



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I TRANSPORTU

Autor:
mgr inż. Remigiusz WIEDEMANN

ROZPRAWA DOKTORSKA

PRIORYTETOWE STEROWANIE RUCHEM
MIEJSKIM Z UWZGLĘDNIENIEM
NAPEŁNIENIA ŚRODKÓW TRANSPORTU
ZBIOROWEGO

Promotor:
dr hab. inż. Piotr SAWICKI, prof. PP

Promotor pomocniczy:
dr inż. Paweł ZMUDA-TRZEBIATOWSKI

Poznań, wrzesień, 2026

Spis treści

STRESZCZENIE	5
1. WPROWADZENIE	6
1.1. Tło rozważań	6
1.2. Sformułowanie problemu badawczego	7
1.3. Cel i zadania badawcze	9
2. PRZEGLĄD STANU WIEDZY	12
2.1. Priorytetyzacja publicznego transportu zbiorowego	12
2.1.1. Geneza problemu i przyczyny konieczności uprzywilejowania PTZ	12
2.1.2. Priorytetyzacja PTZ i klasyfikacja metod oraz środków jej wdrażania	15
2.1.3. Przegląd literatury dotyczący priorytetyzacji PTZ w sygnalizacji świetlnej	32
2.2. Analizy symulacyjne miejskich systemów transportowych	45
2.2.1. Podstawy modelowania i symulacji systemów	45
2.2.2. Problematyka analiz miejskich systemów transportowych	47
2.2.3. Charakterystyka mikroskopowych modeli ruchu	51
2.3. Wielokryterialne wspomaganie decyzji	55
2.3.1. Istota wielokryterialnego wspomagania decyzji	55
2.3.2. Klasyfikacja metod WWD	57
2.3.3. Problematyka doboru metody do specyfiki problemu decyzyjnego	60
2.3.4. Metoda ELECTRE III	61
3. PROPOZYCJA METODY PRIORYTETYZACJI PTZ W RAMACH DZIAŁANIA SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ	63
3.1. Ogólna charakterystyka przyjętej metodyki badań	63
3.2. Szczegółowa charakterystyka autorskiej metody priorytetyzacji PTZ w ramach działania sygnalizacji świetlnej	67
4. WERYFIKACJA ZAPROPONOWANEJ METODY STEROWANIA NA WYBRANYCH PRZYKŁADACH	75
4.1. Wstępne uwagi, założenia i pomocnicze procedury badawcze	75
4.1.1. Wybór i charakterystyka ogólna wybranych polygonów doświadczalnych	75
4.1.2. Definicja kryteriów oceny analizowanych rozwiązań	77
4.1.3. Wybór metody WWD i jej parametryzacja	78
4.1.4. Wybór i konfiguracja narzędzi zastosowanych w badaniach symulacyjnych	80
4.1.5. Charakterystyka przyjętej metody szacowania poziomu emisji CO ₂	85
4.1.6. Opis przyjętej procedury budowy i weryfikacji środowiska testowego	90
4.1.7. Podstawowe założenia docelowych eksperymentów symulacyjnych	95
4.2. Charakterystyka badań dla PDI i wyniki symulacji	96

4.2.1.	Charakterystyka ogólna obszaru badań dla PDI (E1).....	96
4.2.2.	Definiowanie parametrów programu sygnalizacji świetlnej dla PDI (E2)	99
4.2.3.	Definiowanie algorytmu i strategii sterowania dla PDI (E3)	102
4.2.4.	Budowa środowiska testowego dla PDI (E4).....	109
4.2.5.	Prowadzenie symulacji (Etap E5)	110
4.2.6.	Selekcja rozwiązań niezdominowanych dla PDI (E6)	111
4.2.7.	Szeregowanie rozwiązań dla PDI (E7).....	113
4.2.8.	Rekomendacja rozwiązania i weryfikacja realizacji celu badań dla PDI (E8)	115
4.3.	Charakterystyka badań dla PDII i wyniki symulacji.....	116
4.3.1.	Charakterystyka ogólna obszaru badań dla PDII (E1)	116
4.3.2.	Definiowanie parametrów programu sygnalizacji świetlnej dla PDII (E2).....	122
4.3.3.	Definiowanie algorytmu i strategii sterowania dla PDII (E3)	126
4.3.4.	Budowa środowiska testowego dla PDII (E4).....	131
4.3.5.	Prowadzenie symulacji dla PDII (E5)	133
4.3.6.	Selekcja rozwiązań niezdominowanych dla PDII (E6)	133
4.3.7.	Szeregowanie rozwiązań dla PDII (E7)	135
4.3.8.	Rekomendacja rozwiązania i weryfikacja realizacji celu badań dla PDII (E8)	136
4.4.	Charakterystyka badań dla PDIII i wyniki symulacji	137
4.4.1.	Charakterystyka ogólna obszaru badań dla PDIII (E1)	137
4.4.2.	Definiowanie parametrów programu sygnalizacji świetlnej dla PDIII (E2)	142
4.4.3.	Definiowanie algorytmu i strategii sterowania dla PDIII (E3).....	146
4.4.4.	Budowa środowiska testowego dla PDIII (E4)	152
4.4.5.	Prowadzenie symulacji dla PDIII (E5).....	153
4.4.6.	Selekcja rozwiązań niezdominowanych dla PDIII (E6)	154
4.4.7.	Szeregowanie rozwiązań dla PDIII (E7)	156
4.4.8.	Rekomendacja rozwiązania i weryfikacja realizacji celu badań dla PDIII (E8).....	158
5.	PODSUMOWANIE	159
5.1.	Weryfikacja założonego celu pracy	159
5.2.	Wnioski ogólne i rekomendacje.....	162
5.3.	Kierunki dalszych badań	164
	BIBLIOGRAFIA.....	167
	SUMMARY	177
	ZAŁĄCZNIKI	178

STRESZCZENIE

Rozprawa dotyczy problematyki priorytetyzacji publicznego transportu zbiorowego (PTZ) na izolowanych skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Punktem wyjścia pracy jest założenie, że decyzja o uprzywilejowaniu danego kursu oraz zakresie ingerencji w program sygnalizacji nie powinna wynikać wyłącznie z faktu pojawienia się pojazdu w strefie detekcji, lecz z oceny rzeczywistej potrzeby jego obsługi. W związku z tym skoncentrowano się na możliwości różnicowania poziomu priorytetu w zależności od cech zgłoszenia oraz potencjalnych skutków decyzji sterującej dla pozostałych uczestników ruchu. W tym ujęciu napełnienie pojazdu PTZ uznano, obok odchylenia kursu od harmonogramu oraz czasu oczekiwania na obsługę, za jedną z kluczowych zmiennych sterujących.

Celem pracy jest opracowanie metody priorytetowego sterowania ruchem miejskim, w której wskazane zmienne stanowią podstawę kształtowania decyzji o zakresie priorytetu. Metoda ta została ukierunkowana na obniżenie strat czasu indywidualnych podróży oraz uzyskanie rozwiązania kompromisowego w przyjętym zbiorze kryteriów oceny.

Weryfikację zaproponowanego podejścia przeprowadzono z wykorzystaniem mikrosymulacji ruchu na trzech niezależnych poligonach doświadczalnych o zróżnicowanej charakterystyce geometrycznej i ruchowej. Dla każdego poligonu zastosowano opracowaną w ramach rozprawy ośmioetapową metodykę badań obejmującą: charakterystykę obszaru badań, definiowanie podstawowych parametrów programu sygnalizacji świetlnej, definiowanie algorytmu i strategii sterowania, budowę środowiska testowego, prowadzenie symulacji, selekcję rozwiązań niezdominowanych, szeregowanie wariantów oraz rekomendację rozwiązania wraz z weryfikacją realizacji celu pracy. Ocenie poddano warianty autorskiej strategii sterowania wypracowane w oparciu o zaproponowaną metodę oraz warianty strategii porównawczych nieuwzględniających informacji o napełnieniu pojazdów PTZ.

Uzyskane wyniki potwierdziły, że wykorzystanie informacji o napełnieniu pojazdów PTZ w połączeniu z pozostałymi przesłankami decyzyjnymi umożliwiło ograniczenie średnich strat czasu indywidualnych podróży w badanych układach. Wartości tej miary dla najlepszych pod tym względem wariantów strategii porównawczych były o około 4–7 % wyższe niż dla wariantów rekomendowanych, zależnie od analizowanego poligonu doświadczalnego. Rekomendowane warianty nie zawsze osiągały najkorzystniejsze wartości pozostałych miar, jednak w ocenie wielokryterialnej stanowiły korzystny kompromis zgodny z przyjętymi preferencjami decyzyjnymi. Analiza wrażliwości potwierdziła wysoką stabilność rekomendacji względem niewielkich zmian tych preferencji. Opracowana metoda może stanowić podstawę dalszych badań nad warunkowym i stopniowalnym priorytetem dla PTZ. Metodyka badań może natomiast służyć porównywaniu i wyborowi wariantów sterowania w zastosowaniach projektowych, również w przypadku strategii niewykorzystujących proponowanej metody.

1. WPROWADZENIE

1.1. Tło rozważań

Współczesne miasta funkcjonują w warunkach stale rosnących wymagań wobec systemów transportowych. Wzrost poziomu motoryzacji, rozproszenie źródeł i celów podróży oraz intensyfikacja codziennych przemieszczeń powodują, że miejska infrastruktura drogowa jest poddawana coraz większym obciążeniom. Szczególnie wyraźnie zjawisko to ujawnia się w newralgicznych porach dnia, zwanych szczytami komunikacyjnymi, kiedy zapotrzebowanie na korzystanie z sieci przekracza jej rzeczywiste możliwości obsługi. W konsekwencji dochodzi do spadku płynności ruchu, wzrostu liczby zatrzymań, tworzenia kolejek oraz zwiększenia strat czasu ponoszonych przez użytkowników systemu transportowego.

Wobec ograniczonych możliwości dalszego zwiększania przepustowości układów drogowych coraz większe znaczenie zyskują działania zgodne z założeniami zrównoważonego rozwoju transportu. Ich istotą jest sięganie w pierwszej kolejności po rozwiązania zmniejszające potrzebę korzystania z transportu indywidualnego, w tym kształtujące bardziej korzystny podział zadań przewozowych, pozostawiając dostosowywanie infrastruktury do rosnącego ruchu samochodowego jako rozwiązania stosowanego wyłącznie w sytuacjach, gdy inne będą niewystarczające. W tym ujęciu szczególna rola przypada publicznemu transportowi zbiorowemu (PTZ), który w przeliczeniu na pasażera pozwala przewozić większą liczbę osób przy mniejszym zapotrzebowaniu na przestrzeń drogową. Wzrost jego udziału w obsłudze podróży miejskich może ograniczać negatywne skutki kongestii, poprawiać efektywność wykorzystania infrastruktury oraz zmniejszać oddziaływanie transportu na środowisko.

Warunkiem skutecznego wzmocnienia roli PTZ jest jednak zapewnienie odpowiedniej jakości jego funkcjonowania. Z punktu widzenia pasażera szczególne znaczenie mają punktualność oraz czas przejazdu, ponieważ to one w dużej mierze decydują o konkurencyjności transportu zbiorowego względem transportu indywidualnego (TI). Jeżeli pojazdy PTZ podlegają tym samym skutkom kongestii co samochody osobowe, tracą jedną z podstawowych przewag, jaką powinna być przewidywalność i sprawność podróży. Z tego względu stosowanie narzędzi uprzywilejowania PTZ w ruchu miejskim jest uzasadnione zarówno z perspektywy organizacji systemu transportowego, jak i z perspektywy użytkowników.

Wspomniane uprzywilejowanie nie powinno być jednak utożsamiane z bezwarunkowym i jednakowym traktowaniem każdego zgłoszenia priorytetowego. Szczególnie w przypadku skrzyżowań sterowanych sygnalizacją świetlną, nadanie priorytetu oznacza ingerencję w przebieg programu sygnalizacji. Może ona skrócić czas oczekiwania pojazdu zgłaszającego zapotrzebowanie na obsługę, lecz jednocześnie zwiększyć straty czasu na relacjach kolizyjnych, zaburzyć koordynację sygnalizacji albo wpłynąć na obsługę innych pojazdów PTZ. W warunkach złożonego układu ruchowego problemem nie jest więc wyłącznie samo zapewnienie pierwszeństwa, lecz racjonalne określenie, kiedy i w jakim zakresie powinno ono zostać przyznane.

Rozwój systemów detekcji, lokalizacji pojazdów oraz sterowników sygnalizacji świetlnej stworzył możliwość odejścia od rozwiązań opartych na stałych, z góry założonych preferencjach. Współczesne podejście do priorytetyzacji PTZ coraz częściej wiąże się z dynamicznym reagowaniem na rzeczywiste zgłoszenia pojazdów pojawiających się w rejonie skrzyżowania. Sama obecność pojazdu nie musi jednak stanowić wystar-

czającej przesłanki do uruchomienia pełnej procedury priorytetowej. Istotne staje się uwzględnienie dodatkowych informacji opisujących zarówno sytuację ruchową, jak i charakter obsługiwanego kursu.

W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera możliwość różnicowania decyzji priorytetowej. Priorytet może być uruchamiany tylko wtedy, gdy jego zastosowanie jest uzasadnione, a zakres ingerencji w program sygnalizacji może być dostosowywany do bieżących warunków. Oznacza to odejście od prostego, zero-jedynkowego rozumienia priorytetu na rzecz podejścia, w którym decyzja sterująca wynika z oceny potrzeby obsługi pojazdu oraz przewidywanych skutków dla pozostałych uczestników ruchu.

Zasadniczym tłem niniejszej rozprawy jest zatem potrzeba takiego kształtowania priorytetu PTZ, które wykracza poza automatyczne reagowanie na pojawienie się pojazdu w strefie detekcji. Kluczowe staje się poszukiwanie rozwiązań pozwalających wspierać sprawność i punktualność PTZ, a jednocześnie ograniczać negatywne oddziaływanie priorytetu na pozostałe relacje ruchu. Tak zarysowane tło prowadzi do problemu wartościowania zgłoszeń priorytetowych, przedstawionego w kolejnym podrozdziale.

1.2. Sformułowanie problemu badawczego

Jak wskazuje analiza literatury – omówiona szerzej w podrozdziale 2.1 – współczesne badania nad priorytetyzacją PTZ coraz silniej koncentrują się na rozwiązaniach aktywnych i warunkowych. Kierunek ten wynika z potrzeby ograniczenia negatywnych skutków bezwarunkowego uprzywilejowania jednej grupy użytkowników oraz z dążenia do lepszego dopasowania decyzji sterujących do bieżącej sytuacji ruchowej. W literaturze, szczególnie zagranicznej, widoczne jest więc odejście od prostego założenia, że każde zgłoszenie pojazdu PTZ powinno automatycznie uruchamiać tę samą procedurę priorytetową. Coraz częściej analizuje się możliwość uzależniania zarówno samego przyznania priorytetu, jak i jego poziomu, od dodatkowych przesłanek opisujących cechy zgłoszenia, stan ruchu albo przewidywany wpływ decyzji na pozostałe relacje.

Rozwijany w literaturze nurt priorytetu warunkowego stanowi odpowiedź na rzeczywisty problem decyzyjny występujący na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Nadanie priorytetu pojazdowi PTZ może poprawić warunki jego przejazdu, lecz jednocześnie pogorszyć przepustowość relacji kolizyjnych. W skrajnych przypadkach nadmiernie intensywne uprzywilejowanie może prowadzić do istotnego wzrostu strat czasu po stronie TI. Dodatkowym problemem są sytuacje, w których w zbliżonym czasie pojawia się kilka zgłoszeń od pojazdów PTZ, a ich relacje pozostają względem siebie kolizyjne. Wówczas konieczne staje się nie tylko rozstrzygnięcie konfliktu między PTZ a TI, ale również ustalenie kolejności lub poziomu obsługi konkurencyjnych zgłoszeń PTZ.

W najprostszym podejściu o kolejności obsługi zgłoszeń może decydować zasada FIFO (ang. *first-in-first-out*), zgodnie z którą pierwszeństwo uzyskuje pojazd zgłoszony wcześniej. Rozwiązanie takie jest przejrzyste organizacyjnie, ale nie zawsze prowadzi do najkorzystniejszych skutków z punktu widzenia całego układu transportowego. Poszczególne kursy mogą różnić się między sobą, np. stopniem opóźnienia, liczbą pasażerów oraz wpływem na pozostałe relacje. Pominięcie tych różnic może prowadzić do decyzji nieadekwatnych względem rzeczywistej potrzeby uprzywilejowania. W konsekwencji istotnym zagadnieniem badawczym staje się wartościowanie zgłoszeń priorytetowych z uwzględnieniem wielu parametrów jednocześnie.

Przegląd najnowszej literatury wskazuje, że część tych zagadnień jest już podejmowana przez autorów badań. Analizowane są rozwiązania, w których poziom priorytetu zależy między innymi od: położenia pojazdu, jego prędkości, przewidywanego czasu dojazdu do skrzyżowania, obciążenia ruchem indywidualnym, strat czasu, odchylenia

czasu realizacji kursu od harmonogramu¹, liczby jednoczesnych zgłoszeń czy napełnienia pojazdu. Oznacza to, że niniejsza rozprawa wpisuje się w aktualny kierunek badań nad aktywnym i warunkowym uprzywilejowaniem PTZ. Jednocześnie wyniki przeglądu literatury wskazują, że rozwijane rozwiązania mają często charakter fragmentaryczny, a poszczególne przesłanki decyzji priorytetowej są analizowane oddzielnie lub w ograniczonych konfiguracjach, czy również bez ilościowej weryfikacji proponowanych rozwiązań.

Szczególne znaczenie ma tu sposób wykorzystania informacji o napełnieniu pojazdu. Parametr ten zaczyna pojawiać się w literaturze jako jedna z możliwych przesłanek warunkujących przyznanie priorytetu lub jego poziom, jednak nadal nie stanowi powszechnie stosowanego elementu kompleksowego wartościowania zgłoszeń. Tymczasem napełnienie pozwala oceniać skutki decyzji sterującej nie tylko przez pryzmat pojazdu, ale również przez pryzmat pasażerów, których podróże są realizowane w danym kursie. Jest to istotne zwłaszcza wtedy, gdy priorytet przyznany jednemu pojazdowi powoduje straty po stronie innych uczestników ruchu w tym innych pojazdów PTZ. W takich przypadkach decyzja o poziomie priorytetu powinna uwzględniać nie tylko sam fakt zgłoszenia, ale również potencjalną liczbę podróżnych, których dotyczy dana interwencja.

Wątek ten ma szczególne znaczenie w odniesieniu do krajowego dorobku badawczego. O ile w pracach osadzonych w kontekście innych krajów zagadnienie priorytetu warunkowego jest rozwijane coraz szerzej (por. rozdział 2.1), o tyle w polskich warunkach pozostaje ono znacznie mniej rozpowszechnione. Dotyczy to zwłaszcza podejścia, w którym decyzja o przyznaniu priorytetu lub jego poziom jest uzależniana od napełnienia pojazdu PTZ. Pojedyncze prace odnoszące się do warunków polskich (np. [7, 172]) wskazują na możliwość wykorzystania liczby pasażerów w pojeździe w programie sygnalizacji świetlnej, jednak zagadnienie to nie zostało szeroko rozwinięte w postaci kompletnej metody sterowania zweryfikowanej eksperymentalnie. Jednocześnie, obecne są głosy krytyczne względem traktowania napełnienia pojazdu jako samodzielnego kryterium decyzyjnego. Molecki [116] wskazuje, że liczba pasażerów znajdujących się w pojeździe w danej chwili nie musi odzwierciedlać faktycznych potrzeb przewozowych całego systemu. Pojazd o wysokim napełnieniu może bowiem kończyć kurs, natomiast pojazd o niższym napełnieniu może rozpoczynać trasę, na której w kolejnych punktach oczekuje wielu pasażerów. Oznacza to, że decyzje oparte wyłącznie na aktualnym napełnieniu mogą prowadzić do wyborów suboptymalnych z perspektywy systemu transportowego i odczuwanej jakości obsługi.

Krytyka ta nie podważa jednak zasadności wykorzystania informacji o napełnieniu, lecz wskazuje na ograniczenia jej stosowania jako jedynej przesłanki decyzyjnej. Z tego względu w niniejszej rozprawie napełnienie pojazdu nie jest traktowane jako samodzielna podstawa przyznania priorytetu, ale jako jeden z elementów szerszego modelu wartościowania zgłoszeń. Połączenie napełnienia z odchyleniem kursu od harmonogramu oraz czasem oczekiwania na obsługę pozwala ograniczyć ryzyko decyzji opartych wyłącznie na chwilowej liczbie pasażerów, a jednocześnie zachować potencjał tego parametru jako miary społecznej skali skutków opóźnienia. Takie ujęcie stanowi odpowiedź zarówno na rozwijany w literaturze międzynarodowej trend priorytetu warunkowego, jak i na zastrzeżenia formułowane w krajowej dyskusji nad możliwością wykorzystania napełnienia pojazdów w sterowaniu sygnalizacją świetlną.

Luką badawczą nie jest zatem sam brak zainteresowania priorytetem warunkowym czy brak pojedynczych opracowań uwzględniających napełnienie pojazdów. Problem ma charakter bardziej złożony. Dotyczy braku spójnej metody dynamicznego kształtowania poziomu priorytetu, która łączyłaby kilka istotnych przesłanek decyzji:

¹ w dalszej części pracy nazywany również w skrócie *odchyleniem od harmonogramu*

napełnienie pojazdu, odchylenie kursu od harmonogramu oraz czas oczekiwania na obsługę. Pierwsza z tych zmiennych pozwala uwzględnić liczbę pasażerów objętych skutkami decyzji sterującej, druga wiąże priorytet z niezawodnością i punktualnością publicznego transportu zbiorowego, a trzecia ogranicza ryzyko długotrwałego pomijania zgłoszeń oczekujących na obsługę. Ich łączne wykorzystanie pozwala przejść od priorytetu rozumianego jako reakcja na obecność pojazdu do priorytetu rozumianego jako decyzja wynikająca z oceny rzeczywistej potrzeby obsługi.

Osobnego podkreślenia wymaga również sposób oceny rozwiązań priorytetowych. W wielu publikacjach analiza ma charakter wielokryterialny w tym sensie, że autorzy raportują kilka miar efektywności. Nie zawsze towarzyszy temu jednak formalna procedura wyboru rozwiązania kompromisowego, typowego w przypadku więcej niż jednej miary efektywności. Tymczasem taka ocena wymaga równoczesnego uwzględnienia kryteriów, które mogą być względem siebie sprzeczne, a rozwiązanie obiektywnie najlepsze nie zawsze jest dostępne. W takiej sytuacji wybór rekomendowanego rozwiązania nie powinien sprowadzać się do niezależnej analizy pojedynczych miar, lecz do poszukiwania kompromisu w wybranym zbiorze kryteriów z zastosowaniem formalnej procedury uwzględniającej jawnie określone preferencje decydenta.

Wobec powyższych rozważań oraz luki badawczej zidentyfikowanej na podstawie przeglądu literatury (por. rozdział 2.1) **problem badawczy** rozprawy obejmuje dwa powiązane aspekty. Pierwszym jest *niedostateczne rozwinięcie spójnej metody dynamicznego kształtowania decyzji o priorytecie dla pojazdów PTZ w ramach działania sygnalizacji świetlnej, która wpisując się w rozwijany w literaturze nurt priorytetu aktywnego, warunkowego i stopniowalnego, umożliwiałaby jednoczesne uwzględnienie napełnienia pojazdu, odchylenia kursu od harmonogramu oraz czasu oczekiwania na obsługę*. Problem ten jest szczególnie istotny w kontekście krajowym, gdzie badania nad wykorzystaniem napełnienia pojazdów w priorytetowym sterowaniu sygnalizacją świetlną są nieliczne, a dostępne głosy krytyczne wskazują na potrzebę traktowania tego parametru nie jako samodzielnej podstawy decyzyjnej, lecz jako jednej z kilku przesłanek wartościowania zgłoszeń. Drugim aspektem jest *niewystarczający stopień dopracowania metodyki badań łączącej przygotowanie wariantów sterowania z symulacyjną oceną skutków ich zastosowania oraz formalnym wyborem rozwiązania rekomendowanego w ujęciu wielokryterialnym*.

Tak sformułowany problem badawczy obejmuje zarówno opracowanie sposobu wartościowania zgłoszeń pojazdów PTZ, jak i ocenę efektywności wynikających z tego decyzji sterujących. Istotne jest przy tym nie tylko wykazanie, że informacja o napełnieniu może wpływać na zasadność przyznania silniejszego priorytetu, ale również sprawdzenie, czy jej wykorzystanie prowadzi do rozwiązań korzystnych lub kompromisowych w szerszym układzie kryteriów. Z tego względu rozwiązanie problemu badawczego wymaga połączenia algorytmicznego podejścia do priorytetyzacji z analizą symulacyjną oraz wielokryterialnym wspomaganiem decyzji.

1.3. Cel i zadania badawcze

Wobec przedstawionego problemu badawczego za **cel rozprawy** przyjęto *opracowanie metody priorytetowego sterowania ruchem miejskim w obszarze skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, w której decyzje o zakresie priorytetu są kształtowane w oparciu o informacje o napełnieniu pojazdów publicznego transportu zbiorowego, wraz z odchyleniem czasu realizacji kursu od harmonogramu oraz czasem oczekiwania na obsługę. Decyzje te są zarazem ukierunkowane na obniżenie strat czasu indywidualnych podróży oraz uzyskanie rozwiązania kompromisowego w przyjętym zbiorze kryteriów*.

Warunkiem realizacji tak sformułowanego celu jest wykazanie, że:

- 1) wykorzystanie w algorytmie sterowania informacji o napełnieniu pojazdów PTZ umożliwia obniżenie strat czasu indywidualnych podróży realizowanych na modelowanych skrzyżowaniach, w porównaniu z rozwiązaniami nieuwzględniającymi tej informacji;
- 2) opracowana metoda sterowania po zaimplementowaniu jej założeń w ramach jednej z porównywanych strategii² pozwala uzyskać satysfakcjonujące rozwiązanie kompromisowe w przyjętym zbiorze kryteriów oceny, obejmującym: K1 – straty czasu indywidualnych podróży, K2 – straty czasu pojazdów, K3 – straty czasu pojazdów publicznego transportu zbiorowego, K4 – odchylenie kursu od harmonogramu oraz K5 – emisję CO₂ do atmosfery;
- 3) rozwiązanie kompromisowe, stanowiące wariant strategii sterowania opartej na założeniach proponowanej metody, osiąga korzystniejszą (mniejszą) wartość kryterium K1, tj. średnich strat czasu indywidualnych podróży, niż najlepsze pod tym względem warianty strategii porównawczych nieuwzględniających informacji o napełnieniu pojazdów PTZ;
- 4) rekomendacja uzyskana w wyniku analizy wielokryterialnej jest niewrażliwa na niewielkie zmiany preferencji decyzyjnych.

Realizacja sformułowanego celu wymaga wykonania szeregu zadań badawczych, do których zaliczyć należy:

- przeprowadzenie przeglądu i uporządkowanie stanu wiedzy w zakresie priorytetyzacji publicznego transportu zbiorowego;
- opracowanie spójnej metodyki badań służącej przygotowaniu, porównaniu i wyborowi wariantów różnych strategii sterowania;
- opracowanie autorskiego sposobu wartościowania priorytetu dla pojazdu PTZ na podstawie: napełnienia pojazdu, odchylenia kursu od harmonogramu oraz czasu oczekiwania na obsługę;
- opracowanie sposobu przełożenia potrzeby priorytetowej obsługi pojedynczych pojazdów na decyzje dotyczące wyboru faz sygnalizacyjnych i poziomu ingerencji w program sygnalizacji;
- przygotowanie zbioru wariantów sterowania, obejmującego zarówno warianty autorskiej strategii, wykorzystującej napełnienie pojazdów PTZ, jak i warianty strategii porównawczych nieuwzględniających tego parametru;
- budowę zintegrowanego środowiska symulacyjno-sterującego dla wybranych skrzyżowań o zróżnicowanej charakterystyce geometrycznej i ruchowej, obejmującego modele mikrosymulacyjne i wirtualne sterowniki sygnalizacji;
- przeprowadzenie serii eksperymentów symulacyjnych oraz wyznaczenie wartości analizowanych kryteriów;
- opracowanie procedury szacowania emisji CO₂ na potrzeby rozbudowanego planu eksperymentów symulacyjnych;
- zebranie, przetworzenie i ocenę uzyskanych wyników eksperymentów symulacyjnych pod kątem przyjętego zbioru kryteriów;
- wskazanie zbioru rozwiązań niezdominowanych w zakresie każdej z analizowanych strategii sterowania;
- wyznaczenie bazowego modelu preferencji decyzyjnych oraz jego modyfikacji;
- wskazanie rozwiązania rekomendowanego z wykorzystaniem dobranej do problemu decyzyjnego metody wielokryterialnego wspomagania decyzji;
- przeprowadzenie analizy wrażliwości pozwalającej ocenić stabilność rekomendacji

² w dalszej części pracy strategię oparte na założeniach proponowanej metody sterowania nazywane są również strategiami autorskimi

względem zmian preferencji decyzyjnych.

Zakres pracy ograniczono do zagadnień związanych z lokalnym sterowaniem ruchem na wyizolowanych skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Weryfikację opracowanej metody sterowania przeprowadzono z wykorzystaniem modeli mikrosymulacyjnych, za pomocą których porównano proponowane założenia metodyczne z podejściami alternatywnymi, w tym nieuwzględniającymi informacji o napełnieniu pojazdów. Analizie poddano różne parametryzacje algorytmów oraz poligony doświadczalne różniące się charakterystyką geometryczną i ruchową. Pozwoliło to ocenić, czy skuteczność proponowanego podejścia zależy od lokalnych uwarunkowań badanego skrzyżowania.

Praca nie obejmuje pełnego projektu wdrożeniowego systemu detekcji i transmisji danych o napełnieniu pojazdów, analizy wszystkich możliwych technologii pozyskiwania danych pasażerskich, koordynacji między skrzyżowaniami ani kompleksowej optymalizacji całej sieci transportowej miasta. Rozprawa koncentruje się na metodycznym, algorytmicznym i symulacyjnie weryfikowalnym aspekcie uwzględniania informacji o napełnieniu w procesie kształtowania poziomu priorytetu na wyizolowanych skrzyżowaniach oraz na ocenie skutków takiego podejścia w przyjętych warunkach badawczych.

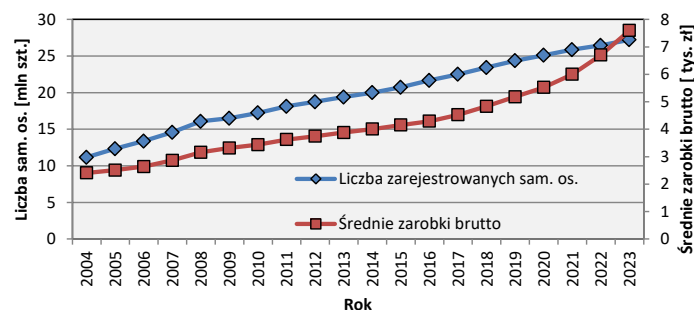
Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów. W rozdziale pierwszym przedstawiono tło rozważań, sformułowano problem badawczy oraz określono cel i zakres pracy. Rozdział drugi zawiera przegląd stanu wiedzy dotyczący priorytetyzacji PTZ, analiz symulacyjnych miejskich systemów transportowych oraz metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji. W rozdziale trzecim zaprezentowano metodykę badań, obejmującą sposób przygotowania danych, projektowania strategii sterowania, budowy modeli symulacyjnych, realizacji eksperymentów, oceny wyników oraz wyboru wariantu rekomendowanego, a następnie szczegółowo scharakteryzowano autorską metodę priorytetowego sterowania ruchem. W rozdziale czwartym przedstawiono przebieg i wyniki weryfikacji proponowanej metody sterowania na tle podejść alternatywnych z wykorzystaniem opracowanej metodyki na wybranych poligonach doświadczalnych. Rozdział piąty zawiera podsumowanie rozprawy, wnioski końcowe oraz wskazanie możliwych kierunków dalszych badań. Do pracy dołączony jest również wykaz literatury oraz niezbędne załączniki.

2. PRZEGLĄD STANU WIEDZY

2.1. Priorytetyzacja publicznego transportu zbiorowego

2.1.1. Geneza problemu i przyczyny konieczności uprzywilejowania PTZ

Obserwowany na przestrzeni lat intensywny wzrost zamożności społeczeństwa oraz rozwój motoryzacji przyczyniły się do upowszechnienia standardu posiadania własnego samochodu w coraz większej liczbie gospodarstw domowych. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego [63], tylko w Polsce, na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat liczba rejestrowanych samochodów osobowych wzrosła ponad dwukrotnie i wiele wskazuje, że wartość ta w kolejnych latach będzie dalej rosła (por. Rys. 1). To zjawisko, w połączeniu m.in. z procesem eksurbanizacji ośrodków miejskich wywiera znaczący wpływ na mobilność i zwyczaje transportowe mieszkańców, przede wszystkim tych zamieszkujących miasta. Obowiązki związane m.in. z pracą, nauką czy zakupami wiążą się z koniecznością pokonywania często nawet kilkudziesięciu kilometrów dziennie pomiędzy rozproszonymi celami podróży w obrębie miasta i jego okolic. W konsekwencji, skumulowanie podróży o podobnych motywacjach, realizowanych najczęściej za pomocą samochodów osobowych, prowadzi do znacznego wzrostu natężenia ruchu i tym samym spadku jego efektywności poprzez intensyfikację zjawiska kongestii transportowej [27, 44, 98]. Jej skala jest szczególnie uciążliwa w czasie szczytów komunikacyjnych, kiedy to zatory ruchu mogą przybierać charakter paraliżu komunikacyjnego. Problem kongestii ma charakter globalny, a skutki jej występowania obserwowane są w praktycznie wszystkich sieciach transportowych na całym świecie o czym świadczą liczne cykliczne raporty (np. [73, 179]).



Rys. 1. Liczba zarejestrowanych samochodów osobowych oraz przeciętne miesięczne wynagrodzenia brutto w Polsce na przestrzeni lat. Źródło: [63]

Ciesielski w pracy [27] stwierdza, że kongestia to proces oczekiwania na możliwość uzyskania pewnego dobra, wynikający z obecności innych nabywców lub użytkowników. Analogicznie, w kontekście transportowym definiuje się ją jako brak możliwości natychmiastowego obsłużenia uczestnika ruchu przez infrastrukturę drogową z powodu konieczności jednoczesnej obsługi innych jej użytkowników [155]. W obu wypadkach problemem jest dysproporcja pomiędzy popytem a podażą w określonym miejscu i czasie [27, 82, 98]. Przepustowość sieci drogowej oraz podaż miejsc parkingowych nie są wystarczająco elastyczne, aby efektywnie zaspokoić potrzeby wszystkich podróżnych, wskutek czego ponoszą oni koszty, wyrażające się najczęściej w stratach czasu [27]. W praktyce kongestia przejawia się zatem spadkiem prędkości podróży, narastaniem kolejek na wlotach skrzyżowań i węzłów, a także problemami z parkowaniem. Niedobór

miejsc parkingowych prowadzi do wydłużenia czasu przejazdu i często wymusza długotrwałe „krążenie” w celu znalezienia dostępnego miejsca, co jedynie wzmacnia skalę zatorów na drogach [27, 98]. Newralgicznymi punktami sieci transportowej, na których straty czasu uczestników ruchu, niezależnie od wybranego środka transportu osiągają najwyższe wartości, są skrzyżowania. Są to miejsca, w których przynajmniej dwa potoki ruchu przecinają się lub zbiegają. Ze względu na ograniczoną przestrzeń oraz konieczność zapewnienia bezpieczeństwa, co wymaga odpowiedniej organizacji ruchu, niemożliwe jest zapewnienie wszystkim uczestnikom swobodnego, wolnego od opóźnień przejazdu. Oczekiwanie użytkowników poruszających się relacjami kolizyjnymi są sprzeczne, ponieważ każda z tych grup dąży do jak najszybszego przejazdu i tym samym minimalizacji własnych strat czasu. Wraz ze wzrostem liczby skrzyżowań w ciągu komunikacyjnym oraz ze wzrostem złożoności ich układów narasta efekt kumulacji opóźnień, co obniża efektywność funkcjonowania całej sieci.

Spadek płynności ruchu wpływa również na wzrost emisji szkodliwych substancji generowanych przez środki transportu kształtujące ten ruch. Badania dowodzą, że emisja toksycznych związków jest w głównej mierze, z pominięciem stanu technicznego pojazdów, pochodną liczby zatrzymań i startów pojazdu z postoju (np. [113]). Warto także podkreślić, że skutki kongestii oddziałują nie tylko na pojazdy TI, ale również na wszystkich pozostałych współużytkowników infrastruktury, w tym pojazdy PTZ oraz pieszych [27].

Poszukiwania sposobów pozwalających efektywnie zmniejszyć skalę zjawiska kongestii i ograniczyć jego negatywne skutki trwają nieprzerwanie od dziesięcioleci. Już w połowie XX wieku zaczęły pojawiać się głosy krytyczne wobec rozbudowy dróg jako jedynego remedium na zatłoczenie komunikacyjne. Warto przywołać słowa amerykańskiego publicysty Mumforda, który takie podejście przyrównał do „próby leczenia otyłości przez popuszczanie pasa.” [118]. Zaczęto wówczas dostrzegać, że polityka transportowa skoncentrowana na maksymalizacji wygody użytkownika samochodu jest krótkowzroczna.

Jednak dopiero sformułowane nieco później prawo Mogridge’a-Lewisa oraz paradoks Downsa-Thomsona wykazały, na podstawie badań empirycznych, że intuicyjnie „oczywiste” rozwiązania polegające na ciągłym zwiększaniu przepustowości sieci ulicznej (realizowane głównie poprzez poszerzanie przekrojów dróg, dodawanie kolejnych pasów ruchu czy rozbudowę powierzchni parkingowych) nie zapewniają trwałej poprawy warunków ruchu. Wręcz przeciwnie, prowadzą one do wzrostu atrakcyjności danej trasy i uruchomienia mechanizmu tzw. popytu indukowanego. Z jednej strony, odnotowuje się odpływ pasażerów z PTZ na rzecz TI, co podnosi koszty jednostkowe przewoźników, wymusza redukcję oferty przewozowej i wzrost cen biletów, a w konsekwencji pogłębia tę tendencję i implikuje dalszy wzrost natężenia ruchu. Z drugiej strony pojawiają się nowe podróże, do których dotychczas, z uwagi na zatłoczenie w ogóle nie dochodziło, lub dochodziło w innych porach dnia. Ostatecznie, rezerwy przepustowości szybko zostają wypełnione, a stan zatłoczenia powraca (w miejscu inwestycji lub przenosi się do sąsiednich odcinków i węzłów), czemu towarzyszy zwiększona emisja zanieczyszczeń oraz hałasu [35, 44, 115, 126]. Doświadczenia płynące z badań przeprowadzonych w wielu częściach świata, m.in. w USA (np. [35, 122]), krajach Europy Zachodniej (np. [115]) oraz w Polsce (np. [34, 152]) konsekwentnie potwierdzają słuszność tych twierdzeń. Biorąc pod uwagę powyższe, można stwierdzić, że po przekroczeniu pewnego poziomu motoryzacji, stworzenie wydajnego układu drogowo-parkingowego, który zapewniłby pełną swobodę korzystania z samochodu, jest niemożliwe lub co najmniej bardzo trudne i nieoptyczne w dłuższej perspektywie.

Obecnie największe nadzieje na zminimalizowanie negatywnych skutków kongestii transportowej pokłada się w działaniach wpisujących się w ideę polityki zrównoważonego rozwoju (ang. *sustainable development*) [44, 161]. Założenia tej polityki są coraz częściej wdrażane na poziomie międzynarodowym, krajowym i lokalnym. Według Światowej Komisji ds. Środowiska i Rozwoju (WCED) [154] zrównoważony rozwój to koncepcja zorientowana na zaspokajanie potrzeb obecnego pokolenia bez ograniczenia możliwości ich zaspokojenia przez przyszłe generacje. Polityka zrównoważonego rozwoju ma charakter wielowymiarowy i obejmuje wiele sfer życia i działalności człowieka, przede wszystkim: energetykę, transport, przemysł, planowanie przestrzenne, mieszkalnictwo, gospodarkę wodną i odpadami, a także zdrowie publiczne i edukację. Jej założenia są wdrażane poprzez zestawy skoordynowanych instrumentów regulacyjnych, finansowych, infrastrukturalnych i informacyjnych.

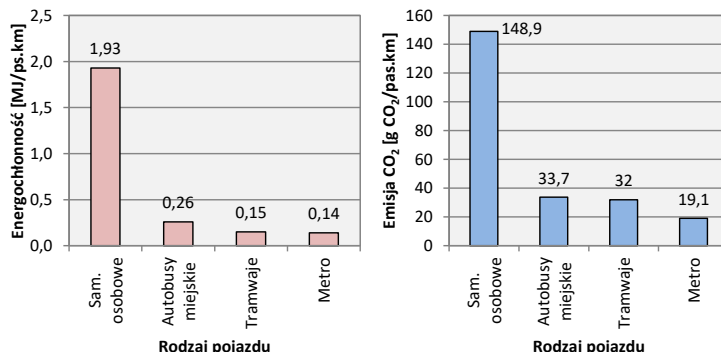
W kontekście transportu, zwłaszcza miejskiego, celem polityki zrównoważonego rozwoju jest równoczesne ograniczenie kongestii, hałasu oraz emisji szkodliwych substancji do atmosfery, poprawa dostępności i bezpieczeństwa użytkowników systemu transportowego, a także bardziej efektywne wykorzystanie energii i przestrzeni [44, 114, 154, 161]. W zakresie przemieszczania się osób, Gaca i in. [44] wskazują, że głównym zadaniem tej strategii jest zapewnienie optymalnego podziału zadań przewozowych pomiędzy PTZ a TI. W warunkach rosnącego poziomu motoryzacji i intensyfikacji zatorów ruchu sprowadza się to do konieczności podejmowania spójnych działań promujących PTZ oraz uczynienia go na tyle konkurencyjnym wobec samochodu, aby zahamować, a docelowo odwrócić trend odpływu pasażerów od usług publicznych przewoźników na rzecz TI [38, 44].

Za realizacją powyższych założeń przemawia przede wszystkim fakt, że środki PTZ, takie jak autobus czy tramwaj, uchodzą za najbardziej ekonomiczny środek przemieszczania się zwłaszcza w obszarze śródmiejskim. Wynika to głównie z ich wysokiej zdolności przewozowej, zdecydowanie większej niż w przypadku standardowego pięcioosobowego samochodu osobowego. Przykładowo, pojemność autobusu Solaris Urbino 18 wynosi 176 pasażerów, z czego 41 miejsc siedzących [177], a tramwaj Moderus Gamma 240 pasażerów (46 miejsc siedzących) [176]. Oznacza to, że pojedynczy pojazd transportu zbiorowego jest w stanie jednorazowo przewieźć odpowiednio 35 i 48 razy więcej osób niż samochód osobowy. W rezultacie, pojazdy transportu zbiorowego wymagają znacznie mniej przestrzeni drogowej w przeliczeniu na jednego pasażera. Rydzkowski i in. [137] szacują, że przy zapewnieniu porównywalnej zdolności przewozowej (i bez uwzględniania powierzchni potrzebnej na parkowanie), samochód osobowy wymaga sześciokrotnie większej powierzchni niż autobus i siedmiokrotnie większej niż tramwaj.

Nie mniej istotna od efektywności transportowej jest przewaga środków PTZ pod względem ekologicznym. Przeprowadzone w Warszawie badania Szymalskiego [153] dowodzą, że najmniejszą energochłonność i emisję CO₂ w przeliczeniu na pasażerokilometr wykazuje metro, nieco wyższą tramwaje, a następnie autobusy miejskie. Natomiast wartości odnotowane dla samochodów osobowych znacznie przewyższają sumę wartości dla pozostałych wymienionych środków transportu (por. Rys. 2). Wskazane w badaniu Szymalskiego zależności są spójne z wynikami innych opracowań w tym zakresie, np. [94, 137].

W kontekście emisji hałasu, badania Frosta i Isona [41] pokazują, że będący w ruchu pojedynczy samochód osobowy jest na ogół cichszy od każdego z pojazdów transportu zbiorowego. Jednak z uwagi na znacznie większy udział samochodów osobowych w ruchu ulicznym, to właśnie ruch samochodowy w głównej mierze odpowiada za poziom hałasu w mieście. Autorzy wskazują, że już osiem samochodów jadących z prędkością

ok. 50 km/h generuje łączny hałas równoważny przejazdowi jednego tramwaju i około dwóch autobusów.



Rys. 2. Wartości energochłonności i emisji CO₂ z podziałem na kategorie pojazdów. Źródło: [153]

Podsumowując, działania na rzecz zwiększenia udziału transportu publicznego w obsłudze potrzeb transportowych miast znajdują uzasadnienie nie tylko z punktu widzenia efektywności transportowej, ale również ze względu na wymierne korzyści ekologiczne. Warto jednocześnie nadmienić, że pomimo silnego ukierunkowania polityki zrównoważonego rozwoju na poprawę jakości PTZ, nie wyklucza ona całkowicie inwestycji drogowych (lub sprzyjających poprawie przepustowości). Przeciwnie, zakłada ich selektywną realizację, zorientowaną głównie na poprawę bezpieczeństwa oraz dostępności do transportu zbiorowego (np. poprzez budowę parkingów typu parkuj i jedź, ang. *park & ride*, w pobliżu przystanków) oraz na utrzymanie istniejącej infrastruktury w należyтым stanie technicznym. Natomiast inwestycje prowadzące głównie do zwiększenia przepustowości powinny być podejmowane jedynie tam, gdzie jest to absolutnie konieczne i znajduje potwierdzenie w wynikach kompleksowych analiz.

Należy również mieć na uwadze preferencje użytkowników systemu transportowego. Wyniki licznych badań (np. [36, 50, 117]) potwierdzają, że spośród wszystkich atrybutów usług PTZ dla podróżnych największe znaczenie mają punktualność oraz łączny czas przejazdu (uwzględniający opóźnienia spowodowane kongestią). Z kolei mniej wagi przywiązuje się do cech takich jak komfort podróży, poczucie bezpieczeństwa, integracja taryfowo-informacyjna czy nawet koszt przejazdu. Można zatem stwierdzić, że wszelkie narzędzia uprzywilejowania PTZ, sprzyjające poprawie punktualności i skróceniu czasu przejazdu są niezbędne i społecznie pożądane.

2.1.2. Priorytetyzacja PTZ i klasyfikacja metod oraz środków jej wdrażania

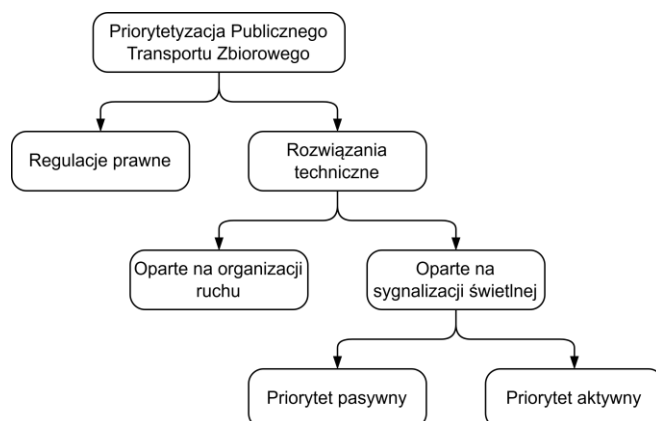
Jednym z kluczowych instrumentów zrównoważonej polityki transportowej jest wdrażanie priorytetów dla PTZ. Słowo „priorytet” pochodzi od łacińskiego słowa *prior* (tzn. pierwszy) i według słownika języka polskiego [61] oznacza *pierwszeństwo przysługujące lub przyznane czemuś i/lub sprawę szczególnie ważną, która musi być załatwiona w pierwszej kolejności*.

W kontekście zarządzania ruchem, priorytetyzacja oznacza działania mające na celu ułatwienie przejazdu lub nadanie pierwszeństwa wybranemu uczestnikowi ruchu względem pozostałych. Przedmiotem analizy dokonanej w ramach niniejszej pracy jest priorytet dla publicznego transportu zbiorowego. Ze względu na obszerność zagadnienia oraz istotne różnice w metodach nadawania priorytetu poszczególnym rodzajom pojazdów zakres pracy zawężono do priorytetyzacji tramwajów poruszających się po wydzielonych torowiskach. W tym kontekście skoncentrowano się na problematyce lokalnego

sterowania ruchem w obrębie wyizolowanego skrzyżowania, na którym ruch pojazdów objętych priorytetem odbywa się po relacjach wydzielonych z ruchu transportu indywidualnego. Ograniczenie to pozwoliło zmniejszyć wpływ dodatkowych czynników, w szczególności współdzielenia pasa ruchu przez pojazdy transportu indywidualnego i zbiorowego oraz związanej z tym kongestii, a tym samym wyraźniej ocenić skutki zastosowania analizowanej metody priorytetyzacji. Inne formy priorytetyzacji, dotyczące głównie pojazdów uprzywilejowanych lub innych uczestników ruchu (np. pieszych), pominięto w analizie.

W literaturze przedmiotu [23, 44] priorytetyzację PTZ definiuje się jako kompleksowy zestaw działań organizacyjnych, technicznych i prawnych ukierunkowanych na poprawę efektywności ruchu pojazdów PTZ w sieci drogowej (głównie na skrzyżowaniach), realizowanych poprzez minimalizację wartości strat czasu, liczby zatrzymań oraz odchyień od rozkładu w trakcie realizacji kursu. Podstawową klasyfikację metod i środków nadawania priorytetu PTZ zamieszczono na Rys. 3. Najogólniej można podzielić je na dwie grupy: regulacje prawne oraz rozwiązania techniczne. Pierwsze z wymienionych dotyczą przepisów obowiązujących w danym kraju, regulujących zasady i sposób zachowania innych uczestników ruchu w obszarze dróg publicznych z pojazdami PTZ. W Polsce, takie przepisy reguluje Prawo o ruchu drogowym tj. ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r. [162]. Szczególne znaczenie w kontekście uprzywilejowania PTZ mają następujące przepisy, zapewniające [162]:

- pierwszeństwo autobusom i trolejbusom włączającym się do ruchu z przystanku w obszarze zabudowanym (art. 18 ust. 1-2);
- pierwszeństwo pojazdu szynowego tj. tramwaju w relacji do innych pojazdów na skrzyżowaniu równorzędnym, bez względu na to z której strony nadjeżdża (art. 25 ust. 2-3);
- pierwszeństwo pojazdu szynowego względem pieszego wchodzącego na przejście dla pieszych (art. 13 ust. 1a). Należy podkreślić, że zasada ta nie dotyczy sytuacji, gdy pieszy już znajduje się na przejściu (art. 26 ust. 1a);
- pierwszeństwo pojazdu szynowego wobec pojazdu znajdującego się na jezdni z torowiskiem. Kierujący pojazdem ma obowiązek ustąpić miejsca nadjeżdżającemu pojazdowi szynowemu (art. 16 ust. 6);
- zakaz zatrzymania pojazdu (innego niż pojazd publicznego transportu zbiorowego): na przejeździe tramwajowym i w odległości mniejszej od 10 m od niego (art. 49 ust. 1. pkt. 1); w odległości mniejszej niż 15 m od słupka lub tablicy oznaczającej przystanek, a na przystanku z zatoką – na całej jej długości (art. 49 ust. 1. pkt. 9);



Rys. 3. Ogólna klasyfikacja metod priorytetyzacji PTZ. Źródło: Opr. własne na bazie [23, 44, 172]

Należy zauważyć, że w obliczu rosnącej skali problemu zatłoczenia miast, regulacje prawne w ujęciu poprawy warunków ruchu pojazdów PTZ są niewystarczające. Dlatego uznaje się za konieczne wdrażanie bardziej zaawansowanych narzędzi inżynierii ruchu, do których zalicza się wszystkie rozwiązania techniczne wprowadzane w obszarze infrastruktury drogowej. W tym kontekście wyróżnia się podejścia oparte na organizacji ruchu oraz na działaniu sygnalizacji świetlnej. Poszczególne warianty obu podejść mogą być wdrażane niezależnie lub w połączeniu, co w praktyce miejskiej zdarza się bardzo często.

Rozwiązania oparte na organizacji ruchu są z reguły najbardziej trwałe, lecz mało elastyczne pod względem możliwości późniejszych modyfikacji czy modernizacji. Zakres takich działań jest bardzo szeroki, od prac polegających jedynie na zmianie oznakowania po inwestycje wymagające kompleksowej przebudowy fragmentu sieci transportowej. Szczególnie te ostatnie mogą się wiązać z głęboką ingerencją w przestrzeń miasta. Oznacza to m. in. konieczność przebudowy istniejących skrzyżowań, budowy nowych skrzyżowań bądź całych ciągów komunikacyjnych. W niektórych przypadkach reorganizacja ruchu wymaga przeprowadzenia dodatkowych wywłaszczeń/wykupu gruntów, rozbiórek istniejących obiektów i budynków pod cele inwestycyjne. W efekcie prowadzi to do wysokich kosztów oraz długotrwałych prac przygotowawczych i realizacyjnych. Klasyfikacja i charakterystyka priorytetów nadawanych poprzez organizację ruchu, stanowi zawartość wielu opracowań (np. [32, 44]), a do najczęściej wymienianych i zarazem stosowanych rozwiązań należą:

- wydzielone pasy przeznaczone dla ruchu autobusowego (tzw. buspasy) (por. Rys. 4a),
- wydzielone drogi autobusowe lub tramwajowe (bądź wspólne korytarze autobusowo-tramwajowe), odseparowane od innych uczestników ruchu (por. Rys. 4b),
- dopuszczenie ruchu autobusów na wprost przy nakazie skrętu w lewo lub w prawo dla pozostałych pojazdów (por. Rys. 4c),
- przeznaczenie części przekroju istniejących jezdni dla komunikacji miejskiej, np. torowiska w pasie dzielącym lub w osi jezdni (por. Rys. 4d).



Rys. 4. Wybrane przykłady nadania priorytetu PTZ za pośrednictwem organizacji ruchu. Źródło: Opr. własne (a, c), [123] (b), [71] (d)

Buspas stanowi najpopularniejszy i relatywnie niedrogi sposób uprzywilejowania pojazdów PTZ poprzez organizację ruchu. Jego koncepcja polega na przydzieleniu jednego z dostępnych pasów ruchu, z reguły przykrawężnikowego, do wyłącznego użytkowania autobusów (często z dopuszczeniem taksówek, rowerów czy pojazdów elektrycznych). Wdrażany jest w szczególności w ciągach głównych arterii miast, gdzie droga prowadząca w danym kierunku składa się z co najmniej dwóch pasów ruchu. Mimo niewątpliwych zalet tego rozwiązania, badania wskazują na rosnący problem nieuprawnionego korzystania z buspasów przez innych uczestników ruchu, co degraduje ich efektywność w ograniczaniu strat czasu pojazdów PTZ. Dlatego zaleca się wdrażanie rozwiązań polegających na skutecznej detekcji i nieuchronnej penalizacji takich zachowań [12, 110, 181].

Zdecydowanie bardziej efektywnym, rozwiązaniem jest budowa wydzielonych dróg dla pojazdów PTZ. Fizyczne oddzielenie ruchu autobusów czy tramwajów od ruchu ogólnego, eliminuje opóźnienia wynikające z kongestii, szczególnie na odcinkach międzywęzłowych. Przykładem takiej inwestycji jest trasa Poznańskiego Szybkiego Tramwaju (PST) (Rys. 4b), która dzięki pełnej separacji torowiska od ruchu samochodowego zapewnia tramwajom wysoką prędkość komunikacyjną i punktualność. Należy jednak zauważyć, że procesy przygotowania i realizacji takich inwestycji zwykle są długotrwałe i bardzo kosztowne. W przypadku pierwszego odcinka wymienionej trasy PST wszystkie prace zajęły łącznie kilkanaście lat, generując bardzo wysokie nakłady inwestycyjne [70].

W ramach organizacji ruchu, znaczną uwagę przykładą się również do kwestii obsługi przystanków. Czas wymiany pasażerskiej istotnie wpływa na efektywność funkcjonowania linii PTZ, a jego skrócenie przyczynia się do poprawy płynności ruchu i punktualności. W znacznym stopniu czas wsiadania i wysiadania pasażerów do/z autobusu czy tramwaju zależy od konstrukcji samego przystanku. Przykładem rozwiązania wspierającego efektywną i bezpieczną wymianę pasażerską jest przystanek wiedeński [79, 112]. Stosuje się go tam, gdzie pasażerowie wsiadają do tramwaju bezpośrednio z jezdni, tzn., gdy chodnik jest oddzielony od torowiska pasem ruchu samochodowego. Jego konstrukcja polega na wyniesieniu fragmentu jezdni pełniącego rolę peronu do poziomu chodnika, w celu zminimalizowania odległości oraz różnicy wysokości między peronem a podłogą pojazdu. W rezultacie zmiana wysokości pasa ruchu wymusza zmniejszenie prędkości samochodów w rejonie przystanku (efekt progu zwalniającego). Jednocześnie czas wymiany pasażerskiej zostaje skrócony. Szczególnie w przypadku osób o ograniczonej mobilności, w tym osób starszych, z niepełnosprawnościami czy opiekunów z dziećmi (por. Rys. 5).



Rys. 5. Przykłady zastosowania przystanku wiedeńskiego. Źródło: [74]

W kontekście przystanków istotny pozostaje też problem ich rozlokowania względem skrzyżowania. Z zagranicznych (np. [43]), jak i polskich (np. [11]) badań w tym

temacie wynika, że wariant, w którym przystanki lokalizowane są na wylotach skrzyżowania wykazuje zdecydowanie więcej zalet i korzyści dla transportu publicznego, szczególnie gdy za zarządzanie ruchem na skrzyżowaniu odpowiedzialna jest sygnalizacja świetlna zapewniająca przejazd pojazdu PTZ przez skrzyżowanie bez zatrzymania. Umieszczenie przystanku przed skrzyżowaniem uznaje się za uzasadnione jedynie w specyficznych przypadkach. Dotyczy to sytuacji, gdy zatrzymanie się autobusu lub tramwaju na wlocie jest nieuniknione, np. ze względu na lokalną geometrię czy układ torowiska. Takie rozwiązanie stosuje się również w miejscach, gdzie ważne są dogodne warunki przesiadkowe na inne linie obsługujące wlot albo konieczność obsługi generatorów ruchu położonych bezpośrednio przed węzłem.

Ostatecznie, w kontekście inwestycji opartych na zmianach w organizacji ruchu należy mieć na uwadze, że szczególnie w centrach miast poważnym problemem jest deficyt wolnej przestrzeni, dlatego w wielu przypadkach wdrożenie dużych inwestycji pokroju np. Poznańskiego Szybkiego Tramwaju jest zwyczajnie niemożliwe i jedynym, choć niekoniecznie gorszym, rozwiązaniem pozostaje wdrożenie usprawnień w zakresie sterowania ruchem.

Pomimo tego, że sygnalizację świetlną stosuje się głównie w celu zwiększenia poziomu bezpieczeństwa na skrzyżowaniach, od lat pełni ona coraz większą rolę w efektywnym zarządzaniu ruchem miejskim. Priorytety oparte na sygnalizacji świetlnej mogą być realizowane pasywnie (w literaturze wymiennie funkcjonuje również określenie priorytetu biernego) lub aktywnie [26, 119, 172].

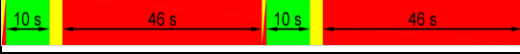
Priorytet pasywny realizuje się poprzez odpowiednie kształtowanie stałoczasowych programów sygnalizacji, bez bieżącej identyfikacji obecności pojazdów PTZ w rejonie skrzyżowania. Program jest projektowany z uwzględnieniem typowych warunków ruchu oraz rozkładów jazdy pojazdów PTZ i ukierunkowany na zwiększenie prawdopodobieństwa ich przejazdu przez skrzyżowanie bez zatrzymania. Najlepsze efekty tego podejścia odnotowuje się, gdy pojazdy PTZ kursują z dużą częstotliwością (zbliżoną do długości cyklu programu sygnalizacji) wzdłuż głównego ciągu komunikacyjnego, a czasy postoju na przystankach są relatywnie krótkie i charakteryzują się niewielką zmiennością [26, 106].

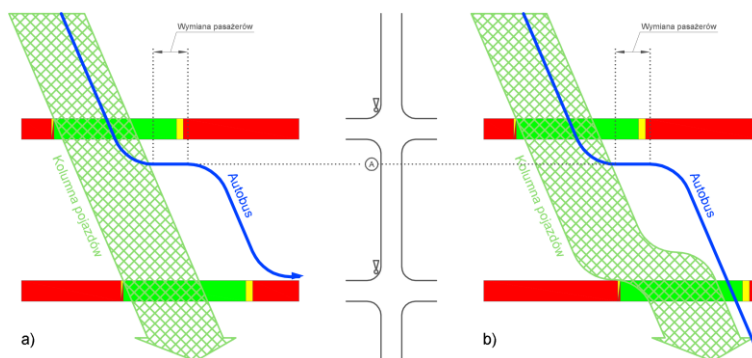
Najprostszym środkiem realizacji priorytetu pasywnego jest stałe wydłużenie sygnału zezwalającego na ruch w danej relacji lub jego dwukrotne załączanie w jednym cyklu programu. Przykład działania obu rozwiązań względem ruchu autobusu przedstawiono w Tab. 1. W wariancie wyjściowym udział sygnału zezwalającego w pożądanej relacji wynosi 16,7%, a maksymalny czas oczekiwania na obsługę sięga 97 s. Wydłużenie tego sygnału (Zmiana I) poprawia sytuację, zwiększając udział w cyklu do 37,5% i skracając maksymalny czas oczekiwania do 72 s. Korzystniejsze efekty daje jednak dwukrotna obsługa w cyklu (Zmiana II), która pomimo utrzymania wyjściowego udziału sygnału zezwalającego, pozwala znacznie ograniczyć ryzyko wystąpienia maksymalnych czasów oczekiwania, redukując je do 47 s. Trzeba jednak pamiętać, że w praktyce podwójna obsługa danej relacji nie zawsze jest możliwa, ponieważ może prowadzić do przekroczenia akceptowalnej długości cyklu i znacznego pogorszenia warunków ruchu na pozostałych relacjach.

Innym przykładem wpisującym się w ramy priorytetu pasywnego jest dostosowanie stałych przesunięć fazowych, czyli tzw. *offset-ów*, w skoordynowanym ciągu skrzyżowań do ruchu pojazdu PTZ (por. Rys. 6). W sytuacji na Rys. 6.a koordynacja jest ukierunkowana na maksymalizację efektu „zielonej fali” dla pojazdów transportu indywidualnego. Po postoju na przystanku autobus nie jest w stanie wpasować się w tę koordynację. W rezultacie przejazd autobusu przez drugie skrzyżowanie bez zatrzymania jest niemożliwy. Wobec tego w wariancie na Rys. 6.b zastosowano większy *offset*, uwzględniający czas

potrzebny na wymianę pasażerską. Poprawiono w ten sposób efektywność ruchu autobusu, kosztem jedynie częściowego pogorszenia koordynacji dla ruchu ogólnego. Jeżeli jednak wymiana pasażerska trwa dłużej niż zwykle, autobus może i tak nie zdążyć dojechać do linii zatrzymania przed końcem sygnału zielonego, co dodatkowo wygeneruje straty czasu wobec transportu indywidualnego.

Tab. 1. Przykładowe konfiguracje sygnału zezwalającego na ruch autobusu w cyklu programu stałoczasowego. Źródło: Opr. własne

Wariant (opis i schemat)	Udział czasu sygn. zezwalającego na ruch w cyklu	Maks. czas oczekiwania
Stan wyjściowy		
	16,67 %	97,00 s
Zmiana I: wydłużenie sygnału		
	37,50 %	72,00 s
Zmiana II: dwukrotne załączenie sygnału		
	16,67 %	47,00 s



Rys. 6. Koordynacja sygnalizacji: bez uwzględnienia priorytetu pasywnego (a) i z jego uwzględnieniem (b). Źródło: Opr. własne na podstawie [44, 171]

Ostatnim przykładem zastosowania priorytetu pasywnego jest śluza autobusowa sterowana programem stałoczasowym. Schemat jej działania przedstawiono na Rys. 7 (a-e). Uprzywilejowanie autobusu polega na wcześniejszym nadaniu sygnału zezwalającego dla buspasa w porównaniu z pasami ogólnymi, na których pojazdy TI oczekują w kolejce. Opóźnienie rozpoczęcia obsługi TI umożliwia autobusowi ominięcie kolejki oraz zajęcie pasa odpowiedniego do dalszego przejazdu przez skrzyżowanie, bezpośrednio przed linią zatrzymania. Zastosowanie takiego stałego rozwiązania jest uzasadnione przede wszystkim wtedy, gdy autobusy pojawiają się w większości cykli. W przeciwnym przypadku nadawanie sygnału zezwalającego dla buspasa w cyklach bez obecności autobusu może prowadzić do niepotrzebnego wstrzymania potoku ruchu TI i wzrostu strat czasu.

Podsumowując charakterystykę priorytetu pasywnego, należy zaznaczyć, że zapewnia on pojazdowi PTZ korzyści jedynie w warunkach typowych, zgodnych z przyjętymi na etapie projektowania założeniami. Wszelkie odchylenia od tych warunków w zakresie funkcjonowania PTZ (np. opóźnienia, zmienna długość postoju na przystankach) nie mogą zostać uwzględnione w programie sygnalizacji w czasie rzeczywistym. W konsekwencji sygnały korzystne dla PTZ są nadawane cyklicznie również w cyklach,

w których nie występuje takie zapotrzebowanie, co może powodować nieuzasadnione wstrzymanie potoków ruchu na relacjach kolizyjnych i wzrost strat czasu.



Rys. 7. Schemat działania służby autobusowej (przedsygnалу) na wlocie skrzyżowania. Źródło: Opr. własne

Obserwowany na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat proces zastępowania programów stałoczasowych programami zmiennoczasowymi (akomodacyjnymi), wynikający z rozwoju narzędzi i metod detekcji uczestników ruchu oraz modernizacji sterowników, stworzył podstawy do stopniowego przejścia od pasywnej priorytetyzacji PTZ do rozwiązań wykorzystujących koncepcję priorytetu aktywnego.

Priorytet aktywny umożliwia dynamiczną modyfikację programu sygnalizacji przez sterownik w następstwie wykrycia przez system detekcji zbliżającego się do skrzyżowania pojazdu PTZ. Dzięki temu możliwe jest przyznawanie uprzywilejowania jedynie w sytuacjach, w których występuje rzeczywiste zapotrzebowanie na obsługę PTZ, co stanowi główną różnicę względem opisanego wcześniej podejścia pasywnego. Możliwości, jakie stwarza koncepcja priorytetu aktywnego, sprawiają, że rozwiązanie to stanowi współcześnie zasadniczy kierunek rozwoju systemów uprzywilejowania PTZ. W części literatury wyróżnia się dodatkowo priorytet adaptacyjny, np. w [2, 143, 188], rozumiany jako bardziej zaawansowana forma priorytetu aktywnego. W niniejszej pracy podejście to traktuje się jako podzbiór priorytetu aktywnego i nie wydziela jako osobnej kategorii.

Podstawowym warunkiem poprawnego funkcjonowania priorytetu aktywnego jest zapewnienie dopływu do sterownika wiarygodnej informacji o zbliżaniu się pojazdu PTZ do skrzyżowania. Wymaga to rozwiązań technicznych umożliwiających selektywną identyfikację pojazdów transportu zbiorowego, poruszających się często w strumieniu ruchu z innymi pojazdami. Zalicza się do nich m.in. dedykowane czujniki montowane w nawierzchni (pętle indukcyjne), kamery czy moduły komunikacyjne instalowane w taborze. Aspekty techniczne detekcji pojazdów PTZ, a także pozostałych uczestników ruchu (w tym dobór technologii, lokalizacja detektorów, przetwarzanie sygnałów oraz kwestie niezawodności i kalibracji) zostały szeroko omówione w literaturze przedmiotu [4, 6, 45, 89, 100, 145]. Z tego względu w niniejszej pracy ograniczono się do wskazania rozwiązań niezbędnych z punktu widzenia realizacji priorytetu aktywnego, koncentrując dalsze rozważania na mechanice ingerencji w program sygnalizacji i jej konsekwencjach dla pracy skrzyżowania.

Odpowiednio wczesne wykrycie zgłoszenia od pojazdu PTZ jest jednym z kluczowych czynników determinujących osiągnięcie wysokiego poziomu obsługi, gdyż zapewnienia zapas czasu konieczny do dopasowania przebiegu programu do aktualnej pozycji pojazdu i przewidywanego czasu dojazdu do linii zatrzymania. Ze względu na wymagania formalne i bezpieczeństwo nie zawsze może to zostać zrealizowane natychmiast. W najprostszym przypadku, gdy prędkość poruszającego się pojazdu PTZ (V) jest znana, a dojazd do skrzyżowania odbywa się ruchem swobodnym, zgłoszenie powinno zostać wykryte co najmniej, gdy pojazd znajduje się w odległości L od linii zatrzymania zgodnie z zależnością (1). Dla takich warunków możliwe jest uruchomienie grupy odpowiedzialnej za przejazd pojazdu PTZ bez zatrzymania [86].

$$L = V \cdot [\max(Tmz_{ij} + Tmin_i) + T_h + T_r] \quad (1)$$

gdzie:

- L – odległość pojazdu od linii zatrzymania w chwili zgłoszenia [m],
- i – dowolna grupa kolizyjna z grupą sygnalizacyjną obsługującą przejazd pojazdu PTZ,
- j – grupa sygnalizacyjna obsługująca przejazd pojazdu PTZ,
- V – prędkość pojazdu PTZ przy zbliżaniu się do skrzyżowania [m/s],
- Tmz_{ij} – czas międzyczas między grupami i oraz j [s],
- $Tmin_i$ – minimalna długość sygnału zezwalającego na ruch w grupie i [s],
- T_h – czas hamowania pojazdu PTZ z prędkości V do zatrzymania [s],
- T_r – czas reakcji kierowcy pojazdu PTZ [s].

Warto jednak zaznaczyć, że w przedstawionej sytuacji sygnał grupy kolizyjnej można wyłączyć od razu po osiągnięciu przez nią czasu minimalnego, co z reguły znacznie ogranicza przepustowość danej relacji i nie jest często stosowane. Lokalne uwarunkowania mogą wymagać uwzględnienia szeregu innych czynników, co wymaga dalszej rozbudowy powyższego równania.

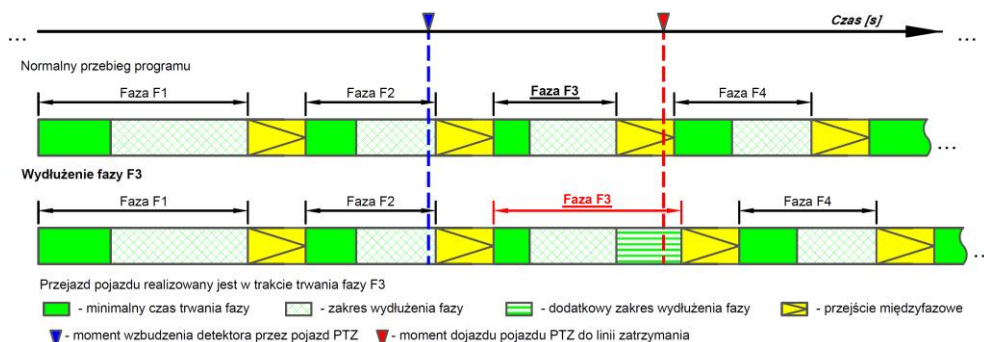
Efektywność priorytetu aktywnego można poprawić integracją z systemami monitorowania i lokalizacji taboru w czasie rzeczywistym, takimi jak AVL (ang. *automatic vehicle location*), wykorzystującymi m.in. technologię GNSS (ang. *global navigation satellite system*). Systemy te zapewniają bieżące, aktualizowane w sposób ciągły dane o położeniu oraz parametrach eksploatacyjnych pojazdów [6, 32]. Dla uzyskania maksymalnych korzyści istotne jest również ograniczenie wpływu zatorów na dojeżdżenie do skrzyżowania tak, aby pojazdy PTZ nie były blokowane przez kolejki innych pojazdów na wlotach. Z tego względu zaleca się, o ile to możliwe, zapewnienie dojazdu do skrzyżowania po wydzielonej drodze lub pasie ruchu [44].

Aktywne metody priorytetyzacji PTZ obejmują szerokie spektrum rozwiązań. W literaturze nie funkcjonuje jednowymiarowa typologia tych metod, ponieważ różnią się one m. in. sposobem realizacji czy zakresem ingerencji w program sygnalizacji. Z tego względu wyróżnia się klasyfikacje prowadzone według różnych kryteriów, które porządkują rozwiązania z odmiennych perspektyw. W niniejszej pracy przyjęto klasyfikację aktywnych metod priorytetyzacji PTZ opracowaną na podstawie wybranych opracowań przeglądowych [23, 32, 145]. Metody uporządkowano według następujących kryteriów:

- sposobu ingerencji w przebieg programu sygnalizacji,
- sposobu podejmowania decyzji przez algorytm sterowania,
- zasięgu oddziaływania,
- warunków udzielania priorytetu oraz doboru jego intensywności.

