu w tym okresie. Sumarycznie jest

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

to o około 31,6% większe zużycie paliwa niż w szczycie porannym. Ponad 85% zużycia w obu przypadkach należy przypisać do samochodów osobowych.

Wskaźnik dla zużycia energii elektrycznej

Wskaźnik dla energii elektrycznej został obliczony z dwóch zbiorów danych:

- liczby zużytych kilowatogodzin przez kursujące po mieście trolejbusy,
- liczby zużytych kilowatogodzin przez infrastrukturę drogową objętą inwestycją.

Dane na temat zużycia energii elektrycznej przez trolejbusy w latach 2022 - 2023 uzyskano od Tyskich Linii Trolejbusowych Spółka z o.o. Zostały one opracowane w celu opracowania wartości średniego dobowego zużycia energii elektrycznej dla trolejbusów, które wyniosło 7083,24 kWh.

Zużycie energii elektrycznej przez infrastrukturę transportową objętą inwestycją zostało wyznaczone na podstawie odczytów z liczników energii elektrycznej udostępnionych przez miasto Tychy. Pozyskane dane ze względu na różne terminy odczytów przeprowadzanych przez miasto w latach 2022 - 2023 obejmują cały lub prawie cały rok. Dzięki znajomości liczby dni, przez jaki przeprowadzany był odczyt w każdym punkcie pomiarowym, możliwe było przekształcenie danych w sposób analogiczny, jak w przypadku trolejbusów do postaci średniego dobowego zużycia energii elektrycznej przez infrastrukturę transportową. Uzyskane wartości średniego zużycia energii elektrycznej dla trolejbusów i infrastruktury transportowej przedstawiono w tabeli 29.

Tabela 29 Średnie dobowe zużycie energii elektrycznej dla trolejbusów i infrastruktury objętej inwestycją

Zużycie energii elektrycznej – infrastruktura [kWh]	757,42
Zużycie energii elektrycznej – trolejbusy [kWh]	7083,24

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie uzyskanych wyników (tabele 27 i 28) obliczono sumaryczne zużycie paliwa oraz sumaryczne zużycie energii elektrycznej po realizacji inwestycji:

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

1. $SF_o = 20096,32$ – sumaryczne zużycie paliw płynnych dla stanu po realizacji inwestycji [litry],
2. $SE_o = 7840,66$ – sumaryczne zużycie energii elektrycznej dla stanu po realizacji inwestycji [kWh].

Aktualne wyniki dla stanu po realizacji inwestycji wraz z wynikami pomiarów dla stanu przed inwestycją użyto do wyznaczenia wskaźnika zużycia energii elektrycznej i paliw płynnych $WBZEP$ przyjmując wartości wag $w_1=0,997$ oraz $w_2=0,003$. Uzyskano wartość wskaźnika $WBZEP=0,954$. Na podstawie uzyskanego wyniku można stwierdzić, że zużycie energii elektrycznej i paliw płynnych w wyniku przeprowadzonej inwestycji spadło o 4,6%.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

6. Podsumowanie i wnioski z przeprowadzonej analizy wskaźnikowej

Celem przeprowadzonych badań była analiza zmian dotyczących wskaźników: czasu przejazdu, poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz zużycia energii elektrycznej i paliw płynnych, związanych z realizacją inwestycji pt. „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach”.

Wskaźnik rzeczywistego czasu przejazdu

Wskaźnik rzeczywistego czasu przejazdu obliczono z wykorzystaniem metody prostej i złożonej. Otrzymane pomiary czasu przejazdu dla stanu przed i po inwestycyjnego zostały porównane w celu oszacowania wskaźnika skrócenia rzeczywistego czasu przejazdu zgodnie z założeniami metodyki. Za pomocą metody prostej, czyli bezpośredniej, wykazano przeciętną redukcję czasu przejazdu w sieci drogowej wynoszącą 7,07%. Średni globalny czas przejazdu dla szczytu porannego wyniósł 5,99 minuty, a dla szczytu popołudniowego 6,76 minuty. Odpowiednio dla pomiarów przed inwestycyjnych te wartości wynosiły: 7,19 i 8,13 minuty. Redukcja przeciętnego czasu przejazdu wyniosła: 1,14 minuty dla szczytu porannego oraz 1,27 minuty dla szczytu popołudniowego.

W przypadku metody zaawansowanej, która zakładała powiązanie głównych cech ruchu drogowego, czyli prędkości, natężenia i gęstości ruchu, osiągnięto większe poziomy redukcji czasu przejazdu. Wartości redukcji czasu przejazdu ostatecznie wyniosły 10,00% oraz 9,55% odpowiednio dla szczytu porannego i popołudniowego. Wartości uzyskano z wykorzystaniem opracowanych modeli teoretycznych charakteryzujących się bardzo dobrym dopasowaniem do danych empirycznych.

Wskaźnik poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego

W ramach wskaźnika zgodnie z przyjętą metodyką analizowano: bezpieczeństwo na skrzyżowaniach, bezpieczeństwo na odcinkach drogowych, bezpieczeństwo na przejazdach kolejowych oraz dane statystyczne na temat wypadków w ruchu drogowym. Dla każdej z czterech składowych wskaźnika przyjęto wagi umożliwiające obliczenie wartości wskaźnika. Wartość referencyjna wskaźnika poziomu bezpieczeństwa dla stanu przed inwestycyjnego wynosi 1,66, wartość wskaźnika po realizacji inwestycji wyniosła 0,947. Na podstawie uzyskanych wartości można stwierdzić, że realizacja inwestycji spowodowała poprawę bezpieczeństwa ruchu drogowego i spadek wskaźnika poziomu bezpieczeństwa o około 43%.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Wskaźnik zużycia energii elektrycznej i paliw płynnych

Wskaźnik obliczono z podziałem na zużycie energii elektrycznej (obliczone dla infrastruktury i trolejbusów) i zużycie paliw płynnych (obliczone dla wszystkich pojazdów spaliniowych w systemie transportowym miasta Tychy). Największe zużycie paliw odnotowano dla godzin szczytu popołudniowego - łączne zużycie paliw większe o 31,6% niż dla godzin szczytu porannego. W przypadku obu szczytów komunikacyjnych 85% zużycia paliw odnotowano dla samochodów osobowych. W obliczeniu wskaźnika zgodnie z przyjętą metodyką wyznaczono wagi dla obu grup. Uzyskano wartość wskaźnika zużycia energii elektrycznej i paliw płynnych równą 0,954. Wartość tę należy interpretować jako redukcję łącznego zużycia energii elektrycznej i paliw płynnych około 4,6% w skali całego obszaru objętego inwestycją. Warto również zwrócić uwagę, że korzyści wynikające z wdrożenia priorytetów dla komunikacji zbiorowej są pośrednio uwzględnione w wynikach analizy.

Podsumowanie

Założeniem przeprowadzonej inwestycji pt. „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” było: skrócenie rzeczywistego czasu przejazdu, poprawienie bezpieczeństwa w ruchu drogowym oraz zredukowanie łącznego zużycia energii elektrycznej i paliw płynnych. Wszystkie założone cele zostały osiągnięte.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

7. Spis rysunków

RYSUNEK 1 LOKALIZACJA PUNKTÓW POMIAROWYCH	6
RYSUNEK 2 UKŁAD DROGOWY WOKÓŁ MIASTA TYCHY ORAZ OBJAZD WDROŻONY (ZIELONE STRZAŁKI) W WYNIKU PRAC NA DW934 (CZERWONA LINIA)	9
RYSUNEK 3 TYPOWE NATĘŻENIE RUCHU NA FRAGMENTIE ODCINKA A09-A12 W SZCZYCIE PORANNYM	<u>1041</u>
RYSUNEK 4 TYPOWE NATĘŻENIE RUCHU NA FRAGMENTIE ODCINKA A09-A12 W SZCZYCIE POPOŁUDNIOWYM	<u>1112</u>
RYSUNEK 5 LICZBA POJAZDÓW ZAREJESTROWANA W WYBRANYCH DNIACH W PUNKCIE A12	<u>1213</u>
RYSUNEK 6 ROZKŁAD PRAWDOPODOBIEŃSTWA CZASU PRZEJAZDU DLA WSZYSTKICH POMIARÓW OBJĘTYCH ANALIZĄ	<u>1920</u>
RYSUNEK 7 ROZKŁAD PRAWDOPODOBIEŃSTWA PRĘDKOŚCI DLA WSZYSTKICH POMIARÓW OBJĘTYCH ANALIZĄ	<u>1920</u>
RYSUNEK 8 ŚREDNIE CZASY PRZEJAZDU DLA STANU PRZED I PO INWESTYCYJNEGO DLA OBU SZCZYTÓW KOMUNIKACYJNYCH (RANO – PO LEWEJ, POPOŁUDNIU – PO PRAWEJ)	<u>2425</u>
RYSUNEK 9 LOKALIZACJA ODCINKÓW DROGOWYCH ROZPATRYWANYCH W ANALIZIE	<u>4850</u>
RYSUNEK 10 MODEL SIECI TRANSPORTOWEJ DLA MIASTA TYCHY	<u>7477</u>

8. Spis tabel

TABELA 1 STATYSTYKA OPISOWA DLA POMIARU CZASU PRZEJAZDU DLA SZCZYTU PORANNEGO PO INWESTYCJI	<u>1516</u>
TABELA 2 STATYSTYKA OPISOWA DLA POMIARU CZASU PRZEJAZDU DLA SZCZYTU POPOŁUDNIOWEGO PO INWESTYCJI	<u>1617</u>
TABELA 3 LICZBA POJAZDÓW PODDANA ANALIZIE W UJĘCIU NA RELACJĘ I W ZALEŻNOŚCI OD PORY DOBY	<u>1718</u>
TABELA 4 ŚREDNIE CZASY PRZEJAZDU DLA STANU PRZED I PO INWESTYCYJNEGO DLA OBU SZCZYTÓW KOMUNIKACYJNYCH (R – RANO, P-POPOŁUDNIU)	<u>2122</u>
TABELA 5 WIELKOŚĆ ZMIAN DLA KAŻDEJ RELACJI ORAZ WSKAŹNIKI ZMIANY W CZASIE PRZEJAZDU DLA OBU PÓR DOBY	<u>2223</u>

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

TABELA 6 WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA DETERMINACJI R^2 DLA WYBRANYCH POSTACI FUNKCYJNYCH DLA CZASU PRZEJAZDU.....	3133
TABELA 7 PARAMETRY FUNKCJI OPORU BPR DLA POSZCZEGÓLNYCH RELACJI POMIAROWYCH.....	3335
TABELA 8 PARAMETRY FUNKCJI OPORU OVERGAARD'A DLA POSZCZEGÓLNYCH RELACJI POMIAROWYCH.....	3436
TABELA 9 PARAMETRY MODELU QVK DLA FUNKCJI VANAERDE DLA POSZCZEGÓLNYCH RELACJI POMIAROWYCH.....	3436
TABELA 10 PARAMETRY MODELU QVK DLA FUNKCJI PROF. KRYSTKA DLA POSZCZEGÓLNYCH RELACJI POMIAROWYCH.....	3638
TABELA 11 PRZYPISANIE TYPÓW FUNKCJI OPORU I QVK WYKORZYSTANYCH W ANALIZIE PORÓWNAWCZEJ....	3638
TABELA 12 SYNTETYCZNE PORÓWNANIE TEORETYCZNYCH ŚREDNICH CZASÓW PRZEJAZDU DLA SZCZYTU PORANNEGO.....	3840
TABELA 13 SYNTETYCZNE PORÓWNANIE TEORETYCZNYCH ŚREDNICH CZASÓW PRZEJAZDU DLA SZCZYTU POPOŁUDNIOWEGO.....	3941
TABELA 14 ZWERYFIKOWANE SYNTETYCZNE PORÓWNANIE TEORETYCZNYCH ŚREDNICH CZASÓW PRZEJAZDU DLA SZCZYTU PORANNEGO.....	4143
TABELA 15 ZWERYFIKOWANE SYNTETYCZNE PORÓWNANIE TEORETYCZNYCH ŚREDNICH CZASÓW PRZEJAZDU DLA SZCZYTU POPOŁUDNIOWEGO.....	4244
TABELA 16 KATEGORIE ROZPATRYWANYCH ZDARZEŃ DROGOWYCH.....	4749
TABELA 17 WYKAZ ORAZ WYPADKOWOŚĆ DLA ANALIZOWANYCH ODCINKÓW DROGOWYCH W OKRESIE PRZED INWESTYCYJNYM.....	4951
TABELA 18 WYKAZ ORAZ WYPADKOWOŚĆ DLA ANALIZOWANYCH ODCINKÓW DROGOWYCH W OKRESIE PO INWESTYCYJNYM.....	5052
TABELA 19 WARTOŚCI CZĄSTKOWE SKŁADOWEJ WYPADKOWOŚCI ODCINKÓW DROGOWYCH DLA STANU PO ORAZ PRZED INWESTYCJĄ.....	5254
TABELA 20 PUNKTOWA OCENA ODCINKÓW DROGOWYCH DLA STANU PRZED ORAZ PO INWESTYCYJNEGO.....	5456
TABELA 21 WYKAZ ROZPATRYWANYCH SKRZYŻOWAŃ ORAZ WARTOŚCI CZĄSTKOWE SKŁADOWEJ WSKAŹNIKA DLA STANU PRZED INWESTYCYJNEGO.....	5759
TABELA 22 WYKAZ ROZPATRYWANYCH SKRZYŻOWAŃ ORAZ WARTOŚCI CZĄSTKOWE SKŁADOWEJ WSKAŹNIKA DLA STANU PO INWESTYCYJNEGO.....	5961
TABELA 23 WARTOŚCI CZĄSTKOWE SKŁADOWEJ WSKAŹNIKA DOTYCZĄCEJ LICZBY PRZEJAZDÓW NA CZERWONYM ŚWIECIE.....	6264

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

TABELA 24 WYKAZ ROZPATRYWANYCH PRZEJAZDÓW KOLEJOWYCH.....	6568
TABELA 25 WARTOŚCI CZĄSTKOWE WSPÓŁCZYNNIKA ZDARZEŃ DROGOWYCH	6770
TABELA 26 PRZYJĘTE WARTOŚCI WAG DLA SKŁADOWYCH WSKAŹNIKA POZIOMU BEZPIECZEŃSTWA	7173
TABELA 27 PRZYJĘTE CHARAKTERYSTYKI DLA POJAZDÓW EKWIWALENTNYCH DLA KAŻDEJ KLASY POJAZDÓW	7679
TABELA 28 UZYSKANE WYNIKI ZUŻYCIA PALIW PŁYNNYCH DLA KLAS POJAZDÓW DLA SZCZYTU PORANNEGO I POPOŁUDNIOWEGO	7679
TABELA 29 ŚREDNIE DOBOWE ZUŻYCIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ DLA TROLEJBUSÓW I INFRASTRUKTURY OBJĘTEJ INWESTYCJĄ.....	7780

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

9. Wykaz literatury

- [1] Cieślakowski S., *Ocena bezpieczeństwa na przejazdach kolejowych w Polsce*, Technika Transportu Szynowego 3/2009;
- [2] Jażdżik-Osmólska A., Korneć R., *Wycena kosztów wypadków i kolizji drogowych na sieci dróg w Polsce na koniec roku 2018, z wyodrębnieniem średnich kosztów społeczno-ekonomicznych wypadków na transeuropejskiej sieci transportowej*, Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach, Warszawa 2019;
- [3] Kucharski R., Drabicki A., *Estimating Macroscopic Volume Delay Functions with the Traffic Density Derived from Measured Speeds and Flows*, Journal of Advanced Transportation Volume 2017, Article ID 4629792, <https://doi.org/10.1155/2017/4629792>;
- [4] Matusz P., Rudecki G., Oskarbski J., Jamroz K., *Problematyka modelowania zależności prędkość – gęstość – natężenie w warunkach ruchu miejskiego*. Transport Miejski i Regionalny 07/2016;
- [5] Zawisza M., Maciasz K., Birr K., Jamroz K., Budziszewski T., *Wybrane problemy modelowania rozkładu przestrzennego i czasu podróży na przykładzie Gdańska*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK w Krakowie, nr 1 (97), 2012;
- [6] Żochowska R., *Modelowanie wyboru trasy w gęstych sieciach miejskich*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, TRANSPORT z. 71, 2011.

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Załącznik 1.

Poniżej przedstawiono wyniki analizy czasu przejazdu zmierzonego dla stanu przed inwestycyjnego. Jest to kopia wyników analizy w celu, łatwiejszego porównania rezultatów pomiarów dla stanu po inwestycyjnego. Pozostałe wyniki oraz szczegółowa analiza zostały zaprezentowane w raporcie pt. „Wskaźniki efektywności funkcjonowania Inteligentnego Systemu Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach – stan przed inwestycyjny”, wersja 4.0.

Przyjęte oznaczenia (zgodnie z opisem metodyki):

R^R – zbiór relacji dla szczytu porannego,

R^P – zbiór relacji dla szczytu popołudniowego,

$\bar{P}_i^R$ – wartość średnia czasu przejazdu dla i-tej relacji dla szczytu porannego [min],

$\bar{P}_j^P$ – wartość średnia czasu przejazdu dla j-tej relacji dla szczytu popołudniowego [min],

$\bar{S}_i^R$ – wartość odchylenia standardowego pomiarów dla i-tej relacji dla szczytu porannego [min],

$\bar{S}_j^P$ – wartość odchylenia standardowego pomiarów dla j-tej relacji dla szczytu popołudniowego [min],

$Q1_i^R$ – pierwszy kwartyl czasu przejazdu dla i-tej relacji dla szczytu porannego [min],

$Q1_j^P$ – pierwszy kwartyl przejazdu dla j-tej relacji dla szczytu popołudniowego [min],

Me_i^R – mediana czasu przejazdu dla i-tej relacji dla szczytu porannego [min],

Me_j^P – mediana czasu przejazdu dla j-tej relacji dla szczytu popołudniowego [min],

$Q3_i^R$ – trzeci kwartyl czasu przejazdu dla i-tej relacji dla szczytu porannego [min],

$Q3_j^P$ – trzeci kwartyl przejazdu dla j-tej relacji dla szczytu popołudniowego [min],

V_i^R – wartość współczynnika zmienności czasu przejazdu dla i-tej relacji dla szczytu porannego [%],

V_i^P – wartość współczynnika zmienności czasu przejazdu dla j-tej relacji dla szczytu popołudniowego [%].

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Tab. 1 Statystyka opisowa dla pomiaru czasu przejazdu dla szczytu porannego – stan przed inwestycyjny

Relacja	$\bar{P}_i^R$	$\bar{S}_i^R$	$Q1_i^R$	Me_i^R	$Q3_i^R$	V_i^R
A01-A02	4,90	0,76	4,40	4,72	5,17	15,5%
A01-A03	7,95	1,52	7,00	7,72	8,73	19,2%
A01-A04	10,33	2,22	8,68	10,02	11,26	21,5%
A01-A05	5,12	1,27	4,17	4,95	5,88	24,8%
A01-A06	4,58	1,20	3,80	4,40	5,04	26,3%
A01-A07	2,60	0,38	2,33	2,57	2,83	14,4%
A02-A01	8,27	2,67	6,28	7,29	9,75	32,3%
A02-A05	13,68	4,13	12,60	13,45	14,47	30,2%
A02-A06	12,39	4,85	8,81	12,49	15,51	39,1%
A03-A01	11,38	3,98	8,52	10,24	13,12	35,0%
A03-A05	4,86	1,49	3,73	4,57	5,68	30,7%
A03-A06	4,14	0,83	3,53	4,08	4,68	20,2%
A03-A08	3,53	0,88	2,94	3,38	3,85	25,0%
A04-A01	13,25	3,29	10,12	13,14	15,38	24,8%
A04-A05	11,84	4,70	7,41	11,92	14,53	39,7%
A04-A06	7,97	3,82	5,13	6,55	9,78	48,0%
A04-A10	1,78	0,63	1,32	1,70	2,10	35,5%
A05-A01	8,24	3,22	5,91	6,95	10,27	39,1%
A05-A02	14,90	4,87	11,00	13,48	19,28	32,7%
A05-A03	5,37	1,79	4,24	5,08	5,90	33,2%
A05-A04	14,89	8,73	5,80	16,92	22,87	58,7%
A05-A06	1,34	0,44	1,02	1,18	1,63	33,0%
A06-A01	7,19	2,72	5,21	6,20	9,28	37,9%
A06-A02	15,17	7,53	8,65	12,92	23,33	49,6%
A06-A03	4,52	1,06	3,77	4,50	5,08	23,5%
A06-A04	6,93	2,22	5,67	6,53	7,44	32,1%
A06-A05	2,73	1,55	1,70	2,43	3,13	56,8%
A06-A12	5,14	0,73	4,73	5,07	5,38	14,1%
A07-A01	2,58	0,34	2,33	2,55	2,82	13,1%
A08-A03	3,85	0,86	3,29	3,72	4,20	22,5%
A10-A04	1,78	0,55	1,33	1,72	2,15	30,7%
A12-A06	5,09	0,76	4,65	4,98	5,32	14,9%
A12-A09	6,84	1,14	6,02	6,65	7,50	16,7%
Średnia	7,13	2,34	5,34	6,79	8,59	30%

Źródło: opracowanie własne

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Tab. 2 Statystyka opisowa dla pomiaru czasu przejazdu dla szczytu popołudniowego – stan przed inwestycyjny

Relacja	$\bar{P}_j^P$	$\bar{S}_j^P$	$Q1_j^P$	Me_j^P	$Q3_j^P$	V_j^P
A01-A02	5,14	0,73	4,67	5,02	5,37	14,2%
A01-A03	8,88	2,50	7,32	8,28	9,73	28,1%
A01-A04	11,70	3,80	8,91	10,12	15,30	32,5%
A01-A05	4,58	0,94	3,90	4,52	5,21	20,5%
A01-A06	4,44	0,87	3,85	4,40	4,93	19,5%
A01-A07	2,64	0,33	2,38	2,62	2,85	12,4%
A02-A01	9,30	1,75	8,00	9,12	10,38	18,8%
A02-A05	18,55	5,85	14,41	18,51	23,55	31,6%
A02-A06	10,97	3,33	7,83	10,72	13,74	30,3%
A03-A01	13,80	2,68	11,76	13,33	15,73	19,5%
A03-A05	4,32	0,93	3,58	4,27	4,88	21,6%
A03-A06	4,35	0,86	3,72	4,32	4,88	19,7%
A03-A08	6,49	1,57	5,49	6,42	7,48	24,3%
A04-A01	15,13	2,77	13,04	14,77	17,17	18,3%
A04-A05	15,86	7,39	6,73	17,62	22,26	46,6%
A04-A06	7,09	2,29	5,47	6,43	7,96	32,3%
A04-A10	1,88	0,54	1,44	1,87	2,30	28,4%
A05-A01	11,35	2,24	9,73	11,09	12,83	19,7%
A05-A02	17,72	6,07	12,13	15,97	23,89	34,3%
A05-A03	5,46	1,31	4,64	5,34	5,93	23,9%
A05-A04	15,43	4,31	14,13	14,71	18,90	27,9%
A05-A06	1,24	0,36	1,00	1,15	1,37	28,8%
A06-A01	10,02	2,41	8,20	9,95	11,36	24,0%
A06-A02	14,93	6,57	8,02	14,72	21,00	44,0%
A06-A03	4,80	0,90	4,17	4,79	5,42	18,8%
A06-A04	7,77	3,00	5,56	6,84	8,63	38,6%
A06-A05	2,32	0,77	1,73	2,40	2,84	33,4%
A06-A12	5,06	0,61	4,65	4,98	5,40	12,1%
A07-A01	6,31	1,67	5,05	6,83	7,58	26,5%
A08-A03	4,31	0,74	3,93	4,33	4,85	17,3%
A10-A04	1,91	0,48	1,52	1,90	2,25	25,4%
A12-A06	5,07	0,57	4,68	5,03	5,38	11,3%
A12-A09	6,35	0,85	5,72	6,18	6,95	13,4%
Średnia	8,04	2,18	6,28	7,83	9,65	25%

Źródło: opracowanie własne

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Załącznik 2.

Jakość dopasowania modeli teoretycznych do danych empirycznych dla stanu przed inwestycyjnego.

Tabela 1 Wartości współczynnika determinacji R^2 dla wybranych postaci funkcyjnych dla czasu przejazdu

Relacja	Funkcja BPR	Funkcja Overgaard'a	Funkcja Inrets	Funkcja Underwood'a	Funkcja vanAerde	Funkcja prof. Krystka
A01-A02-1	57,83%	57,57%	56,91%	56,37%	58,94%	55,62%
A01-A02-2	90,38%	92,36%	84,89%	91,32%	93,36%	91,96%
A01-A03-1	92,18%	93,31%	88,13%	89,70%	98,03%	89,11%
A01-A03-2	96,22%	97,94%	90,45%	92,50%	99,71%	91,75%
A01-A04-1	93,20%	93,37%	89,97%	91,17%	99,04%	90,50%
A01-A04-2	98,49%	99,01%	95,17%	96,16%	99,78%	95,65%
A01-A05-1	78,80%	81,96%	73,45%	80,29%	85,50%	80,19%
A01-A05-2	85,93%	95,86%	76,90%	92,30%	96,67%	92,38%
A01-A06-1	80,78%	87,47%	70,27%	81,93%	92,07%	82,42%
A01-A06-2	88,57%	96,47%	80,47%	83,35%	99,73%	85,19%
A01-A07-1	48,05%	76,05%	59,21%	75,73%	76,61%	75,97%
A01-A07-2	60,82%	83,39%	64,51%	82,80%	84,24%	83,08%
A02-A01-1	75,35%	76,17%	74,52%	73,74%	75,52%	72,83%
A02-A01-2	76,26%	76,35%	75,94%	75,98%	76,36%	75,55%
A02-A05-1	92,60%	92,03%	78,10%	88,73%	96,94%	75,93%
A02-A05-2	96,54%	95,68%	91,54%	90,58%	98,88%	83,08%
A02-A06-1	81,57%	81,35%	81,12%	79,03%	84,61%	72,81%
A02-A06-2	96,44%	96,27%	94,25%	93,92%	98,43%	87,28%
A03-A01-1	85,42%	85,65%	84,33%	84,03%	85,89%	83,49%
A03-A01-2	91,47%	91,48%	91,22%	89,97%	96,01%	91,20%
A03-A05-1	90,03%	91,95%	84,49%	87,56%	97,05%	76,59%
A03-A05-2	92,82%	93,71%	89,09%	90,05%	97,87%	83,19%
A03-A06-1	62,52%	-	59,86%	61,94%	61,58%	60,05%
A03-A06-2	82,80%	83,40%	79,43%	82,27%	84,98%	80,93%
A03-A08-1	68,40%	5,70%	63,88%	66,26%	85,47%	2,58%
A03-A08-2	89,91%	90,79%	86,04%	87,27%	94,57%	81,67%
A04-A01-1	66,57%	66,36%	66,25%	64,89%	61,77%	65,71%
A04-A01-2	88,02%	88,05%	88,02%	87,56%	88,79%	87,68%
A04-A05-1	78,38%	77,82%	73,54%	74,02%	73,34%	64,74%
A04-A05-2	92,84%	92,56%	91,17%	90,79%	70,85%	88,40%
A04-A06-1	75,29%	76,28%	71,35%	74,04%	79,14%	69,67%
A04-A06-2	94,79%	94,94%	88,90%	93,22%	96,47%	89,99%

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Relacja	Funkcja BPR	Funkcja Overgaard'a	Funkcja Inrets	Funkcja Underwood'a	Funkcja vanAerde	Funkcja prof. Krystka
A04-A10-1	53,75%	1,19%	49,29%	55,79%	59,07%	11,22%
A04-A10-2	75,47%	-	68,30%	78,19%	79,51%	76,39%
A05-A01-1	94,45%	95,43%	91,26%	92,44%	94,17%	94,32%
A05-A01-2	87,13%	87,18%	86,08%	85,15%	83,35%	88,33%
A05-A02-1	97,47%	97,44%	95,56%	94,50%	98,92%	92,67%
A05-A02-2	59,83%	58,54%	55,43%	54,22%	30,25%	52,62%
A05-A03-1	93,23%	94,90%	88,18%	89,64%	97,71%	85,15%
A05-A03-2	94,29%	94,90%	91,05%	92,07%	98,12%	89,06%
A05-A04-1	99,55%	99,29%	98,29%	99,04%	99,36%	98,89%
A05-A04-2	88,60%	88,34%	83,98%	86,26%	56,26%	83,11%
A05-A06-1	94,08%	95,34%	86,33%	88,57%	98,25%	83,91%
A05-A06-2	93,09%	95,06%	87,32%	88,71%	98,78%	86,56%
A06-A01-1	85,28%	86,85%	83,06%	84,36%	86,26%	84,53%
A06-A01-2	88,48%	88,14%	88,09%	87,61%	89,99%	88,09%
A06-A02-1	95,85%	96,02%	94,87%	93,27%	94,48%	89,66%
A06-A02-2	96,54%	96,39%	86,97%	93,74%	95,02%	89,13%
A06-A03-1	65,75%	1,50%	63,97%	64,42%	67,08%	62,17%
A06-A03-2	76,04%	77,67%	74,38%	75,41%	78,07%	73,98%
A06-A04-1	82,99%	83,19%	80,75%	82,38%	93,95%	78,57%
A06-A04-2	93,77%	94,18%	86,47%	91,53%	86,19%	86,51%
A06-A05-1	86,30%	87,34%	82,72%	82,20%	88,85%	71,87%
A06-A05-2	88,27%	89,88%	84,17%	84,80%	94,08%	76,80%
A06-A12-1	57,39%	57,82%	56,92%	57,36%	57,63%	57,16%
A06-A12-2	62,68%	62,74%	62,82%	62,48%	61,60%	62,60%
A07-A01-1	24,22%	42,61%	34,16%	42,25%	42,48%	41,84%
A07-A01-2	95,49%	96,65%	92,58%	94,58%	94,34%	96,27%
A08-A03-1	45,62%	3,79%	45,06%	45,28%	46,87%	10,69%
A08-A03-2	72,75%	8,96%	71,51%	72,43%	84,86%	68,56%
A10-A04-1	49,23%	-	47,04%	50,28%	52,66%	49,20%
A10-A04-2	69,88%	73,68%	65,14%	71,42%	73,52%	70,85%
A12-A06-1	46,00%	46,32%	45,92%	45,45%	45,22%	45,74%
A12-A06-2	71,01%	71,01%	70,65%	70,96%	72,37%	71,01%
A12-A09-1	40,85%	51,84%	35,02%	51,39%	51,22%	51,52%
A12-A09-2	50,25%	66,03%	46,67%	66,01%	66,85%	66,12%
Średnia	78,19%	77,24%	75,31%	78,57%	81,26%	74,43%

Źródło: opracowanie własne

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Parametry dla opracowanych modeli:

Tabela 2 Parametry funkcji oporu BPR dla poszczególnych relacji pomiarowych

Relacja	Parametry modelu BPR			
	V_o	$\hat{k}_{max}$	a	b
A03-A06-1	50,00	30,41	4,36	1,67
A04-A01-1	43,78	66,67	3,04	0,98
A04-A05-1	50,00	29,06	4,60	1,57
A04-A05-2	50,00	39,42	4,09	1,62
A05-A02-2	50,00	37,66	3,82	1,55
A05-A04-1	40,70	49,39	3,51	1,87
A05-A04-2	50,00	44,98	4,38	1,68
A06-A02-2	50,00	38,10	4,22	1,54
Objaśnienia: V_o – oszacowana prędkość w ruchu swobodnym [km/h]; $\hat{k}_{max}$ – oszacowana maksymalna gęstość ruchu [poj./km/pas]; a, b – parametry funkcji BPR [-];				

Źródło: opracowanie własne

Tabela 3 Parametry funkcji oporu Overgaard'a dla poszczególnych relacji pomiarowych

Relacja	Parametry modelu Overgaard'a			
	V_o	$\hat{k}_{max}$	α	β
A02-A01-1	30,84	150,00	8,39	0,36
A05-A01-1	38,14	150,00	6,68	0,48
A06-A01-1	21,45	150,00	5,08	0,44
A06-A02-1	13,28	150,00	6,61	0,38
A06-A04-2	15,14	150,00	6,09	0,48
A06-A12-1	27,36	150,00	5,17	0,61
A07-A01-1	26,96	60,01	1,35	2,13
A07-A01-2	21,76	150,00	3,38	0,57
A10-A04-2	15,88	150,00	5,73	0,55
A12-A06-1	64,40	150,00	4,42	0,41
A12-A09-1	21,35	150,00	4,66	1,15
Objaśnienia: V_o – szacowana prędkość w ruchu swobodnym [km/h]; $\hat{k}_{max}$ – szacowana maksymalna gęstość ruchu [poj./km/pas]; α, β – parametry modelu Overgaard'a [-];				

Źródło: opracowanie własne

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Tabela 4 Parametry modelu QVK dla funkcji vanAerde dla poszczególnych relacji pomiarowych

Relacja	Parametry modelu vanAerde			
	V_{opt}	V_0	$\hat{q}_{max}$	$\hat{k}_{max}$
A01-A02-1	25,08	25,07	1067,63	44,76
A01-A02-2	45,14	44,91	1095,87	1,09
A01-A03-1	15,19	15,04	530,50	1,01
A01-A03-2	29,19	28,70	546,69	79,49
A01-A04-1	9,09	8,91	536,86	94,24
A01-A04-2	21,12	21,02	547,93	1,26
A01-A05-1	28,31	28,31	536,99	19,19
A01-A05-2	38,49	38,25	554,74	1,03
A01-A06-1	39,14	38,71	550,33	1,25
A01-A06-2	39,29	39,01	555,67	2,67
A01-A07-1	46,70	46,69	1061,30	31,94
A01-A07-2	46,14	46,13	976,92	26,71
A02-A01-2	31,51	28,93	461,95	34,71
A02-A05-1	17,47	14,73	173,63	150,00
A02-A05-2	10,12	9,85	280,21	91,29
A02-A06-1	17,30	17,29	152,49	37,54
A02-A06-2	22,72	22,72	301,24	84,53
A03-A01-1	23,23	22,98	558,52	4,66
A03-A01-2	17,05	17,05	647,73	21,06
A03-A05-1	16,98	16,81	293,11	1,08
A03-A05-2	32,52	32,13	339,67	2,84
A03-A06-2	41,54	37,59	344,55	148,08
A03-A08-1	46,73	46,73	247,06	11,97
A03-A08-2	21,20	21,08	376,41	1,02
A04-A01-2	18,06	17,71	766,48	10,49
A04-A06-1	25,24	25,06	276,25	1,03
A04-A06-2	23,78	21,50	412,01	149,97
A04-A10-1	40,97	40,71	223,65	15,45
A04-A10-2	37,69	36,04	302,21	12,68
A05-A02-1	14,58	14,58	421,15	73,34
A05-A03-1	39,85	37,11	431,03	149,96
A05-A03-2	39,91	37,90	471,87	87,79

Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Relacja	Parametry modelu vanAerde			
	V_{opt}	V_o	$\hat{q}_{max}$	$\hat{k}_{max}$
A05-A06-1	28,79	27,02	417,98	149,98
A05-A06-2	15,47	15,32	460,70	1,28
A06-A01-2	21,08	20,87	732,43	4,68
A06-A03-1	26,71	26,70	333,62	28,71
A06-A03-2	31,61	30,90	379,66	50,42
A06-A04-1	27,70	27,25	350,38	1,58
A06-A05-1	18,49	18,49	320,70	60,87
A06-A05-2	15,73	15,73	373,94	89,08
A08-A03-1	42,12	42,11	173,92	4,03
A08-A03-2	31,52	30,84	205,95	26,42
A10-A04-1	40,42	39,31	284,00	92,98
A12-A06-2	65,65	65,64	1543,65	48,78
A12-A09-2	99,21	98,44	804,87	1,03

Objaśnienia: V_{opt} – szacowana prędkość optymalna [km/h]; V_o – szacowana prędkość w ruchu swobodnym [km/h]; $\hat{q}_{max}$ – szacowane natężenie maksymalne [poj./h/pas]; $\hat{k}_{max}$ – szacowana maksymalna gęstość ruchu [poj./km/pas];
Źródło: opracowanie własne

Tabela 5 Parametry modelu QVK dla funkcji prof. Krystka dla poszczególnych relacji pomiarowych

Relacja	Parametry modelu Krystka	
	$\hat{k}_{max}$	V_o
A12-A06-2	150	90

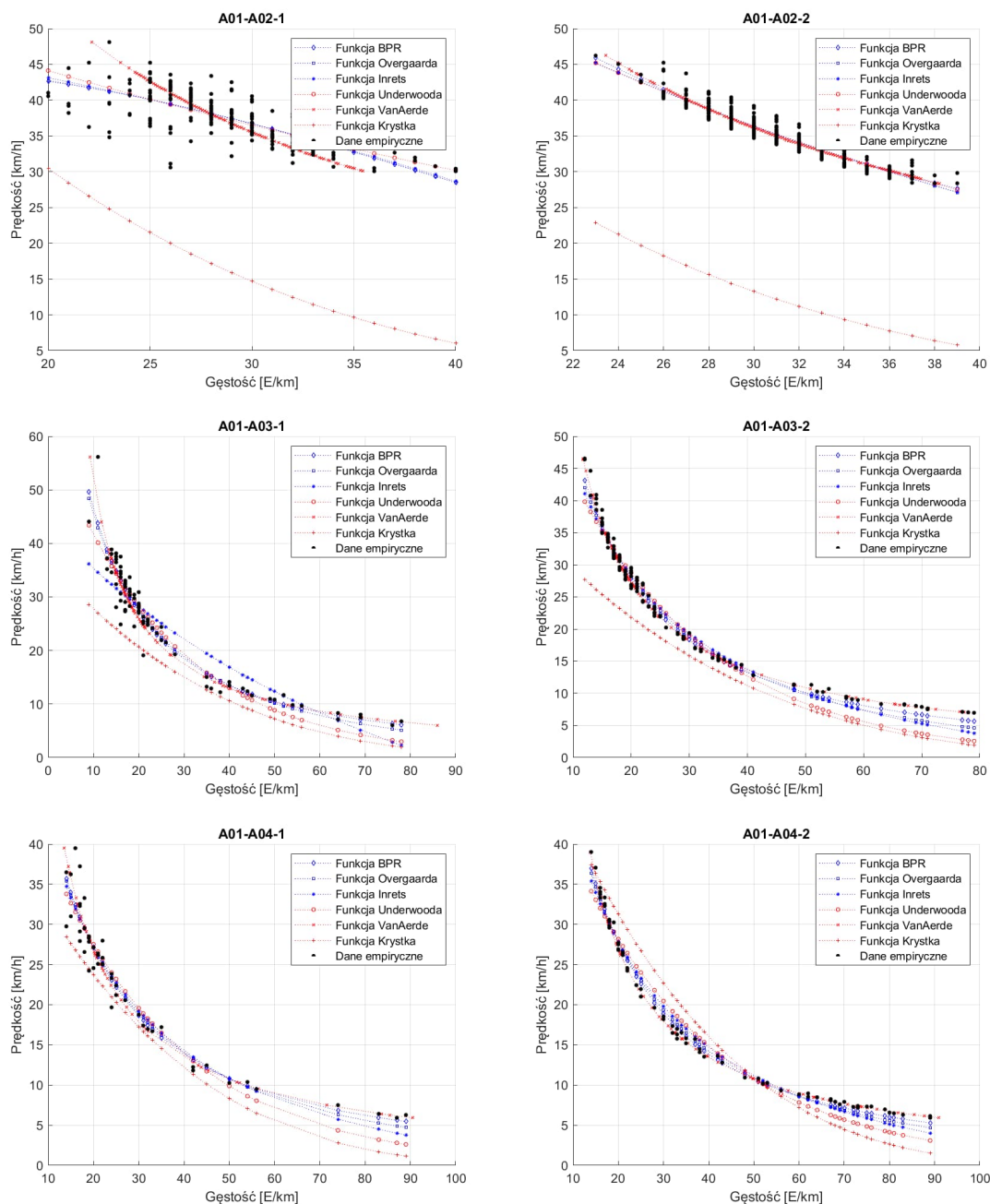
Objaśnienia: $\hat{k}_{max}$ – szacowana maksymalna gęstość ruchu [poj./km/pas]; V_o – szacowana prędkość w ruchu swobodnym [km/h];
Źródło: opracowanie własne

Relacja	Parametry modelu Inrets			
	V_o	$\hat{k}_{max}$	α	c
A06-A12-2	82,39	78,14	0,44	0,33