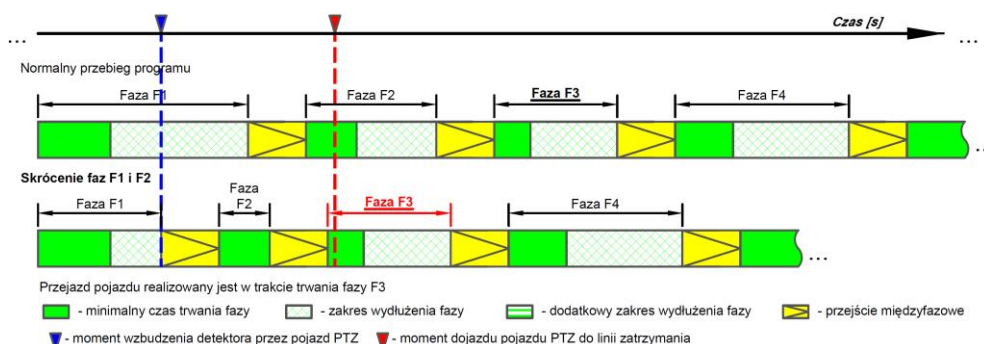
Z punktu widzenia *ingerencji w przebieg programu sygnalizacji*, realizacja aktywnego priorytetu PTZ polega na uruchamianiu specjalnych procedur modyfikujących przebieg programu sygnalizacji. Działanie tych procedur sprowadza się przede wszystkim do:

- wydłużenia sygnału zielonego: polega na wydłużeniu czasu trwania aktualnie realizowanej fazy, w celu umożliwienia przejazdu pojazdu PTZ zbliżającego się do skrzyżowania. Zakres wydłużenia może być zdefiniowany ogólnie lub uzależniony od przewidywanego czasu dojazdu pojazdu PTZ do skrzyżowania i może przewyższać domyślny maksymalny czas trwania danej fazy (por. Rys. 8);



Rys. 8. Wydłużenie fazy F3 w celu zapewnienia przejazdu pojazdu PTZ. Źródło: Opr. własne

- skrócenia sygnału czerwonego: polega na wcześniejszym zakończeniu realizacji fazy, w której obsługiwany jest ruch kolidujący z relacją wykrytego pojazdu PTZ. Zakres skrócenia i tym samym czas potrzebny do załączenia docelowej fazy, ograniczony jest koniecznością zapewnienia minimalnego czasu trwania danej fazy (szczególnie gdy w fazie skracanej załączana jest grupa piesza odpowiedzialna za ruch na długim przejściu) i zachowania czasów międzyczłonnych (por. Rys. 9). Przyspieszenie realizacji priorytetu poprzez skracanie faz kolizyjnych może znacznie pogorszyć przepustowość relacji nieobjętych priorytetem. Wpływ tego czynnika można jednak ograniczyć stosując rekompensaty czasowe dla faz skróconych;

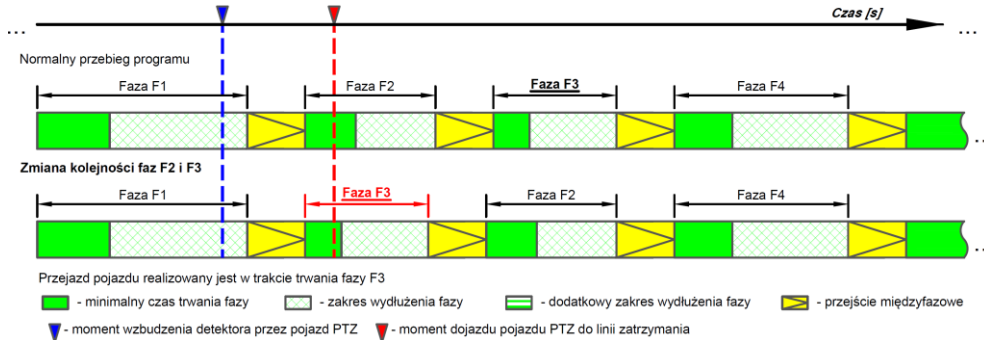


Rys. 9. Skrócenie faz F1 i F2 w celu zapewnienia przejazdu pojazdu PTZ w ramach fazy F3. Źródło: Opr. własne

- pominięcia realizacji faz kolizyjnych w danym cyklu: polega na rezygnacji z wyświetlenia wybranej fazy w bieżącym cyklu programu, aby możliwie szybko doprowadzić do załączenia fazy docelowej obsługującej przejazd pojazdu PTZ. Wyróżnia się dwa warianty takiego działania. Pierwszy dotyczy pominięcia fazy, do której nie odnotowano zgłoszeń. Wówczas odstąpienie od jej realizacji nie wpływa negatywnie na poziom obsługi uczestników ruchu. Drugi wariant dotyczy fazy, do której wykryto zgłoszenia, lecz mimo to nie zostaje ona wyświetlona. W tym przypadku konsekwencje

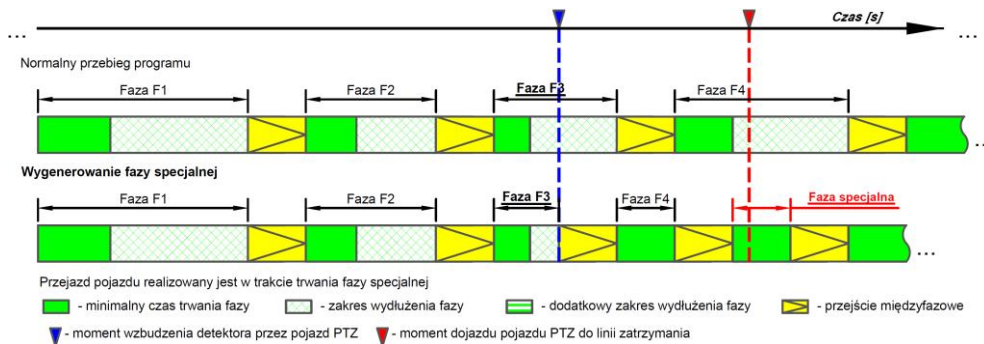
funkcjonalne są znacznie większe niż przy skróceniu fazy, ponieważ w danym cyklu dochodzi do całkowitego braku obsługi zgłoszonego potoku, co może powodować szybkie narastanie kolejek i znaczny wzrost strat czasu. Z tego względu zaleca się, aby procedura ta była stosowana wyłącznie w ściśle określonych warunkach, z uwzględnieniem rekompensat w kolejnych cyklach;

- zmiany kolejności faz: polega na modyfikacji standardowej sekwencji faz w taki sposób, aby przejście do docelowej fazy obsługującej ruch wykrytego pojazdu PTZ zostało zrealizowane możliwie jak najwcześniej (por. Rys. 10);



Rys. 10. Zmiana kolejności faz w celu zapewnienia przejazdu pojazdu PTZ w ramach fazy F3. Źródło: Opr. własne

- wygenerowania specjalnej fazy priorytetowej: polega na dodaniu do programu sygnalizacji dodatkowej fazy, wyświetlanej wyłącznie wówczas, gdy zostanie zgłoszona obecność pojazdu transportu zbiorowego. Jeśli zgłoszenia nie odnotowano, faza ta jest pomijana w cyklu, co zapobiega niepotrzebnemu wstrzymywaniu ruchu pozostałych uczestników. Wprowadzenie tego mechanizmu pozwala zapewnić przejazd pojazdu PTZ nawet w sytuacji, gdy standardowy program nie przewiduje dla niego odpowiedniego sygnału w danym cyklu (por. Rys. 11);



Rys. 11. Wygenerowanie dodatkowej specjalnej fazy w celu zapewnienia przejazdu pojazdu PTZ. Źródło: Opr. własne

- ponownego załączenia fazy w cyklu: polega na ponownym wyświetleniu wybranej fazy jeszcze w tym samym cyklu w celu zapewnienia przejazdu przez skrzyżowanie pojazdu PTZ bez konieczności oczekiwania na kolejny cykl;
- dynamicznej zmiany *offsetu* programu: polega na czasowej korekcie *offsetu* programów w ciągu skoordynowanych skrzyżowań w celu osiągnięcia efektu „zielonej fali” względem wykrytego pojazdu PTZ. Po jego przejeździe wartość *offsetu* wraca do wartości bazowej.

Wymienione procedury stanowią główną warstwę wykonawczą aktywnego priorytetu w sygnalizacji świetlnej i mogą być stosowane w programie oddzielnie, jak i w różnych kombinacjach. O tym, które działanie zostanie uruchomione oraz w jakim momencie, rozstrzyga zaimplementowany w sterowniku algorytm. Z punktu widzenia *sposobu podejmowania decyzji przez algorytm sterowania* wyodrębnia się: podejście oparte na regułach, optymalizacyjne lub wykorzystujące techniki uczenia maszynowego.

Na większości skrzyżowań wyposażonych w sygnalizację świetlną sterowanie ruchem odbywa się za pośrednictwem predefiniowanego zestawu reguł (ang. *rule-based traffic control*), przedstawianego najczęściej w postaci drzewa decyzyjnego. Warunki logiczne oraz wartości parametrów, np. maksymalnego czasu wydłużenia sygnału zielonego, są często dobierane w sposób heurystyczny z uwzględnieniem typowej dla danego miejsca charakterystyki ruchu, zarówno TI, jak i PTZ. Priorytetyzacja PTZ realizowana w ramach tego podejścia wyróżnia się przede wszystkim przejrzystą, deterministyczną logiką decyzyjną, łatwą do implementacji w większości sterowników sygnalizacji. Jednak sam proces projektowania może być długotrwały z powodu potrzeby wykonania odpowiedniej kalibracji reguł i parametrów. Trudności może niekiedy sprawiać konieczność przewidzenia przez projektanta szerokiego zakresu scenariuszy, obejmujących różne sytuacje występujące na skrzyżowaniu, w tym przypadki nietypowe. Ponadto formułowanie warunków logicznych bywa skomplikowane, np. gdy trzeba rozstrzygać konflikty przy jednoczesnych kilku zgłoszeniach priorytetu, zwłaszcza przy zastosowaniu reguł innych niż FIFO. Przypadki te nie stanowią jednak bariery zasadniczej ani przeciwwskazania do stosowania podejścia regułowego, co potwierdza jego dominujący charakter wdrożeniowy [32, 172].

Alternatywą dla podejścia regułowego jest sterowanie ruchem oparte na modelu optymalizacyjnym. Przebieg programu nie wynika w tym wypadku z wcześniej zdefiniowanego zestawu reguł, lecz stanowi rozwiązanie problemu optymalizacyjnego, zdefiniowanego poprzez funkcję celu oraz zestaw warunków brzegowych. Funkcja celu może być nastawiona m.in. na minimalizację opóźnień pojazdów PTZ (np. [24]), łącznej straty czasu indywidualnych podróży (np. [25, 30]) lub wiele innych czynników zależnych od założeń projektowych, stosowanych rozłącznie lub w kombinacji. Rolą warunków brzegowych jest zawężenie przestrzeni dopuszczalnych rozwiązań zadania optymalizacyjnego poprzez odrzucenie wariantów niezgodnych z ograniczeniami technicznymi i wymaganiami bezpieczeństwa (np. dopuszczalne zakresy długości faz i cyklu, czasy międzyzielone czy minimalne czasy zielonego dla relacji pieszych.). Priorytetyzacja PTZ dla tego typu sterowania jest zwykle realizowana poprzez nadanie większej wagi tym składnikom funkcji celu, które opisują straty po stronie transportu zbiorowego, niż składnikom odnoszącym się do pozostałych uczestników ruchu. W celu osiągnięcia wysokiej skuteczności, kolejne obliczenia powinny być realizowane na skutek zgłoszenia pojazdu PTZ, tak aby nie utracić możliwości przyznania priorytetu w odpowiednim momencie. Zaletą oparcia priorytetyzacji na optymalizacji jest możliwość uwzględnienia wielu kryteriów oraz ograniczeń sterowania naraz w ramach jednej, formalnie określonej procedury. Z drugiej strony większa złożoność obliczeniowa i zależność jakości decyzji od przyjętego modelu matematycznego oraz dostępności wiarygodnych danych wejściowych mogą ograniczać zakres ich zastosowania w sterowaniu w czasie rzeczywistym. Dodatkowo, w porównaniu z podejściem regułowym, interpretacja procesu decyzyjnego i ewentualna kalibracja algorytmu są bardziej skomplikowane. Z tych względów oraz przez stosunkowo wysoki koszt wdrożenia, rozwiązania oparte na optymalizacji częściej stanowią element rozbudowanych systemów sterowania ruchem, gdzie koordynacja decyzji na poziomie wielu skrzyżowań pozwala lepiej wykorzystać ich potencjał [32, 106].

Obecnie rozważa się również wykorzystanie metod uczenia maszynowego jako narzędzia wspomagającego decyzje sterownika w zakresie priorytetyzacji PTZ, np. w pracach [108, 166]. W podejściu tym algorytm, na podstawie danych pomiarowych lub wyników symulacji, uczy się zależności pomiędzy warunkami ruchu, np. czasem oczekiwania na obsługę, a działaniem sterownika. Istotą takiego rozwiązania jest zastąpienie każdorazowego rozwiązywania zadania optymalizacyjnego w czasie rzeczywistym modelem, który na podstawie rozpoznanego stanu ruchu wskazuje decyzję uznaną za najkorzystniejszą. Priorytetyzacja jest przy tym uwzględniana analogicznie jak w podejściu optymalizacyjnym, czyli poprzez odpowiednie określenie kryteriów oceny rozwiązania oraz tego, jakie działanie sterownika uznaje się za optymalne w danych warunkach. W przypadku uczenia nadzorowanego zależność ta jest wyznaczana poprzez minimalizację błędu względem danych referencyjnych, które mogą pochodzić z rozwiązań uzyskanych metodami optymalizacyjnymi lub z innych przyjętych punktów odniesienia dla oczekiwanego działania sterownika. Natomiast w ujęciu uczenia ze wzmocnieniem decyzje są kształtowane przez ocenę ich skutków w postaci kary i ewentualnej nagrody, wynikających z przyjętej funkcji oceny. Nagroda jest przypisywana decyzjom prowadzącym do poprawy obsługi publicznego transportu zbiorowego, np. skrócenia czasu oczekiwania na sygnał zezwalający, ograniczenia opóźnień lub zwiększenia skuteczności realizacji priorytetu, natomiast kara, decyzjom powodującym pogorszenie tych wskaźników albo nadmierne pogorszenie warunków ruchu pozostałych uczestników. W tym sensie priorytetyzacja nie stanowi odrębnej reguły wprowadzonej do algorytmu, lecz wynika ze sposobu zdefiniowania danych referencyjnych, funkcji celu albo funkcji kary i nagrody. Dzięki temu możliwe jest podejmowanie decyzji bez konieczności rozwiązywania zadania optymalizacyjnego przy każdej zmianie sytuacji ruchowej. Jednocześnie skuteczność takich metod pozostaje silnie zależna od jakości i reprezentatywności danych oraz od odporności rozwiązania na sytuacje nietypowe. Dodatkowym ograniczeniem, podobnie jak w przypadku podejścia optymalizacyjnego, bywa mniejsza przejrzystość mechanizmu podejmowania decyzji, co utrudnia weryfikację działania i ocenę niezawodności w warunkach odbiegających od typowych.

Ze względu na kryterium *zasięgu oddziaływania* wyróżnia się priorytety lokalne oraz obszarowe. Kryterium to opisuje, czy priorytet jest realizowany wyłącznie punktowo, w obrębie pojedynczego węzła, czy też obejmuje koordynację działań sterowania na większym obszarze. Priorytet lokalny jest realizowany niezależnie w obrębie pojedynczego skrzyżowania z poziomu lokalnego sterownika sygnalizacji tzn. bez koordynacji działań z sąsiednimi sygnalizacjami [32, 44, 145]. Najczęściej stosowany jest w przypadku izolowanych skrzyżowań stanowiących wąskie gardła sieci transportowej, gdzie straty czasu pojazdów transportu publicznego mają znaczny, ale punktowy charakter a także w miejscach o dużej zmienności ruchu.

Priorytet obszarowy obejmuje więcej niż jedno skrzyżowanie i zakłada powiązanie działań pomiędzy węzłami tak, aby poprawa warunków przejazdu PTZ była uzyskiwana w szerszej skali przestrzennej, a nie wyłącznie punktowo. Realizowany jest z wykorzystaniem scentralizowanego systemu sterowania ruchem, w którym decyzje nadania uprzywilejowania są podejmowane na poziomie nadrzędnym, na przykład przez centrum sterowania lub sterownik nadrzędny. W takim układzie sterowniki lokalne pełnią przede wszystkim funkcję wykonawczą. Rejestrują informacje o ruchu ogólnym i przejazdach pojazdów PTZ, przekazują je do sterownika nadrzędnego, skąd po przetworzeniu otrzymują polecenia zmian sygnałów dla poszczególnych relacji. W ramach priorytetu obszarowego wyróżnia się rozwiązania koordynowane wzdłuż pojedynczego ciągu komunikacyjnego (podejście korytarzowe) oraz rozwiązania odnoszące się do większego fragmentu układu ulicznego (podejście sieciowe) [32, 44, 145]. Zwykle priorytet

obszarowy stanowi element szerszego wdrożenia rozwiązań ITS (ang. *intelligent transport system*), co bezpośrednio wiąże się ze znacznie wyższymi kosztami inwestycyjnymi niż w przypadku punktowych realizacji.

Niezależnie od zastosowanej procedury, rodzaju sterowania czy zasięgu oddziaływania priorytetu, zakres modyfikacji programu sygnalizacji jest każdorazowo ograniczony warunkami bezpieczeństwa ruchu. W szczególności dotyczy to zapewnienia minimalnych czasów trwania sygnałów zielonych oraz zachowania wymaganych czasów międzyzielonych. Powodem wprowadzenia ograniczeń jest również chęć ograniczenia negatywnych skutków uprzywilejowania jednej grupy uczestników ruchu bądź uzyskania innych pożądaných efektów.

W literaturze przedmiotu, zarówno klasycznej, jak i najnowszej, m.in. w [8, 9, 15, 26, 42, 44, 111, 120, 142], ukształtował się szeroki konsensus, zgodnie z którym priorytetyzacja PTZ w ramach działania sygnalizacji świetlnej wiąże się z ryzykiem znacznego pogorszenia warunków ruchu po stronie transportu indywidualnego. Jak twierdzą ich autorzy, w skrajnych przypadkach może ona prowadzić do lokalnego wyczerpania przepustowości i wystąpienia tzw. paraliżu komunikacyjnego. Ryzyko to wzrasta zwłaszcza wtedy, gdy w danym miejscu jednocześnie obserwuje się wysokie natężenia ruchu ogólnego oraz PTZ.

Często elementem newralgicznym skrzyżowań jest organizacja ruchu uwzględniająca występowanie relacji kolizyjnych pomiędzy co najmniej dwoma liniami PTZ. Wówczas pojawia się konieczność rozstrzygnięcia, który pojazd PTZ powinien zostać obsługiwany w pierwszej kolejności, gdy zgłoszenia napływają do sterownika w krótkim odstępie czasu lub równocześnie. Przeważnie przyjmuje się zasadę FIFO, zgodnie z którą obsługa następuje według kolejności zgłoszeń. Nie zawsze rozwiązanie to jest najlepsze, szczególnie gdy ocena efektywności jest przeprowadzana wielokryterialnie. Poszczególne kursy PTZ mogą znacznie różnić się wartościami szeregu parametrów, których uwzględnienie przy ustalaniu kolejności obsługi może pozytywnie wpłynąć na efektywność funkcjonowania całego badanego układu transportowego. Pojawia się zatem potrzeba określenia *warunków udzielania priorytetu oraz doboru jego intensywności*.

Przedstawione w wielu opracowaniach wnioski (np. [32, 42, 44, 145]) wskazują potrzebę różnicowania sposobu obsługi żądań priorytetu w zależności od bieżącej sytuacji na skrzyżowaniu, charakterystyki danego zgłoszenia PTZ oraz lokalnych uwarunkowań. W tym kontekście istotne jest rozróżnienie priorytetu bezwarunkowego i warunkowego.

Priorytet bezwarunkowy zakłada, że samo zgłoszenie pojazdu PTZ stanowi wystarczającą przesłankę do uruchomienia wybranej procedury priorytetowej. W tym podejściu uprzywilejowanie jest realizowane bez dodatkowej selekcji i jest nastawione wyłącznie na zwiększenie prędkości komunikacyjnej PTZ. Z kolei koncepcja priorytetu warunkowego (nazywanego również priorytetem względnym) zakłada, że zgłoszenie może zostać obsługiwane priorytetowo wyłącznie wtedy, gdy spełnione zostaną dodatkowe warunki powiązane z parametrami kursu lub stanem ruchu. W rezultacie uprzywilejowanie może zostać uruchomione, odłożone w czasie lub pominięte, jeżeli jest to uzasadnione w danym momencie [32, 42, 125].

W części opracowań z pojęciem priorytetu warunkowego utożsamiana jest również idea poziomowania priorytetu, rozumiana jako kształtowanie skali ingerencji w program sygnalizacji po przyznaniu priorytetu [32, 42, 172]. Zakres interwencji może być wówczas ustalany statycznie albo dynamicznie.

W podejściu statycznym dla każdego przyjętego do obsługi zgłoszenia pojazdu PTZ przypisana jest taka sama lub porównywalna skala interwencji. Oznacza to, że wartości parametrów poszczególnych procedur priorytetu (takie jak maksymalny czas

wydłużenia sygnału zielonego lub maksymalny stopień skrócenia sygnału czerwonego) pozostają stałe, niezależnie od bieżącej sytuacji ruchowej oraz parametrów zgłoszenia. W podejściu dynamicznym wartości tych parametrów mogą być dobierane w czasie rzeczywistym na podstawie przyjętych warunków, co umożliwia wybór jednego spośród co najmniej kilku poziomów priorytetu, zależnie od bieżącej sytuacji ruchowej oraz cech zgłoszenia.

Podejmowanie decyzji o przyznaniu priorytetu i jego poziomie w zależności od wybranego zbioru kryteriów i reguł daje możliwość znalezienia kompromisu pomiędzy poprawą warunków ruchu PTZ a ograniczaniem strat na relacjach kolizyjnych, a także może stanowić narzędzie rozwiązania konfliktu kilku konkurencyjnych zgłoszeń PTZ w sposób inny niż FIFO.

O skuteczności priorytetu warunkowego, niezależnie od formy jego realizacji, w największym stopniu decyduje właściwy dobór kryteriów oraz kalibracja zasad podejmowania decyzji. Zbiór potencjalnych kryteriów jest bardzo szeroki, a sygnałnie można do niego zaliczyć m.in. informacje o:

- odchyleniu od rozkładu jazdy (opóźnienie, wyprzedzenie), gdzie priorytet uruchamiany może być np. tylko dla pojazdów opóźnionych albo może być poziomowany w funkcji wielkości odchylenia (np. [32, 125]);
- napełnieniu pojazdu, gdzie poziom priorytetu może być uzależniany od liczby pasażerów, tak aby np. silniejszą ingerencję stosować dla kursów o większym obciążeniu przewozowym (np. [7, 141]);
- typie pojazdu, linii, kierunku ruchu na skrzyżowaniu oraz rodzaju relacji, gdzie priorytet może być różnicowany pomiędzy kategoriami PTZ, liniami lub relacjami, na przykład poprzez preferowanie przejazdów na wprost względem manewrów skrętnych lub poprzez nadanie wyższego priorytetu tramwajom niż autobusom (np. [111, 188]);
- liczbie jednoczesnych zgłoszeń, gdzie zasady przyznawania lub poziomowania priorytetu mogą uwzględniać współwystępowanie wielu żądań, w tym wybór takiej fazy lub wariantu interwencji, który umożliwia obsługę większej liczby zgłoszeń w tym samym cyklu [14, 104];
- natężeniu ruchu transportu indywidualnego, gdzie priorytet może być ograniczany w warunkach wysokiego obciążenia ruchem albo modyfikowany w celu redukcji strat na relacjach kolizyjnych (np. [101, 185]);
- wpływie na koordynację, gdzie decyzja o przyznaniu priorytetu lub jego poziomie może uwzględniać konsekwencje dla jakości koordynacji międzywęzłowej, w tym dla utrzymania parametrów programu koordynacyjnego (np. [22, 183]);

Wybór jednego lub kilku z wymienionych, a także innych kryteriów zależy od zamierzonego celu sterowania oraz możliwości technicznych pozyskiwania, przetwarzania i przekazywania danych z systemu detekcji do sterownika. Ze względu na przedmiot niniejszej rozprawy dalsze rozważania skoncentrowano przede wszystkim na dwóch pierwszych spośród wymienionych kryteriów, tj. odchyleniu kursu od harmonogramu oraz napełnieniu pojazdu PTZ.

Jedną z kluczowych cech atrakcyjnego i konkurencyjnego transportu publicznego jest jego punktualność względem rozkładu jazdy lub regularność, tj. równe odstępy między kolejnymi kursami, jeśli w ten sposób PTZ funkcjonuje w danym miejscu. Z tego względu odchylenie od harmonogramu należy do najwcześniej wykorzystywanych i jednocześnie najczęściej spotykanych kryteriów warunkujących zastosowanie priorytetu oraz dobór jego poziomu [32, 42, 125, 145]. Uzależnienie decyzji od tego parametru sprzyja poprawie regularności i punktualności kursowania PTZ, jednak ma również swoje ograniczenia, które należy uwzględnić przy projektowaniu systemu priorytetów. Jeżeli priorytet przyznaje się wyłącznie pojazdom opóźnionym, wówczas część

potencjału tego działania pozostaje niewykorzystana, ponieważ pojazdy kursujące zgodnie z planem nie odnoszą korzyści, a poprawa jakości obsługi może być relatywnie niewielka w skali całej linii lub sieci [116]. Można rozważyć hipotetyczny przypadek sieci, w której pojazdy PTZ regularnie tracą czas na tych samych odcinkach. Takie powtarzalne straty czasu konsekwentnie prowadzą do opóźnień względem harmonogramu. Jeżeli za główne kryterium jakości PTZ uzna się wówczas tylko punktualność, najbardziej efektywnym działaniem może być wydłużenie rozkładowych czasów przejazdu pomiędzy przystankami zamiast wprowadzania strategii inwazyjnego priorytetu. W takim ujęciu wdrażanie inwazyjnej strategii priorytetu sygnalizacyjnego traci część uzasadnienia. Taki zabieg poprawia wskaźniki punktualności, jednak nie oznacza pełnej poprawy jakości usługi w sensie odczuwanym przez pasażerów. W rzeczywistości, dla użytkowników PTZ punktualność jest warunkiem istotnym, lecz nie jedynym, ponieważ równie ważny jest czas samej podróży. Z perspektywy zarządców i organizatorów transportu ważne jest również zapewnienie możliwie dużej liczby podróży realizowanych sprawnie i szybko, przy racjonalnym wykorzystaniu zasobów i przepustowości sieci. W konsekwencji wybrana strategia priorytetu nie powinna ograniczać się wyłącznie do miar punktualności, lecz powinna uwzględniać również inne miary efektywności przejazdu.

Stosunkowo nowym i nadal intensywnie rozwijanym kierunkiem jest podejście, w którym kryterium sterującym priorytetem jest napełnienie pojazdu PTZ, rozumiane jako liczba przewożonych pasażerów. Uwzględnienie tego parametru pozwala wprost odnieść sterowanie sygnalizacją do celu, jakim jest ograniczanie strat czasu ponoszonych przez ludzi, a nie wyłącznie przez pojazdy. W konsekwencji może to prowadzić do wniosku, że w określonych sytuacjach bardziej efektywne, z perspektywy ogółu uczestników ruchu, jest nie przyznawać priorytetu lub przyznać go w mniejszym zakresie pojazdowi o niskim napełnieniu, na przykład pojazdowi kończącemu trasę, a w pierwszej kolejności obsłużyć pojazd o większej liczbie pasażerów. Choć w literaturze można znaleźć opracowania dotyczące tego zagadnienia, stanowią one niewielki odsetek w porównaniu z badaniami, w których priorytet uzależnia się od innych kryteriów, głównie wspomnianej wcześniej punktualności. W niektórych publikacjach aspekt napełnienia pojazdów PTZ traktowany jest jedynie pomocniczo, w innych odnosi się do wszystkich pojazdów, także samochodów osobowych, co z technicznego punktu widzenia jest dość trudne, a wręcz niemożliwe do praktycznej realizacji, gdyż wymagałoby pozyskiwania w czasie rzeczywistym danych o napełnieniu setek a czasem tysięcy pojazdów na godzinę. Dodatkowym ograniczeniem mogłyby być również kwestie związane z ochroną prywatności, zwłaszcza gdyby dane o liczbie osób w pojazdach były pozyskiwane lub szacowane na podstawie informacji umożliwiających identyfikację użytkowników, pojazdów albo przebiegu ich podróży. Abstrahując jednak od ograniczeń technologicznych i formalnych, przy bardzo dużej liczbie podróży realizowanych pojazdami TI, znaczenie PTZ mogłoby ulec marginalizacji. Warto zauważyć w tym kontekście, że część badań opiera się ponadto na założonych, nierzeczywistych wartościach napełnienia wynikających z pojemności pojazdu, a nie z rzeczywistych danych pomiarowych (np. w [80]).

W roku 2011 Christofa i Skabardonis w pracy [26] przedstawili procedurę sterowania sygnalizacją, w której kryterium optymalizacji stanowi minimalizacja łącznego opóźnienia osób, przy jednoczesnym nadawaniu priorytetu pojazdom PTZ zależnie od napełnienia. Autorzy przetestowali symulacyjnie rozwiązanie dla skrzyżowania w Atenach, natomiast ze względu na brak rzeczywistych danych czasy przyjazdu pojazdów oraz ich napełnienia były modelowane w różnych scenariuszach. Uwzględniono m.in. scenariusze średnich napełnień na poziomie 20, 30 oraz 40 pasażerów. Efektem prac było ograniczenie opóźnień pasażerów transportu publicznego oraz ograniczenie opóźnienia osób

ogółem, co autorzy interpretowali jako przesunięcie decyzji sterowania w stronę kryterium korzystniejszego społecznie.

Efimenko i in. [37] zaproponowali algorytm przyznawania priorytetu na skrzyżowaniu, w którym decyzja opiera się na bilansie strat i zysków czasu wszystkich uczestników ruchu, przy czym w proces decyzyjny włączono informację o napełnieniu pojazdu. W warstwie koncepcyjnej autorzy zakładali pozyskiwanie danych o liczbie pasażerów z pokładowego systemu zliczania oraz ich przesyłanie online do systemu dyspozytorskiego. W testach symulacyjnych przyjęto jednak tylko zakresowe poziomy napełnienia, dzieląc pojazdy na klasy od 0 do 40 pasażerów, od 40 do 80 pasażerów oraz od 80 do 110 pasażerów. W rezultatach wykazano, że w badanych warunkach napełnienie pojazdów wpływa na efektywność priorytetu. W części przypadków wykazano, że przy niskim napełnieniu pojazdów PTZ obserwowany jest bardzo mały zysk, lub straty czasu, co jak twierdzą autorzy może uzasadniać warunkowanie priorytetu liczbą pasażerów.

De Keyser i współautorzy [30] ocenili kilka strategii sterowania sygnalizacją w mikrosymulacji, pokazując, że przyznawanie wysokiego priorytetu pojazdom transportu publicznego może pogarszać warunki ruchu ogółem, jeżeli analizuje się je wyłącznie w ujęciu pojazdowym. Kluczowym elementem ich podejścia było przejście na ujęcie zależne od poszczególnych podróży, w którym opóźnienia waży się liczbą osób w pojazdach. Przy czym w ich badaniach nie uwzględniono liczby pasażerów w formie zmiennej czasu rzeczywistego, przyjmując jedynie wartości średnie. Zakładając, że samochodem podróżuje ok. 1,84 osób, autorzy zaproponowali wyznaczanie progu minimalnej liczby pasażerów w pojeździe PTZ, która uzasadniałaby wyższy poziom priorytetu. W jednym z analizowanych przypadków progowa wartość dla tramwaju osiągnęła poziom około 135 pasażerów, co autorzy uznali za nierealistyczne w odniesieniu do pojemności pojazdu, a w konsekwencji wskazali zasadność ograniczenia priorytetu w takich warunkach.

Warto podkreślić, że problematyka uwzględniania napełnienia w priorytetyzacji transportu publicznego pojawia się również w polskich opracowaniach, w tym w pracach rozwijających podejście oparte na kryteriach kosztowych i społecznych. Aleksandrowicz i Strózek [7] zaproponowali funkcję wyznaczania decyzji o przyznaniu priorytetu w programach sygnalizacji świetlnej, w której uwzględnia się aktualną liczbę pasażerów w pojeździe oraz koszty społeczne transportu. Autorzy w założeniach metodycznych uznają, że napełnienie ma charakter informacji bieżącej i powinno pochodzić z automatycznego systemu zliczania pasażerów oraz powinno być dostępne w czasie rzeczywistym dla sterownika. Praca zawiera jedynie opis założeń metodycznych bez weryfikacji, którą jednak autorzy zapowiadają jako zadanie dla przyszłych badań.

W roku 2022 autor rozprawy opublikował wyniki pilotażowych badań poświęconych opracowaniu metody priorytetu zależnego od napełnienia środków transportu [172], które stanowiły wstęp do badań właściwych realizowanych w ramach niniejszej pracy doktorskiej. W zaproponowanym podejściu napełnienie pojazdów uznano za główną zmienną sterującą poziomem priorytetu dla ruchu tramwajowego. Przy czym wartość napełnienia każdego pojazdu określono stosując wartości losowe. Weryfikację efektywności przyjętych założeń przeprowadzono w środowisku symulacyjnym, analizując opóźnienia w ujęciu pasażerskim na obszarze izolowanego przejazdu tramwajowego. Uzyskane wyniki wskazały około dwuprocentową redukcję opóźnień w przeliczeniu na podróżnego w wariancie wykorzystującym napełnienie, w porównaniu z najlepszym wariantem nieuwzględniającym tego parametru. Na etapie eksperymentów symulacyjnych przeanalizowano kilkaset wariantów nastaw algorytmu co odróżnia to badanie od wcześniejszych prac, w których badanie wrażliwości nastaw parametrów sterujących

realizowane było na zdecydowanie mniejszą skalę. Między innymi z tych względów przyczyniło się to do podjęcia pogłębionych badań w ramach niniejszej rozprawy.

Pomimo tego, że przytoczone prace wskazują potencjał napełnienia jako istotnego czynnika sterowania ruchem, jego zastosowanie wiąże się z pewnymi problemami wdrożeniowymi oraz z krytyką koncepcyjną. Po pierwsze, wykorzystanie informacji o napełnieniu w sterowaniu czasem rzeczywistego wymaga pozyskiwania danych o liczbie pasażerów oraz ich niezawodnej transmisji do systemów zarządzania ruchem i sterowników sygnalizacji. W praktyce oznacza to konieczność stosowania pokładowych systemów zliczania pasażerów i odpowiedniej integracji teleinformatycznej. Niestety, obecnie jakość danych otrzymywanych z automatycznych systemów zliczania bywa ograniczona i wymaga walidacji oraz utrzymania. Aleksandrowicz i Stróžek [7] zwracają uwagę, że deklaracje producentów bramek zliczających są zróżnicowane, a w pomiarach weryfikujących pracę takich systemów uzyskuje się zgodność danych na poziomie około 60 procent dla liczby wsiadających i wysiadających. W konsekwencji, wdrożenia priorytetów opartych na informacji o napełnieniu powinny przewidywać procedury testowania, kalibracji oraz ciągłego monitorowania jakości danych.

Po drugie, w literaturze znaleźć można stanowiska krytyczne względem koncepcji użycia parametru napełnienia pojazdów PTZ jako jedyne kryterium decyzyjnego. Jak wskazywano wcześniej, Molecki [116] w swoim artykule podkreśla, że liczba pasażerów w pojeździe nie musi odzwierciedlać faktycznych potrzeb przewozowych, ponieważ pojazd o wyższym napełnieniu może kończyć kurs, natomiast pojazd o niższym napełnieniu może rozpocząć trasę, na której w kolejnych punktach oczekuje wielu pasażerów, a informacja o tych oczekujących nie jest bezpośrednio dostępna dla pojazdu. Oznacza to, że decyzje oparte wyłącznie na aktualnym napełnieniu mogą prowadzić do wyborów suboptymalnych z perspektywy systemu i odczuwanej jakości obsługi.

Jak wynika z literatury, informacja o napełnieniu pojazdu PTZ stanowi wartościowe źródło informacji o skali zapotrzebowania na przewozy i może odgrywać istotną rolę w procesie podejmowania decyzji o nadaniu priorytetu. Jednocześnie należy zauważyć, że traktowanie tego parametru jako jedynej przesłanki decyzyjnej niesie za sobą ryzyko. Dlatego zasadne wydaje się uwzględnianie napełnienia jako jednego z kilku równoważnych czynników wspierających decyzje, obok np. opóźnienia względem rozkładu jazdy, czasu oczekiwania na obsługę czy liczby aktualnych zgłoszeń. Włączenie tych przesłanek do modelu decyzyjnego pozwala lepiej odzwierciedlić realne potrzeby operacyjne transportu zbiorowego.

Podsumowując aspekt warunkowości priorytetu, warto zauważyć, że koncepcja ta, choć szeroko opisywana i rozwijana w literaturze międzynarodowej, w polskich warunkach pozostaje znacznie mniej rozpowszechniona. Dotyczy to zwłaszcza podejścia zakładającego możliwość odmowy nadania priorytetu w sytuacjach, gdy spełnione są określone przesłanki negatywne. W ujęciu szerszym obecnym w badaniach zagranicznych warunkowość nie sprowadza się jednak wyłącznie do decyzji o przyznaniu lub odmowie uprzywilejowania. Kluczową rolę odgrywa tu możliwość elastycznego skalowania poziomu ingerencji w program sygnalizacji w zależności od aktualnych warunków ruchowych oraz cech konkretnego pojazdu transportu zbiorowego. W literaturze coraz częściej akcentuje się, że priorytet powinien być traktowany jako element standardowego działania systemu, natomiast jego intensywność powinna być dobierana kontekstowo. Takie podejście tworzy podstawy do projektowania strategii dynamicznych, które wspierają funkcjonowanie transportu zbiorowego w sposób zrównoważony i proporcjonalny względem innych uczestników ruchu.

Przedstawiona klasyfikacja metod i technik priorytetyzacji PTZ w ramach działania sygnalizacji świetlnej koncentruje się w głównej mierze na metodycznych

i technicznych aspektach realizacji uprzywilejowania. Niezależnie jednak od sposobu działania priorytetu, w literaturze [44, 121, 136, 151] funkcjonuje także podejście zorientowane na ocenę skutków wdrożenia priorytetu. W takim ujęciu analizie poddaje się jakość przejazdu pojazdów PTZ przez skrzyżowanie, wyrażoną najczęściej jako poziom średnich strat czasu.

W praktyce wyróżnia się cztery główne poziomy efektywności priorytetu: pełny, wysoki, niski i ujemny. Priorytet pełny gwarantuje taki poziom uprzywilejowania, przy którym średnie straty czasu pojazdów PTZ są bliskie zeru. Przejazd przez skrzyżowanie odbywa się zwykle bez zatrzymania czy hamowania spowodowanego stanem wyświetlanych sygnałów, choć sporadyczne zatrzymania mogą wystąpić, np. z powodu wcześniejszej obsługi innego pojazdu PTZ na relacji kolizyjnej. Priorytet wysoki dopuszcza niewielkie średnie straty czasu, nieprzekraczające z reguły kilkunastu sekund. Zatrzymania pojazdów PTZ mogą się zdarzać częściej niż w przypadku priorytetu pełnego i wynikają zwykle z konieczności zachowania obsługi relacji kolizyjnych. W przypadku priorytetu niskiego zakres uprzywilejowania wciąż jest zauważalny jednak w dużo mniejszej skali, gdyż średnie straty czasu pojazdów PTZ są wyraźnie wyższe niż w przypadku wcześniej wymienionych poziomów.

Jeżeli obserwowane wartości opóźnień są większe niż w referencyjnym programie stałoczasowym, mówi się o priorytecie ujemnym. Jego występowanie może wynikać raczej z błędu projektowego niż umyślnego zamierzenia projektanta i może być skutkiem np. zaprojektowania punktu wykrywania pojazdu PTZ zbyt blisko linii zatrzymania. Warto również zauważyć, że efektywność różnego rodzaju strategii sterowania nie jest gwarantowana i w dużej mierze zależy od odpowiedniej kalibracji względem miejscowych uwarunkowań, stąd brak efektu uprzywilejowania PTZ może wynikać z niekorzystnego doboru wartości zmiennych sterujących.

Warto zaznaczyć, że nie zawsze możliwe jest zapewnienie pełnego lub wysokiego poziomu priorytetu. Dotyczy to szczególnie skrzyżowań o złożonej strukturze, gdzie występują liczne relacje kolizyjne, zachodzące nie tylko pomiędzy transportem zbiorowym a ruchem indywidualnym, ale również pomiędzy pojazdami różnych linii PTZ. Uwzględnienie tego rodzaju ograniczeń projektowych i operacyjnych jest jednym z założeń przyjętych w niniejszej rozprawie.

Przedstawiona w niniejszym podrozdziale klasyfikacja metod priorytetyzacji w sygnalizacji świetlnej została wykorzystana jako podstawa do oceny i uporządkowania współczesnych rozwiązań opisywanych w literaturze. Stanowi ona ramy analizy kilkudziesięciu publikacji naukowych z ostatnich lat, której wyniki zaprezentowano w kolejnym podrozdziale.

2.1.3. Przegląd literatury dotyczący priorytetyzacji PTZ w sygnalizacji świetlnej

Zagadnienie nadawania priorytetu pojazdom PTZ w sygnalizacji świetlnej pozostaje istotnym obszarem badań w dziedzinie organizacji i zarządzania ruchem miejskim. O rosnącym zainteresowaniu tym zagadnieniem świadczy systematyczny wzrost liczby publikacji indeksowanych w bazie Scopus [78], będącej jedną z największych i najczęściej wykorzystywanych multidyscyplinarnych baz danych zawierających publikacje naukowe z całego świata. Kwerendę przeprowadzono w dniu 10.10.2025 z wykorzystaniem zapytania przedstawionego poniżej (patrz Listing 1).

Jak wynika z danych przedstawionych na Rys. 12, największy przyrost liczby publikacji w tym temacie nastąpił w drugiej dekadzie XXI wieku i wciąż utrzymuje się na wysokim poziomie. W związku z aktualnością i rosnącą popularnością zagadnienia wykonano przegląd literatury ukierunkowany na identyfikację dominujących kierunków

najnowszych badań. Analizę oparto na zbiorze 53 artykułów ($N = 53$) opublikowanych w latach 2018–2025. Zestaw publikacji objętych analizą stanowią następujące pozycje bibliograficzne: [1-3, 5, 7-9, 14-15, 22, 28-29, 31, 37, 49, 53-56, 80, 84-85, 88, 96, 99, 101-104, 107-109, 111, 120, 130, 141-143, 149-150, 158, 166-167, 172, 174-175, 182-188].

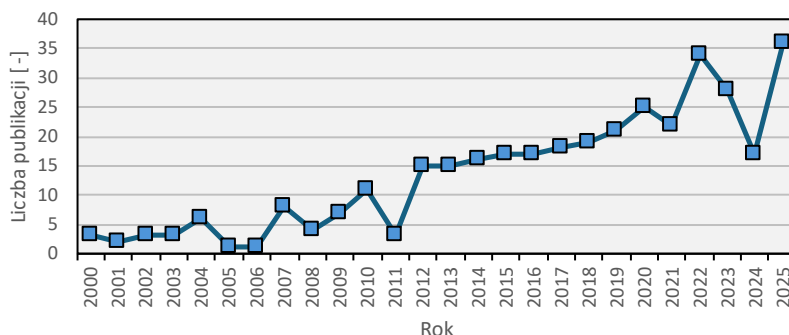
```

1. (TITLE("bus" OR "tram" OR "public tra*")
2.   AND TITLE("priority" OR "prioritization"))
3. OR (AUTHKEY("bus" OR "tram" OR "public tra*")
4.   AND AUTHKEY("priority" OR "prioritization"))
5. AND PUBYEAR > 1999
6. AND PUBYEAR < 2026
7. AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, "ar"))
8. AND (LIMIT-TO(SUBJAREA, "ENGI")
9.   OR LIMIT-TO(SUBJAREA, "SOCI")
10.  OR LIMIT-TO(SUBJAREA, "COMP")
11.  OR LIMIT-TO(SUBJAREA, "ENVI")
12.  OR LIMIT-TO(SUBJAREA, "MATH")
13.  OR LIMIT-TO(SUBJAREA, "DECI")
14.  OR LIMIT-TO(SUBJAREA, "ENER"))
15. AND (LIMIT-TO(LANGUAGE, "English"))

```

Listing 1. Zapytanie zastosowane w bazie Scopus. Źródło: Opr. własne

W ramach przeglądu przeanalizowano treść pełnych tekstów artykułów, wyodrębniając z nich kluczowe elementy opisu rozwiązań z zakresu priorytetu PTZ, odnoszące się między innymi do ich cech, sposobów implementacji oraz metod oceny ich skuteczności.



Rys. 12. Liczba artykułów dotyczących priorytetyzacji PTZ w ramach działania sygnalizacji świetlnej, na przestrzeni lat 2000-2025 (stan wg 28.05.2026). Źródło: Opr. własne na bazie [78]

W celu uporządkowania i ujednolicenia materiału opracowano zestaw 18 pytań badawczych, pogrupowanych w cztery bloki tematyczne, w tym dotyczących: identyfikacji podstawowych cech metod priorytetyzacji PTZ, ustalania priorytetu warunkowego, wykorzystania analiz symulacyjnych w procesie badawczym, oraz sposobu oceny badanych rozwiązań i podstaw formułowania wniosków o ich efektywności. Przyjęty schemat posłużył do zakodowania treści poszczególnych publikacji oraz uporządkowania ich pod kątem elementów istotnych dla dalszej syntezy, w tym identyfikacji podobieństw, różnic i dominujących tendencji w analizowanym zbiorze. Szczegółowe zestawienie wyników kodowania poszczególnych publikacji zamieszczono w *Załączniku nr 1*.

Syntetyczne wyniki analizy przedstawiono w tabelach Tab. 2 – Tab. 19, odpowiadających poszczególnym pytaniom badawczym. W tabelach zestawiono odpowiedzi występujące w analizowanych publikacjach, liczbę publikacji, w których dana odpowiedź została odnotowana (n), jej udział w badanym zbiorze ($\% N$) oraz odpowiadające jej pozycje bibliograficzne.

W przypadku pytań dopuszczających występowanie kilku odpowiedzi w jednej publikacji zastosowano kodowanie wielokrotne. Dotyczy to pytań 6, 10, 11 i 17, których wyniki przedstawiono odpowiednio w Tab. 7, Tab. 11, Tab. 12 i Tab. 18. Oznacza to, że jedna publikacja mogła zostać przypisana do więcej niż jednej kategorii, dlatego sumy liczebności oraz odpowiadających im udziałów w tabelach mogą przekraczać odpowiednio N oraz 100 %.

Pytania wchodzące w skład pierwszego z czterech bloków tematycznych służą do *identyfikacji podstawowych cech metod priorytetyzacji PTZ*. Dotyczą informacji o rodzaju pojazdów PTZ obsługiwanych w ramach priorytetu (Tab. 2), rodzaju i zasięgu oddziaływania priorytetu (Tab. 3 i Tab. 4), założeniach infrastrukturalnych (Tab. 5), dominującym sposobie sterowania (Tab. 6), stosowanych procedurach modyfikacji programu sygnalizacji (Tab. 7) oraz o uwzględnieniu w badaniach możliwości wystąpienia konfliktów zgłoszeń (Tab. 8).

Analizę rozpoczęto od rozpoznania rodzaju pojazdów PTZ objętych priorytetem (por. Tab. 2). W badanej próbie wyraźnie dominuje podejście skoncentrowane na transporcie autobusowym. Kategoria ta obejmuje 39 artykułów, co stanowi 73,6 % całego zbioru. Znacznie rzadziej analizowano ruch tramwajowy (7 artykułów; 13,2 %) oraz rozwiązania obejmujące oba wspomniane środki transportu (3 artykuły; 5,6 %). Pozostałe przypadki miały charakter incydentalny i dotyczyły pojedynczych publikacji poświęconych autobusom i trolejbusom, autonomicznym pojazdom PTZ lub pracom, w których rodzaju pojazdu nie określono jednoznacznie. Oznacza to, że dominujący w literaturze obraz priorytetu PTZ odnosi się przede wszystkim do transportu autobusowego, podczas gdy inne środki transportu pozostają reprezentowane zdecydowanie słabiej.

Tab. 2. Rodzaj pojazdów PTZ objętych priorytetem (Pyt. 1). Źródło: Opr. własne

Rodzaj	Pozycje w bibliografii	n	% N
Autobus	[1, 2, 3, 5, 8, 9, 14, 15, 31, 37, 49, 54, 55, 80, 96, 99, 101, 102, 103, 104, 107, 108, 109, 111, 120, 130, 141, 142, 143, 149, 150, 158, 166, 174, 175, 182, 183, 185, 186]	39	73,6 %
Tramwaj	[29, 53, 56, 84, 167, 172, 184]	7	13,2 %
Tramwaj, autobus	[22, 28, 188]	3	5,6 %
Autobus, trolejbus	[85]	1	1,9 %
Autonomiczne pojazdy PTZ	[88, 187]	2	3,8 %
Nie określono	[7]	1	1,9 %

Pod względem rodzaju priorytetu literatura jest jeszcze bardziej jednorodna (por. Tab. 3). Zdecydowanie przeważają rozwiązania oparte na priorytecie aktywnym (46 publikacji; 86,8 %), podczas gdy priorytet pasywny występuje jedynie w 5 artykułach (9,4 %). Oznacza to, że analizowane badania koncentrują się przede wszystkim na priorytecie realizowanym w sposób dynamiczny. Wyróżnić można również publikacje w których autorzy wyraźnie rozdzielili dwie warstwy działania: warstwę pasywną, związaną z bazową organizacją i koordynacją sygnalizacji, oraz warstwę aktywną, odpowiadającą za

bieżące dostosowanie sterowania do aktualnej sytuacji ruchowej. Takie podejście łączące oba rodzaje priorytetu zidentyfikowano tylko w 2 przypadkach (3,8 %).

Tab. 3. Rodzaj priorytetu PTZ w proponowanych rozwiązaniach (Pyt. 2). Źródło: Opr. własne

Rodzaj	Pozycje w bibliografii	n	% N
Aktywny	[1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 14, 15, 22, 28, 29, 31, 37, 49, 53, 54, 55, 56, 80, 85, 96, 99, 101, 102, 103, 104, 107, 108, 109, 111, 141, 142, 143, 158, 166, 167, 172, 174, 175, 182, 183, 185, 186, 187, 188]	46	86,8 %
Pasywny	[120, 130, 149, 150, 184]	5	9,4 %
Aktywny, pasywny	[84, 88]	2	3,8 %

Kolejnym analizowanym aspektem jest założony zasięg funkcjonowania priorytetu, rozumiany jako skala, na której podejmowane są decyzje o przyznaniu priorytetu przy pomocy sygnalizacji (por. Tab. 4). Chodzi więc o ustalenie czy mechanizm decyzyjny działa na poziomie pojedynczego skrzyżowania, czy też obejmuje koordynację wzdłuż ciągu komunikacyjnego albo w skali szerszej sieci. W tym ujęciu wyraźnie dominują rozwiązania o zasięgu lokalnym. Do tej kategorii zalicza się 39 artykułów, czyli aż 73,6 % przyjętej próby. Priorytet obszarowy w ujęciu korytarzowym występuje w 10 publikacjach (18,9 %), natomiast działanie priorytetu obszarowego o charakterze regionalnym analizowane jest jedynie w 2 przypadkach (3,8 %).

Spośród analizowanych artykułów w dwóch przypadkach zidentyfikowano podejście o charakterze mieszanym. W [187] system zdecentralizowanego sterowania lokalnego rozszerzono wprowadzając ograniczoną komunikację między skrzyżowaniami, natomiast w [102] lokalny charakter sterowania uzupełniono o uwzględnianie sygnałów z innych skrzyżowań oraz ocenę skutków interwencji na skrzyżowaniach sąsiednich.

Tab. 4. Zasięg oddziaływania priorytetu (Pyt. 3). Źródło: Opr. własne

Zasięg	Pozycje w bibliografii	n	% N
Lokalny	[1, 2, 5, 7, 9, 14, 15, 22, 28, 29, 31, 37, 49, 53, 54, 55, 56, 80, 85, 99, 103, 104, 107, 108, 109, 111, 141, 142, 143, 149, 150, 158, 166, 172, 174, 175, 183, 185, 188]	39	73,6 %
Obszarowy (korytarz)	[3, 84, 88, 96, 101, 120, 130, 167, 182, 184]	10	18,8 %
Obszarowy (sieć)	[8, 186]	2	3,8 %
Mieszany	[102, 187]	2	3,8 %

W ramach czwartego pytania kontrolnego skoncentrowano się na założeniach infrastrukturalnych badanych rozwiązań, w szczególności na tym, czy pojazdy PTZ poruszają się po pasach lub drogach wydzielonych od ruchu transportu indywidualnego, czy też współdzielą z nim trasę przejazdu (por. Tab. 5). Spośród wybranych publikacji najliczniejszą grupę stanowią prace, w których autorzy badań zakładają funkcjonowanie PTZ na infrastrukturze co najmniej częściowo wydzielonej od ruchu TI (25 artykułów; 47,2%). Mniej liczne są publikacje odnoszące się do sytuacji, w których pojazdy PTZ współdzielą trasę z ruchem indywidualnym i współtworzą z nim kolejki (17 artykułów; 32,1 %). W 11 przypadkach (20,8 %) autorzy badań nie podają informacji pozwalających jednoznacznie określić warunki infrastrukturalne analizowanego rozwiązania.

Warto dodać, że w części publikacji wydzielenie infrastruktury dla PTZ nie ma charakteru pełnego. W pracy [188] wydzielona infrastruktura przeznaczona jest jedynie dla tramwajów, natomiast autobusy funkcjonują bez takiego wydzielienia. W pracach [111] i [186] uprzywilejowanie infrastrukturalne ma charakter częściowy i wiąże się

z zastosowaniem śluz autobusowych. W [96] wydzielony pas autobusowy występuje jedynie w godzinach szczytu, co oznacza, że separacja ruchu PTZ od ruchu ogólnego ma charakter czasowy. Z kolei w [104] wydzielenie infrastruktury dotyczy tylko części pojazdów PTZ, tzn. autobusy BRT (ang. *Bus Rapid Transit*) poruszają się po wydzielonych pasach, natomiast autobusy regularne funkcjonują na pasach ogólnodostępnych.

Tab. 5. Wydzielenie dróg lub pasów ruchu dla PTZ od ruchu TI (Pyt. 4). Źródło: Opr. własne

Odpowiedź	Pozycje w bibliografii	n	% N
Tak	[3, 8, 14, 15, 28, 29, 31, 53, 84, 88, 96, 103, 104, 111, 120, 130, 142, 149, 150, 166, 167, 172, 175, 186, 188]	25	47,2 %
Nie	[1, 2, 5, 37, 49, 55, 80, 85, 99, 101, 141, 143, 158, 182, 183, 185, 187]	17	32,1 %
Nie określono	[7, 9, 22, 54, 56, 102, 107, 108, 109, 174, 184]	11	20,7 %

W pytaniu piątym skoncentrowano się na identyfikacji dominującego sposobu sterowania w kontekście priorytetyzacji (por. Tab. 6). Spośród analizowanych publikacji najliczniejszą grupę stanowią prace oparte na podejściu regułowym (30 artykułów; 56,6 %). Wyraźnie mniej liczne są publikacje wykorzystujące optymalizację realizowaną w czasie rzeczywistym, tzw. online (10 artykułów; 18,9 %) oraz metody oparte na uczeniu maszynowym (7 artykułów; 13,2 %). Osobną grupę tworzą prace wykorzystujące optymalizację bez sterowania w czasie rzeczywistym, tzw. offline (5 artykułów; 9,4 %). Są to artykuły, w których założono wykorzystanie priorytetu pasywnego. W jednym przypadku (1,9 %) nie podano wystarczających informacji pozwalających na jednoznaczne określenie dominującego sposobu sterowania. Pomimo wyraźnej dominacji rozwiązań wykorzystujących podejście regułowe, warto zaznaczyć, że w części publikacji zaklasyfikowanych do tej kategorii pomocniczo wykorzystywano optymalizację offline. Dotyczy to prac [8, 9, 28, 49, 55, 56, 84, 88, 96, 107], w których bieżące decyzje są podejmowane na podstawie zdefiniowanych wcześniej zasad, ale parametry sterowania lub struktura działania systemu zostały wcześniej przygotowane z użyciem procedur optymalizacyjnych.

Tab. 6. Dominujący rodzaj sterowania w kontekście priorytetu (Pyt. 5). Źródło: Opr. własne

Rodzaj	Pozycje w bibliografii	n	% N
Reguły	[1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 15, 22, 28, 29, 31, 37, 49, 54, 55, 56, 80, 84, 88, 96, 103, 104, 107, 109, 111, 141, 142, 167, 172]	30	56,6 %
Optymalizacja w trybie online	[14, 85, 102, 158, 174, 175, 182, 183, 185, 186]	10	18,9 %
Uczenie maszynowe	[53, 101, 108, 143, 166, 187, 188]	7	13,2 %
Optymalizacja w trybie offline	[120, 130, 149, 150, 184]	5	9,4 %
Brak informacji	[99]	1	1,9 %

W ramach pytania szóstego zidentyfikowano zbiór procedur najczęściej stosowanych do modyfikacji programu sygnalizacji (por. Tab. 7). Spośród analizowanych publikacji najczęściej wskazywane są najprostsze do wdrożenia procedury, tj. wydłużenie sygnału zielonego (ang. *green extension*), odnotowane w 33 artykułach (62,3 %), oraz skrócenie sygnału czerwonego (ang. *red truncation*), występujące w 28 pracach (52,8 %). Wyraźnie rzadziej pojawiają się rozwiązania bardziej skomplikowane, jak np. zmiana kolejności faz oraz dynamiczna zmiana długości cyklu lub faz (po 9 artykułów; 17,0 %), pomijanie faz (8 artykułów; 15,1 %), dodatkowa faza priorytetowa i kompensacja zielonego (po 6 artykułów; 11,3 %) czy dostosowanie offsetu (5 artykułów; 9,4 %). Sporadycznie występują także bardziej specyficzne rozwiązania, takie jak ponowne załączenie fazy w cyklu, zastosowanie przedsygnału oraz mechanizmy zaliczone do kategorii „inne”,

obejmujące m.in. ograniczanie zbyt częstego przełączania faz, czasową blokadę priorytetu czy limitowanie liczby kolejnych cykli z priorytetem. W 11 przypadkach (20,8 %) autorzy nie podają informacji pozwalających jednoznacznie określić, jakie procedury modyfikacji programu sygnalizacji wykorzystano.

Tab. 7. Procedury modyfikacji programu sygnalizacji świetlnej (Pyt. 6). Źródło: Opr. własne

Procedura	Pozycje w bibliografii	n	% N
Wydłużenie sygnału zielonego	[1, 2, 3, 8, 14, 15, 22, 28, 29, 31, 37, 49, 53, 55, 56, 80, 84, 88, 96, 101, 102, 103, 104, 141, 142, 143, 158, 167, 172, 174, 182, 185, 188]	33	62,3 %
Skrócenie sygnału czerwonego	[1, 2, 3, 8, 14, 15, 22, 28, 29, 31, 37, 49, 53, 55, 80, 96, 99, 101, 102, 103, 104, 141, 142, 158, 172, 174, 182, 185]	28	52,8 %
Pomijanie faz	[2, 5, 14, 29, 53, 85, 174, 188]	8	15,1 %
Zmiana kolejności faz	[5, 14, 29, 37, 53, 84, 85, 143, 188]	9	17,0 %
Dodatkowa faza priorytetowa	[2, 14, 22, 29, 172, 174]	6	11,3 %
Kompensacja sygnału zielonego	[14, 22, 49, 96, 99, 102]	6	11,3 %
Dostosowanie wartości offsetów	[8, 84, 88, 96, 182]	5	9,4 %
Zastosowanie służy (przedsygnалу)	[111, 186]	2	3,8 %
Ponowne załączenie fazy w cyklu	[8, 29, 53]	3	5,7 %
Dynamiczna zmiana długości cyklu/długości faz	[5, 8, 143, 166, 175, 182, 183, 186, 187]	9	17,0 %
Inne	[22, 28, 188]	3	5,7 %
Brak informacji lub nie dotyczy	[7, 9, 54, 107, 108, 109, 120, 130, 149, 150, 184]	11	20,8 %

W ostatnim pytaniu pierwszego bloku tematycznego przeanalizowano, w ilu pracach uwzględniono sytuacje kolizyjnych zgłoszeń pojazdów PTZ, a więc przypadki, w których o priorytet ubiega się jednocześnie więcej niż jeden pojazd (por. Tab. 8). Uzyskany rozkład wskazuje, że aspekt ten pozostaje w analizowanej literaturze zagadnieniem relatywnie rzadko podejmowanym w sposób szczegółowy. W większości publikacji nie odnoszono się do tego zagadnienia wprost (37 artykułów; 69,8 %). W 13 przypadkach (24,5 %) autorzy nie tylko uwzględniali występowanie takich konfliktów, lecz także podawali sposób ustalania pierwszeństwa, natomiast w 3 artykułach (5,7 %) sam fakt występowania kolizyjnych zgłoszeń został odnotowany, ale bez dokładniejszego opisu mechanizmu ich rozstrzygania.

Tab. 8. Rozstrzyganie kolizyjnych zgłoszeń PTZ (Pyt. 7). Źródło: Opr. własne

Odpowiedź	Pozycje w bibliografii	n	% N
Tak (podano szczegóły)	[5, 9, 14, 22, 49, 53, 80, 85, 141, 143, 158, 182, 188]	13	24,5%
Tak (brak szczegółów)	[28, 166, 183]	3	5,7%
Nie	[1, 2, 3, 7, 8, 15, 29, 31, 37, 54, 55, 56, 84, 88, 96, 99, 101, 102, 103, 104, 107, 108, 109, 111, 120, 130, 142, 149, 150, 167, 172, 174, 175, 184, 185, 186, 187]	37	69,8%

W publikacjach, w których podano szczegóły, ustalanie pierwszeństwa opiera się najczęściej na kryteriach optymalizacyjnych, takich jak minimalizacja opóźnień lub uwzględnienie bieżącej sytuacji ruchowej [14, 49, 53, 80, 143, 158, 182, 188]. Rzadziej stosowane są podejścia wykorzystujące rankingi lub wskaźniki priorytetu [5, 22, 141]

oraz proste reguły kolejności obsługi, takie jak FIFO [9]. W [85] o przyznaniu pierwszeństwa decyduje natomiast przewidywana długość kolejki.

Drugi blok pytań badawczych (pytania 8–11) dotyczy *zagadnienia priorytetu warunkowego*. Odnosi się on zarówno do kwestii tego, czy decyzja o przyznaniu priorytetu zależy od spełnienia określonych warunków (Tab. 9, Tab. 11), jak i do tego, czy warunkowy charakter ma sam poziom przyznawanego uprzywilejowania (Tab. 10, Tab. 12). W pytaniach 8 i 9 przyjęto sześciostopniową skalę odpowiedzi, która uwzględnia stopień pewności interpretacji. Wynika to z faktu, że autorzy analizowanych publikacji nie zawsze odnoszą się do warunkowości w sposób bezpośredni i precyzyjny. W części prac można ją potwierdzić jednoznacznie, w innych wynika ona jedynie z opisu mechanizmu działania systemu. Zdarzają się również publikacje, w których brakuje podstaw do rozstrzygnięcia tej kwestii. Pytania 10 i 11 mają charakter uzupełniający względem pytań 8 i 9, ponieważ nie dotyczą już samego stwierdzenia, czy dana forma warunkowości występuje, lecz wskazania czynników, które ją kształtują.

Wyniki otrzymane dla pytania ósmego wskazują (por. Tab. 9), że w blisko połowie analizowanych prac można zidentyfikować zastosowanie priorytetu warunkowego (47,2 %). Jednocześnie tylko w części publikacji (17,0 %) zostało to wyraźnie zaznaczone w tekście, podczas gdy w wielu przypadkach (30,2 %) warunkowość wynika raczej z opisu mechanizmu działania systemu niż z jednoznacznej deklaracji autorów. W pozostałych pracach warunkowości nie stwierdzono (43,4 %), albo brakowało podstaw pozwalających na rozstrzygnięcie tej kwestii (9,4 %).

Tab. 9. Warunkowość przyznania priorytetu (Pyt. 8). Źródło: Opr. własne

Odpowiedź	Pozycje w bibliografii	n	% N
Tak, potwierdzono wprost w treści	[7, 9, 37, 80, 107, 108, 109, 158, 183]	9	17,0 %
Raczej tak, logicznie wynika z treści	[5, 8, 22, 28, 49, 56, 84, 88, 141, 182, 185, 186]	12	22,6 %
Przypuszczalnie	[102, 103, 166, 188]	4	7,6 %
Brak precyzyjnej odpowiedzi	[1, 99, 101, 143, 187]	5	9,4 %
Raczej nie, jasno wynika z treści	[2, 3, 14, 15, 29, 31, 53, 54, 55, 85, 96, 104, 111, 167, 174, 175]	16	30,2 %
Nie, zaprzeczono wprost	[120, 130, 142, 149, 150, 172, 184]	7	13,2 %

W pytaniu dziewiątym, odnoszącym się do warunkowości poziomu przyznawanego priorytetu (por. Tab. 10), udział publikacji wskazujących na istnienie takiej zależności jest nieco wyższy (52,8 %). Jednak także tutaj jedynie niewielka część autorów potwierdza ją wprost (9,4 %). W zdecydowanej większej liczbie prac (43,4 %) zmienność poziomu priorytetu wynika dopiero z logiki opisywanego rozwiązania.

Tab. 10. Warunkowość poziomu priorytetu (Pyt. 9). Źródło: Opr. własne

Odpowiedź	Pozycje w bibliografii	n	% N
Tak, potwierdzono wprost w treści	[22, 104, 141, 158, 172]	5	9,4 %
Raczej tak, logicznie wynika z treści	[5, 14, 15, 49, 53, 55, 80, 85, 101, 102, 103, 111, 143, 166, 174, 175, 182, 183, 185, 186, 187, 188]	22	41,5 %
Przypuszczalnie, ale bez pewności	[28]	1	1,9 %
Brak precyzyjnej odpowiedzi	[1, 99]	2	3,8 %
Raczej nie, jasno wynika z treści	[2, 3, 7, 8, 9, 29, 31, 37, 54, 56, 84, 88, 96, 107, 108, 109, 167]	17	32,1 %
Nie, zaprzeczono wprost	[120, 130, 142, 149, 150, 184]	6	11,3 %

W przypadku warunkowego zastosowania priorytetu (por. Tab. 11) najczęściej wskazywanymi przesłankami są odchylenie od rozkładu jazdy (22,6 %) oraz pozycja, prędkość i przewidywany czas dojazdu pojazdu PTZ do linii zatrzymania (18,9 %). Stosunkowo często uwzględnia się również napelnienie pojazdu PTZ (13,2 %), globalne straty czasu wszystkich podróży w systemie (13,2 %) oraz obciążenie ruchem indywidualnym lub lokalny poziom zatłoczenia skrzyżowania (11,3 %). Rzadziej decyzja o uruchomieniu priorytetu zależy od stanu i elastyczności bieżącej fazy sygnalizacji (9,4 %) czy częstotliwości udzielania priorytetu (7,6 %).

Tab. 11. Czynniki decydujące o przyznaniu priorytetu (Pyt. 10). Źródło: Opr. własne

Czynnik	Pozycje w bibliografii	n	% N
Odchylenie od harmonogramu (lub częstotliwości)	[9, 37, 84, 88, 107, 108, 109, 141, 166, 182, 183, 188]	12	22,6 %
Napelnienie pojazdu PTZ	[5, 7, 37, 49, 141, 158, 188]	7	13,2 %
Liczba osób oczekujących na przystankach	[37]	1	1,9 %
Pozycja, prędkość i przewidywany czas dojazdu poj. PTZ do linii zatrzymania	[8, 49, 84, 102, 103, 158, 166, 182, 185, 188]	10	18,9 %
Typ pojazdu / linii PTZ	[188]	1	1,9 %
Liczba jednoczesnych zgłoszeń PTZ	[182]	1	1,9 %
Stan i elastyczność bieżącej fazy sygnalizacji	[49, 80, 84, 103, 185]	5	9,4 %
Wpływ na jakość koordynacji	[183]	1	1,9 %
Obciążenie ruchem TI, lokalny poziom zatłoczenia skrzyżowania	[5, 7, 37, 56, 158, 188]	6	11,3 %
Warunki bezpieczeństwa przy nagłej zmianie sygnałów	[188]	1	1,9 %
Zużycie energii (koszt energetyczny ruchu)	[7]	1	1,9 %
Częstotliwość udzielania priorytetu (limity, blokady priorytetu)	[22, 28, 109, 188]	4	7,6 %
Obecność zatoru na dojeździe pojazdu PTZ do skrzyżowania	[49, 103]	2	3,8 %
Globalne straty czasu wszystkich podróży	[7, 37, 49, 80, 158, 182, 186]	7	13,2 %
Nie dotyczy	[1, 2, 3, 14, 15, 29, 31, 53, 54, 55, 85, 96, 99, 101, 104, 111, 120, 130, 142, 143, 149, 150, 167, 172, 174, 175, 184, 187]	28	52,8 %

W przypadku czynników warunkujących poziom przyznawanego priorytetu obraz jest częściowo podobny (por. Tab. 12). Najczęściej wskazywaną grupę czynników stanowią: pozycja, prędkość i przewidywany czas dojazdu pojazdu PTZ do linii zatrzymania (33,96 %). Stosunkowo często poziom priorytetu uzależnia się również od obciążenia ruchem indywidualnym lub lokalnego poziomu zatłoczenia (24,5 %) oraz od globalnych strat czasu wszystkich podróży w systemie (24,5 %). Relatywnie często uwzględnia się także napelnienie pojazdu PTZ (15,1 %) oraz liczbę jednoczesnych zgłoszeń lub oczekujących pojazdów PTZ (15,1 %). Rzadziej pojawiają się: odchylenie od rozkładu jazdy (11,3 %), typ pojazdu lub linii (5,7 %), wpływ na koordynację (3,8 %) czy zator na dojeździe PTZ (3,8 %).

Trzeci blok pytań (pytania 12-14) dotyczy *wykorzystania analiz symulacyjnych w procesie badawczym*. Obejmuje on zastosowanie narzędzi mikrosymulacji do weryfikacji efektywności badanych rozwiązań (Tab. 13), uwzględnienie w badaniach aspektu losowości ruchu drogowego (Tab. 14) oraz kwestię doboru poligonów doświadczalnych (Tab. 15).

Tab. 12. Czynniki decydujące o poziomie priorytetu (Pyt. 11). Źródło: Opr. własne

Czynnik	Pozycje w bibliografii	n	% N
Odchylenie od harmonogramu (lub częstotliwości)	[22, 141, 166, 182, 183, 188]	6	11,3 %
Napełnienie pojazdu PTZ	[5, 14, 49, 141, 143, 158, 172, 188]	8	15,1 %
Pozycja, prędkość i przewidywany czas dojazdu poj. PTZ do linii zatrzymania	[14, 15, 28, 49, 53, 80, 102, 103, 111, 141, 143, 158, 166, 175, 182, 183, 185, 188]	18	34,0 %
Typ pojazdu / linii PTZ	[22, 85, 188]	3	5,7 %
Kierunek jazdy poj. PTZ	[111]	1	1,9 %
Liczba jednoczesnych zgłoszeń PTZ	[14, 55, 85, 104, 111, 166, 172, 182]	8	15,1 %
Wpływ na jakość koordynacji	[22, 183]	2	3,8 %
Obciążenie ruchem TI, lokalny poziom zatłoczenia skrzyżowania	[5, 14, 53, 85, 101, 102, 143, 158, 166, 175, 185, 187, 188]	13	24,5 %
Częstotliwość udzielania priorytetu (limity, blokady priorytetu)	[188]	1	1,9 %
Obecność zatoru na dojeździe pojazdu PTZ do skrzyżowania	[49, 103]	2	3,8 %
Globalne straty czasu wszystkich podróży	[14, 49, 53, 80, 85, 102, 158, 174, 175, 182, 185, 186, 188]	13	24,5 %
Nie dotyczy	[1, 2, 3, 7, 8, 9, 29, 31, 37, 54, 56, 84, 88, 96, 99, 107, 108, 109, 120, 130, 142, 149, 150, 167, 184]	25	47,2 %

Wyniki przeglądu literatury wskazują, że mikrosymulacja stanowi dominujące narzędzie weryfikacyjne i została zastosowana w większości analizowanych publikacji, tj. 35 z 53 (por. Tab. 13). Do budowy modeli oraz realizacji eksperymentów najczęściej wykorzystywano narzędzia Vissim i SUMO, natomiast Aimsun i TransModeler pojawiały się jedynie incydentalnie. W pozostałych pracach mikrosymulacja nie była wykorzystywana albo nie stanowiła głównego narzędzia badawczego. W tej grupie pojawiają się m.in. modele matematyczne i metody analityczne [9, 56, 102], eksperymenty numeryczne lub autorskie środowiska symulacyjne [37, 108, 142], badania terenowe i analizy oparte na danych empirycznych [2, 109], a także inne podejścia symulacyjne, takie jak symulacja Monte Carlo [130], czy modelowanie makroskopowe [186]. W kilku przypadkach autorzy ograniczali się do innych form weryfikacji albo nie doprecyzowali narzędzia badawczego [7, 54, 99, 107, 150, 166, 182, 184]. Oznacza to, że choć mikrosymulacja jako narzędzie wyraźnie dominuje w aktualnych badaniach, nie stanowi jedynej ścieżki weryfikacji efektywności proponowanych rozwiązań.

Tab. 13. Wykorzystanie mikrosymulacji w analizach (Pyt. 12). Źródło: Opr. własne

Odpowiedź	Narzędzie	Pozycje w bibliografii	n	% N
Tak	Vissim	[1, 8, 15, 29, 31, 49, 55, 80, 88, 96, 103, 104, 149, 158, 167, 172, 175]	17	32,1 %
	SUMO	[14, 22, 28, 53, 85, 101, 111, 120, 141, 143, 174, 183, 185, 187, 188]	15	28,3 %
	Aimsun	[3, 5]	2	3,7 %
	TransModeler	[84]	1	1,9 %
Nie	Nie dotyczy	[2, 7, 9, 37, 54, 56, 99, 102, 107, 108, 109, 130, 142, 150, 166, 184, 186]	17	32,1 %
Brak informacji	Nie dotyczy	[182]	1	1,9 %

W ramach pytania trzynastego analizowano, czy w eksperymentach symulacyjnych uwzględniono stochastyczny charakter ruchu drogowego poprzez wykonanie wielu

przebiegów symulacji z różnym ziarnem (por. Tab. 14). Kwestia ta ma istotne znaczenie dla wiarygodności uzyskiwanych rezultatów. Pozwala bowiem ograniczyć wpływ przypadkowych wahań ruchu na końcową ocenę efektywności badanego rozwiązania. Wyniki dla analizowanej próby publikacji pokazują, że uwzględnianie tego aspektu nie stanowi jeszcze powszechnego standardu metodologicznego. Potwierdzono je w 19 publikacjach, natomiast w 8 pracach wyraźnie z niego zrezygnowano. W 17 artykułach brakowało informacji pozwalających jednoznacznie rozstrzygnąć tę kwestię, a w 9 przypadkach pytanie to nie dotyczyło przyjętej metody weryfikacji. Z przeprowadzonych analiz wynika również, że w pracach uwzględniających losowość, liczba powtórzeń była wyraźnie zróżnicowana, przy czym najczęściej stosowano 10 uruchomień [3, 5, 14, 104, 143, 167].

Tab. 14. Wykonanie wielokrotnych przebiegów symulacji z losowym ziarnem (Pyt. 13). Źródło: Opr. własne

Odpowiedź	Pozycje w bibliografii	n	% N
Tak	[1, 3, 5, 14, 15, 31, 84, 104, 120, 130, 141, 142, 143, 158, 167, 174, 175, 183, 187]	19	35,8 %
Nie	[49, 55, 56, 80, 99, 107, 150, 172]	8	15,1 %
Brak informacji	[8, 9, 22, 28, 29, 37, 53, 85, 88, 96, 101, 103, 111, 149, 182, 185, 188]	17	32,1 %
Nie dotyczy	[2, 7, 54, 102, 108, 109, 166, 184, 186]	9	17,0 %

W odniesieniu do pytania czternastego (por. Tab. 15) można stwierdzić, że w większości analizowanych publikacji eksperymenty symulacyjne opierano na modelach bazujących na rzeczywistych fragmentach systemów transportowych (31 artykułów; 58,5 %). Wyraźnie rzadziej stosowano modele hipotetyczne, tj. wygenerowane na potrzeby badania, nieodzworowujące konkretnego istniejącego fragmentu systemu transportowego i zazwyczaj cechujące się uproszczoną strukturą (13 artykułów; 24,5 %). Sporadycznie łączono oba typy podejścia w ramach jednego badania (5 artykułów; 9,4 %).

W kontekście analizy poligonów doświadczalnych widać, że badania najczęściej prowadzono w skali lokalnej. Dominują modele pojedynczych skrzyżowań, zarówno rzeczywistych [2, 14, 49, 55, 80, 103, 141, 143, 174, 175, 185], jak i hipotetycznych [15, 37, 85, 172, 150]. Często pojawiają się również niewielkie korytarze obejmujące od dwóch do kilku skrzyżowań [3, 8, 28, 53, 96, 101, 102, 111, 120, 130, 142, 167, 183, 186]. Znacznie rzadziej analizowano układy większe, takie jak 21 skrzyżowań [99], 26 skrzyżowań [84], sieć 8×8 [5] czy ciąg kilkudziesięciu skrzyżowań [109].

Tab. 15. Rodzaj poligonu doświadczalnego (Pyt. 14). Źródło: Opr. własne

Rodzaj	Pozycje w bibliografii	n	% N
Model bazujący na rzeczywistym fragmencie systemu transportowego	[1, 2, 3, 8, 14, 28, 29, 31, 49, 55, 56, 80, 84, 88, 96, 99, 101, 102, 103, 104, 109, 111, 120, 141, 143, 149, 158, 167, 174, 175, 185]	31	58,5 %
Model hipotetyczny	[5, 9, 15, 37, 85, 107, 108, 150, 166, 172, 182, 183, 186]	13	24,5 %
Oba typy modeli (rzeczywisty i hipotetyczny)	[53, 130, 142, 187, 188]	5	9,4 %
Brak dokładnych danych	[22, 184]	2	3,8 %
Nie dotyczy (brak weryfikacji symulacyjnej)	[7, 54]	2	3,8 %

Ostatni blok pytań (pytania 15–18) dotyczy aspektów *sposobu oceny badanych rozwiązań oraz podstaw formułowania wniosków o ich efektywności*. W jego ramach przeanalizowano, czy proponowane metody priorytetyzacji PTZ porównywano z innymi

strategiami lub ich wariantami (Tab. 16), czy ocena miała charakter jedno- czy wielokryterialny (Tab. 17) i jakie miary efektywności raportowano (Tab. 18), a także czy autorzy uwzględniali w procesie badawczym analizę wrażliwości (Tab. 19).

Analiza porównawcza efektywności proponowanych rozwiązań stanowi zasadniczy element zdecydowanej większości współczesnych badań nad priorytetyzacją PTZ (por. Tab. 16). Świadczy o tym fakt, że nie występuje ona jedynie w 4 rozpatrywanych publikacjach. W pracach ją uwzględniających, zakres porównań pozostaje jednak silnie zróżnicowany. W większości przypadków zestawia się niewielką liczbę podejść do sterowania, zwykle jedną lub dwie metody, czasem z uwzględnieniem kilku ich wariantów. Bardziej rozbudowane analizy pojawiają się zdecydowanie rzadziej. W pracach [187] i [142] porównuje się odpowiednio 4 i 5 metod, natomiast w publikacji [172], mimo że zestawia się jedynie 2 konkurencyjne podejścia, analizą obejmuje się łącznie aż 719 wariantów. W części artykułów punktem odniesienia jest wyłącznie sterowanie bazowe nieuwzględniające jakiegokolwiek priorytetyzacji, np. [2, 3, 55, 99, 120], co daje ograniczoną możliwość rzetelnej oceny efektywności wybranej metody priorytetyzacji.

Tab. 16. Porównanie z innymi metodami/wariantami metod priorytetyzacji (Pyt. 15). Źródło: Opr. własne

Odpowiedź	Pozycje w bibliografii	n	% N
Tak	[1, 2, 3, 5, 8, 9, 14, 15, 22, 28, 29, 31, 37, 49, 53, 55, 56, 80, 84, 85, 88, 96, 99, 101, 102, 103, 104, 108, 109, 111, 120, 130, 141, 142, 143, 149, 150, 158, 167, 172, 174, 175, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188]	49	92,4 %
Nie	[7, 54, 107, 166]	4	7,6 %

Ocena poszczególnych rozwiązań w większości prac ma charakter wielokryterialny (por. Tab. 17). To znaczy, że autorzy raportują co najmniej dwie miary efektywności ruchu i na podstawie ich analizy formułują wnioski i rekomendacje. Badania skupione na analizie jednego parametru stanowią jedynie około 21 % wszystkich analizowanych publikacji. Mediana liczby raportowanych miar wynosi 3, przy czym najczęściej raportuje się właśnie 3 lub 4 parametry. Najszerszy, składający się z 6 niezależnych miar zestaw występuje w trzech publikacjach [1, 8, 184]. Nieco węższy, ale nadal rozbudowany zakres raportowania zidentyfikowano w pracach [29, 31, 187], gdzie autorzy raportują 5 miar efektywności.

Tab. 17. Charakter oceny ze względu na liczbę miar efektywności (Pyt. 16). Źródło: Opr. własne

Rodzaj	Pozycje w bibliografii	n	% N
Wielokryterialna	[1, 3, 5, 8, 9, 14, 15, 22, 29, 31, 53, 55, 56, 84, 88, 96, 99, 101, 102, 104, 111, 120, 130, 141, 142, 143, 149, 150, 158, 167, 174, 175, 182, 183, 184, 185, 187, 188]	38	71,7 %
Jednokryterialna	[2, 28, 37, 49, 80, 85, 103, 108, 109, 172, 186]	11	20,8 %
Nie dotyczy	[7, 54, 107, 166]	4	7,5 %

W kontekście rodzaju badanych miar efektywności wyraźnie dominuje podejście oparte na stratach czasu (por. Tab. 18). Najczęściej uwzględnia się straty czasu pojazdów (34 prace; 64,2 %) oraz straty czasu pasażerów (22; 41,5 %). Wyraźnie rzadziej analizuje się: kolejki na wlotach skrzyżowań (10; 18,9 %), aspekty punktualności kursowania PTZ oraz zatrzymania i postoje (po 8; 15,1 %), a także czasy przejazdu (7; 13,2 %). Miary środowiskowe i energetyczne mają znaczenie uzupełniające, ponieważ emisje i energochłonność pojawiają się po 6 razy (11,3 %), natomiast pozostałe kategorie występują bardzo rzadko.

Tab. 18. Miary efektywności ruchu zastosowane w ocenie (Pyt. 17). Źródło: Opr. własne

Kategoria parametrów	Uszczegółowienie	Pozycje w bibliografii	n	% N
Straty czasu pojazdów	ogółem; według rodzaju transportu: PTZ, TI; skumulowane; w punktach przerwania zielonej fali	[1, 2, 3, 5, 8, 14, 15, 22, 29, 31, 53, 55, 56, 84, 85, 96, 101, 104, 111, 120, 130, 141, 142, 143, 149, 150, 158, 167, 174, 175, 182, 183, 184, 187]	34	64,2 %
Straty czasu pasażerów	ogółem; według rodzaju transportu: PTZ, TI; skumulowane	[5, 14, 28, 31, 37, 49, 80, 102, 103, 104, 130, 143, 149, 150, 158, 167, 172, 183, 185, 186, 187, 188]	22	41,5 %
Czas oczekiwania pasażerów na przystankach	-	[84]	1	1,9 %
Straty czasu pieszych	-	[102]	1	1,9 %
Punktualność / regularność kursowania PTZ	punktualność; liczba opóźnionych pojazdów; niezawodność jazdy	[9, 56, 84, 108, 109, 130, 182, 184]	8	15,1 %
Czasy przejazdu	ogółem; według rodzaju transportu: PTZ, TI; czas dotarcia ostatniego pojazdu do celu	[1, 8, 88, 96, 149, 174, 184]	7	13,2 %
Prędkość ruchu pojazdów	ogółem; pojazdów PTZ	[3, 9, 29, 31, 185]	5	9,4 %
Zatrzymania i postoje	czas zatrzymania; czas postoju na przystankach; liczba zatrzymań: ogółem i PTZ; odsetek pojazdów bez zatrzymania; odsetek zatrzymań na sygnalizacjach; wskaźnik pojazdów zatrzymanych	[3, 22, 53, 88, 96, 141, 142, 184]	8	15,1 %
Długość kolejek	-	[1, 8, 31, 53, 55, 101, 141, 185, 187, 188]	10	18,9 %
Przepustowość	-	[120, 187]	2	3,8 %
Emisje	emisje; emisje (CO); emisje (CO/ NOX/VOC); emisje (CO2)	[1, 8, 29, 55, 88, 99]	6	11,3 %
Energochłonność	zużycie paliwa, zużycie energii elektrycznej	[1, 8, 29, 56, 99, 185]	6	11,3 %
Komfort i bezpieczeństwo	bezpieczeństwo; komfort podróży określany na podstawie progów prędkości PTZ	[56, 188]	2	3,8 %
Jakość koordynacji	szerokość wiązki koordynacji	[184]	1	1,9 %
Inne miary	liczba pojazdów w sieci; opóźnienie przypadające na fazę niepriorytetową; częstotliwość żądań priorytetu; poprawa na jednostkę kosztu; skumulowana wartość nagrody	[5, 9, 22, 53, 182]	5	9,4 %
Nie dotyczy	-	[7, 54, 107, 166]	4	7,6 %

Na tym tle zwraca uwagę relatywnie niewielka rola miar niestandardowych. Kategoria „inne miary” obejmuje pojedyncze wskaźniki autorskie lub metodyczne, takie jak: opóźnienie na fazę niepriorytetową [22], parametr skumulowanej wartości nagrody [53], parametr poprawy na jednostkę kosztu [182], parametr częstotliwości żądań priorytetu [9] czy liczba pojazdów w sieci [5]. Ich obecność wskazuje, że część autorów uzupełnia klasyczne miary czasu i płynności ruchu o wskaźniki projektowane na potrzeby

konkretnej metody badawczej, jednak nie tworzą one jeszcze utrwalonego standardu oceny.

Autorzy badań najczęściej budują ocenę efektywności wokół relacji między korzyściami dla PTZ a kosztami po stronie TI. Świadczy o tym przede wszystkim fakt, że najczęściej współwystępującym układem miar są straty czasu pojazdów transportu publicznego oraz straty czasu pojazdów TI, raportowane łącznie w 21 publikacjach. Wraz z efektywnością ruchu pojazdów stosunkowo często uwzględnia się również perspektywę pasażerską, czego wyrazem jest najczęściej raportowana trójka miar obejmująca: straty czasu pasażerów, straty czasu pojazdów PTZ oraz straty czasu pojazdów TI, występująca w 8 pracach.

W ramach ostatniego, 18. pytania, przeanalizowano prowadzenie analizy wrażliwości, rozumianej jako sprawdzenie, w jakim stopniu wyniki oraz ocena badanego rozwiązania są odporne na: zmiany założeń, parametrów sterowania lub warunków ruchu (por. Tab. 19). Artykuły przyporządkowano do trzech kategorii. Pierwsza, tj. „jawna analiza wrażliwości” oznacza przypadki, w których autorzy wprost deklarują wykonanie takiej analizy, zwykle w osobnej sekcji, badając kompleksowo wpływ wybranych zmian na osiągnięte rezultaty.

Kategoria „ograniczona/pośrednia analiza wrażliwości” obejmuje te prace, w których nie formułuje się formalnie analizy wrażliwości, ale bada się działanie wybranej metody priorytetyzacji np. w różnych scenariuszach ruchowych, przy odmiennych poziomach popytu. Z kolei „Brak analizy wrażliwości” odnosi się do publikacji, w których nie przeprowadzono tego rodzaju testów lub nie przedstawiono ich w sposób pozwalający uznać je za element procedury oceny. Jak wynika z danych zamieszczonych w Tab. 19, analiza wrażliwości jest uwzględniana w literaturze stosunkowo często, bo w aż 40 z badanych publikacji. Uzyskany rozkład odpowiedzi wskazuje, że jej formalnie wyodrębniona wersja nie stanowi standardu, gdyż zdecydowanie częściej pojawia się jej uproszczona postać.

Tab. 19. Uwzględnienie analiz wrażliwości (Pyt. 18). Źródło: Opr. własne

Odpowiedź	Pozycje w bibliografii	n	% N
Jawna analiza wrażliwości	[1, 5, 14, 56, 88, 104, 130, 149, 158, 183]	10	18,9 %
Ograniczona / pośrednia analiza wrażliwości	[3, 8, 9, 15, 22, 28, 37, 53, 55, 80, 85, 96, 99, 101, 102, 108, 109, 111, 120, 141, 142, 143, 172, 174, 175, 182, 185, 186, 187, 188]	30	56,6 %
Brak analizy wrażliwości	[2, 7, 29, 31, 49, 54, 84, 103, 107, 150, 166, 167, 184]	13	24,5 %

Przeprowadzony przegląd literatury pokazuje, że współczesne badania nad priorytetyzacją PTZ w ramach sygnalizacji świetlnej koncentrują się przede wszystkim na rozwiązaniach aktywnych, lokalnych i najczęściej opartych na sterowaniu regułowym. Dominują przy tym analizy odnoszące się do ruchu autobusowego, podczas gdy rozwiązania poświęcone innemu środkom PTZ, w tym tramwajom, pozostają wyraźnie słabiej reprezentowane. W badanych publikacjach najczęściej stosuje się klasyczne procedury ingerencji w program sygnalizacji, takie jak wydłużanie sygnału zielonego i skracanie sygnału czerwonego. Coraz wyraźniej zaznacza się także rozwój podejścia warunkowego, w którym decyzja o przyznaniu priorytetu lub jego poziomie uzależniana jest od dodatkowych przesłanek opisujących stan ruchu lub cechy zgłoszenia pojazdu PTZ.

Jednocześnie przeprowadzona analiza pozwala wskazać kilka obszarów, które w dotychczasowych badaniach pozostają rozwinięte w ograniczonym stopniu. Po pierwsze, wciąż relatywnie *rzadko podejmowany jest problem rozstrzygania kolizyjnych zgłoszeń pojazdów PTZ, a jeżeli już się pojawia, to nie zawsze jest opisywany w sposób szczegółowy*. Po drugie, choć w literaturze widoczny jest wzrost zainteresowania priorytetem

warunkowym, znacznie rzadziej stosowane są rozwiązania wykorzystujące bardziej złożone, wieloczynnikowe podstawy podejmowania decyzji. Dotyczy to między innymi uwzględniania parametru napełnienia pojazdów PTZ, szczególnie w połączeniu z innymi istotnymi czynnikami, takimi jak odchylenie od harmonogramu jazdy czy czas oczekiwania na obsługę. Jest to o tyle istotne, że takie ujęcie pozwala oceniać efektywność priorytetu z perspektywy przemieszczania ludzi, a nie wyłącznie pojazdów, a zarazem lepiej uwzględnia potrzebę zachowania niezawodności funkcjonowania transportu zbiorowego. Po trzecie, mimo dominacji mikrosymulacji jako narzędzia weryfikacyjnego, *standard metodologiczny badań pozostaje niejednorodny*. Dotyczy to zarówno uwzględniania *stochastycznego charakteru ruchu, jak i skali analiz wrażliwości oraz zakresu porównań z innymi metodami sterowania*.

Na osobne podkreślenie zasługuje także sposób oceny proponowanych rozwiązań. W wielu publikacjach analiza ma charakter wielokryterialny, jednak najczęściej sprowadza się to do równoległego raportowania kilku miar efektywności i formułowania wniosków na tej podstawie. Znacznie rzadziej spotyka się natomiast *formalne wykorzystanie metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji w procesie wyboru rozwiązania kompromisowego*. Jest to istotne ograniczenie, ponieważ ocena strategii sterowania ruchem z natury rzeczy wymaga równoważenia interesów wielu grup użytkowników systemu transportowego.

Podsumowując, przegląd zagadnień przedstawionych w podrozdziale 2.1 pozwala uporządkować aktualny stan badań nad priorytetyzacją PTZ w ramach działania sygnalizacji świetlnej oraz wskazać obszary, które w dotychczasowej literaturze pozostają rozwinięte w ograniczonym stopniu. Wnioski te stanowią rozwinięcie uzasadnienia przesłanek problemu badawczego sformułowanego w podrozdziale 1.2.

Dalsza część rozdziału ma charakter uzupełniający i obejmuje przegląd zagadnień niezbędnych do realizacji przyjętego postępowania badawczego, tj. modelowania i analiz symulacyjnych miejskich systemów transportowych oraz wielokryterialnego wspomaganie decyzji.

2.2. Analizy symulacyjne miejskich systemów transportowych

2.2.1. Podstawy modelowania i symulacji systemów

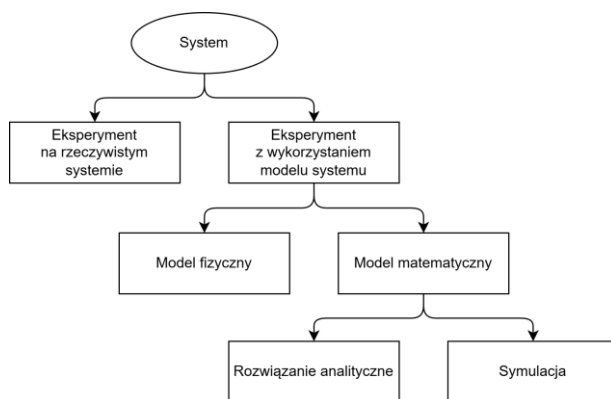
System można rozumieć jako wyodrębniony fragment rzeczywistości, złożony z elementów pozostających ze sobą w określonych relacjach i oddziałujących na siebie i otoczenie w ramach analizowanego procesu. Zakres systemu nie jest stały, lecz zależy od celu badań. Ten sam obiekt może być więc opisany szerzej lub wężej, w zależności od tego, które elementy, zależności i zjawiska są istotne z punktu widzenia prowadzonej analizy [82, 97].

W odniesieniu do schematu zaproponowanego przez Lawa [97] (Rys. 13) badanie systemu może być prowadzone na dwa podstawowe sposoby. Pierwszy polega na eksperymentowaniu bezpośrednio na systemie. Podejście to pozwala obserwować rzeczywiste skutki wprowadzanych zmian, jednak w praktyce często jest kosztowne, czasochłonne, ryzykowne albo zakłóca normalne funkcjonowanie systemu. Ponadto podejście to znacznie ogranicza możliwość porównania kilku wariantów funkcjonowania systemu w jednakowych warunkach. W wielu przypadkach system może również jeszcze nie istnieć, co uniemożliwia przeprowadzenie eksperymentów w warunkach rzeczywistych. Drugie podejście polega na badaniu systemu z wykorzystaniem jego modelu. [97]

Model jest celowo uproszczoną reprezentacją rzeczywistości lub jej fragmentu, odwzorowującą te cechy, relacje i procesy badanego obiektu bądź systemu, które są istotne

z punktu widzenia przyjętego celu badań. Jednocześnie pomija on aspekty nieistotne lub takie, których uwzględnienie mogłoby nadmiernie komplikować analizę [82, 97, 128]. Dlatego można uznać, że model powinien być tak prosty, jak to możliwe, a zarazem tak złożony, jak jest to konieczne.

W praktyce inżynierskiej wyróżnia się modele fizyczne oraz modele matematyczne. Pierwsze stanowią materialne odwzorowanie badanego obiektu, najczęściej w odpowiednio pomniejszonej skali np. w postaci makiety fragmentu infrastruktury czy modelu pojazdu. W kontekście analizy różnego rodzaju systemów zdecydowanie większą rolę odgrywają modele matematyczne oraz techniki ich analizy [97].



Rys. 13. Klasyfikacja metod analizy systemu. Źródło: [97]

Modelowanie matematyczne stanowi proces formalnego opisu badanego zjawiska, procesu lub systemu za pomocą aparatu matematycznego, obejmującego m.in. zmienne, parametry, równania, zależności funkcyjne oraz warunki początkowe i brzegowe. W niektórych przypadkach model matematyczny pozwala na uzyskanie rozwiązania metodami analitycznymi, które polegają na przedstawieniu zależności między wielkościami opisującymi system w postaci jawnych relacji lub równań możliwych do bezpośredniego rozwiązania. Taka analiza ma charakter dokładny i zwykle stanowi podejście preferowane. Jednak w odniesieniu do modeli bardziej złożonych systemów jego wyznaczenie może być trudne oraz może wiązać się z nadmiernymi wymaganiami obliczeniowymi albo okazać się wręcz niemożliwe. W takich przypadkach zasadne staje się zastosowanie symulacji [19, 44, 97].

Symulację można rozumieć jako uproszczone odtwarzanie działania wybranego obiektu lub systemu z wykorzystaniem modelu, najczęściej zaimplementowanego komputerowo. Model symulacyjny może być tworzony na podstawie modelu matematycznego lub zbioru modeli cząstkowych, odwzorowujących wybrane cechy, relacje i procesy istotne z punktu widzenia celu analizy. Podejście to ma charakter analizy typu *what-if*, ponieważ polega na przeprowadzaniu eksperymentów na modelu dla przyjętych danych wejściowych, warunków i założeń, a następnie na analizie uzyskanych danych wyjściowych. W odróżnieniu od rozwiązania analitycznego symulacja zwykle nie prowadzi do bezpośredniego wyprowadzenia jawnej zależności matematycznej, lecz pozwala prześledzić przebieg działania modelu oraz ocenić, jak system rzeczywisty może reagować na wprowadzane zmiany w jego strukturze [10, 44, 97].

W literaturze przedmiotu modele symulacyjne porządkuje się najczęściej według trzech podstawowych kryteriów: roli czasu, sposobu uwzględniania losowości oraz charakteru zmian stanu systemu [19, 97].

Ze względu na rolę czasu wyróżnia się modele statyczne i dynamiczne. Modele statyczne opisują system w jednym wybranym stanie albo w warunkach, w których przebieg czasu nie jest bezpośrednio analizowany. Modele dynamiczne odwzorowują natomiast zmiany zachodzące w systemie w kolejnych chwilach jego funkcjonowania [97].

W kontekście sposobu uwzględniania losowości modele dzieli się na deterministyczne i stochastyczne. W modelach deterministycznych przyjęcie tego samego zestawu danych wejściowych i parametrów prowadzi do tych samych wyników. Modele stochastyczne zawierają natomiast elementy losowe, dlatego kolejne przebiegi symulacji mogą dawać odmienne rezultaty. Z tego powodu ich ocena wymaga zwykle wykonania wielu powtórzeń oraz analizy statystycznej otrzymanych wyników [97].

W ujęciu charakteru zmian stanu modele można podzielić na ciągłe, dyskretnie oraz mieszane. W modelach ciągłych zmienne opisujące system zmieniają się w sposób płynny. W modelach dyskretnych zmiany następują w określonych chwilach, na przykład po wystąpieniu zdarzenia albo w kolejnych krokach symulacji. Modele mieszane łączą oba sposoby opisu, co pozwala reprezentować w jednym modelu zarówno procesy o charakterze ciągłym, jak i procesy zmieniające się skokowo [19, 97].

Ponieważ przedstawione kryteria odnoszą się do odrębnych i niezależnych cech modeli symulacyjnych, mogą być rozpatrywane równolegle. W praktyce oznacza to, że jeden model może jednocześnie spełniać kilka kryteriów klasyfikacyjnych, na przykład być dynamiczny, stochastyczny i dyskretny. Nie wyklucza to jednak występowania innych kombinacji tych właściwości. Jednocześnie wskazane kryteria nie wyczerpują wszystkich możliwych sposobów klasyfikacji modeli symulacyjnych. W zależności od specyfiki badanego systemu oraz celu prowadzonej analizy istotne mogą być również inne osie podziału, związane m.in. z poziomem szczegółowości modelu, skalą odwzorowania procesów czy zakresem uwzględnianych zależności. Ma to szczególne znaczenie w przypadku miejskich systemów transportowych, w których dobór modelu powinien odpowiadać charakterowi analizowanego problemu, skali badanego obszaru oraz poziomowi szczegółowości wymaganych wyników.

2.2.2. Problematyka analiz miejskich systemów transportowych

Sieć transportowa, jej infrastruktura i przyjęte rozwiązania z zakresu organizacji i sterowania ruchem, stanowią jedno z kluczowych czynników warunkujących zdolność miejskiego systemu transportowego do realizacji jego podstawowego celu, jakim jest przemieszczanie osób i/lub ładunków przy zachowaniu określonych parametrów jakościowych, takich jak bezpieczeństwo, sprawność, niezawodność, komfort oraz dostępność [82]. Zdolność ta nie jest jednak stała i może ulegać zmianom w czasie eksploatacji systemu. Czynniki takie jak wzrost gospodarczy i społeczny, wzrost poziomu motoryzacji, zmiany w zagospodarowaniu przestrzennym (w tym intensyfikacja zabudowy i nowe inwestycje) oraz zmiany struktury podróży mogą sprawić, że system przestanie spełniać przyjęte standardy. W konsekwencji pojawia się potrzeba jego reorganizacji lub modernizacji w celu dostosowania do nowych potrzeb użytkowników [124].

Zakres możliwych do realizacji działań inwestycyjnych może obejmować zarówno niewielkie zmiany organizacji ruchu na pojedynczym odcinku drogi, wprowadzenie sygnalizacji świetlnej bądź tylko korektę jej programu, jak i przedsięwzięcia o znacznie większej skali, takie jak budowa nowych odcinków dróg, obwodnic czy wydzielonych tras dla publicznego transportu zbiorowego. Niezależnie od skali, każda ingerencja w miejski system transportowy jest podejmowana z intencją wywołania określonej zmiany w sposobie jego funkcjonowania. Może nią być m.in. poprawa płynności ruchu, poprawa bezpieczeństwa, zmiana podziału modalnego podróży, nadanie priorytetu wybranym grupom

użytkowników, ograniczenie negatywnego oddziaływania transportu na otoczenie albo kombinacja kilku takich efektów.

Planowanie inwestycji i przewidywanie ich skutków stanowi trudne zadanie, m.in. ze względu na skomplikowaną strukturę wzajemnie powiązanych elementów systemu [138]. Współzależność ta powoduje, że poprawa efektywności w jednym fragmencie układu może wywoływać niezamierzone konsekwencje w innych jego częściach. Ponadto rozwiązanie korzystne z punktu widzenia jednej grupy użytkowników systemu może jednocześnie prowadzić do pogorszenia warunków dla innych jego uczestników.

Analiza miejskich systemów transportowych wymaga zwykle podejścia modelowego. W praktyce oznacza to konieczność doboru takiego narzędzia badawczego, które odpowiada zarówno skali analizowanego układu, jak i charakterowi rozpatrywanego problemu. Metody analityczne są szczególnie przydatne w przypadku zagadnień o ograniczonym zakresie, dobrze opisanych zależnościach oraz stosunkowo niewielkiej liczbie zmiennych. Mogą być wykorzystywane m.in. w analizach przepustowości pojedynczych elementów sieci, ocenie podstawowych parametrów sygnalizacji świetlnej, uproszczonych prognozach ruchu czy analizach parkingowych. W przypadku miejskich systemów transportowych wiele problemów ma jednak charakter znacznie bardziej złożony. Efektywność systemu zależy nie tylko od przyjętych parametrów infrastruktury i organizacji ruchu, lecz także od zmienności popytu transportowego, losowości zachowań użytkowników, wzajemnych oddziaływań między uczestnikami ruchu oraz sprzężeń występujących pomiędzy poszczególnymi częściami sieci. W takich warunkach zastosowanie wyłącznie metod analitycznych może wymagać daleko idących uproszczeń, które ograniczają możliwość właściwej oceny systemu.

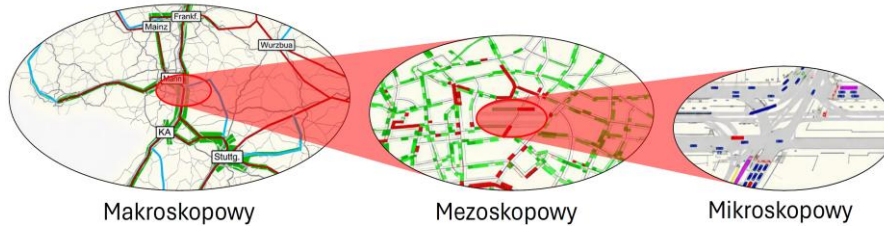
Na ograniczenia tego typu zwracają uwagę Wiedemann i Sawicka [138], wskazując, że rozwiązania analityczne mogą dostarczać precyzyjnych wyników i prowadzić do wyznaczenia rozwiązania optymalnego, jednak wiele takich ujęć ma charakter statyczny i deterministyczny. Ogranicza to ich przydatność w analizach wielu problemów transportowych, w których istotne znaczenie ma uwzględnienie dynamiki oraz losowości ruchu. Podobny wniosek w odniesieniu do sterowania ruchem z priorytetem dla tramwajów formułuje Szustek [151], podkreślając, że skutki działania złożonych algorytmów akomodacyjnych są trudne do oceny wyłącznie na podstawie analitycznych miar jakości ruchu wyznaczanych dla programów bazowych.

Z tego względu w analizach miejskich systemów transportowych szczególne znaczenie mają modele symulacyjne. Pozwalają one odwzorować zmiany stanu systemu w czasie, uwzględnić zmienność warunków ruchu oraz analizować skutki różnych wariantów organizacji i sterowania ruchem bez ingerencji w system rzeczywisty. Dzięki temu możliwe jest porównywanie alternatywnych rozwiązań w kontrolowanych warunkach, obserwacja przebiegu procesów transportowych oraz ocena wpływu projektowanych zmian na funkcjonowanie całego układu lub jego wybranych elementów [10, 44]. Należy jednak podkreślić, że wykorzystanie modelu symulacyjnego samo w sobie nie gwarantuje uzyskania wiarygodnych wyników.

W praktyce odpowiada to zasadzie określanej jako *garbage in – garbage out*, zgodnie z którą błędne lub niereprezentatywne dane wejściowe prowadzą do wyników obarczonych błędem, niezależnie od stopnia zaawansowania zastosowanego narzędzia. Dlatego budowa modelu symulacyjnego ma zwykle charakter iteracyjny i obejmuje kolejne etapy formułowania założeń, pozyskiwania danych, kalibracji, walidacji oraz ewentualnej korekty modelu [10, 97].

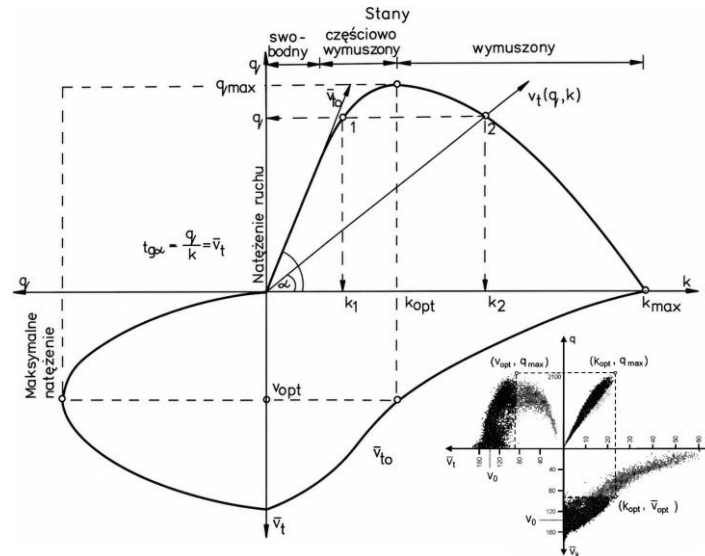
Modele symulacyjne miejskich systemów transportowych można klasyfikować według ogólnych kryteriów stosowanych w teorii modelowania i symulacji, takich jak rola czasu, sposób uwzględniania losowości czy charakter zmian stanu systemu.

W kontekście analiz funkcjonowania tych systemów równie ważne znaczenie ma poziom szczegółowości, z jakim odwzorowywany jest ruch w modelowej sieci transportowej. W tym ujęciu wyróżnia się modele makroskopowe, mezoskopowe oraz mikroskopowe. Klasyfikacja ta odnosi się do stopnia agregacji opisu systemu transportowego, a więc do tego, czy ruch jest analizowany na poziomie całych strumieni pojazdów, grup pojazdów i relacji między nimi, czy pojedynczych uczestników ruchu [44, 57]. Graficzną reprezentację tego podziału zamieszczono na Rys. 14.



Rys. 14. Podział modeli symulacyjnych ze względu na szczegółowość odzwierciedlenia ruchu pojazdów. Źródło: Opr. własne na bazie [60]

Wybór poziomu modelowania zależy przede wszystkim od celu analizy, skali badanego obszaru, dostępności danych, wymaganej dokładności wyników oraz rodzaju decyzji, które mają być wspierane przez model. Modele makroskopowe opisują ruch drogowy na najwyższym poziomie agregacji. Nie odwzorowują pojedynczych pojazdów, ich zachowań ani bezpośrednich interakcji, lecz ujmują ruch jako ciągły strumień charakteryzowany uśrednionymi wielkościami potoku ruchu: natężeniem q , gęstością k oraz prędkością v . Wielkości te powiązane są podstawową zależnością $q = v \cdot k$, stanowiącą punkt wyjścia do opisu relacji przedstawianych na fundamentalnym wykresie ruchu [10, 44, 57]. Jedną z pierwszych klasycznych postaci tej zależności był model Greenshieldsa z 1935 roku [52], zakładający liniowy spadek prędkości wraz ze wzrostem gęstości, a w konsekwencji paraboliczną zależność natężenia od gęstości. Przykład współczesnej, empirycznie wyznaczonej postaci tych zależności przedstawiono na Rys. 15.



Rys. 15. Fundamentalny wykres ruchu. Źródło: [44]

W modelowaniu makroskopowym w kontekście sposobu odwzorowania czasu można wyróżnić ujęcia statyczne i dynamiczne. Modele statyczne opisują uśredniony stan ruchu w przyjętym okresie analizy, bez odwzorowania jego zmian w czasie. Wykorzystuje się je m.in. do wyznaczania warunków równowagi, natężeń ruchu na odcinkach sieci drogowej oraz czasów przejazdu zależnych od stopnia wykorzystania przepustowości. Modele dynamiczne uwzględniają natomiast zmienność parametrów ruchu w czasie i przestrzeni, co pozwala analizować zatory, fale kinematyczne oraz skutki zakłóceń. Przykładem takiego podejścia jest model LWR [105, 131], nazwany od autorów Lighthilla, Whithama i Richardsa, w którym zależność fundamentalna zostaje połączona z równaniem ciągłości wyrażającym zasadę zachowania liczby pojazdów [57].

Ze względu na wysoki poziom agregacji modele makroskopowe są szczególnie użyteczne w analizach dużych układów transportowych, obejmujących miasta, obszary metropolitalne lub sieci krajowe. Stosuje się je przede wszystkim w modelowaniu planistycznym, w tym w prognozowaniu rozkładu ruchu, ocenie skutków zmian w układzie drogowym, analizach dostępności transportowej, badaniu wpływu inwestycji infrastrukturalnych oraz porównywaniu wariantów rozwoju systemu transportowego. W praktyce stanowią podstawę klasycznych modeli czterostadiowych, obejmujących generację podróży, dystrybucję podróży, podział zadań przewozowych i rozkład ruchu na sieć, a także mogą być wykorzystywane w analizach opartych na podejściu aktywnościowym [10, 57].

Do głównych zalet modeli makroskopowych należą stosunkowo niewielkie wymagania dotyczące szczegółowości danych oraz możliwość prowadzenia analiz dla rozległych obszarów. Ich ograniczeniem jest natomiast mniejsza przydatność do badania lokalnych interakcji między uczestnikami ruchu, szczegółowych efektów organizacji ruchu oraz funkcjonowania sygnalizacji świetlnej, zwłaszcza zmiennoczasowej.

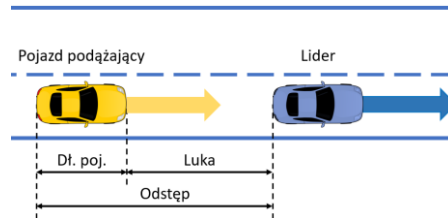
Modele mezoskopowe stanowią podejście pośrednie między ujęciem makroskopowym a mikroskopowym. Ich celem jest umożliwienie analizy większych obszarów sieci transportowej przy jednoczesnym uwzględnieniu wybranych cech dynamiki ruchu, które nie są widoczne w pełni zagregowanym opisie makroskopowym. W zależności od przyjętej struktury modelu ruch może być reprezentowany za pomocą grup pojazdów, pakietów ruchu, kolejek lub uproszczonych opisów przemieszczania się pojazdów w sieci. Modele mezoskopowe wykorzystują najczęściej uproszczone modele przepływu, modele kolejkowe, funkcje opóźnień oraz procedury dynamicznego rozkładu ruchu. Są stosowane przede wszystkim wtedy, gdy istotne jest odwzorowanie zmian natężenia, prędkości, opóźnień i kolejek w czasie oraz przestrzeni, a analizowany obszar obejmuje rozległy fragment sieci. Ich znaczenie wynika z możliwości prowadzenia analiz dynamicznych przy ograniczonej złożoności obliczeniowej i umiarkowanych wymaganiach dotyczących szczegółowości danych wejściowych [10, 44, 57].

Modele mikroskopowe z kolei odwzorowują ruch na najwyższym poziomie szczegółowości spośród wskazanych klas, reprezentując poszczególnych uczestników ruchu jako odrębne obiekty o określonych parametrach i regułach zachowania. Pozwalają one analizować zjawiska lokalne, w których istotne znaczenie mają geometria układu, organizacja ruchu, sygnalizacja świetlna oraz wzajemne interakcje użytkowników [10, 44, 57]. Z punktu widzenia niniejszej pracy podejście to ma szczególne znaczenie, ponieważ umożliwia ocenę rozwiązań z zakresu priorytetowego sterowania ruchem PTZ, w tym wpływu decyzji sterujących na przejazd pojazdów PTZ oraz warunki ruchu pozostałych uczestników. Z tego względu szczegółową charakterystykę modeli mikrosymulacyjnych oraz ich zastosowań przedstawiono szerzej w kolejnym podrozdziale.

2.2.3. Charakterystyka mikroskopowych modeli ruchu

Mikrosymulacyjne modele ruchu opierają się na odwzorowaniu zachowania pojedynczych uczestników systemu transportowego oraz ich wzajemnych interakcji na wysokim poziomie szczegółowości. Uczestnikom tym, obejmującym m.in. pojazdy, pieszych, rowerzystów oraz pojazdy PTZ, przypisywane są cechy techniczne i behawioralne, takie jak: typ, długość, prędkość pożądana, zdolność przyspieszania i hamowania, trasa przejazdu oraz parametry reakcji na otoczenie. Model obejmuje również elementy infrastruktury i organizacji ruchu, w tym geometrię sieci, pasy ruchu, relacje skrętne, przystanki, przejścia dla pieszych, reguły pierwszeństwa, detektory oraz sygnalizację świetlną. Takie ujęcie pozwala analizować ruch jako wynik interakcji między uczestnikami, infrastrukturą oraz przyjętym sposobem sterowania [10, 44, 57].

Podstawę działania modeli mikrosymulacyjnych stanowi zbiór modeli cząstkowych odpowiedzialnych za symulację różnych aspektów funkcjonowania systemu transportowego. W przypadku pojazdów szczególne znaczenie mają modele opisujące podążanie za pojazdem poprzedzającym, zmianę pasa ruchu, akceptację luki, reakcję na sygnalizację świetlną oraz zachowanie w punktach kolizji. Mechanizmy te decydują o sposobie przemieszczania się pojazdów w sieci, kształtowaniu odstępów, tworzeniu i rozładowywaniu kolejek oraz przebiegu manewrów wykonywanych w rejonie skrzyżowań. Spośród tych elementów podstawowe znaczenie ma *model podążania za liderem*, opisujący zachowanie pojazdu w ruchu wzdłużnym [10, 44, 57]. Model ten opisuje zachowanie pojazdu poruszającego się za innym pojazdem na tym samym pasie ruchu (Rys. 16). Pojazd podążający dostosowuje swoją prędkość, przyspieszenie oraz odstęp do pojazdu poprzedzającego, określanego jako lider. Decyzje kierowcy zależą przede wszystkim od aktualnej odległości między pojazdami, prędkości własnej, prędkości lidera, różnicy tych prędkości oraz przyjętego czasu reakcji. W najprostszym ujęciu model ten odwzorowuje więc proces utrzymywania bezpiecznego odstępu przy jednoczesnym dążeniu do płynnej jazdy i zachowania możliwie zbliżonej prędkości względem pojazdu poprzedzającego [57].



Rys. 16. Oznaczenia pozycji pojazdów względem siebie. Źródło: Opr. własne

Jednym z najwcześniejszych ujęć modelu podążania za liderem był model Pipesa z 1953 r. [127], zaliczany do grupy modeli bezpiecznego odstępu. Jego podstawą jest prosta reguła, zgodnie z którą kierowca powinien zachowywać co najmniej jedną długość pojazdu od pojazdu poprzedzającego na każde 16,1 km/h prędkości jazdy [10, 57]. Na tej podstawie wymagany odstęp między pojazdami można zapisać w postaci (2).

$$D_n(v) = L_n \left(1 + \frac{v_n}{16,1} \right) \quad (2)$$

gdzie:

- $D_n(v)$ – odstęp między pojazdem n a pojazdem lidera [m],
- L_n – długość pojazdu n [m],
- v_n – prędkość pojazdu n [km/h].

Zależność ta oznacza, że minimalny wymagany odstęp rośnie liniowo wraz z prędkością pojazdu. Choć model Pipesa ma bardzo uproszczony charakter, stanowi jedno z pierwszych formalnych ujęć relacji między prędkością pojazdu a odstępem od lidera.

Kolejny istotny kierunek rozwoju modeli podążania za liderem stanowiły modele bodziec–reakcja, rozwijane przede wszystkim w pracach grupy General Motors na przełomie lat 50. i 60. XX wieku. W podejściu tym zachowanie pojazdu podążającego traktowane jest jako reakcja kierowcy na bodziec wynikający ze zmiany warunków ruchu przed pojazdem. Reakcją jest najczęściej przyspieszenie lub opóźnienie pojazdu, natomiast bodźcem może być m.in. różnica prędkości między pojazdem podążającym a pojazdem poprzedzającym. Ogólną ideę takiego modelu można zapisać w uproszczonej postaci za pomocą wzoru (3) [10].

$$a_n(t + \tau) = \lambda(v_{n-1}(t) - v_n(t)) \quad (3)$$

gdzie:

$a_n(t + \tau)$ – reakcja w postaci przyspieszenia lub opóźnienia pojazdu podążającego n po upływie czasu reakcji $[m/s^2]$,

τ – czas reakcji kierowcy pojazdu n $[s]$,

λ – współczynnik wrażliwości $[1/s]$.

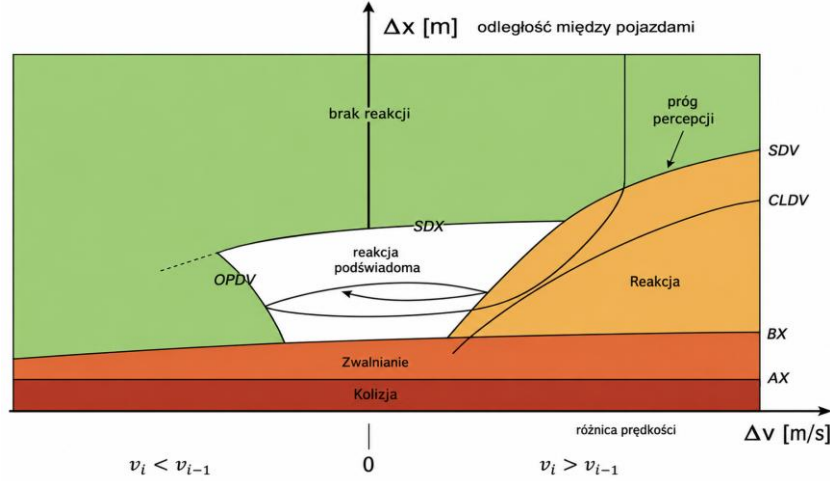
Zależność ta oznacza, że kierowca dostosowuje prędkość pojazdu do ruchu lidera z pewnym opóźnieniem, a intensywność tej reakcji zależy od przyjętego parametru wrażliwości. W porównaniu z modelem Pipesa podejście bodziec–reakcja lepiej oddaje dynamiczny charakter procesu podążania, ponieważ uwzględnia nie tylko wymagany odstęp, lecz także zmianę sytuacji ruchowej w czasie, a także wprowadza czynnik ludzki w postaci opóźnienia reakcji.

Dalszy rozwój modeli podążania za liderem obejmował m.in. modele bezpiecznej odległości, w których wymagany odstęp między pojazdami wynika już nie tylko z prostej zależności od prędkości, lecz także z warunków uniknięcia kolizji. W tego typu ujęciach zakłada się, że pojazd podążający powinien zachować taki odstęp od lidera, aby w przypadku nagłego hamowania pojazdu poprzedzającego możliwe było bezpieczne zatrzymanie lub odpowiednie dostosowanie prędkości. Uwzględniane są więc m.in.: czas reakcji kierowcy, prędkości obu pojazdów, przyspieszenia i opóźnienia hamowania oraz minimalny odstęp przy zatrzymaniu. Przykładem rozwinięcia tej grupy modeli jest model Gippsa [48] z 1981 r., w którym prędkość pojazdu w kolejnym kroku obliczeniowym jest ograniczana zarówno przez prędkość swobodną, jak i przez warunek bezpieczeństwa względem pojazdu poprzedzającego. Modele te pozwoliły lepiej opisać proces dostosowywania prędkości w warunkach zmiennego ruchu, pozostając jednak w nurcie podejść opartych na kryterium bezpieczeństwa odstępów [10, 163].

Odrębną grupę stanowią modele psychofizyczne, określane również jako modele progów percepcji. W podejściu tym zakłada się, że kierowca nie reaguje na każdą, nawet niewielką zmianę odległości lub prędkości pojazdu poprzedzającego, lecz dopiero wtedy, gdy zmiana ta zostanie przez niego zauważona i przekroczy określony próg percepcji. Zachowanie pojazdu podążającego zależy więc nie tylko od rzeczywistego odstępu i różnicy prędkości względem lidera, ale także od sposobu postrzegania sytuacji ruchowej przez kierowcę [10, 57]. Do najważniejszych przedstawicieli tej grupy należą modele Wiedemanna. Pierwszy z nich, *Wiedemann-74 (W-74)*, został opracowany w 1974 r. [173], natomiast jego późniejszym rozwinięciem jest model *Wiedemann-99 (W-99)* [129]. *Wiedemann-74* jest szczególnie odpowiedni do odwzorowania ruchu miejskiego oraz odcinków przeplatania przy niższych prędkościach, natomiast *Wiedemann-*

99 jest modelem bardziej rozbudowanym parametrycznie, stosowanym m.in. w modelowaniu ruchu na autostradach i drogach ekspresowych [13, 129].

W obu modelach kierowca nie reaguje w sposób ciągły na każdą zmianę położenia lub prędkości pojazdu poprzedzającego, lecz zmiana sposobu jego jazdy następuje dopiero po przekroczeniu określonych progów percepcji [10, 57, 129] (Rys. 17).



Rys. 17. Stany podążania w modelu podążania za liderem Wiedemanna-74. Źródło: [129]

W zależności od odstępu od lidera oraz różnicy prędkości między pojazdami kierowca może znajdować się w jednym z podstawowych stanów jazdy: jazdy swobodnej, zbliżania, podążania albo hamowania. W stanie jazdy swobodnej pojazd nie jest istotnie ograniczany przez lidera i dąży do osiągnięcia prędkości pożądaney. W stanie zbliżania kierowca dostosowuje prędkość do wolniejszego pojazdu poprzedzającego, natomiast w stanie podążania utrzymuje odstęp bezpieczeństwa bez wyraźnego przyspieszania lub hamowania. Stan hamowania występuje wtedy, gdy odstęp od lidera spada poniżej wartości uznawanej za bezpieczną. Przejścia między tymi stanami zależą od progów opisanych funkcjami odstępu i różnicy prędkości, a także od indywidualnych cech kierowcy i pojazdu [10, 57, 129].

Podstawowymi wielkościami wykorzystywanymi do opisu odstępu w modelu W-74 są AX i BX , które określają pożądaną odległość między pojazdami. Wielkość AX opisuje odstęp w warunkach postoju. Natomiast BX jest wielkością zależną od prędkości, wykorzystywaną do wyznaczania minimalnej (ABX) i maksymalnej (SDX) odległości podążania.

W implementacji modelu W-74 zastosowanej w programie mikrosymulacyjnym Vis-sim wielkości te wyznaczone są zgodnie z zależnościami (4) [13].

$$\begin{aligned} AX &= AX_{add} + L_p + Z_{N(0,0.3)} \\ BX &= (BX_{add} + BX_{mult} \cdot Z_{N(0.5,0.15)}) \cdot \sqrt{v} \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie:

AX_{add} – zadawany w programie Vissim parametr kalibracyjny, określający bazową wartość odstępu między pojazdami w warunkach postoju [m],

BX_{add} – zadawany w programie Vissim parametr kalibracyjny, określający addytywną składową odstępu bezpieczeństwa, wpływającą na wartość pożądanego odstępu między pojazdami podczas jazdy [m],

BX_{mult} – zadawany w programie Vissim parametr kalibracyjny, stanowiący multiplikatywną składową odstępu bezpieczeństwa [m],

- L_p – długość pojazdu poprzedzającego [m],
 $Z_{N(m,s)}$ – zmienna losowa o rozkładzie normalnym, średniej m i odchyleniu standardowym s ,
 v – mniejsza z prędkości lidera i pojazdu poruszającego się w kolumnie [m/s].

Z modelem związane są również funkcje progów *SDV*, *CLDV* i *OPDV* odnoszące się do różnicy prędkości względem lidera. Pierwszy z nich oznacza moment rozpoznania zbliżania się do wolniejszego pojazdu poprzedzającego, drugi wyznacza dodatkowy próg reakcji hamowania podczas zbliżania się do lidera, a trzeci określa moment ponownego przyspieszania, gdy pojazd podążający porusza się wolniej od pojazdu poprzedzającego [10].

Model podążania za liderem nie wyczerpuje pełnego zakresu zachowań kierowców odwzorowywanych w mikrosymulacji. Istotne znaczenie mają również inne modele, np. modele zmiany pasa ruchu, akceptacji luki czy przejazdu przez punkty kolizji. Mechanizmy te określają, w jaki sposób pojazdy zajmują pasy ruchu, przygotowują się do skrętu, reagują na pojazdy na pasach sąsiednich oraz podejmują decyzje w sytuacjach konfliktowych, np. na skrzyżowaniach, wlotach podporządkowanych czy przejściach dla pieszych. Uzupełnieniem opisu zachowań pojazdów są modele ruchu pieszego, pozwalające odwzorować przemieszczanie się pieszych oraz ich interakcje z ruchem kołowym, szczególnie w rejonie przejść, przystanków i węzłów przesiadkowych [10, 129].

Opracowanie mikrosymulacyjnego modelu bazowego wymaga zgromadzenia danych opisujących zarówno infrastrukturę i organizację ruchu, jak i rzeczywisty sposób funkcjonowania analizowanego układu. Do podstawowych danych należą m.in.: geometria sieci, liczba i układ pasów ruchu, ograniczenia prędkości, relacje skrętne, zasady pierwszeństwa, programy sygnalizacji świetlnej, natężenia ruchu, struktura kierunkowa, czasy przejazdu, długości kolejek oraz informacje dotyczące publicznego transportu zbiorowego, w tym: przebieg tras, lokalizacja przystanków i czasy postoju. Budowa modelu bazowego ma zwykle charakter iteracyjny, ponieważ obejmuje nie tylko wprowadzenie danych wejściowych, lecz także dobór i dostrajanie parametrów zachowań uczestników ruchu, tak aby model możliwie wiernie odwzorowywał obserwowane warunki. Etap ten należy odróżnić od walidacji, rozumianej jako niezależne sprawdzenie zgodności wyników modelu z danymi obserwowanymi, które nie były bezpośrednio wykorzystywane do jego dostrajania [13, 144, 159].

Wyniki mikrosymulacji mogą obejmować m.in.: czasy przejazdu, opóźnienia, długości kolejek, liczbę zatrzymań, prędkości, straty czasu oraz miary odnoszące się do funkcjonowania publicznego transportu zbiorowego. Ich interpretacja wymaga jednak uwzględnienia ograniczeń modelu, w szczególności dużych wymagań dotyczących danych wejściowych, czasochłonności opracowania modelu, wrażliwości na parametry zachowań oraz losowości części procesów ruchowych. Z tego względu wyniki powinny być oceniane w odniesieniu do przyjętych założeń, jakości odwzorowania stanu bazowego oraz zmienności rezultatów uzyskiwanych w kolejnych przebiegach symulacji.

Prawidłowo zbudowany model mikrosymulacyjny umożliwia szczegółowe odwzorowanie działania sygnalizacji świetlnej, w tym zmiennoczasowej. Jest to szczególnie istotne w analizach aktywnego priorytetu dla publicznego transportu zbiorowego, ponieważ pozwala ocenić wpływ decyzji sterujących na przejazd pojazdów transportu zbiorowego oraz warunki ruchu pozostałych uczestników. Model umożliwia więc analizę skutków priorytetu zarówno z perspektywy pojazdu objętego uprzywilejowaniem, jak i całego lokalnego układu ruchu, przez co podejście to zostało uznane za niezbędne do uwzględnienia w przedmiotowych badaniach w niniejszej rozprawie.

2.3. Wielokryterialne wspomaganie decyzji

2.3.1. Istota wielokryterialnego wspomagania decyzji

Problem decyzyjny najogólniej oznacza sytuację, w której zachodzi potrzeba wyboru sposobu działania spośród co najmniej dwóch dopuszczalnych możliwości - rozwiązań. Obejmuje on nie tyle samą decyzję, ale cały proces do niej prowadzący, tzn. rozpoznanie problemu, określenie celu i sformułowanie możliwych wariantów działania [17, 157].

Jedną z cech problemów decyzyjnych jest zróżnicowanie stopnia ich ustrukturyzowania. Niektóre z nich dają się przedstawić w sposób przejrzysty i jednoznaczny, inne zaś cechują się niepełnością danych, trudnością oceny konsekwencji i większym znaczeniem subiektywnego osądu decydenta. Wielokryterialne problemy decyzyjne należą do grupy problemów słabo ustrukturyzowanych określanych również w sensie matematycznym jako źle zdefiniowane [157, 190]. Wynika to z faktu, że rozpatrywane warianty działania oceniane są jednocześnie z wielu punktów widzenia. Obecność wielu kryteriów oceny, a często również wielu interesariuszy i wielu częściowo sprzecznych interesów sprawia, że niemożliwe staje się wskazanie jednego rozwiązania bezwzględnie najlepszego ze względu na wszystkie aspekty oceny, czyli rozwiązania globalnie optymalnego. Poprawa wyniku względem jednego kryterium jest bowiem często osiągnięta kosztem pogorszenia wyniku innego [51, 157]. W praktyce spotyka się niekiedy próby upraszczania takich problemów przez sprowadzanie ich do postaci jednokryterialnej, na przykład przez agregację wielu kryteriów cząstkowych do jednego kryterium globalnego, rozumianego jako syntetyczna miara łącznej oceny wariantu (np. agregowanie do kryterium kosztu). Zabieg taki może ułatwiać formalny zapis problemu i jego obliczeniową analizę, lecz jednocześnie prowadzi do uproszczenia rzeczywistej struktury problemu decyzyjnego. Zacierają bowiem relacje zysków i strat pomiędzy poszczególnymi kryteriami, a tym samym utrudniają uchwycenie kompromisów, które w problemach wielokryterialnych mają znaczenie podstawowe [51, 157].

W tym kontekście zasadnicze znaczenie ma pojęcie dominacji. Wariant a dominuje wariant b , jeżeli nie jest od niego gorszy według żadnego kryterium i jednocześnie jest lepszy według co najmniej jednego z nich. Jeżeli taki warunek nie zachodzi, warianty nie mogą być jednoznacznie uporządkowane w sensie dominacji [51]. Konsekwencją tego stanu rzeczy jest występowanie zbioru rozwiązań niezdominowanych, nazywanych również sprawnymi. Są to rozwiązania, dla których nie istnieje inny wariant wyraźnie lepszy. Spośród tego zbioru nie wybiera się więc rozwiązania obiektywnie najlepszego, lecz poszukuje się w ramach analizy wielokryterialnej rozwiązania kompromisowego, odpowiadającego preferencjom decydenta [51, 157, 190].

Wspomniana analiza wielokryterialna jest procesem rozwiązywania wielokryterialnego problemu decyzyjnego poprzez uporządkowane zestawienie wariantów, kryteriów i ocen oraz przez uwzględnienie preferencji decydenta w taki sposób, aby możliwe było sformułowanie rekomendacji decyzyjnej [51, 157, 138, 190].

Rozwój analizy wielokryterialnej jako wyodrębnionego obszaru badań operacyjnych wiąże się przede wszystkim z drugą połową XX wieku [51]. W literaturze wskazuje się jednak, że podstawy tego nurtu kształtowały się znacznie wcześniej, między innymi w związku z XVIII-wiecznymi rozważaniami Franklina nad porównywaniem argumentów i pracami Condorceta nad preferencjami zbiorowymi, a także z późniejszym rozwojem teorii użyteczności u Edgewortha oraz koncepcją efektywności Pareta, która do dziś pozostaje jednym z fundamentów analizy wielokryterialnej. Istotne znaczenie dla formalizacji tej problematyki miały również prace Koopmansa [92] nad pojęciem wektora efektywnego, Kuhna i Tuckera [95] nad warunkami występowania rozwiązań

niezdominowanych oraz Charnesa i Coopera [21] skupione na programowaniu celowym [90, 91, 157].

W dalszym rozwoju dyscypliny ukształtowały się dwa główne nurty: amerykański oraz europejski. Nurt amerykański, kojarzony przede wszystkim z pracami Keeneya i Raiffy nad wieloatrybutową teorią użyteczności, opierał się na agregacji ocen cząstkowych do jednej funkcji użyteczności i zakładał porównywalność wszystkich par wariantów. Nurt europejski, wiązany głównie z pracami Roya, rozwijał podejścia oparte na relacji przewyższania, pozwalające uwzględniać także sytuacje nieporównywalności wariantów [51, 90, 91].

Współcześnie podział na nurt amerykański i europejski ma przede wszystkim znaczenie porządkujące, ponieważ granice między tymi tradycjami stopniowo się zacierały, a rozwój wielokryterialnego wspomaganie decyzji (WWD) doprowadził do powstania podejść łączących różne sposoby modelowania preferencji i agregacji ocen [51]. Jednocześnie w najnowszych zastosowaniach coraz większą rolę przypisuje się uwzględnianiu w analizie wielokryterialnej m.in. danych niedeterministycznych, niepewności preferencji oraz świadomego doboru metody do charakteru problemu decyzyjnego [139].

Niezależnie od różnic pomiędzy poszczególnymi nurtami i metodami, analiza wielokryterialna opiera się w głównej mierze na trzech podstawowych elementach: zbiorze wariantów, zbiorze kryteriów oraz zbiorze ocen wariantów względem wybranych kryteriów [190].

Zbiór wariantów powinien obejmować rozwiązania rzeczywiście dopuszczalne i sensowne z punktu widzenia danego problemu. Warianty muszą być zdefiniowane w sposób umożliwiający ich porównanie według wspólnego zestawu kryteriów. Oznacza to, że powinny być osadzone w tym samym kontekście decyzyjnym i opisane z dostateczną precyzją, aby ocena nie miała charakteru przypadkowego [51, 157].

Jeszcze większe znaczenie ma poprawna konstrukcja zbioru kryteriów. W literaturze wskazuje się, że powinien on być możliwie kompletny i umożliwiający ocenę wariantów ze wszystkich stron istotnych dla rozważanego problemu. Nie powinien jednak zawierać kryteriów redundantnych tj. nadmiarowych, które opisują w istocie ten sam aspekt pod różnymi nazwami [51, 190]. Przykładem takiej pary kryteriów jest w problemie oceny lokalizacji nieruchomości odległość od centrum miasta i czas dojazdu do centrum miasta, gdyż ich wartości z reguły są silnie skorelowane.

Nie mniej ważnym składnikiem analizy wielokryterialnej są preferencje decydenta. Określają one sposób postrzegania ważności kryteriów, ocenę różnic pomiędzy wariantami oraz akceptowalne kompromisy między poszczególnymi aspektami oceny. To one pozwalają przejść od zbioru rozwiązań niezdominowanych do rekomendacji praktycznie użytecznej. Rekomendacja taka może, w zależności od obranego celu analizy przyjmować postać:

- wyboru jednego wariantu,
- uszeregowania wariantów od najlepszego do najgorszego,
- przyporządkowania wariantów do określonych, predefiniowanych klas.

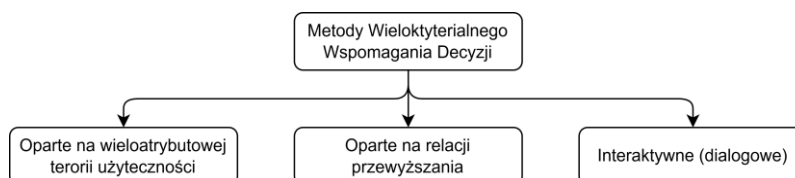
Co istotne, uzyskany wynik analizy nie zastępuje decydenta ani nie obliguje go do realizacji rekomendowanego rozwiązania, lecz dostarcza mu uporządkowanych podstaw do podjęcia racjonalnej decyzji [51, 138, 157, 190]. Tak rozumiana geneza i idea WWD prowadzi bezpośrednio do potrzeby uporządkowania istniejących podejść metodycznych. Skoro problemy wielokryterialne różnią się strukturą, sposobem wyrażania preferencji i oczekiwaną postacią wyniku, naturalną konsekwencją jest wykształcenie się wielu grup metod, odmiennych zarówno pod względem założeń teoretycznych, jak i praktyki zastosowań.

2.3.2. Klasyfikacja metod WWD

Na przestrzeni lat opracowano wiele metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji. Proces ich powstawania przebiegał z jednej strony w ramach różnych nurtów i szkół badawczych, z drugiej zaś stanowił odpowiedź na zróżnicowaną specyfikę problemów decyzyjnych, dla których metody te były tworzone. Poszczególne podejścia różnią się od siebie m.in. sposobem modelowania preferencji decydenta, zakresem wymaganych danych czy oczekiwaną postacią wyniku analizy. Z tego względu trudno wskazać jedną typologię, która jednocześnie porządkowałaby te podejścia i w pełni rozgraniczała specyfikę każdego z nich.

W literaturze przedmiotu utrwalił się ogólny podział, zgodnie z którym wyróżnia się trzy zasadnicze grupy podejść (Rys. 18):

- oparte na wieloatrybutowej teorii użyteczności,
- oparte na relacji przewyższania,
- interaktywne (dialogowe).



Rys. 18. Podstawowy podział metod WWD. Źródło: Opr. własne

Ujęcie to przywoływane jest zarówno w starszych opracowaniach stanowiących podstawę rozwoju dyscypliny [132, 133, 164, 165], jak i w późniejszych pracach przeglądowych oraz aplikacyjnych [33, 39, 46, 147, 148, 180, 190]. Dlatego w niniejszym podrozdziale przyjęto je jako punkt wyjścia do omówienia głównych rodzin metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji. Podział ten należy jednak traktować jedynie jako ogólny schemat porządkujący, a nie jako klasyfikację o charakterze bezwzględnie rozłącznym. W literaturze wskazuje się, że wyróżniane grupy metod mogą odnosić się do różnych poziomów opisu, a część metod można przypisać nie tylko do jednej rodziny, lecz także do kombinacji kilku podejść [164]. Potwierdzają to przykłady metod mieszanych, takich jak MAPPAC, opisywana jako rozwiązanie pośrednie między metodami przewyższania a podejściem opartym na wieloatrybutowej teorii użyteczności [147].

Metody oparte na wieloatrybutowej teorii użyteczności (*ang. multi-attribute utility theory*, MAUT), wywodzące się z amerykańskiego nurtu WWD, opierają się na założeniu, że złożone preferencje decydenta można wyrazić za pomocą jednej funkcji użyteczności. Funkcja ta łączy oceny wariantu uzyskane na wielu kryteriach w jedną ocenę globalną, dzięki czemu możliwe staje się porównywanie wariantów według wspólnej miary. W tym ujęciu problem wielokryterialny zostaje więc sprowadzony do postaci, w której każdy wariant otrzymuje syntetyczną ocenę odzwierciedlającą jego łączną atrakcyjność dla decydenta [132, 133, 164]. Metody tej rodziny zakładają, że preferencje decydenta można przedstawić jako relację pozwalającą porównać każdą parę wariantów. Oznacza to, że dla dowolnych dwóch wariantów decydent powinien być w stanie wskazać, który z nich preferuje, albo uznać je za równoważne [133, 164].

Charakterystyczną cechą tej grupy metod jest możliwość wzajemnego równoważenia wyników uzyskiwanych na różnych kryteriach. Gorsza ocena wariantu w jednym aspekcie może zostać zrekompensowana lepszą oceną w innym, o ile łączna użyteczność wariantu pozostaje wysoka. W rezultacie o pozycji wariantu decyduje nie pojedyncze kryterium, lecz jego zagregowana ocena końcowa [133].

Metody te są szczególnie przydatne wtedy, gdy decydent akceptuje założenie o pełnym uporządkowaniu wariantów i gdy możliwe jest względnie jednoznaczne określenie jego preferencji. Ich ograniczeniem jest jednak założenie, że taka globalna funkcja preferencji rzeczywiście istnieje i adekwatnie opisuje sposób myślenia decyidenta. Dlatego autorzy niektórych publikacji wskazują, że teoria użyteczności jest interesująca praktycznie, ale wymaga ostrożności, ponieważ jej założenia mogą być zbyt restrykcyjne wobec realnych problemów decyzyjnych [133, 164]. Do tej grupy metod zaliczane są m.in. MAUT/MAVT, SMART oraz UTA. W części źródeł do tej rodziny włączana jest również metoda AHP (np. [148]), jednak inne opracowania traktują ją jako podejście odrębne albo wskazują na trudność jej jednoznacznego przyporządkowania wg klasycznego podziału [17, 33, 165, 168].

Metody oparte na relacjach przewyższania (*ang. outranking methods*) wywodzą się z europejskiego, w szczególności francuskiego nurtu WWD. Ich podstawą jest modelowanie preferencji za pomocą relacji zachodzących między wariantami, a nie poprzez przypisanie każdemu wariantowi jednej końcowej wartości. Kluczowe znaczenie ma tu relacja przewyższania, która pozwala ocenić, czy przy dostępnych informacjach i przyjętych kryteriach istnieją wystarczające podstawy, aby uznać jeden wariant za co najmniej tak dobry jak drugi [132, 133, 164].

Charakterystyczną cechą metod przewyższania jest dopuszczenie nieporównywalności wariantów. Oznacza to, że w przypadku części porównań metoda może nie wskazać jednoznacznej przewagi żadnego z wariantów, a jednocześnie nie musi traktować ich jako równoważnych. Pozwala to zachować niejednoznaczność typową dla problemów, w których kryteria są konfliktowe, jakościowo odmienne lub trudne do wspólnego uporządkowania [132, 133, 164].

Istotne znaczenie ma również ograniczona kompensacja między kryteriami, np. przez zastosowanie progu weta. Oznacza to, że bardzo dobra ocena wariantu na części kryteriów nie musi wystarczyć do uznania go za przewyższający inny wariant, jeżeli na jednym z kryteriów osiąga on wynik niedopuszczalnie słaby. W ten sposób metody przewyższania ograniczają mechaniczne równoważenie słabych i mocnych stron wariantu [133, 164].

Metody przewyższania są szczególnie przydatne w problemach konfliktowych, słabo ustrukturyzowanych i trudnych do opisanego za pomocą jednej miary oceny. Ograniczeniem tych metod jest większa złożoność interpretacyjna, ponieważ wynik zależy od sposobu konstrukcji relacji przewyższania, przyjętych wag, progów oraz procedury dalszego wykorzystania tej relacji. Do tej grupy metod zaliczane są m.in.: ELECTRE III, PROMETHEE, ORESTE, MELCHIOR [132, 133, 147, 164].

Trzecią ze wskazanych rodzin metod wielokryterialnego wspomagania decyzji stanowią metody interaktywne (*ang. interactive methods*). Ich istotą jest prowadzenie analizy w formie dialogu między decydentem a modelem wspomagającym decyzję. Preferencje decyidenta nie muszą być w pełni określone na początku postępowania, ponieważ są stopniowo rozpoznawane i doprecyzowywane w trakcie kolejnych etapów analizy [132, 133, 164].

Charakterystyczną cechą tej grupy metod jest iteracyjny przebieg procedury. W kolejnych krokach generowane są rozwiązania kompromisowe lub zawężone obszary poszukiwań, które następnie są oceniane przez decyidenta. Na podstawie jego reakcji, wskazanych preferencji, akceptowalnych ustępstw lub oczekiwanych kierunków poprawy model wyznacza kolejną propozycję. Proces ten powtarza się aż do momentu uzyskania rozwiązania uznanego przez decyidenta za satysfakcjonujące [132, 133, 164].