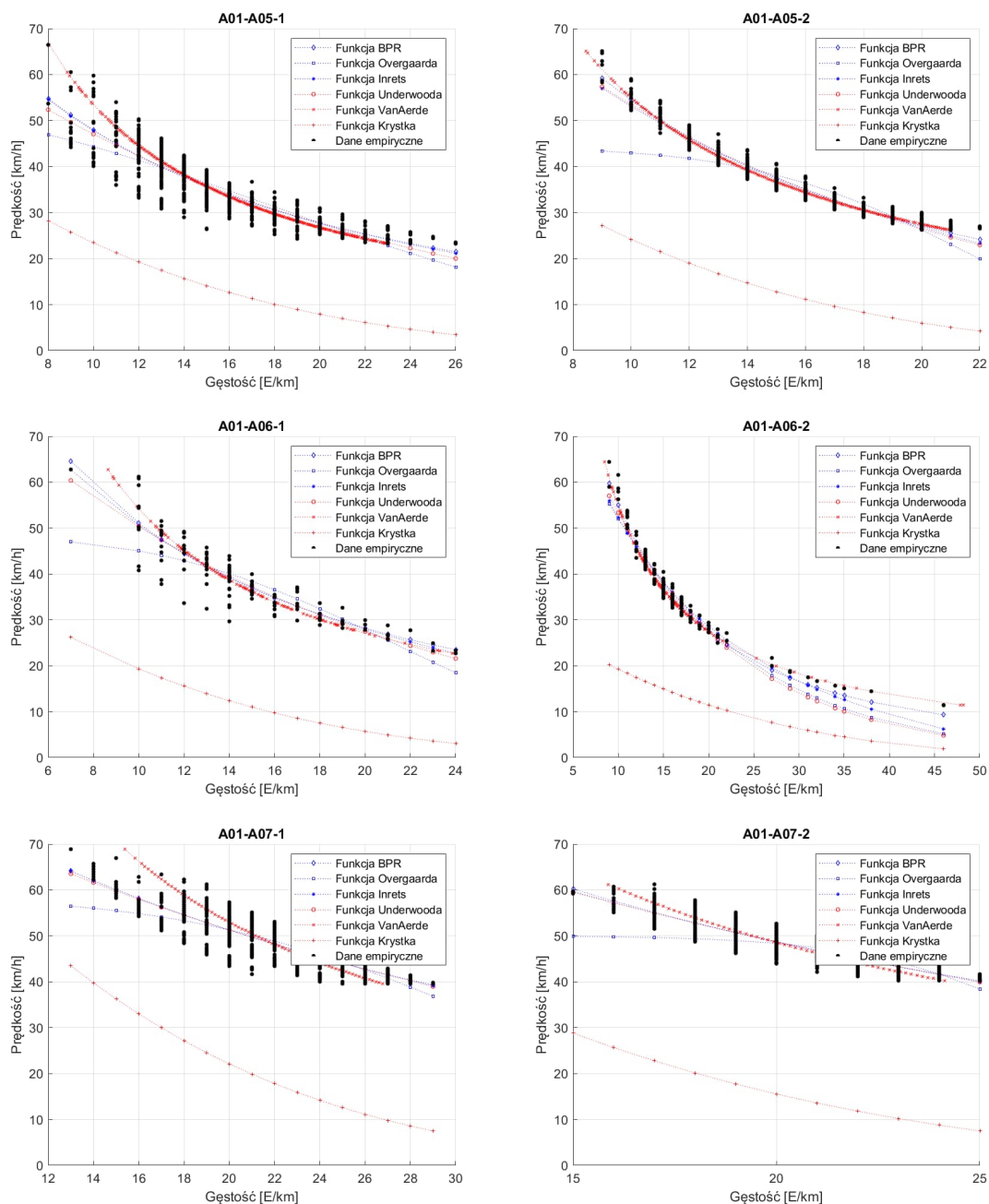
Objaśnienia: V_o – szacowana prędkość w ruchu swobodnym [km/h]; $\hat{k}_{max}$ – szacowana maksymalna gęstość ruchu [poj./km/pas]; α, c – parametry funkcji BPR [-];

Wykresy dopasowania modeli do danych empirycznych:

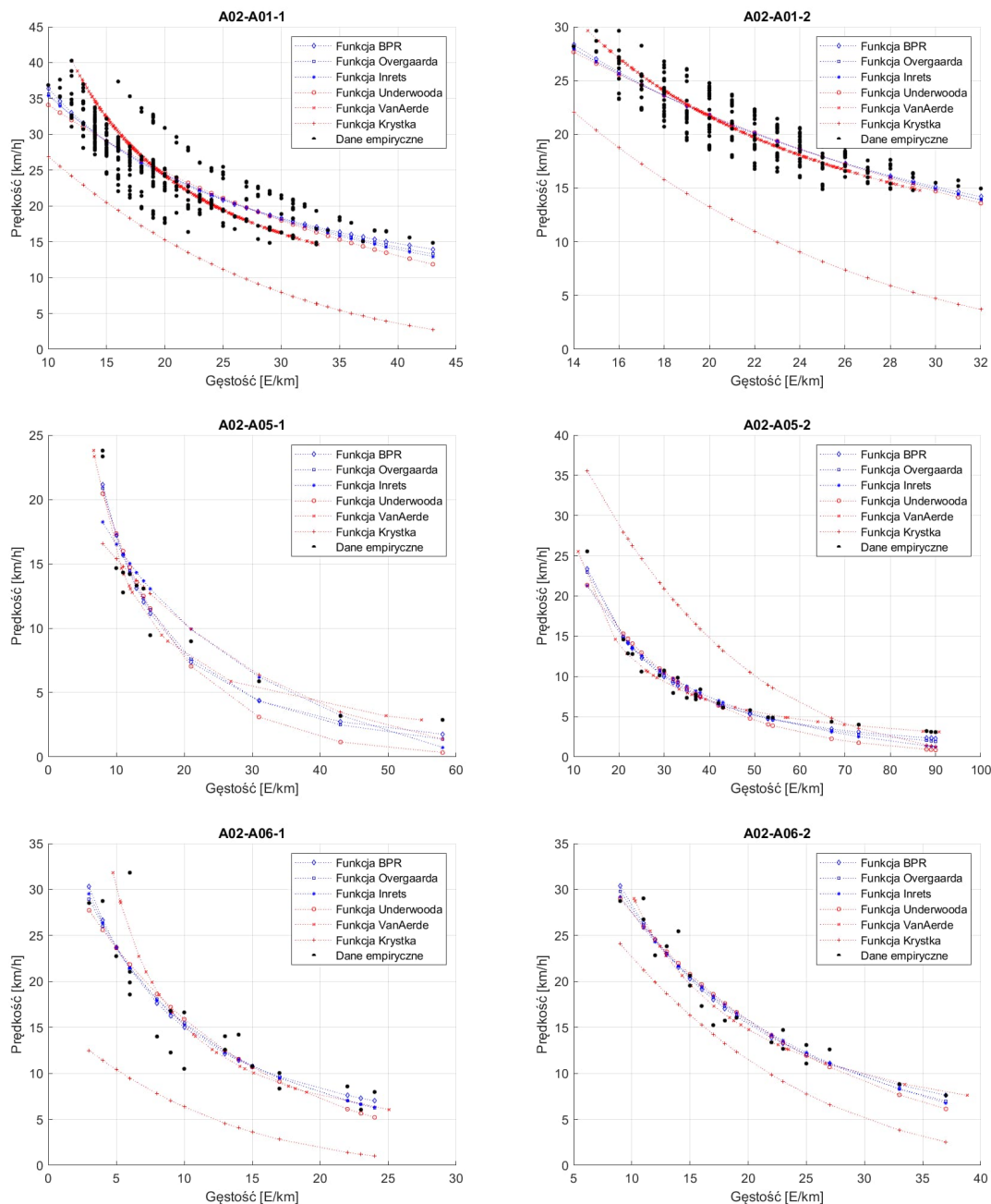
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



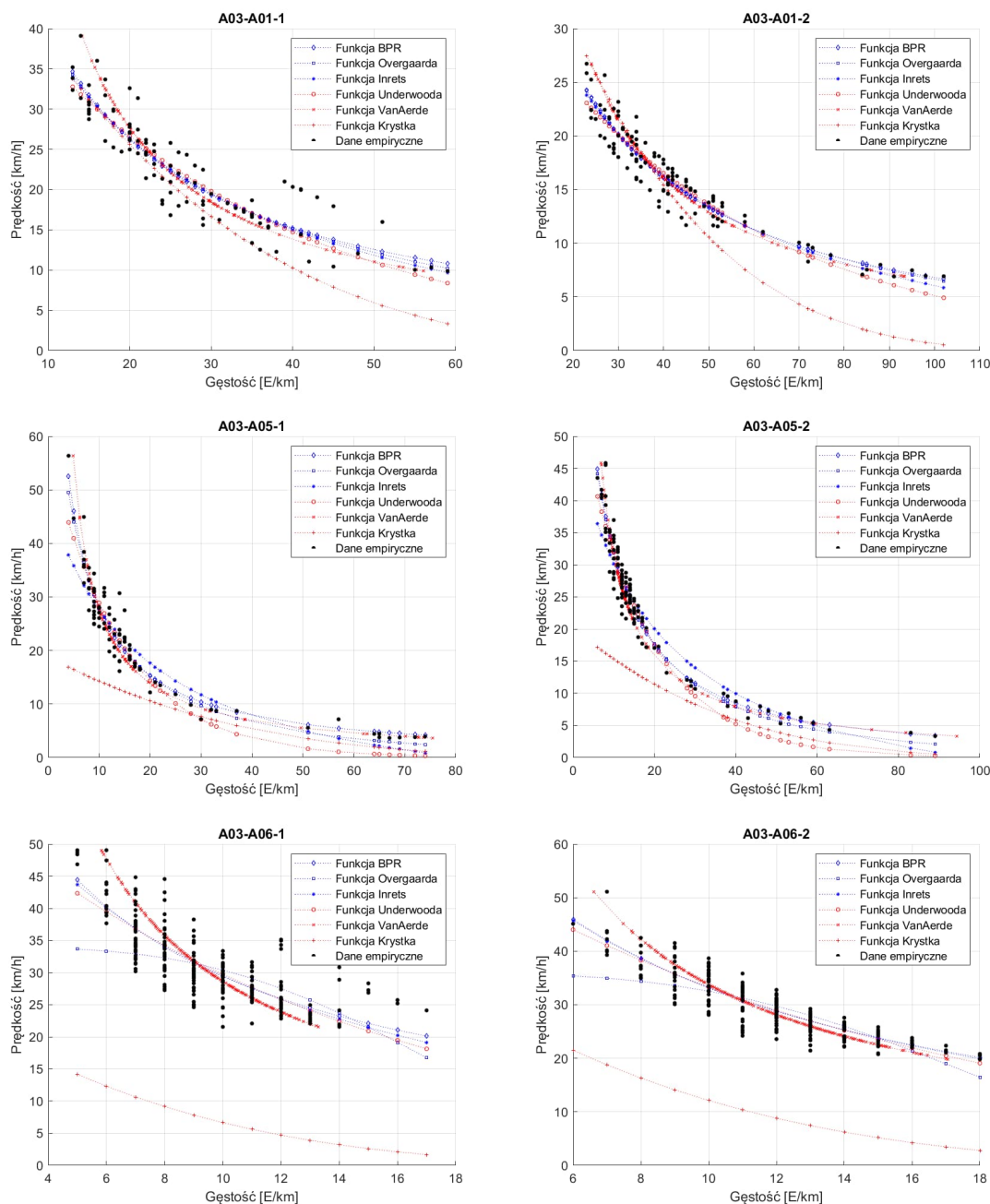
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



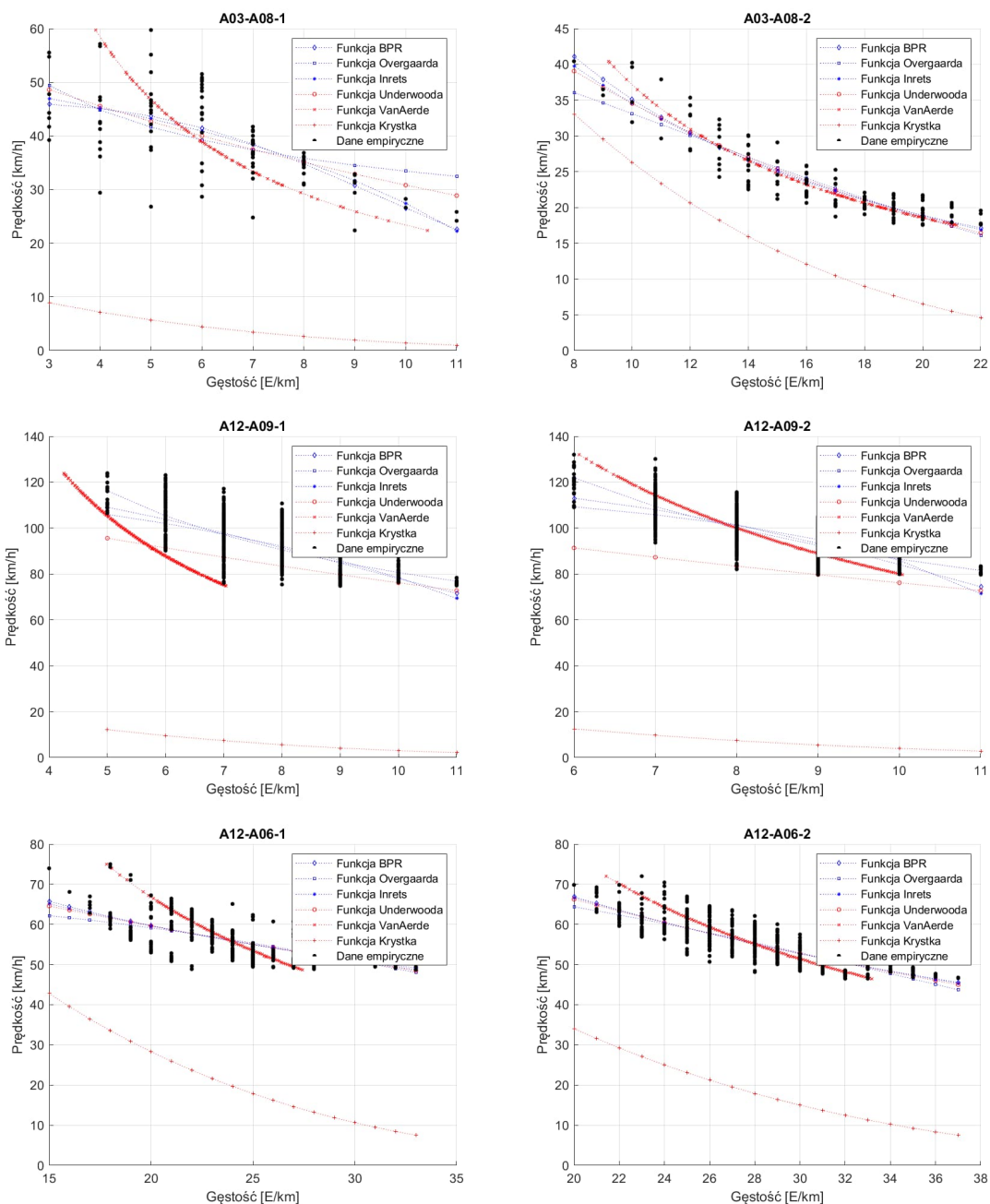
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



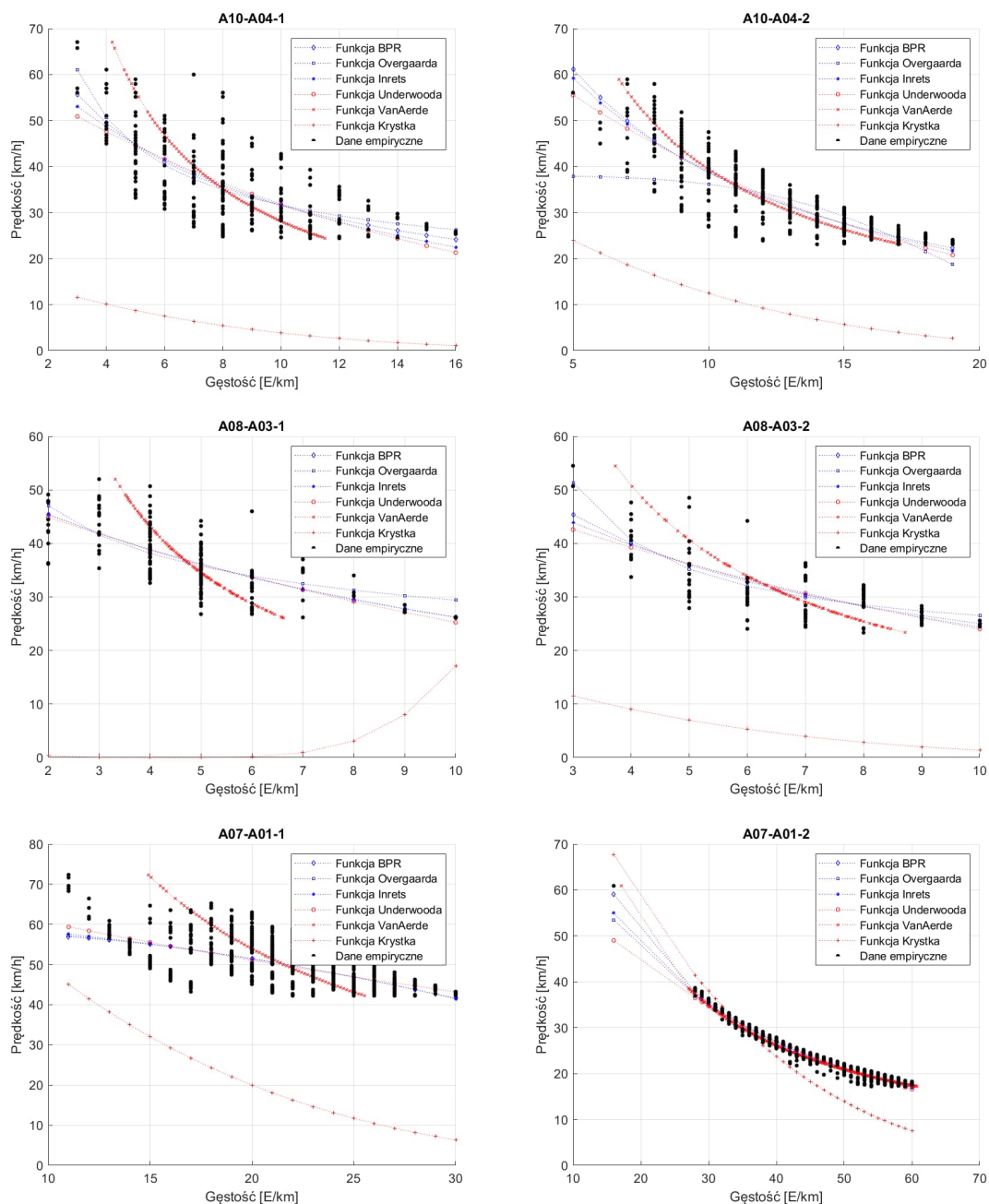
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



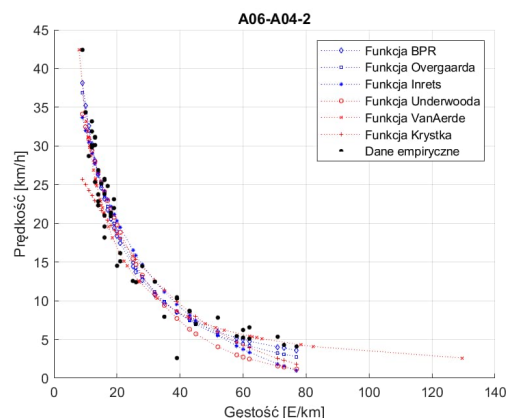
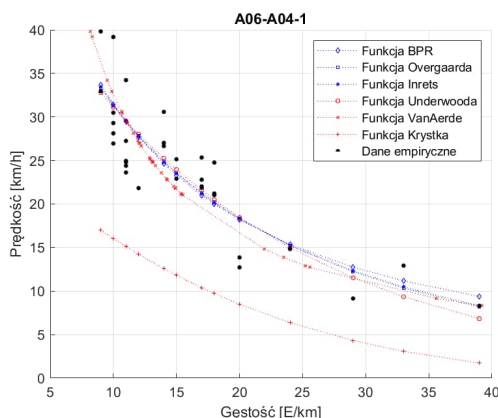
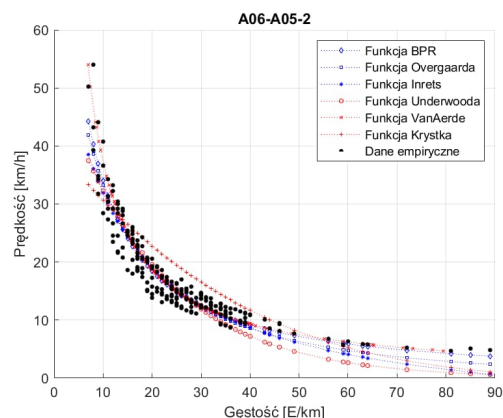
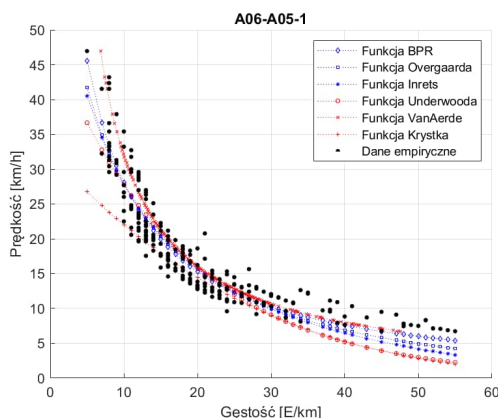
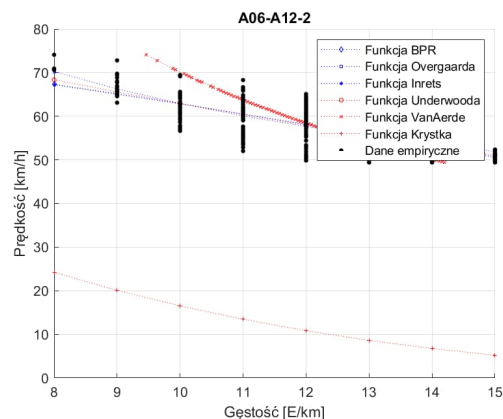
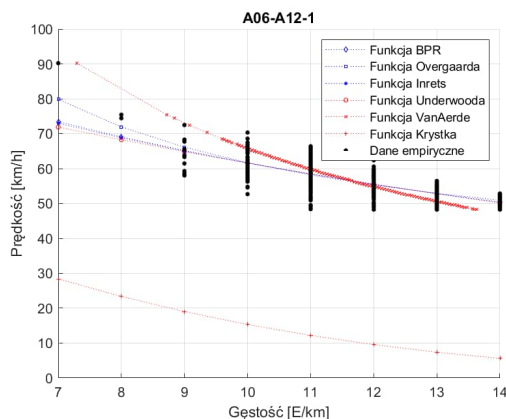
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



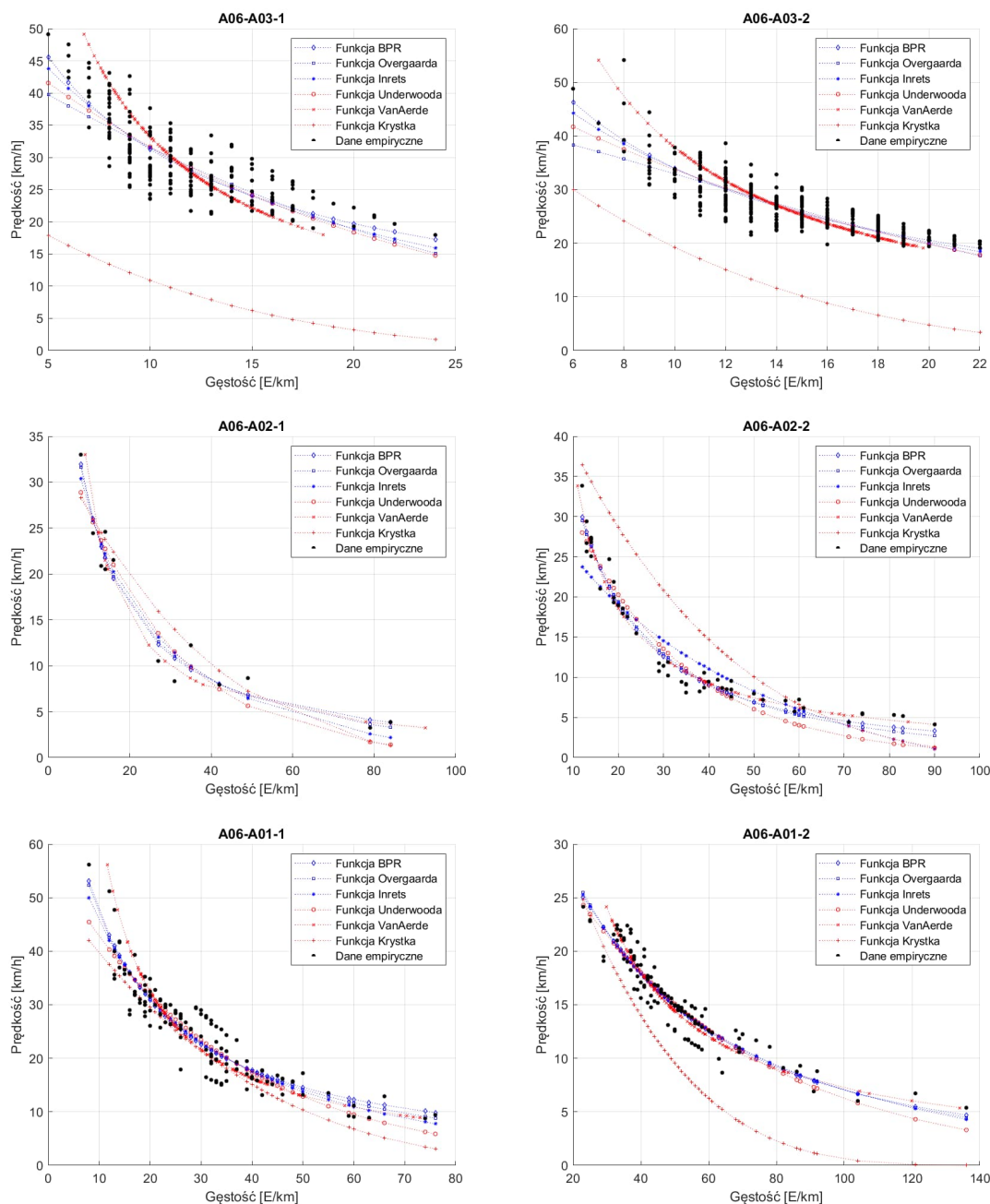
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



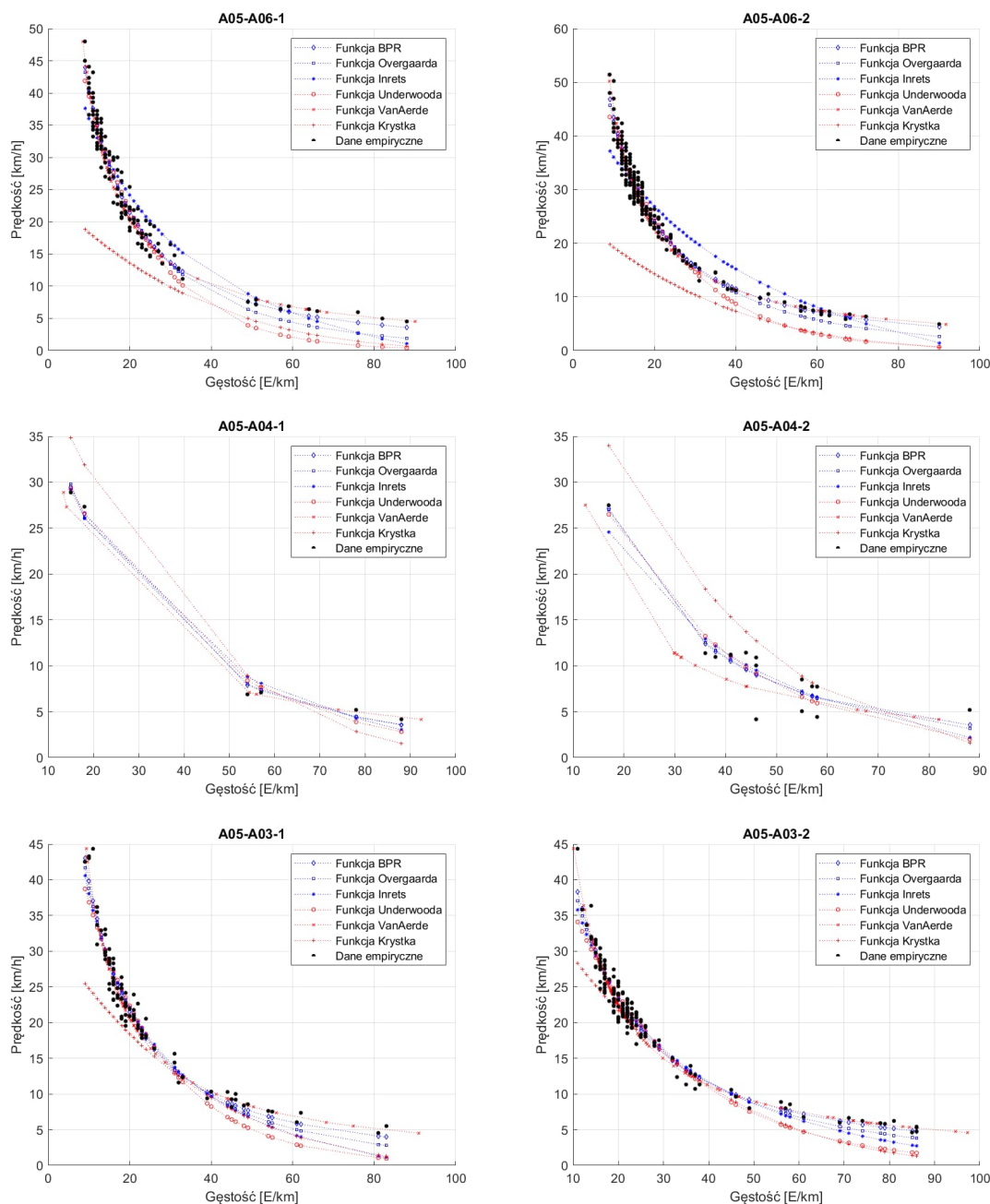
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



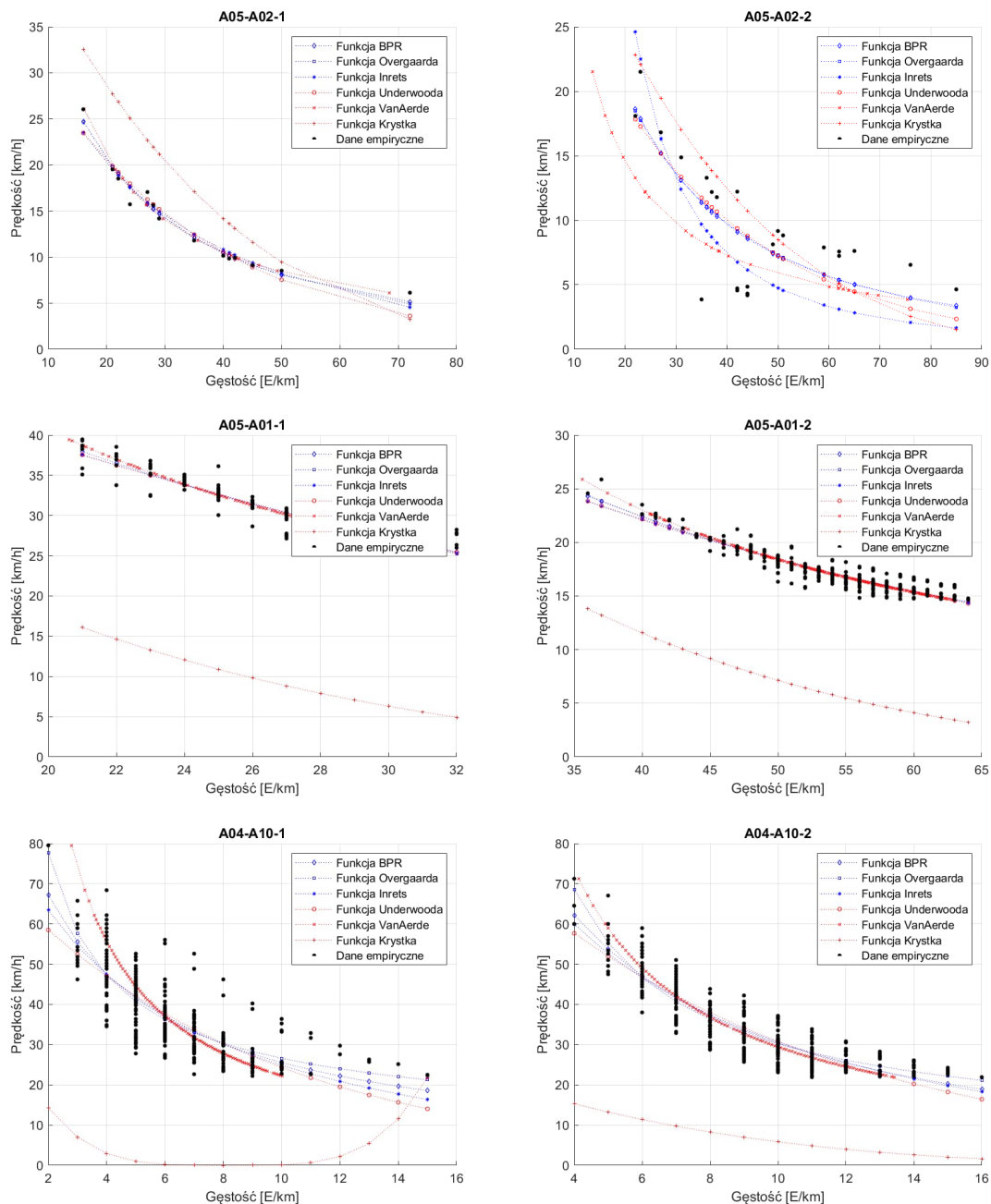
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



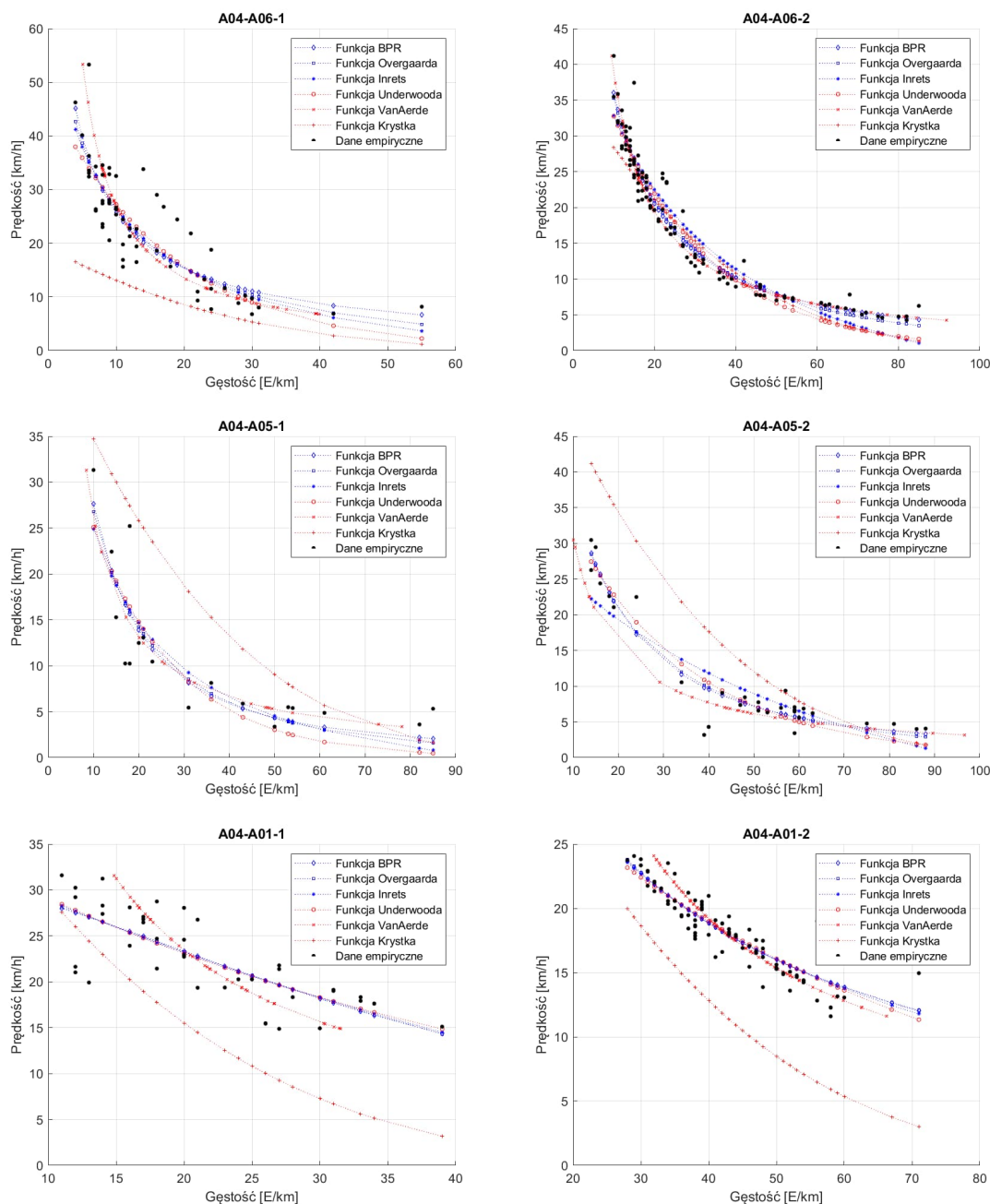
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



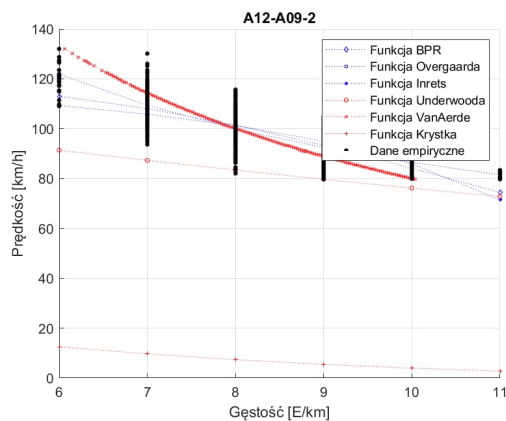
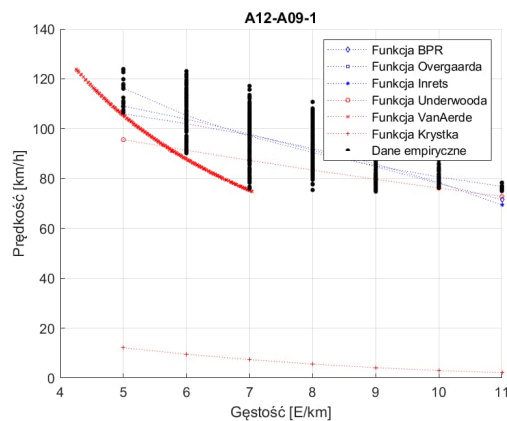
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



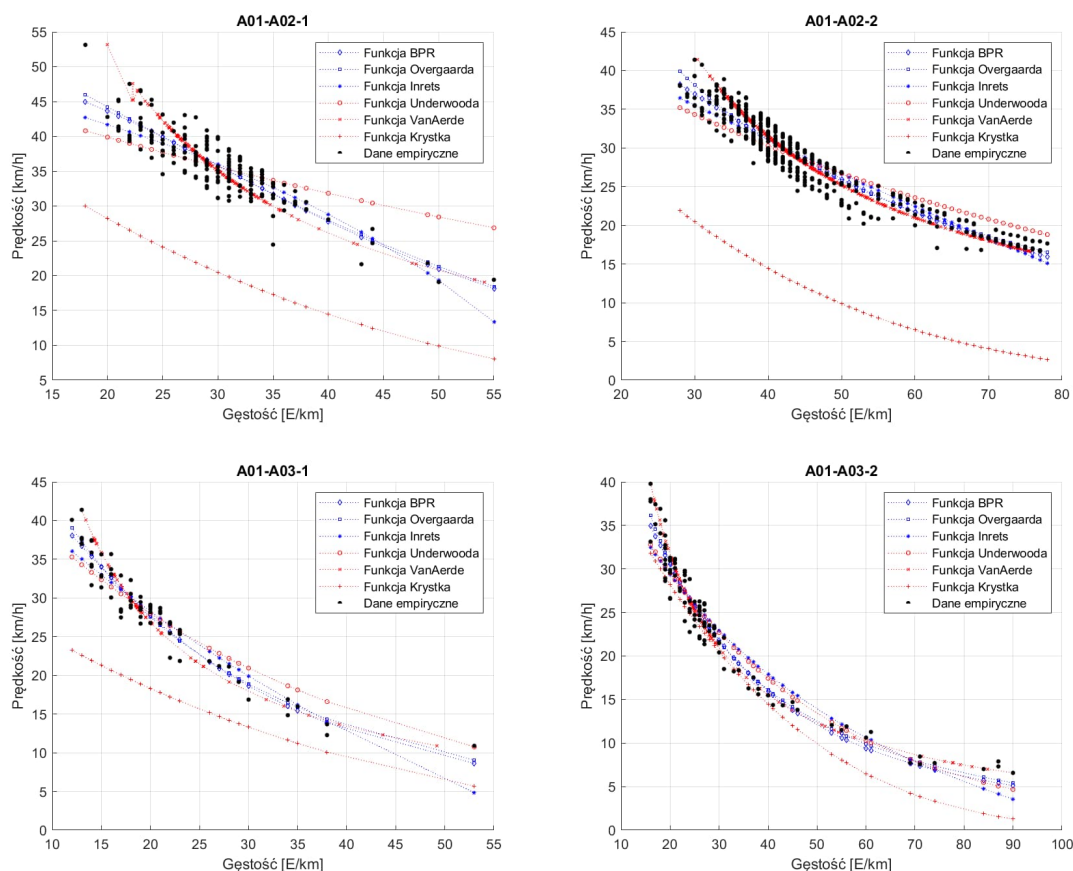
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