W metodach interaktywnych szczególne znaczenie ma duże zaangażowanie decyidenta w proces analizy. Decydent nie tylko przekazuje informacje o swoich

preferencjach, ale również lepiej rozpoznaje strukturę problemu, możliwe kompromisy między kryteriami oraz konsekwencje własnych wyborów. W tym sensie metoda nie zastępuje decydenta, lecz wspiera go w stopniowym kształtowaniu stanowiska wobec analizowanego problemu [133, 164].

Wynikiem zastosowania metod interaktywnych nie musi być pełny ranking wszystkich wariantów. Celem jest raczej zawężenie przestrzeni rozwiązań i doprowadzenie do wyboru rozwiązania kompromisowego, które jest zgodne z preferencjami ujawnionymi w toku dialogu. Dlatego podejście to szczególnie dobrze odpowiada problemom, w których preferencje są niepewne, zmienne, trudne do formalnego zapisania albo ujawniają się dopiero podczas porównywania kolejnych propozycji [132, 133, 164].

Zaletą metod interaktywnych jest realistyczne ujęcie roli decydenta oraz możliwość korygowania ocen w trakcie analizy. Ich ograniczeniem jest natomiast czasochłonność oraz zależność wyniku od jakości dialogu między decydentem, analitykiem i procedurą obliczeniową. Skuteczność tych metod zależy więc nie tylko od formalnego modelu, ale także od zdolności decydenta do formułowania ocen, akceptowania kompromisów i stopniowego doprecyzowywania własnych preferencji. Do tej grupy metod zaliczane są m.in.: STEM, LBS, SWT, Pareto-race [132, 133, 147, 164].

Jak wspomniano już na wstępie, przedstawiony podział należy traktować jako ważny punkt odniesienia, lecz nie jako wyczerpującą i zamkniętą klasyfikację metod WWD. W literaturze występują bowiem także jego odmienne ujęcia, w których akcentowane jest np. wielocelowe programowanie matematyczne [164], metody decyzji grupowych i negocjacji [18] albo dezagregacji preferencji [33]. W nowszych pracach klasyfikacja metod coraz częściej wiązana jest natomiast z problemem ich doboru do określonej sytuacji decyzyjnej, a więc z analizą cech metod, wymagań informacyjnych i rodzaju rekomendacji, jaką dana metoda może dostarczyć [168].

Jedną z takich osi jest cel analizy, czyli oczekiwana postać rekomendacji decyzyjnej. W tym ujęciu wyróżnia się metody służące wyborowi jednego lub kilku najlepszych wariantów, metody porządkowania wariantów od najlepszego do najgorszego oraz metody klasyfikacji lub sortowania, w których warianty przypisywane są do z góry określonych klas [17, 33, 148, 165].

Z punktu widzenia praktyki zastosowań istotny jest również charakter danych wejściowych. W literaturze wskazuje się podział na metody wykorzystujące dane ilościowe, jakościowe lub mieszane [190]. Osobną oś klasyfikacji stanowi sposób traktowania niepewności informacji. W tym ujęciu wyróżnia się metody deterministyczne, zakładające jednoznacznie określone dane i parametry, oraz podejścia niedeterministyczne, umożliwiające uwzględnienie losowości, rozmytości, nieprecyzyjności lub niepełności informacji [16, 17, 190].

Metody WWD bywają również klasyfikowane ze względu na sposób pozyskiwania informacji preferencyjnej. Preferencje decydenta mogą być określane przed rozpoczęciem obliczeń (łac. *a priori*), po zapoznaniu się z możliwymi rozwiązaniami (łac. *a posteriori*) albo w trakcie procedury, w sposób interaktywny. Różnić może się także forma ich wyrażania: od wag kryteriów, przez progi preferencji, nierozróżnialności i weta, po bezpośrednie porównywanie wariantów parami [148, 190].

Wielość metod oraz różnorodność możliwych kryteriów ich klasyfikacji sprawiają, że samo przyporządkowanie metody do jednej z rodzin nie wystarcza do uzasadnienia jej zastosowania w konkretnym problemie decyzyjnym. W nowszej literaturze (np. [139, 168]) coraz większą uwagę zwraca się więc nie tylko na klasyfikację metod, lecz także na problem ich świadomego doboru. Podkreśla się, że metody WWD różnią się m.in.: zakresem wymaganych danych, sposobem modelowania preferencji, poziomem kompensacyjności, odpornością na niepewność, złożonością obliczeniową, transparentnością

wyniku oraz dostępnością implementacji. W konsekwencji wybór metody WWD sam może być traktowany jako problem wielokryterialny [160, 168], wymagający uwzględnienia wielu, częściowo konkurencyjnych przesłanek. Zagadnienie to stanowi przedmiot kolejnego podrozdziału.

2.3.3. Problematyka doboru metody do specyfiki problemu decyzyjnego

Duża liczba metod WWD sprawia, że istotnym elementem analizy staje się nie tylko samo rozwiązanie problemu decyzyjnego, lecz również świadomy dobór metody, która zostanie w tym celu zastosowana. W konsekwencji wybór metody nie powinien być traktowany jako czynność wyłącznie techniczna, lecz jako decyzja wpływająca na przebieg i wiarygodność całej procedury wspomaganie decyzji.

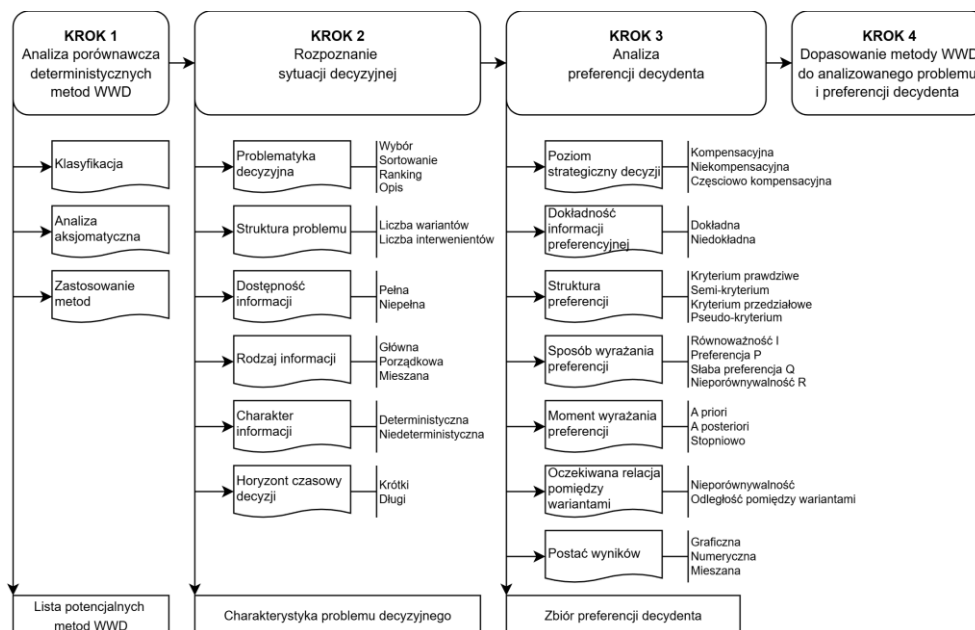
Znaczenie właściwego doboru metody wynika również z faktu, że zastosowanie różnych procedur do tego samego problemu może prowadzić do odmiennych rezultatów. Różnice te mogą wynikać m.in. z odmiennego sposobu wykorzystania wag, innego mechanizmu agregacji ocen, różnic w normalizacji danych oraz z obecności dodatkowych parametrów wpływających na rekomendację końcową. Wybór metody dokonywany arbitralnie może zatem obniżać wiarygodność rekomendacji, ponieważ zastosowana metoda nie zawsze zostaje właściwie dopasowana do rzeczywistej struktury problemu decyzyjnego [139, 168].

W literaturze proponowane są różne sposoby formalizacji procesu wyboru metody WWD. Część opracowań koncentruje się na identyfikacji kryteriów, według których można porównywać dostępne metody. Trzaskalik [160] przywołuje w tym kontekście modele Gershona [47] i Tecle'a [156], obejmujące odpowiednio 27 i 49 kryteriów odnoszących się m.in. do: cech problemu decyzyjnego, właściwości metody, wymagań implementacyjnych, roli decydenta oraz postaci rozwiązania. Podejście to wskazuje, że dobór metody powinien wynikać z oceny wielu cech, a nie jedynie z popularności danej procedury.

Ujęcie Sawickiej [139] można traktować jako proceduralne rozwinięcie tej logiki. Autorka proponuje czteroetapowy schemat postępowania, obejmujący: analizę porównawczą metod WWD, rozpoznanie sytuacji decyzyjnej, analizę preferencji decydenta oraz dopasowanie metody do problemu i preferencji decydenta. Przyjęty przez nią algorytm postępowania przedstawiono na Rys. 19. Schemat Sawickiej porządkuje dobór metody WWD jako proces przechodzenia od ogólnej analizy dostępnych metod do wyboru procedury najlepiej dopasowanej do konkretnego problemu. Jego istotą jest równoczesne uwzględnienie dwóch grup przesłanek: charakterystyki sytuacji decyzyjnej oraz preferencji decydenta. Oznacza to, że metoda nie jest wybierana wyłącznie na podstawie jej właściwości formalnych, lecz także z uwzględnieniem: rodzaju problemu, dostępnych informacji, sposobu wyrażania preferencji i oczekiwanej postaci wyniku [139].

Podobny kierunek rozwijają Wątróbski i in. [168], którzy wskazują, że ze względu na dużą liczbę metod WWD ich właściwy dobór staje się istotnym problemem metodycznym, a niewłaściwe zastosowanie metody może obniżać jakość rekomendacji. Przykładem praktycznej formalizacji jest również praca Ziemby i Fabisiak [189], w której wybór metody oceny użyteczności serwisów internetowych został sformułowany jako odrębny problem wielokryterialny, z własnym zestawem kryteriów oceny metod.

Procedury wspierające dobór metody ograniczają arbitralność decyzji metodycznej, lecz nie zastępują roli analityka i decydenta. Ostateczny wybór wymaga zestawienia właściwości metod z praktycznymi wymaganiami problemu, takimi jak: dostępność danych, zrozumiałość wyniku, czasochłonność procedury czy możliwość uwzględnienia niepewności [168].



Rys. 19. Algorytm doboru metody WWD. Źródło: [139]

W kolejnym podrozdziale przedstawiono charakterystykę metody ELECTRE III, która w toku procesu oceny (patrz 4.1.3) dopasowania metod WWD do specyfiki problemu została wskazana w części badawczej niniejszej rozprawy.

2.3.4. Metoda ELECTRE III

ELECTRE III należy do grupy metod wielokryterialnego wspomagania decyzji opartych na relacji przewyższania. Ponieważ szczegółowe podstawy teoretyczne oraz pełny opis algorytmu ELECTRE III są szeroko omówione w literaturze przedmiotu, np. [40, 134], w niniejszym podrozdziale opis ograniczono do zasadniczych elementów procedury obliczeniowej, istotnych dla zrozumienia sposobu wykorzystania tej metody w pracy.

Punktem wyjścia do zastosowania metody jest przygotowanie zestawu danych wejściowych. W tym celu definiuje się zbiór wariantów decyzyjnych $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ oraz spójną rodzinę kryteriów $K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$, wraz z informacją o kierunku preferencji każdego z kryteriów. Ocenę wariantu a_i względem kryterium k_j oznacza się jako $k_j(a_i)$, a zestawienie wszystkich ocen tworzy macierz, która wraz z pozostałymi danymi stanowi podstawę dalszych obliczeń.

Właściwy przebieg analizy ująć można w czterech kolejnych etapach [140]:

- etap I: budowa modelu preferencji decydeny,
- etap II: konstrukcja wartościowanej relacji przewyższania,
- etap III: porządkowanie wariantów,
- etap IV: wyznaczenie rankingu finalnego.

Etap I polega na budowie modelu preferencji decydeny. Dla każdego kryterium k_j określa się wagę w_j , odzwierciedlającą jego względne znaczenie oraz progi: równoważności q_j , preferencji p_j i weta v_j . Progi te służą do określenia, jak duże różnice ocen wariantów są uznawane odpowiednio za nieistotne, wystarczające do stwierdzenia preferencji oraz na tyle istotne, że mogą zakwestionować relację przewyższania. Parametry te przyjmuje się z zachowaniem zależności $0 \leq q_j < p_j < v_j$.

W etapie II warianty porównuje się parami, określając wiarygodność stwierdzenia, że jeden z nich jest co najmniej tak dobry jak drugi. Uwzględnia się przy tym zarówno stopień zgodności kryteriów z takim stwierdzeniem, jak i ewentualny sprzeciw wynikający z niekorzystnej oceny wariantu w którymś z kryteriów. Następnie, w etapie III, na podstawie uzyskanych relacji przeprowadza się dwie procedury porządkowania: zstępującą, rozpoczynającą się od wariantów ocenianych jako najkorzystniejsze, oraz wstępującą, rozpoczynającą się od wariantów ocenianych jako najmniej korzystne.

Połączenie wyników obu procedur prowadzi w etapie IV do wyznaczenia rankingu finalnego, który nie musi stanowić pełnego porządku liniowego. Pierwsza pozycja wskazuje wariant lub grupę wariantów ocenionych najkorzystniej w zakresie przyjętych kryteriów i modelu preferencji, natomiast ostatnia pozycja odpowiada rozwiązaniom ocenionym najmniej korzystnie. Umieszczenie kilku wariantów na tej samej pozycji oznacza brak podstaw do ustalenia między nimi ścisłej kolejności i może wynikać zarówno z ich równoważności, jak i nieporównywalności. Dla dwóch dowolnych wariantów $a, b \in A$ ranking może zatem wskazywać preferencję wariantu a względem b (aPb), ich równoważność (aIb) albo nieporównywalność (aRb).

3. PROPOZYCJA METODY PRIORYTETYZACJI PTZ W RAMACH DZIAŁANIA SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ

3.1. Ogólna charakterystyka przyjętej metodyki badań

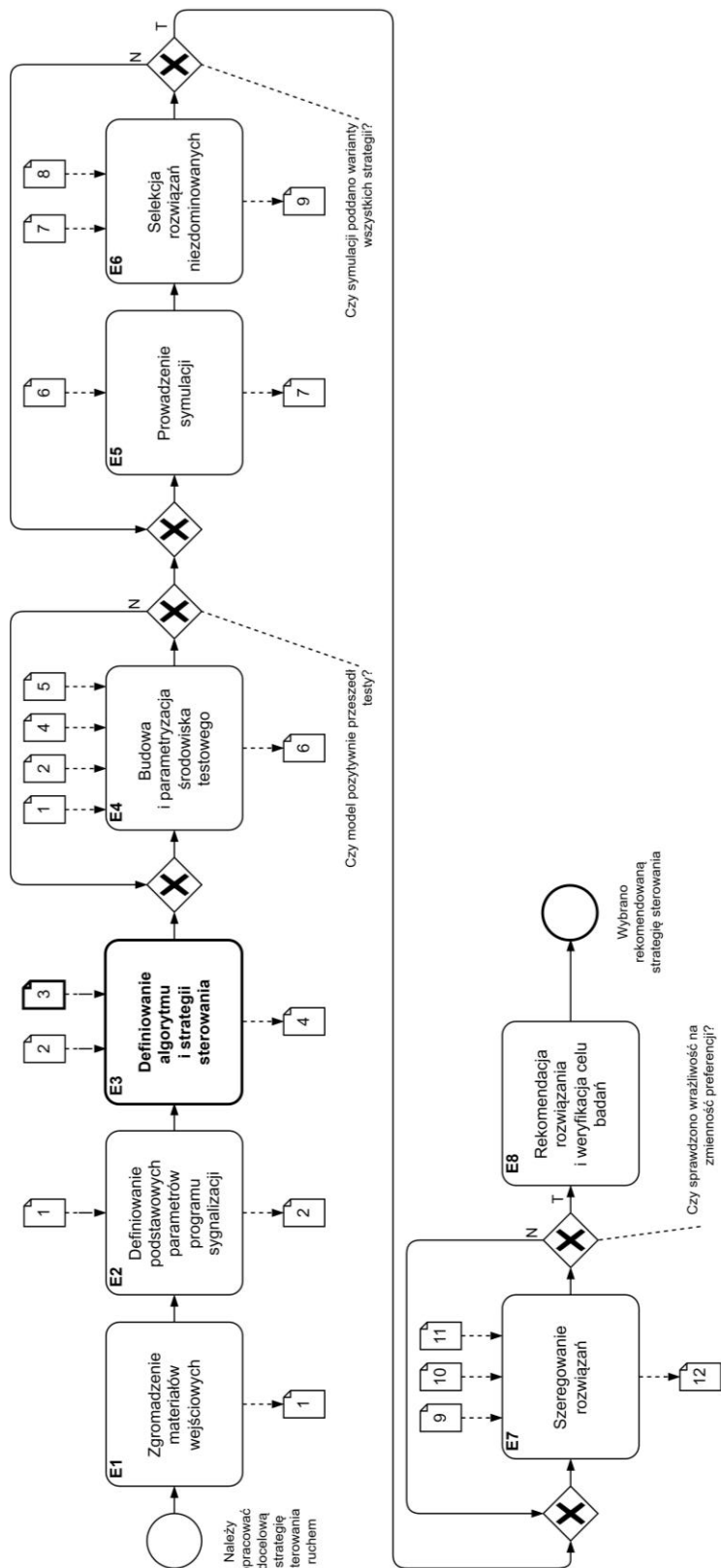
W niniejszej pracy zaproponowano autorską metodę priorytetyzacji PTZ z uwzględnieniem trzech kluczowych zmiennych sterujących, tj. napełnienia środka transportu PTZ, odchylenia kursu od harmonogramu oraz oczekiwania na obsługę. Kompleksowe zastosowanie tej metody w szerszym ujęciu stanowi metodyka badań, będąca uporządkowaną procedurą projektowania, oceny i wyboru wariantu priorytetowego sterowania ruchem w obszarze objętym analizą. Jest przeznaczona do stosowania w odniesieniu do określonego poligonu doświadczalnego, rozumianego jako rzeczywisty lub hipotetyczny układ transportowy, wyposażony w sygnalizację świetlną. Punktem wyjścia do zastosowania metodyki są charakterystyka geometryczna i ruchowa badanego układu, dostępne dane oraz przyjęty cel i kryteria oceny, natomiast jej rezultatem jest wskazanie wariantu sterowania rekomendowanego dla analizowanych warunków. Ze względu na trudność bezpośredniego testowania wielu wariantów sterowania w rzeczywistym systemie transportowym ich ocenę przeprowadza się z wykorzystaniem analiz symulacyjnych, opartych na mikroskopowym modelu ruchu pojazdów współpracującym z systemem sterowania sygnalizacją świetlną. Podejście to umożliwia porównywanie różnych strategii sterowania oraz ich wariantów w jednakowych i kontrolowanych warunkach. Graficzną reprezentację zaproponowanej metodyki przedstawiono na Rys. 20, natomiast dalszą część rozdziału poświęcono charakterystyce jej poszczególnych etapów i zasad ich realizacji.

Metodyka składa się z ośmiu etapów. Pierwszy z nich – E1 – stanowi wszelkie prace przygotowawcze mające na celu zaprojektowanie programu sygnalizacyjnego oraz zbudowanie wiarygodnego modelu symulacyjnego dla wybranego, rzeczywistego lub hipotetycznego skrzyżowania drogowego dalej wymiennie nazywanego poligonem doświadczalnym. Do prac tych zaliczono zebranie i przetworzenie danych takich jak:

- plan sytuacyjny organizacji ruchu, zawierający niezbędne informacje na temat geometrii skrzyżowania, jego dróg dolotowych, rozmieszczenia oznakowania poziomego i pionowego, elementów infrastruktury sygnalizacji świetlnej i systemu detekcji, warunkujących sposób poruszania się uczestników ruchu w jego obszarze;
- wolumeny natężenia ruchu pojazdów transportu indywidualnego uwzględniające informacje na temat struktury rodzajowej oraz kierunkowej pojazdów poruszających się w obrębie przedmiotowego skrzyżowania;
- harmonogramy kursowania pojazdów PTZ;
- rozkłady napełnienia pojazdów TI i PTZ;
- rozkłady odchylenia realizacji kursu pojazdów PTZ względem harmonogramu jazdy;
- natężenie ruchu pieszego na przejściach dla pieszych i przystankach PTZ,
- natężenie ruchu rowerowego.

Zebranie kompletu wyżej wymienionych charakterystyk pozwala na przejście do kolejnych etapów metodyki, związanych bezpośrednio z budową samego modelu oraz programu sygnalizacji.

Działania prowadzone w ramach etapu E2 skupione są na zdefiniowaniu podstawowych założeń programu sygnalizacji świetlnej. Obejmują one przede wszystkim planowanie grup sygnalizacyjnych, ustalenie ich kolizyjności względem siebie, obliczenia



LEGENDA

- 1 - Zbiór materiałów wejściowych; 2 - Podstawowe parametry programu; 3 - Założenia do tworzenia strategii sterowania; 4 - Zbiór strategii i wariantów sterowania; 5 - Zbiór narzędzi (Vissim, LISA+); 6 - Model symulacyjny; 7 - Zbiór wszystkich rezultatów; 8 - Wybrane kryteria oceny; 9 - Zbiór rezultatów niezdominowanych; 10 - Wybrana metoda WWD; 11 - model preferencji; 12 - Listy rankingowe rozwiązań

Rys. 20. Przyjęta metodologia badań. Źródło: Opr. własne

czasów międzyzielonych, definicję możliwych do realizacji faz ruchu, ich parametrów czasowych, a także możliwych przejść pomiędzy nimi.

Etap E3 koncentruje się na opracowaniu sposobu sterowania ruchem w analizowanym układzie. Obejmuje zaprojektowanie algorytmu sterowania oraz zdefiniowanie zbioru strategii sterowania i ich wariantów przeznaczonych do dalszej analizy. Przez strategię sterowania rozumie się spójny sposób działania programu sygnalizacji, określający zasady podejmowania decyzji, zakres wykorzystywanych informacji oraz stosowane procedury sterowania. Wariant strategii oznacza natomiast jej konkretną konfigurację, wynikającą z przyjęcia określonych wartości lub kombinacji wartości parametrów sterujących. Struktura algorytmu oraz dobór i liczba strategii i ich wariantów powinny być dostosowane do celu prowadzonej analizy i lokalnych uwarunkowań badanego układu. Do zdefiniowania jednej ze strategii sterowania stosowana jest autorska metoda sterowania, opisana w podrozdziale 3.2. Stanowi ona wejście do etapu E3, ujęte na Rys. 20 jako założenia do tworzenia strategii sterowania. Rezultatem etapu jest opracowany algorytm sterowania oraz jednoznacznie zdefiniowany zbiór wariantów przyjętych strategii, przeznaczony do implementacji w środowisku testowym i dalszej oceny symulacyjnej.

Zaleca się w czasie realizacji etapów E2 i E3 skorzystać z jednego z szeregu dostępnych narzędzi przyspieszających etap projektowania programu sygnalizacji. Przy wyborze należy zwrócić szczególną uwagę, aby umożliwiała ono:

- wykonywanie automatycznych obliczeń czasów międzyzielonych. Proces ich ręcznego wykonywania jest bardzo czasochłonny i ściśle uzależniony od skomplikowania geometrii skrzyżowania oraz liczby przewidzianych grup sygnalizacyjnych. Co więcej, praktycznie każda zmiana w zakresie organizacji ruchu skutkuje koniecznością wykonania obliczeń od nowa. Zatem zautomatyzowanie tego procesu jest bardzo istotnym czynnikiem przemawiającym za wykorzystaniem takiego narzędzia;
- konstruowanie programów oraz ich parametrów w oparciu o automatyczne obliczenia przepustowości;
- budowę i wstępne testowanie logiki algorytmu sterowania akomodacyjnego w postaci schematu blokowego;
- programowanie i kompilację bardziej skomplikowanych elementów logiki sterowania z wykorzystaniem popularnych języków programowania, takich jak: JAVA, Python, C++ czy VBS;
- wygenerowanie plików wykonawczych kompatybilnych z przygotowanym modelem symulacyjnym.

Etap E4 obejmuje przygotowanie kompletnego modelu mikrosymulacyjnego, służącego do realizacji eksperymentów symulacyjnych. Prace w tym etapie skoncentrowane są na odwzorowaniu wszystkich istotnych elementów wybranego fragmentu układu transportowego w środowisku symulacyjnym. Dotyczy to m.in. odwzorowania struktury sieci drogowej, geometrii skrzyżowania oraz obowiązującej organizacji ruchu. Ponadto, do modelu wprowadza się parametry ruchowe, obejmujące natężenia ruchu pojazdów i pieszych oraz charakterystyki poszczególnych grup użytkowników, takie jak rozkłady napełnienia czy odchylenia od harmonogramów jazdy w przypadku transportu publicznego. Integralną częścią prac jest implementacja programu sygnalizacji świetlnej wraz z elementami warunkującymi jego działanie, takimi jak: detektory, sygnalizatory oraz logika sterowania.

Budowę modelu kończy jego dokładne przetestowanie, polegające na przeprowadzeniu serii eksperymentów mających na celu upewnienie się, że wszystkie jego elementy działają w sposób poprawny. Działania te mogą być bardzo czasochłonne w zależności od stopnia skomplikowania modelowanego układu oraz szczególnie w przypadku, gdy

model ma służyć do oceny wielu, różnych strategii sterowania. Elementami modelu, na których funkcjonowanie należy zwrócić szczególną uwagę są:

- parametry oraz zachowanie uczestników ruchu – należy upewnić się, że poszczególne pojazdy i/lub piesi poruszają się w obrębie modelu w odpowiedniej liczbie oraz że ich parametry, np. napętnienie lub odchylenie od harmonogramu (w przypadku pojazdów transportu zbiorowego) są zgodne z założonym rozkładem. Ponadto, należy zwrócić uwagę, aby pojazdy poruszały się w sposób naturalny, odpowiadający możliwie wier- nie temu co można zaobserwować w rzeczywistości;
- działanie systemu detekcji – należy upewnić się, że wszystkie detektory umieszczone w modelu działają prawidłowo i pozwalają na realizację założeń sprawdzanej strategii sterowania. Responsywność oraz poprawność odczytu zgłoszeń pochodzących od po- szczególnych uczestników ruchu są kluczowe dla poprawnego działania modelu;
- działanie programu sygnalizacyjnego, w szczególności w zakresie komunikacji zaim- plementowanego w modelu systemu detekcji ze sterownikiem sygnalizacji świetlnej – działanie to polega na weryfikacji poprawności reakcji algorytmu na zgłoszenia pocho- dzące od detektorów wzbudzanych przez poszczególnych uczestników ruchu;
- generowanie wyników – każdy przebieg symulacji powinien zakończyć się otrzyma- niem kompletu wyników, potrzebnych do późniejszej analizy. Ponadto wyniki dwóch symulacji powinny być tożsame dla jednakowych warunków i założeń początkowych.

W przypadku odnotowania jakichkolwiek nieprawidłowości należy dokonać odpo- wiedniej kalibracji a następnie cały etap testów powtórzyć. Pomyślna weryfikacja po- prawności modelu pozwala na jego wykorzystanie w etapie docelowych eksperymentów symulacyjnych.

Podobnie jak w etapie konstruowania programów sygnalizacji świetlnej, budowę mo- delu symulacyjnego zaleca się zrealizować z wykorzystaniem jednego z kilku często sto- sowanych w inżynierii ruchu narzędzi. Poza podstawowymi funkcjami pozwalającymi na realizację wymienionych wcześniej czynności, dotyczącymi budowy geometrii i wprowadzania odpowiednich natężeń ruchu, konieczne jest, aby wybrane oprogramo- wanie pozwalało również na:

- implementację oraz poprawne działanie zewnętrznych sterowników sygnalizacji świetlnej;
- dowolną parametryzację poszczególnych grup uczestników ruchu oraz indywidual- nych pojazdów;
- implementację skryptów wykonanych z wykorzystaniem popularnych języków progra- mowania, takich jak: JAVA, Python, C++ czy VBS;
- zbieranie zarówno zagregowanych jak i surowych wyników dotyczących każdego przebiegu symulacji;
- zbieranie wyników dotyczących podstawowych miar efektywności ruchu, takich jak np.: straty czasu, ale również tych dotyczących emisji związków toksycznych do at- mosfery generowanych przez poruszające się w modelu pojazdy;
- łatwe tworzenie licznych scenariuszy symulacji i zarządzanie nimi.

Etap E5 obejmuje przygotowanie i realizację docelowych serii eksperymentów sy- mulacyjnych z wykorzystaniem opracowanego modelu mikrosymulacyjnego. Symulacje wykonywane są dla rozpatrywanych wariantów wszystkich wybranych strategii stero- wania ruchem. Ze względu na stochastyczny charakter procesów zachodzących w sieci drogowej, każdy wariant należy poddać wielokrotnemu uruchomieniu z zastosowaniem różnych wartości ziarna symulacji, co pozwala na np. uśrednienie wyników oraz zwięk- szenie wiarygodności analiz. Etap ten kończy zebranie i obróbka wyników w celu przy- gotowania ich do analiz porównawczych realizowanych w kolejnych etapach.

Etap E6 rozpoczyna analizę rezultatów uzyskanych za pośrednictwem symulacji. W jego ramach przeprowadza się selekcję rozwiązań niezdominowanych, mającą na celu wstępne odrzucenie wariantów osiągających gorsze od pozostałych wyniki w zakresie przyjętego zbioru kryteriów oceny. Selekcję można przeprowadzić łącznie dla wszystkich wariantów, ale zaleca się odrębnie dla poszczególnych strategii sterowania, jeżeli celem jest zachowanie reprezentacji każdej z nich w dalszej analizie. W rezultacie otrzymany zostaje zbiór niezdominowanych wariantów wszystkich strategii sterowania.

W etapie E7, na uprzednio wyselekcjonowanym zbiorze wariantów niezdominowanych, przeprowadza się analizę wielokryterialną mającą na celu uszeregowanie rozpatrywanych rozwiązań zgodnie z przyjętym modelem preferencji decydenta. Przez decydenta rozumie się podmiot odpowiedzialny za wybór lub rekomendowanie wariantu sterowania dla analizowanego układu. Funkcję tę może pełnić pojedynczy podmiot odpowiedzialny za zarządzanie ruchem albo zespół uwzględniający perspektywy organu zarządzającego ruchem, zarządcy drogi, organizatora PTZ oraz poszczególnych grup użytkowników systemu transportowego. Drugim działaniem realizowanym w ramach tego etapu jest analiza wrażliwości służąca zbadaniu stabilności uzyskanych rezultatów względem zmian założeń modelu preferencji. Wybór kryteriów oceny, dobór metody WWD, wskazanie decydenta oraz zbudowanie modelu jego preferencji należy przeprowadzić w ramach prac przygotowawczych.

Ostatni etap metodyki, tj. E8, obejmuje wskazanie rozwiązania rekomendowanego na podstawie wyników wielokryterialnego szeregowania wariantów oraz przeprowadzonej analizy wrażliwości. Etap ten obejmuje również interpretację uzyskanych rezultatów i sformułowanie wniosków odnoszących się do analizowanego fragmentu systemu transportowego. W niniejszej rozprawie wnioski sformułowane w ramach etapu E8 stanowią ponadto podstawę oceny spełnienia warunków realizacji celu pracy określonych w podrozdziale 1.3.

3.2. Szczegółowa charakterystyka autorskiej metody priorytetyzacji PTZ w ramach działania sygnalizacji świetlnej

Przedstawiona poniżej autorska metoda sterowania stanowiła w przeprowadzonych badaniach podstawę zdefiniowania jednej z analizowanych strategii, a tym samym wejście do etapu E3 metodyki opisanej w podrozdziale 3.1.

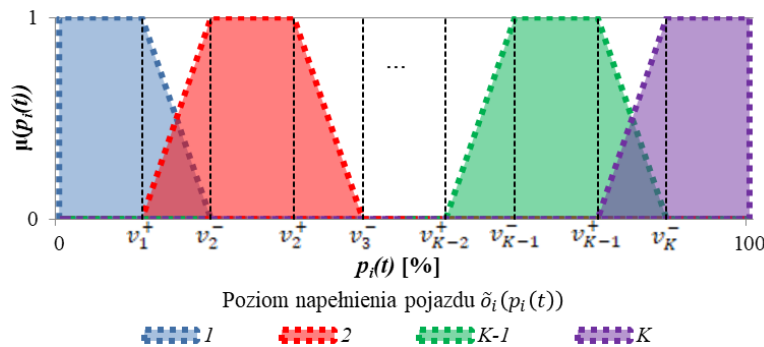
Jako punkt wyjściowy w zakresie priorytetyzacji, uznano ustalenie sposobu oceny potrzeby priorytetowej obsługi konkretnego pojazdu komunikacji miejskiej. Wymaga to zdefiniowania pewnych założeń, czemu poświęcony jest niniejszy podrozdział. Każdy pojazd PTZ zgłaszający się do systemu detekcji sygnalizacji świetlnej można scharakteryzować bazując na zbiorze parametrów. Na podstawie własnych analiz, opartych m.in. na przeglądzie literatury oraz rezultatach wstępnych eksperymentów symulacyjnych z 2022 roku (patrz [172]) przyjęto, że oprócz najczęściej wykorzystywanego w algorytmach sterowania parametru odchylenia realizacji kursu od harmonogramu, do zestawu zmiennych sterujących poziomem priorytetu należy również zaliczyć parametry wypełnienia pojazdu pasażerami oraz czasu oczekiwania na obsługę.

Uwzględnienie napełnienia pojazdu w procesie priorytetyzacji ma prowadzić do redukcji strat czasu większej liczby podróżujących w tym samym czasie, a w konsekwencji zmniejszenia średnich strat czasu przypadających na pojedynczego podróżującego. To z kolei determinuje poprawę efektywności systemu transportowego.

Należy jednak zaznaczyć, że napełnienie pojazdu i wartość odchylenia od harmonogramu są parametrami o niskiej dynamice zmian. Oznacza to, że ich wartość zmienia się dopiero po dotarciu do przystanku, którego lokalizacja nie musi odpowiadać położeniu

skrzyżowania z przedmiotową sygnalizacją. W związku z tym uznano, że wpływ obu tych parametrów powinien być skorelowany z czasem oczekiwania na obsługę. Ma to na celu nadanie dynamiki procesowi priorytetyzacji, szczególnie w przypadku konieczności jednoczesnego obsłużenia kilku zgłoszeń priorytetowych pochodzących od pojazdów poruszających się na kolizyjnych relacjach. Tak zdefiniowane założenia stanowią podstawę do formalizacji zależności matematycznych opisujących mechanizm działania proponowanej metody priorytetyzacji.

Każdy i -ty pojazd PTZ zgłaszający się w chwili t do systemu detekcji charakteryzuje się określonym procentowym napełnieniem pasażerami, wyrażonym jako $p_i(t)$ [%]. Wartość tę można sklasyfikować jako element jednego z K zbiorów, nazwanych poziomami napełnienia pojazdu $\tilde{o}_i(p_i(t))$. W trakcie badań uznano, że granice pomiędzy kolejnymi zbiorami, powinny być rozmyte. Szczególnie ma to znaczenie przy niewielkiej liczbie zbiorów (K). Zastosowanie rozmytych granic zmniejsza ryzyko popełnienia błędów wynikających z małych wahań parametru. Oznacza to, że niewielka zmiana w liczbie pasażerów, lub niewielki błąd wynikający z nieprecyzyjności urządzenia zliczającego liczbę pasażerów, nie spowoduje nagłej zmiany poziomu priorytetu, co mogłoby być postrzegane jako niesprawiedliwe bądź nieefektywne. Ideę podziału na K poziomów napełnienia przedstawiono na Rys. 21.



Rys. 21. Zastosowanie zbiorów rozmytych w klasyfikacji pojazdów do K poziomów napełnienia. Źródło: Opr. własne

Zgodnie z Rys. 21, dla każdego przedziału $k = 1, 2, \dots, K$ zdefiniowane są granice napełnienia: dolna (v_k^-) oraz górna (v_k^+). Ich wartości są ustalane na podstawie statystycznej analizy historycznych danych na temat napełnienia pojazdów transportu zbiorowego, uzyskanych w ramach pierwszego etapu metodyki (E1).

Względem pojazdów, których aktualne napełnienie mieści się w rozmytych granicach dwóch sąsiadujących przedziałów decyzję o klasyfikacji oparto na probabilistycznym podejściu z użyciem zmiennej losowej $Rnd_i(t)$. Generowanie jej nowej wartości następuje wraz z każdą wykrytą zmianą napełnienia pojazdu. Sama procedura klasyfikacji sprowadza się do porównania aktualnej wartości zmiennej losowej z wynikami funkcji prawdopodobieństwa przynależności napełnienia i -tego pojazdu do danego k -tego poziomu napełnienia ($P_i^k(t)$). Dla trapezoidalnego kształtu funkcji (por. Rys. 21) można w tym celu wykorzystać następujące wzory (5).

$$P_i^k(t) = \frac{v_{k+1}^- - p_i(t)}{v_{k+1}^- - v_k^+}$$

$$P_i^{k+1}(t) = \frac{p_i(t) - v_k^+}{v_{k+1}^- - v_k^+}$$
(5)

gdzie:

- P_i^k, P_i^{k+1} – prawdopodobieństwo przynależności i -tego pojazdu do k -tego i $k + 1$ -tego poziomu napełnienia,
 v_k^-, v_k^+ – dolna i górna granica przedziału k -tego poziomu napełnienia.

W zależności od przyjętych kształtów funkcji, formuła matematyczna określająca prawdopodobieństwo przynależności do danego poziomu może wyglądać inaczej. Jednak niezależnie od tego, zawsze musi być spełniony warunek, dla którego suma prawdopodobieństw przynależności do zbiorów wynosi 1.

Jeżeli wygenerowana wartość $Rnd_i(t)$ (mieszcząca się w przedziale od 0 do 1) jest mniejsza lub równa P_i^k , pojazd zostaje przypisany do k -tego poziomu. W przeciwnym razie, pojazd zostaje zaklasyfikowany do poziomu $k + 1$. Ostatecznie cały proces klasyfikacji dla warunków przedstawionych na Rys. 21 przedstawia wzór (6).

$$\tilde{o}_i(p_i(t)) = \begin{cases} 1 & \text{gdy} & (p_i(t) \leq v_1^+) \vee \\ & & \vee \left((v_1^+ < p_i(t) < v_2^-) \wedge (Rnd_i(t) \leq P_i^1(t)) \right) \\ 2 & \text{gdy} & (v_2^- \leq p_i(t) \leq v_2^+) \vee \\ & & \vee \left((v_1^+ < p_i(t) < v_2^-) \wedge (Rnd_i(t) > P_i^1(t)) \right) \vee \\ & & \vee \left((v_2^+ < p_i(t) < v_3^-) \wedge (Rnd_i(t) \leq P_i^2(t)) \right) \\ \dots & \dots & \dots \\ K-1 & \text{gdy} & (v_{K-1}^- \leq p_i(t) \leq v_{K-1}^+) \vee \\ & & \vee \left((v_{K-2}^+ < p_i(t) < v_{K-1}^-) \wedge (Rnd_i(t) > P_i^{K-2}(t)) \right) \vee \\ & & \vee \left((v_{K-1}^+ < p_i(t) < v_K^-) \wedge (Rnd_i(t) \leq P_i^{K-1}(t)) \right) \\ K & \text{gdy} & (p_i(t) \geq v_K^-) \vee \\ & & \vee \left((v_{K-1}^+ < p_i(t) < v_K^-) \wedge (Rnd_i(t) > P_i^{K-1}(t)) \right) \end{cases} \quad (6)$$

Ostatecznie każdemu i -temu pojazdowi zostaje przypisany odpowiedni współczynnik priorytetowy $r_{o_i}(t)$. Jego wartość zależy od przydzielonego poziomu napełnienia i mieści się w przedziale od 0 do 1. Wraz ze wzrostem poziomu napełnienia pojazdu, wartość współczynnika maleje. Aby umożliwić analizę różnych kombinacji wartości współczynnika $r_{o_i}(t)$, wprowadzono macierz O , gdzie każdy wiersz reprezentuje zestaw wartości dla jednej z analizowanych kombinacji. Macierz $O_{N \times K}$ ma wymiar $N \times K$, gdzie N to liczba kombinacji współczynników, a K to liczba poziomów napełnienia (por. wzór (7)).

$$O = \begin{bmatrix} o_1^1 & o_2^1 & \dots & o_K^1 \\ o_1^2 & o_2^2 & \dots & o_K^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ o_1^N & o_2^N & \dots & o_K^N \end{bmatrix} \quad (7)$$

gdzie:

- o_k^n – wartość współczynnika priorytetowego $r_{o_i}(t)$ dla k -tego poziomu napełnienia w n -tej kombinacji.

W konsekwencji wartość współczynnika priorytetowego $r_{o_i}(t)$ dla i -tego pojazdu w czasie t , dla przyjętej n -tej kombinacji można wyrazić wzorem (8).

$$r_{oi}(t) = \begin{cases} o_1^n & \text{gdy } \tilde{o}_i(p_i(t)) = 1 \\ o_2^n & \text{gdy } \tilde{o}_i(p_i(t)) = 2 \\ \dots & \dots \\ o_{K-1}^n & \text{gdy } \tilde{o}_i(p_i(t)) = K-1 \\ o_K^n & \text{gdy } \tilde{o}_i(p_i(t)) = K \end{cases} \quad (8)$$

Przechodząc do kolejnego parametru oceny należy przyjąć, że i -ty pojazd PTZ zgłaszający się w chwili t do systemu detekcji cechuje pewne, wyrażone w minutach, odchylenie od harmonogramu, oznaczone jako $d_i(t)$ [min]. Określa ono czy kurs jest przyspieszony (wartości poniżej 0), punktualny (wartość równa 0) czy opóźniony (wartości powyżej 0). Cechę tę można sklasyfikować jako element jednego z L zbiorów, nazwanych poziomami odchylenia od harmonogramu $s_i(d_i(t))$. W przeciwieństwie do schematu opracowanego do określenia poziomu napełnienia pojazdu, granice pomiędzy poszczególnymi poziomami odchylenia od harmonogramu mogą być ostre. Wynika to ze stosunkowo niewielkiego zakresu obserwowanych stanów tego parametru. Poza stosunkowo rzadkimi przypadkami wynikającymi ze szczególnych okoliczności, takich jak np. awaria pojazdu, parametr ten przyjmuje zwykle wartości w zakresie od -5 do 10 minut. Ogólny schemat klasyfikacji pojazdów do zestawu L poziomów odchylenia od harmonogramu przedstawia zależność (9). Wszystkie pojazdy realizujące swój kurs przed czasem lub zgodnie z harmonogramem zalicza się do pierwszego poziomu.

$$s_i(d_i(t)) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } d_i(t) \leq u_1^+ \\ 2 & \text{gdy } u_1^+ < d_i(t) \leq u_2^+ \\ \dots & \dots \\ L-1 & \text{gdy } u_{L-2}^+ < d_i(t) \leq u_{L-1}^+ \\ L & \text{gdy } d_i(t) > u_{L-1}^+ \end{cases} \quad (9)$$

gdzie:

u_l^+ – górna granica l -tego poziomu odchylenia od harmonogramu $l = 1, 2, \dots, L-1$.

Podobnie jak wcześniej, każdemu z przewidzianych poziomów odchylenia od harmonogramu przydzielono odpowiedni współczynnik priorytetowy, tym razem oznaczony jako $r_{s_i}(t)$. Jego wartość również zawiera się w przedziale od 0 do 1. Docelowo pojazdowi, realizującemu swój kurs punktualnie lub przed czasem, a więc takim, które charakteryzują się poziomem $s_i(d_i(t))$ równym 1, przypisana zostaje wartość współczynnika równa 1. Ma to na celu minimalizację liczby kursów wyprzedzających swój harmonogram, które analogicznie jak kursy opóźnione, również są niepożądane z punktu widzenia efektywności funkcjonowania PTZ. Z kolei im większym opóźnieniem obciążony jest dany kurs, tym poziom odchylenia od harmonogramu jest większy i w konsekwencji przypisany współczynnik $r_{s_i}(t)$ jest bliższy 0.

Celem umożliwienia analizy różnych kombinacji wartości współczynnika $r_{s_i}(t)$, wprowadzono macierz S . Każdy wiersz macierzy reprezentuje zestaw wartości dla jednej z analizowanych kombinacji. Macierz $S_{M \times L}$ ma wymiar $M \times L$, gdzie M to liczba kombinacji współczynników, a L to liczba poziomów odchylenia od harmonogramu (por. wzór (10)).

$$S = \begin{bmatrix} s_1^1 & s_2^1 & \dots & s_L^1 \\ s_1^2 & s_2^2 & \dots & s_L^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_1^M & s_2^M & \dots & s_L^M \end{bmatrix} \quad (10)$$

gdzie:

s_l^m – wartość współczynnika priorytetowego $r_{s_l}(t)$ dla l -tego poziomu odchylenia od harmonogramu w m -tej kombinacji. Zakłada się, że wszystkie $s_1^m = 1$.

W konsekwencji wartość współczynnika priorytetowego $r_{s_i}(t)$ dla i -tego pojazdu w czasie t , dla przyjętej m -tej kombinacji można wyrazić wzorem (11).

$$r_{s_i}(t) = \begin{cases} s_1^m & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = 1 \\ s_2^m & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = 2 \\ \dots & \dots \\ s_{L-1}^m & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = L-1 \\ s_L^m & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = L \end{cases} \quad (11)$$

Zaprezentowane powyżej współczynniki $r_{o_i}(t)$ i $r_{s_i}(t)$, stanowią ilościową ocenę potrzeby priorytetowej i -tego pojazdu pod kątem niezależnych względem siebie parametrów. W celu otrzymania kompleksowej i zintegrowanej oceny, konieczne jest ujednolicenie i agregacja tych współczynników, wraz z parametrem oczekiwania na obsługę w ramach jednego ilościowego parametru. Jednak działanie to ma jednocześnie pozwolić na zachowanie ich indywidualnych właściwości oraz zagwarantować wkład każdego z nich w ostateczną ocenę. Pozwoli to przede wszystkim na wypracowanie jednolitego, ogólnego wskaźnika, który lepiej oddaje rzeczywiste potrzeby danego pojazdu transportu zbiorowego przebywającego w obrębie skrzyżowania. Jednocześnie zastosowana formuła powinna być podatna na elastyczną kalibrację parametrami, co pozwoli lepiej dopasować nowe podejście do specyfiki różnych poligonów doświadczalnych.

Stąd, ocena każdego zgłoszenia i -tego pojazdu PTZ, odnotowanego w czasie t , została uzależniona od wartości wprowadzonego ogólnego współczynnika priorytetowego $r_{v_i}(t)$. Przyjmuje on wartości w przedziale od 0 do 1, gdzie:

- $r_{v_i}(t) = 0$, oznacza potrzebę zastosowania najsilniejszego priorytetu,
- $r_{v_i}(t) = 1$, oznacza brak konieczności dodatkowego uprzywilejowania.

Pozostałe wartości mieszczące się w tym przedziale odzwierciedlają pośrednie poziomy oczekiwanego priorytetu, wynikające z aktualnych parametrów pojazdu. Ostateczna wartość współczynnika $r_{v_i}(t)$ stanowi rozwiązanie zależności wyrażonej wzorem (12).

$$r_{v_i}(t) = \begin{cases} \left(1 - \left(\frac{w_i(t)}{T_c}\right)^{\gamma}\right) \cdot \left(\frac{\alpha r_{o_i}(t) + \beta r_{s_i}(t)}{\alpha + \beta}\right), & \left(1 - \left(\frac{w_i(t)}{T_c}\right)^{\gamma}\right) \cdot \left(\frac{\alpha r_{o_i}(t) + \beta r_{s_i}(t)}{\alpha + \beta}\right) > 0 \\ 0, & \left(1 - \left(\frac{w_i(t)}{T_c}\right)^{\gamma}\right) \cdot \left(\frac{\alpha r_{o_i}(t) + \beta r_{s_i}(t)}{\alpha + \beta}\right) \leq 0 \end{cases}; \quad (12)$$

$$\alpha \geq 0, \quad \beta \geq 0, \quad \alpha + \beta > 0, \quad T_c > 0$$

gdzie:

$r_{o_i}(t)$ – współczynnik priorytetowy i -tego pojazdu w czasie t , zależny od poziomu napełnienia $\delta_i(p_i(t))$; $r_{o_i}(t) \in \langle 0,1 \rangle [-]$,

$r_{s_i}(t)$ – współczynnik priorytetowy i -tego pojazdu w czasie t , zależny od punktualności kursu tj. poziomu odchylenia od harmonogramu $s_i(d_i(t))$; $r_{s_i}(t) \in \langle 0,1 \rangle [-]$,

$w_i(t)$ – czas oczekiwania i -tego pojazdu na obsługę w momencie t [s],

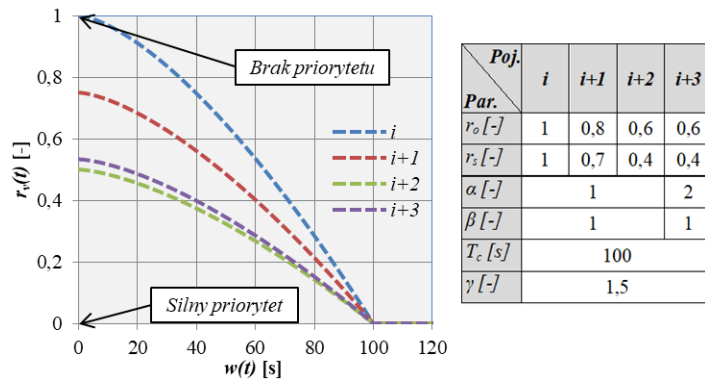
α, β – współczynniki wagowe [-], domyślnie przyjęto, że $\alpha = \beta = 1$. Jednak w czasie analiz symulacyjnych rekomendowana jest dodatkowa weryfikacja ustawienia $\alpha = 3, \beta = 2$;

- γ – współczynnik kalibrujący, regulujący intensywność wpływu przyrostu czasu oczekiwania $w_i(t)$ na wartość ogólnego współczynnika priorytetowego $r_{v_i}(t)$. Powinien mieć wartość równą lub wyższą od 1. Dla $\gamma = 1$ obserwuje się jednostajny, liniowy spadek wsp. $r_{v_i}(t)$, wprost proporcjonalny do upływu czasu. Przyjęcie wyższych wartości powoduje łagodniejszy spadek w pierwszych kilkudziesięciu sekundach oraz znacznie gwałtowniejszy dla dalszego czasu oczekiwania. Na potrzeby badań przyjęto $\gamma = 3$.
- T_c – graniczna wartość czasu oczekiwania na obsługę. W przedmiotowych analizach przyjęto, że równa się długości maksymalnego cyklu programu sygnalizacji [s].

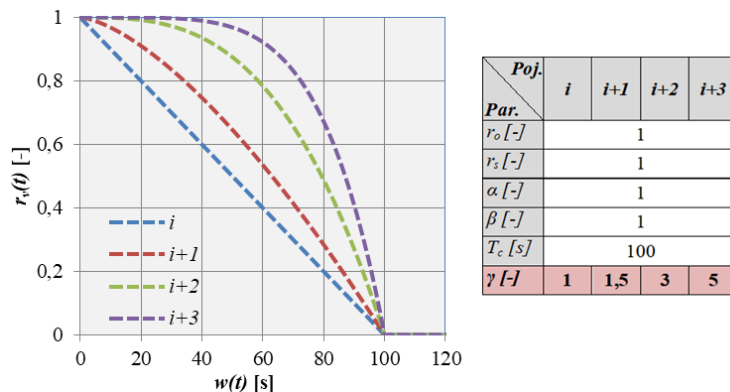
Na Rys. 22 przedstawiono różne przebiegi zmian wartości współczynnika priorytetowego $r_{v_i}(t)$, w zależności od przyjętych nastaw początkowych. Zmniejszenie się jego wartości dla i -tego pojazdu zachodzić może na skutek jednoczesnego lub niezależnego:

- spadku wartości współczynnika $r_{o_i}(t)$ na skutek zwiększenia się liczby pasażerów,
- spadku wartości współczynnika $r_{s_i}(t)$ na skutek wzrostu opóźnienia pojazdu względem harmonogramu,
- wydłużenia się czasu oczekiwania na obsługę $w_i(t)$.

Z kolei przykład przebiegu funkcji dla kilku różnych nastaw γ zamieszczono na Rys. 23.



Rys. 22. Przebieg zmian wartości współczynnika priorytetowego $r_{v_i}(t)$ w zależności od czasu oczekiwania na obsługę. Źródło: Opr. własne



Rys. 23. Wpływ współczynnika kalibrującego γ na przebieg zmian wartości współczynnika priorytetowego $r_{v_i}(t)$. Źródło: Opr. własne

Przedstawiony współczynnik $r_{v_i}(t)$ stanowi podstawę do oceny potrzeby priorytetowej pojedynczego zgłoszenia pochodzącego od i -tego pojazdu. Daje to podstawę do sformułowania zależności opisującej poziom priorytetu jaki należy przydzielić f -tej fazie sygnalizacyjnej, która obsługuje m.in. ruch pojazdów wymagających priorytetyzacji.

Każdej ze zbioru F możliwych do realizacji faz sygnalizacji, przypisany jest indywidualny współczynnik priorytetowy $R_f(t)$. Jego wartość mieści się w przedziale od 0 do 1 i stanowi iloczyn współczynników priorytetowych $r_{v_i}(t)$ należących do pojazdów, które aktualnie zgłaszają się do systemu detekcji i mogą być obsługiwane jednocześnie przez daną fazę. Niech $N_f(t)$ oznacza zbiór pojazdów, których zgłoszenie zostało odnotowane w systemie detekcji w chwili t i które mogą być obsługiwane przez fazę f . Zależność tę przedstawia poniższy wzór (13).

$$R_f(t) = \prod_{i \in N_f(t)} r_{v_i}(t) \quad (13)$$

gdzie:

$N_f(t)$ – zbiór pojazdów sterowanych grupami sygnalizacyjnymi, które w chwili t mogą być obsługiwane jednocześnie w ramach realizacji fazy f . Zakłada się, że i -ty pojazd może zostać obsługiwany w ramach kilku niezależnych faz.

Ponadto, rekomenduje się wprowadzenie warunków brzegowych dotyczących klasyfikacji pojazdów do zbioru $N_f(t)$. W badaniach przyjęto, że w danej chwili t do zbioru mogą zostać przypisane maksymalnie dwa pierwsze pojazdy z każdego wlotu, pod warunkiem, że ich trajektoria ruchu jest zgodna z docelową fazą priorytetową. W przypadku niezależnych wlotów, na których pojazdy mogą przemieszczać się bezkolizyjnie, liczba uwzględnianych pojazdów jest sumowana. Pojazdy przekraczające limit wpływu na danym wlocie są pomijane do momentu zwolnienia miejsca przez wcześniej uwzględnione pojazdy.

Podsumowując, parametryzacja poszczególnych faz ruchu oparta na współczynnikach priorytetowych stanowi fundament proponowanej metody zarządzania priorytetami w ramach działania sygnalizacji świetlnej. Istotnym aspektem metody jest wielowymiarowa ocena zgłoszeń. W praktyce, priorytetyzacja polega na minimalizacji czasu potrzebnego na obsługę pojazdu przez program sygnalizacji. Strategia oparta na współczynnikach priorytetowych pozwala m.in. na niezależne lub równoczesne:

- skrócenie czasu wydłużania trwającej fazy kolizyjnej. Wykorzystując współczynnik $R_f(t)$, można dynamicznie skracać maksymalny czas trwania fazy kolizyjnej wprost proporcjonalnie do wartości współczynnika;
- skrócenie czasu blokady priorytetu na skrzyżowaniach o wysokim natężeniu transportu indywidualnego, na których odnotowuje się częste zgłoszenia na tych samych relacjach;
- tworzenie rankingu faz sygnalizacyjnych. Na złożonych zarówno pod kątem geometrycznym jak i organizacyjnym skrzyżowaniach, gdzie poza intensywnym ruchem pojazdów transportu indywidualnego, występuje dużo kolizyjnych względem siebie relacji pojazdów transportu zbiorowego, wprowadzony współczynnik $R_f(t)$ pozwala na tworzenie dynamicznego harmonogramu kolejności realizowanych przez sterownik faz. Dzięki temu system sterowania może elastycznie dostosować każdy kolejny cykl programu do panujących na skrzyżowaniu warunków.

Weryfikacja założeń zaproponowanej metody powinna zostać zrealizowana na podstawie analiz symulacyjnych co najmniej kilku poligonów doświadczalnych, zgodnie

z metodyką badań przedstawioną w podrozdziale 3.1. Należy przy tym zadbać, aby różniły się one pod względem zarówno złożoności geometrii, obciążenia ruchem, jak i skomplikowania sterowania. Pozwoli to zweryfikować efektywność różnych sposobów wykorzystania zaproponowanych współczynników priorytetowych oraz ocenić spełnienie warunków realizacji celu pracy określonych w podrozdziale 1.3.

4. WERYFIKACJA ZAPROPONOWANEJ METODY STEROWANIA NA WYBRANYCH PRZYKŁADACH

4.1. Wstępne uwagi, założenia i pomocnicze procedury badawcze

4.1.1. Wybór i charakterystyka ogólna wybranych poligonów doświadczalnych

Przed rozpoczęciem właściwych analiz, sformułowano zbiór szczegółowych założeń i warunków brzegowych dotyczących kilku kluczowych aspektów prowadzonych prac badawczych. Zostały one opracowane w celu określenia zarówno zakresu samych badań, jak i spójnych i weryfikowalnych warunków do przeprowadzenia analiz i symulacji. Dotyczą one następujących zagadnień:

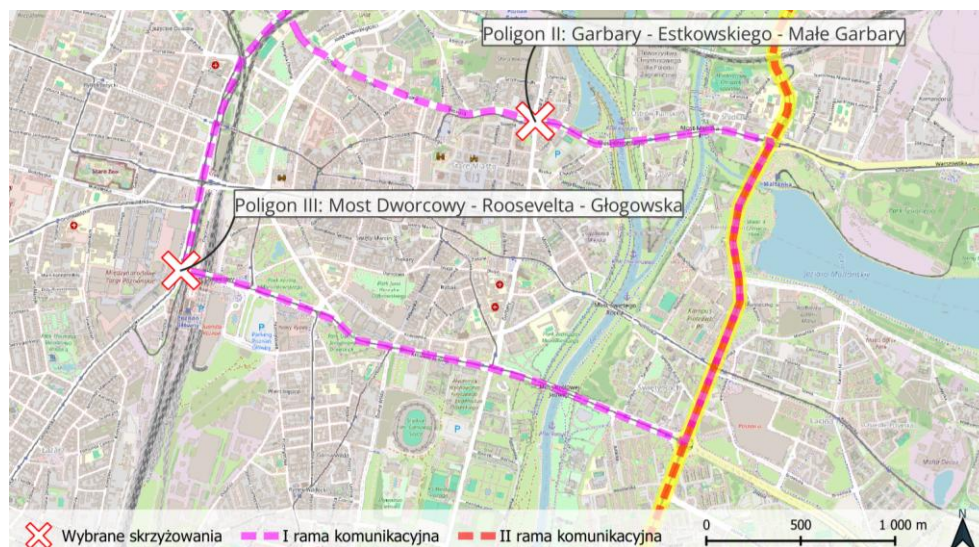
- wyboru poligonów doświadczalnych,
- definicji kryteriów oceny i określenia preferencji decydenta,
- wyboru i parametryzacji metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji,
- wyboru i konfiguracji narzędzi i metod zastosowanych w badaniach symulacyjnych,
- charakterystyki przyjętej metody szacowania poziomu emisji dwutlenku węgla,
- charakterystyki przyjętej procedury budowy i weryfikacji środowiska testowego;
- założeń prowadzenia eksperymentów symulacyjnych.

W pierwszej kolejności przystąpiono do wyboru odpowiedniego obszaru eksperymentalnego, będącego przedmiotem badań symulacyjnych. Skoncentrowano się tu na problematyce lokalnego sterowania ruchem i priorytetyzacji pojazdów PTZ w przestrzeni wyizolowanego skrzyżowania, gdzie ruch pojazdów objętych priorytetem odbywa się na relacjach wydzielonych od ruchu pojazdów TI. Ograniczono w ten sposób wpływ dodatkowego czynnika, jakim jest współdzielenie pasa ruchu przez pojazdy TI i PTZ na efektywność sterowania, szczególnie w przypadku występowania silnej kongestii. Z tego powodu, weryfikację metody oparto na przykładach priorytetyzacji ruchu tramwajów, których dojazd do skrzyżowania odbywa się zdecydowanie częściej niż w przypadku autobusów, na wyizolowanych drogach. Podejście to pozwala na bardziej precyzyjną ocenę efektywności zaproponowanej metody sterowania w węższym obszarze zastosowań, jednocześnie formułując solidną podstawę do przyszłych badań nad priorytetyzacją uwzględniającą dodatkowe komplikacje związane ze współdzieleniem infrastruktury drogowej. Przy wyłanianiu zbioru poligonów pod uwagę wzięto też klasyfikację skrzyżowań zaproponowaną przez Sobotę [146]. Ostatecznie do zbioru poligonów doświadczalnych wybrano trzy skrzyżowania:

- Poligon doświadczalny I (w skrócie PDI): skrzyżowanie trójwłotowe typu „T”,
- Poligon doświadczalny II (w skrócie PDII): skrzyżowanie Garbary-Estkowskiego w Poznaniu,
- Poligon doświadczalny III (w skrócie PDIII): skrzyżowanie Most Dworcowy-Roosevelta-Głogowska w Poznaniu.

Ze względu na chęć przeanalizowania w pierwszej kolejności efektywności metody w warunkach możliwie uproszczonych i kontrolowanych, PDI ma charakter hipotetyczny i ruch odbywający się na nim nie odnajduje odzwierciedlenia w rzeczywistej sieci drogowej. W czasie jego tworzenia szczególną uwagę zwrócono na ograniczenie liczby czynników, które na wczesnym etapie prac mogłyby niepotrzebnie komplikować analizę późniejszych wyników symulacji i oceny efektywności użytych algorytmów sterowania. Z tego względu pominięto w nim elementy takie jak: ruch pieszy, rowerowy, przystanki dla PTZ, a w konsekwencji również przesiadki w ramach PTZ.

Większość danych wejściowych niezbędnych do utworzenia kompletnego modelu symulacyjnego PDI wyznaczono poprzez generowanie wartości z przyjętych przedziałów zmienności. Przedziały te ograniczały zakres losowości i zostały dobrane na podstawie założeń przyjętych dla danego poligonu, tak aby umożliwić ocenę działania algorytmów sterowania w warunkach uproszczonych, ale kontrolowanych. Dotyczyło to przede wszystkim parametrów natężenia ruchu samochodowego, częstotliwości kursowania pojazdów PTZ, ich napelnienia oraz odchylenia od harmonogramu. Kolejne poligony badawcze, stanowią rzeczywiste skrzyżowania zlokalizowane w Poznaniu. Ich orientacyjne położenie na planie miasta zamieszczono na Rys. 24. W porównaniu do PDI cechuje je dużo większa złożoność zarówno pod względem geometrii, jak i liczby relacji kolizyjnych. Odbyna się na nich ruch samochodów (osobowych, dostawczych i ciężarowych), tramwajów, autobusów, pieszych i rowerzystów. W obszarze każdego z nich zlokalizowane są przystanki, przez co w analizach uwzględniono również aspekt przejazdów pasażerów między pojazdami TZ. Wybór tych skrzyżowań umożliwia weryfikację efektywności zaproponowanej metody w warunkach możliwie zbliżonych do rzeczywistych, gdzie liczba uczestników ruchu oraz ich wzajemnych interakcji jest istotnie większa niż w przypadku PDI. Tym samym przedmiotowa analiza przybiera bardziej złożony charakter.



Rys. 24. Orientacyjne położenie PDII i PDIII w Poznaniu. Źródło: Opr. własne na podstawie [178]

Dane wejściowe do modeli symulacyjnych PDII i PDIII otrzymano w wyniku obserwacji i analizy rzeczywistych procesów transportowych zachodzących w obszarze wskazanych skrzyżowań. Do określenia wolumenów natężenia ruchu samochodowego i pieszego przeprowadzono pomiary. W badaniach wykorzystano metodę wideorejestracji, umożliwiającą późniejszą dokładną analizę nagrań. Podejście to eliminuje główne wady bezpośrednich pomiarów terenowych, takie jak konieczność angażowania kilku osób czy ryzyko błędów wynikających z percepcji i zmęczenia. Kluczowym warunkiem skuteczności tej metody jest zapewnienie odpowiedniej widoczności skrzyżowania na nagraniu. Ponadto, wykorzystanie nagrań pozwala na dostosowanie prędkości nagrania do preferencji osoby zliczającej oraz daje jej możliwość odnotowania innych parametrów ruchu, w tym długości kolejek, prędkości pojazdów itp. użytecznych w procesie kalibracji modelu. Dodatkowo poza nagraniami, głównie w celach weryfikacyjnych, posiłkowano się danymi z szerszego okresu pozyskanymi z pętli indukcyjnych. Dane te zostały

przekazane przez poznański Zarząd Dróg Miejskich (ZDM) i posłużyły do weryfikacji czy wartości obliczone z nagrań są zbieżne z danymi z pętli indukcyjnych i tym samym czy otrzymane wyniki mają powtarzalny charakter.

Informacje, dotyczące rozkładów jazdy oraz charakterystyki konkretnych kursów pojazdów PTZ, tj. poziom napełnienia oraz odchylenia od harmonogramu uzyskano, wykorzystując dużą próbkę bazy danych pozyskanej z Zarządu Transportu Miejskiego w Poznaniu (ZTM). Surowe dane poddano wstępnej selekcji, mającej na celu zidentyfikowanie i odrzucenie informacji dotyczących kursów, obarczonych różnego rodzaju błędami lub znacznymi odchyleniami od normy. Zaliczono do nich kursy charakteryzujące się przede wszystkim wskazaniem ujemnego lub znacznie wyższego napełnienia niż maksymalna pojemność pojazdu. Odrzucono również kursy, dla których wartości odchylenia od harmonogramu znacznie odbiegały od typowego zakresu zmienności, co mogło wskazywać na wystąpienie błędu pomiarowego lub wpływu losowych zdarzeń na drogach poza obszarem analiz. Należy podkreślić, że niemożliwe było uzyskanie pełnej informacji na temat wszystkich rejestrowanych kursów. Wynika to przede wszystkim z braku wyposażenia wszystkich pojazdów PTZ w Poznaniu w bramki automatycznego zliczania pasażerów oraz z już wspomnianych błędów wynikających z niedoskonałości dostępnych urządzeń. Wobec tego otrzymane dane nie były implementowane wprost do modeli. Zamiast tego wyselekcjonowane dane posłużyły do opracowania indywidualnych dla każdej linii rozkładów statystycznych, które stały się podstawą do wyznaczenia losowych wartości napełnienia oraz odchylenia od harmonogramu.

W kolejnych podrozdziałach, zgodnie z założeniami metodycznymi z rozdziału 3.1, bardziej szczegółowo scharakteryzowano poszczególne poligony doświadczalne.

4.1.2. Definicja kryteriów oceny analizowanych rozwiązań

Wskazanie obiektywnie najlepszego rozwiązania w zakresie sterowania ruchem zazwyczaj jest niemożliwe, ponieważ wdrożony na skrzyżowaniu program sygnalizacji ma za zadanie zaspokajać potrzeby różnych interesariuszy, które często stoją do siebie w opozycji. Praktycznie zawsze priorytetyzacja pewnej grupy pojazdów, realizowana jest kosztem innych uczestników ruchu, pokonujących skrzyżowanie w relacjach kolizyjnych. To prowadzi do spadku płynności ruchu na tych relacjach i tym samym zwiększenia liczby zatrzymań i startów pojazdów. Bezpośrednio powoduje to wzrost emisji toksycznych związków do atmosfery. Co więcej nieadekwatny do potrzeby, poziom przyznanego priorytetu dla pojazdu PTZ może wpłynąć negatywnie na jego punktualność, np. nadmierne przyspieszenie przejazdu może skutkować znacznym wyprzedzeniem harmonogramu, co może stwarzać problemy na kolejnych przystankach.

Problem decyzyjny ma zatem charakter wielokryterialny i polega na znalezieniu rozwiązania kompromisowego, które umożliwia poprawę efektywności funkcjonowania systemu transportowego z punktu widzenia zarówno użytkowników, jak i pojazdów, ze szczególnym uwzględnieniem warunków ruchu i punktualności PTZ, przy jednoczesnym ograniczeniu emisji związków toksycznych. Zatem do zestawu kryteriów decyzyjnych sugerowane jest zaliczenie następujących pięciu wielkości:

- K1 – średnie straty czasu indywidualnych podróży [s/os.];
- K2 – średnie straty czasu pojazdów [s/poj.];
- K3 – średnie straty czasu pojazdów publicznego transportu zbiorowego [s/poj. PTZ];
- K4 – średnie odchylenie od harmonogramu jazdy pojazdów publicznego transportu zbiorowego [min];
- K5 – emisja dwutlenku węgla (CO_2) do atmosfery [kg].

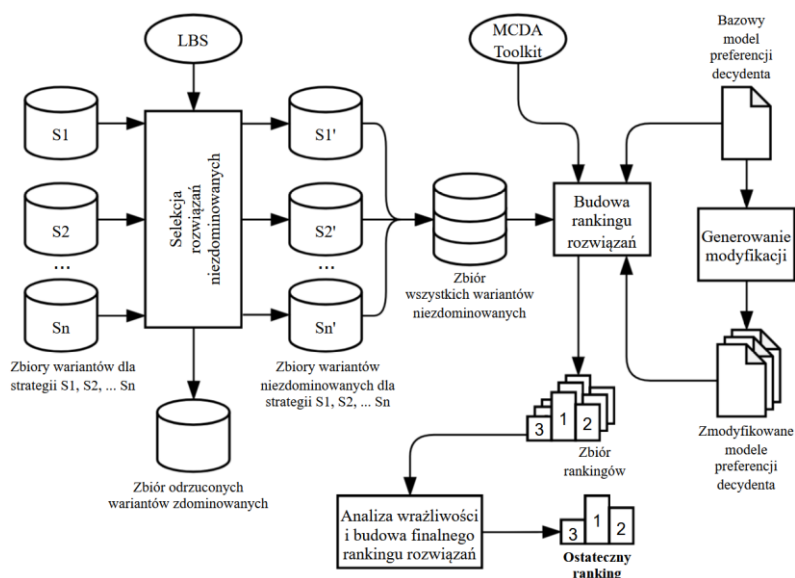
Wartości wszystkich przyjętych kryteriów oceny wyznaczano dla jednogodzinnego okna analizy, obejmującego okres o względnie jednorodnych warunkach ruchowych. W przypadku kryteriów K1–K4 wartości stanowią średnie miary wyznaczone na podstawie wyników uzyskanych w tym okresie, natomiast kryterium K5 określa sumaryczną masę CO₂ wyemitowaną przez pojazdy w ciągu analizowanej godziny. Dla kryterium K4 uśredniano wartości bezwzględne odchyłeń poszczególnych kursów od harmonogramu.

4.1.3. Wybór metody WWD i jej parametryzacja

Do przedmiotowej analizy, polegającej na weryfikacji i porównaniu ze sobą wielu wariantów strategii sterowania, sugerowane jest posłużenie się grupą metod pozwalających na ich szeregowanie w postaci rankingu. Wynika to z faktu, że celem analizy nie jest wyłącznie wskazanie pojedynczego najlepszego rozwiązania, lecz uporządkowanie rozważanych wariantów pod względem ich względnej atrakcyjności decyzyjnej. Takie podejście umożliwia identyfikację wariantu najkorzystniejszego, a jednocześnie pozwala określić pozycję pozostałych rozwiązań oraz ocenić relacje zachodzące pomiędzy nimi.

Wybrana metoda powinna cechować się możliwie intuicyjnym procesem budowy modelu preferencji decydenta. Natomiast samo narzędzie służące do realizacji analizy powinno pozwalać na możliwie szybkie wprowadzenie danych, wykonanie obliczeń oraz analizy wrażliwości modelu preferencji.

Niniejszy podrozdział stanowi szczegółową charakterystykę schematu postępowania, który został opracowany i zastosowany w analizach na wszystkich trzech poligonach doświadczalnych. Na Rys. 25 graficznie przedstawiono kolejne działania mające na celu wyłonienie spośród wielu wariantów różnych strategii sterowania, rozwiązania kompromisowego w zakresie wybranych kryteriów oceny.



Rys. 25. Przyjęty schemat postępowania w zakresie analizy wielokryterialnej. Źródło: Opr. własne

W pierwszej kolejności zbiór wszystkich wariantów kolejnych strategii sterowania zostaje poddany niezależnej selekcji, której celem jest wyłonienie nowego zbioru zawierającego jedynie warianty niezdominowane (etap E6). Pozostałe, zdominowane warianty

pozostają odrzucone z dalszych analiz. Proces selekcji przeprowadza się przy użyciu funkcji filtra rozwiązań niezdominowanych, wchodzącego w skład narzędzia Light Beam Search (LBS) w wersji 0.99, opracowanego przez Jaszkiewicza i Słowińskiego [83].

Nowo powstały zbiór stworzony z połączenia wariantów niezdominowanych wszystkich strategii sterowania poddany zostaje dalszej, docelowej analizie wielokryterialnej (E7). Do przeprowadzenia tej analizy wybrano metodę ELECTRE III. Zastosowanie tej metody uzasadnione jest przede wszystkim jej zdolnością do modelowania sytuacji, w których różnice między wariantami są mierzalne, ale z punktu widzenia decydenta często nieistotne lub trudne do jednoznacznego rozstrzygnięcia. Ma to szczególne znaczenie w analizowanym przypadku, gdzie wiele rozwiązań może osiągać zbliżone wartości w kryteriach takich jak straty czasu czy odchylenia od harmonogramu. ELECTRE III pozwala na definiowanie progów równoważności, preferencji i weta, dzięki czemu umożliwia odwzorowanie momentu, w którym różnice między wariantami zaczynają mieć znaczenie decyzyjne. Szczególnie istotna jest możliwość zastosowania progu weta, który ogranicza nadmierną kompensację słabych wyników wariantu w jednym kryterium przez dobre wyniki w innych kryteriach. Dzięki temu wariant charakteryzujący się nieakceptowalnym poziomem realizacji któregoś z kluczowych kryteriów nie zostaje oceniony jako korzystny wyłącznie ze względu na przewagę w pozostałych obszarach. Dodatkowym atutem metody jest jej przydatność w analizach obejmujących dużą liczbę wariantów. Po określeniu wag kryteriów oraz progów równoważności, preferencji i weta dalsze porównania realizowane są w sposób obliczeniowy, co ogranicza pracochłonność procedury w porównaniu z podejściami wymagającymi bezpośredniego porównywania wielu wariantów między sobą.

Na podstawie doświadczenia autora oraz konsultacji z praktykami zajmującymi się tematyką sterowania ruchem drogowym, polityką transportową i logistyką miejską utworzono bazowy model preferencji decydenta. Dla każdego z pięciu rozpatrywanych kryteriów oceny (K1-K5) zdefiniowano wagę kryterium i kierunek preferencji, a następnie wartości progów równoważności, preferencji i weta. Wynik tego działania przedstawiono w Tab. 20. Należy podkreślić, że wartości zawarte w tabeli odnoszą się do przyjętego jednogodzinnego okresu analizy. Zastosowanie innego, dłuższego lub krótszego horyzontu czasowego wymaga ich ponownego wyznaczenia.

Tab. 20. Bazowy model preferencji decydenta. Źródło: Opr. własne

Kryterium		K1	K2	K3	K4	K5
Opis kryterium		Straty czasu indywidualnych podróży	Straty czasu pojazdów	Straty czasu pojazdów PTZ	Odchylenie od harmonogramu	Emisja CO ₂ do atmosfery
Jednostka		[s/os.]	[s/poj.]	[s/poj. PTZ.]	[min]	[kg]
Kierunek preferencji		Min.	Min.	Min.	Min.	Min.
Waga kryterium		0,40	0,25	0,35	0,30	0,20
Progi	równoważności q	0,10	0,10	0,10	0,10	10,00
	preferencji p	5,00	5,00	5,00	0,30	50,00
	weta v	10,00	10,00	10,00	0,90	100,00

Wszystkie kryteria docelowo są minimalizowane, co oznacza, że preferowane są warianty, których wartości poszczególnych kryteriów są niższe. Budując model preferencji dążono do osiągnięcia kompromisu między wybranymi miarami oceny. Najwyższą wagę przyznano kryterium K1, czyli średnim stratom czasu indywidualnych podróży, co podkreśla kluczowe znaczenie efektywności przemieszczania się osób w obrębie skrzyżowania niezależnie od wybranego środka transportu. Niewiele niższe wagi przypisano do

kryteriów K3 i K4 związanych bezpośrednio z efektywnością publicznego transportu zbiorowego pod względem strat czasu pojazdów i punktualności kursowania. Przedostatnie miejsce przyznano kryterium ogólnych strat czasu pojazdów, w którym dominującą rolę pełnią pojazdy transportu indywidualnego. Najniższą natomiast wagę nadano kryterium emisji CO₂ (K5), co świadczy o tym, że aspekty środowiskowe są w istocie brane pod uwagę w procesie decyzyjnym, jednak nie stanowią one priorytetu w stosunku do płynności i faktycznej efektywności systemu transportowego.

Wszelkie obliczenia zgodne z metodą ELECTRE III, mające na celu utworzenie rankingu rozwiązań, przeprowadzono z wykorzystaniem narzędzia MCDA Toolkit w wersji 1.6, stanowiącego nakładkę na arkusz kalkulacyjny Microsoft Excel.

Otrzymany za pośrednictwem bazowego modelu preferencji ranking nie stanowi ostatecznego wyniku prac. Do jego osiągnięcia wymagane jest przeprowadzenie analizy wrażliwości, której celem jest zobiektywizowanie otrzymanych rezultatów oraz sprawdzenie ich stabilności (odporności na odstępstwa od przyjętego modelu bazowego). W tym celu przygotowano zbiór *P*-zmodyfikowanych wersji modelu bazowego (przyjęto $P = 39$), w których każdy parametr podlegał losowym zmianom w ograniczonym zakresie od 5 % do 15 % wartości z modelu bazowego. Szczególną uwagę zwrócono na to, aby modyfikacje nie powtarzały się, ponieważ obecność identycznych modeli mogłaby prowadzić do nadreprezentacji odpowiadających im wyników i tym samym zafałszowania końcowego rezultatu. Pełne zestawienie parametrów bazowego modelu preferencji oraz jego 39 zmodyfikowanych wersji, wykorzystanych w analizie wrażliwości, zamieszczono w *Załączniku nr 2*.

Niezależnie, dla każdego z przygotowanych modeli preferencji przeprowadzono procedurę szeregowania rozwiązań w narzędziu MCDA Toolkit. W rezultacie, wraz z rankingiem utworzonym na podstawie bazowego modelu preferencji, uzyskano zbiór 40 rankingów cząstkowych. Pozycja wybranego wariantu strategii sterowania może się różnić w każdym z nich w zależności od przyjętej kombinacji parametrów modelu preferencji. Dlatego na podstawie całego zbioru rankingów opracowano ranking ostateczny, w którym pozycję każdego wariantu określono jako dominantę jego pozycji we wszystkich rankingach cząstkowych. Dodatkowo, dla każdego wariantu obliczono odchylenie standardowe jego pozycji, co pozwala na ocenę stabilności i pewności przypisanej mu pozycji. Niska wartość tego wskaźnika świadczy o wysokiej spójności wyników i odporności wyboru na zmiany parametrów modelu preferencji, natomiast wysoka może sugerować jego wrażliwość i konieczność ostrożniejszej interpretacji. Ostateczne uszeregowanie wariantów odzwierciedla najczęściej powtarzające się wyniki, co wzmacnia jego obiektywność i odporność na ewentualne niedoskonałości modelu bazowego, związane z percepcją decydentów.

4.1.4. Wybór i konfiguracja narzędzi zastosowanych w badaniach symulacyjnych

Realizując prace związane z weryfikacją założeń zaproponowanej metody sterowania (patrz 3.2), prowadzoną zgodnie z opracowaną metodyką badań (patrz 3.1), posłużono się specjalistycznymi narzędziami z zakresu m.in. inżynierii ruchu oraz analiz symulacyjnych. W głównej mierze, mają one na celu ułatwienie i tym samym przyspieszenie procesu projektowania oraz realizacji badań symulacyjnych.

Do przygotowania programów sygnalizacyjnych oraz algorytmów sterowania, stosując się do zaleceń zawartych w podrozdziale 3.1, wybrano narzędzie niemieckiego producenta Schlothauer&Wauer o nazwie LISA+ w wersji 5.2 [77]. Alternatywnym narzędziem, możliwym do wykorzystania w celach badawczych jest np. produkt innego niemieckiego

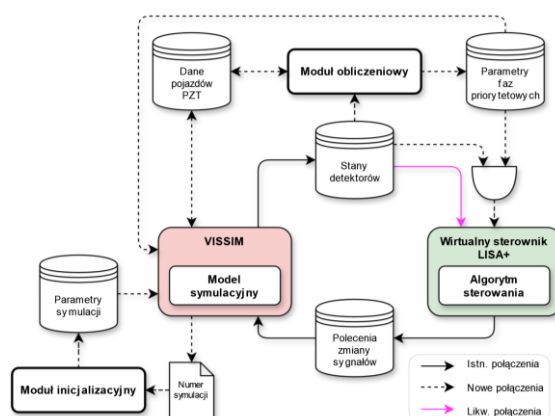
producenta, firmy GEVAS Software, Crossig [67].

Wszystkie modele symulacyjne będące poligonami testowymi dla badanych strategii sterowania wykonano w narzędziu Vissim (wersja 22), niemieckiej firmy PTV Group [76]. Do potencjalnych alternatyw zaliczyć można narzędzie Aimsun [64] lub otwarte oprogramowanie Simulation of Urban MObility (SUMO) [59].

Oba wybrane programy spełniły wszystkie wskazane w podrozdziale 3.1 wymagania stawiane tego typu narzędziom. W obu wypadkach, duży wpływ na ostateczną decyzję miał fakt wieloletniego, praktycznego doświadczenia autora pracy w obsłudze wskazanych narzędzi, nabytego w czasie pracy zawodowej w roli projektanta inżynierii ruchu.

Niewątpliwie bardzo istotną cechą wybranych narzędzi jest możliwość ich współpracy podczas symulacji. Programy i algorytmy sterowania opracowane w LISA+ mogą być poddane symulacji w środowisku Vissim. W tym celu, utworzone w module OMTC (z ang. *open method of traffic control*) algorytmy wraz ze wszystkimi parametrami programów są implementowane w wirtualnych sterownikach programu LISA+. Wirtualne sterowniki komunikują się z programem Vissim poprzez interfejs, tzn. odbierają dane z detektorów w modelu, przetwarzają je i następnie wysyłają polecenia zmiany nadawanych sygnałów z powrotem do modelu [62]. Funkcjonalność ta, przy obecnie najczęściej stosowanych algorytmach sterowania jest wystarczająca. Należy dodać, że w realizowanych badaniach rzeczywisty, fizyczny rodzaj zastosowanych detektorów został pominięty. Jest to spowodowane tym, że w środowisku symulacyjnym stosowane są jedynie wirtualne detektory, które spełniają wszystkie swoje funkcje, ale pozbawione są swoich fizycznych cech poza pozycją oraz obszarem zbierania danych.

Scharakteryzowana powyżej, domyślna konfiguracja programów (w zastosowanych wersjach oprogramowania) nie pozwala jednak na zasadniczą z punktu widzenia realizowanych prac komunikację w myśl idei V2I (z ang. *vehicle to infrastructure*). Mianowicie, standardowa komunikacja programów ogranicza się do pobierania przez wirtualne sterowniki informacji o zajętości wzbudzanych przez symulowane pojazdy wirtualnych detektorów, z pominięciem możliwości transferu bardziej szczegółowych parametrów dotyczących danego pojazdu. W przypadku pojazdów PTZ wyjątkowo możliwe jest przesłanie również numeru linii i kierunku jazdy danego pojazdu. Problemem natomiast jest przekazanie do wirtualnego sterownika informacji np. o napełnieniu wykrytego pojazdu oraz wartości jego odchylenia od harmonogramu. W związku z tym, wykorzystując fakt, że oba narzędzia, zarówno LISA+ jak i Vissim pozwalają na implementację skryptów zewnętrznych, opracowano metodę rozszerzonej komunikacji obu narzędzi. Jej schemat z oznaczeniem zarówno dotychczasowego jak i docelowego przepływu danych zamieszczono na Rys. 26.



Rys. 26. Schemat opracowanej komunikacji między narzędziami Vissim i LISA+. Źródło: Opr. Własne

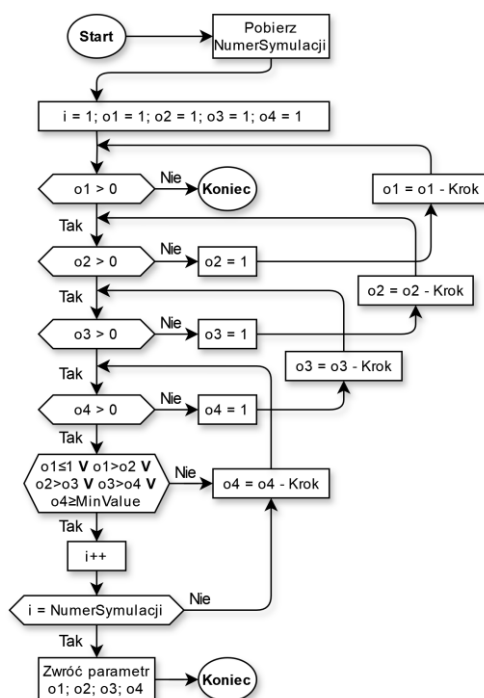
Zastosowanie tej metody wymaga wcześniejszego dostosowania modelu symulacyjnego jak i algorytmu sterowania. W modelu w Vissimie, za pomocą funkcji UDA (z ang. *user defined attributes*), należy utworzyć zbiór nowych parametrów zarówno dotyczących pojazdów jak i sterownika sygnalizacji. Lista parametrów wraz z opisem zamieszczona jest w poniższej tabeli (Tab. 21). W przypadku wszystkich analizowanych poligonów doświadczalnych przyjęto czterostopniową skalę poziomu napełnienia pojazdu PTZ oraz pięciostopniową skalę wartości jego odchylenia od harmonogramu ($K = 4, L = 5$).

Tab. 21. Charakterystyka nowych parametrów modelu symulacyjnego w Vissim. Źródło: Opr. własne

Parametr UDA	Opis	Obiekt modelu symulacyjnego
p	Procentowe napełnienie i -tego pojazdu pasażerami – $p_i(t)$	Pojazd PTZ
op	Poziom napełnienia i -tego pojazdu – $\tilde{o}_i(p_i(t))$	
ro	Współczynnik priorytetowy i -tego pojazdu, zależny od stopnia napełnienia – $r_{o_i}(t)$	
d	Odchylenie od harmonogramu i -tego pojazdu – $d_i(t)$	
sd	Poziom odchylenia od harmonogramu i -tego pojazdu – $s_i(d_i(t))$	
rs	Współczynnik priorytetowy i -tego pojazdu zależny od odchylenia od harmonogramu – $r_{s_i}(t)$	
w	Czas oczekiwania i -tego pojazdu – $w_i(t)$	
rv	Ogólny współczynnik priorytetowy i -tego pojazdu – $r_{v_i}(t)$	
pos	Pozycja i -tego pojazdu na wlocie	
$zgloszony$	Informacja czy i -ty pojazd został wykryty przez system detekcji	
$o1$	Kolejne elementy macierzy $O(o_1^n, o_2^n, o_3^n, o_4^n)$ dla n -tej kombinacji współczynników zależnych od napełnienia. Wygenerowane w logice inicjalizacyjnej, przy użyciu algorytmu z Rys. 27	Sterownik sygnalizacji
$o2$		
$o3$		
$o4$		
$s1$	Kolejne elementy macierzy $S(s_1^m, s_2^m, s_3^m, s_4^m, s_5^m)$ dla m -tej kombinacji współczynników zależnych od odchylenia od harmonogramu. Założono, że $s_1^m = 1$. Pozostałe wartości wygenerowano w logice inicjalizacyjnej przy użyciu algorytmu z Rys. 27	
$s2$		
$s3$		
$s4$		
$s5$		
$alfa$	Współczynnik wagowy α	
$beta$	Współczynnik wagowy β	
$gamma$	Współczynnik kalibrujący γ . Dla wszystkich poligonów przyjęto $\gamma = 3$	
Tc	Graniczna wartość czasu oczekiwania na obsługę Dla wszystkich poligonów przyjęto $Tc = 120$ [s]	
Rf	Współczynniki priorytetowe f -tej fazy sygnalizacyjnej $R_f(t)$. Liczba zdefiniowanych zmiennych Rf odpowiada liczbie faz obsługujących ruch pojazdów PTZ, np. $R1, R2, R3...$	

Bezpośrednio po uruchomieniu symulacji, informacja o jej numerze porządkowym jest wysyłana do modułu inicjalizacyjnego, którego zadaniem jest wygenerowanie kolejnej kombinacji elementów macierzy O oraz S , służących do parametryzacji kolejnych wariantów proponowanej strategii sterowania. Na potrzeby badań, przyjęto uproszczenie ograniczające liczbę analizowanych wariantów, według którego $o_k^n = s_l^m$ dla $l = k + 1$ i $n = m$ (np. $o_1^1 = s_2^1, o_4^3 = s_5^3$). Działanie to pozwala znacznie ograniczyć liczbę

analizowanych kombinacji wariantów sterowania. Uznano to za konieczne, ponieważ w analizach symulacyjnych założono dodatkowe zwielokrotnienie analizowanych wariantów nastaw wynikające z przyjętych dwóch konfiguracji współczynników wagowych α, β : 1) $\alpha = \beta = 1$, 2) $\alpha = 3$, $\beta = 2$. Schemat działania modułu inicjalizacyjnego w zakresie generowania kolejnych kombinacji wartości parametrów $o1-o4$, przedstawia Rys. 27.



Rys. 27. Schemat generowania kolejnych kombinacji parametrów $o1-o4$ w module inicjalizacyjnym.
Źródło: Opr. własne

Do każdego rozpatrywanego w analizie poligonu doświadczalnego zastosowano zestaw indywidualnych wartości parametrów sterujących. Ich zestawienie zamieszczono w Tab. 22.

Tab. 22. Nastawy procesu generowania kombinacji parametrów $o1-o4$ (Rys. 27). Źródło: Opr. własne

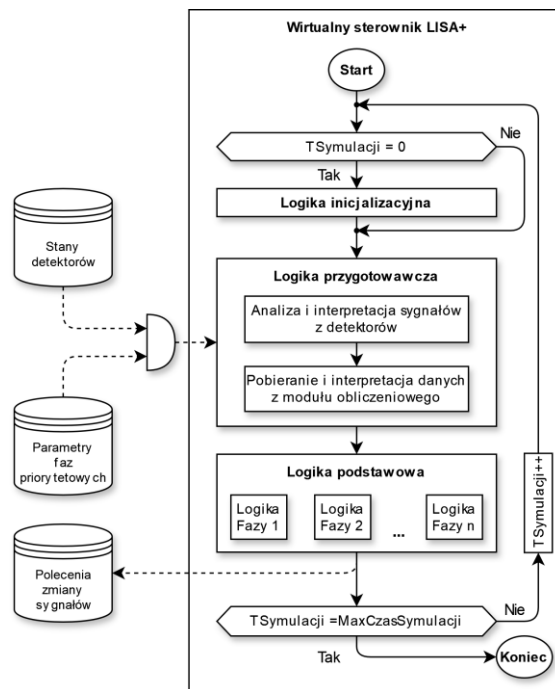
Poligon doświadczalny	Parametr	Wartość parametru	Liczba wygenerowanych kombinacji parametrów $o1-o4$
I	Krok	11	35
	MinValue	30	
II	Krok	13	35
	MinValue	22	
III	Krok	10	70
	MinValue	30	

Następnie, gdy parametry symulacji i sterowania są już ustalone, a w modelu zaczynają pojawiać się pojazdy, z każdym krokiem symulacji aktualne informacje o wykrytych przez system detekcji pojazdach PTZ są przekazywane do modułu obliczeniowego. W pierwszej kolejności, ustalone są wartości parametrów zamieszczonych w Tab. 21, dotyczące pojazdów PTZ. Następnie, są one wykorzystane do kolejnego etapu obliczeń,

podczas którego wyznaczane są wartości współczynników $R_f(t)$ wszystkich faz obsługujących przejazdy pojazdów PTZ. Rezultaty tego etapu zapisywane są do zestawu plików zewnętrznych. Uproszczony kod źródłowy modułu obliczeniowego służącego do obsługi zgłoszeń tramwajowych, zamieszczono w *Załączniku nr 3*.

Algorytm sterowania zbudowany w środowisku LISA+ składa się z zestawu trzech głównych logik: inicjalizacyjnej, przygotowawczej i podstawowej. Pierwsza wywoływana jest wyłącznie na początku wykonywania algorytmu i zawiera instrukcje definiujące np. sposób sterowania (stałoczasowe lub akomodacyjne) czy ustawienia koordynacji. Logika przygotowawcza następuje po logice inicjalizacyjnej i rozpoczyna każdy kolejny przebieg algorytmu. Instrukcje w niej zawarte odpowiadają za analizę i interpretację sygnałów z detektorów rozlokowanych na skrzyżowaniu. W jej wnętrzu zawarto również instrukcje służące do pobierania wartości parametrów $R_f(t)$ wyznaczonych w module obliczeniowym i przechowywanych w zestawie plików pomocniczych. Aby zapewnić poprawną ze standardową komunikacją synchronizację zgłoszeń, wprowadzono warunek, według którego algorytm sterowania nie podejmuje dalszych działań do czasu otrzymania aktualnych danych zarówno z systemu detekcji jak i modułu obliczeniowego. Ostatnia z wymienionych, logika podstawowa, stanowi rdzeń algorytmu sterowania. Wykonywana jest bezpośrednio po logice przygotowawczej. Odpowiada za sprawdzanie stanu każdej ze zbioru zdefiniowanych faz sygnalizacyjnych. W przypadku wykrycia aktywności danej fazy, inicjuje podlogikę odpowiadającą za jej sterowanie. Rezultatem każdego pełnego przebiegu algorytmu sterowania jest wysłanie polecenia zmiany lub utrzymania danego stanu sygnalizatorów w modelu symulacyjnym.

Schemat działania wirtualnego sterownika przedstawiono na Rys. 28. W opracowanej metodzie komunikacji między narzędziami zapewniono możliwość podglądu w czasie rzeczywistym wyników obliczeń wykonywanych zarówno w module inicjalizacyjnym jak i obliczeniowym bezpośrednio w modelu, za pośrednictwem zmiennych przypisanych do sterownika sygnalizacji (por. Tab. 21).

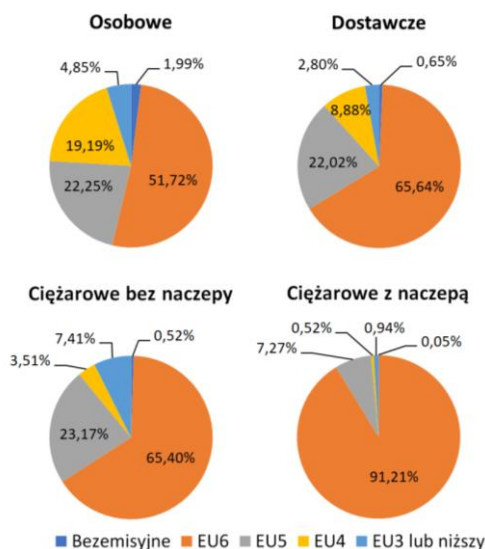


Rys. 28. Schemat działania wirtualnego sterownika LISA+. Źródło: Opr. własne

4.1.5. Charakterystyka przyjętej metody szacowania poziomu emisji CO₂

Jednym z kryteriów oceny poszczególnych wariantów sterowania ruchem jest emisja dwutlenku węgla CO₂ do atmosfery. W związku z tym, jedno z podjętych zadań badawczych polega na wyborze metody szacowania jej poziomu na podstawie zestawu charakterystyk ruchu pojazdów pozyskanych z mikrosymulacji. Do narzędzi umożliwiających szacowanie emisji na podstawie wyników mikrosymulacji należą m.in. ESTM Bosch [65], EnViVer [58] oraz PHEM [69]. Spośród nich do dalszych prac wybrano moduł ESTM Bosch. Wybór ten podyktowany był w głównej mierze faktem integracji modułu z wykorzystywanym w badaniach środowiskiem Vissim oraz prostotą obsługi. Konfiguracja wybranego modułu polega na przyporządkowaniu do każdego przewidzianego w modelu typu pojazdu, odpowiedniego rozkładu poziomu emisji. Na potrzeby realizowanych badań, czterem następującym typom pojazdów, nienależącym do kategorii PTZ, tj. samochodom: osobowym, dostawczym, ciężarowym z naczepą i bez naczepy, przypisano domyślne ustawienia modułu emisji charakteryzujące ruch miejski w Niemczech w 2022 roku według HBEFA [75, 68]. Wybór profilu niemieckiego wynikał z ograniczonego zbioru dostępnych w module profili krajowych oraz z jego przyjęcia jako najbardziej zbliżonego geograficznie punktu odniesienia dla warunków polskich.

Według przyjętych rozkładów, zdecydowana większość pojazdów, niezależnie od ich typu, charakteryzuje się standardem emisji na poziomie EU6 (patrz Rys. 29). Szczególnie jest to widoczne w przypadku pojazdów ciężarowych z naczepą. Odsetek pojazdów spełniających jedynie starsze normy tj. niższe niż EU3, w żadnej kategorii nie stanowi więcej niż 8%. W przypadku samochodów osobowych zauważa się najwyższy udział pojazdów bezemisyjnych, wynoszący 1,99%.



Rys. 29. Charakterystyka zastosowanych typów pojazdów pod kątem europejskiego standardu emisji.
Źródło: Opr. własne na bazie [75, 68]

Ponadto, przyjęte rozkłady zakładają, że prawie wszystkie pojazdy ciężarowe zasilane są silnikami o zapłonie samoczynnym (Tab. 23). Ich udział kształtuje się na poziomie ponad 99%. Resztę stanowią pojazdy zasilane alternatywnymi, bezemisyjnymi źródłami energii. W przypadku samochodów osobowych, rozkład ten jest bardziej zdywersyfikowany. Większość stanowią silniki benzynowe z udziałem na poziomie około 53%. Pojazdy zasilane silnikiem diesla w tym typie pojazdów stanowią 44% ogółu. Resztę stanowią

pojazdy zasilane CNG (0,7%) oraz pojazdy bezemisyjne wykorzystujące alternatywne źródła energii (2%).

Po skalibrowaniu modułu emisji, przystąpiono do serii testów mających na celu m.in. sprawdzenie niezawodności narzędzia oraz czasu obliczeń poziomu emisji.

Tab. 23. Charakterystyka zastosowanych typów pojazdów pod kątem stosowanego rodzaju paliwa. Źródło: Opr. własne na bazie [75, 68]

Typ pojazdu Rodzaj paliwa	osobowe	dostawcze	ciężarowe (bez naczepy)	ciężarowe (z naczepą)
Alternatywne, bezemisyjne źródło energii	2,0 %	0,7 %	0,5 %	0,1 %
CNG	0,7 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Diesel	44,4 %	95,4 %	99,5 %	99,9 %
Benzyna	52,9 %	3,9 %	0,0 %	0,0 %

Wykonane testy procesu symulacyjnego wykazały, że czas trwania pojedynczego eksperymentu wynosi od kilku do kilkunastu minut, co docelowo stanowi znaczne obciążenie czasowe i obliczeniowe. Należy zauważyć, że każdy model według przyjętych założeń ma zostać poddany serii kilkuset symulacji, aby zbadać możliwie szeroki zakres zmienności parametrów początkowych każdej z analizowanych strategii sterowania. Wielkość ta nie uwzględnia dodatkowo konieczności przeprowadzenia trudnej do przewidzenia liczby symulacji testowych związanych z kalibracją i walidacją modelu oraz algorytmu sterowania. Moduł ESTM Bosch pracuje asynchronicznie do symulacji, oznacza to, że po każdej zakończonej symulacji pakiet danych z rezultatami danego eksperymentu wysyłany jest do chmury obliczeniowej, gdzie są one przetwarzane. W tym czasie nie jest możliwe uruchomienie kolejnych symulacji. Według producenta [75] proces ten w zależności od skomplikowania układu oraz obciążenia sieci może trwać nawet do kilkudziesięciu minut. Przeprowadzone testy wykazały, że dla analizowanych polygonów proces ten trwał średnio 5 minut, czasami przekraczając 30 minut. Ostatecznie wykonanie eksperymentów symulacyjnych uwzględniających wykorzystanie modułu ESTM Bosch dla wszystkich przewidzianych polygonów i wariantów sterowania uznano za nieefektywne z perspektywy czasu i zasobów obliczeniowych. Tego rodzaju podejście wiązałoby się z nadmiernym wydłużeniem całkowitego czasu przetwarzania, co mogłoby znacząco ograniczyć możliwość przeprowadzenia pełnej analizy w akceptowalnych ramach czasowych. Dodatkowo, stałe obciążenie związane z wysyłaniem i przetwarzaniem danych w chmurze zwiększało ryzyko dalszych opóźnień w realizacji badań.

W związku z powyższym, podjęto decyzję o opracowaniu alternatywnej metody szacowania poziomu emisji CO₂, jednakże częściowo bazującej na działaniu wybranego modułu. Podstawą tej metody jest wykorzystanie obszernego zbioru wyników symulacji, obejmujących zarówno poziom emisji CO₂ uzyskany za pomocą modułu ESTM Bosch, jak i wybrane inne miary efektywności ruchu pojazdów w sieci, w celu zbudowania modelu regresji wielorakiej.

Zmienną objaśnianą modelem regresji jest sumaryczna godzinna emisja dwutlenku węgla (CO₂) do atmosfery, oznaczona jako y_{CO_2} [g]. Jako zmienne objaśniające wybrano następujące zagregowane do jednej godziny rezultaty efektywności ruchu pojazdów poruszających się w modelowej sieci:

- x_1 - całkowity dystans pokonany przez pojazdy [km],
- x_2 - całkowity czas realizowanych podróży [s],

- x_3 - całkowite straty czasu pojazdów [s],
- x_4 - liczba wszystkich zatrzymań pojazdów [-],
- x_5 - średnia prędkość pojazdów [km/h],
- x_6 - średnie straty czasu pojazdów [s].

Ostateczną, ogólną postać modelu regresji przedstawia zależność (14):

$$y_{CO_2} = \sum_{i=1}^6 \beta_i \cdot x_i \quad (14)$$

gdzie:

β_i – współczynnik regresji dla i -tej zmiennej objaśniającej.

W celu wyznaczenia wartości współczynników regresji dla poszczególnych zmiennych objaśniających przygotowano zestaw 11 pomocniczych modeli symulacyjnych różniących się od siebie pod względem złożoności zamodelowanych układów komunikacyjnych. Dla każdego modelu wykonano serię eksperymentów symulacyjnych odzwierciedlających różne warunki ruchowe – od swobodnego przepływu do sytuacji występowania poważnej kongestii. Do zbioru modeli pomocniczych należą następujące modele:

- Nr 1 – stanowi prosty jednopasowy odcinek drogi, na którym pojazdy poruszają się bez żadnych przeszkód, ruchem swobodnym;
- Nr 2 – stanowi prosty, jednopasowy odcinek drogi, na którym pojazdy zobligowane są do chwilowego zatrzymania się w wyznaczonym miejscu;
- Nr 3 – stanowi prosty dwupasowy odcinek drogi z sygnalizacją z programem stałoczasowym porcjującym przejazd potoku pojazdów;
- Nr 4 – stanowi prosty siedmiopasowy odcinek drogi z trzema sygnalizacjami ze stałoczasowymi programami, porcjującymi przejazd potoku pojazdów;
- Nr 5 – stanowi układ trzech małych skrzyżowań „T-owych” zlokalizowanych w ciągu drogi głównej. Ruch na nich sterowany jest za pomocą trzech sygnalizacji świetlnych, których programy oparte są o proste algorytmy akomodacyjne;
- Nr 6 – stanowi układ dwóch małych oddalonych od siebie skrzyżowań w postaci przejazdu tramwajowego oraz skrzyżowania „T-owego”. Ruch na nich sterowany jest za pomocą dwóch sygnalizacji świetlnych, których programy oparte są o proste algorytmy akomodacyjne;
- Nr 7 – stanowi małe skrzyżowanie „T-owe” z sygnalizacją świetlną, której program oparty jest o prosty algorytm akomodacyjny. Symulacje wykonano dla dwóch alternatywnych wariantów tego programu;
- Nr 8 – stanowi skrzyżowanie dwupasmowej drogi dwukierunkowej z przejazdem tramwajowym. Ruch na nim sterowany jest sygnalizacją świetlną z akomodacyjnym programem uwzględniającym priorytet dla ruchu tramwaju;
- Nr 9 – stanowi docelowy układ poligonu doświadczalnego I, przygotowanego na potrzeby weryfikacji metody sterowania będącej głównym przedmiotem prowadzonych prac. Zastosowane na potrzeby budowy modelu regresji sterowanie zakłada wykorzystanie stałoczasowego programu sygnalizacji;
- Nr 10 – stanowi docelowy układ poligonu doświadczalnego II, przygotowanego na potrzeby weryfikacji metody sterowania będącej głównym przedmiotem prowadzonych prac. Zastosowane na potrzeby budowy modelu regresji sterowanie zakłada wykorzystanie trzech wariantów akomodacyjnego programu sygnalizacji;
- Nr 11 – stanowi docelowy układ poligonu doświadczalnego III, przygotowanego na potrzeby weryfikacji metody sterowania będącej głównym przedmiotem prowadzo-

nych prac. Zastosowane na potrzeby budowy modelu regresji sterowanie zakłada wykorzystanie czterech wariantów akomodacyjnego programu sygnalizacji.

Dla każdego z wymienionych modeli przewidziano co najmniej dziesięć przebiegów symulacji. Wraz z każdym kolejnym przebiegiem, stopniowo zwiększano natężenie ruchu. Dzięki temu działaniu, symulacji poddano scenariusze zakładające obciążenie ruchem na poziomie od około 10% do około 150% natężenia wyjściowego. Dodatkowo, duża część przebiegów symulacji uwzględnia kilka godzinnych interwałów, przez co docelowa liczba godzinnych obserwacji możliwych do wykorzystania w analizie regresji wyniosła 1090. W Tab. 24 zestawiono krótką charakterystykę ilościową modeli pomocniczych oraz warunków, dla których wykonano symulacje.

Tab. 24. Charakterystyka modeli pomocniczych wykorzystanych przy budowie modelu regresji. Źródło: Opr. własne

Numer modelu	Liczba skrzyżowań	Liczba sygnalizacji	Rodzaj Sterowania (1 - stałoczasowe, 2 - akomodacyjne)	Wariant sterowania	Przyrost natężenia ruchu wraz z kolejnymi przebiegami symulacji	Liczba Przebiegów symulacji	Liczba godzinnych interwałów przypadających na jeden przebieg symulacji
1	0	0	nd.	nd.	tak	42	1
2	0	0	nd.	nd.	tak	130	1
3	0	1	1	1	tak	40	1
4	0	3	1	1	tak	10	1
5	3	3	2	1	tak	18	1
6	2	2	2	1	tak	15	1
7	1	1	2	1	tak	40	1
				2	tak	15	1
8	1	1	2	1	tak	20	2
9	1	1	1	1	tak	13	2
10	1	1	2	1	tak	13	2
				2	tak	13	2
				3	tak	13	2
11	1	1	2	1	tak	30	6
				2	nie	35	6
				3	nie	35	6
				4	tak	12	3

Po odfiltrowaniu przebiegów, dla których odnotowano problemy z połączeniem z chmurą obliczeniową, liczba obserwacji została zredukowana do 956. Następnie przystąpiono do właściwych obliczeń modelu regresji. Działanie to wykonano w czterech iteracjach (Tab. 25). Po trzech pierwszych iteracjach odrzucano część obserwacji ekstremalnych, charakteryzujących się bardzo dużą wartością składników resztowych, większą niż trzykrotność błędu standardowego. Dążono w ten sposób do uzyskania możliwie najwyższej wartości parametru R^2 , przy jednoczesnym zachowaniu dostatecznie dużego zbioru obserwacji. W trakcie wykonywania poszczególnych iteracji zwrócono również uwagę czy wybrane zmienne objaśniające są statystycznie istotne, tj. czy ich wartość $-p$ jest mniejsza niż 5%. W Tab. 25 zestawiono wartości parametrów regresji dla poszczególnych iteracji.

Ostateczny model regresji opracowano na zbiorze 909 obserwacji, spełniających wcześniej wspomniane warunki. Oznacza to, że początkowy zestaw wyników zredukowano o niecałe 5%.

Tab. 25. Zestawienie parametrów modelu regresji wielorakiej. Źródło: Opr. własne

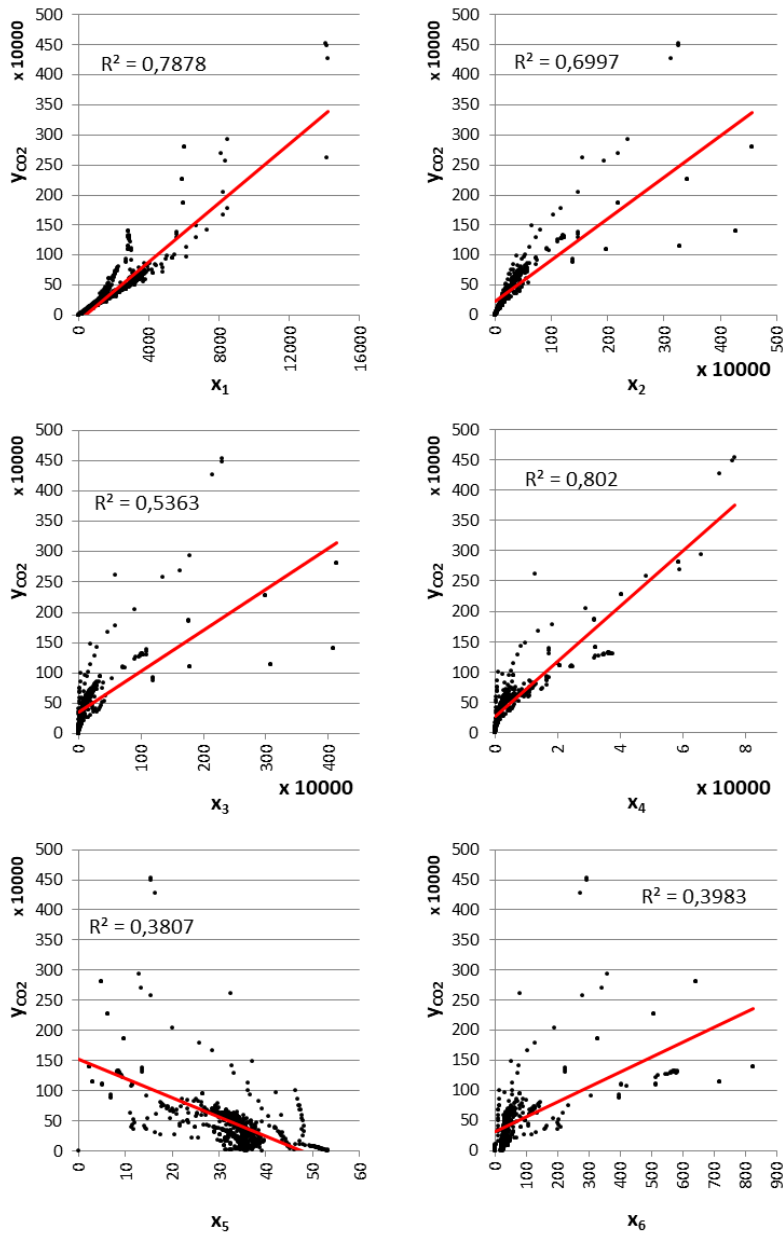
Parametr \ Iteracja	1	2	3	4
β_1	884,997	680,495	566,064	543,408
β_2	-10,267	-7,450	-5,881	-5,573
β_3	10,344	7,565	6,000	5,696
β_4	21,725	23,237	24,249	24,455
β_5	94,474	260,355	338,559	357,493
β_6	58,105	-169,68	-213,287	-227,328
R^2	0,989	0,994	0,995	0,996
Błąd standardowy	74 912,679	50 181,819	44 925,464	43 098,569
Liczba obserwacji	956	921	913	909
Wartość $-p$ dla x_1	$9,997 \cdot 10^{-58}$	$3,513 \cdot 10^{-60}$	$7,441 \cdot 10^{-51}$	$1,366 \cdot 10^{-49}$
Wartość $-p$ dla x_2	$1,045 \cdot 10^{-40}$	$6,198 \cdot 10^{-39}$	$6,319 \cdot 10^{-30}$	$1,526 \cdot 10^{-28}$
Wartość $-p$ dla x_3	$2,728 \cdot 10^{-41}$	$4,572 \cdot 10^{-40}$	$4,459 \cdot 10^{-31}$	$1,014 \cdot 10^{-29}$
Wartość $-p$ dla x_4	$1,529 \cdot 10^{-168}$	$9,578 \cdot 10^{-267}$	$1,326 \cdot 10^{-306}$	0
Wartość $-p$ dla x_5	$4,772 \cdot 10^{-1}$	$4,065 \cdot 10^{-3}$	$3,288 \cdot 10^{-5}$	$5,026 \cdot 10^{-6}$
Wartość $-p$ dla x_6	$2,387 \cdot 10^{-1}$	$1,063 \cdot 10^{-6}$	$1,238 \cdot 10^{-11}$	$6,710 \cdot 10^{-14}$

Przedstawione na Rys. 30 zależności cząstkowe pokazują wpływ poszczególnych zmiennych objaśniających na emisję CO₂. Najwyższe współczynniki determinacji R^2 dla zmiennych x_4 (liczba zatrzymań) i x_1 (całkowity dystans) wynoszą odpowiednio 0,8020 i 0,7878, co wskazuje na ich znaczący wpływ na poziom emisji. Zmienne x_2 (czas podróży) z R^2 równym 0,6997 oraz x_3 (straty czasu) z R^2 na poziomie 0,5363 również istotnie wpływają na jej ostateczną wartość. Najniższe wartości współczynnika determinacji uzyskano dla x_5 (średnia prędkość) i x_6 (średnie straty czasu), odpowiednio 0,3983 i 0,3807, co wskazuje na ich mniejszy wpływ. Jednak, ostateczny model regresji wielorakiej osiąga wartość współczynnika R^2 równą 0,9960, co sugeruje, że uwzględnienie wszystkich zmiennych jednocześnie pozwala na znacznie dokładniejsze prognozowanie emisji CO₂ niż analiza pojedynczych zmiennych.

Wyniki przeprowadzonej analizy uznano za wystarczające przesłanki, ku stwierdzeniu, że zaproponowany model matematyczny estymacji poziomu emisji CO₂ spełnia swoje zadanie i może zostać z powodzeniem wykorzystany w dalszych analizach. Zatem do dalszych prac wykorzystano zależność określoną następującym wzorem (15):

$$y_{CO_2} = 543,408 \cdot x_1 - 5,573 \cdot x_2 + 5,696 \cdot x_3 + 24,455 \cdot x_4 + 357,493 \cdot x_5 - 227,328 \cdot x_6 \quad (15)$$

Zestawienie wszystkich wyników symulacji, wykorzystanych przy konstrukcji ostatecznego równania regresji zawarto w *Załączniku nr 4*.



Rys. 30. Liniowe zależności między poszczególnymi zmiennymi objaśniającymi a zmienną objaśnianą.
Źródło: Opr. własne

4.1.6. Opis przyjętej procedury budowy i weryfikacji środowiska testowego

Budowa środowiska testowego (por. etap E4) w postaci modelu mikrosymulacyjnego obejmuje opracowanie jego części podażowej oraz popytowej. Część podażowa odwzorowuje infrastrukturę transportową objętą zakresem modelu oraz zasady organizacji i sterowania ruchem, tworząc środowisko, w którym poruszają się uczestnicy ruchu. Natomiast część popytowa odwzorowuje zapotrzebowanie na podróże, obejmujące wielkość ruchu, jego strukturę rodzajową i kierunkową oraz rozkład w czasie.

Budowę części podażowej należy rozpocząć od odwzorowania geometrii układu transportowego na podstawie możliwie szczegółowych materiałów źródłowych, w szczególności planu sytuacyjnego. Przebieg odcinków i łączników należy ukształtować tak, aby pojazdy mogły prawidłowo realizować przypisane trasy, w tym płynnie i odpowiednio wcześniej zajmować pasy właściwe dla realizowanych relacji.

Pozwala to ograniczyć występowanie manewrów nienaturalnych, niezgodnych z zasadami ruchu lub wynikających wyłącznie z uproszczeń modelowych, które mogłyby wpływać na ocenę warunków ruchu. Odcinki dołotowe powinny być na tyle długie, aby kolejki powstające podczas symulacji mieściły się w granicach modelu i nie ograniczały liczby wprowadzanych do niego pojazdów.

Na relacjach skrętnych, łukach oraz innych odcinkach o ograniczonej swobodzie przejazdu należy zdefiniować lokalne ograniczenia prędkości, dostosowane do geometrii toru jazdy. W miejscach potencjalnych kolizji pomiędzy potokami ruchu należy natomiast odtworzyć zasady pierwszeństwa wynikające z przyjętej organizacji ruchu. W zależności od zakresu modelu część podażowa powinna również obejmować pozostałe elementy infrastruktury, takie jak torowiska, przystanki PTZ, przejścia dla pieszych oraz infrastruktura rowerowa.

Do modelu należy następnie zaimplementować wirtualne sterowniki sygnalizacji świetlnej przygotowane w etapie E3 oraz rozmieścić sygnalizatory i detektory. Sygnalizatory należy powiązać z odpowiednimi grupami sygnalizacyjnymi, natomiast lokalizacja i konfiguracja detektorów powinny umożliwiać pozyskanie wszystkich informacji wymaganych przez poszczególne algorytmy sterowania. Elementy te należy zintegrować w sposób zapewniający wymianę danych pomiędzy modelem mikrosymulacyjnym a sterownikami, w tym przekazywanie zgłoszeń detektorowych, stanów grup sygnalizacyjnych oraz indywidualnych parametrów pojazdów PTZ, jeżeli wymaga tego algorytm.

Po opracowaniu części podażowej należy zdefiniować część popytową modelu. Dla TI należy wprowadzić generatory ruchu i przypisać im natężenia wraz z ich rozkładem w czasie, określić strukturę rodzajową ruchu oraz zdefiniować trasy przejazdu odwzorowujące przyjętą strukturę kierunkową. Dla pojazdów PTZ należy utworzyć linie komunikacyjne, określić przebieg ich tras i harmonogramy kursowania, a także zdefiniować parametry opisujące początkowe napełnienie i odchylenie realizacji kursu od harmonogramu. Jeżeli zakres modelu obejmuje ruch pieszy lub rowerowy, należy analogicznie określić wielkość tych potoków, ich rozkład w czasie oraz trasy przemieszczania się. W przypadku obsługi przystanków należy ponadto odwzorować proces wymiany pasażerskiej.

Po zakończeniu budowy modelu, w ramach tego samego etapu metodyki, należy przeprowadzić jego wieloetapową weryfikację, a w przypadku dostępności odpowiednich danych referencyjnych również kalibrację wybranych parametrów. W tym celu należy wykonać serię przebiegów testowych pozwalających na ocenę modelu w różnych warunkach ruchu. Kontrolę powinny podlegać w szczególności:

- poprawność odwzorowania geometrii i organizacji ruchu oraz prawidłowość zachowania uczestników ruchu;
- zgodność wielkości ruchu, jego struktury rodzajowej, kierunkowej i czasowej oraz parametrów przypisanych poszczególnym grupom uczestników z przyjętymi wartościami referencyjnymi;
- poprawność odwzorowania procesu rozładowywania kolejek, oceniana na podstawie natężenia nasycenia;
- działanie systemu detekcji, wirtualnych sterowników i algorytmów sterowania, w tym poprawność wymiany danych oraz zachowanie wymagań bezpieczeństwa ruchu;
- kompletność generowanych wyników oraz ich powtarzalność dla jednakowych wa-

runków początkowych i tej samej wartości ziarna losowego.

W pierwszej kolejności należy ocenić poprawność odwzorowania układu odcinków i połączeń między nimi. Kontrola ta powinna mieć charakter jakościowy i polegać na obserwacji zachowania uczestników ruchu podczas kolejnych przebiegów testowych. Należy sprawdzić, czy pojazdy mogą odpowiednio wcześniej zająć pas właściwy dla przypisanej trasy, czy zmiany pasa ruchu odbywają się płynnie oraz czy nie występują nienaturalne manewry, nieuzasadnione nagłe zatrzymania ani kolizje między uczestnikami ruchu. Kontroli należy poddać również przestrzeganie zasad pierwszeństwa oraz dostosowywanie prędkości do geometrii poszczególnych relacji. W przypadku stwierdzenia nieprawidłowości należy skorygować geometrię odcinków i łączników, odległości zmiany pasa ruchu, przebieg tras lub lokalizację obiektów sterujących, a następnie ponowić obserwacje.

Elementem tej kontroli powinna być również analiza komunikatów dotyczących pojazdów usuwanych z modelu po przekroczeniu czasu określonego parametrem *waiting time before diffusion*. Parametr ten określa czas, przez jaki pojazd może oczekiwać na możliwość wykonania zmiany pasa niezbędnej do kontynuowania przejazdu po przypisanej trasie. Po jego przekroczeniu Vissim usuwa pojazd z modelu i generuje odpowiedni komunikat. Jako wspólne założenie dla wszystkich modeli opracowanych w ramach badań przyjęto wartość tego parametru równą 180 s, zastępując jego domyślną wartość wynoszącą 60 s. Pozwoliło to ograniczyć ryzyko przedwczesnego usuwania pojazdów oczekujących na zmianę pasa w rejonie skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, szczególnie przy długich cyklach programu oraz utrzymujących się kolejkach. Usuwanie takich pojazdów mogłoby prowadzić do sztucznego zmniejszenia liczby pojazdów w sieci, a w konsekwencji do zawyżenia przepustowości modelowanego układu. Brak możliwości wykonania niezbędnego manewru również w czasie 180 s należy natomiast traktować jako sygnał wymagający ponownej kontroli geometrii odcinków i łączników, przebiegu tras lub parametrów zmiany pasa ruchu. Model należy korygować do momentu wyeliminowania przypadków usuwania pojazdów z tego powodu.

Kolejny zakres weryfikacji powinien obejmować kontrolę zgodności ruchu generowanego w modelu z przyjętymi wartościami referencyjnymi. Porównania należy przeprowadzić odrębnie dla poszczególnych relacji ruchu, kategorii pojazdów oraz analizowanych przedziałów czasu, co umożliwia jednocześnie sprawdzenie wielkości ruchu oraz jego struktury rodzajowej, kierunkowej i czasowej. W przypadku pojazdów PTZ należy ponadto potwierdzić zgodność liczby kursów oraz parametrów opisujących początkowe napełnienie i odchylenie realizacji kursu od harmonogramu z przyjętymi założeniami. W zależności od charakteru modelowanego układu wartościami referencyjnymi mogą być wyniki pomiarów terenowych albo wartości wynikające z założeń modelu. W drugim przypadku porównanie stanowi kontrolę poprawności odwzorowania przyjętych założeń, a nie walidację modelu względem rzeczywistych warunków ruchu.

Zgodność wielkości ruchu należy zweryfikować ilościowo, np. z wykorzystaniem współczynnika determinacji R^2 oraz wskaźnika GEH. Współczynnik R^2 określa stopień dopasowania liniowej zależności pomiędzy natężeniami uzyskanymi w modelu a odpowiadającymi im wartościami referencyjnymi i pozwala ocenić, w jakim stopniu zmienność jednego zbioru znajduje odzwierciedlenie w drugim. Jego wartość mieści się w przedziale od 0 do 1, przy czym wartości bliższe 1 oznaczają silniejsze dopasowanie liniowe. W przyjętej procedurze współczynnik R^2 należy wyznaczyć dla natężeń w interwałach 15-minutowych. Sam współczynnik R^2 nie pozwala jednak ocenić wielkości bezwzględnych rozbieżności między porównywanymi natężeniami, dlatego uzupełniając należy zastosować wskaźnik GEH. Wskaźnik ten służy do oceny różnic pomiędzy natężeniami uzyskanymi w modelu a odpowiadającymi im wartościami referencyjnymi,

z uwzględnieniem poziomu porównywanych potoków ruchu. W odróżnieniu od prostej różnicy procentowej wskaźnik GEH uwzględnia również wielkość porównywanych potoków ruchu, przypisując większe znaczenie rozbieżnościom występującym przy większych natężeniach. Wartości wskaźnika GEH należy wyznaczyć dla natężeń przeliczonych na jedną godzinę. Jego wartość wyznacza się zgodnie ze wzorem (16):

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}} \quad (16)$$

gdzie:

M – natężenie ruchu uzyskane w modelu [poj./h],

C – referencyjne natężenie ruchu (przyjęte lub zmierzone) [poj./h].

Mniejsza wartość wskaźnika GEH oznacza większą zgodność porównywanych natężeń. Na podstawie wytycznych TfL [159] oraz kryteriów stosowanych w literaturze dotyczącej kalibracji i walidacji modeli mikrosymulacyjnych, np. [144, 87] przyjęto, że akceptowalny poziom zgodności uzyskuje się, gdy wartość GEH jest mniejsza od 5 dla co najmniej 85% porównań. Jednocześnie dla kluczowych relacji ruchu dążono do uzyskania wartości GEH mniejszej od 3.

Jeżeli dostępne są odpowiednie dane terenowe, kolejnym działaniem powinna być weryfikacja i ewentualna kalibracja natężenia nasycenia na wlotach skrzyżowania. Wartości referencyjne należy wyznaczyć na podstawie odstępów czasowych pomiędzy kolejnymi pojazdami przekraczającymi linię zatrzymania w warunkach nasycenia. Obliczenia należy przeprowadzić odrębnie dla kontrolowanych relacji ruchu, a następnie porównać uzyskane wartości z natężeniami nasycenia wyznaczonymi podczas przebiegów testowych modelu. Przebiegi te należy rozpocząć z zastosowaniem standardowych wartości parametrów modelu *Wiedemanna-74* odpowiedzialnych za sposób podążania za liderem i utrzymywanie odstępów pomiędzy pojazdami.

Natężenie nasycenia nie jest wprowadzane w programie Vissim bezpośrednio, lecz zależy przede wszystkim od prędkości pojazdów oraz utrzymywanych pomiędzy nimi odstępów. Zgodnie z zaleceniami TfL [159] jego kalibrację należy rozpocząć od zastosowania w rejonie linii zatrzymania krótkich obszarów ograniczonej prędkości RSA (ang. *reduced speed area*). W kolejnych przebiegach testowych należy systematycznie zmieniać przypisany do nich rozkład prędkości pożądanej i porównywać uzyskiwane natężenia nasycenia z wartościami referencyjnymi. Dopiero gdy za pomocą RSA nie jest możliwe uzyskanie wymaganej zgodności, a wyniki obserwacji lub pomiarów wskazują na odmienny sposób utrzymywania odstępów przez kierowców, dopuszczalne jest przeprowadzenie kalibracji parametrów modelu *Wiedemanna-74*. Zmiany tych parametrów powinny być ograniczone do niezbędnego minimum i nie powinny prowadzić do tworzenia odrębnej konfiguracji modelu dla każdej relacji, chyba że takie zróżnicowanie znajduje jednoznaczne potwierdzenie w danych terenowych.

W przyjętej procedurze kryterium kalibracji natężenia nasycenia należy uznać za spełnione, jeżeli w pięciu kolejnych przebiegach testowych wartość bezwzględna różnicy względnej pomiędzy natężeniem nasycenia wyznaczonym w modelu a wartością referencyjną nie przekracza 5% dla żadnej z kontrolowanych relacji. Jeżeli nie są dostępne dane umożliwiające wyznaczenie referencyjnych natężeń nasycenia, podstawę powinny stanowić standardowe ustawienia modelu. Ewentualne zmiany parametrów modelu *Wiedemanna-74* lub konfiguracji obszarów RSA można wprowadzać w ograniczonym zakresie, opierając je na dostępnych wytycznych lub wynikach kalibracji modeli

układów o zbliżonych cechach geometrycznych i ruchowych. Niezależnie od przyjętego rozwiązania sposób rozładowywania kolejek należy ocenić jakościowo podczas przebiegów testowych.

Kolejnym obszarem weryfikacji powinno być działanie algorytmów sterowania. Jej celem jest potwierdzenie zgodności funkcjonowania wirtualnych sterowników z przyjętymi regułami sterowania, parametrami czasowymi programów sygnalizacji oraz wymaganiami bezpieczeństwa ruchu. Weryfikację należy przeprowadzić dwuetapowo: najpierw w formie testów scenariuszowych poszczególnych strategii sterowania w środowisku LISA+, a następnie w formie testów integracyjnych po połączeniu wirtualnych sterowników z modelem Vissim.

Testy scenariuszowe należy przeprowadzić dla każdej strategii sterowania, ze szczególnym uwzględnieniem granicznych wartości jej parametrów oraz zmiennych wejściowych wykorzystywanych przez algorytm. Powinny one polegać na kontrolowanym wywoływaniu zgłoszeń z detektorów oraz obserwacji reakcji algorytmu w warunkach typowych, granicznych i nietypowych. Należy sprawdzić działanie programu przy braku zgłoszeń, wystąpieniu pojedynczych zgłoszeń oraz jednoczesnym pojawieniu się zgłoszeń na relacjach kolizyjnych i niekolizyjnych. Kontroli wymagają również sytuacje, w których zgłoszenia pojawiają się w pobliżu momentu osiągnięcia minimalnych lub maksymalnych czasów trwania faz oraz podczas realizacji przejść międzyfazowych. W przypadku jednoczesnego występowania wielu zgłoszeń należy dodatkowo sprawdzić prawidłowość ustalania kolejności ich obsługi oraz zachowanie w pamięci zgłoszeń, które nie zostały jeszcze obsłużone.

Podczas testów należy rejestrować, a następnie poddać automatycznej analizie stany grup sygnalizacyjnych, faz i detektorów oraz wartości zmiennych wykorzystywanych przez algorytm. Kontrola powinna obejmować wykluczenie jednoczesnego nadawania sygnału zezwalającego grupom kolizyjnym, zachowanie wymaganych czasów międzyzielonych, minimalnych czasów trwania faz oraz aktualnie obowiązujących wartości czasów maksymalnych. Należy również sprawdzić poprawność realizacji przejść międzyfazowych, rejestrowania i kasowania zgłoszeń, wyboru kolejnej fazy oraz wyznaczania poziomu priorytetu na podstawie informacji przekazywanych do algorytmu.

Po pozytywnym zakończeniu testów scenariuszowych należy przeprowadzić testy integracyjne obejmujące analogiczny zbiór sytuacji po połączeniu wirtualnych sterowników z modelem Vissim. Ich zasadniczym celem powinno być sprawdzenie poprawności dwukierunkowej wymiany danych pomiędzy modelem mikrosymulacyjnym a sterownikiem LISA+. Kontroli należy poddać przekazywanie do sterownika zgłoszeń detektorowych i informacji charakteryzujących pojazdy PTZ, a w kierunku przeciwnym stanów grup sygnalizacyjnych. Należy również potwierdzić, że wzbudzanie i kasowanie zgłoszeń następuje w odpowiednich momentach, a zmiany stanów grup sygnalizacyjnych wywołują w modelu właściwe reakcje poszczególnych grup uczestników ruchu.

Końcowym elementem testów integracyjnych powinno być sprawdzenie prawidłowego zakończenia przebiegów symulacyjnych, kompletności generowanych wyników oraz ich powtarzalności dla jednakowych warunków początkowych i tej samej wartości ziarna losowego. Warunkiem dopuszczenia danej strategii sterowania do właściwych eksperymentów symulacyjnych powinno być niewystąpienie żadnego naruszenia przyjętych warunków kontrolnych oraz potwierdzenie poprawnego działania systemu detekcji i wymiany danych. W przypadku stwierdzenia nieprawidłowości należy skorygować algorytm, konfigurację sterownika lub sposób jego powiązania z modelem, a następnie powtórzyć odpowiedni zakres testów scenariuszowych i integracyjnych.

4.1.7. Podstawowe założenia docelowych eksperymentów symulacyjnych

Po pozytywnym zakończeniu budowy i weryfikacji środowiska testowego w ramach etapu E4, należy przygotować plan właściwych eksperymentów symulacyjnych, realizowanych w etapie E5. Plan powinien obejmować wszystkie warianty sterowania zdefiniowane w etapie E3 oraz zapewniać ich ocenę w porównywalnych warunkach ruchu.

Ze względu na stochastyczny charakter ruchu drogowego oceny wariantów sterowania nie należy opierać na wyniku pojedynczego przebiegu symulacyjnego, ponieważ może on zależeć od konkretnej realizacji procesów losowych i nie być reprezentatywny dla analizowanego wariantu. Każdy wariant należy zatem poddać serii przebiegów z różnymi wartościami parametru ziarna symulacji (ang. *random seed*), który steruje realizacją procesów losowych w modelu. W prowadzonych badaniach wykonano po pięć przebiegów dla każdego wariantu, stosując kolejne całkowitoliczbowe wartości ziarna od 41 do 45. Ten sam zestaw wartości wykorzystano dla wszystkich wariantów, co zapewniło porównywalność warunków symulacji oraz powtarzalność uzyskiwanych wyników.

W środowisku Vissim, niektóre elementy modelu domyślnie mają deterministyczny charakter. Oznacza to, że wartość niektórych parametrów nie ulega zmianie na skutek aktualizacji wartości ziarna symulacji. Parametrem tym jest np. początkowa wartość napełnienia pojazdu PTZ, wygenerowanego według przyjętego rozkładu jazdy. Zważając na istotną rolę, jaką pełni w przedmiotowej analizie aspekt liczby pasażerów danego pojazdu, dla każdego kursu linii PTZ, przygotowano pięć zestawów wartości napełnienia, które przypisano do odpowiednich ziaren symulacji.

Do analiz symulacyjnych na wybranych poligonach doświadczalnych, przygotowano wiele wariantów kilku strategii sterowania, reprezentujących różne podejścia w kwestii priorytetyzacji PTZ. Uwzględnienie w analizach stochastycznego charakteru ruchu spowodowało pięciokrotne zwiększenie ostatecznej liczby symulacji. Z tego względu zdecydowano, żeby każdy poligon doświadczalny poddać analizie w warunkach jednego wybranego szczytu komunikacyjnego. Ostatecznie, dla każdego wariantu sterowania do oceny efektywnościowej wykorzystano uśrednione wyniki z pięciu kolejnych iteracji symulacji. Przy czym wcześniej upewniono się, że wszystkie oceny cząstkowe nie charakteryzują się znacznym odchyleniem od wskazanej wartości średniej.

Każdy pojedynczy eksperyment symulacyjny podzielony został na trzy kolejne etapy: przygotowawczy, główny i rozładowania. Etap przygotowawczy trwa co najmniej 30 minut. Rozpoczyna się z chwilą inicjalizacji symulacji. Poprzedza główną część symulacji i polega na wypełnieniu sieci symulacyjnej uczestnikami ruchu, tj. pojazdami, pieszymi, rowerzystami. Jego istotą jest zapewnienie zamierzonych warunków ruchowych w momencie rozpoczęcia godziny szczytu. Efektywność ruchu pojazdów podczas tego etapu symulacji nie jest brana pod uwagę w ocenie.

Kolejny, główny etap symulacji trwa jedną godzinę i odzwierciedla obciążenie sieci, charakterystyczne dla wybranej godziny szczytu. W czasie trwania tego etapu ruch pojazdów poddawany jest ocenie z wykorzystaniem wybranych miar efektywności.

Ostatnia część symulacji, tj. etap rozładowania, trwa co najmniej 30 minut. Ma na celu zapewnienie możliwości dokończenia podróży wszystkim uczestnikom wygenerowanym w ramach poprzedniego etapu symulacji. Efektywność ruchu pojazdów w czasie trwania tego etapu nie jest brana pod uwagę w ocenie. Etap ten umożliwia również kontrolę rozładowywania kolejek powstałych w głównej części symulacji oraz identyfikację ewentualnych trwałych blokad ruchu.

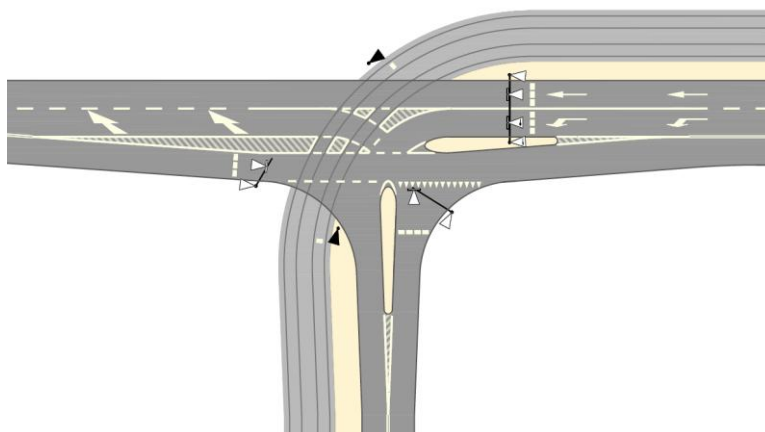
4.2. Charakterystyka badań dla PDI i wyniki symulacji

4.2.1. Charakterystyka ogólna obszaru badań dla PDI (E1)

Pierwszy poligon doświadczalny obejmuje niewielkie trójwlotowe skrzyżowanie typu „T”. Droga główna biegnie w osi wschód-zachód, a od południa pod kątem prostym dołącza do niej droga podporządkowana. Ruch samochodów odbywa się pomiędzy wszystkimi wlotami, natomiast tramwaje poruszają się jedynie między wlotami wschodnim i południowym.

Wlot wschodni składa się z dwóch pasów ruchu: zewnętrznego, obsługującego strumień pojazdów jadących na wprost oraz wewnętrznego, przeznaczonego do skrętu w lewo. Po północnej stronie wlotu, równoległe do jezdni biegnie torowisko tramwajowe, które przecina drogę główną w centralnej części skrzyżowania i dalej kontynuuje swój przebieg po zachodniej stronie wlotu południowego. Na pozostałych wlotach skrzyżowania, tj. południowym i zachodnim wyznaczono po jednym pasie dla ruchu samochodowego. W obrębie całego skrzyżowania, dla wszystkich pojazdów obowiązuje maksymalna dopuszczalna prędkość wynosząca 50 km/h.

Fragment planu sytuacyjnego, przedstawiający wyłącznie centralną część tarczy skrzyżowania zaprezentowano na Rys. 31. Wszystkie szczegóły geometryczne układu drogowego wchodzącego w skład PDI zamieszczono na planie sytuacyjnym w *Załączniku nr 5*. Uwzględniono na nim organizację ruchu w zakresie oznakowania poziomego oraz rozmieszczenie wszystkich urządzeń sygnalizacji świetlnej.



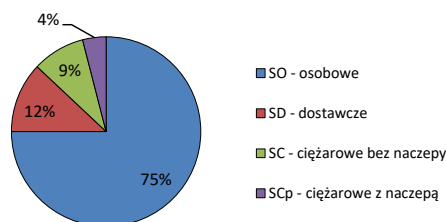
Rys. 31. Układ geometryczny skrzyżowania wraz z przyjętą organizacją ruchu - PDI. Źródło: Opr. własne

Zgodnie z treścią rozdziału 4.1.1, w pracach skoncentrowanych na pierwszym, hipotetycznym poligonie, całkowicie pominięto ruch pieszy i rowerowy skupiając się wyłącznie na zmotoryzowanych uczestnikach ruchu. Na wszystkich wlotach przyjęto jednorodną strukturę rodzajową pojazdów (patrz Rys. 32), według której większość, bo 75% stanowią samochody osobowe. Udział samochodów dostawczych wynosi 12%, a pozostałe 13% stanowią samochody ciężarowe.

Natężenie ruchu pojazdów na poszczególnych relacjach zamieszczono na Rys. 33. Przedstawione na nim wartości wyrażono w pojazdach umownych, zakładając domyślny dla oprogramowania LISA+ przelicznik, według którego jeden samochód:

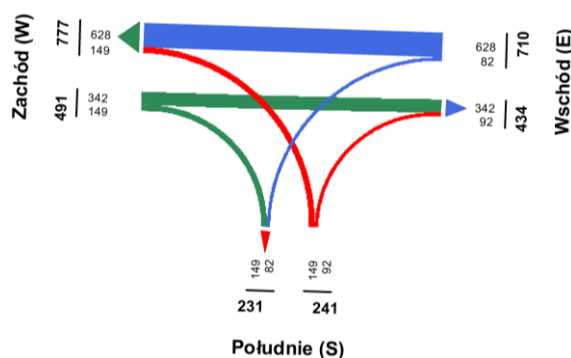
- osobowy lub dostawczy to 1 pojazd umowny [E],
- ciężarowy bez naczepy to 1,5 pojazdu umownego [E],

- ciężarowy z naczepą to 2 pojazdy umowne [E].



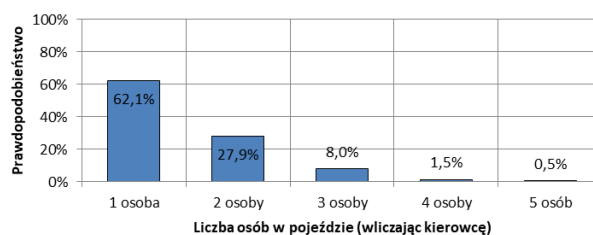
Rys. 32. Struktura rodzajowa pojazdów – PDI. Źródło: Opr. własne

Największe wolumeny ruchu samochodowego występują w kierunkach na wprost pomiędzy wlotami drogi głównej. Relacje skrajne charakteryzuje znacznie mniejsze obciążenie, wynoszące maksymalnie 149 poj. umownych na godzinę (oba kierunki relacji zachód-południe). Najmniej pojazdów skręca w lewo z wlotu wschodniego na południe.



Rys. 33. Kartogram natężenia ruchu samochodowego [E] – PDI. Źródło: Opr. własne

Dodatkowo, w analizie założono, że spośród pojazdów transportu samochodowego tylko samochód osobowy umożliwia podróż więcej niż jednej osobie. Przyjęto rozkład (por. Rys. 34), zgodnie z którym 62,1% osób podróżuje w pojedynkę samochodem osobowym, 27,9% odbywa podróż z jednym pasażerem, a 8% z dwoma pasażerami. Przejazdy z trzema lub czterema pasażerami są marginalne i stanowią łącznie 2% ogółu podróży. Ostatecznie, średnie napełnienie pojazdu wynosi 1,5 osoby.



Rys. 34. Przyjęty rozkład napełnienia samochodów osobowych w analizie – PDI. Źródło: Opr. własne

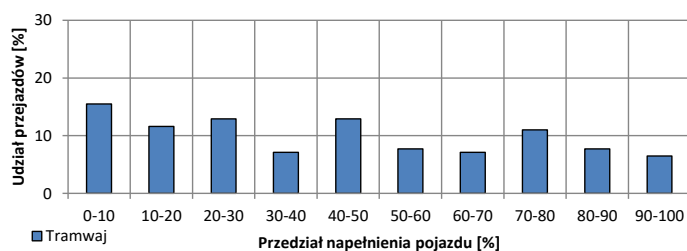
Usługi TZ w obrębie skrzyżowania realizowane są za pośrednictwem jednej umownej linii tramwajowej. Łącznie, w ciągu godziny przez skrzyżowanie przejeżdża 69 tramwajów, z czego 40 jedzie ze wschodu na południe, natomiast tylko 29 w kierunku przeciwnym. Pełny rozkład jazdy wraz z zestawieniem wylosowanych wartości napełnienia tramwajów dla wszystkich ziaren symulacji zawarto w *Załączniku nr 6*. Średnie napełnienie tramwajów utrzymuje się na poziomie 90 osób, jednak odnotowuje się również

wartości skrajne bądź im bliskie (patrz Tab. 26). Do losowania liczby pasażerów wykorzystano równomierny rozkład wartości w zakresie od 0 do 200 pasażerów, przy czym wartość 200 przyjęto jako pojemność tramwaju, odpowiadającą jego 100-procentowemu napełnieniu. Oznacza to, że każda wartość z tego przedziału miała jednakowe prawdopodobieństwo wystąpienia, co sprowadza się do uzyskania szerokiego zakresu zmienności w czasie symulacji. W rezultacie zamieszczone na Rys. 35 przedziały napełnienia są reprezentowane w bardzo zbliżonym stopniu.

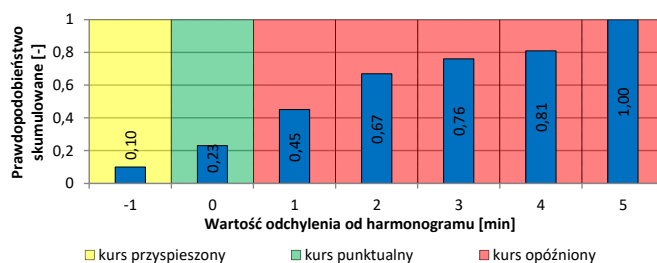
Podobnie jak w przypadku parametru napełnienia, dla każdego tramwaju wartość początkową odchylenia od rozkładu jazdy wygenerowano stosując równomierny rozkład prawdopodobieństwa (patrz Rys. 36). Przy czym założono, że ponad trzy czwarte kursów

Tab. 26. Charakterystyka linii publicznego transportu zbiorowego – PDI. Źródło: Opr. własne

Rodzaj linii PTZ	Grupa sygn.	Liczba kursów dla 1 ziarna symulacji	Napełnienie pojazdu pasażerami [os.]			
			Średnie	Minimalne	Maksymalne	Odchylenie standardowe
Tramwajowa	E→S	40	87	1	195	49
	S→E	29	91	0	198	53



Rys. 35. Rozkład napełnienia tramwajów – PDI. Źródło: Opr. własne



Rys. 36. Rozkład prawdopodobieństwa odchylenia kursu od harmonogramu jazdy – PDI. Źródło: Opr. własne

charakteryzuje opóźnienie mieszczące się w przedziale od 1 do 5 minut. Przejazdy punktualne i przyspieszone dotyczą jedynie 23% przejazdów tramwajów.