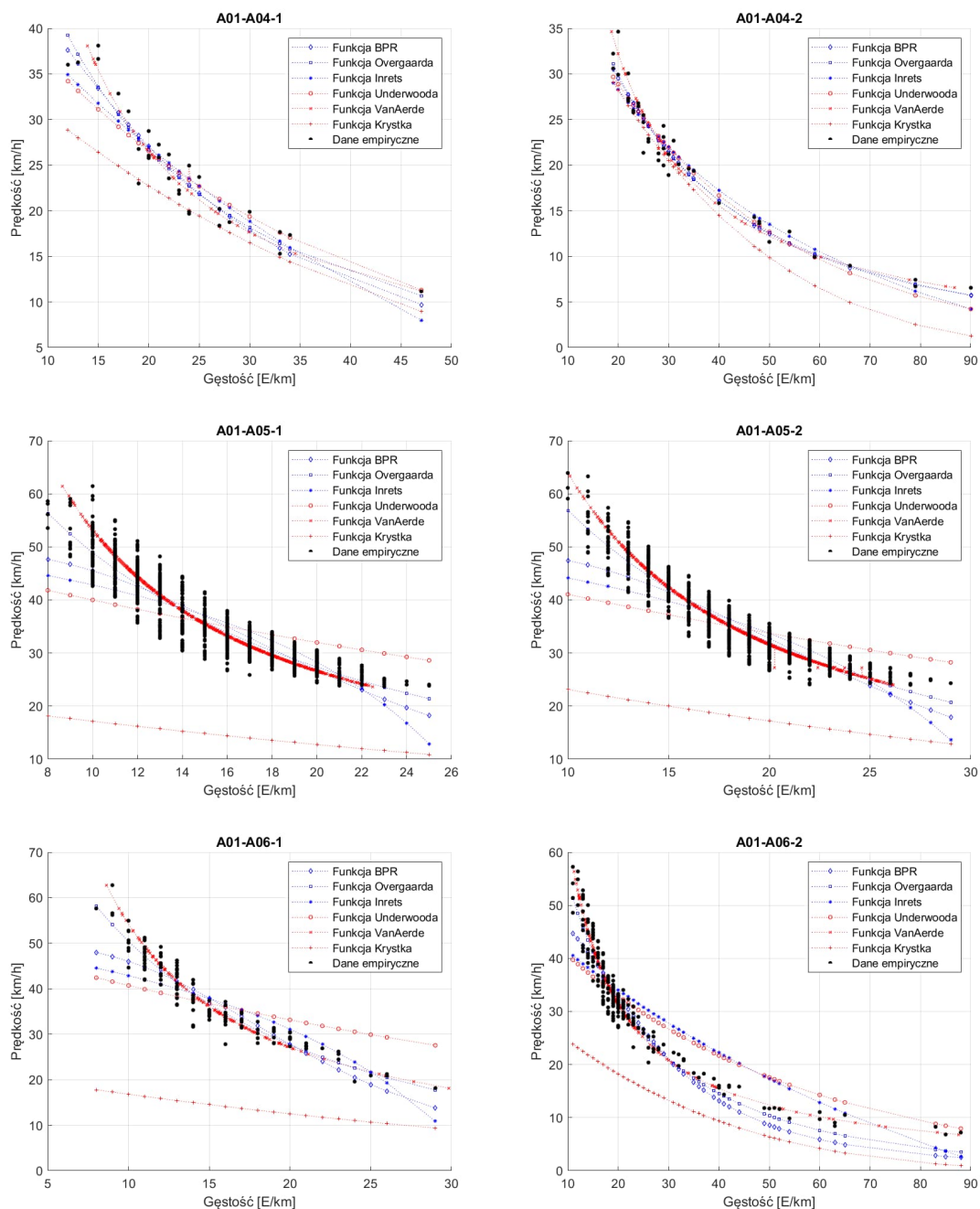
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Załącznik 3.

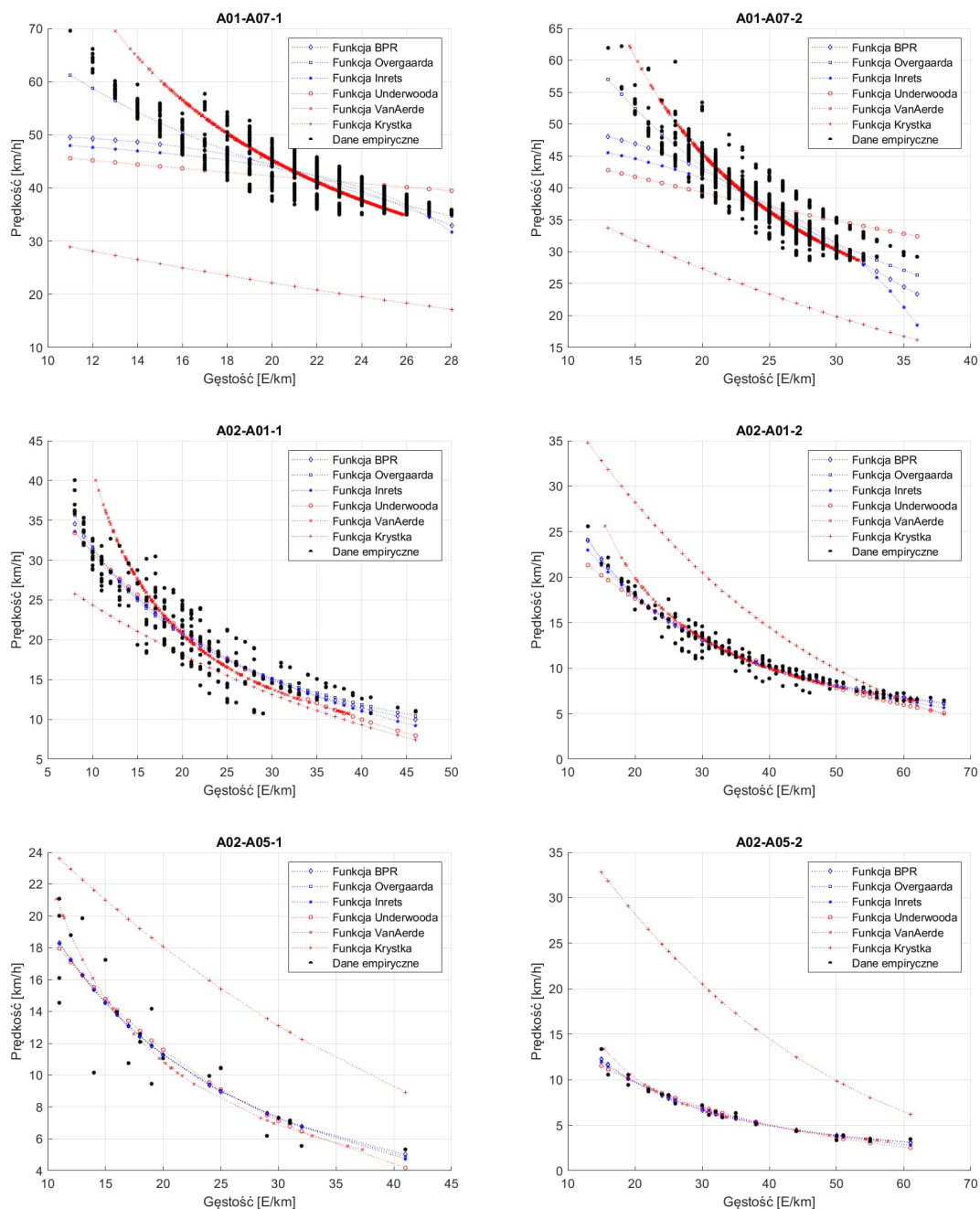
Dopasowanie modeli teoretycznych do danych empirycznych dla stanu po inwestycyjnego.



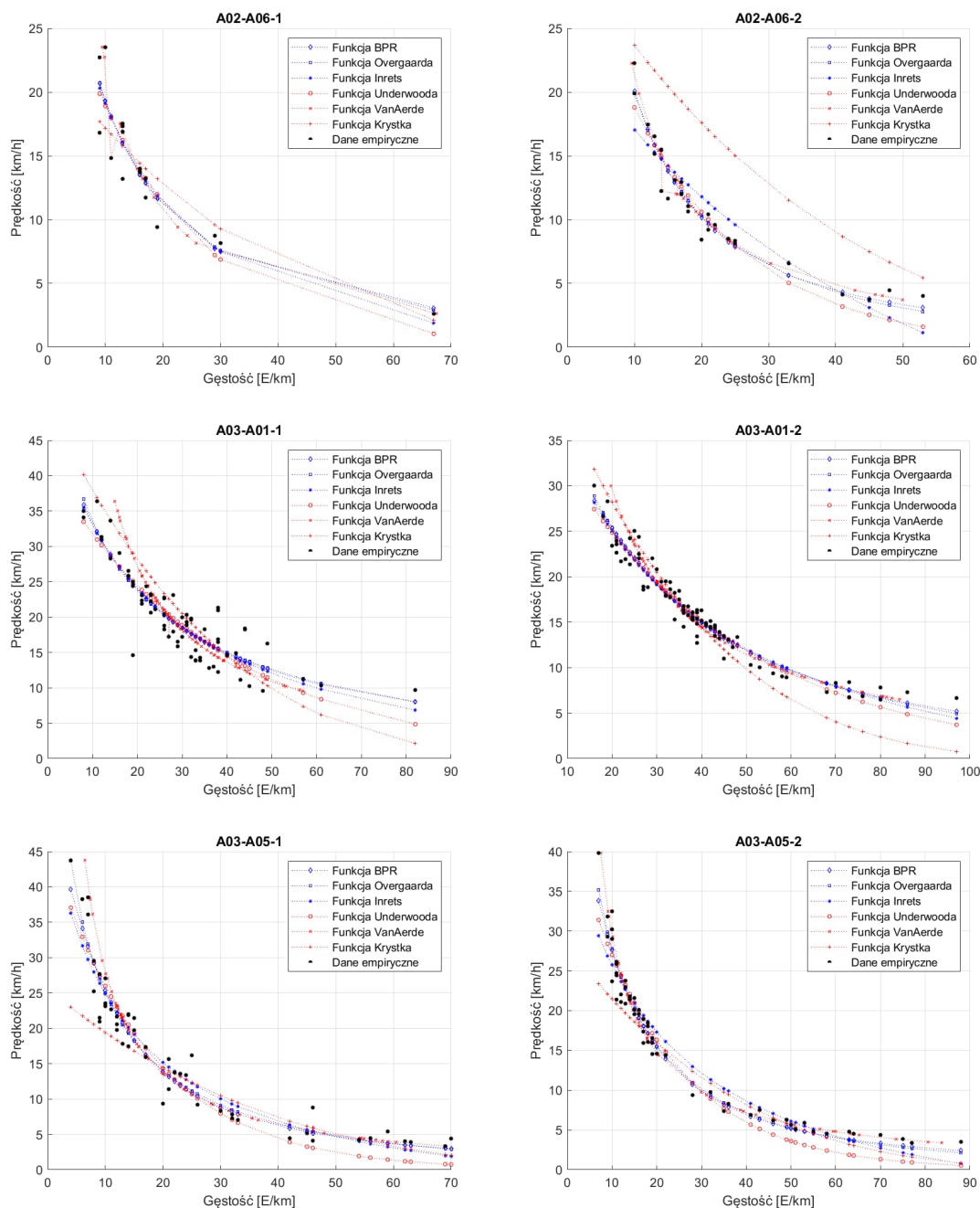
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



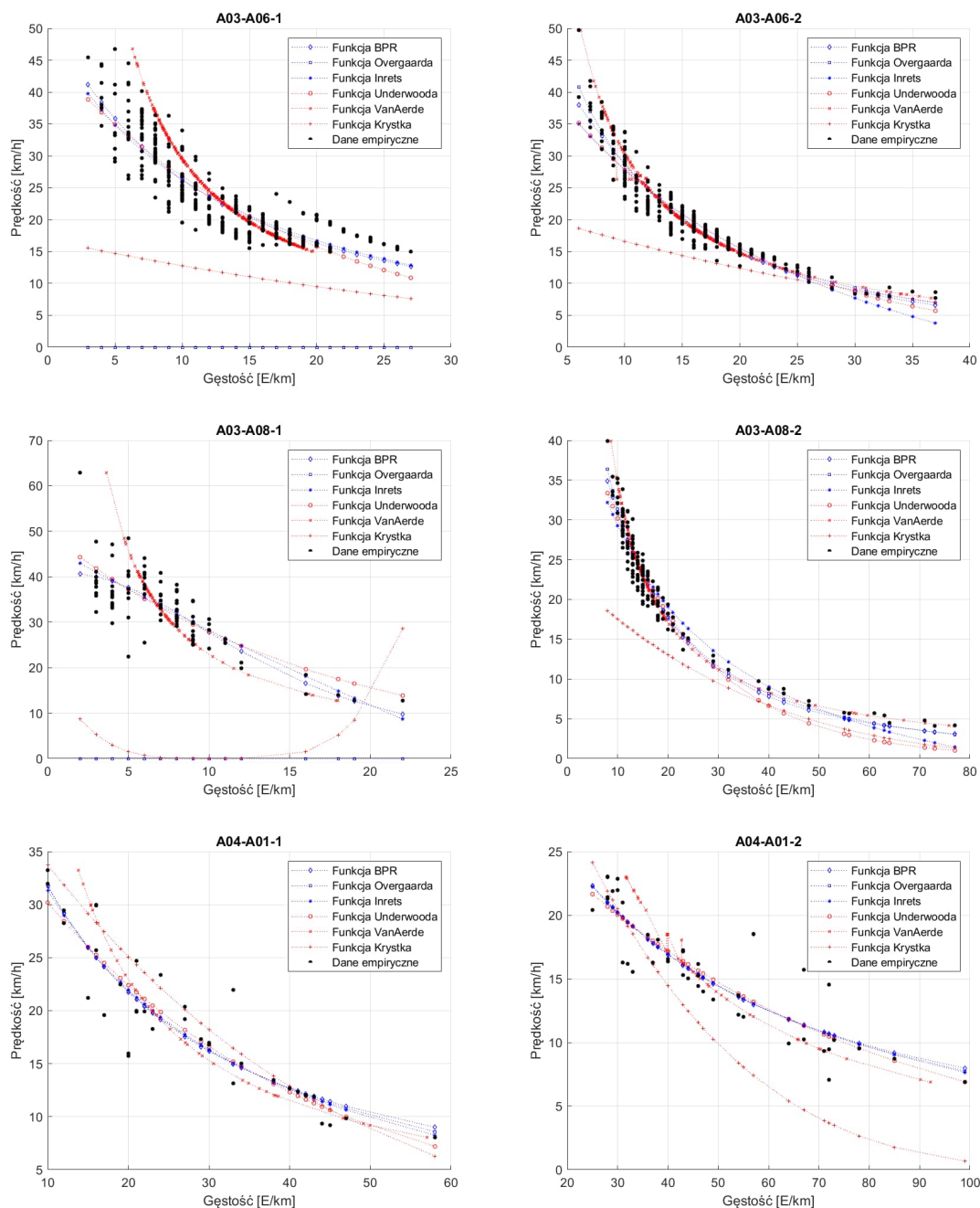
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



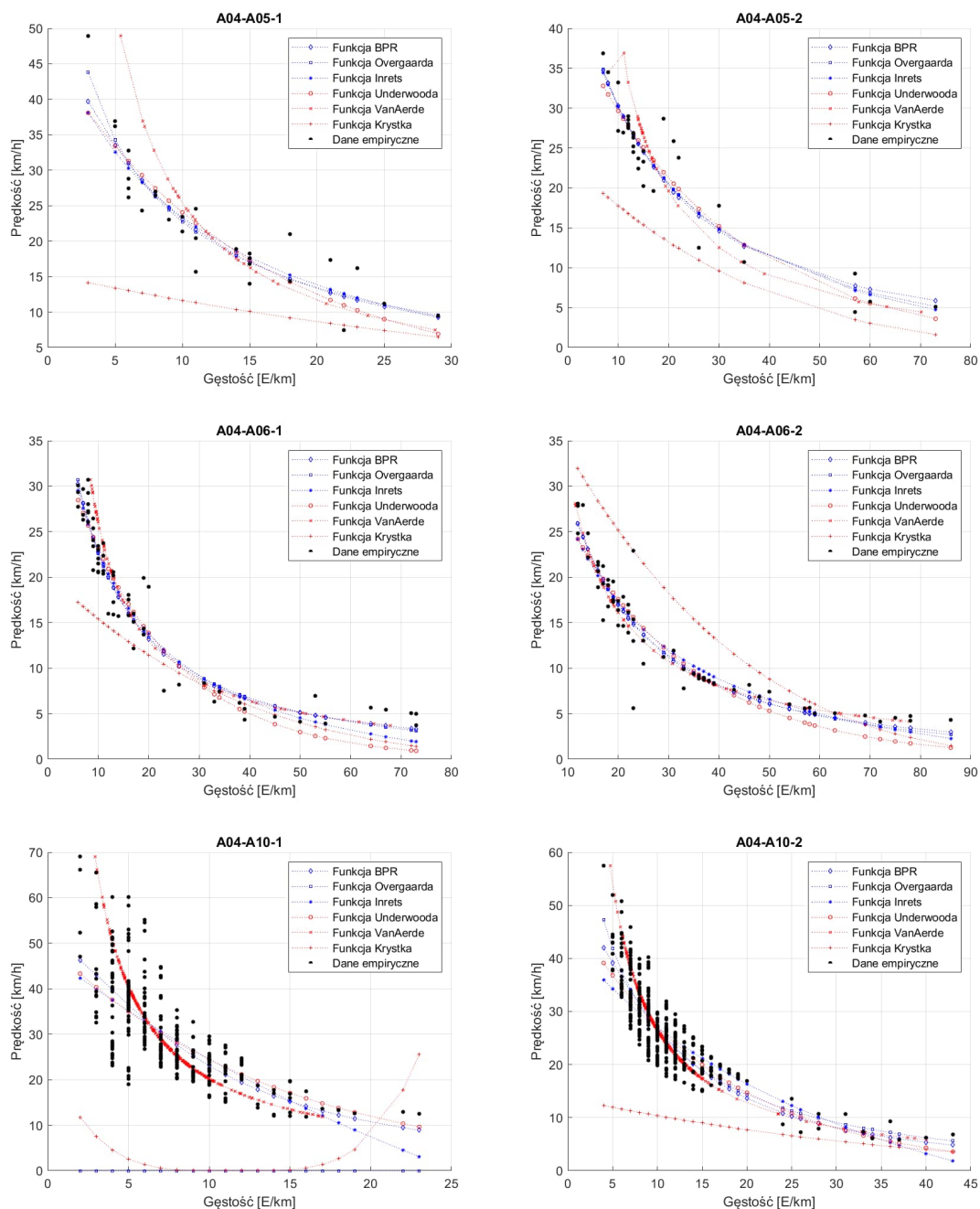
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