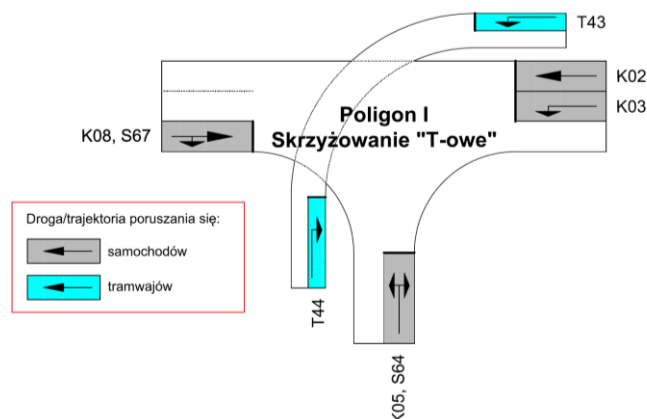
Przygotowane dane dotyczące geometrii skrzyżowania i funkcjonującej na nim organizacji ruchu, wraz z charakterystyką poszczególnych uczestników tego ruchu, stanowią niezbędną podstawę do opracowania programów sygnalizacji świetlnej, będącego kolejnym etapem metodyki badań (Etap 2). W dalszych etapach przygotowane dane posłużą do budowy modelu symulacyjnego, za pomocą którego zweryfikowano realizację celu pracy.

4.2.2. Definiowanie parametrów programu sygnalizacji świetlnej dla PDI (E2)

W drugim etapie metodyki (Etap E2) skoncentrowano się na projekcie funkcjonowania programu sygnalizacji świetlnej. Działania te rozpoczęto od zaplanowania grup sygnalizacyjnych i przypisania ich do poszczególnych strumieni ruchu pojazdów.

Na wszystkich analizowanych poligonach doświadczalnych przyjęto zasadę, że grupom sygnalizacyjnym, w zależności od ich rodzaju, przypisano przed numerem odrębne prefiksy. Litera „K” oznacza grupy kołowe ogólne i kierunkowe, litera „S” - grupy warunkowego skrętu w kierunku wskazanym strzałką, litera „T” – grupy tramwajowe, litera „P” – grupy piesze, a litera „R” – grupy rowerowe. W przypadku grup wspólnych dla pieszych i rowerzystów zastosowano prefiks „PR”.

Na PDI zaprojektowano osiem grup sygnalizacyjnych: dwie przeznaczone do obsługi ruchu tramwajowego i sześć dla ruchu samochodowego. Schemat skrzyżowania, uwzględniający ich rozmieszczenie zawiera Rys. 37. Na wlocie wschodnim ruch pojazdów obsługiwany jest przez trzy grupy sygnalizacyjne: ogólną K02, kierunkową K03 oraz tramwajową T43. Grupa K02 reguluje ruch pojazdów jadących na wprost drogą główną, natomiast K03 i T43 obsługują odpowiednio samochody i tramwaje skręcające w lewo.



Rys. 37. Schemat skrzyżowania – PDI. Źródło: Opr. własne

Na wlocie południowym za sterowanie ruchem odpowiadają grupa K05 dla samochodów oraz T44 dla tramwajów. Ostatni wlot, zachodni, sterowany jest grupą K08. Dodatkowo, pojazdom skręcającym w prawo na wlotach południowym i zachodnim przypisano grupy warunkowego skrętu, oznaczone odpowiednio jako S64 i S67.

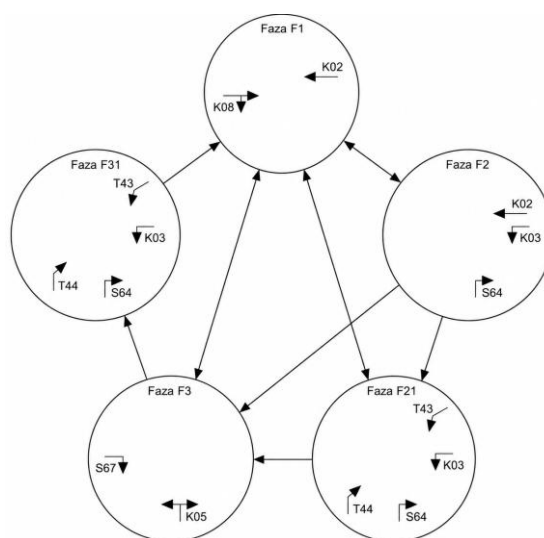
Dla każdej grupy sygnalizacyjnej wyznaczono najbardziej prawdopodobne trajektorie poruszania się pojazdów i lokalizacje wszystkich punktów kolizyjnych. Dla każdej pary grup sygnalizacyjnych o niedopuszczalnej kolizji przeprowadzono szereg obliczeń mających na celu wyznaczenie kompletu czasów międzyzielonych. Procedurę tę wykonano dwukrotnie stosując w obu przypadkach inne założenia początkowe dotyczące wartości prędkości dojazdu i ewakuacji uczestników ruchu (patrz Tab. 27). W pierwszym wariancie, obliczenia wykonano stosując się do wytycznych zawartych w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach (zwanym dalej Rozporządzeniem o sygnałach drogowych) [135], natomiast w drugim dodatkowo uwzględniono miejscowe uwarunkowania wynikające z geometrii skrzyżowania, przyjętej organizacji ruchu oraz wolumenów natężenia ruchu. Przez małe promienie łuków relacji skrętnych oraz

możliwość wystąpienia kongestii wynikającej z wysokiego natężenia ruchu, pojazdy często dojeżdżają do i ewakuują się z punktów kolizyjnych z prędkościami znacznie niższymi niż te określone w standardowych wytycznych. Uwzględnienie tej różnicy pozwala dostosować obliczenia do rzeczywistych warunków ruchu, zapewniając odpowiednie marginesy czasowe w krytycznych punktach. Po wykonaniu obliczeń na podstawie otrzymanych wyników opracowano docelową macierz czasów międzyzielonych, w której dla każdego punktu kolizji przyjęto maksymalne wartości czasów uzyskane spośród dwóch wariantów obliczeń. Taka metoda umożliwiła uwzględnienie zarówno standardowych wytycznych, jak i specyfiki lokalnych warunków ruchu. Przyjęcie wyższych wartości minimalizuje ryzyko niedoszacowania czasów międzyzielonych. Plan skrzyżowania z wyznaczonymi trajektoriami strumieni ruchu pojazdów oraz macierz czasów międzyzielonych wraz z obliczeniami przedstawia *Załącznik nr 7*.

Tab. 27. Prędkości przyjęte do obliczeń czasów międzyziel. – PDI. Źródło: Opr. własne na bazie [135]

Rodzaj strumienia ruchu	Długość pojazdu l_p [m]	Kierunek poruszania się	Obliczenia uwzględniające			
			wytyczne rozporządzenia		warunki miejscowe	
			Prędkość dojazdu V_d [km/h]	Prędkość ewakuacji V_e [km/h]	Prędkość dojazdu V_d [km/h]	Prędkość ewakuacji V_e [km/h]
Pojazdy	10	Prosto	60	50	60	30
		Lewo	60	50	60	30
		Prawo	60	50	60	30
Tramwaje	27	Prawo	60	36	60	30
		Lewo	60	36	60	30

Do sterowania ruchem na skrzyżowaniu przygotowano układ pięciu faz sygnalizacyjnych. Trzy z nich dedykowane są obsłudze strumieni pojazdów przypisanych do grup kołowych. Pozostałe dwie stanowią fazy priorytetowe zaprojektowane specjalnie do obsługi ruchu tramwajów. Schemat wszystkich faz oraz możliwych przejść między nimi zamieszczono w formie graficznej na Rys. 38, natomiast diagramy zaprojektowanych przejść międzyfazowych zawarto w *Załączniku nr 8*.



Rys. 38. Sekwencja faz sygnalizacji – PDI. Źródło: Opr. własne

Faza F1 obsługuje ruch pojazdów poruszających się na wprost w ciągu drogi głównej (grupy K02 i K08). Dodatkowo, pełni rolę fazy podstawowej, co oznacza, że pozostaje aktywna, dopóki system detekcji nie wykryje zgłoszeń do pozostałych faz. Inne fazy, w przypadku braku zapotrzebowania na ich załączenie, mogą być pomijane w cyklu.

Faza F2 odpowiada głównie za ruch pojazdów oczekujących na lewoskręcie z wlotu wschodniego, który jest sterowany grupą K03. Dodatkowo, w trakcie realizacji tej fazy załączane są niekolizyjne grupy: kołowa K02 i warunkowego skrętu S64.

Podstawowym zadaniem fazy F3 jest umożliwienie wjazdu na skrzyżowanie pojazdom z wlotu południowego. Ponadto, podczas jej trwania załączana jest niekolizyjna grupa warunkowego skrętu z wlotu zachodniego (S67). Fazy F21 i F31 to dwa warianty fazy priorytetowej. Pod względem funkcjonalności są identyczne i są przeznaczone przede wszystkim do obsługi ruchu tramwajów sterowanych grupami T43 i T44. Dodatkowo umożliwiają ruch pojazdów sterowanych niekolizyjnymi grupami K03 i S64. Mogą być wywoływane w różnych punktach czasowych cyklu. Faza F21 może być załączana po fazach F1 lub F2, natomiast faza F31 – wyłącznie po fazie F3.

Wszystkie rozważane strategie sterowania, w celu zachowania możliwie wysokiego stopnia porównywalności, oparto na jednakowych parametrach czasowych poszczególnych faz (por. Tab. 28). Ich wartości dobrano mając na uwadze przyjęte wolumeny natężenia ruchu na skrzyżowaniu oraz częstotliwości kursowania pojazdów PTZ. Każda z wywołanych przez sterownik faz musi być załączona co najmniej na czas minimalny – T_{min} . Na podstawie interpretacji zgłoszeń z systemu detekcji ich działanie może być wydłużone maksymalnie do osiągnięcia czasu maksymalnego – T_{max} .

Tab. 28. Charakterystyki czasowe faz sygnalizacyjnych dla programów akomodacyjnych – PDI. Źródło: Opr. własne

Faza	Typ fazy	Minimalny czas trwania fazy	Maksymalny czas trwania fazy
		T_{min} [s]	T_{max} [s]
F1	Podstawowa	10	40/ ∞ *
F2		8	25
F3		8	24
F21	Priorytetowa	7	21
F31		7	21

* w przypadku braku zgłoszeń do innych faz

Do obsługi zgłoszeń pojazdów przypisanych do grup kołowych przeznaczono 12 detektorów. W obrębie każdego pasa ruchu ustawiono je w następującej trójelementowej konfiguracji:

- pierwszy detektor: o długości 2 metrów, zlokalizowany jest w odległości około 1-1,5 m od linii zatrzymania. Jego głównym zadaniem jest wykrycie obecności pojazdów oczekujących na obsługę, szczególnie tych, które nie zdołały przekroczyć linii zatrzymania w poprzedniej realizacji sygnału zezwalającego na ruch;
- drugi detektor: o długości wahającej się od 10 do 20 metrów w zależności od dostępnego miejsca. Służy głównie do wykrywania zapotrzebowania na wydłużenie (akomodację) sygnału zezwalającego na ruch w danej grupie sygnalizacyjnej poprzez analizę zajętości obszaru detekcji oraz luki czasowej detektora. Pomocniczo wykorzystywany jest również do wykrywania pojazdów oczekujących na obsługę;
- trzeci detektor: o długości 1 metra, zlokalizowany jest w największej odległości od linii

zatrzymania, wynoszącej około 50-60 m. Wzbudzenie tego detektora stanowi najwcześniejsze zgłoszenie zapotrzebowania na obsługę danej relacji.

Do wykrywania tramwajów przewidziano system dwóch punktów meldunkowych dla każdego kierunku. Pierwszy z nich informuje o zgłoszeniu rozpoczęcia zapotrzebowania na obsługę. Na przedmiotowym skrzyżowaniu zlokalizowany jest w odległości ponad 135 m od linii zatrzymania. Drugi punkt meldunkowy pełni funkcję wymeldowania pojazdu, tzn. informuje sterownik o obsłudze danego kursu i braku konieczności dalszego wydłużania danej fazy (w ramach tego zgłoszenia). Znajduje się kilka metrów za linią zatrzymania. Tabełaryczne zestawienie detektorów, opis ich funkcjonalności oraz klasyfikacje względem grup sygnalizacyjnych zamieszczono w *Załączniku nr 9*. Ich dokładne rozmieszczenie na tarczy skrzyżowania ukazano na planie sytuacyjnym (*Załącznik nr 5*).

4.2.3. Definiowanie algorytmu i strategii sterowania dla PDI (E3)

Ostatecznie, przystąpiono do projektowania algorytmu sterowania akomodacyjnego. W pierwszej kolejności zaimplementowano w nim strategię sterowania opartą na założeniach autorskiej metody priorytetyzacji pojazdów PTZ opisanej szczegółowo w podrozdziale 3.2. W czasie jego budowy zwrócono uwagę na to, by przy wprowadzeniu możliwie niewielkich modyfikacji w strukturze warunków logicznych możliwe było zaimplementowanie w nim alternatywnych strategii priorytetyzacji pojazdów PTZ w celu późniejszej analizy porównawczej uzyskanych wyników. Struktura algorytmu oparta jest na zestawie oznaczeń parametrów, zmiennych i procedur, których lista wraz z wyjaśnieniem została umieszczona w Tab. 29.

Tab. 29. Zestawienie zmiennych i procedur stosowane w algorytmie sterowania. Źródło: Opr. własne

Oznaczenie	Opis
LT _F (nazwa fazy)	Licznik czasu trwania fazy sygnalizacyjnej [s].
LT _B (nazwa fazy)	Licznik czasu blokady fazy sygnalizacyjnej [s]. Mierzy czas od zakończenia priorytetowej realizacji danej fazy do jej ponownej priorytetowej aktywacji.
LToc _F (nazwa fazy)	Licznik czasu oczekiwania fazy sygnalizacyjnej na obsługę [s]. Mierzy czas od pierwszego zgłoszenia do załączenia fazy.
L _B	Licznik zablokowanych przejść do realizacji fazy priorytetowej.
MaxL _B	Stała określająca stopień blokady priorytetu. Jej wartość definiuje, ile kolejnych wariantów fazy priorytetowej zostanie zablokowanych po zrealizowaniu ostatniej fazy priorytetowej.
Stop(licznik blokady)	Procedura zatrzymania licznika czasu blokady.
Start(licznik blokady)	Procedura wznowienia pracy licznika czasu blokady.
Pm _F (nazwa fazy docelowej)	Procedura inicjująca przejście z aktualnie realizowanej fazy do fazy docelowej.
T _{min} (nazwa fazy)	Minimalny czas trwania fazy [s].
T _{max} (nazwa fazy)	Maksymalny czas trwania fazy [s].
T _{max2} (nazwa fazy)	Alternatywny maksymalny czas trwania fazy [s], stosowany w celu dodatkowego wydłużenia czasu realizacji fazy.
T _B (nazwa fazy)	Maksymalny czas blokady danej fazy [s].
Z _G (nazwa grupy)	Zmienna, która przechowuje informację czy odnotowano zapotrzebowanie na obsługę strumienia ruchu sterowanego daną grupą sygnalizacyjną (przybiera wartość: T – tak, N – nie).

Tab. 29. Zestawienie zmiennych i procedur stosowane w algorytmie sterowania, cd. Źródło: Opr. własne

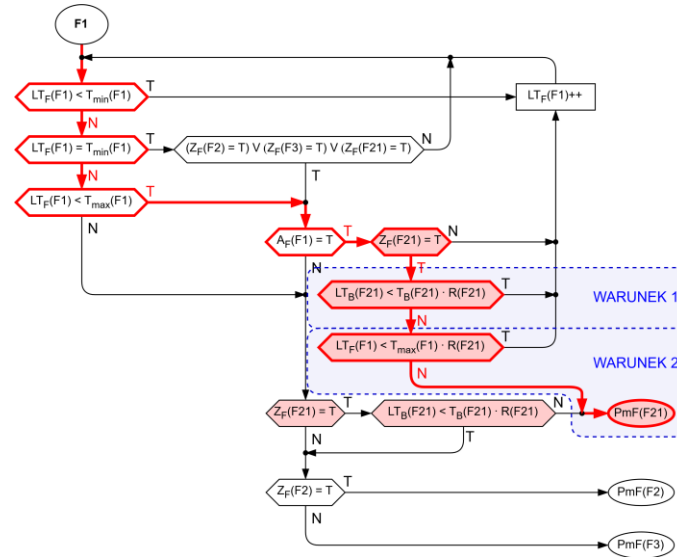
Oznaczenie	Opis
Z_F (nazwa fazy)	Zmienna, która na podstawie zgłoszeń do wybranych grup sygnalizacyjnych przechowuje informację, czy odnotowano zapotrzebowanie na obsługę danej fazy sygnalizacyjnej (przybiera wartość: T – tak, N – nie).
Z_{PF} (nazwa fazy)	Zmienna, która na podstawie zgłoszeń do wybranych grup, przechowuje informację, czy odnotowano zapotrzebowanie na priorytetową obsługę danej fazy sygnalizacyjnej (przybiera wartość: T – tak, N – nie).
A_G (nazwa grupy)	Zmienna, która przechowuje informację, czy odnotowano zapotrzebowanie na wydłużenie obsługi strumienia ruchu sterowanego daną grupą sygnalizacyjną (przybiera wartość: T – tak, N – nie).
A_{PG} (nazwa grupy)	Zmienna, która przechowuje informację, czy odnotowano zapotrzebowanie na priorytetowe wydłużenie obsługi strumienia ruchu sterowanego daną grupą sygnalizacyjną (przybiera wartość: T – tak, N – nie).
A_F (nazwa fazy)	Zmienna, która na podstawie zgłoszeń wydłużających do wybranych grup, przechowuje informację, czy odnotowano zapotrzebowanie na wydłużenie obsługi danej fazy sygnalizacyjnej (przybiera wartość: T – tak, N – nie).
R (nazwa fazy)	Aktualna wartość współczynnika priorytetowego $R_f(t)$ danej fazy sygnalizacyjnej.
Rank(pozycja w rankingu)	Zmienna, która przechowuje aktualny stan rankingu zgłoszeń priorytetowych. Procedura zwraca nazwę fazy, która znajduje się na danym miejscu w rankingu. Ranking tworzony jest wyłącznie spośród zgłoszonych kolizyjnych względem siebie faz priorytetowych. Dla Rank(1) zwraca nazwę fazy o najwyższym priorytecie.

Przebieg programu akomodacyjnego odbywa się z uwzględnieniem następujących głównych założeń:

- Faza F1 jest fazą rozpoczynającą realizację programu akomodacyjnego. Pełni rolę fazy podstawowej, oznacza to, że pozostaje aktywna w cyklu do czasu wystąpienia zapotrzebowania na realizację innych faz.
- Standardowa kolejność faz w pojedynczym cyklu, nieuwzględniająca zapotrzebowania na obsługę zgłoszeń priorytetowych to F1-F2-F3.
- Fazy, do których nie odnotowano zgłoszeń, zostają pominięte w danym cyklu.
- Faza priorytetowa może być załączana maksymalnie dwa razy w cyklu, po fazie F1 lub F2 oraz po fazie F3.
- Wszystkie wywołane przez sterownik fazy sygnalizacyjne załączane są co najmniej na czas minimalny (T_{min}). Ich działanie może zostać wydłużone na podstawie zgłoszeń wydłużających, jednak nie dłużej niż do osiągnięcia czasu maksymalnego (T_{max}).

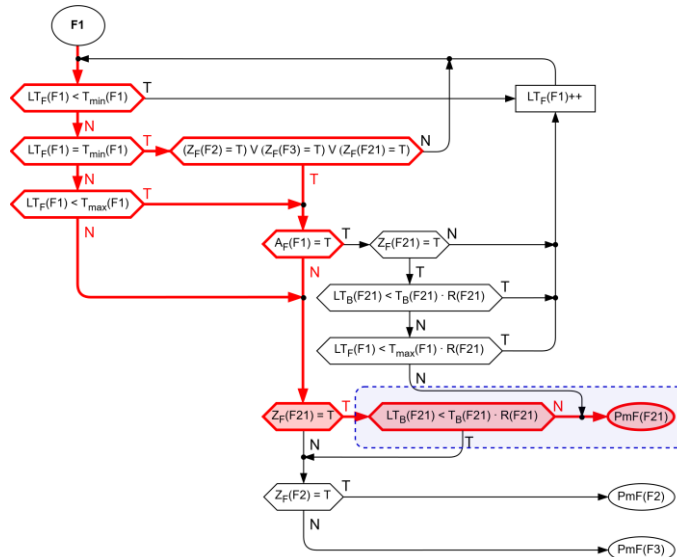
Zakończenie działania fazy niepriorytetowej (F1, F2 lub F3) w czasie pomiędzy T_{min} a T_{max} (tj., gdy zachodzi warunek $T_{min} < LT_F < T_{max}$), może nastąpić na skutek ustania zgłoszeń wydłużających lub wpłynięcia zgłoszenia priorytetowego do faz F21 lub F31. Gdy aktywne są zgłoszenia wydłużające aktualnie realizowaną fazę, przejście do fazy priorytetowej jest warunkowe i oparte na weryfikacji dwóch warunków logicznych (patrz przykład dla fazy F1 na Rys. 39). Niespełnienie któregośkolwiek z nich skutkuje blokadą realizacji priorytetu i wydłużeniem obecnej fazy. W pierwszej kolejności, sterownik sprawdza, czy licznik czasu blokady fazy priorytetowej LT_B przekroczył wartość iloczynu maksymalnego czasu blokady T_B i współczynnika priorytetowego R (**Warunek 1**). Im niższa jest wartość współczynnika priorytetowego, tym bardziej może zostać skrócony rzeczywisty czas blokady priorytetu. Następnie sterownik sprawdza czy licznik czasu obecnie realizowanej fazy (LT_F) przekroczył wartość iloczynu maksymalnego czasu fazy (T_{max}) i współczynnika priorytetowego R (**Warunek 2**). Im niższa wartość współczynnika priorytetowego, tym rzeczywisty maksymalny

czas trwania obecnie realizowanej fazy jest krótszy.



Rys. 39. Warunkowa realizacja priorytetu w czasie akomodacji fazy F1 – PDI. Źródło: Opr. własne

- Przejście do fazy priorytetowej po osiągnięciu przez obecnie realizowaną fazę niepriorytetową (F1, F2 lub F3) czasu $T_{\max}$ (tj., gdy $LT_F = T_{\max}$) lub wcześniej przy braku zgłoszeń wydłużających, może nastąpić pod warunkiem, że licznik czasu blokady fazy priorytetowej LT_B przekroczył wartość iloczynu maksymalnego czasu blokady T_B i współczynnika priorytetowego R (patrz przykład dla fazy F1 na Rys. 40).

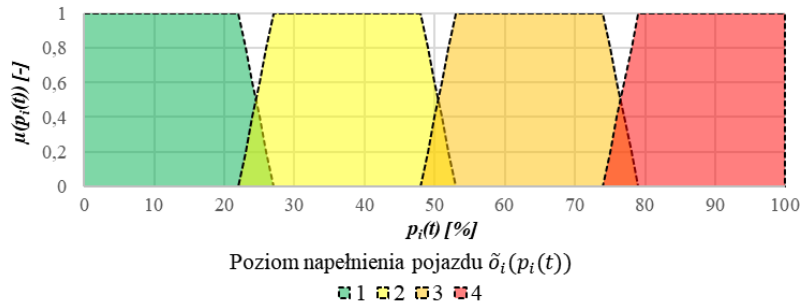


Rys. 40. Warunkowa realizacja priorytetu na końcu fazy F1 – PDI. Źródło: Opr. własne

- Zakończenie realizacji faz priorytetowych F21, F31 w czasie pomiędzy $T_{\min}$ a $T_{\max}$ (tj., gdy zachodzi nierówność $T_{\min} < LT_F < T_{\max}$), może nastąpić wyłącznie na skutek ustania zgłoszeń wydłużających.
- Każdorazowe załączenie któregoś z wariantów fazy priorytetowej F21 lub F31

powoduje wyzerowanie obu liczników blokady priorytetu $LT_B(F21)$ i $LT_B(F31)$ oraz wstrzymanie przez nie dalszego naliczania czasu. Wznowienie działania liczników blokady jest inicjowane przez zakończenie realizacji fazy priorytetowej. Domyślnie maksymalny czas blokady faz F21 i F31 ustalono na poziomie 120 sekund ($T_B(F21) = T_B(F31) = 120$ s).

Poprawność realizacji programu sygnalizacji bazującego na przedstawionym algorytmie sprawdzono przeprowadzając serie prób w module testowym środowiska LISA+. Zanim pliki wykonawcze wirtualnego sterownika będą gotowe do implementacji w modelu symulacyjnym, w celu zapewnienia możliwie wysokiego poziomu efektywności w zakresie priorytetyzacji pojazdów PTZ, należy dokonać wstępnej parametryzacji niektórych zależności matematycznych z podrozdziału 3.2. W pierwszej kolejności określono zakresy wartości dla wszystkich poziomów napełnienia pojazdów PTZ. Rezultat tego działania zamieszczono na Rys. 41. Wartości graniczne dla kolejnych czterech po-



Rys. 41. Klasyfikacja pojazdów PTZ do poziomów napełnienia – PDI. Źródło: Opr. własne

ziomów, przyjęto mając na uwadze zastosowany równomierny rozkład losowania liczby pasażerów. Dla tak zdefiniowanych granic procedura klasyfikacji i -tego pojazdu PTZ do odpowiedniego poziomu napełnienia (6) przebiega zgodnie ze wzorem (17).

$$\tilde{o}_i(p_i(t)) = \begin{cases} 1 & \text{gdy} & (p_i(t) \leq 22\%) \vee \\ & \vee \left((22\% < p_i(t) < 27\%) \wedge \left(Rnd_i(t) \leq \frac{27\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \\ 2 & \text{gdy} & (27\% \leq p_i(t) \leq 48\%) \vee \\ & \vee \left((22\% < p_i(t) < 27\%) \wedge \left(Rnd_i(t) > \frac{27\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \vee \\ & \vee \left((48\% < p_i(t) < 53\%) \wedge \left(Rnd_i(t) \leq \frac{53\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \\ 3 & \text{gdy} & (53\% \leq p_i(t) \leq 74\%) \vee \\ & \vee \left((48\% < p_i(t) < 53\%) \wedge \left(Rnd_i(t) > \frac{53\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \vee \\ & \vee \left((74\% < p_i(t) < 79\%) \wedge \left(Rnd_i(t) \leq \frac{79\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \\ 4 & \text{gdy} & (p_i(t) \geq 79\%) \vee \\ & \vee \left((74\% < p_i(t) < 79\%) \wedge \left(Rnd_i(t) > \frac{79\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \end{cases} \quad (17)$$

Następnie, określono zasady klasyfikacji pojazdów PTZ do pięciu kolejnych poziomów odchylenia od harmonogramu (9). Dla przyjętych wartości granicznych proces ten dla i -tego pojazdu odbywa się według poniższej zależności (18):

$$s_i(d_i(t)) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } d_i(t) \leq 0 \text{ [min]} \\ 2 & \text{gdy } 0 < d_i(t) \leq 1 \text{ [min]} \\ 3 & \text{gdy } 1 < d_i(t) \leq 2 \text{ [min]} \\ 4 & \text{gdy } 2 < d_i(t) \leq 3 \text{ [min]} \\ 5 & \text{gdy } d_i(t) > 3 \text{ [min]} \end{cases} \quad (18)$$

Stosując metodę generowania kolejnych kombinacji wartości parametrów *ol-o4*, opisaną w podrozdziale 4.1.4 (Rys. 27), w wyniku realizacji logiki inicjalizacyjnej otrzymano 35 wariantów nastaw, które posłużyły jako elementy macierzy $O_{N \times K}$ (7) i $S_{M \times L}$ (10). Uzyskany zbiór został wytypowany do analiz symulacyjnych. Jego zestawienie, zawierające wartości dla 8 wybranych wariantów nastaw przedstawiono poniżej (19):

$$O = \begin{bmatrix} 1 & 0,89 & 0,78 & 0,67 \\ 1 & 0,89 & 0,78 & 0,56 \\ 1 & 0,89 & 0,78 & 0,45 \\ 1 & 0,89 & 0,78 & 0,34 \\ 1 & 0,89 & 0,67 & 0,56 \\ 1 & 0,89 & 0,67 & 0,45 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0,78 & 0,56 & 0,45 & 0,34 \\ 0,67 & 0,56 & 0,45 & 0,34 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0,89 & 0,78 & 0,67 \\ 1 & 1 & 0,89 & 0,78 & 0,56 \\ 1 & 1 & 0,89 & 0,78 & 0,45 \\ 1 & 1 & 0,89 & 0,78 & 0,34 \\ 1 & 1 & 0,89 & 0,67 & 0,56 \\ 1 & 1 & 0,89 & 0,67 & 0,45 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0,78 & 0,56 & 0,45 & 0,34 \\ 1 & 0,67 & 0,56 & 0,45 & 0,34 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Według powyższego zestawienia, pierwsza kombinacja przeznaczona do dalszych analiz zakłada następujący przydział współczynników $r_{oi}(t)$ i $r_{si}(t)$ (20):

$$r_{oi}(t) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } \tilde{o}_i(p_i(t)) = 1 \\ 0,89 & \text{gdy } \tilde{o}_i(p_i(t)) = 2 \\ 0,78 & \text{gdy } \tilde{o}_i(p_i(t)) = 3 \\ 0,67 & \text{gdy } \tilde{o}_i(p_i(t)) = 4 \end{cases} \quad r_{si}(t) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = 1 \\ 1 & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = 2 \\ 0,89 & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = 3 \\ 0,78 & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = 4 \\ 0,67 & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = 5 \end{cases} \quad (20)$$

W badaniach rozpatrzono dwie wersje współczynnika $r_{vi}(t)$ (12), w zakresie konfiguracji współczynników wagowych α i β , tj.: 1) $\alpha = \beta = 1$, 2) $\alpha = 3, \beta = 2$. W pierwszej zakłada się równoważny wpływ czynników napełnienia oraz odchylenia od harmonogramu na ocenę potrzeby priorytetowej obsługi danego pojazdu. W drugiej natomiast większe znaczenie nadano parametrowi napełnienia. W efekcie, w ramach proponowanej strategii priorytetyzacji przeanalizowanych zostanie łącznie 70 wariantów sterowania. W ten sposób sparametryzowany program sterowania w postaci plików wirtualnego sterownika jest gotowy do implementacji w modelu symulacyjnym.

Na potrzeby analiz porównawczych opracowano jeszcze 5 alternatywnych strategii sterowania różniących się od siebie podejściem do priorytetyzacji PTZ. W celu identyfikacji ich wariantów wprowadzono notację A_w^s gdzie s oznacza numer strategii sterowania, natomiast w odnosi się do numeru rozpatrywanego wariantu tej strategii. Dla opisanego dotychczas podejścia, stosując się do tej notacji, zastosowano oznaczenia $A_1^1, \dots, A_{70}^1$.

Pierwsza ze strategii porównawczych również zakłada wykorzystanie koncepcji warunkowego priorytetu i opiera się na modyfikacji przedstawionej wcześniej metody. Różnica względem proponowanej strategii autorskiej polega wyłącznie na zmianie sposobu oceny zgłaszającego się i -tego pojazdu w zakresie równania (12). Pominęto w niej całkowicie znaczenie parametru napełnienia pojazdu, uzależniając ostateczną wartość współczynnika $r_{v_i}(t)$ od czasu oczekiwania $w_i(t)$ i poziomu odchylenia od harmonogramu $r_{s_i}(t)$. Zmodyfikowana na potrzeby tej strategii sterowania postać zależności $r_{v_i}(t)$ przedstawia się następująco (21):

$$r_{v_i}(t) = \begin{cases} \left(1 - \left(\frac{w_i(t)}{T_c}\right)^y\right) \cdot r_{s_i}(t), & \left(1 - \left(\frac{w_i(t)}{T_c}\right)^y\right) \cdot r_{s_i}(t) > 0 \\ 0, & \left(1 - \left(\frac{w_i(t)}{T_c}\right)^y\right) \cdot r_{s_i}(t) \leq 0 \end{cases}; \quad \forall T_c > 0 \quad (21)$$

Ustawienia pozostałych parametrów, w tym założeń logiki sterowania, pozostawiono bez zmian. Dotyczy to również konfiguracji kombinacji współczynników $r_{s_i}(t)$ w macierzy S (19), które posłużyły do wyznaczenia kolejnych tych samych co wcześniej 35 wariantów strategii sterowania. Do identyfikacji poszczególnych wariantów wynikających z zastosowania tej strategii zarezerwowano oznaczenia $A_1^2, \dots, A_{35}^2$.

Koncepcja kolejnej strategii porównawczej również oparta jest na modyfikacji współczynnika $r_{v_i}(t)$. Tym razem, jego wartość całkowicie uzależniono od wartości czasu oczekiwania $w_i(t)$, pomijając wpływ parametrów zależnych od napełnienia pojazdu ($r_{o_i}(t)$) oraz odchylenia od harmonogramu ($r_{s_i}(t)$). W ich miejsce wprowadzono nowy, stały współczynnik r_x . Jest on odpowiedzialny za skalowanie priorytetu zależnego wyłącznie od czasu oczekiwania. W czasie symulacji jego wartość nie ulega zmianie. W efekcie współczynnik $r_{v_i}(t)$ przyjął następującą formę (22):

$$r_{v_i}(t) = \begin{cases} \left(1 - \left(\frac{w_i(t)}{T_c}\right)^y\right) \cdot r_x, & \left(1 - \left(\frac{w_i(t)}{T_c}\right)^y\right) \cdot r_x > 0 \\ 0, & \left(1 - \left(\frac{w_i(t)}{T_c}\right)^y\right) \cdot r_x \leq 0 \end{cases}; \quad \forall T_c > 0 \quad (22)$$

Łącznie przygotowano dziewięć wariantów tej strategii sterowania i oznaczono je jako $A_1^3, \dots, A_9^3$. Każdy kolejny wariant charakteryzuje się przyjęciem coraz mniejszej wartości współczynnika r_x . Zbiór tych wartości tworzy ciąg arytmetyczny, zgodnie ze wzorem (23).

$$r_x(w) = 1 - (w - 1) \cdot \frac{1 - 0,12}{8}; \quad w = 1, 2, \dots, 9 \quad (23)$$

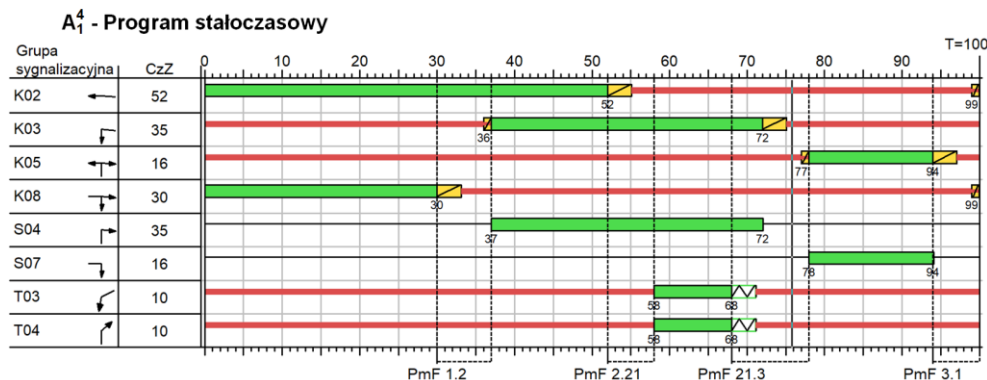
$$r_x = \{1, 0,89, 0,78, 0,67, 0,56, 0,45, 0,34, 0,23, 0,12\}$$

gdzie:

w – numer kolejnego wariantu.

Czwarta strategia sterowania w odróżnieniu od pozostałych nie uwzględnia zastosowania programu zmiennoczasowego. Oparto ją na działaniu programu stałoczasowego. Docelowo przygotowano jeden wariant tego programu, oznaczony jako A_1^4 . Przyjęta

konfiguracja faz obejmuje sekwencję F1-F2-F21-F3. Diagram zastosowanego programu zamieszczono na Rys. 42.



Rys. 42. Program stałoczasowy – PDI. Źródło: Opr. własne

Przedostatnia strategia sterowania ponownie zakłada wykorzystanie akomodacyjnego programu sterowania, podobnie jak trzy pierwsze strategie, jednakże poziom przyznanego priorytetu nie jest uzależniony od dynamicznych parametrów zgłaszającego się pojazdu ani ich liczby, lecz wyłącznie od wartości statycznego współczynnika r_x . W ramach analizy rozpatrzono dziewięć wariantów jego wartości, tych samych, co w strategii trzeciej (A_w^3).

Zastosowanie tej strategii wynika z faktu, że w praktyce najczęściej stosowane rozwiązania w zakresie priorytetyzacji transportu zbiorowego opierają się na wykorzystaniu statycznego, bezwarunkowego priorytetu. W tego typu podejściach nie jest uwzględniany stan danego kursu, rozumiany jako jego napełnienie, odchylenie od harmonogramu czy czas oczekiwania, a poziom priorytetu pozostaje ujednolicony i z góry narzucony.

Aby umożliwić zastosowanie tego samego algorytmu sterowania, co w strategiach A_w^1 , ..., A_w^3 , zmodyfikowano formułę współczynnika priorytetowego faz F21 i F31 – $R_f(t)$ (13). W nowej wersji zależność ta przyjmuje postać równania (24). Zestaw rozpatrywanych wariantów tej strategii oznaczono jako A_1^5 , ..., A_9^5 .

$$R_f(t) = r_x \quad (24)$$

Ostatnia strategia sterowania zakłada wykorzystanie akomodacyjnego algorytmu sterowania, jednak z uwzględnieniem najbardziej statycznej i uproszczonej formy priorytetyzacji pojazdów PTZ. W przeciwieństwie do wcześniejszych podejść opartych na programie zmiennoczasowym (A_w^1 , ..., A_w^3 , A_w^5), możliwość dwukrotnej obsługi faz priorytetowych w jednym cyklu nie jest warunkowana spełnieniem mechanizmu blokady priorytetu (patrz Rys. 39 i Rys. 40) – każda faza priorytetowa może zostać wywołana bez ograniczeń, jeśli istnieje na nią zapotrzebowanie. W tej strategii całkowicie zrezygnowano z mechanizmu skracania faz, przez co każda aktywowana faza jest realizowana w pełnym zakresie czasowym, aż do ustania zgłoszeń wydłużających lub osiągnięcia maksymalnego czasu trwania fazy $T_{\max}$. Dopiero wtedy możliwe jest załączenie kolejnej fazy. W efekcie sekwencja faz może przyjąć postać F1-F2-F21-F3-F31 lub F1-F21-F3-F31, przy czym fazy z wyjątkiem F1, dla których nie odnotowano zgłoszeń, mogą zostać pominięte w danym cyklu. Dla tej strategii sterowania przygotowano jeden wariant, oznaczony jako A_1^6 .

W Tab. 30 zestawiono krótką charakterystykę wszystkich rozpatrywanych strategii sterowania. Z wyjątkiem czwartej, wszystkie strategie zakładają wykorzystanie zmiennozasobowego programu. Spośród tych uwzględniających priorytetyzację pojazdów PTZ, jedynie trzy uzależniają poziom przyznanego priorytetu od indywidualnych parametrów zgłaszających się pojazdów. W przypadku dwóch pozostałych priorytet ma statyczny charakter i jego poziom jest ustalony ogólnie.

Etap projektowania programów sygnalizacji świetlnej zakończył się wygenerowaniem wirtualnych sterowników dla wszystkich rozpatrywanych strategii sterowania. W takiej formie są one gotowe do bezpośredniej implementacji w modelu symulacyjnym, umożliwiając przeprowadzenie dalszych analiz porównawczych.

Tab. 30. Charakterystyka rozpatrywanych strategii sterowania – PDI. Źródło: Opr. własne

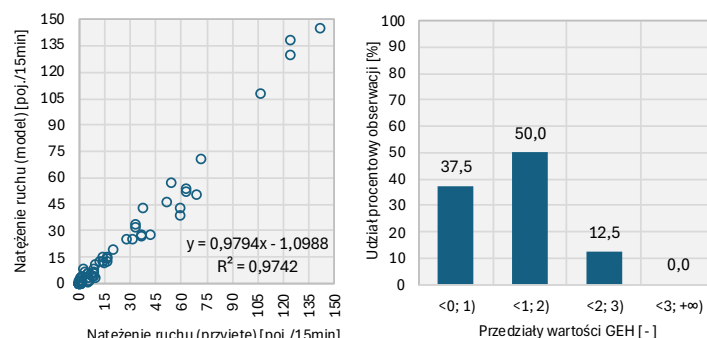
Nr strategii sterowania s	Łączna liczba wariantów w	Rodzaj programu		Realizacja priorytetu			Typ priorytetu		Parametry dynamiki priorytetu		
		Stałozasobowy	Zmiennozasobowy	Warunkowa	Bezwartunkowa	Brak	Dynamiczny	Stacyjny	Czas oczekiwania na obsługę	Napełnienie pojazdu	Odechylenie od harmonogramu
1	70	-	X	X	-	-	X	-	X	X	X
2	35	-	X	X	-	-	X	-	X	-	X
3	9	-	X	X	-	-	X	-	X	-	-
4	1	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-
5	9	-	X	-	X	-	-	X	-	-	-
6	1	-	X	-	X	-	-	X	-	-	-

4.2.4. Budowa środowiska testowego dla PDI (E4)

Budowę i weryfikację środowiska testowego dla PDI przeprowadzono zgodnie z założeniami metodycznymi przedstawionymi szczegółowo w podrozdziale 4.1.6. Układ sieci drogowej odtworzono na podstawie planu sytuacyjnego zamieszczonego w załączniku nr 5.

Podczas przebiegów testowych przeprowadzono jakościową kontrolę geometrii, przebiegu tras oraz zachowania pojazdów. Po wprowadzeniu niezbędnych korekt wyeliminowano nienaturalne manewry, nieuzasadnione zatrzymania, kolizje oraz przypadki braku możliwości kontynuowania przejazdu po przypisanej trasie. Wartość parametru *Waiting time before diffusion* przyjęto na poziomie 180 s, a kontrola komunikatów generowanych po kolejnych przebiegach nie wykazała przypadków usuwania pojazdów z modelu z powodu przekroczenia tego czasu.

Zgodność ruchu generowanego w modelu z wartościami referencyjnymi zweryfikowano ilościowo z wykorzystaniem współczynnika determinacji R^2 oraz wskaźnika GEH. W przypadku PDI wartości referencyjne odpowiadały natężeniom przyjętym w założeniach modelu, ponieważ poligon miał charakter hipotetyczny i nie odwzorowywał istniejącego układu drogowego objętego pomiarami terenowymi. Przedstawione na Rys. 43 porównanie nie stanowiło zatem walidacji modelu względem ruchu rzeczywistego, lecz kontrolę zgodności ruchu wygenerowanego w modelu z wartościami założonymi.

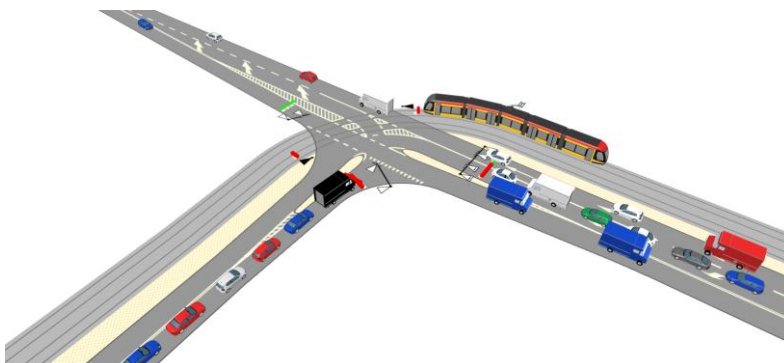


Rys. 43. Porównanie założonych i uzyskanych w modelu natężeń ruchu oraz rozkład wartości wskaźnika GEH – PDI. Źródło: Opr. własne

Dla całego zbioru porównań natężeń w interwałach 15-minutowych otrzymano wartość współczynnika determinacji R^2 równą 0,9742. Po przeliczeniu natężeń na jedną godzinę 37,5% wartości GEH mieściło się w przedziale od 0 do 1, 50% w przedziale od 1 do 2, a pozostałe 12,5% w przedziale od 2 do 3. Wszystkie uzyskane wartości wskaźnika GEH były zatem mniejsze od 3, a tym samym spełniły zarówno przyjęte kryterium podstawowe, jak i bardziej rygorystyczny poziom zgodności zalecany dla kluczowych relacji ruchu.

Dla każdej strategii sterowania przeprowadzono również testy scenariuszowe i integracyjne. W ich trakcie nie stwierdzono naruszeń przyjętych warunków kontrolnych. Potwierdzono poprawne działanie systemu detekcji i wszystkich wirtualnych sterowników, prawidłową wymianę danych pomiędzy środowiskami Vissim i LISA+, a także kompletność i powtarzalność generowanych wyników dla jednakowych warunków początkowych i tej samej wartości ziarna losowego.

Ostateczny wygląd modelu w czasie wykonywania eksperymentu przedstawia Rys. 44.



Rys. 44. Model w czasie symulacji – PDI. Źródło: Opr. własne

Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność budowy i funkcjonowania kompletnego środowiska testowego PDI oraz spełnienie wszystkich przyjętych warunków weryfikacji. Tym samym środowisko testowe wraz z zaimplementowanymi strategiami sterowania dopuszczono do właściwych eksperymentów symulacyjnych realizowanych w etapie E5.

4.2.5. Prowadzenie symulacji (Etap E5)

Po pozytywnym zakończeniu weryfikacji środowiska testowego przystąpiono do realizacji właściwych eksperymentów symulacyjnych, zgodnie z założeniami przedstawionymi w 4.1.7. Za pomocą wbudowanego w Vissim menedżera scenariuszy

przygotowano dokładny plan wykonywania docelowych eksperymentów symulacyjnych, przewidzianych dla wszystkich strategii sterowania i ich wariantów. Łącznie do analiz przygotowano 125 wariantów sterowania. Mając na uwadze, że każdy z nich poddano serii pięciu symulacji z uwzględnieniem zmiennego parametru ziarna symulacji, ostatecznie do przeprowadzenia przyjęto 625 eksperymentów symulacyjnych. Ponadto, zgodnie z podrozdziałem 4.1.5 model PDI został wykorzystany jako jeden z 11 modeli pomocniczych służących do opracowania modelu regresji emisji dwutlenku węgla CO₂.

W rezultacie przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych uzyskano kompletny zbiór surowych wyników dotyczących efektywności ruchu wszystkich pojazdów. Zostały one przekształcone, w taki sposób, aby dla każdego wariantu, wszystkich sześciu strategii uzyskać zbiór wyników w zakresie wybranych kryteriów oceny. Pełne zestawienie wyników dla wszystkich 125 wariantów zamieszczono w formie tabelarycznej w *Załączniku nr 10*.

W kolejnych etapach metodyki uzyskany zbiór wyników poddano analizie wielokryterialnej mającej na celu wskazanie rozwiązania najlepszego – kompromisowego, na tle pozostałych. Całą procedurę przeprowadzono zgodnie ze schematem postępowania określonym w podrozdziale 4.1.3.

4.2.6. Selekcja rozwiązań niezdominowanych dla PDI (E6)

W pierwszej kolejności dokonano selekcji wariantów niezdominowanych, osobno w zakresie każdej strategii sterowania. Dzięki temu z początkowych 125 wariantów odrzucono ponad połowę, pozostawiając do dalszych analiz 60 rozwiązań niezdominowanych. Ich listę zamieszczono w Tab. 31. Najlepsze wartości w ramach każdego kryterium oceny zostały wyróżnione zielonym tłem, natomiast najlepsze wyniki w poszczególnych strategiach sterowania oznaczono pogrubieniem i podkreśleniem.

Wyniki zwracają uwagę przede wszystkim na korzystną pozycję pierwszej strategii w zakresie kryteriów opisujących straty czasu podróży i pojazdów. Najmniejszą wartość K₁, wynoszącą 29,88 s/os., uzyskał wariant A_{57}^1 . Dla porównania najlepszy pod tym względem wariant spośród pozostałych strategii A_6^2 , osiągnął wartość 31,94 s/os. Różnica wyniosła 2,06 s/os., tj. około 6,45%. Jednocześnie wartość K₂ dla wariantu A_{57}^1 wyniosła 50,12 s/poj. i była tylko o 0,10 s/poj. większa od najmniejszej wartości tego kryterium, uzyskanej przez A_{11}^1 . Oznacza to, że strategia wykorzystująca napełnienie pojazdu, odchylenie kursu od harmonogramu i czas oczekiwania na obsługę umożliwiła ograniczenie strat czasu indywidualnych podróży bez wyraźnego pogorszenia warunków ruchu ocenianych na poziomie pojazdów.

Najbardziej wyraźny konflikt pomiędzy kryteriami wystąpił w przypadku wariantu A_9^5 , reprezentującego najwyższy analizowany poziom priorytetu statycznego. Uzyskał on najmniejsze wartości pod względem kryteriów K₃ i K₄, wynoszące odpowiednio 2,99 s/poj. PTZ oraz 2,37 min., co świadczy o znacznej poprawie warunków przejazdu tramwajów. Towarzyszyły temu jednak wartości K₁ i K₂ równe odpowiednio 73,95 s/os. i 213,36 s/poj. Były one niemal dwuipółkrotnie oraz ponad czterokrotnie większe od najmniejszych wartości tych kryteriów. Wariant ten osiągnął również największą wartość dla kryterium K₅ wynoszącą 411,91 kg. W porównaniu z najmniejszą emisją, wynoszącą 283,01 kg dla wariantu A_1^3 , oznaczało to wzrost o 128,90 kg, tj. o około 45,55%.

Tak duże pogorszenie pozostałych kryteriów należy wiązać z intensywnym i bezwarunkowym ingerowaniem w przebieg programu sygnalizacji. Częste przerywanie obsługi relacji kolizyjnych sprzyjało narastaniu kolejek oraz zwiększeniu liczby zatrzymań i ponownych rozpędzeń pojazdów. Dalsze zwiększanie poziomu priorytetu przynosiło

więc korzyści tramwajom, ale odbywało się kosztem nieproporcjonalnie dużego pogorszenia warunków funkcjonowania pozostałej części układu.

Niekorzystne rezultaty uzyskał także wariant A_1^4 , oparty na programie stałoczasowym. Osiągnął on najmniej korzystne wartości dla czterech pierwszych kryteriów, w tym dla K1 równą 103,08 s/os. oraz dla K2 równą 240,94 s/poj. Wartości te były odpowiednio ponad trzykrotnie i niemal pięciokrotnie większe od najlepszych odnotowanych wyników. W warunkach losowego napływu pojazdów oraz zmiennego występowania zgłoszeń tramwajowych rezultat ten można wiązać z brakiem możliwości dostosowania przebiegu programu do rzeczywistego zapotrzebowania na obsługę.

Uzyskane wyniki ujawniły zatem dwa niekorzystne skrajne podejścia: sterowanie stałoczasowe, które nie reagowało na bieżące warunki ruchu, oraz nadmiernie intensywny priorytet bezwarunkowy, poprawiający obsługę tramwajów kosztem pozostałych uczestników ruchu. Jednocześnie żaden wariant nie uzyskał najkorzystniejszych wartości wszystkich kryteriów. Z tego względu rozwiązania niezdominowane poddano w kolejnym etapie szeregowaniu z wykorzystaniem metody ELECTRE III (por. podrozdział 4.1.3).

Tab. 31. Zbiór niezdominowanych wariantów sterowania – PDI. Źródło: Opr. własne

A_W^S		Stosunek par. $\alpha : \beta$	Kombinacja współczynników $[s_1, o_1, s_2, o_2, s_3, o_3, s_4, o_4, s_5]$	Wsp. r_x	Kryteria oceny				
S	W				K1 [s/os.]	K2 [s/poj.]	K3 [s/poj. PTZ]	K4 [min]	K5 [kg]
1	1	1 : 1	1,00 1,00 0,89 0,78 0,67	nd	33,71	52,78	24,92	2,68	288,81
1	2	1 : 1	1,00 1,00 0,89 0,78 0,56	nd	31,69	50,43	23,42	2,67	289,36
1	11	1 : 1	1,00 1,00 0,78 0,67 0,56	nd	30,96	50,02	21,59	2,60	289,66
1	14	1 : 1	1,00 1,00 0,78 0,56 0,45	nd	31,39	55,92	20,76	2,60	298,67
1	20	1 : 1	1,00 1,00 0,56 0,45 0,34	nd	34,22	69,04	18,39	2,56	315,21
1	25	1 : 1	1,00 0,89 0,78 0,56 0,34	nd	32,34	59,97	19,92	2,58	301,01
1	26	1 : 1	1,00 0,89 0,78 0,45 0,34	nd	31,11	60,50	18,69	2,59	304,10
1	27	1 : 1	1,00 0,89 0,67 0,56 0,45	nd	32,31	59,92	19,68	2,57	307,00
1	28	1 : 1	1,00 0,89 0,67 0,56 0,34	nd	32,66	60,41	19,59	2,56	303,11
1	31	1 : 1	1,00 0,78 0,67 0,56 0,45	nd	33,83	65,83	18,53	2,59	313,97
1	32	1 : 1	1,00 0,78 0,67 0,56 0,34	nd	34,22	68,77	17,72	2,56	315,99
1	33	1 : 1	1,00 0,78 0,67 0,45 0,34	nd	34,86	72,15	17,99	2,54	322,20
1	35	1 : 1	1,00 0,67 0,56 0,45 0,34	nd	37,26	79,55	17,53	2,53	334,78
1	37	3 : 2	1,00 1,00 0,89 0,78 0,56	nd	32,03	51,14	23,90	2,67	289,34
1	41	3 : 2	1,00 1,00 0,89 0,67 0,45	nd	31,08	53,23	21,10	2,60	293,87
1	46	3 : 2	1,00 1,00 0,78 0,67 0,56	nd	30,44	50,51	21,22	2,60	290,60
1	49	3 : 2	1,00 1,00 0,78 0,56 0,45	nd	31,03	57,99	19,84	2,60	301,21
1	55	3 : 2	1,00 1,00 0,56 0,45 0,34	nd	33,59	69,64	17,96	2,59	312,80
1	56	3 : 2	1,00 0,89 0,78 0,67 0,56	nd	32,27	56,45	20,10	2,61	300,28
1	57	3 : 2	1,00 0,89 0,78 0,67 0,45	nd	29,88	50,12	20,77	2,61	289,54
1	59	3 : 2	1,00 0,89 0,78 0,56 0,45	nd	31,53	56,15	20,47	2,64	298,01
1	62	3 : 2	1,00 0,89 0,67 0,56 0,45	nd	31,34	60,11	18,69	2,59	308,73
1	64	3 : 2	1,00 0,89 0,67 0,45 0,34	nd	33,17	65,07	18,89	2,57	311,94
1	65	3 : 2	1,00 0,89 0,56 0,45 0,34	nd	35,72	74,96	17,55	2,61	323,85
1	67	3 : 2	1,00 0,78 0,67 0,56 0,34	nd	32,52	62,90	19,65	2,58	307,29
1	68	3 : 2	1,00 0,78 0,67 0,45 0,34	nd	30,97	58,05	19,03	2,58	300,32
1	70	3 : 2	1,00 0,67 0,56 0,45 0,34	nd	36,37	77,43	16,62	2,55	330,80
2	5	nd	1,00 1,00 0,89 0,67 0,56	nd	33,22	52,55	23,15	2,65	289,25
2	6	nd	1,00 1,00 0,89 0,67 0,45	nd	31,94	52,56	21,79	2,63	287,82
2	8	nd	1,00 1,00 0,89 0,56 0,45	nd	33,47	55,05	22,55	2,62	291,81
2	9	nd	1,00 1,00 0,89 0,56 0,34	nd	33,44	56,96	21,82	2,61	296,42
2	10	nd	1,00 1,00 0,89 0,45 0,34	nd	33,35	58,84	21,72	2,60	296,27
2	14	nd	1,00 1,00 0,78 0,56 0,45	nd	33,11	57,15	21,44	2,60	292,76
2	17	nd	1,00 1,00 0,67 0,56 0,45	nd	33,29	56,76	22,40	2,58	295,86
2	20	nd	1,00 1,00 0,56 0,45 0,34	nd	36,33	69,85	19,92	2,56	311,70
2	24	nd	1,00 0,89 0,78 0,56 0,45	nd	33,37	55,90	21,89	2,62	292,27
2	27	nd	1,00 0,89 0,67 0,56 0,45	nd	33,41	57,90	21,76	2,58	297,78

Tab. 31. Zbiór niezdominowanych wariantów sterowania – PDI, cd. Źródło: Opr. własne

A_W^S		Stosunek par. $\alpha : \beta$	Kombinacja współczynników $[s_1, o_1, s_2, o_2, s_3, o_3, s_4, o_4, s_5]$	Wsp. r_x	Kryteria oceny				
S	W				K1	K2	K3	K4	K5
					[s/os.]	[s/poj.]	[s/poj. PTZ]	[min]	[kg]
2	28	nd	1,00 0,89 0,67 0,56 0,34	nd	32,87	59,57	20,26	2,56	298,89
2	30	nd	1,00 0,89 0,56 0,45 0,34	nd	37,88	73,74	19,72	2,55	315,85
2	31	nd	1,00 0,78 0,67 0,56 0,45	nd	32,43	56,65	20,84	2,59	297,46
2	34	nd	1,00 0,78 0,56 0,45 0,34	nd	36,10	70,40	19,19	2,56	308,17
3	1	nd	nd	1,00	38,53	56,76	28,94	2,72	283,01
3	2	nd	nd	0,89	36,41	54,81	26,16	2,66	286,54
3	3	nd	nd	0,78	33,61	54,40	22,70	2,65	291,72
3	4	nd	nd	0,67	36,70	69,80	19,53	2,61	326,54
3	5	nd	nd	0,56	41,36	92,50	15,95	2,54	353,33
3	6	nd	nd	0,45	42,48	102,33	13,11	2,52	354,27
3	7	nd	nd	0,34	48,20	125,41	10,31	2,49	382,45
3	8	nd	nd	0,23	59,69	168,31	4,62	2,38	380,67
3	9	nd	nd	0,12	74,00	213,73	3,11	2,38	406,58
4	1	nd	nd	nd	103,08	240,94	37,32	2,90	340,79
5	1	nd	nd	1,00	45,90	66,46	34,69	2,81	287,51
5	2	nd	nd	0,89	45,47	70,51	34,18	2,82	289,50
5	4	nd	nd	0,67	45,23	71,28	33,36	2,80	289,78
5	5	nd	nd	0,56	34,43	60,80	21,28	2,63	306,29
5	6	nd	nd	0,45	39,64	86,34	16,84	2,54	352,14
5	7	nd	nd	0,34	48,98	120,35	14,06	2,51	383,99
5	8	nd	nd	0,23	54,96	154,24	4,64	2,41	371,87
5	9	nd	nd	0,12	73,95	213,36	2,99	2,37	411,91
6	1	nd	nd	nd	40,31	95,98	11,93	2,51	310,27

4.2.7. Szeregowanie rozwiązań dla PDI (E7)

Dla zdefiniowanego modelu preferencji decydenta (patrz 4.1.3) za pomocą metody ELECTRE III skonstruowano bazowy ranking rozwiązań (ranking nr 1 w Tab. 32). Zgodnie z nim, najlepszym rozwiązaniem jest wariant A_{57}^1 , który zajął pierwsze miejsce, wykazując najwyższą ocenę spośród analizowanych niezdominowanych wariantów sterowania ruchem. Na miejscu drugim uplasował się wariant A_{46}^1 , natomiast trzecie miejsce przypadło wariantowi A_{11}^1 . Szczyt rankingu zajmują zatem trzy warianty pierwszej strategii sterowania realizującej zaproponowaną w niniejszej pracy metodę priorytetyzacji pojazdów PTZ. W dalszej części rankingu pojawiają się pojedyncze warianty należące do alternatywnych strategii, jednak ich pozycje są istotnie niższe. Czwarte miejsce zajął jedyny wariant strategii szóstej A_6^6 . Współdzieli tę pozycję z kilkoma wariantami strategii pierwszej. Dopiero na kolejnych pozycjach pojawiają się pojedyncze reprezentacje strategii drugiej, trzeciej i piątej. Na ostatnim miejscu rankingu odnotowano jedyny wariant czwartej strategii A_1^4 , reprezentujący działanie programu stałoczasowego.

Następnie, zgodnie z przyjętym schematem postępowania w zakresie analizy wielokryterialnej, przystąpiono do analizy wrażliwości mającej na celu ocenę stabilności otrzymanych rezultatów. Wykorzystując kolejne 39 modyfikacji przyjętego modelu preferencji, przeprowadzono obliczenia, w wyniku których otrzymano kolejne rankingi. Fragmentaryczne zestawienie rankingów zamieszczono w Tab. 32 (komplet wyników stanowi zawartość Załącznika nr 11).

Analiza wrażliwości pozwoliła na ocenę stabilności pozycji rankingowych poszczególnych wariantów oraz uwiarygodnienie pozycji zajmowanych przez rozwiązania, szczególnie te znajdujące się na szczycie klasyfikacji. Ostateczny ranking został skonstruowany na podstawie dominant pozycji zajmowanych przez dany wariant w czterdziestu rankingach częściowych. Otrzymane wyniki jednoznacznie wskazują, że wariant

A_{57}^1 , będący zwycięzcą rankingu bazowego, utrzymał pierwsze miejsce we wszystkich czterdziestu rankingach, osiągając tym samym pełną stabilność – odporność na zmiany modelu preferencji w założonym zakresie zmienności. Podobnie wysoki poziom stabilności wykazały warianty A_{46}^1 i A_{11}^1 , zajmujące odpowiednio drugie i trzecie miejsce. Również w ich przypadku nie odnotowano żadnych wahań pozycji. Szczyt rankingu, reprezentowany przez trzy warianty Strategii 1, należy zatem uznać za pewne i niepodważalne wybory, potwierdzone nie tylko przez ranking bazowy, ale także przez spójną analizę pozycji dominujących. Duża część alternatywnych wariantów cechuje się zauważalnym rozrzutem pozycji w kolejnych rankingach. Jednak pomimo zauważalnych wahań należy podkreślić, że we wszystkich wypadkach dotyczy to pozycji znacząco oddalonych od strefy rozwiązań najlepszych i nie wpływa na końcowe wnioski. Najwyższy rozrzut pozycji w rankingach odnotowano dla wariantu A_{32}^1 . Odchylenie standardowe jego pozycji wynosi 2,35. Podobną skalę zmienności zaobserwowano dla wariantów A_6^5 ($\sigma = 2,33$) i A_{55}^1 ($\sigma = 2,24$). Analiza wrażliwości potwierdziła również zasadność przypisania wariantowi A_1^4 ostatniego miejsca w rankingu.

Tab. 32. Wyniki szeregowania wariantów sterowania i analizy wrażliwości – PDI. Źródło: Opr. własne

Oznaczenie A_W^S		Numer rankingu						Min	Max	μ	σ	Dominanta. Ranking finalny
S	W	1	2	3	4	...	40					
1	57	1	1	1	1	...	1	1	1	1,00	0,00	1
1	46	2	2	2	2	...	2	2	2	2,00	0,00	2
1	11	3	3	3	3	...	3	3	3	3,00	0,00	3
1	41	4	4	4	4	...	4	4	4	4,00	0,00	4
6	1	4	4	4	4	...	4	4	5	4,10	0,30	4
1	68	4	5	4	4	...	5	4	6	4,48	0,55	4
5	8	5	5	5	5	...	5	5	6	5,10	0,30	5
2	6	5	5	5	5	...	6	5	7	5,18	0,49	5
1	59	5	6	6	6	...	6	5	8	5,75	0,70	6
1	14	5	6	5	5	...	5	5	7	5,90	0,73	6
1	2	6	6	6	6	...	7	5	7	5,93	0,47	6
3	8	6	6	6	6	...	6	6	7	6,10	0,30	6
1	49	6	7	7	6	...	7	5	7	6,48	0,67	7
3	6	7	7	7	7	...	7	6	9	6,83	0,54	7
1	56	6	7	7	6	...	7	6	9	7,15	0,76	7
3	7	8	8	8	8	...	8	7	10	7,83	0,54	8
1	26	7	8	8	7	...	8	5	9	7,98	0,96	8
1	37	7	8	8	7	...	8	7	11	7,98	0,88	8
1	62	7	8	9	7	...	9	5	10	8,18	1,12	8
5	9	9	9	9	9	...	9	8	11	8,90	0,54	9
3	9	9	9	9	9	...	9	8	11	8,93	0,57	9
2	5	8	9	10	8	...	13	8	13	9,38	1,13	9
1	27	8	9	10	8	...	11	8	12	9,53	1,10	9
1	70	9	11	10	9	...	13	6	16	10,45	2,19	9
2	31	9	10	12	8	...	10	8	12	9,85	1,04	10
1	25	9	10	12	9	...	12	8	13	10,50	1,36	10
3	5	10	9	11	11	...	6	6	16	10,70	2,16	10
1	28	10	10	11	9	...	12	9	13	10,88	1,05	11
5	6	10	13	13	10	...	14	10	19	12,88	2,33	11
5	7	11	10	12	12	...	14	8	14	11,60	1,51	12
2	28	11	11	13	10	...	13	10	15	12,08	1,15	12
3	3	11	12	13	10	...	14	10	16	12,68	1,47	12
2	14	12	11	14	11	...	14	11	14	12,75	1,02	12
2	24	11	11	13	10	...	14	10	15	12,38	1,09	13
1	32	12	13	14	11	...	11	8	18	12,98	2,35	13
1	67	13	12	15	12	...	15	11	16	13,63	1,09	13
2	8	12	13	14	11	...	15	11	16	13,65	1,17	14

Tab. 32. Wyniki szeregowania wariantów sterowania i analizy wrażliwości – PDI, cd. Źródło: Opr. własne

Oznaczenie A_W^S		Numer rankingu						<i>Min</i>	<i>Max</i>	μ	σ	Dominanta. Ranking finalny
<i>S</i>	<i>W</i>	1	2	3	4	...	40					
1	55	14	14	16	13	...	12	10	19	14,70	2,24	14
2	9	13	12	15	12	...	15	12	17	14,43	1,12	15
1	1	13	14	15	12	...	14	12	17	14,58	1,32	15
1	31	15	16	18	14	...	14	11	20	15,65	2,19	15
1	64	14	15	19	14	...	15	12	19	15,75	1,73	15
2	17	14	14	17	13	...	16	13	18	15,65	1,17	16
1	20	16	15	20	14	...	16	13	21	16,88	1,99	16
2	27	15	14	17	14	...	17	14	19	16,10	1,28	17
1	33	15	15	18	16	...	17	14	23	17,55	2,02	17
1	65	17	17	21	16	...	18	15	22	17,80	1,57	17
2	10	16	15	18	15	...	18	15	19	17,20	1,23	18
2	34	18	18	22	17	...	19	17	24	19,73	1,58	18
5	5	17	17	21	16	...	19	16	22	18,75	1,44	19
1	35	18	18	22	17	...	19	16	24	19,40	1,66	20
3	2	18	18	22	17	...	19	17	24	19,58	1,58	20
3	4	19	19	23	18	...	20	18	25	20,75	1,56	21
3	1	19	19	23	18	...	20	18	25	20,90	1,80	21
2	20	20	20	24	19	...	21	19	26	21,73	1,53	22
2	30	21	21	25	20	...	22	20	27	22,75	1,56	23
5	1	22	22	26	21	...	23	21	28	23,73	1,53	24
5	2	23	23	27	22	...	24	22	29	24,73	1,53	25
5	4	24	24	28	23	...	25	23	30	25,60	1,45	26
4	1	25	25	29	24	...	26	24	31	26,60	1,45	27

4.2.8. Rekomendacja rozwiązania i weryfikacja realizacji celu badań dla PDI (E8)

Na podstawie wyników wielokryterialnego szeregowania wariantów oraz przeprowadzonej analizy wrażliwości jako rozwiązanie rekomendowane dla PDI wskazano wariant A_{57}^1 , reprezentujący pierwszą strategię sterowania. W strategii tej poziom priorytetu kształtowany jest z uwzględnieniem napełnienia pojazdu PTZ, odchylenia kursu od harmonogramu oraz czasu oczekiwania na obsługę. Wariant ten uzyskał pierwszą pozycję zarówno w rankingu bazowym, jak i we wszystkich rankingach wyznaczonych dla zmodyfikowanych modeli preferencji decydenta, co świadczy o pełnej stabilności uzyskanej rekomendacji względem analizowanych zmian preferencji.

Wyniki uzyskane dla PDI pozwalają sformułować dwa zasadnicze wnioski. Po pierwsze, zastosowanie zaproponowanej metodyki w kontrolowanych warunkach hipotetycznego poligonu umożliwiło przeprowadzenie całej procedury prowadzącej od zdefiniowania wariantów sterowania do wskazania stabilnego rozwiązania rekomendowanego. Potwierdza to możliwość skutecznego zastosowania zaproponowanej metody priorytetyzacji i przyjętej metodyki badawczej oraz uzasadnia jej dalszą weryfikację w bardziej złożonych warunkach.

Po drugie, korzystne rezultaty uzyskane przez pierwszą strategię sterowania wskazują na zasadność uwzględniania napełnienia pojazdu PTZ jako jednej ze zmiennych wpływających na poziom priorytetu. Najlepszy wariant tej strategii pozwolił uzyskać mniejsze straty czasu indywidualnych podróży niż wszystkie warianty strategii porównawczych, przy jednoczesnym zachowaniu korzystnych wyników w pozostałych kryteriach oceny.

Wyniki wskazują ponadto na występowanie dwóch niekorzystnych skrajności w sposobie sterowania. Program stałoczasowy (A_1^4), pozbawiony możliwości reagowania na

bieżące warunki ruchu i pojawiające się zgłoszenia PTZ, osiągnął najgorsze wyniki w czterech pierwszych kryteriach oceny. Z kolei najwyższy analizowany poziom priorytetu statycznego (A_9^5) pozwalał uzyskać bardzo korzystne wartości kryteriów odnoszących się bezpośrednio do PTZ, lecz jednocześnie prowadził do pogorszenia pozostałych kryteriów. Wyniki te potwierdzają potrzebę poszukiwania rozwiązań kompromisowych, łączących zdolność reagowania na bieżące zapotrzebowanie z ograniczeniem nadmiernej ingerencji w obsługę pozostałych uczestników ruchu.

Weryfikacja szczegółowych warunków realizacji celu pracy określonych w podrozdziale 1.3 wykazała, że zastosowanie strategii uwzględniającej informację o napełnieniu pozwoliło uzyskać mniejszą wartość kryterium K1 niż w przypadku strategii porównawczych. Przeprowadzone szeregowe wielokryterialne umożliwiło wskazanie rozwiązania kompromisowego w przyjętym zbiorze kryteriów K1-K5. Rozwiązanie to należało do strategii autorskiej i zachowało przewagę pod względem K1 również względem najlepszego wariantu nieuwzględniającego napełnienia pojazdów PTZ. Jednocześnie analiza wrażliwości potwierdziła odporność rekomendacji na niewielkie zmiany preferencji decydenta. Tym samym dla PDI potwierdzono spełnienie wszystkich warunków realizacji celu pracy.

W kolejnym podrozdziale scharakteryzowano prace poświęcone drugiemu poligonowi doświadczalnemu.

4.3. Charakterystyka badań dla PDII i wyniki symulacji

4.3.1. Charakterystyka ogólna obszaru badań dla PDII (E1)

Czterowłotowe skrzyżowanie Garbary-Estkowskiego-Małe Garbary położone jest w centrum Poznania w obszarze osiedla Stare Miasto. Stanowi ono jeden z kluczowych punktów na mapie transportowej miasta. Ulice Małe Garbary i Estkowskiego są częścią tzw. pierwszej ramy komunikacyjnej, która pełni ważną rolę w obsłudze pojazdów poruszających się w relacji wschód-zachód.

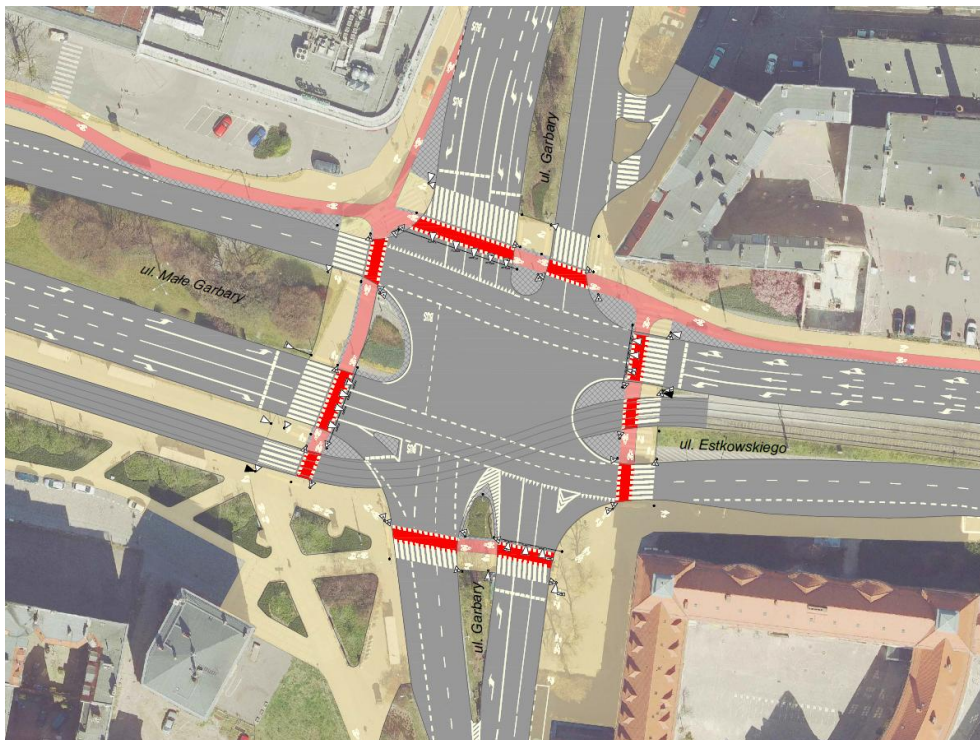
Od końca 2018 roku prowadzono prace projektowe dotyczące budowy nowej drogi dla rowerów biegnącej wzdłuż północnej krawędzi pierwszej ramy komunikacyjnej, obejmującej ulice Małe Garbary, Estkowskiego oraz Solną. W związku z tą inwestycją, projektowi przebudowy poddano m.in. przedmiotowe skrzyżowanie. Pierwotny stan organizacji ruchu funkcjonujący przed rozpoczęciem prac budowlanych przedstawia Rys. 45. Do najważniejszych zmian względem stanu pierwotnego zalicza się likwidację trójkątnej wyspy dzielącej pasy ruchu na północnym wlocie oraz likwidację wydzielonego pasu do skrętu w prawo na wlocie wschodnim. Autor niniejszej pracy jest współautorem projektu nowej organizacji ruchu oraz docelowego systemu sterowania na tym obszarze [170]. Z tego względu jako stan wyjściowy do badań przyjęto docelowy kształt inwestycji, która w trakcie opracowania niniejszej rozprawy była w trakcie wdrażania.

Geometrię układu drogowego oraz przyjętą na potrzeby analiz organizację ruchu w zakresie oznakowania poziomego oraz rozlokowania urządzeń sygnalizacji świetlnej przedstawiono na planie sytuacyjnym w *Załączniku nr 12*. Fragment ilustrujący samą tarczę skrzyżowania zamieszczono na Rys. 46.

Drogę główną stanowi ciąg ulic Małe Garbary i Estkowskiego. Wszystkie jezdnie wlotowe i wylotowe rozdzielone są kilkunastometrowymi pasami rozdziału. Wyjątkiem jest wlot południowy, gdzie mierzy on około 8 metrów. Środkiem wschodniego pasa rozdziału przebiega dwukierunkowe torowisko tramwajowe. Trasa tramwajowa od wschodu pokonując skrzyżowanie, kieruje się na południową stronę wlotu zachodniego i następnie biegnie



Rys. 45. Skrzyżowanie Garbary-Estkowskiego-Małe Garbary w Poznaniu - przed przebudową. Źródło: Opr. własne na bazie [66]



Rys. 46. Układ geometryczny skrzyżowania wraz z przyjętą organizacją ruchu – PDII. Źródło: Opr. własne na podstawie [170, 66]

dalej bezkolizyjnie i równolegle do jezdni ul. Małe Garbary. Na jezdni wlotowej wschodniego wlotu skrzyżowania wyznaczone są trzy pasy dla ruchu kołowego. Wewnętrzny służy do skrętu w lewo w kierunku południowym. Do jazdy na wprost przewidziano dwa pasy, przy czym zewnętrzny służy również do skrętu w prawo. Na jezdni doprowadzającej pojazdy do tarczy skrzyżowania od południa wyznaczono trzy pasy ruchu o takiej samej konfiguracji jak dla wlotu wschodniego, tj.: jeden pas do skrętu w lewo i dwa pasy do jazdy na wprost. Zewnętrzny pas pozwala również na skręt w prawo. Na wlocie zachodnim ruch pojazdów obsługiwany jest przez cztery pasy ruchu: po jednym pasie dla relacji w lewo i w prawo oraz dwa środkowe pasy przeznaczone do jazdy na wprost. Po południowej stronie jezdni, wzdłuż torowiska, działa dwukierunkowy przystanek tramwajowy.

Najwięcej pasów ruchu wyznaczono na północnym wlocie ulicy Garbary. Do jazdy w lewo służą dwa pasy ruchu. Tyle samo przewidziano dla pojazdów poruszających się na wprost. Zewnętrzny pas ruchu służy do skrętu w prawo oraz do jazdy na wprost, jednak wyłącznie dla autobusów. Na wszystkich wlotach skrzyżowania obowiązuje ograniczenie prędkości do 50 km/h.

Przez wszystkie jezdnie oraz torowiska wyznaczono przejścia dla pieszych oraz przejazdy rowerowe. Ponadto, na wlocie zachodnim funkcjonują dwa przystanki obsługujące tramwaje poruszające się w obu kierunkach. Kolejny przystanek funkcjonujący bezpośrednio w obrębie skrzyżowania zlokalizowany jest na południowym wlocie zaraz za przejściem dla pieszych.

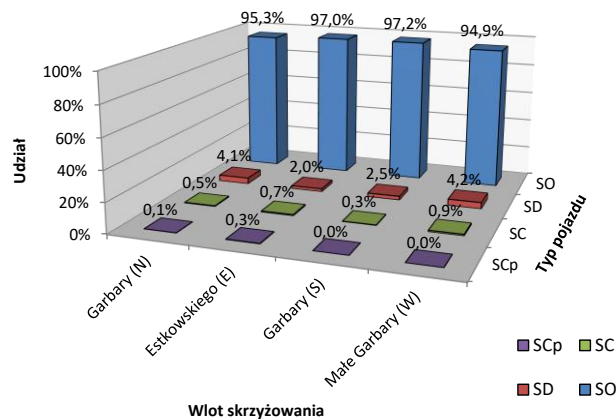
Z punktu widzenia obsługi ruchu tramwajowego, należy zaznaczyć, że zapewnienie bezpiecznego przejazdu zbliżających się do skrzyżowania tramwajów wymaga wstrzymania ruchu za pomocą sygnalizacji świetlnej dla znacznej liczby innych relacji.

Pomiary ruchu drogowego przeprowadzono w typowym dniu roboczym w maju 2023 r., w godzinach 6:30–8:30, tj. w czasie trwania porannego szczytu komunikacyjnego. Aby wynik pomiaru był reprezentatywny, przy wyborze terminu badania kierowano się tym, żeby ruch odbywający się w obszarze badań był pozbawiony nieprzewidzianych zakłóceń i wyjątkowych okoliczności (np. remonty, objazdy, wypadki). Należy nadmienić, że pomiary wykonano przed rozpoczęciem prac budowlanych związanych ze wspomnianą wcześniej planowaną drogą dla rowerów. Kamera została zamontowana w miejscu zapewniającym pełny widok tarczy skrzyżowania, co umożliwiło dokładne odnotowanie natężenia ruchu oraz struktury rodzajowej pojazdów na poszczególnych relacjach. Zebrane nagrania zostały następnie poddane analizie w celu oszacowania natężenia ruchu oraz klasyfikacji typów pojazdów.

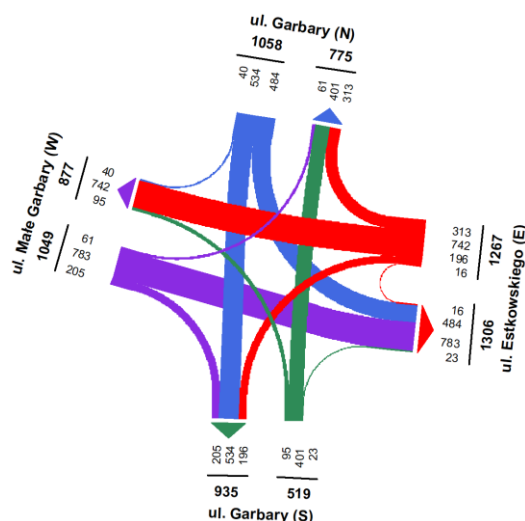
Zdecydowana większość zaobserwowanych pojazdów to samochody osobowe. W przypadku wszystkich czterech wlotów stanowią one ponad 94% ogółu. Udział pojazdów dostawczych waha się między 2 a 4%, podczas gdy pojazdy ciężarowe (z naczą i bez niej) osiągnęły maksymalnie 1% udziału na wlocie ul. Estkowskiego (patrz Rys. 47). Przyjęte natężenia ruchu pojazdów na poszczególnych relacjach, wyrażone w postaci pojazdów umownych (E), zamieszczono na Rys. 48.

Największe natężenie ruchu kołowego obserwowane jest na relacjach prowadzących na wprost, szczególnie na wlotach zachodnim i wschodnim, gdzie liczba pojazdów osiąga wartość około 750 poj. na godzinę. Wysokie natężenie ruchu na tym odcinku wynika z jego kluczowej funkcji w sieci transportowej Poznania, stanowiącej część pierwszej ramy komunikacyjnej miasta. Spośród manewrów skrętnych, największy potok pojazdów odnotowano przy lewoskręcie z wlotu północnego, który wynosi 484 pojazdy na godzinę. Relacja ta jest częścią jednej z głównych tras łączących północ miasta z pierwszą ramą komunikacyjną po lewej stronie rzeki Warty. Na wlocie południowym

prowadzącym w kierunku ścisłego centrum, ruch pojazdów kołowych jest stosunkowo mniejszy i wynosi sumarycznie około 500 pojazdów na godzinę.



Rys. 47. Struktura rodzajowa pojazdów – PDII. Źródło: Opr. własne



Rys. 48. Kartogram natężenia ruchu [E] – PDII. Źródło: Opr. własne

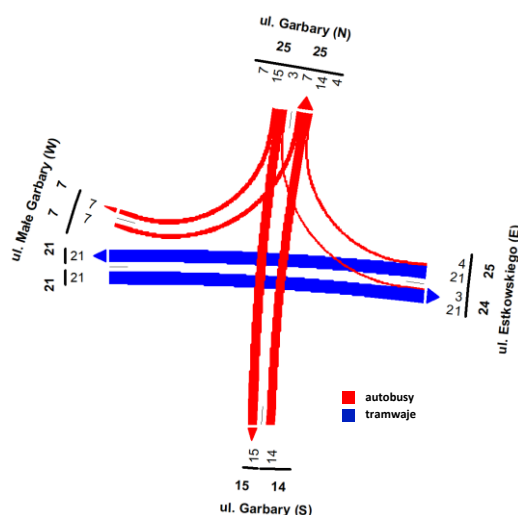
W kontekście charakterystyki ruchu kołowego należy dodać, że wykorzystano te same założenia dotyczące napełnienia poszczególnych typów samochodów co w przypadku I poligonu doświadczalnego (patrz Rys. 34).

Wyniki pomiarów natężenia ruchu pojazdów PTZ zostały skonfrontowane z danymi pochodzącymi z rozkładów jazdy oraz informacjami pozyskanymi od Zarządu Transportu Miejskiego (ZTM). Podczas pomiarów terenowych zaobserwowano nieznacznie niższe wartości natężenia ruchu autobusów i tramwajów, co prawdopodobnie wynikało z opóźnień lub innych, trudnych do zidentyfikowania czynników losowych. Dlatego do dalszych analiz przyjęto wyższe wartości rozkładowe.

Przyjęty na potrzeby badań, pełny harmonogram kursowania tramwajów i autobusów oraz dane dotyczące poziomu ich napełnienia dla wszystkich ziaren symulacji zawarto w Załączniku nr 13. Poniżej, w Tab. 33 i na Rys. 49 zestawiono część zagregowanych statystyk. W analizach uwzględniono cztery linie tramwajowe oraz osiem linii autobusowych. Zgodnie z rozkładem, w czasie godziny szczytu można spodziewać się przejazdu 42 tramwajów oraz 50 autobusów (Rys. 49).

Tab. 33. Charakterystyka linii publicznego transportu zbiorowego – PDII. Źródło: Opr. własne

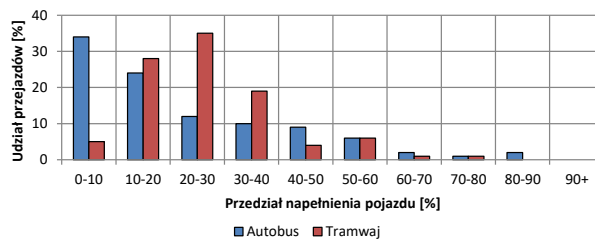
Rodzaj linii PTZ	Grupa sygn.	Liczba kursów dla 1 ziarna symulacji	Napełnienie pojazdu pasażerami [os.]			
			Średnie	Minimalne	Maksymalne	Odchylenie standardowe
Autobusowe	E→N	4	24	1	63	15
	N→E	3	20	4	43	14
	N→S	15	31	1	95	26
	N→W	7	14	2	56	10
	S→N	14	30	0	91	23
	W→N	7	12	1	35	9
Tramwajowe	E→W	21	52	12	160	28
	W→E	21	54	14	152	28



Rys. 49. Kartogram natężenia ruchu autobusów i tramwajów – PDII. Źródło: Opr. własne

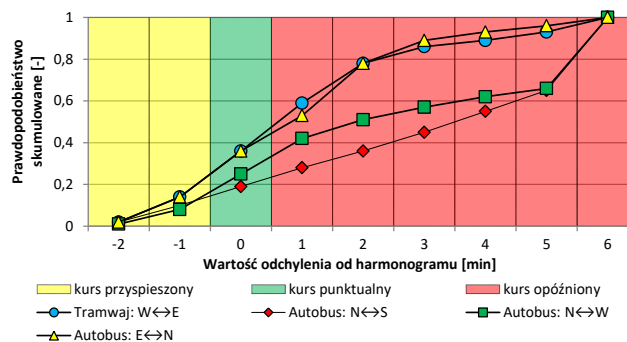
Średnia liczba pasażerów w autobusach waha się między 12 a 31 pasażerami (tj. między 11 a 28 % napełnienia autobusu o pojemności 110 pasażerów), co wskazuje na stosunkowo niskie obłożenie w porównaniu do tramwajów, którymi podróżuje średnio między 52 a 54 pasażerów (na 200 możliwych). Wartość odchylenia standardowego w porównaniu do wartości przeciętnej jest zdecydowanie wyższa w przypadku autobusów, co oznacza, że ich napełnienie cechuje się większym rozrzutem. Jak pokazano na Rys. 50, odsetek liczby przejazdów autobusowych zasadniczo maleje wraz ze wzrostem poziomu napełnienia. W przypadku tramwajów rozkład ten jest bardziej skoncentrowany w przedziałach napełnienia między 10 % a 40 %, z najwyższym udziałem przejazdów w przedziale 20-30 %, podczas gdy pozostałe przedziały napełnienia charakteryzują się znacznie niższymi udziałami przejazdów.

Na rozrzut wartości napełnienia poszczególnych pojazdów na tych samych trasach ma wpływ m.in. fakt, że niektóre linie są postrzegane przez podróżujących jako atrakcyjniejsze, chociażby przez ich różne punkty startu i destynacji. Dla przykładu linia autobusowa 174 średnio przewozi 55 pasażerów, podczas gdy linia 176 kursująca na tej samej relacji skrzyżowania przewozi już tylko 8 pasażerów.



Rys. 50. Rozkład napelnienia autobusów i tramwajów – PDII. Źródło: Opr. własne

Zagregowane do typu pojazdu i kierunku realizowanych tras charakterystyki dotyczące odchylenia realizacji kursów od harmonogramu zamieszczono na Rys. 51. Największe, przekraczające 5 minut opóźnienia występują na liniach autobusowych kursujących w relacjach północ-południe (35%) oraz północ-zachód (34%). Najbardziej punktualne są tramwaje kursujące na trasie wschód-zachód oraz autobusy w relacji wschód-północ. Udział punktualnych przejazdów w ich przypadku utrzymuje się na poziomie 22%. Kursy przyspieszone występują stosunkowo rzadko i stanowią niecałe 10% wszystkich kursów.



Rys. 51. Rozkład prawdopodobieństwa odchylenia kursu od harm. jazdy – PDII. Źródło: Opr. własne

W odróżnieniu od pierwszego poligonu doświadczalnego, na przedmiotowym skrzyżowaniu funkcjonuje ruch pieszy oraz rowerowy. Na podstawie nagrań oraz statystyk dotyczących osób wsiadających i wysiadających z pojazdów PTZ w bezpośrednim sąsiedztwie skrzyżowania, przyjęto potoki ruchu pieszych w czasie godziny szczytu, zgodnie z Rys. 52.



Rys. 52. Potoki pieszych – PDII. Źródło: Opr. własne

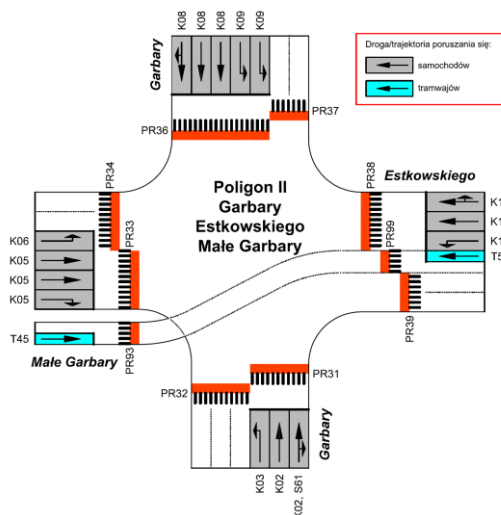
Ze względu na brak infrastruktury rowerowej w obszarze skrzyżowania w okresie wykonywania pomiarów zaobserwowane natężenia ruchu rowerowego były niewielkie i nie mogły stanowić podstawy do odwzorowania warunków docelowych. W związku z tym na potrzeby analiz przyjęto scenariuszowe natężenie wynoszące 60 rowerzystów/h na każdym wlocie skrzyżowania. Przy długości cyklu programu sygnalizacji wynoszącej 120 s odpowiada to średnio dwóm rowerzystom przypadającym na jeden cykl.

4.3.2. Definiowanie parametrów programu sygnalizacji świetlnej dla PDII (E2)

Zebrany materiał stanowi niezbędną podstawę by w ramach etapu E2 metodyki opracować program sygnalizacji świetlnej, uwzględniając jego odpowiednią parametryzację. Schemat przyjętego układu skrzyżowania wraz z naniesionymi grupami sygnalizacyjnymi przedstawiono na Rys. 53. Do sterowania ruchem pojazdów i pieszych na skrzyżowaniu zaprojektowano zestaw 21 grup sygnalizacyjnych, po cztery grupy kołowe ogólne i kierunkowe dla pojazdów kołowych, dwie grupy tramwajowe, jedną grupę warunkowego skrętu w prawo oraz 10 grup pieszo-rowerowych. Dla uproszczenia zrezygnowano z uwzględniania w analizach grup ostrzegawczych z migającą postacią pieszego, których działanie poza bezwzględnie dużą wartością w kwestii bezpieczeństwa, nie wpływa na efektywność ruchu pojazdów.

Grupa ogólna K02 odpowiada za ruch pojazdów jadących na wprost i w prawo z południowego wlotu ul. Garbary. Dla drugiej z wymienionych relacji przewidziano również możliwość warunkowego skrętu sterowanego grupą S61. Za bezkolizyjny przejazd pojazdów skręcających w lewo odpowiada kierunkowa grupa K03. Ruch pieszych i rowerzystów pokonujących przekrój wlotu południowego sterowany jest grupami PR31 i PR32.

Na wlocie zachodnim ruch pojazdów kołowych sterowany jest grupą ogólną K05 i kierunkową K06. Pierwsza odpowiedzialna jest za ruch pojazdów jadących na wprost i w prawo. Druga odpowiada za bezkolizyjny przejazd pojazdów skręcających w lewo. Za ruch tramwajów oczekujących na przystanku odpowiada grupa T45. Do przejść i przejazdów rowerowych funkcjonujących na wlocie zachodnim przypisano grupy PR33, PR34 i PR93.



Rys. 53. Schemat skrzyżowania – PDII. Źródło: Opr. własne

Pojazdy podążające na skrzyżowaniu na wprost oraz w prawo z północnego wlotu ul. Garbary sterowane są grupą ogólną K08. Grupa kierunkowa K09 odpowiada za ruch

pojazdów skręcających w lewo w kierunku ul. Estkowskiego. Za ruch pieszych i rowerzystów na tym wlocie odpowiedzialne są grupy PR36 i PR37.

Na ostatnim, czwartym wlocie grupa ogólna K11 steruje ruchem pojazdów jadących na wprost i w prawo, podczas gdy zadaniem grupy kierunkowej K12 jest zapewnienie bezkolizyjnego przejazdu w lewo w kierunku wlotu południowego. Za bezpieczny przejazd tramwajów w kierunku przystanku odpowiada grupa T51. Grupy PR38, PR39 i PR99 przyporządkowano do obsługi ruchu pieszych i rowerzystów na wszystkich trzech przejściach i przejazdach przewidzianych na wlocie wschodnim.

Analogicznie jak w przypadku PDI, każdej z grup sygnalizacyjnych przypisano odpowiednie trajektorie ruchu i wyznaczono zbiór punktów kolizyjnych, dla których wykonano obliczenia czasów międzyzielonych. Ponownie, dla każdego punktu kolizji obliczenia wykonano dwukrotnie, stosując za każdym razem inne założenia (patrz Tab. 34). W pierwszym wariantcie zastosowano wytyczne zawarte w Rozporządzeniu o sygnalach drogowych [135] oraz ówczesne zalecenia ZDM Poznań. W drugim uwzględniono miejscowe uwarunkowania, szczególnie rzeczywiste prędkości, jakie uczestnicy ruchu osiągają na poszczególnych trajektoriach.

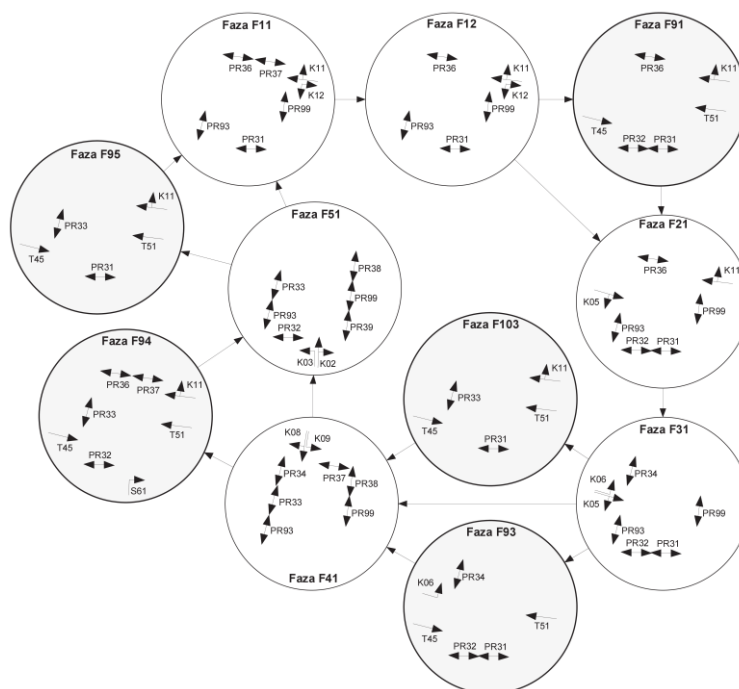
Na podstawie wyników obliczeń opracowano macierz czasów międzyzielonych, w której dla każdego punktu kolizji przyjęto maksymalne wartości czasów uzyskane w dwóch wariantach obliczeń. Tabele ze wszystkimi obliczeniami czasów międzyzielonych oraz przyjętą macierz czasów międzyzielonych zamieszczono w *Załączniku nr 14*.

Do sterowania ruchem na skrzyżowaniu zaprojektowano łącznie jedenaście faz ruchu: sześć cyklicznie załączanych faz podstawowych, służących do obsługi ruchu w grupach kołowych, pieszych i rowerowych (F11-F51) oraz pięć wariantów fazy priorytetowej dedykowanej obsłudze ruchu tramwajów (F91-F103). Schemat wszystkich faz oraz możliwych przejść między nimi zamieszczono na Rys. 54, natomiast diagramy zaprojektowanych przejść międzyfazowych zawarto w *Załączniku nr 15*. Fazy priorytetowe, zgodnie z załączonym schematem mogą być wywoływane w kilku miejscach, pomiędzy fazami podstawowymi. Konfiguracja grup kołowych i pieszo-rowerowych obsługiwanych dodatkowo w ramach realizacji faz priorytetowych wynika bezpośrednio z punktu załączenia danej fazy w cyklu. Standardowa sekwencja faz podstawowych w pojedynczym cyklu bez wzbudzenia faz priorytetowych to F11-F12-F21-F31-F41-F51.

Tab. 34. Prędkości przyjęte do obliczeń czasów międzyziel. – PDII. Źródło: Opr. własne na bazie [135, 170]

Rodzaj strumienia ruchu	Długość pojazdu l_p [m]	Kierunek poruszania się	Obliczenia uwzględniające			
			wytyczne rozporządzenia		warunki miejscowe	
			Prędkość dojazdu V_d [km/h]	Prędkość ewakuacji V_e [km/h]	Prędkość dojazdu V_d [km/h]	Prędkość ewakuacji V_e [km/h]
Pojazdy	10	Prosto	60	50	60	50
		Lewo	60	50	50	40
		Prawo	60	50	40	30
		Zawracanie	40	50	40	30
Tramwaje	27	Prosto	60	36	60	36
Autobusy	14	Prosto	60	36	60	36
		Prawo	60	36	36	30
Piesi	0	-	1,4			
Rowery	0	-	4,2			

Zadaniem fazy podstawowej F11 i następującej po niej fazy F12 jest obsługa ruchu pojazdów w grupach kołowych zlokalizowanych na wschodnim wlocie ul. Estkowskiego (grupy K11 i K12). Różnica między nimi polega na tym, że podczas realizacji fazy F12 następuje wyłączenie obsługi przejścia dla pieszych i rowerzystów zlokalizowanego na wylotowej jezdni północnego wlotu ul. Garbary (grupa PR37). Zablokowanie ruchu na tym przejściu usprawnia ewakuację pojazdów poruszających się w relacji ze wschodu na północ i tym samym zapewnia zwiększenie przepustowości na mocno obciążonym, wspólnym pasie ruchu służącym do jazdy na wprost i w prawo w ramach działania grupy K11. W czasie realizacji kolejnej fazy (F21) obsługiwany jest ruch kołowy odbywający się w obu kierunkach relacji wschód-zachód (grupy K11 i K05). Wraz z załączeniem kolejnej fazy (F31), dołączona zostaje obsługa grupy K06 (lewoskręt wlotu zachodniego), kosztem wyłączenia obsługi całego ruchu kołowego z wlotu wschodniego. Następną z kolei faza F41 dedykowana jest obsłudze grup kołowych na wlocie północnym, natomiast ostatnia faza podstawowa F51 odpowiada za ruch pojazdów oczekujących na wlocie południowym.



Rys. 54. Sekwencja faz sygnalizacji – PDII. Źródło: Opr. własne

Wszystkie przewidziane w badaniu strategie sterowania akomodacyjnego zostały oparte na jednakowych parametrach czasowych poszczególnych faz. Ich zestawienie przedstawiono w Tab. 35. Każda z realizowanych przez sterownik faz musi być załączona co najmniej na czas minimalny – $T_{\min}$. Na podstawie zgłoszeń fazy mogą być wydłużane maksymalnie do osiągnięcia czasu $T_{\max}$. Zgodnie z przyjętymi założeniami metodycznymi, nadrzędnym przedmiotem prac badawczych jest analiza efektywności priorytetyzacji pojazdów publicznego transportu zbiorowego poruszających się na wydzielonych relacjach. Dlatego priorytetowa obsługa zgłoszeń, działająca w myśl metody zaprezentowanej w rozdziale 3.2 dotyczy wyłącznie ruchu tramwajowego. Niemniej jednak, ze względu na istotną rolę ruchu autobusowego w obrębie skrzyżowania Garbary-Estkowskiego, pojazdy te również poddano pewnego rodzaju uprzywilejowaniu.

Wszystkie fazy podstawowe, do których odnotowano zgłoszenie wydłużające od autobusu mogą zostać bezwarunkowo wydłużone do czasu $T_{\max}$, niezależnie od występowania zgłoszeń do faz priorytetowych.

Tab. 35. Charakterystyki czasowe faz sygnalizacyjnych dla programów akomodacyjnych – PDII. Źródło: Opr. własne

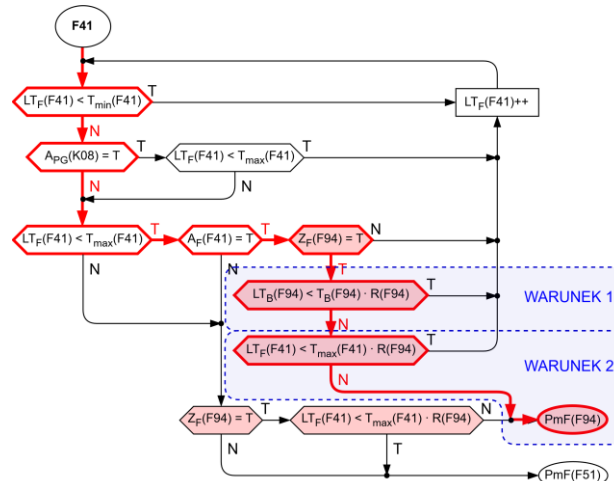
Faza	Typ fazy	Minimalny czas trwania fazy	Maksymalny czas trwania fazy
		$T_{\min}$ [s]	$T_{\max}$ [s]
F11	Podstawowa	7	-
F12		1	4
F21		1	10
F31		1	5
F41		16	20
F51		9	16
F91	Priorytetowa	1	10
F93		5	14
F94		1	10
F95		2	11
F103		3	12

Do wykrywania poszczególnych uczestników ruchu w obrębie skrzyżowania zaprojektowano system detekcji, oparty na analogicznych założeniach jak w przypadku PDI. Do obsługi zgłoszeń pojazdów przypisanych do grup kołowych wykorzystano łącznie 43 detektory, rozmieszczone na poszczególnych pasach ruchu w przedstawionej wcześniej trójelementowej konfiguracji. Do detekcji tramwajów wdrożono ponownie system dwóch punktów meldunkowych przypadających na każdy kierunek – pierwszy sygnalizuje zgłoszenie zapotrzebowania na obsługę, natomiast drugi potwierdza zakończenie obsługi i eliminuje konieczność dalszego wydłużania fazy. Dla tramwaju poruszającego się z zachodu na wschód, punkt meldunkowy umiejscowiono w obrębie przystanku i jego wzbudzenie inicjuje sygnał zakończenia wymiany pasażerskiej. Dla drugiego kierunku punkt meldunkowy umiejscowiono w odległości 150 m od linii zatrzymania. Punkty wymeldowania umieszczono w obu przypadkach kilkanaście metrów za linią zatrzymania. W ramach rozpatrywanego skrzyżowania, analogiczny sposób detekcji oparty na punktach meldunkowych zastosowano względem autobusów. Na potrzeby badań zrezygnowano natomiast ze stosowania dedykowanej detekcji pieszych i rowerzystów, gdyż wszystkie fazy podstawowe są wyświetlane w każdym kolejnym cyklu wraz z kompletem przypisanych do nich grup sygnalizacyjnych. Z tego powodu nie wymagają zgłoszeń do ich załączenia. System detekcji poświęcony pojazdom z grup kołowych odpowiada wyłącznie za obsługę zgłoszeń wydłużających poszczególne fazy. Tabelę zawierającą opis i klasyfikację zastosowanych detektorów zawarto w *Załączniku nr 16*, natomiast rozmieszczenie detektorów w terenie zostało przedstawione na planie sytuacyjnym (*Załącznik nr 12*).

4.3.3. Definiowanie algorytmu i strategii sterowania dla PDII (E3)

Po zaplanowaniu systemu detekcji przystąpiono do projektowania algorytmu sterowania akomodacyjnego. W pierwszej kolejności przystosowano go do realizacji autorskiej metody priorytetyzacji pojazdów PTZ opisanej w podrozdziale 3.2. Struktura algorytmu została oparta na zestawie przedstawionych wcześniej w Tab. 29 oznaczeń parametrów, zmiennych i procedur. Przebieg programu akomodacyjnego odbywa się z uwzględnieniem następujących założeń:

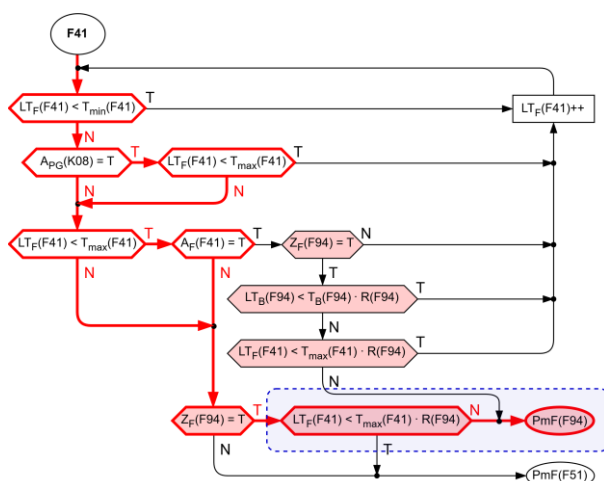
- Faza F11 jest fazą rozpoczynającą realizację programu akomodacyjnego.
- Standardowa kolejność faz w pojedynczym cyklu, nieuwzględniająca zapotrzebowania na obsługę zgłoszeń priorytetowych od tramwajów to F11-F12-F21-F31-F41-F51.
- Faza priorytetowa może być załączana maksymalnie cztery razy w cyklu, po fazach: F12, F31, F41, F51.
- Wszystkie wywołane przez sterownik fazy sygnalizacyjne załączane są co najmniej na czas minimalny ($T_{\min}$). Ich działanie może zostać wydłużone na podstawie zgłoszeń wydłużających od grup kołowych, jednak nie dłużej niż do osiągnięcia przez nie czasu maksymalnego ($T_{\max}$).
- Zakończenie działania fazy niepriorytetowej (dotyczy faz F12, F21, F31, F41 i F51) w czasie pomiędzy $T_{\min}$ a $T_{\max}$ (tj., gdy zachodzi nierówność $T_{\min} < LT_F < T_{\max}$), może nastąpić na skutek ustania zgłoszeń wydłużających lub wpłynięcia zgłoszenia priorytetowego do faz F91, F93, F103, F94, F95. Gdy aktywne są zgłoszenia wydłużające aktualnie realizowanej fazy, przejście do fazy priorytetowej jest warunkowe i oparte na weryfikacji dwóch warunków logicznych (patrz przykład dla fazy F41 na Rys. 55). W pierwszej kolejności, sterownik sprawdza, czy licznik czasu blokady fazy priorytetowej LT_B przekroczył wartość iloczynu maksymalnego czasu blokady T_B i współczynnika priorytetowego R (**Warunek 1**). Im niższa jest wartość współczynnika priorytetowego, tym bardziej może zostać skrócony rzeczywisty czas blokady priorytetu.



Rys. 55. Warunkowa realizacja priorytetu w czasie akomodacji fazy F41 – PDII. Źródło: Opr. własne

Następnie sterownik sprawdza czy licznik czasu obecnie realizowanej fazy (LT_F) przekroczył wartość iloczynu maksymalnego czasu fazy ($T_{\max}$) i współczynnika priorytetowego R (**Warunek 2**). Im niższa wartość współczynnika priorytetowego, tym rzeczywisty maksymalny czas trwania obecnie realizowanej fazy jest krótszy. Niespełnienie któregośkolwiek z tych warunków skutkuje blokadą realizacji priorytetu i wydłużeniem

- Zakończenie działania fazy niepriorytetowej (dotyczy tylko faz F21, F31, F41 i F51), do której odnotowano zgłoszenia wydłużające pochodzące od autobusu może nastąpić tylko na skutek ustania tych zgłoszeń lub po osiągnięciu przez nią czasu $T_{\max}$.
- Przejście do fazy priorytetowej po osiągnięciu przez obecnie realizowaną fazę niepriorytetową (F12, F31, F41 lub F51) czasu $T_{\max}$ (tj. gdy $LT_F = T_{\max}$) lub wcześniej przy braku zgłoszeń wydłużających, może nastąpić pod warunkiem, że licznik czasu blokady fazy priorytetowej LT_B przekroczył wartość iloczynu maksymalnego czasu blokady T_B i współczynnika priorytetowego R (patrz przykład dla fazy F41 na Rys. 56).
- Zakończenie realizacji faz priorytetowych F91, F93, F103, F94, F95 w czasie pomiędzy $T_{\min}$ a $T_{\max}$ (tj., gdy zachodzi nierówność $T_{\min} < LT_F < T_{\max}$), może nastąpić wyłącznie na skutek ustania zgłoszeń wydłużających.
- Każdorazowe załączenie któregoś z wariantów fazy priorytetowej F91, F93, F103, F94 lub F95 powoduje wyzerowanie wszystkich liczników blokady priorytetu ($LT_B(F91)$, ..., $LT_B(F95)$) oraz wstrzymanie przez nie dalszego naliczania czasu. Wznowienie działania liczników blokady jest inicjowane przez zakończenie realizacji fazy priorytetowej. W trakcie analiz przyjęto maksymalny czas blokady faz priorytetowych wynoszący 120 sekund.

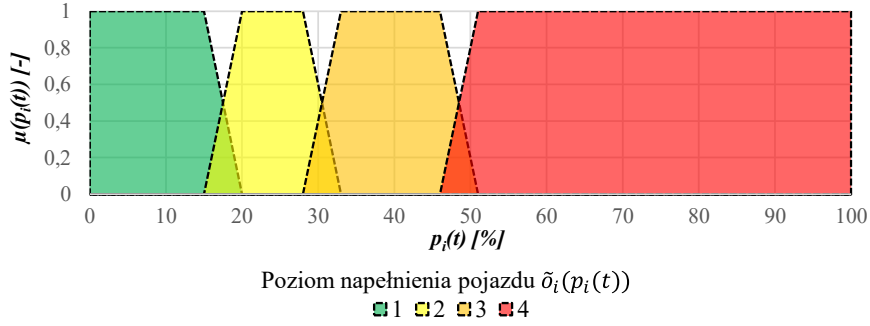


Rys. 56. Warunkowa realizacja priorytetu na końcu fazy F41 – PDII. Źródło: Opr. własne

Po potwierdzeniu poprawności działania programu sygnalizacyjnego pracującego według powyższych zasad, analogicznie jak w przypadku PDI, przystąpiono do jego parametryzacji. Proces ten przeprowadzono zgodnie z zasadami metody opisanej w podrozdziale 3.2.

Wartości graniczne kolejnych poziomów napęnlennia pojazdów PTZ ustalono na podstawie danych pozyskanych od Zarządu Transportu Miejskiego w Poznaniu (por. Rys. 50), a przyjęty czterostopniowy podział poziomów zamieszczono na Rys. 57. Procedura klasyfikacji *i*-tego pojazdu PTZ do odpowiedniego poziomu napęnlennia odbywa się zgodnie z zależnością (25).

Klasyfikacja kolejnych pojazdów PTZ do pięciu poziomów odchylenia od harmonogramu została przeprowadzona analogicznie jak dla PDI, stosując te same zasady oraz zależność (18).



Rys. 57. Klasyfikacja pojazdów PTZ do poziomów napęnienia – PDII. Źródło: Opr. własne

$$\delta_i(p_i(t)) = \begin{cases} 1 & \text{gdy} & (p_i(t) \leq 15\%) \vee \\ & \vee \left((15\% < p_i(t) < 20\%) \wedge \left(Rnd_i(t) \leq \frac{20\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \\ 2 & \text{gdy} & (20\% \leq p_i(t) \leq 28\%) \vee \\ & \vee \left((15\% < p_i(t) < 20\%) \wedge \left(Rnd_i(t) > \frac{20\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \vee \\ & \vee \left((28\% < p_i(t) < 33\%) \wedge \left(Rnd_i(t) \leq \frac{33\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \\ 3 & \text{gdy} & (33\% \leq p_i(t) \leq 46\%) \vee \\ & \vee \left((28\% < p_i(t) < 33\%) \wedge \left(Rnd_i(t) > \frac{33\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \vee \\ & \vee \left((46\% < p_i(t) < 51\%) \wedge \left(Rnd_i(t) \leq \frac{51\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \\ 4 & \text{gdy} & (p_i(t) \geq 51\%) \vee \\ & \vee \left((46\% < p_i(t) < 51\%) \wedge \left(Rnd_i(t) > \frac{51\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \end{cases} \quad (25)$$

W oparciu o metodę generowania kombinacji wartości parametrów *o1-o4* (por. podrozdział 4.1.4, Rys. 27) uzyskano zestaw 35 wariantów nastaw współczynników, które tworzą macierze $O_{N \times K}$ (7) i $S_{M \times L}$ (10). Zestawienie elementów tych macierzy przedstawiono poniżej (26).

$$O = \begin{bmatrix} 1 & 0,87 & 0,74 & 0,61 \\ 1 & 0,87 & 0,74 & 0,48 \\ 1 & 0,87 & 0,74 & 0,35 \\ 1 & 0,87 & 0,74 & 0,22 \\ 1 & 0,87 & 0,61 & 0,48 \\ 1 & 0,87 & 0,61 & 0,35 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0,74 & 0,48 & 0,35 & 0,22 \\ 0,61 & 0,48 & 0,35 & 0,22 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0,87 & 0,74 & 0,61 \\ 1 & 1 & 0,87 & 0,74 & 0,48 \\ 1 & 1 & 0,87 & 0,74 & 0,35 \\ 1 & 1 & 0,87 & 0,74 & 0,22 \\ 1 & 1 & 0,87 & 0,61 & 0,48 \\ 1 & 1 & 0,87 & 0,61 & 0,35 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0,74 & 0,48 & 0,35 & 0,22 \\ 1 & 0,61 & 0,48 & 0,35 & 0,22 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Pierwsza kombinacja przeznaczona do dalszych analiz, zgodnie z powyższym zestawieniem, zakłada przydział współczynników $r_{o_i}(t)$ i $r_{s_i}(t)$ w postaci zależności (27).

$$r_{o_i}(t) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } \tilde{o}_i(p_i(t)) = 1 \\ 0,87 & \text{gdy } \tilde{o}_i(p_i(t)) = 2 \\ 0,74 & \text{gdy } \tilde{o}_i(p_i(t)) = 3 \\ 0,61 & \text{gdy } \tilde{o}_i(p_i(t)) = 4 \end{cases} \quad r_{s_i}(t) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = 1 \\ 1 & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = 2 \\ 0,87 & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = 3 \\ 0,74 & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = 4 \\ 0,61 & \text{gdy } s_i(d_i(t)) = 5 \end{cases} \quad (27)$$

Przyjęto dwie wersje współczynnika $r_{v_i}(t)$ (12), wynikające z zastosowania dwóch różnych konfiguracji współczynników wagowych α i β , tj.: 1) $\alpha = \beta = 1$; 2) $\alpha = 3, \beta = 2$. Dla obu z nich w algorytmie sterowania zastosowano tę samą wartość długości blokady realizacji fazy priorytetowej równą 120 sekund. Ostatecznie, w ramach proponowanej strategii sterowania przygotowano 70 wariantów, którym, zgodnie z przyjętą wcześniej nomenklaturą, nadano oznaczenia $A_1^1, \dots, A_{70}^1$.

Do przeprowadzenia analiz porównawczych, przygotowano jeszcze trzy alternatywne strategie sterowania, różniące się głównie w kontekście podejścia do priorytetyzacji PTZ.

Charakterystyka zmian wprowadzonych w ramach pierwszej porównawczej strategii sprowadza się do modyfikacji, w ramach której w ocenie zgłaszającego się i -tego pojazdu pominięty zostaje całkowicie aspekt napełnienia tego pojazdu. Wobec tego, niezbędnej korekcie poddano równanie (12) dotyczące współczynnika $r_{v_i}(t)$, które w zaktualizowanej formie przedstawiono wcześniej w równaniu (21), w podrozdziale 4.2.3, poświęconym analizom poligonu I. Pozostałe ustawienia parametrów oraz założeń logiki pozostawiono bez zmian. W konsekwencji wyznaczono 35 wariantów tej strategii sterowania i nadano im oznaczenia $A_1^2, \dots, A_{35}^2$.

W kolejnej strategii sterowania poziom przyznanego priorytetu nie jest uzależniony od dynamicznych parametrów zgłaszających się pojazdów, a jedynie od przyjętych statycznych założeń początkowych. Zasady działania tej strategii w zakresie priorytetyzacji ruchu tramwajów zostały oparte na mechanizmach opisanych w zatwierdzonym projekcie organizacji ruchu, który ma zostać wdrożony na skrzyżowaniu po zakończeniu jego przebudowy.

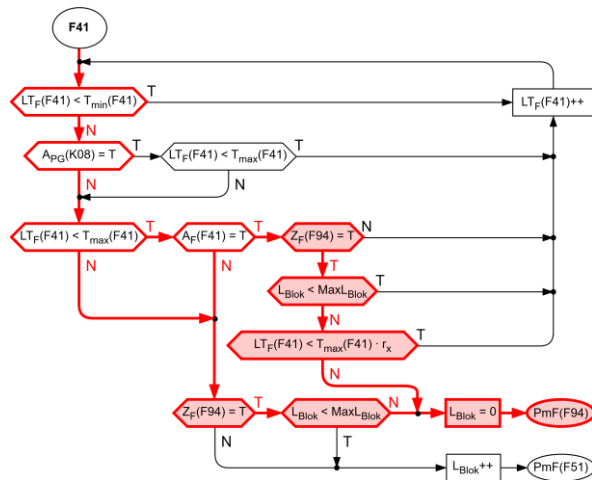
Przejdzie do kolejnej fazy priorytetowej jest możliwe dopiero, gdy licznik L_B osiągnie wartość przyjętego stopnia blokady priorytetu, wyrażonego zmienną $MaxL_B$. Każde zablokowanie przejścia do fazy priorytetowej zwiększa wartość licznika L_B o wartość 1, natomiast każdorazowa realizacja dowolnej fazy priorytetowej powoduje jego wyzerowanie. Przyjęto cztery stopnie blokady:

- Stopień 0 ($MaxL_B = 0$) – brak blokady priorytetu, wszystkie warianty fazy priorytetowej mogą być załączane w każdym kolejnym cyklu.
- Stopień 1 ($MaxL_B = 1$) – po obsłudze aktualnej fazy priorytetowej zostaje zablokowany jej kolejny wariant. Na przykład, jeśli zrealizowana została faza F91, sterownik, pomimo zgłoszeń tramwajów, nie może załączyć w tym cyklu fazy F93 lub F103. Obsługa zgłoszenia nastąpi dopiero w fazie F94.
- Stopień 2 ($MaxL_B = 2$) – po obsłudze aktualnej fazy priorytetowej zostają zablokowane dwa kolejne jej warianty. Na przykład, jeśli zrealizowana została faza F93, sterownik, pomimo zgłoszeń, nie może załączyć w tym cyklu faz F94 i F95. Obsługa zgłoszenia będzie możliwa dopiero w fazie F91 w kolejnym cyklu.
- Stopień 3 ($MaxL_B = 3$) – po obsłudze aktualnej fazy priorytetowej zostają zablokowane jej trzy kolejne warianty. Na przykład, jeśli zrealizowana została faza F94, sterownik nie może załączyć fazy F95 w aktualnym cyklu oraz faz F91 i F93 (lub F103) w cyklu następnym. Obsługa zgłoszenia nastąpi najwcześniej w kolejnej realizacji fazy F94.

Dodatkowo, wprowadzono statyczny współczynnik priorytetowy r_x , który skraca maksymalny czas trwania fazy niepriorytetowej (T_{max}) po zgłoszeniu tramwaju. Przyjęto osiem wariantów konfiguracji tego parametru, w zakresie od 1,00 do 0,16.

Docelowo, w systemie rzeczywistym, wartości zarówno stopnia blokady ($MaxL_{Blok}$), jak i współczynnika priorytetowego (r_x) będą mogły zostać dostosowane przez operatora Centrum Sterowania Ruchem. Na potrzeby badań przeanalizowano 32 warianty tej strategii sterowania. Uwzględniono w nich różne kombinacje obu parametrów sterujących. Wariantom tym nadano oznaczenia $A_1^3, \dots, A_{32}^3$.

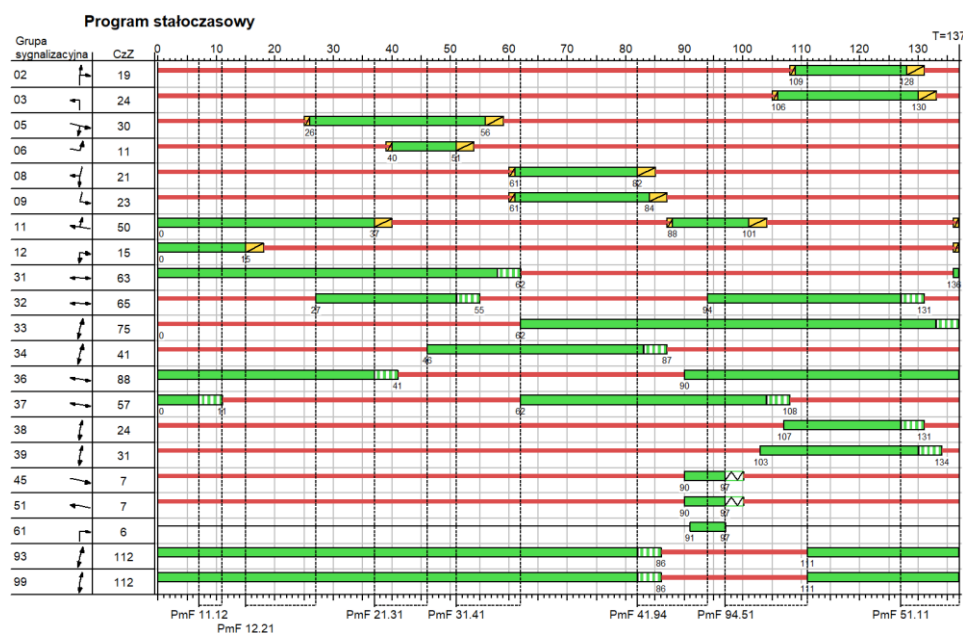
Zastosowanie tej strategii w przeprowadzonych analizach wymagało odpowiedniego dostosowania wcześniej opisanego algorytmu sterowania. Na Rys. 58 przedstawiono przykład zaktualizowanego schematu blokowego logiki fazy F41. Uwypuklono na nim warunki konieczne do spełnienia w celu przejścia z fazy F41 do priorytetowej fazy F94.



Rys. 58. Zastosowanie licznika blokady priorytetu w trakcie realiz. fazy F41 – PDII. Źródło: Opr. własne

Ostatnią analizowaną w ramach tego poligonu doświadczalnego strategię sterowania oparto na wykorzystaniu stałoczasowego programu sygnalizacji o długości cyklu wynoszącej 137 sekund. Jedyńemu wariantowi tej strategii przyporządkowano oznaczenie A_1^4 . W każdym kolejnym cyklu sterownik realizuje stałą sekwencję faz: F11-F12-F21-F31-F41-F94-F51. Ruch tramwajów obsługiwany jest zatem tylko jeden raz w cyklu za pośrednictwem fazy F94. Paskowy diagram programu stałoczasowego umieszczono na Rys. 59.

Wszystkie przedstawione strategie sterowania wykorzystano w kolejnych etapach badań, a w Tab. 36 zebrano ich najważniejsze cechy. Po zakończeniu etapu projektowania kolejnych programów sygnalizacji świetlnej, wygenerowano zestaw wirtualnych sterowników i przystąpiono do realizacji kolejnego etapu metodyki, poświęconego modelowaniu symulacyjnemu.



Rys. 59. Program stałoczasowy – PDII. Źródło: Opr. własne

Tab. 36. Charakterystyka rozpatrywanych strategii sterowania – PDII. Źródło: Opr. własne

Nr strategii sterowania S	Łączna liczba wariantów W	Rodzaj programu		Realizacja priorytetu			Typ priorytetu		Parametry dynamiki priorytetu		
		Stałoczasowy	Zmiennoczasowy	Warunkowa	Bezwartunkowa	Brak	Dynamiczny	Statyczny	Czas oczekiwania na obsługę	Napełnienie pojazdu	Oddalenie od harmonogramu
1	70	-	X	X	-	-	X	-	X	X	X
2	35	-	X	X	-	-	X	-	X	-	X
3	32	-	X	-	X	-	-	X	-	-	-
4	1	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-

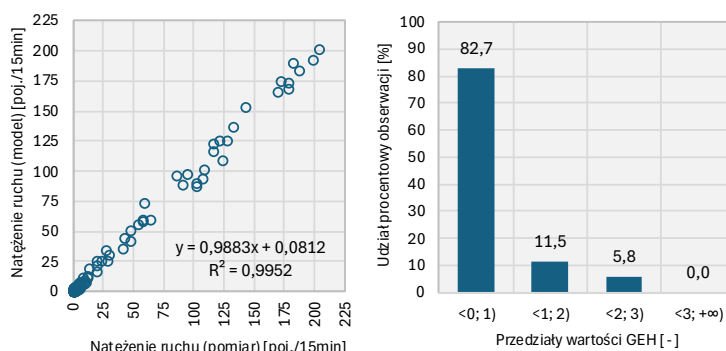
4.3.4. Budowa środowiska testowego dla PDII (E4)

Przy budowie mikrosymulacyjnego modelu skrzyżowania i jego późniejszej weryfikacji zastosowano schemat postępowania opisany w podrozdziale 4.1.6. Geometrię układu drogowego i organizację ruchu odtworzono na podstawie projektu docelowego układu skrzyżowania przedstawionego na planie sytuacyjnym zamieszczonym w *Załączniku nr 12*.

Jako dane referencyjne dotyczące wielkości i struktury ruchu wykorzystano wyniki pomiarów wykonanych przed rozpoczęciem przebudowy skrzyżowania. Model wykonany na potrzeby przedmiotowego poligonu, w porównaniu z PDI, obejmował znacznie szerszy zakres elementów składowych, w tym ruch piesz i rowerowy, przystanki PTZ oraz proces wymiany pasażerskiej.

Podczas kolejnych przebiegów testowych przeprowadzono jakościową kontrolę geometrii, przebiegu tras oraz zachowania poszczególnych grup uczestników ruchu. Po wprowadzeniu niezbędnych korekt wyeliminowano nienaturalne manewry, nieuzasadnione zatrzymania, kolizje oraz przypadki braku możliwości kontynuowania przejazdu po przypisanej trasie. Korekta wartości parametru *waiting time before diffusion* pozwoliła wyeliminować sporadyczne przypadki usuwania pojazdów z modelu z powodu przekroczenia granicznego czasu oczekiwania na zmianę pasa ruchu.

Zgodność ruchu generowanego w modelu z wynikami pomiarów zweryfikowano ilościowo z wykorzystaniem analizy wartości współczynnika determinacji R^2 oraz wskaźnika GEH. Jak wynika z danych zamieszczonych na Rys. 60, osiągnięto bardzo dobre dopasowanie. Dla całego zbioru porównań natężeń w interwałach 15-minutowych otrzymano współczynnik determinacji $R^2 = 0,9952$. Spośród uzyskanych wartości wskaźnika GEH 82,7% mieściło się w przedziale od 0 do 1, 11,5% w przedziale od 1 do 2, a pozostałe 5,8% w przedziale od 2 do 3. Wszystkie wartości wskaźnika GEH były zatem mniejsze od 3, a tym samym spełniały zarówno przyjęte kryterium podstawowe, jak i bardziej rygorystyczny poziom zgodności zalecany dla kluczowych relacji ruchu.



Rys. 60. Porównanie zmierzonych i uzyskanych w modelu natężeń ruchu oraz rozkład wartości wskaźnika GEH – PDII. Źródło: Opr. własne

Na podstawie nagrań terenowych, odrębnie dla kontrolowanych relacji ruchu, wyznaczono referencyjne wartości natężenia nasycenia. W przebiegach testowych wykonanych z zastosowaniem standardowych wartości parametrów modelu *Wiedemanna-74* uzyskano wartości natężenia nasycenia znacznie wyższe od tych wyznaczonych na podstawie pomiarów, co wskazywało na zbyt szybkie rozładowywanie kolejek w modelu. Przykładowo dla relacji na wprost średnie wartości referencyjne wynosiły około 1900 poj./h, podczas gdy w modelu uzyskiwano wartości na poziomie 2100 poj./h.

Kalibrację rozpoczęto od wprowadzenia w rejonie linii zatrzymania krótkich kilkumetrowych obszarów ograniczonej prędkości RSA, pozostawiając standardowe wartości parametrów modelu *Wiedemanna-74* bez zmian. Po przetestowaniu kilku rozkładów prędkości pożądaną wymaganą poziom zgodności uzyskano dla rozkładu równomiernego mieszczącego się w przedziale 30–35 km/h. W pięciu kolejnych przebiegach testowych wartość bezwzględna różnicy nie przekraczała 5% dla żadnej z kontrolowanych relacji. Pozwoliło to uznać, że sposób rozładowywania kolejek na analizowanych wlotach odwzorowano z przyjętą dokładnością.

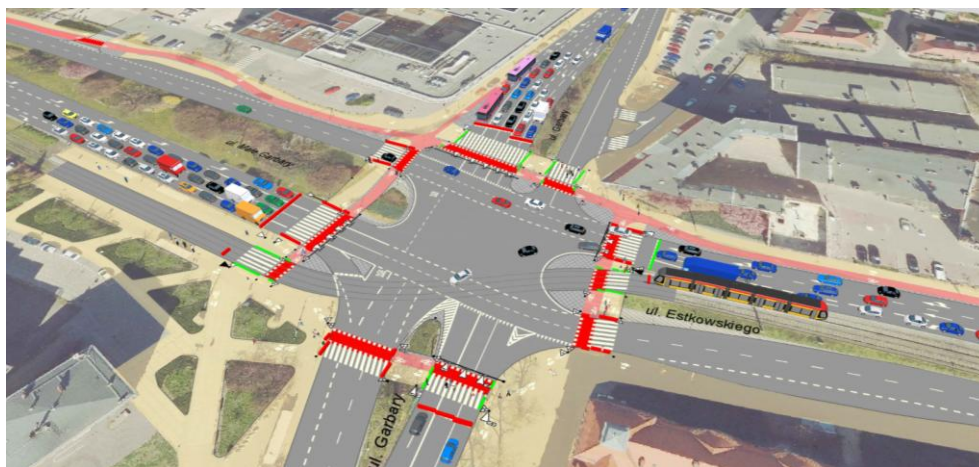
W kontekście funkcjonowania sygnalizacji świetlnej dla każdej strategii sterowania przeprowadzono rozbudowane testy scenariuszowe i integracyjne. W trakcie kolejnych testów wykryto kilka błędów logiki sterowania. Po wyeliminowaniu ich przyczyn nie stwierdzono dalszych naruszeń przyjętych warunków kontrolnych. Potwierdzono

poprawne działanie systemu detekcji i wszystkich wirtualnych sterowników, prawidłową wymianę danych pomiędzy środowiskami Vissim i LISA+, a także kompletność i powtarzalność generowanych wyników dla jednakowych warunków początkowych i tej samej wartości ziarna losowego.

Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność budowy i funkcjonowania kompletnego środowiska testowego PDII oraz spełnienie wszystkich przyjętych warunków weryfikacji i kalibracji. Tym samym środowisko testowe wraz z zaimplementowanymi strategiami sterowania dopuszczono do właściwych eksperymentów symulacyjnych realizowanych w etapie E5.

4.3.5. Prowadzenie symulacji dla PDII (E5)

Po zakończeniu budowy modelu i przeprowadzeniu serii symulacji testowych potwierdzających jego prawidłowe działanie, przystąpiono do etapu właściwych eksperymentów zgodnie z założeniami opisanymi w 4.1.7. W menedżerze scenariuszy, przygotowano plan symulacji dla wszystkich 138 wariantów sterowania. Uwzględniono w nim konieczność wykonania serii pięciu symulacji dla każdego wariantu, co ostatecznie wymagało przeprowadzenia 690 eksperymentów symulacyjnych. Dodatkowo, za pośrednictwem przedmiotowego modelu wykonano serię dodatkowych symulacji, których wyniki wykorzystano do opracowania modelu regresji emisji dwutlenku węgla CO₂ (patrz podrozdział 4.1.5). Na poniższym rysunku (Rys. 61) przedstawiono wygląd modelu w trakcie eksperymentu symulacyjnego.



Rys. 61. Model w czasie symulacji – PDII. Źródło: Opr. własne

W efekcie wykonania wszystkich symulacji otrzymano wyniki, które następnie przekształcono tak, aby dla każdego badanego wariantu sterowania uzyskać zbiór kompletnych informacji w zakresie wybranego zbioru kryteriów. Pełne zestawienie rezultatów otrzymanych dla wszystkich wariantów sterowania zamieszczono w *Załączniku nr 17*. W kolejnych etapach metodyki otrzymane wyniki poddano analizie wielokryterialnej, zgodnie z procedurą z podrozdziału 4.1.3.

4.3.6. Selekcja rozwiązań niezdominowanych dla PDII (E6)

Niezależnie dla każdej z badanych strategii sterowania dokonano selekcji wariantów niezdominowanych, przez co ponad czterokrotnie zredukowano liczbę wariantów z początkowych 138 do 30. Tabełacyjne zestawienie wszystkich niezdominowanych

wariantów sterowania zamieszczono w Tab. 37. Najlepsze wyniki w poszczególnych strategiach sterowania oznaczono pogrubieniem i podkreśleniem, natomiast najlepsze wartości w ramach każdego kryterium oceny zostały wyróżnione zielonym tłem. Analiza wyników wykazała, że najkorzystniejsze wartości wszystkich pięciu kryteriów uzyskały warianty pierwszej strategii sterowania. W przypadku kryterium K1 wartości dla jej niezdominowanych wariantów mieściły się w przedziale od 61,79 s/os. (A_{44}^1) do 63,96 s/os. (A_{29}^1). Dla porównania najlepszy pod tym względem wariant spośród pozostałych strategii, A_4^2 , uzyskał wartość 65,55 s/os. Wynik wariantu A_{44}^1 był zatem lepszy o 3,76 s/os., tj. o około 5,74%.

Tab. 37. Zbiór niezdominowanych wariantów sterowania – PDII. Źródło: Opr. własne

A_W^S		Stos. par. $\alpha : \beta$	Kombinacja współczynników $[s_1 \ o_1, s_2 \ o_2, s_3 \ o_3, s_4 \ o_4, s_5]$	Wsp. τ_x	Par. $MaxL_B$	Kryteria oceny				
S	W					K1 [s/os.]	K2 [s/poj.]	K3 [s/poj. PTZ]	K4 [min]	K5 [kg]
1	2	1 : 1	1,00 1,00 0,87 0,74 0,48	nd	nd	62,09	63,98	60,43	3,50	962,95
1	19	1 : 1	1,00 1,00 0,61 0,35 0,22	nd	nd	62,17	64,76	58,18	3,47	964,55
1	20	1 : 1	1,00 1,00 0,48 0,35 0,22	nd	nd	63,36	67,39	57,66	3,44	969,04
1	22	1 : 1	1,00 0,87 0,74 0,61 0,35	nd	nd	62,91	64,93	58,92	3,47	963,68
1	23	1 : 1	1,00 0,87 0,74 0,61 0,22	nd	nd	62,18	65,17	55,66	3,45	963,57
1	24	1 : 1	1,00 0,87 0,74 0,48 0,35	nd	nd	63,53	66,77	57,25	3,44	967,39
1	25	1 : 1	1,00 0,87 0,74 0,48 0,22	nd	nd	62,51	66,01	58,24	3,42	966,29
1	26	1 : 1	1,00 0,87 0,74 0,35 0,22	nd	nd	62,42	65,88	56,07	3,45	964,66
1	29	1 : 1	1,00 0,87 0,61 0,35 0,22	nd	nd	63,96	68,19	56,49	3,44	967,85
1	30	1 : 1	1,00 0,87 0,48 0,35 0,22	nd	nd	62,84	67,96	57,05	3,41	969,80
1	37	3 : 2	1,00 1,00 0,87 0,74 0,48	nd	nd	62,00	63,70	62,82	3,50	962,53
1	44	3 : 2	1,00 1,00 0,87 0,48 0,22	nd	nd	61,79	64,91	61,80	3,49	964,48
1	59	3 : 2	1,00 0,87 0,74 0,48 0,35	nd	nd	62,27	65,17	58,78	3,46	964,58
1	62	3 : 2	1,00 0,87 0,61 0,48 0,35	nd	nd	62,68	66,03	57,51	3,45	965,19
1	63	3 : 2	1,00 0,87 0,61 0,48 0,22	nd	nd	62,45	66,56	57,93	3,44	966,26
1	67	3 : 2	1,00 0,74 0,61 0,48 0,22	nd	nd	63,43	67,76	54,47	3,45	968,62
1	68	3 : 2	1,00 0,74 0,61 0,35 0,22	nd	nd	61,83	67,29	58,20	3,41	965,83
2	3	0 : 1	1,00 1,00 0,87 0,74 0,35	nd	nd	65,59	68,47	60,70	3,48	971,17
2	4	0 : 1	1,00 1,00 0,87 0,74 0,22	nd	nd	65,55	69,21	59,66	3,48	971,72
2	5	0 : 1	1,00 1,00 0,87 0,61 0,48	nd	nd	66,10	68,99	62,10	3,50	970,55
2	30	0 : 1	1,00 0,87 0,48 0,35 0,22	nd	nd	69,62	73,85	65,16	3,47	979,66
3	1	nd	nd	1,00	3	69,53	66,74	76,38	3,67	964,21
3	9	nd	nd	1,00	2	68,64	69,51	65,37	3,60	968,68
3	10	nd	nd	0,88	2	69,94	71,18	66,22	3,59	971,30
3	11	nd	nd	0,76	2	67,71	70,50	63,99	3,52	971,47
3	17	nd	nd	1,00	1	71,27	76,26	62,60	3,53	977,21
3	25	nd	nd	1,00	0	73,04	81,62	55,99	3,50	984,55
3	26	nd	nd	0,88	0	68,08	76,69	61,29	3,43	978,07
3	32	nd	nd	0,16	0	75,22	84,47	59,83	3,49	995,28
4	1	nd	nd	nd	nd	75,08	69,67	73,49	3,80	979,24

Nie oznacza to jednak, że jeden wariant pierwszej strategii był najlepszy pod względem wszystkich kryteriów. Najkorzystniejsze wartości K2 i K5 uzyskał wariant A_{37}^1 , najmniejszą wartość K3 – wariant A_{67}^1 , natomiast najkorzystniejszą wartość dla K4 uzyskały warianty A_{30}^1 i A_{68}^1 . W obrębie pierwszej strategii występowały zatem różnice w zakresie korzyści uzyskiwanych przez poszczególne grupy uczestników ruchu.

Szczególnie niekorzystne rezultaty uzyskał wariant A_{32}^3 , reprezentujący najwyższy spośród analizowanych poziom priorytetyzacji tramwajów. Średnie straty czasu pojazdów PTZ wyniosły w jego przypadku 59,8 s, przy czym dla tramwajów osiągnęły 24,1 s, a dla autobusów 93,0 s. Intensywnemu uprzywilejowaniu tramwajów towarzyszyły zatem znaczne straty czasu dla autobusów, co ograniczało korzyści dla PTZ rozpatrywanego jako całość. Jednocześnie wariant ten uzyskał najmniej korzystne wartości kryteriów K1, K2 i K5, co wskazuje, że silne ukierunkowanie sterowania na obsługę tramwajów pogarszało wyniki dotyczące pozostałych uczestników ruchu.

Niekorzystne wyniki uzyskała również czwarta strategia, wykorzystująca program stałoczasowy (A_1^4). Jej jedyny wariant osiągnął najmniej korzystną wartość kryterium K4 oraz przedostatnie wartości kryteriów K1 i K3. Brak bieżącego dostosowywania programu sygnalizacji do zgłoszeń pojazdów PTZ ograniczał zatem możliwość zapewnienia ich sprawnej i punktualnej obsługi.

Podobnie jak w przypadku analizy przeprowadzonej dla PDI, również tutaj jednoznaczne wskazanie najlepszego rozwiązania w zakresie wybranego zbioru kryteriów pozostaje problematyczne. Wśród rozpatrywanych wariantów nie występuje żaden, który konsekwentnie dominowałby nad pozostałymi we wszystkich kryteriach oceny. W związku z tym, zgodnie z przyjętym podejściem metodycznym, przystąpiono do analizy z wykorzystaniem metody ELECTRE III (patrz 4.1.3).

4.3.7. Szeregowanie rozwiązań dla PDII (E7)

Wyniki rankingu bazowego wskazują, że wszystkie warianty pierwszej strategii zostały ocenione wyżej niż jakiekolwiek rozwiązanie należące do pozostałych, alternatywnych strategii sterowania. Świadczy to o wyraźnej przewadze autorskiego podejścia na analizowanym skrzyżowaniu. Najgorszy wariant pierwszej strategii A_{37}^1 zajął dziewiąte miejsce, podczas gdy najwyżej oceniane rozwiązania strategii alternatywnych osiągnęły dopiero pozycję dziesiątą A_3^2 , A_4^2 , A_5^2 , A_{25}^3 . Na najwyższych pozycjach rankingu znalazły się warianty: A_{23}^1 , A_{26}^1 i A_{19}^1 , które zajęły odpowiednio pierwsze, drugie i trzecie miejsce. Tymczasem, na ostatnim miejscu rankingu, podobnie jak w przypadku PDI, odnotowano wariant reprezentujący strategię opartą na programie stałoczasowym A_1^4 .

W ramach analizy wrażliwości, dla kolejnych modyfikacji modelu preferencji decydenta przygotowano 39 rankingów cząstkowych, które wraz z rankingiem bazowym stały się podstawą do wskazania rankingu ostatecznego. Zestawienie wybranych rozwiązań zamieszczono w Tab. 38, a pełne zestawienie zamieszczono w *Załączniku nr 18*.

Uzyskane wyniki potwierdzają wyraźną dominację pierwszej strategii A_w^1 . Wariant A_{23}^1 niezmiennie zajmował pierwsze miejsce we wszystkich rozpatrywanych rankingach, co pozwala na rekomendację tego rozwiązania – stabilny wybór. Drugie miejsce, również niezmiennie zajął wariant A_{26}^1 . Wariant A_{19}^1 , który ostatecznie uplasował się na trzeciej pozycji charakteryzuje się najniższą, niezerową wartością odchylenia standardowego ($\sigma = 0,16$), co również świadczy o dużej spójności zajmowanych lokat. Wśród pozostałych wariantów zaobserwowano większą zmienność zajmowanych lokat. Najwyższą wartość odchylenia standardowego odnotowano dla wariantu A_{30}^2 ($\sigma = 1,70$). Stosunkowo wysoką, choć nieco niższą niestabilność wykazały również warianty A_5^2 i A_{11}^3 ($\sigma = 1,55$). Co istotne, we wszystkich przypadkach większa zmienność zajmowanych pozycji dotyczyła wariantów wyraźnie oddalonych od strefy rozwiązań najlepszych i nie wpływała na ostateczną rekomendację. Analiza wrażliwości potwierdziła również ocenę wariantu A_1^4 , który konsekwentnie zajmował ostatnie miejsce we wszystkich rankingach.

Tab. 38. Wyniki szeregowania wariantów sterowania i analizy wrażliwości – PDII. Źródło: Opr. własne

Oznaczenie A_{W}^S		Numer w rankingu						Min	Max	μ	σ	Dominanta. Ranking finalny
S	W	1	2	3	4	...	40					
1	23	1	1	1	1	...	1	1	1	1,00	0,00	1
1	26	2	2	2	2	...	2	2	2	2,00	0,00	2
1	19	3	3	3	3	...	3	3	4	3,03	0,16	3
1	62	4	4	4	4	...	5	3	5	3,98	0,35	4
1	67	5	4	5	5	...	4	3	5	4,18	0,74	4
1	59	5	4	5	5	...	6	3	6	4,75	0,92	4
1	63	6	5	6	6	...	5	3	6	5,10	0,92	6
1	25	6	5	6	6	...	6	3	6	5,18	0,95	6
1	68	6	5	6	6	...	7	3	7	5,30	0,93	6
1	30	6	5	6	6	...	7	4	7	5,50	0,67	6
1	24	6	5	6	6	...	7	4	7	5,58	0,77	6
1	22	6	5	6	6	...	7	3	8	5,65	1,01	6
1	2	7	6	7	7	...	8	4	8	6,45	0,89	7
1	29	7	6	7	7	...	8	5	8	6,48	0,89	7
1	20	7	6	7	7	...	9	4	9	6,55	1,12	7
1	44	8	7	8	8	...	9	6	9	7,68	0,85	8
1	37	9	7	9	9	...	10	6	10	8,43	1,20	9
2	4	10	8	10	10	...	11	7	11	9,45	1,16	10
3	25	10	8	10	10	...	11	7	11	9,45	1,16	10
2	3	10	8	10	10	...	12	8	12	9,88	1,35	10
2	5	10	8	10	10	...	13	8	13	10,00	1,55	10
3	11	11	9	11	11	...	14	9	14	11,00	1,55	11
3	9	12	10	12	12	...	14	10	15	11,95	1,45	12
3	26	13	11	13	13	...	15	10	16	12,90	1,51	13
3	10	14	12	14	14	...	16	11	17	13,90	1,51	14
2	30	15	13	15	15	...	17	12	19	14,98	1,70	15
3	1	15	13	16	16	...	16	13	19	15,65	1,46	15
3	17	16	14	17	17	...	17	13	18	16,00	1,24	16
3	32	17	15	18	18	...	17	15	20	17,08	1,08	17
4	1	18	16	19	19	...	18	16	21	18,23	1,19	18

4.3.8. Rekomendacja rozwiązania i weryfikacja realizacji celu badań dla PDII (E8)

Na podstawie przeprowadzonego szeregowania wielokryterialnego oraz analizy wrażliwości jako rozwiązanie rekomendowane dla PDII wskazano wariant A_{23}^1 , należący do pierwszej strategii sterowania. Strategia ta wykorzystuje w procesie kształtowania poziomu priorytetu informacje dotyczące napełnienia pojazdu PTZ, odchylenia kursu od harmonogramu oraz czasu oczekiwania na obsługę. Wariant A_{23}^1 zajął pierwsze miejsce zarówno dla bazowego modelu preferencji, jak i we wszystkich jego zmodyfikowanych wersjach. Otrzymana rekomendacja wykazała zatem pełną stabilność w zakresie analizowanych zmian preferencji decydenta.