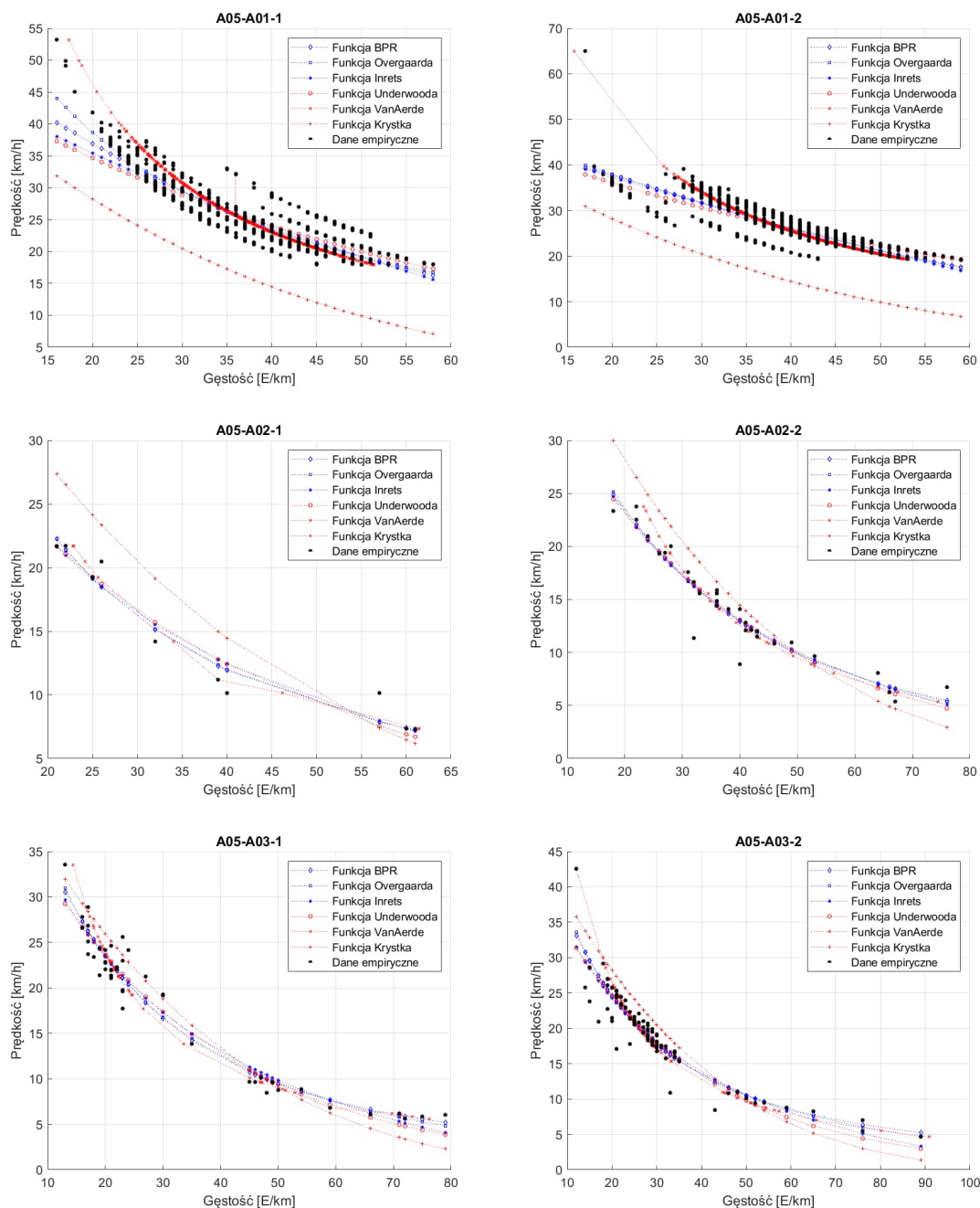
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



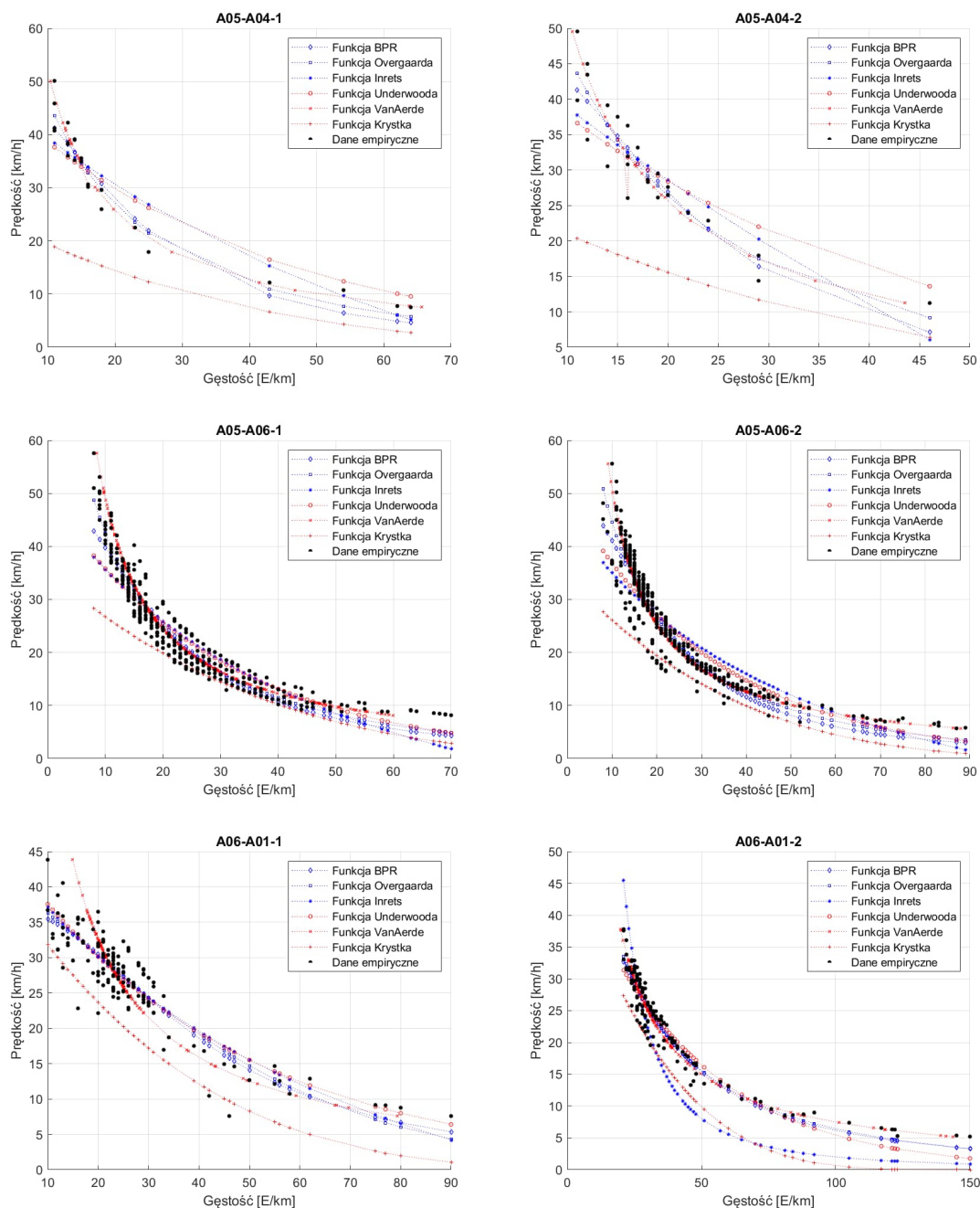
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



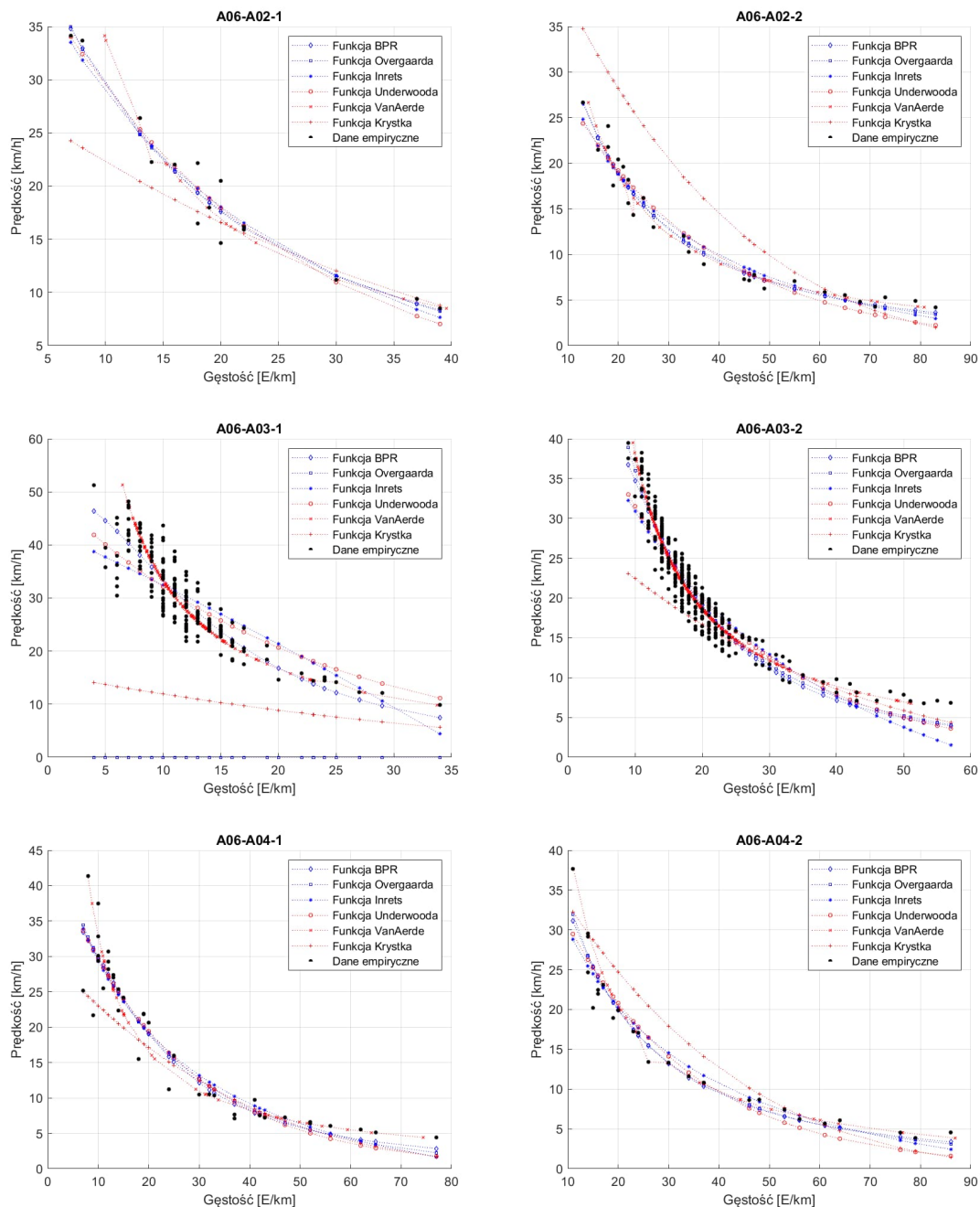
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



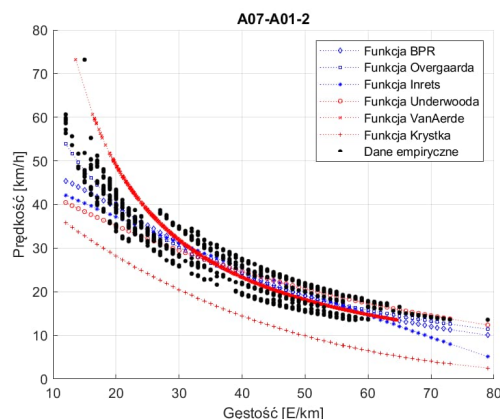
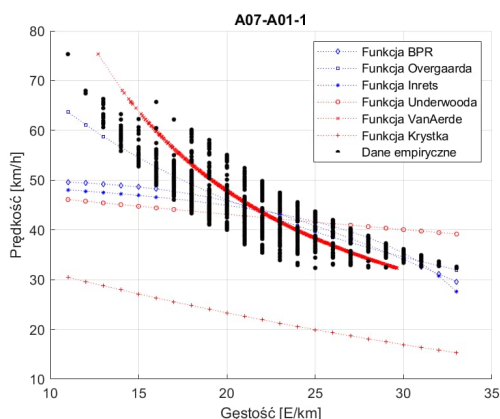
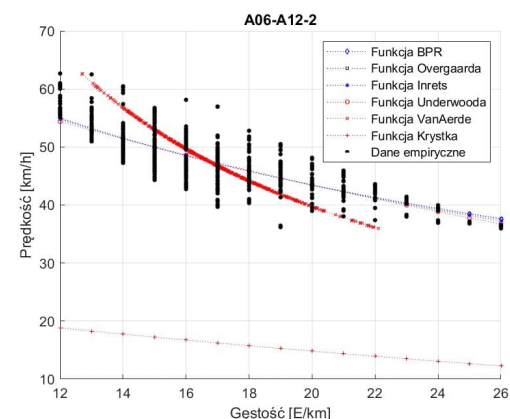
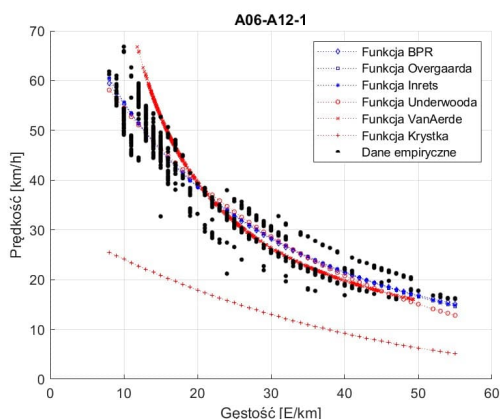
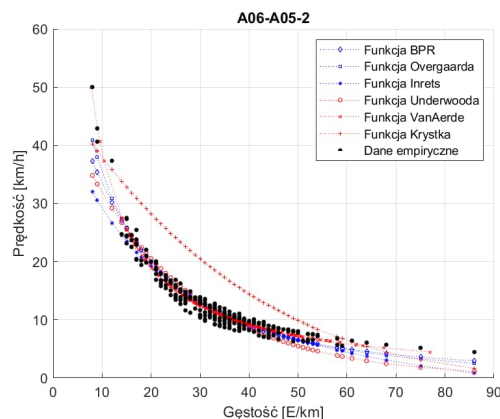
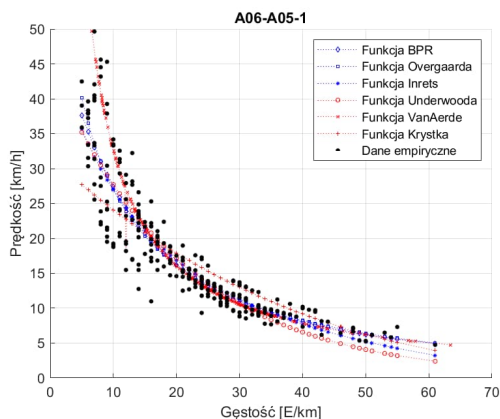
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



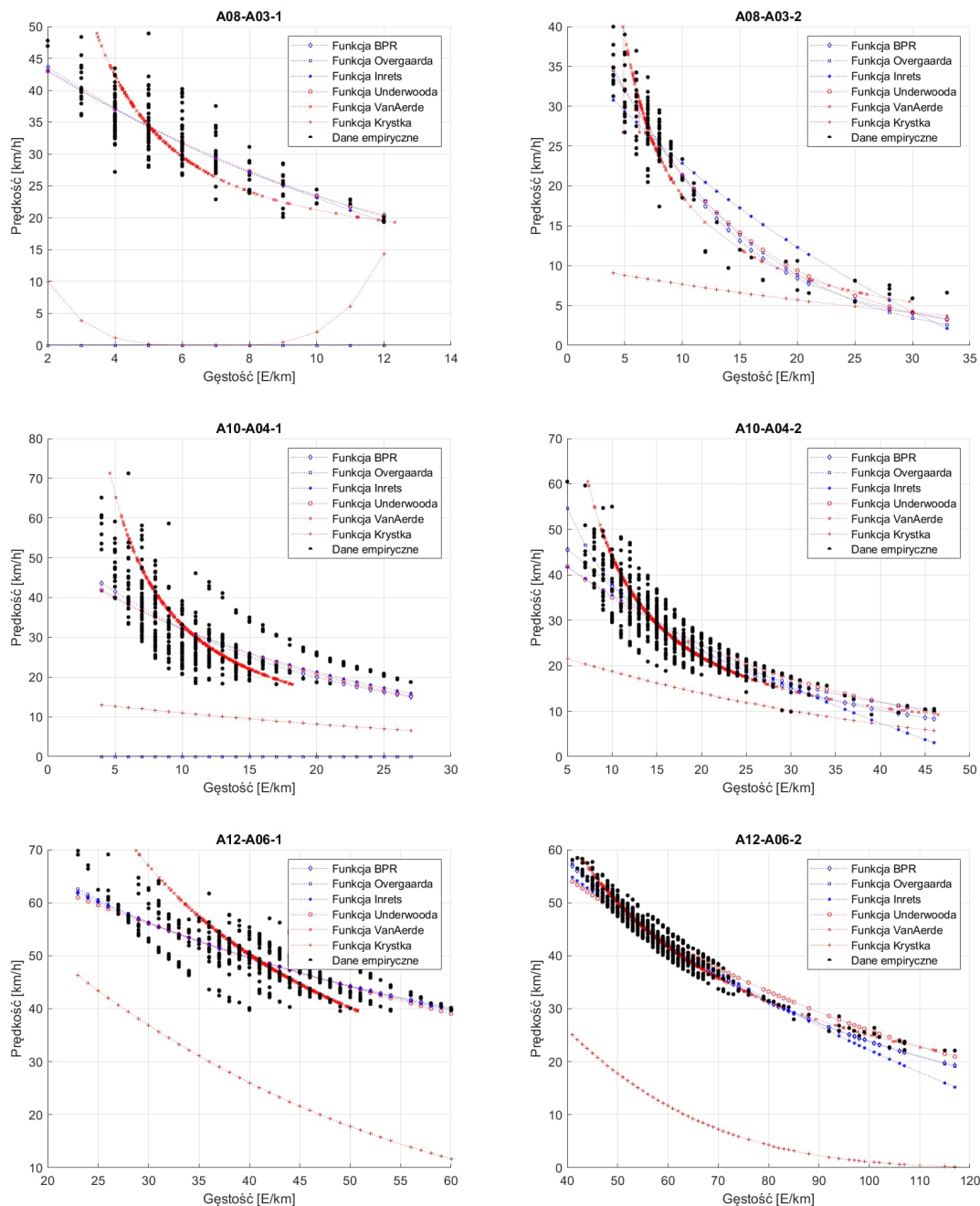
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



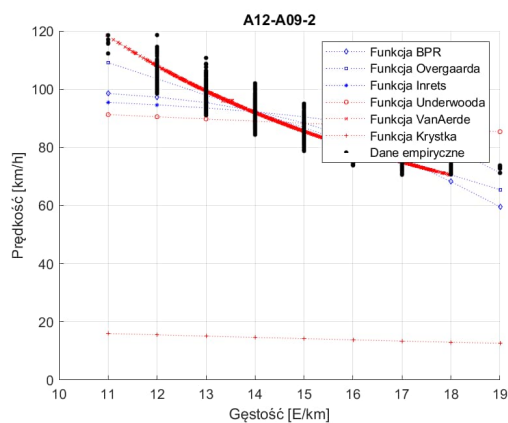
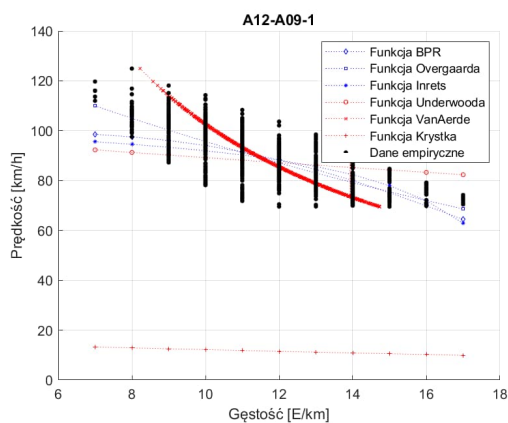
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



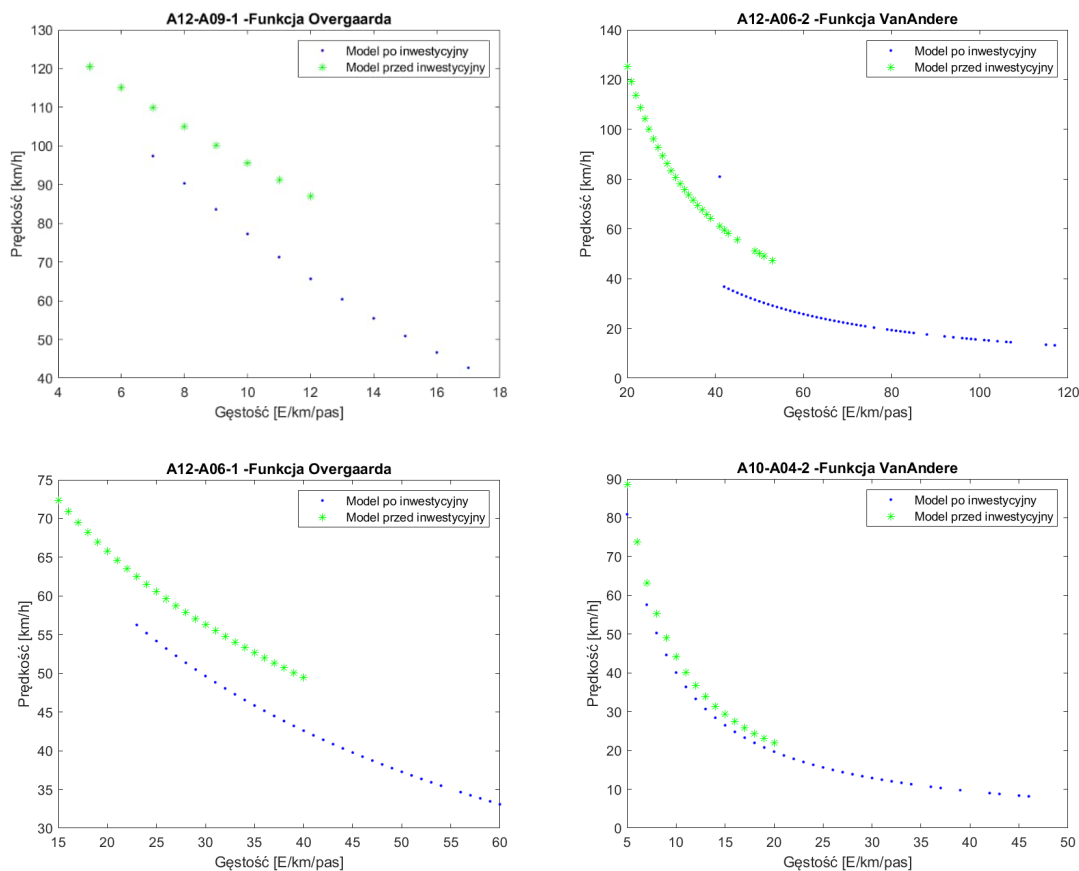
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



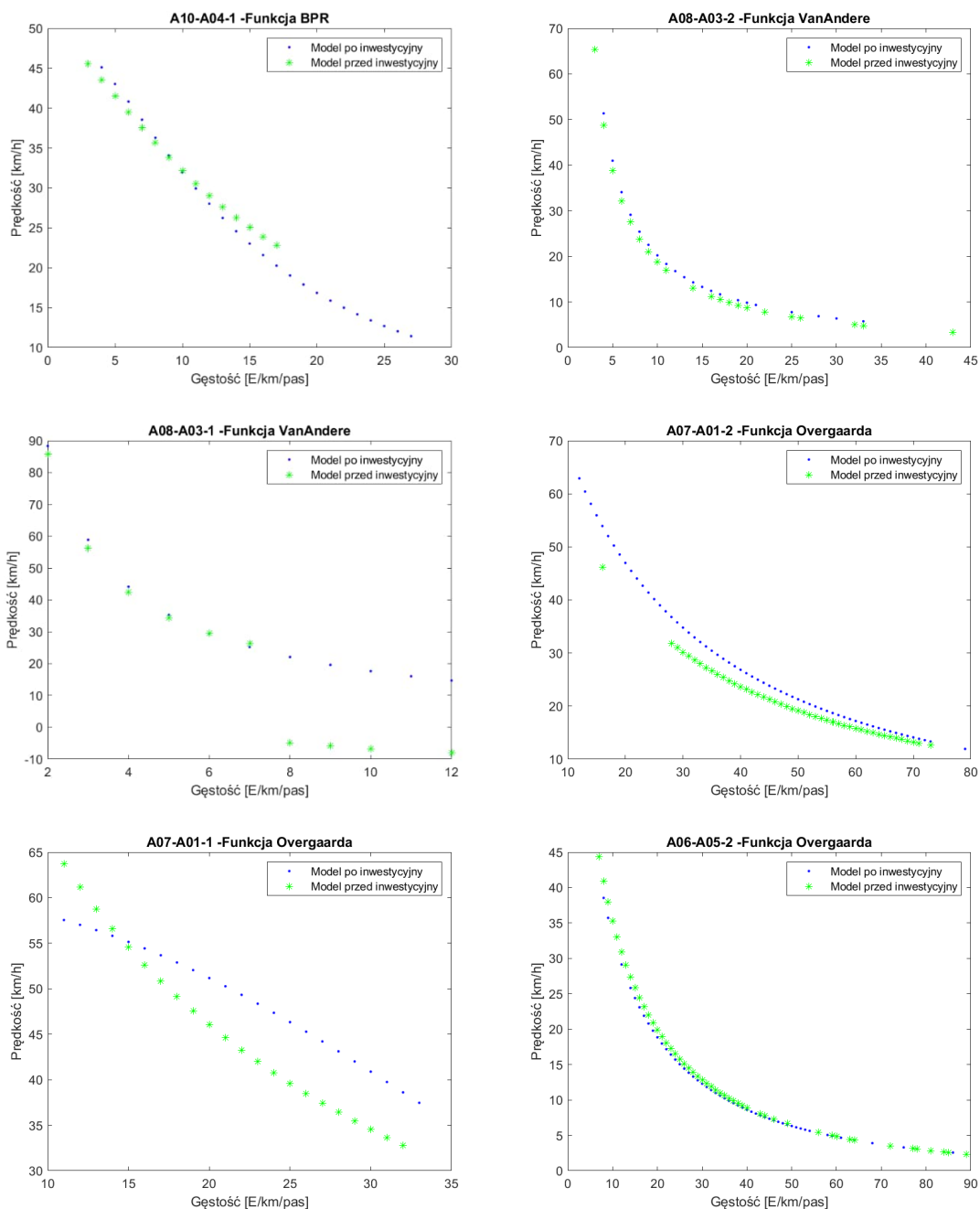
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

Załącznik 4.

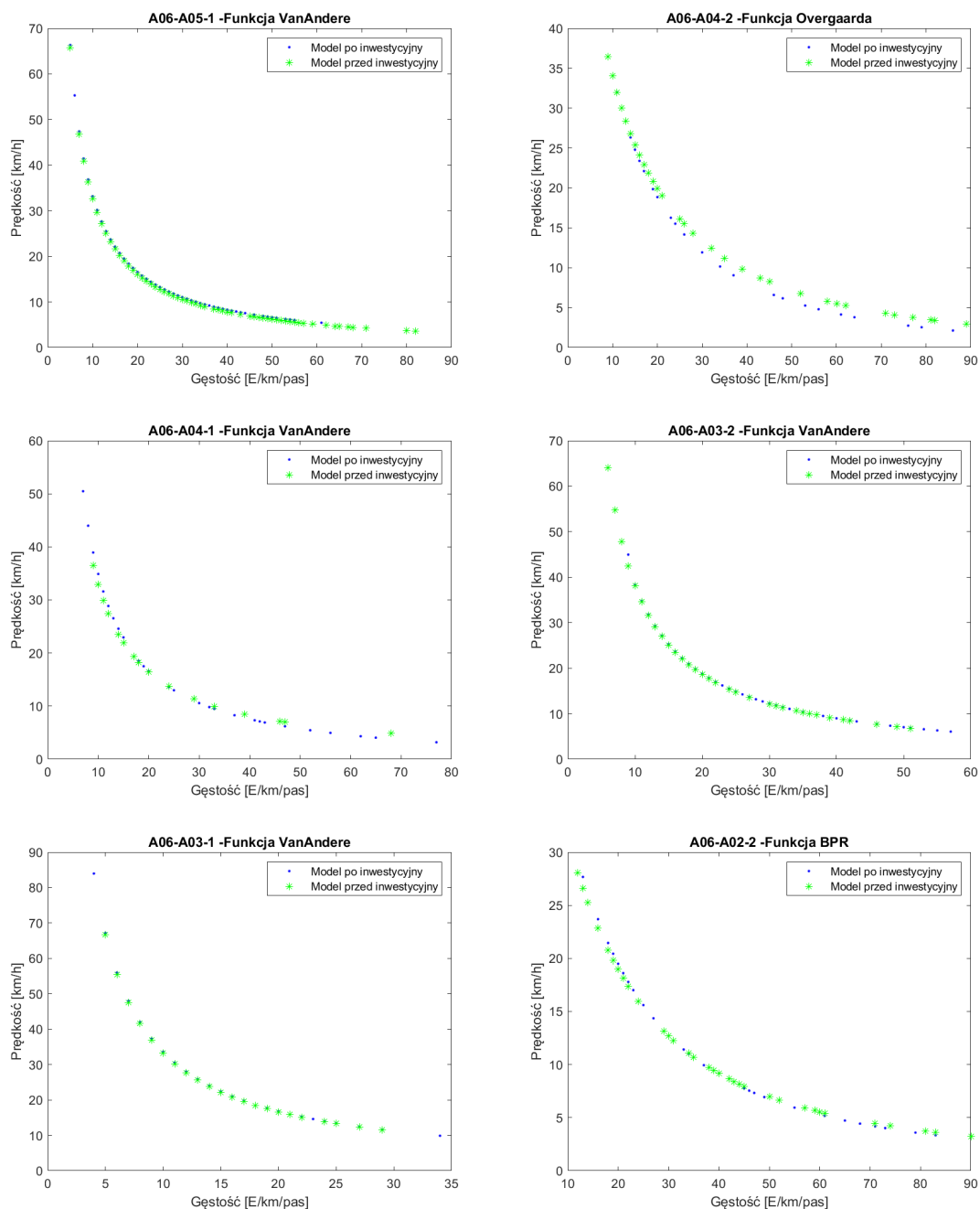
Porównanie teoretycznych prędkości przejazdu w relacji do gęstości ruchu dla stanu przed i po inwestycyjnego.



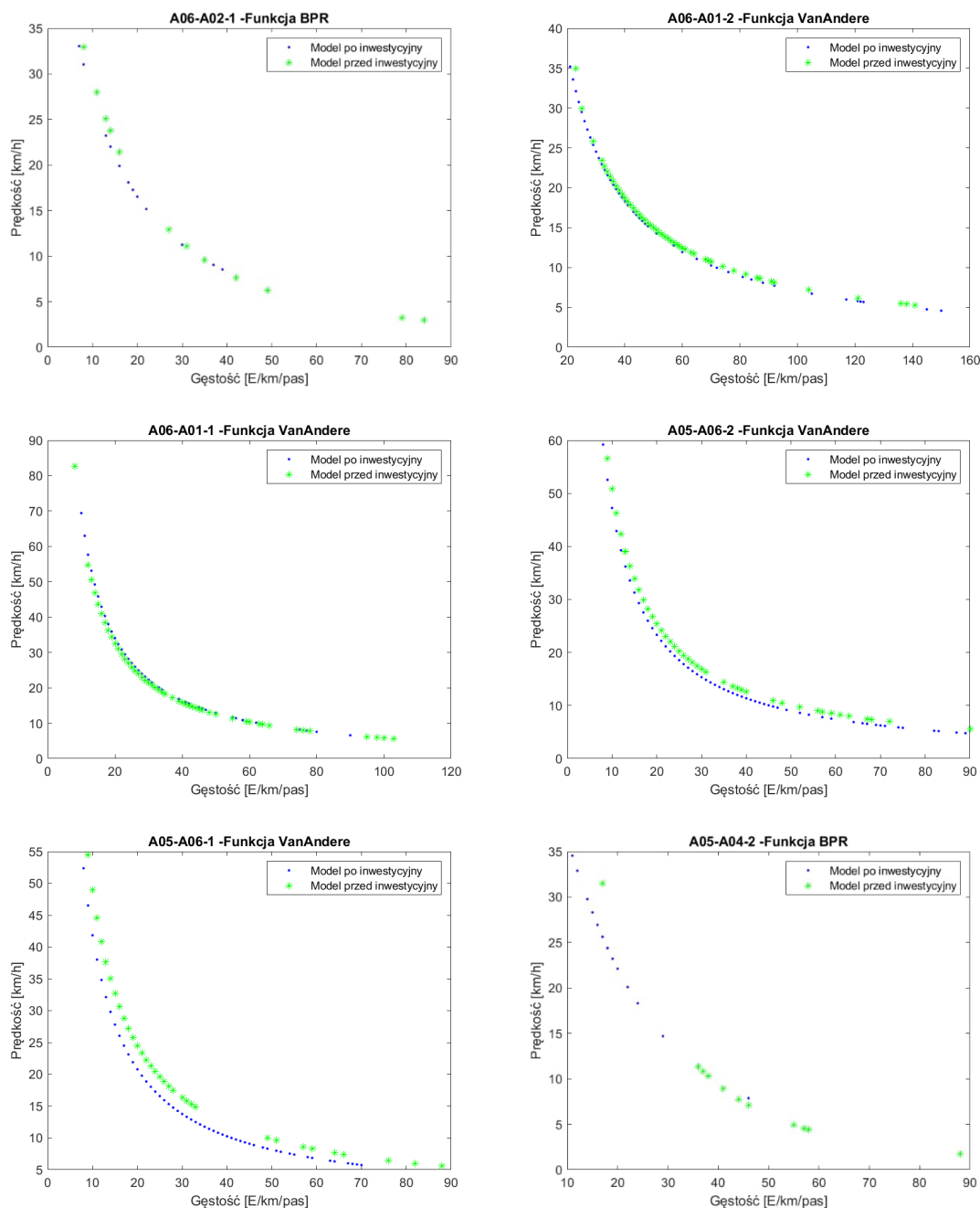
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



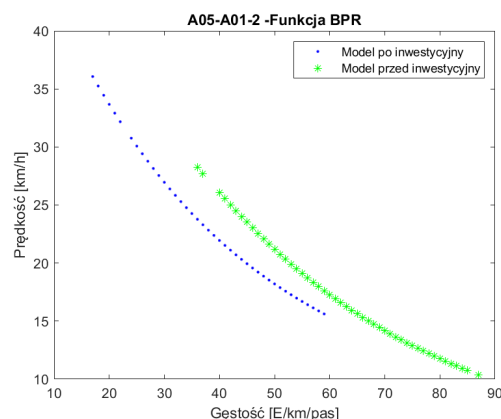
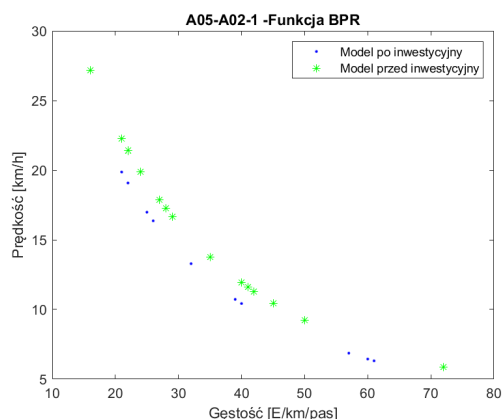
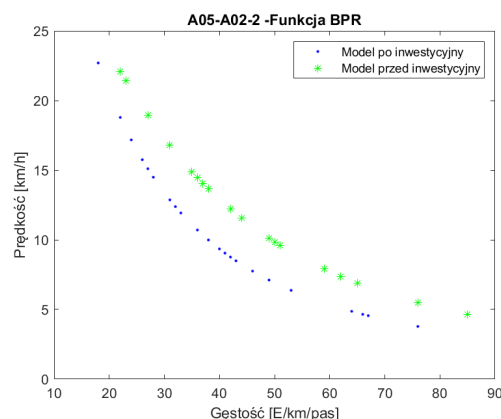
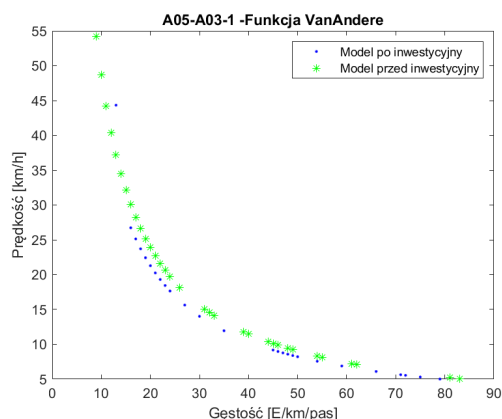
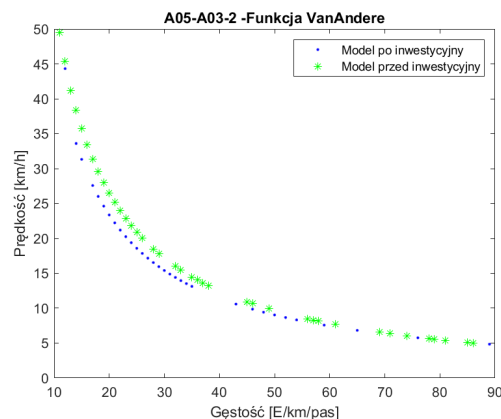
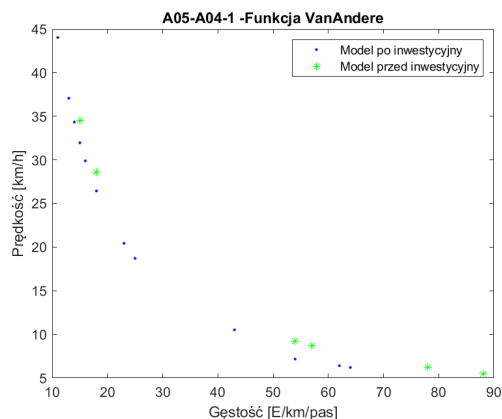
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



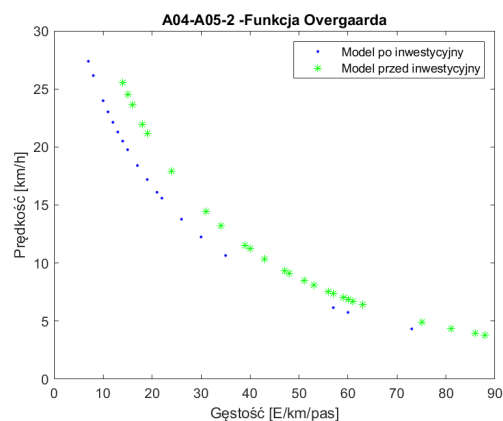
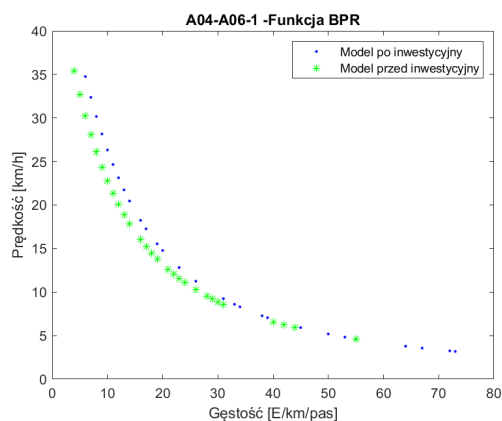
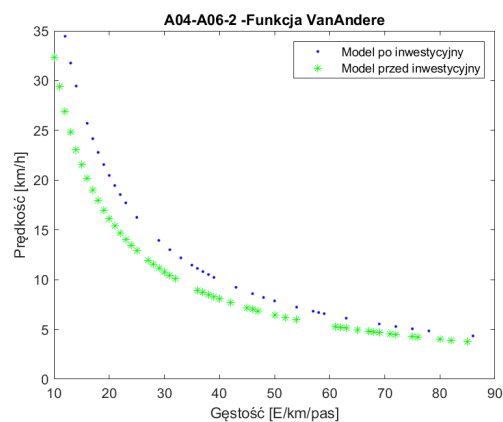
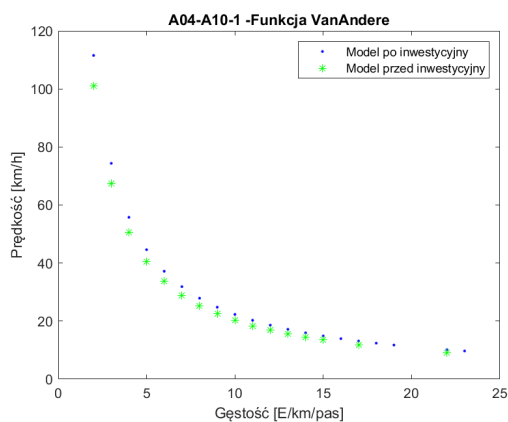
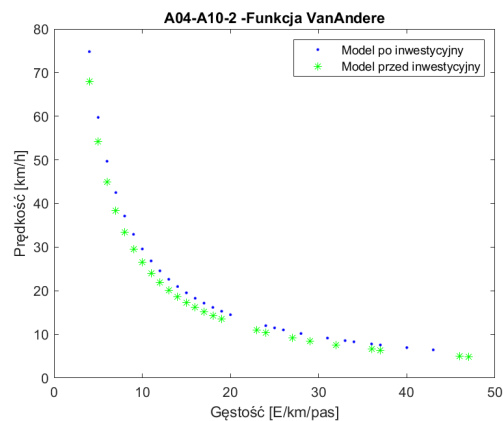
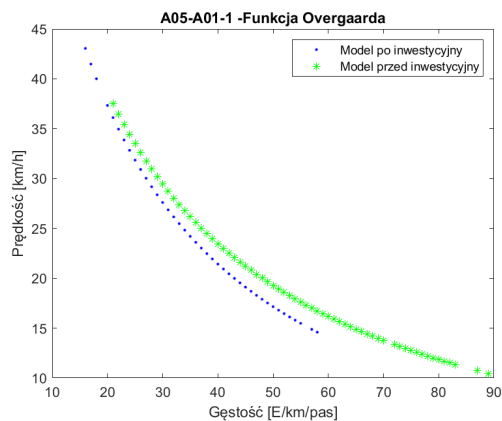
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



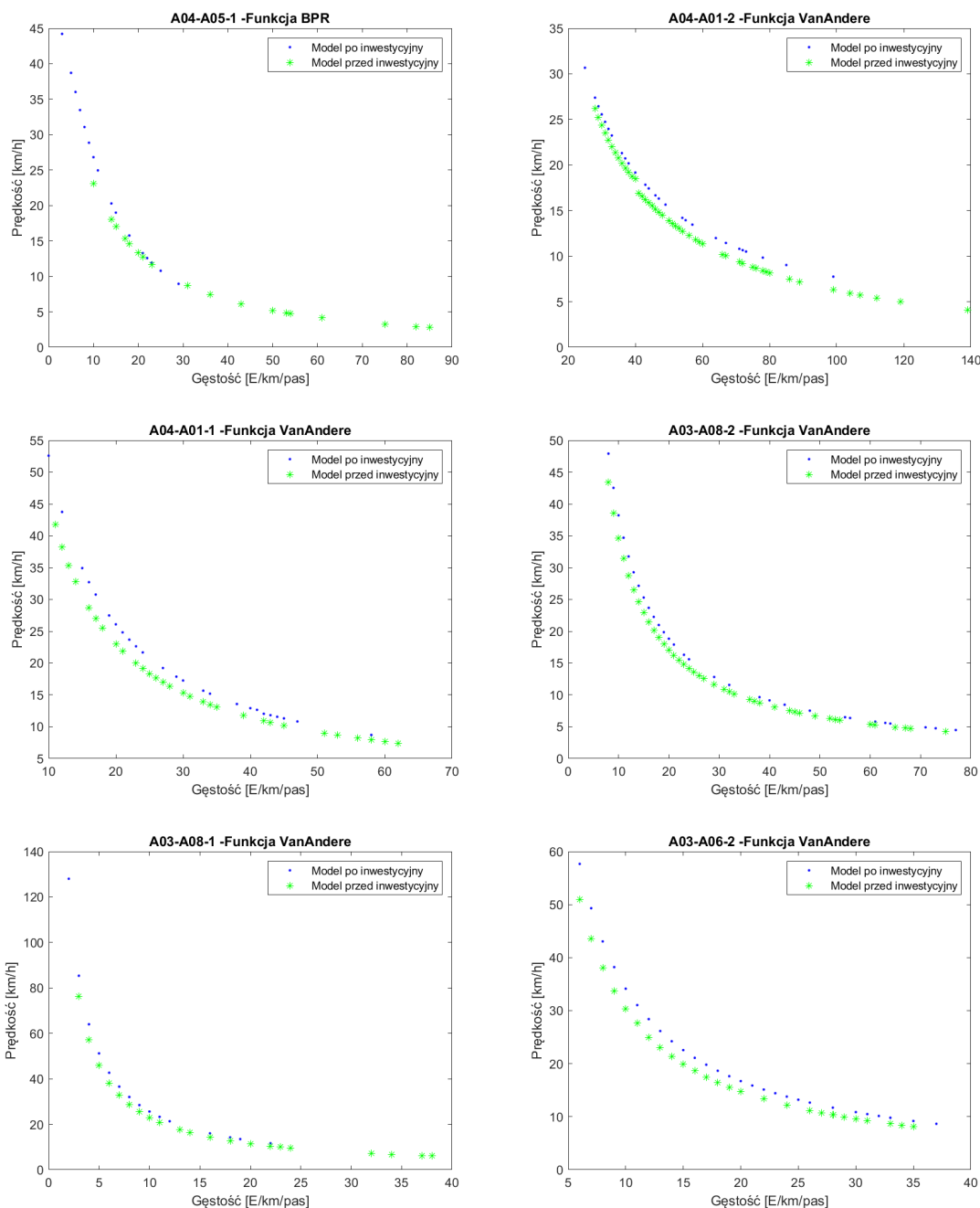
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



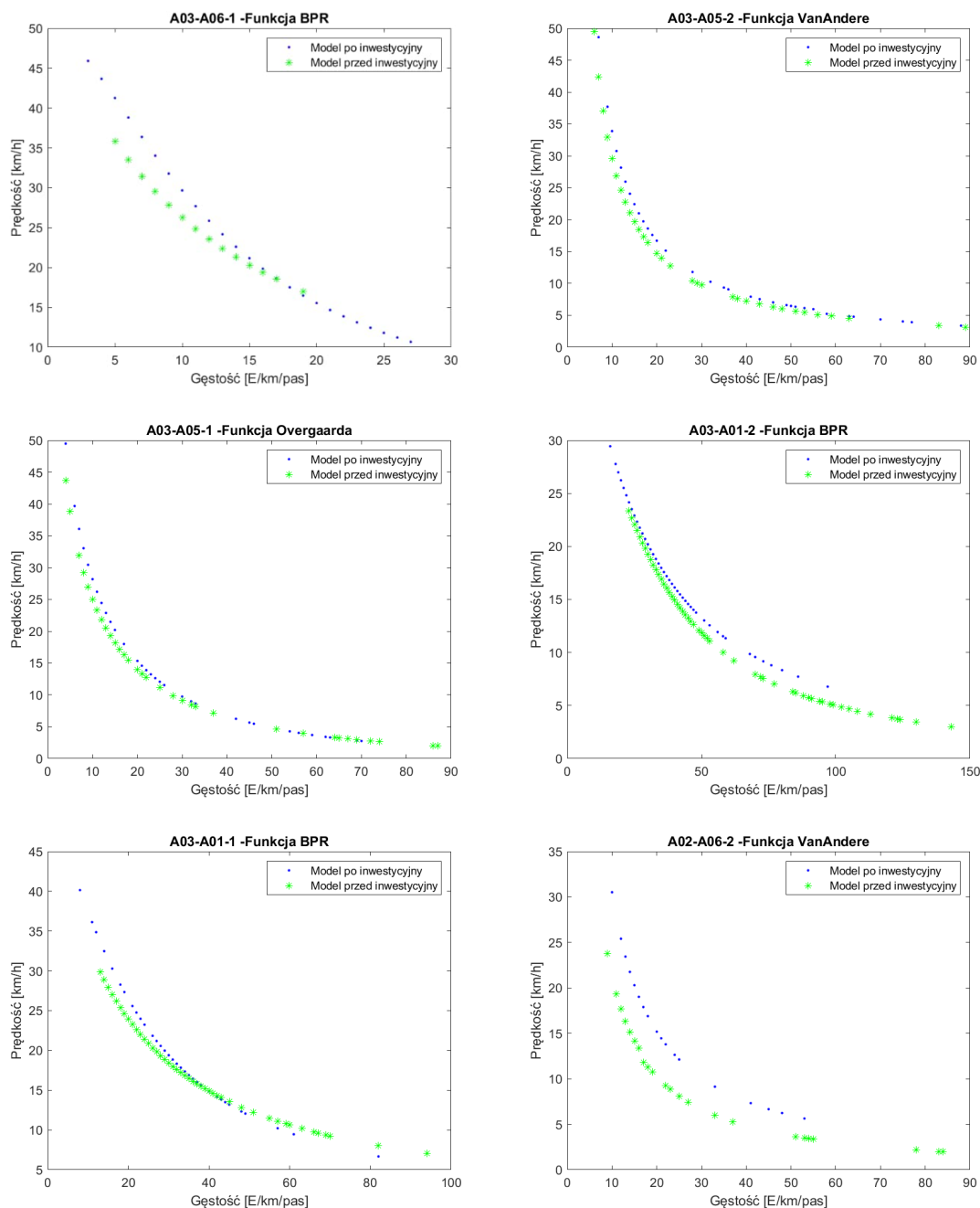
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



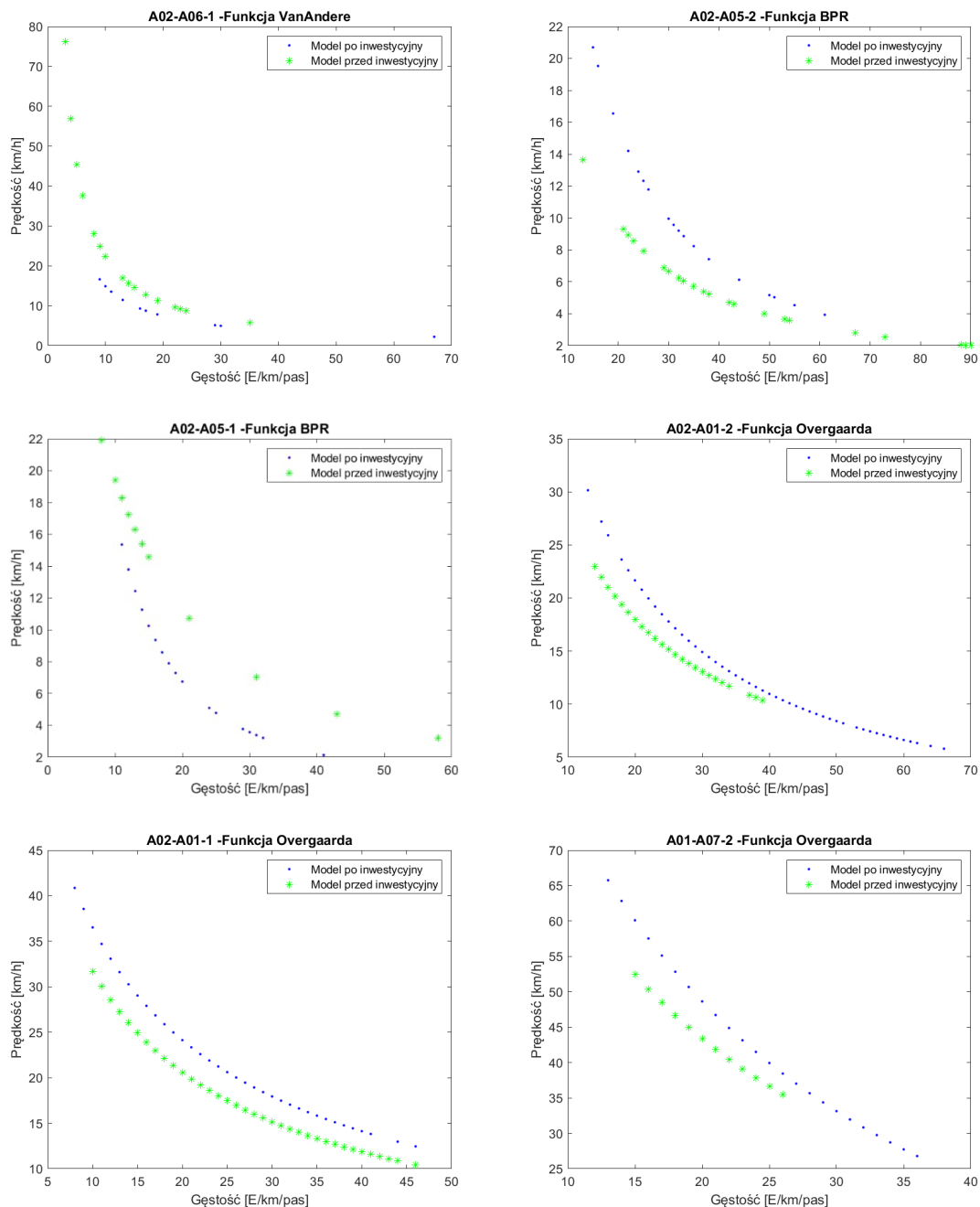
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



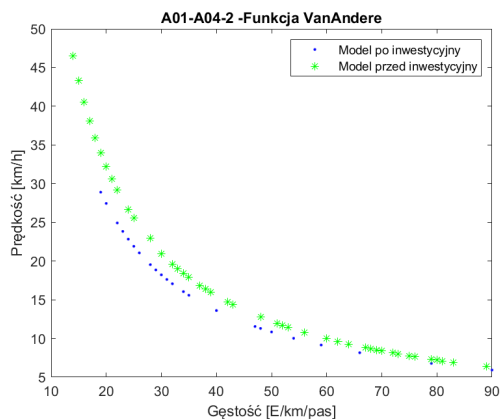
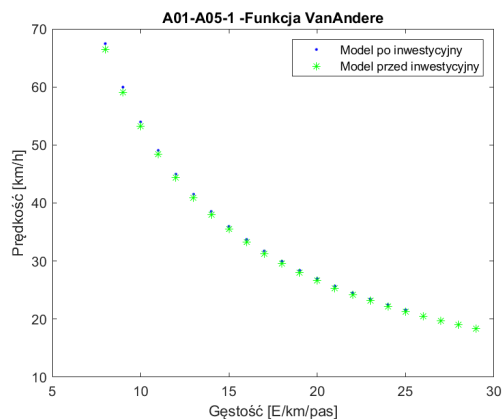
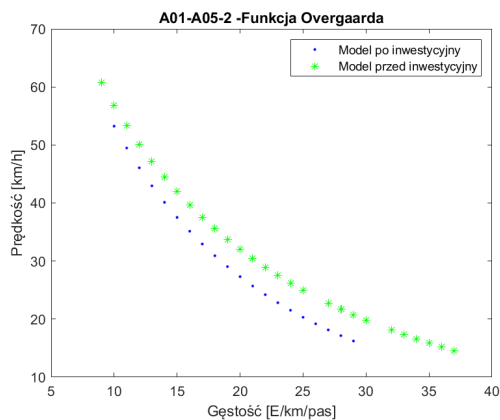
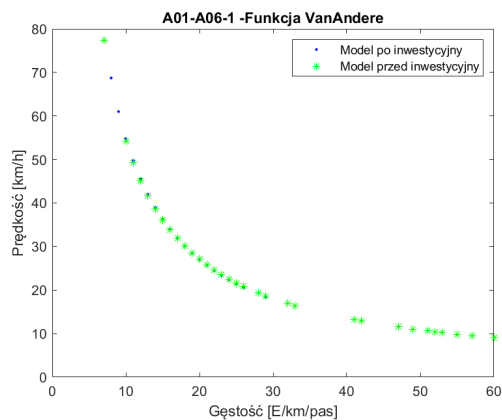
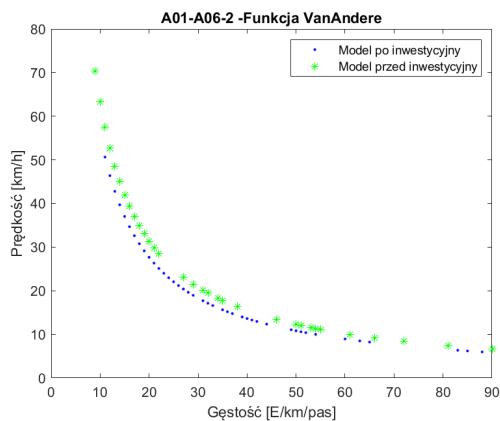
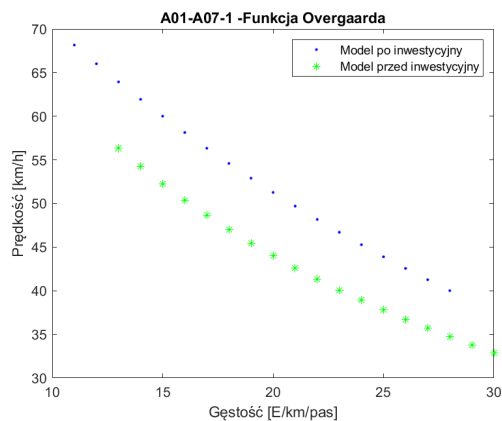
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



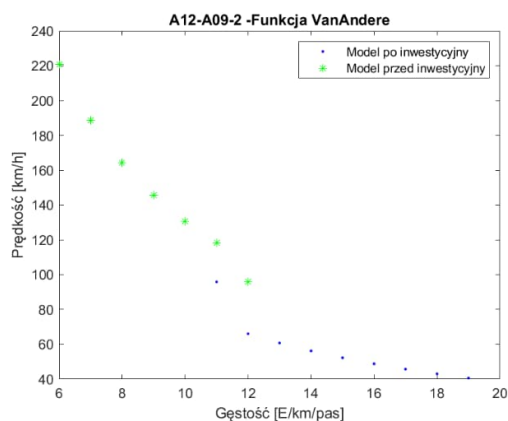
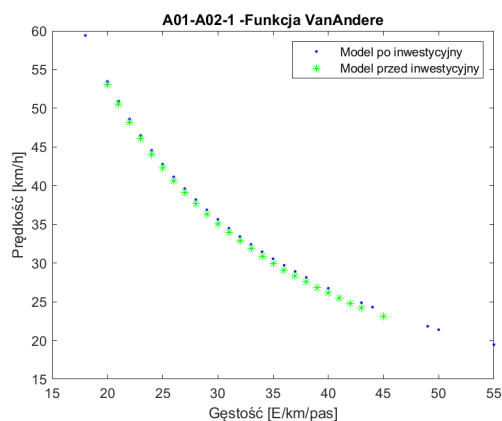
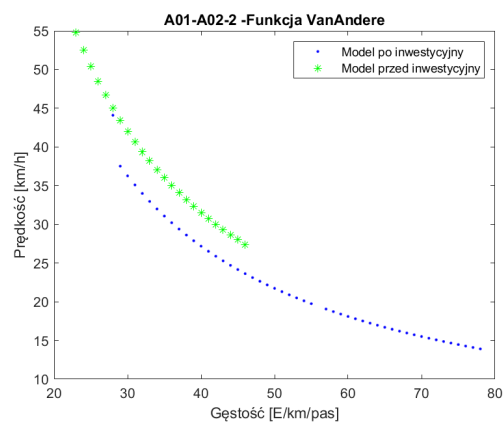
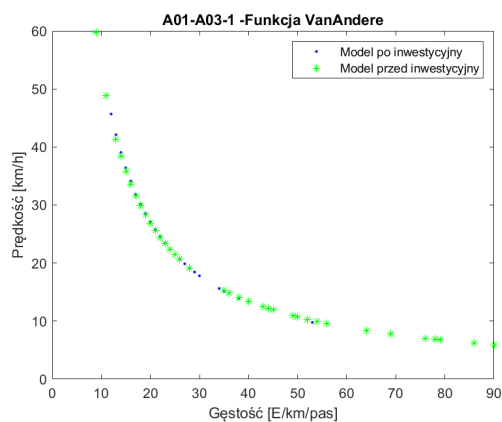
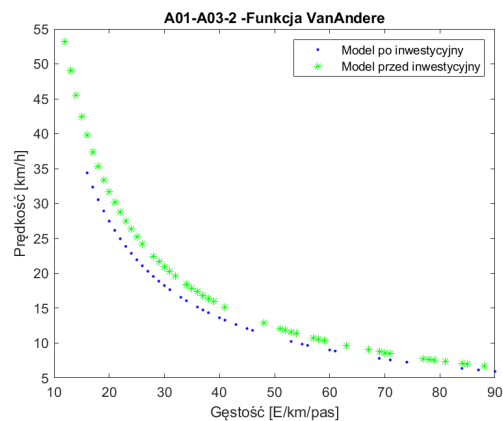
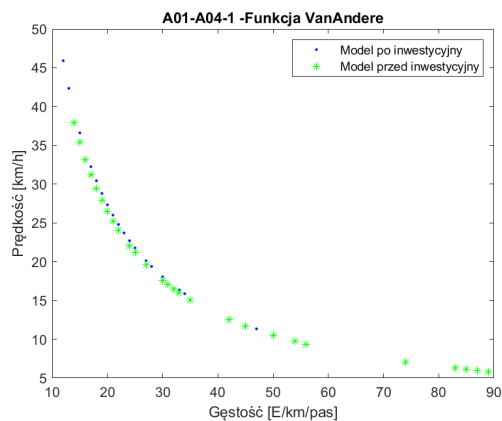
Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020



Projekt „Inteligentny System Zarządzania i Sterowania Ruchem w Tychach” realizowany w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 – 2020