Analiza PDII dostarcza przede wszystkim przesłanek wskazujących na możliwość wykorzystania opracowanej metodyki w rzeczywistych procesach projektowych. W odróżnieniu od hipotetycznego PDI środowisko badawcze opracowano na podstawie projektu przebudowy rzeczywistego skrzyżowania, wykorzystując dostępne dane pomiarowe i informacje dotyczące funkcjonowania transportu zbiorowego. Jednocześnie analizowany układ odpowiadał rozwiązaniu docelowemu, które w czasie prowadzenia badań nie funkcjonowało jeszcze w pełnym zakresie. Konieczne było zatem przyjęcie części założeń dotyczących przyszłych warunków ruchu, m.in. w odniesieniu do ruchu

rowerowego. Uzyskane rezultaty wskazują więc na przydatność metodyki w ocenie projektowanych rozwiązań.

Rezultaty PDII wzmacniają również wnioski dotyczące zasadności stosowania autorskiej strategii sterowania. Najkorzystniejsze wartości poszczególnych kryteriów występowały w obrębie pierwszej strategii, a jej niezdominowane warianty charakteryzowały się mniejszymi stratami czasu indywidualnych podróży niż rozwiązania należące do strategii porównawczych. Przewaga ta znalazła odzwierciedlenie również w szeregowaniu wielokryterialnym, w którym warianty strategii autorskiej zajmowały najwyższe pozycje. Jednocześnie wysoka stabilność uzyskanych rankingów wskazuje, że ich korzystna ocena nie była wynikiem wyłącznie pojedynczej konfiguracji preferencji decydenta.

Także w PDII widoczny jest konflikt pomiędzy korzyściami wynikającymi z intensywnego uprzywilejowania PTZ a warunkami ruchu pozostałych jego uczestników. Najwyższy analizowany poziom priorytetu statycznego A_{32}^3 poprawiał przede wszystkim kryteria odnoszące się bezpośrednio do obsługi tramwajów, lecz odbywało się to kosztem pogorszenia innych miar oceny. Z drugiej strony program stałoczasowy A_1^4 , niewykorzystujący informacji o bieżącym zapotrzebowaniu, również nie zapewniał korzystnego wyniku całościowego. Rezultaty te ponownie wskazują na potrzebę stosowania priorytetu o charakterze warunkowym i stopniowalnym, którego intensywność może być dostosowywana do rzeczywistej potrzeby obsługi danego zgłoszenia.

Weryfikacja szczegółowych warunków realizacji celu pracy określonych w podrozdziale 1.3 wykazała, że strategia uwzględniająca informację o napełnieniu pozwoliła uzyskać mniejsze wartości kryterium K1 niż strategię porównawczą. Przeprowadzone szeregowanie wielokryterialne umożliwiło wskazanie rozwiązania kompromisowego w przyjętym zbiorze kryteriów K1-K5. Rekomendowany wariant należał do strategii autorskiej i zachował przewagę pod względem K1 nad najlepszym wariantem nieuwzględniającym informacji o napełnieniu. Jednocześnie analiza wrażliwości potwierdziła odporność rekomendacji na niewielkie zmiany preferencji decydenta. Tym samym dla PDII potwierdzono spełnienie wszystkich warunków realizacji celu pracy.

Kolejny podrozdział poświęcony jest charakterystyce badań nad trzecim - ostatnim poligonem doświadczalnym.

4.4. Charakterystyka badań dla PDIII i wyniki symulacji

4.4.1. Charakterystyka ogólna obszaru badań dla PDIII (E1)

Trzeci, zarazem ostatni rozpatrywany poligon doświadczalny obejmuje trójwłotowe skrzyżowanie zlokalizowane na południowo-zachodnim wierzchołku pierwszej ramy komunikacyjnej Poznania. Podobnie jak skrzyżowanie Garbary-Estkowskiego, również odgrywa ważną rolę w systemie transportowym miasta. Jednak ze względu na swoje strategiczne położenie, jego rola jest jeszcze większa. Wynika to z bezpośredniego sąsiedztwa dużych generatorów ruchu, takich jak m.in. Międzynarodowe Targi Poznańskie, dworce kolejowy i autobusowy, oraz duża galeria handlowa. Wszystko to, oraz intensywna częstotliwość kursowania tramwajów i wysokie natężenie ruchu drogowego, sprawiają, że skrzyżowanie to stanowi jeden z kluczowych węzłów komunikacyjnych miasta.

Należy podkreślić, że skrzyżowanie Most Dworcowy-Roosevelta-Głogowska wykazuje najwyższy stopień złożoności spośród rozpatrywanych poligonów doświadczalnych. Dotychczas rozważano przede wszystkim sytuacje kolizyjne pomiędzy pojazdami sterowanymi różnymi grupami kołowymi oraz tramwajami. Na PDII dodatkowo uwzględniono ruch pieszych, rowerzystów i obsługę przystanków PTZ. W zakresie priorytetyzacji starano się wypracować rozwiązanie, które umożliwi nadanie możliwie wysokiego poziomu

priorytetu dla tramwajów przy jednoczesnym zabezpieczeniu interesów pozostałych uczestników ruchu. Na PDIII występują wszystkie dotychczas uwzględniane czynniki, a ponadto ruch tramwajowy odbywa się pomiędzy wszystkimi wlotami. Taka konfiguracja znacząco podnosi poziom złożoności problemu sterowania i priorytetyzacji, ponieważ w analizach należy dodatkowo rozważyć kolejność nadawania priorytetu tramwajom poruszającym się w relacjach kolizyjnych względem siebie.

Przyjęta do badań organizacja ruchu w postaci planu sytuacyjnego stanowi *Załącznik nr 19*, a fragment przedstawiający samą tarczę skrzyżowania zamieszczono na Rys. 62. Wszystkie jezdnie wlotowe i wylotowe oddzielone są pasami rozdziału, przez które biegną tory tramwajowe. Tramwaje poruszają się pomiędzy wlotami na wszystkich sześciu możliwych relacjach, zapewniając pełną obsługę kierunków ruchu. Droga główna biegnie w relacji północ-południe ulicami Roosevelta i Głogowską, natomiast ul. Most Dworcowy pełni funkcję wlotu podporządkowanego.

Na północnym wlocie skrzyżowania znajdują się cztery pasy ruchu kołowego, z czego dwa przeznaczone są do jazdy na wprost, a pozostałe dwa do skrętu w lewo. Wlot wschodni obsługuje wyłącznie relacje skrętne. Dla pojazdów jadących w prawo przewidziano jeden pas, a dla jadących w lewo dwa pasy. Z kolei na południowym wlocie, podobnie jak na północnym, wyznaczono cztery pasy ruchu – po dwa do jazdy na wprost oraz do skrętu w prawo. Na wszystkich wlotach skrzyżowania funkcjonuje ograniczenie prędkości typowe dla obszaru zabudowanego wynoszące 50 km/h. Przejścia dla pieszych wyznaczono jedynie przez północny i południowy wlot skrzyżowania. W jego bezpośrednim obszarze przystanki tramwajowe funkcjonują wyłącznie na wlocie północnym.

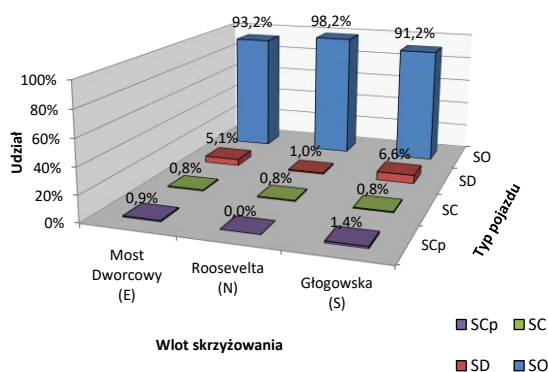


Rys. 62. Układ geometryczny skrzyżowania wraz z przyjętą organizacją ruchu – PDIII. Źródło: Opr. własne

Pomiary mające na celu określenie wolumenów natężenia ruchu oraz jego struktury kierunkowej i rodzajowej przeprowadzono w typowym dniu roboczym w lutym 2023 r., w godzinach 14:00-18:00. Na potrzeby badań wykorzystano materiał filmowy z kamery online, zainstalowanej na terenie Międzynarodowych Targów Poznańskich [72].

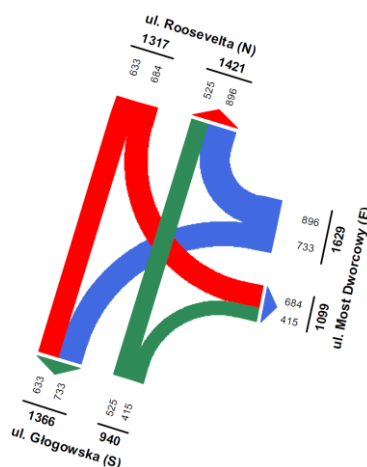
Na wszystkich wlotach skrzyżowania dominującą grupą pojazdów są samochody osobowe (por. Rys. 63), które osiągają maksymalny udział na poziomie 98,2% na ul.

Roosevelta i najmniej – 91,2% na ul. Głogowskiej. Samochody dostawcze stanowią drugą co do wielkości kategorię pojazdów, przy czym ich udział nie przekracza 7% (maksymalnie 6,6% na ul. Głogowskiej, najmniej – 1% na ul. Roosevelta). Udział pojazdów ciężarowych z i bez naczepy przekracza 2% jedynie na ul. Głogowskiej, podczas gdy na ul. Roosevelta nie odnotowano pojazdów ciężarowych z naczepą a udział obu kategorii wynosi jedynie 0,8%.



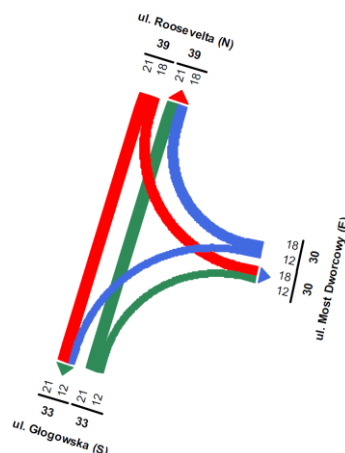
Rys. 63. Struktura rodzajowa pojazdów – PDIII. Źródło: Opr. własne

Na zamieszczonym na Rys. 64 kartogramie przedstawiono natężenia ruchu pojazdów na poszczególnych relacjach, wyrażone w pojazdach umownych (E). W godzinie szczytu przez skrzyżowanie przejeżdża niemal 4 tysiące pojazdów. Największe natężenie ruchu odnotowuje się na wlocie wschodnim (ul. Most Dworcowy), którym przemieszcza się 1629 pojazdów. Około 20% mniejszym natężeniem ruchu charakteryzuje się wlot północny (ul. Roosevelta), co odpowiada 1317 pojazdom. Najmniejsze natężenie ruchu na skrzyżowaniu obserwowane jest na wlocie południowym (ul. Głogowska), które kształtuje się na poziomie 940 pojazdów. Rozkład kierunkowy ruchu na wszystkich wlotach jest stosunkowo równomierny, a obserwowane odchylenia mieszczą się w przedziale od 2% do 5%. Dominującą na skrzyżowaniu relacją jest skręt w prawo z ul. Most Dworcowy w kierunku ul. Roosevelta. Przemieszcza się nią niemal 900 pojazdów w ciągu godziny, co stanowi ponad dwukrotność natężenia najmniej obciążonej relacji, prowadzącej z ul. Głogowskiej (S) w kierunku ul. Most Dworcowy (E).



Rys. 64. Kartogram natężenia ruchu [E] – PDIII. Źródło: Opr. własne

Skrzyżowanie Most Dworcowy-Roosevelta-Głogowska poza wysokim obciążeniem po stronie ruchu kołowego cechuje się również jednym z wyższych wolumenów natężenia ruchu tramwajowego w Poznaniu. W czasie godziny szczytu przez skrzyżowanie przejeżdża ponad 100 tramwajów dziewięciu różnych linii (Rys. 65). Najwięcej porusza się w obu kierunkach relacji północ-południe, najmniej natomiast w obu kierunkach relacji południe-wschód. Pośrednie wartości obserwuje się dla relacji północ-wschód.



Rys. 65. Kartogram natężenia ruchu tramwajów – PDIII. Źródło: Opr. własne

W ujęciu całościowym harmonogram kursowania tramwajów oraz dane dotyczące poziomu ich napełnienia opracowane dla wszystkich ziaren symulacji zawarto w *Załączniku nr 20*. Część zagregowanych charakterystyk przedstawiono w Tab. 39. Jak wynika z tego zestawienia, średnia liczba pasażerów tramwajów mieści się w przedziale między 52 a 93, a odchylenie standardowe kształtuje się na poziomie 30 pasażerów. Rozrzut na tym poziomie spowodowany jest w głównej mierze, podobnie jak w przypadku PDII, różnicami w atrakcyjności poszczególnych linii.

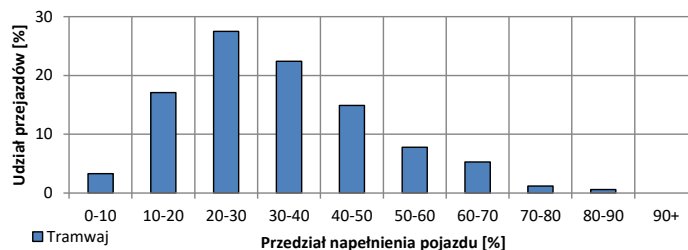
Tab. 39. Charakterystyka linii publicznego transportu zbiorowego – PDIII. Źródło: Opr. własne

Rodzaj linii PTZ	Grupa sygn.	Liczba kursów dla 1 ziarna symulacji	Napełnienie pojazdu pasażerami [os.]			
			Średnie	Minimalne	Maksymalne	Odchylenie standardowe
Tramwajowe	N→E	18	69	9	165	32
	N→S	21	56	6	177	29
	E→N	18	56	15	137	27
	E→S	12	93	42	165	28
	S→N	21	52	12	134	25
	S→E	12	83	24	139	27

Co istotne, zauważyć można prawidłowość, według której wraz ze wzrostem częstotliwości kursowania maleje średnie napełnienie pojazdu. Dlatego najczęściej (ponad 80) pasażerów obserwuje się w pojazdach kursujących w relacji wschód-południe, natomiast najmniej w pojazdach relacji północ-południe.

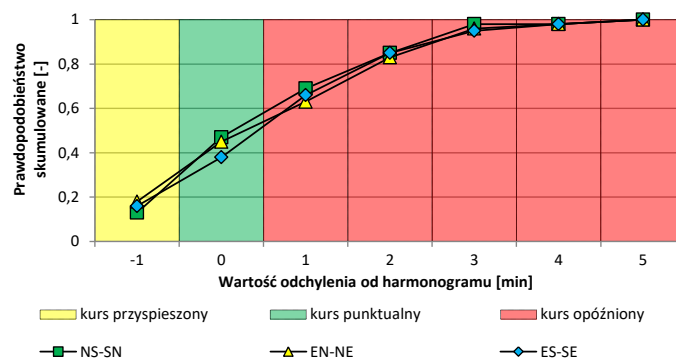
Z rozkładów napełnienia, przedstawionych również w postaci graficznej na Rys. 66 wynika, że w obrębie przedmiotowego skrzyżowania nie występują przejazdy puste, a te charakteryzujące się napełnieniem niższym niż 10% stanowią bardzo niski odsetek,

nieprzekraczający 5%. Obłożenie większości tramwajów oscyluje bliżej przedziałów z zakresu 20-40%. Wyższe wartości liczby pasażerów, przekraczające 60% pojemności pojazdu stanowią nieco ponad 7% przejazdów.



Rys. 66. Rozkład napełnienia tramwajów – PDIII. Źródło: Opr. własne

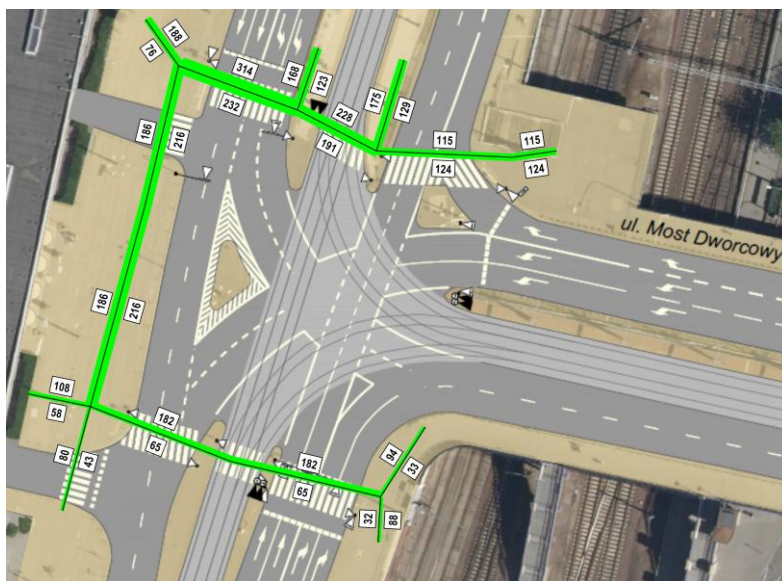
Dalsza analiza danych wykazała, że wszystkie linie tramwajowe cechuje podobny rozkład wartości odchylenia od harmonogramu (por. Rys. 67). Najwyższe różnice zauważa się w przypadku tramwajów nadjeżdżających do skrzyżowania o czasie. Linie poruszające się wzdłuż osi północ-południe (NS-SN), charakteryzuje najwyższy odsetek punktualnych przejazdów wynoszący 37%. Dla porównania dla relacji północ-wschód i południe-wschód wartości te kształtują się na poziomie odpowiednio 22 i 27%. Odsetek przejazdów przyspieszonych mieści się w przedziale od 13% (relacja północ-południe) do 18% (północ-wschód).



Rys. 67. Rozkład prawdopodobieństwa odchylenia kursu od harm. jazdy – PDIII. Źródło: Opr. własne

Ponad połowa kursów obciążona jest określonym poziomem opóźnienia. Nieznaczne, tj. nieprzekraczające 2 minut, najczęściej obserwowane jest na trasach realizowanych pomiędzy wlotami ul. Głogowskiej i Most Dworcowy, a różnica względem innych relacji wynosi blisko 9%. Opóźnienie przekraczające 3 minuty dotyczy około 15% przejazdów realizowanych na każdej relacji.

W obrębie skrzyżowania odnotowano duże potoki ruchu pieszego, spowodowane w głównej mierze dużą częstotliwością kursowania pojazdów PTZ, bezpośrednim sąsiedztwem galerii handlowej oraz lokalizacją w obrębie ważnego węzła przesiadkowego. Najwięcej pieszych porusza się po północnej części skrzyżowania, głównie ze względu na umiejscowienie na niej przystanków (Rys. 68).



Rys. 68. Potoki pieszych – PDIII. Źródło: Opr. własne

W czasie pomiarów nie odnotowano ruchu rowerowego. Wynikało to zarówno z zimowego terminu przeprowadzenia pomiarów, jak i z przebiegu infrastruktury rowerowej, kierującej zasadnicze relacje ruchu rowerowego poza granice analizowanego poligonu. Ponadto charakter jezdni w obrębie skrzyżowania może ograniczać skłonność rowerzystów do poruszania się po nich.

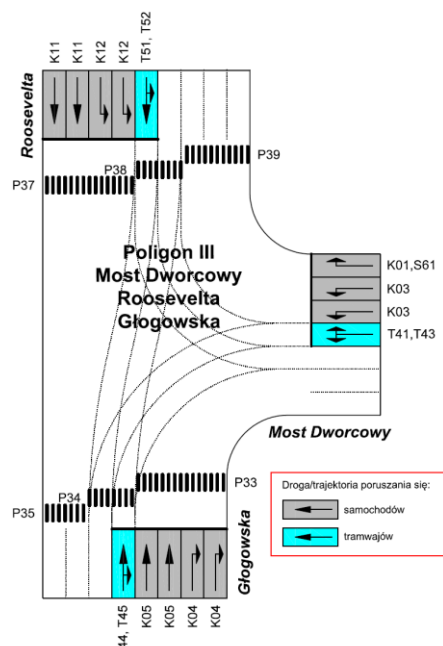
Zgromadzony materiał wykorzystano w kolejnych etapach metodyki do prac poświęconych projektowi programu sygnalizacji świetlnej oraz jego dokładnej parametryzacji, szczególnie pod kątem priorytetyzacji pojazdów PTZ.

4.4.2. Definiowanie parametrów programu sygnalizacji świetlnej dla PDIII (E2)

Sterowanie ruchem pojazdów oraz pieszych odbywa się za pośrednictwem 19 grup sygnalizacyjnych. Za ruch samochodów odpowiada zestaw sześciu grup kołowych (trzech ogólnych i trzech kierunkowych) oraz jedna grupa warunkowego skrętu w prawo. Przejazd tramwajów regulowany jest działaniem 6 grup tramwajowych, natomiast za bezpieczeństwo niezmotoryzowanych uczestników ruchu odpowiada 6 grup pieszych. Schemat układu skrzyżowania wraz z naniesionymi nazwami grup sygnalizacyjnych zamieszczono na Rys. 69.

Grupa ogólna K01 wraz z sygnałem warunkowego skrętu S61 odpowiadają za ruch pojazdów w prawo z wlotu ul. Most Dworcowy. Bezkolizyjna relacja w lewo, prowadząca pojazdy z Mostu Dworcowego w kierunku ul. Głogowskiej sterowana jest grupą K03. Za ruch tramwajów odpowiadają grupy T41 (relacja w prawo) i T43 (relacja w lewo). Na wlocie południowym grupa kierunkowa K04 obsługuje ruch pojazdów podążających w prawo, natomiast grupa ogólna K05 przyporządkowana jest do relacji na wprost. Do kontroli ruchu tramwajów na wlocie południowym przyporządkowano grupy T44 (relacja w prawo) i T45 (relacja na wprost). Piesi pokonują przekrój jezdni za pośrednictwem działania grup P33, P34 i P35.

Ruch pojazdów na ostatnim, północnym wlocie sterowany jest grupą ogólną K11 i kierunkową K12. Pierwsza odpowiada za przejazd na wprost, natomiast druga za relację skrętną w lewo w kierunku ul. Most Dworcowy. Tramwaje sterowane grupą T51 poruszają się na wprost z wlotu północnego w kierunku południowym, natomiast te objęte działaniem grupy



Rys. 69. Schemat skrzyżowania – PDIII. Źródło: Opr. własne

T52 skręcają w kierunku ul. Most Dworcowy. Przejścia dla pieszych zlokalizowane na wlocie północnym obsługują grupy P37, P38 i P39.

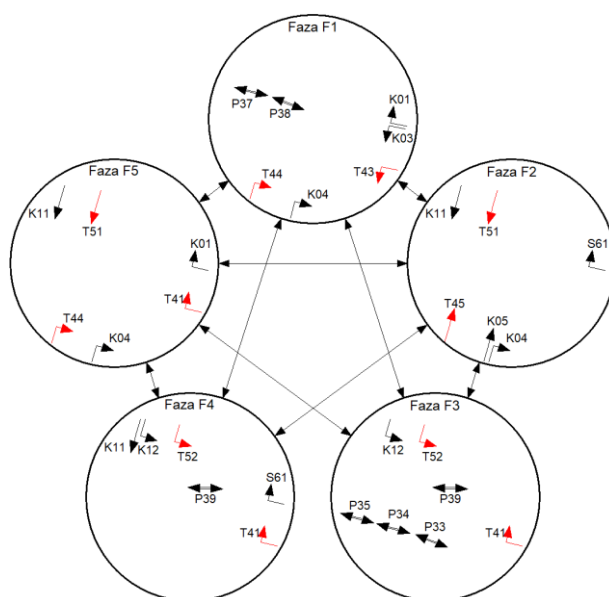
Wszystkim grupom sygnalizacyjnym przyporządkowano trajektorie ruchu i wyznaczono zbiór punktów kolizyjnych. Następnie, dla każdej relacji kolizyjnej wykonano obliczenia czasów międzyzielonych. Analogicznie do poprzednich poligonów, obliczenia wykonano dwukrotnie uwzględniając kolejno wytyczne z Rozporządzenia o sygnałach drogowych [135] oraz miejscowe uwarunkowania. Przyjęte dane wejściowe do obliczeń zaprezentowano w Tab. 40 oraz w *Załączniku nr 21*.

Tab. 40. Prędkości przyjęte do obliczeń czasów międzyziel. – PDIII. Źródło: Opr. własne na bazie [135]

Rodzaj strumienia ruchu	Długość pojazdu l_p [m]	Kierunek poruszania się	Obliczenia uwzględniające			
			wytyczne rozporządzenia		warunki miejscowe	
			Prędkość dojazdu V_d [km/h]	Prędkość ewakuacji V_e [km/h]	Prędkość dojazdu V_d [km/h]	Prędkość ewakuacji V_e [km/h]
Pojazdy	10	Prosto	60	50	60	50
		Lewo	60	50	50	40
		Prawo	60	50	40	30
Tramwaje	27	Prosto	36	36	30	30
		Prawo	36	36	30	30
		Lewo	36	36	30	30
Piesi	0	-	1,4			

Sterowanie na skrzyżowaniu zaprojektowano bazując na zestawie pięciu faz ruchu: F1, F2, F3, F4, F5. Układ grup w każdej fazie przyjęto w taki sposób, aby w ramach działania każdej z nich obsługiwane były różne niekolizyjne względem siebie kombinacje relacji tramwajowych (patrz Rys. 70). Diagramy zaprojektowanych przejść międzyfazowych

zawarto w *Załączniku nr 22*.



Rys. 70. Sekwencja faz sygnalizacji – PDIII. Źródło: Opr. własne

W ramach działania fazy F1 dozwolony jest ruch tramwajów sterowanych grupami T43 i T44. Poruszają się one w relacji skrajnej między wlotami południowym i wschodnim. W czasie trwania tej fazy obsługiwane są również pojazdy sterowane grupami kołowymi K01, K03 (cały wlot wschodni) oraz K04 (relacja w prawo na wlocie południowym). Ponadto, dozwolony jest ruch pieszych na dwóch przejściach zlokalizowanych na północnym wlocie, na którym funkcjonuje przystanek tramwajowy. Zatem faza F1 zapewnia pieszym możliwość dojścia do/z przystanku oraz umożliwia im ewentualną przesiadkę.

Faza F2 odpowiada za ruch pojazdów z grup kołowych (grupy K05 i K11) oraz tramwajów (T45 i T51) w relacji na wprost wzdłuż ulic Roosevelta i Głogowskiej. Ponadto, w ramach działania fazy dozwolony jest skręt w prawo z wlotu południowego (grupa K04) oraz warunkowo z wlotu wschodniego (grupa S61).

W czasie trwania fazy F3 dopuszczony jest ruch tramwajów w relacjach skrajnych pomiędzy wlotami wschodnim i północnym (grupy T41 i T52). Faza ta pozwala również na przejazd samochodów jadących w lewo, z wlotu północnego (grupa K12), oraz warunkowo w prawo z wlotu wschodniego (grupa S61). Piesi natomiast mogą pokonać jezdnię wylotową wlotu północnego (grupa P39) i cały południowy wlot skrzyżowania (grupy P33, P34, P35).

Faza F4 jest fazą alternatywną dla fazy F3. Obsługuje te same relacje tramwajowe. Różnica polega na pominięciu obsługi przejść dla pieszych na południowym wlocie. Zamiast nich dopuszczony zostaje ruch pojazdów jadących na wprost z wlotu północnego (grupa K11).

Ostatnia faza F5 pozwala na równoczesny przejazd tramwajów i innych pojazdów w trzech niezależnych kierunkach: w prawo z wlotu wschodniego (grupy K01 i T41) i południowego (grupy K04 i T44) oraz na wprost z wlotu północnego (grupy K11 i T51).

W przypadku braku jakichkolwiek zgłoszeń do systemu detekcji realizowana jest standardowa sekwencja F1-F2-F3. Jednak poprzez zastosowanie wielu możliwych przejść między fazami docelowy sposób sterowania pozwala na elastyczne tworzenie dowolnych sekwencji w każdym kolejnym cyklu.

Warto zauważyć, że w trakcie realizacji wszystkich faz dopuszczony jest ruch pojazdów na najbardziej obciążonej relacji tj. skręcie w prawo z wlotu wschodniego. W fazach F2, F3 i F4 odbywa się to jednak warunkowo za pośrednictwem grupy S61. Dodatkowego wyjaśnienia wymaga jednak zestawienie grup sygnalizacyjnych w fazie F2. Zgodnie z zapisami Rozporządzenia Ministra Infrastruktury [135] do grupy par strumieni kolizyjnych o niedopuszczalnym jednoczesnym zezwoleniu na ruch zalicza się m.in. dowolny strumień pojazdów sterowany sygnałem ogólnym i kolidujący strumień pojazdów z wlotu innego niż przeciwny. Na analizowanym skrzyżowaniu sygnał warunkowego skreću załączany jest razem z sygnałem z grupy ogólnej K05 na wlocie prostopadłym. Zatem zestawienie takich grup nie spełnia warunku z Rozporządzenia. Niemniej taka praktyka jest dość powszechna na polskich drogach i jej zasadność stanowi temat prowadzonych od lat dyskusji i analiz (np. [93, 81]). Na przedmiotowym skrzyżowaniu na jezdni wylotowej ul. Roosevelta funkcjonuje dedykowany dla skręcających w prawo z wlotu wschodniego pas rozbiegowy, który ogranicza ryzyko wystąpienia kolizji między pojazdami. Mając na uwadze, że problematyka tego aspektu sterowania nie stanowi tematu badań oraz, że taki sposób sterowania został zaobserwowany w trakcie pomiarów i jest on zgodny z zatwierdzonym projektem funkcjonującej organizacji ruchu [20], w analizowanych strategiach sterowania dopuszczono możliwość występowania takiej jak w fazie F2 konfiguracji sygnałów.

Wszystkie rozpatrywane strategie sterowania akomodacyjnego bazują na jednakowych parametrach czasowych faz, zestawionych w Tab. 41. Każda faza ma określony minimalny czas trwania T_{min} oraz możliwość wydłużenia do wartości maksymalnej T_{max} zależnie od zgłoszeń z systemu detekcji. Gdy zgłoszenia wydłużające pochodzą od tramwajów, wyjątkowo daną fazę można wydłużyć o dodatkowe 10 sekund (T_{max2}).

Do wykrywania poszczególnych uczestników ruchu zaprojektowano system detekcji, obejmujący 57 detektorów. Do obsługi pojazdów z grup kołowych zastosowano 33 detektory rozmieszczone zgodnie z przyjętym już na PDI i PDII schematem trójelementowej konfiguracji na każdym z pasów ruchu. W odróżnieniu od poprzednich poligonów, system wzbogacono o dedykowaną detekcję pieszych, do której wykorzystano 12 detektorów (po dwa na każdym z 6 przejść dla pieszych).

Tab. 41. Charakterystyki czasowe faz sygnal. dla programów akomodacyjnych – PDIII. Źródło: Opr. własne

Faza	Minimalny czas trwania fazy	Maksymalny czas trwania fazy	
	T_{min} [s]	T_{max} [s]	T_{max2} [s]
F1	10	43	53
F2	5	18	28
F3	12	20	30
F4	8	23	33
F5	5	28	38

Detekcja tramwajowa obejmuje łącznie 12 punktów meldunkowych, po dwa dla każdej z sześciu funkcjonujących relacji. Punkty meldunku na wlocie południowym i wschodnim zlokalizowano w odległości około 130 m od linii zatrzymania, natomiast na wlocie północnym został on umieszczony bezpośrednio w strefie przystanku. Wzbudzenie tego ostatniego jest inicjowane po zakończeniu wymiany pasażerskiej. Punkty wymeldowania zgodnie z dotychczasową praktyką znajdują się w niewielkiej odległości za linią zatrzymania.

Zestawienie detektorów, opis ich funkcjonalności oraz klasyfikacje względem grup sygnalizacyjnych zamieszczono w *Załączniku nr 23*. Ich dokładne rozmieszczenie na tarczy skrzyżowania ukazano na planie sytuacyjnym (*Załącznik nr 19*).

4.4.3. Definiowanie algorytmu i strategii sterowania dla PDIII (E3)

W następstwie zaprojektowania podstawowych elementów programu i systemu detekcji przystąpiono do projektowania algorytmu sterowania akomodacyjnego. Podobnie jak we wcześniej analizowanych przypadkach, do oznaczenia parametrów zmiennych i procedur zastosowano oznaczenia z Tab. 29. Najpierw algorytm dostosowano do spełnienia założeń w zakresie priorytetyzacji PTZ opisanych w podrozdziale 3.2. W kontraście do PDI i PDII, na przedmiotowym skrzyżowaniu funkcjonuje kilka kolizyjnych względem siebie relacji tramwajowych, stąd problematyka priorytetyzacji uległa rozszerzeniu o aspekt tego, w jakiej kolejności powinny być obsługiwane jednocześnie zgłoszenia priorytetowe do różnych faz.

W przypadku PDI i PDII w strukturze programu przewidziano odrębne fazy przeznaczone do obsługi zgłoszeń priorytetowych. W PDIII, ze względu na dużą częstotliwość zgłoszeń tramwajów poruszających się po wzajemnie kolizyjnych relacjach oraz wysokie natężenie ruchu kołowego, przyjęto odmienny sposób organizacji faz. Fazy F1–F4 mogą być wywoływane zarówno w ramach standardowej obsługi ruchu, jak i w następstwie zgłoszeń priorytetowych od tramwajów. Wyjątek stanowi faza F5, wywoływana wyłącznie na skutek zgłoszeń priorytetowych, której głównym zadaniem jest jednoczesna obsługa trzech relacji tramwajowych. Wywołanie fazy w ramach standardowej obsługi następuje na podstawie zgłoszeń od grup kołowych lub pieszych albo zgodnie z podstawową kolejnością faz w cyklu. Wywołanie priorytetowe następuje natomiast w odpowiedzi na zgłoszenie tramwaju.

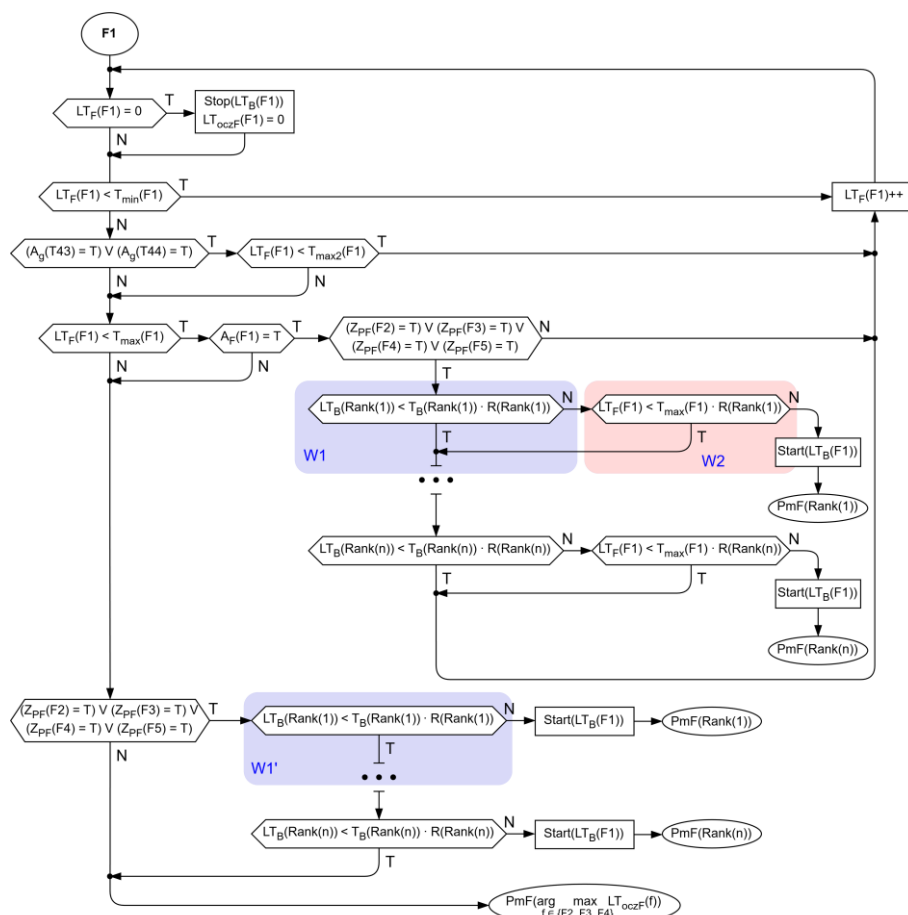
Warunki realizacji priorytetu również zostały rozbudowane. Najistotniejszą zmianą jest wprowadzenie rankingu współczynników $R_f(t)$, który decyduje o kolejności obsługi zgłoszeń priorytetowych, tj. kolejności realizacji faz. Im niższa wartość współczynnika $R_f(t)$ dla danej fazy, tym wyższa jest jej pozycja w rankingu.

Wzorem zastosowanych w poprzednich poligonach rozwiązań, wprowadzono mechanizm czasowej blokady priorytetu, przy czym każdej fazie przyporządkowano indywidualny licznik czasu blokady oraz maksymalny czas jej trwania (domyślnie: $T_B = 120$ s). Czas trwania każdej blokady może zostać skrócony proporcjonalnie do wartości współczynnika $R_f(t)$ przypisanego do danej fazy.

W toku prowadzonych prac przyjęto, że podczas realizacji programu sygnalizacji powinny zostać uwzględnione następujące zasady:

- Faza F1 rozpoczyna realizację programu akomodacyjnego.
- Standardowa kolejność faz w pojedynczym cyklu, nieuwzględniająca zapotrzebowania na obsługę zgłoszeń priorytetowych od tramwajów to F1-F2-F3 (lub F4). W przypadku zaburzenia tej sekwencji na skutek obsługi zgłoszeń priorytetowych, następna w kolejności realizowana jest faza o najdłuższym czasie oczekiwania (faza o najwyższej wartości parametru LT_{oczF}).
- Wszystkie fazy sygnalizacyjne załączane są co najmniej na czas minimalny T_{min} . Ich działanie może zostać wydłużone na podstawie zgłoszeń z grup kołowych do czasu T_{max} . W przypadku wykrycia zgłoszeń wydłużających pochodzących z grup PTZ, możliwe jest dalsze przedłużenie do osiągnięcia czasu T_{max2} .
- Zakończenie priorytetowej obsługi danej fazy w czasie pomiędzy T_{min} a T_{max2} , tj. gdy $T_{min} < LT_F < T_{max2}$, może nastąpić wyłącznie na skutek ustania zgłoszeń wydłużających od tramwajów.

- Zakończenie działania fazy w przedziale czasu pomiędzy $T_{\min}$ a $T_{\max}$, tj. gdy $T_{\min} < LT_F < T_{\max}$, może nastąpić z powodu ustania zgłoszeń wydłużających lub pojawienia się zgłoszeń priorytetowych do innych faz (przykład dla fazy F1 na Rys. 71). Gdy aktywne są zgłoszenia wydłużające z grup kołowych ($A_F(F1) \rightarrow T$), przejście do priorytetowej realizacji fazy znajdującej się na pierwszym miejscu rankingu $Rank(1)$ może nastąpić dopiero po pozytywnej weryfikacji dwóch warunków:
- czy licznik czasu blokady zgłoszonej fazy LT_B przekroczył wartość iloczynu maksymalnego czasu blokady T_B i współczynnika priorytetowego $R_f(t)$ – **warunek W1**;
 - czy licznik czasu aktualnej fazy LT_F przekroczył wartość iloczynu maksymalnego czasu trwania $T_{\max}$ i współczynnika priorytetowego $R_f(t)$ – **warunek W2**.



Rys. 71. Warunkowa realizacja priorytetu w czasie trwania fazy F1 – PDIII. Źródło: Opr. własne

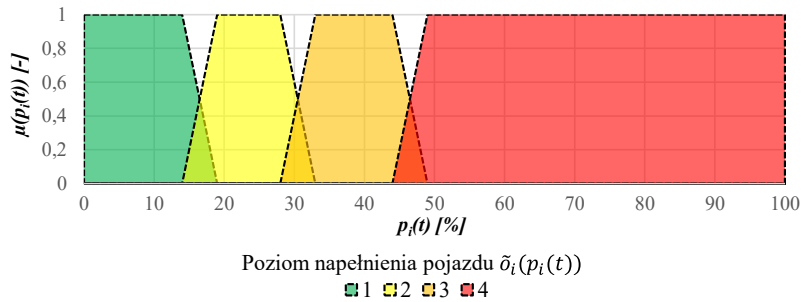
- W przypadku niespełnienia któregoś z powyższych warunków, weryfikacja jest kontynuowana dla fazy znajdującej się na kolejnym miejscu rankingu $Rank(2), \dots, Rank(n)$.
- Po osiągnięciu przez aktualną fazę czasu maksymalnego, tj. gdy $(LT_F = T_{\max}) \vee (LT_F = T_{\max 2})$, albo w przypadku braku zgłoszeń wydłużających, sprawdzana jest obecność zgłoszeń priorytetowych do innych faz. Jeśli takie zgłoszenia występują, przejście do fazy znajdującej się na pierwszym miejscu rankingu może nastąpić, gdy licznik czasu blokady zgłoszonej fazy LT_B przekroczył wartość iloczynu

maksymalnego czasu blokady T_B i współczynnika priorytetowego $R_f(t)$ – **warunek W1'**. W przypadku niespełnienia warunku dla fazy o najwyższym priorytecie, procedura jest kontynuowana dla kolejnych faz w rankingu. Jeżeli żadna z faz nie spełnia warunku przejścia, realizowane jest przejście do fazy o najdłuższym czasie oczekiwania na obsługę.

- Załączenie dowolnej fazy powoduje wyzerowanie jej indywidualnego licznika blokady priorytetu oraz wstrzymanie jego dalszego naliczania czasu, do momentu zainicjowania przejścia do kolejnej fazy. Dla wszystkich faz przyjęto jednakowy maksymalny czas blokady, wynoszący 120 sekund.

Analogicznie jak w przypadku pozostałych poligonów, po potwierdzeniu poprawności działania programu sygnalizacyjnego opartego na przyjętym algorytmie, przystąpiono do jego parametryzacji. Proces ten przeprowadzono zgodnie z założeniami metodycznymi opisanymi w podrozdziale 3.2.

Wzorem działań podjętych w przypadku PDII, wartości graniczne poziomów napełnienia pojazdów PTZ ustalono na podstawie rzeczywistych danych dostarczonych przez Poznański ZTM (por. Rys. 66). Procedura klasyfikacji i -tego pojazdu PTZ do jednego z czterech poziomów napełnienia (patrz Rys. 72) odbywa się zgodnie z zależnością (28).



Rys. 72. Klasyfikacja pojazdów PTZ do poziomów napełnienia – PDIII. Źródło: Opr. własne

Klasyfikacja pojazdów PTZ do pięciu poziomów odchylenia od harmonogramu została przeprowadzona tak samo jak dla PDI i PDII, stosując identyczne zasady oraz zależność (18).

Stosując metodę generowania kombinacji wartości parametrów $o1-o4$ (por. podrozdział 4.1.4, Rys. 27) uzyskano zestaw 70 wariantów nastaw współczynników, które następnie umieszczono w macierzach $O_{N \times K}$ (7) i $S_{M \times L}$ (10). Fragmentaryczne zestawienie elementów tych macierzy przedstawiono w postaci zależności (29). Do analiz przyjęto dwa warianty współczynnika $r_{v_i}(t)$ (12), wynikające z zastosowania dwóch następujących konfiguracji współczynników wagowych α i β : 1) $\alpha = \beta = 1$; 2) $\alpha = 3, \beta = 2$.

Wszystkim fazom przyporządkowano taką samą wartość czasu blokady realizacji priorytetu równą 120 sekund. Ostatecznie, w ramach proponowanej strategii sterowania przygotowano 140 wariantów, którym, zgodnie z przyjętą wcześniej nomenklaturą nadano oznaczenia $A_1^1, \dots, A_{140}^1$.

Na potrzeby analizy porównawczej przygotowano jeszcze pięć alternatywnych strategii sterowania, pełniących funkcję punktu odniesienia dla oceny efektywności strategii autorskiej. Udostępniony na potrzeby badań zatwierdzony projekt organizacji ruchu zawierał jedynie częściowy opis logiki sterowania sygnalizacją, niewystarczający do jednoznacznego odtworzenia aktualnie funkcjonującego programu. Z tego względu żadnej z analizowanych strategii nie traktowano jako jego wiernego odwzorowania, choć największe podobieństwo wykazywały warianty strategii czwartej. Zgodnie z informacją

uzyskaną od zarządcy drogi, bardziej szczegółowa dokumentacja dotycząca sposobu działania programu nie była dostępna. Niemniej, w przypadku pozyskania w przyszłości dodatkowych informacji możliwe byłoby uzupełnienie zbioru analiz o wiernie odwzorowany wariant i przeprowadzenie dla niego dodatkowych eksperymentów symulacyjnych.

$$\delta_i(p_i(t)) = \begin{cases} 1 & \text{gdy} & (p_i(t) \leq 14\%) \vee \\ & & \vee \left((14\% < p_i(t) < 19\%) \wedge \left(Rnd_i(t) \leq \frac{19\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \\ 2 & \text{gdy} & (19\% \leq p_i(t) \leq 28\%) \vee \\ & & \vee \left((14\% < p_i(t) < 19\%) \wedge \left(Rnd_i(t) > \frac{19\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \vee \\ & & \vee \left((28\% < p_i(t) < 33\%) \wedge \left(Rnd_i(t) \leq \frac{33\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \\ 3 & \text{gdy} & (33\% \leq p_i(t) \leq 44\%) \vee \\ & & \vee \left((28\% < p_i(t) < 33\%) \wedge \left(Rnd_i(t) > \frac{33\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \vee \\ & & \vee \left((44\% < p_i(t) < 49\%) \wedge \left(Rnd_i(t) \leq \frac{49\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \\ 4 & \text{gdy} & (p_i(t) \geq 49\%) \vee \\ & & \vee \left((44\% < p_i(t) < 49\%) \wedge \left(Rnd_i(t) > \frac{49\% - p_i(t)}{5\%} \right) \right) \end{cases} \quad (28)$$

Charakterystyka pierwszej rozważanej alternatywnej strategii odpowiada założeniom zastosowanym w przypadku wcześniejszych dwóch poligonów doświadczalnych. Modyfikacja polega na całkowitym pominięciu parametru napełnienia pojazdu podczas oceny zgłaszającego się i -tego pojazdu PTZ. W związku z tym, korekcie poddano równanie (12) definiujące wartość współczynnika $r_{v_i}(t)$. Jego zmodyfikowana postać została wcześniej zaprezentowana w równaniu (21) w podrozdziale 4.2.3, dotyczącym analiz dla PDI. Pozostałe parametry i założenia logiki sterowania pozostały bez zmian. Wyznaczono 70 wariantów sterowania, którym przypisano oznaczenia $A_1^2, \dots, A_{70}^2$.

$$O = \begin{bmatrix} 1 & 0,90 & 0,80 & 0,70 \\ 1 & 0,90 & 0,80 & 0,60 \\ 1 & 0,90 & 0,80 & 0,50 \\ 1 & 0,90 & 0,80 & 0,40 \\ 1 & 0,90 & 0,80 & 0,30 \\ 1 & 0,90 & 0,70 & 0,60 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0,70 & 0,50 & 0,40 & 0,30 \\ 0,60 & 0,50 & 0,40 & 0,30 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0,90 & 0,80 & 0,70 \\ 1 & 1 & 0,90 & 0,80 & 0,60 \\ 1 & 1 & 0,90 & 0,80 & 0,50 \\ 1 & 1 & 0,90 & 0,80 & 0,40 \\ 1 & 1 & 0,90 & 0,80 & 0,30 \\ 1 & 1 & 0,90 & 0,70 & 0,60 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0,70 & 0,50 & 0,40 & 0,30 \\ 1 & 0,60 & 0,50 & 0,40 & 0,30 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Założenia kolejnej strategii porównawczej również opierają się na modyfikacji współczynnika $r_{v_i}(t)$. Tym razem jego wartość całkowicie uniezależniono od parametrów dotyczących napełnienia pojazdu $r_{o_i}(t)$ oraz jego odchylenia od harmonogramu $r_{s_i}(t)$. Uwzględniono natomiast czas oczekiwania $w_i(t)$ i wartość stałego współczynnika skalującego r_x . W konsekwencji wartość współczynnika $r_{v_i}(t)$ definiowana jest w ramach tej strategii zgodnie z zależnością (22) zaprezentowaną wcześniej w ramach analiz dla PDI. Do dalszych analiz przygotowano osiem wariantów tej strategii $A_1^3, \dots, A_8^3$. Każdy z nich charakteryzuje

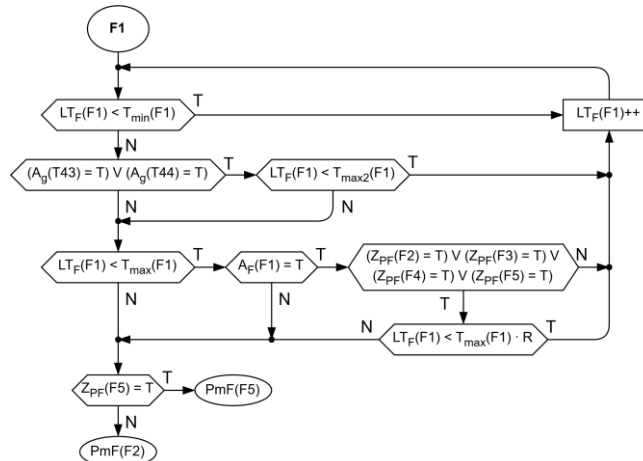
się przyjęciem innej wartości współczynnika $r_x = \{1; 0,9; 0,8; \dots; 0,3\}$.

W następnej strategii sterowania realizowany jest program akomodacyjny oparty na podstawowej, stałej sekwencji faz F1–F2–F3 (lub F4). W przypadku jednoczesnej detekcji zgłoszeń z grup T41, T44 oraz T51 dopuszcza się warunkowe załączenie dodatkowej fazy F5, wstawianej pomiędzy fazami standardowej sekwencji bez naruszania ich kolejności (np. F1–F5–F2–F3 lub F4).

Każda wywołana faza musi być aktywna przez nie krótszy niż ustalony czas minimalny $T_{\min}$. Czas jej trwania może zostać wydłużony na podstawie sygnałów z systemu detekcji, jednak nie więcej niż do osiągnięcia czasu maksymalnego $T_{\max}$, bądź $T_{\max 2}$ w przypadku zgłoszeń wydłużających od pojazdów PTZ.

Głównym założeniem tej strategii w kontekście uprzywilejowania pojazdów PTZ jest zapewnienie im jednakowego, bezwarunkowego i statycznego priorytetu. Każde takie zgłoszenie traktowane jest przez sterownik równorzędnie, niezależnie od wartości parametrów zgłaszającego się tramwaju. Zastosowany mechanizm uprzywilejowania, oparto wyłącznie na skracaniu maksymalnego czasu trwania faz poprzedzających fazę, do której przypisano zgłoszenie priorytetowe. Zakres skrócenia jest proporcjonalny do stałej wartości współczynnika skalującego r_x (por. Rys. 73, gdzie $R = r_x$). Dodatkowo przyjęto, że skróceniu mogą podlegać jedynie te fazy, do których nie odnotowano zgłoszeń wydłużających od pojazdów PTZ. Do analiz przygotowano łącznie osiem wariantów tej strategii $A_1^4, \dots, A_8^4$, wynikających z przyjęcia różnych wartości współczynnika $r_x = \{1; 0,9; 0,8; \dots; 0,3\}$.

Przedostatnia z omawianych strategii sterowania opiera się na programie akomodacyjnym, realizowanym w sposób cykliczny z wykorzystaniem stałej sekwencji faz F1–F2–F3 (lub F4). Każda faza funkcjonuje w zakresie czasowym od $T_{\min}$ do $T_{\max}$. W przypadku braku zgłoszeń z systemu detekcji dopuszcza się pominięcie danej fazy w bieżącym cyklu. Strategia ta nie przewiduje żadnych mechanizmów uprzywilejowania dla pojazdów PTZ, a zgłoszenia generowane przez tramwaje traktowane są przez sterownik identycznie jak te pochodzące od pozostałych uczestników ruchu.



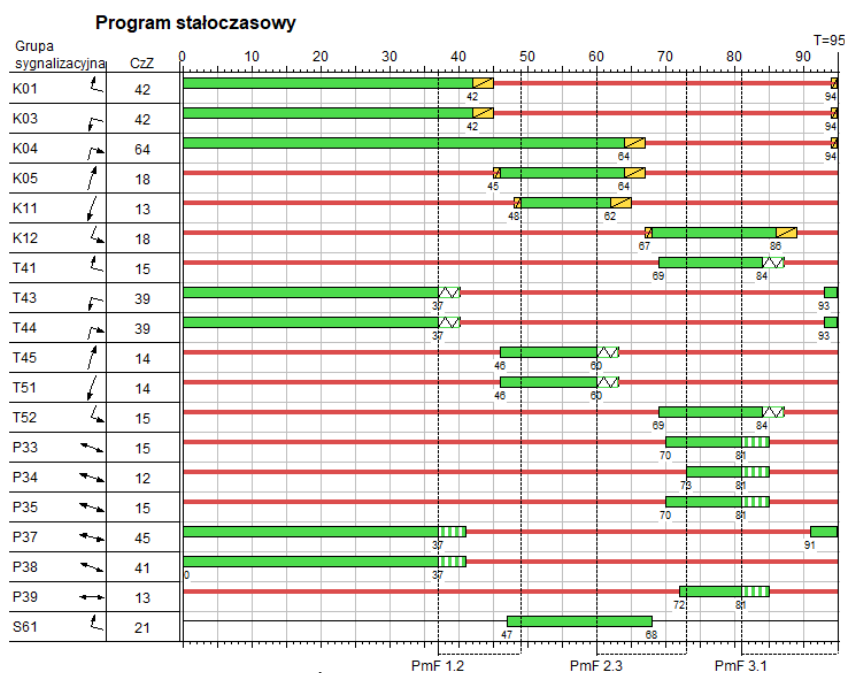
Rys. 73. Schemat blokowy fazy F1 w czwartej strategii sterowania – PDIII. Źródło: Opr. własne

Każda z faz jest załączana na czas nie krótszy niż ustalony czas minimalny $T_{\min}$, natomiast jej ewentualne wydłużenie, zależne od obecności zgłoszeń wydłużających, możliwe jest maksymalnie do osiągnięcia wartości czasu maksymalnego $T_{\max}$. W ramach tej strategii przygotowano jeden wariant, któremu nadano oznaczenie A_1^5 .

Ostatnia strategia, reprezentowana przez jedyny wariant A_1^6 , zakłada wykorzystanie

do sterowania ruchem programu stałoczasowego. W ramach jej działania sterownik w każdym cyklu realizuje stałą sekwencję faz F1-F2-F3 (patrz Rys. 74).

Wszystkie przedstawione strategie sterowania wykorzystano w kolejnych etapach badań. W Tab. 42 zebrano ich najważniejsze cechy. Jak miało to miejsce w przypadku poprzednich poligonów, zakończeniem tego etapu prac, było wygenerowanie zestawu wirtualnych sterowników, co umożliwiło przystąpienie do realizacji prac poświęconych modelowaniu symulacyjnemu.



Rys. 74. Program stałoczasowy – PDIII. Źródło: Opr. własne

Tab. 42. Charakterystyka rozpatrywanych strategii sterowania – PDIII. Źródło: Opr. własne

Nr strategii sterowania s	Łączna liczba wariantów w	Rodzaj programu		Realizacja priorytetu			Typ priorytetu		Parametry dynamiki priorytetu		
		Stałoczasowy	Zmiennoczasowy	Warunkowa	Bezwarunkowa	Brak	Dynamiczny	Statyczny	Czas oczekiwania na obsługę	Napełnienie pojazdu	Odczylenie od harmonogramu
1	140	-	X	X	-	-	X	-	X	X	X
2	70	-	X	X	-	-	X	-	X	-	X
3	8	-	X	X	-	-	X	-	X	-	-
4	8	-	X	-	X	-	-	X	-	-	-
5	1	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-
6	1	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-

4.4.4. Budowa środowiska testowego dla PDIII (E4)

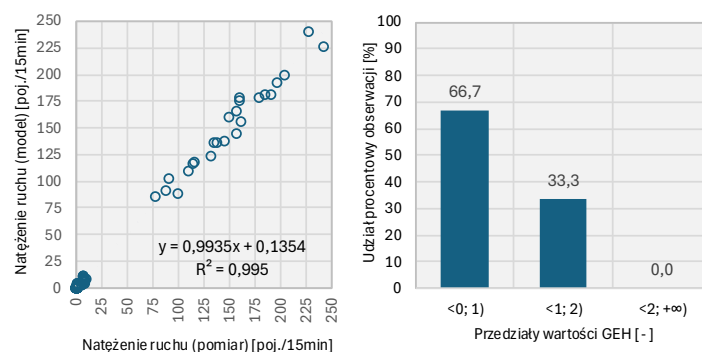
Budowę i weryfikację modelu mikrosymulacyjnego dla PDIII zrealizowano według procedury przedstawionej w podrozdziale 4.1.6. Za podstawę odwzorowania geometrii układu drogowego oraz organizacji ruchu przyjęto plan sytuacyjny zamieszczony w *Załączniku nr 19*. Zebrane na podstawie analizy wideo wyniki pomiarów wykorzystano jako dane referencyjne dotyczące wielkości i struktury ruchu. Ze względu na złożoność analizowanego układu podczas budowy modelu szczególną uwagę zwrócono na odwzorowanie ruchu tramwajowego na poszczególnych relacjach oraz obsługę jednocześnie występujących zgłoszeń pojazdów PTZ.

Poprawność odwzorowania geometrii oraz zachowania poszczególnych grup uczestników ruchu oceniano jakościowo podczas przebiegów testowych. W końcowych przebiegach, poprzedzonych serią drobnych modyfikacji, nie stwierdzono nienaturalnych manewrów, nieuzasadnionych zatrzymań, kolizji ani przypadków braku możliwości kontynuowania przejazdu po przypisanej trasie. Ustawienie wartości parametru *waiting time before diffusion* na 180 s spowodowało zniwelowanie pojedynczych przypadków usuwania pojazdów wskutek przekroczenia czasu oczekiwania na zmianę pasa ruchu.

Stopień zgodności natężeń generowanych w modelu z wynikami pomiarów oceniono z wykorzystaniem współczynnika determinacji R^2 oraz wskaźnika GEH. Wyniki przedstawione na Rys. 75 wskazują na bardzo dobre dopasowanie modelu. Współczynnik determinacji wyznaczony dla całego zbioru natężeń w interwałach 15-minutowych wyniósł 0,995. Spośród wartości wskaźnika GEH wyznaczonych dla natężeń godzinowych 66,7 % mieściło się w przedziale od 0 do 1, a pozostałe 33,3 % w przedziale od 1 do 2. Żadna z zaobserwowanych wartości nie przekroczyła zatem 2, co oznacza spełnienie przyjętego kryterium podstawowego oraz uzyskanie poziomu zgodności zalecanego dla kluczowych relacji ruchu.

Referencyjne wartości natężenia nasycenia wyznaczono na podstawie nagrań terenowych, odrębnie dla kontrolowanych relacji ruchu. Otrzymane wyniki były zbliżone do wartości ustalonych dla odpowiadających im relacji w PDII. Przykładowo średnie natężenie nasycenia dla relacji na wprost wynosiło około 1950 poj./h.

Ze względu na tę zbieżność punktem wyjścia do kalibracji były ustawienia zastosowane w PDII. Po przeprowadzeniu serii testów najlepsze dopasowanie do referencyjnych wartości natężenia uzyskano przy zastosowaniu w krótkich obszarach RSA równomiernego rozkładu prędkości pożądaney w przedziale 32–37 km/h. Pozwoliło to pozostawić standardowe wartości parametrów modelu *Wiedemanna-74* bez zmian. W pięciu kolejnych przebiegach testowych wartość bezwzględna różnicy względnej nie przekroczyła 5% dla żadnej z kontrolowanych relacji. Uzyskany wynik potwierdził prawidłowe odwzorowanie sposobu rozdawiania kolejek.



Rys. 75. Porównanie zmierzonych i uzyskanych w modelu natężeń ruchu oraz rozkład wartości wskaźnika GEH – PDIII. Źródło: Opr. własne

Każdą przyjętą do analiz strategię sterowania poddano testom scenariuszowym, a po jej połączeniu z modelem Vissim również testom integracyjnym. Zakres kontroli obejmował funkcjonowanie systemu detekcji i wirtualnych sterowników, wymianę danych pomiędzy środowiskami Vissim i LISA+, a także obsługę ruchu pieszego oraz pojazdów PTZ. Ze względu na układ torowisk osobno przeanalizowano sytuacje, w których zgłoszenia tramwajów poruszających się po relacjach kolizyjnych i niekolizyjnych występowały jednocześnie albo w niewielkich odstępach czasu. Kontroli poddano ich rejestrowanie i wartościowanie, ustalanie kolejności obsługi, przypisywanie do właściwych faz oraz kasowanie po przejeździe pojazdu. Potwierdzono również, że obsługa jednego tramwaju nie powodowała utraty pozostałych zgłoszeń.

Przeprowadzone testy pozwoliły wykryć i usunąć drobne błędy implementacyjne i konfiguracyjne, dotyczące m.in. zapisu warunków logicznych, odwołań do zmiennych oraz wartości wybranych parametrów sterowania. Po wprowadzeniu odpowiednich korekt testy końcowe nie wykazały dalszych nieprawidłowości ani naruszeń przyjętych warunków kontrolnych. Potwierdzono prawidłowe działanie modelu, systemu detekcji i wszystkich wirtualnych sterowników, a także kompletność i powtarzalność generowanych wyników dla jednakowych warunków początkowych i tej samej wartości ziarna losowego. Na tej podstawie środowisko testowe PDIII wraz z zaimplementowanymi strategiami sterowania dopuszczono do właściwych eksperymentów symulacyjnych realizowanych w etapie E5.

4.4.5. Prowadzenie symulacji dla PDIII (E5)

Po pomyślnym zakończeniu serii symulacji testowych zaczęto realizować etap właściwych eksperymentów zgodnie z założeniami opisanymi w 4.1.7. W ramach przygotowań do tego etapu opracowano kompletny plan eksperymentów, obejmujący wszystkie 228 wariantów sterowania. Standardowo, dla każdego z nich przewidziano konieczność wykonania pięciu niezależnych przebiegów, co ostatecznie przełożyło się na 1140 eksperymentów symulacyjnych. Niezależnie od głównego planu symulacji, z wykorzystaniem tego samego modelu przeprowadzono również serię obliczeń uzupełniających, których wyniki posłużyły, jak w przypadku innych modeli, do opracowania modelu regresji emisji dwutlenku węgla CO₂ (patrz podrozdział 4.1.5). Przykładowy widok modelu w trakcie realizacji jednego z eksperymentów przedstawiono na Rys. 76.



Rys. 76. Model w czasie symulacji – PDIII. Źródło: Opr. własne

Otrzymane w rezultacie symulacji wyniki przetworzono, uzyskując spójny zestaw danych dla każdego analizowanego wariantu sterowania. Szczegółowe zestawienie wyników przedstawiono w tabeli w *Załączniku nr 24*.

W ostatnim etapie prac przystąpiono do analizy wielokryterialnej (według procedury z podrozdziału 4.1.3), mającej na celu wskazanie najlepszego, rekomendowanego rozwiązania.

4.4.6. Selekcja rozwiązań niezdominowanych dla PDIII (E6)

Najpierw, niezależnie dla każdej strategii sterowania, dokonano selekcji wariantów niezdominowanych. Dzięki temu całkowitą liczbę analizowanych wariantów zredukowano ponad czterokrotnie (z 228 do 53). Zestawienie wybranych do dalszych prac wariantów umieszczono w Tab. 43; pogrubieniem i podkreśleniem wyróżniono warianty najlepsze w ramach poszczególnych strategii, natomiast najlepsze wyniki dla każdego kryterium oznaczono zielonym tłem.

Analiza wyników przedstawionych w Tab. 43 wskazuje na wyraźną sprzeczność pomiędzy poprawą warunków przejazdu pojazdów PTZ a ograniczaniem strat czasu ponoszonych przez pozostałych uczestników ruchu. Najmniejszą wartość kryterium K1, wynoszącą 36,82 s/os., uzyskał wariant A_{92}^1 , należący do strategii uwzględniającej napelnienie pojazdu, odchylenie kursu od harmonogramu oraz czas oczekiwania na obsługę. W porównaniu z najlepszym wariantem strategii nieuwzględniających napelnienia, tj. A_5^3 , wartość tego kryterium była mniejsza o 2,27 s/os., czyli o około 5,81 %. Wynik ten pokazuje, że uwzględnienie parametru napelnienia w algorytmie sterowania może sprzyjać ograniczaniu strat czasu indywidualnych podróży.

Najkorzystniejsze wartości kryteriów bezpośrednio opisujących funkcjonowanie PTZ, tj. K3 i K4, uzyskał wariant A_8^3 . Towarzyszyły temu jednak wyraźnie mniej korzystne oceny dla kryteriów K2 i K5, co pokazuje, że intensywne podporządkowanie programu sygnalizacji świetlnej potrzebom PTZ może prowadzić do wzrostu strat czasu pozostałych pojazdów oraz emisji CO₂.

Sz szczególnie duże zróżnicowanie wyników wystąpiło w ramach czwartej strategii, zakładającej priorytet statyczny i bezwarunkowy. Jej wariant A_1^4 osiągnął najmniejszą wartość pod względem kryterium K2, natomiast wariant A_8^4 , reprezentujący najwyższy poziom priorytetu, uzyskał najgorsze wartości w zakresie kryteriów K1, K2 i K5. Wartość

Tab. 43. Zbiór niezdominowanych wariantów sterowania – PDIII. Źródło: Opr. własne

A_W^S		Stosunek par. $\alpha : \beta$	Kombinacja współczynników					Wsp. r_x	Kryteria oceny				
S	W		$[s_1 \ o_1, s_2 \ o_2, s_3 \ o_3, s_4 \ o_4, s_5]$	K1 [s/os.]	K2 [s/poj.]	K3 [s/poj. PTZ]	K4 [min]		K5 [kg]				
1	21	1 : 1	1,00 1,00 0,80 0,60 0,40	nd	37,80	57,27	21,89	1,76	902,83				
1	33	1 : 1	1,00 1,00 0,60 0,50 0,30	nd	37,67	59,51	19,06	1,72	902,72				
1	43	1 : 1	1,00 0,90 0,80 0,50 0,40	nd	37,94	59,41	19,75	1,72	912,69				
1	55	1 : 1	1,00 0,90 0,50 0,40 0,30	nd	39,53	64,79	16,85	1,68	938,91				
1	57	1 : 1	1,00 0,80 0,70 0,60 0,40	nd	37,47	57,89	19,87	1,72	897,08				
1	65	1 : 1	1,00 0,80 0,50 0,40 0,30	nd	40,52	66,41	16,93	1,68	950,22				
1	69	1 : 1	1,00 0,70 0,50 0,40 0,30	nd	40,95	67,16	17,30	1,68	984,18				
1	73	3 : 2	1,00 1,00 0,90 0,80 0,50	nd	41,63	63,16	23,74	1,78	890,47				
1	82	3 : 2	1,00 1,00 0,90 0,60 0,30	nd	38,71	58,83	22,38	1,76	893,52				
1	87	3 : 2	1,00 1,00 0,80 0,70 0,50	nd	36,88	55,16	22,41	1,76	904,24				
1	92	3 : 2	1,00 1,00 0,80 0,60 0,30	nd	36,82	56,26	20,54	1,73	923,63				
1	115	3 : 2	1,00 0,90 0,80 0,40 0,30	nd	38,41	61,64	18,49	1,71	944,52				
1	120	3 : 2	1,00 0,90 0,70 0,50 0,30	nd	37,90	60,38	18,90	1,71	927,13				
1	123	3 : 2	1,00 0,90 0,60 0,50 0,30	nd	38,18	61,72	17,75	1,70	917,31				
1	125	3 : 2	1,00 0,90 0,50 0,40 0,30	nd	42,06	70,39	16,41	1,67	999,81				
1	134	3 : 2	1,00 0,80 0,60 0,40 0,30	nd	41,27	68,32	16,58	1,68	990,50				
1	135	3 : 2	1,00 0,80 0,50 0,40 0,30	nd	40,39	66,81	16,75	1,68	996,19				
1	137	3 : 2	1,00 0,70 0,60 0,50 0,30	nd	45,39	78,18	15,83	1,67	1076,22				
1	139	3 : 2	1,00 0,70 0,50 0,40 0,30	nd	40,84	67,93	16,72	1,68	1008,04				
1	140	3 : 2	1,00 0,60 0,50 0,40 0,30	nd	42,26	71,28	16,04	1,67	1062,63				
2	7	0 : 1	1,00 1,00 0,90 0,70 0,50	nd	42,98	62,71	25,83	1,79	897,54				
2	9	0 : 1	1,00 1,00 0,90 0,70 0,30	nd	41,83	59,68	26,30	1,81	899,05				
2	19	0 : 1	1,00 1,00 0,80 0,70 0,30	nd	40,05	55,39	26,33	1,80	886,65				
2	20	0 : 1	1,00 1,00 0,80 0,60 0,50	nd	40,69	57,38	26,10	1,79	899,44				
2	29	0 : 1	1,00 1,00 0,70 0,50 0,40	nd	44,01	63,96	25,77	1,79	902,40				
2	37	0 : 1	1,00 0,90 0,80 0,70 0,50	nd	41,88	64,02	22,64	1,76	912,50				
2	38	0 : 1	1,00 0,90 0,80 0,70 0,40	nd	40,61	59,02	25,11	1,77	904,66				
2	39	0 : 1	1,00 0,90 0,80 0,70 0,30	nd	42,90	63,08	24,56	1,76	908,21				
2	41	0 : 1	1,00 0,90 0,80 0,60 0,40	nd	40,54	59,99	23,47	1,76	916,07				
2	55	0 : 1	1,00 0,90 0,50 0,40 0,30	nd	41,19	64,16	20,89	1,72	910,28				
2	58	0 : 1	1,00 0,80 0,70 0,60 0,30	nd	42,71	65,29	22,23	1,73	906,30				
2	63	0 : 1	1,00 0,80 0,60 0,50 0,30	nd	42,48	66,10	20,87	1,72	922,92				
2	66	0 : 1	1,00 0,70 0,60 0,50 0,40	nd	42,62	65,67	21,26	1,72	917,68				
2	67	0 : 1	1,00 0,70 0,60 0,50 0,30	nd	42,47	66,82	20,13	1,71	937,58				
2	68	0 : 1	1,00 0,70 0,60 0,40 0,30	nd	42,08	65,18	20,92	1,72	975,80				
2	70	0 : 1	1,00 0,60 0,50 0,40 0,30	nd	39,88	60,51	21,15	1,72	916,22				
3	1	nd	nd	1,00	44,79	62,49	29,84	1,86	894,60				
3	3	nd	nd	0,80	40,73	63,12	20,68	1,73	902,27				
3	4	nd	nd	0,70	40,37	64,21	18,82	1,72	908,94				
3	5	nd	nd	0,60	39,09	61,81	17,86	1,70	953,61				
3	6	nd	nd	0,50	46,00	80,20	15,39	1,67	1147,49				
3	7	nd	nd	0,40	46,81	81,86	14,66	1,67	1176,10				
3	8	nd	nd	0,30	49,18	88,64	13,06	1,64	1287,51				
4	1	nd	nd	1,00	50,31	54,16	48,93	2,11	979,50				
4	2	nd	nd	0,90	51,02	58,82	45,19	2,08	1020,16				
4	3	nd	nd	0,80	55,32	71,23	42,03	2,02	1131,97				
4	4	nd	nd	0,70	54,34	71,44	39,10	1,97	1141,00				
4	5	nd	nd	0,60	55,20	78,30	34,99	1,93	1295,56				
4	6	nd	nd	0,50	56,83	85,21	33,71	1,89	1403,50				
4	7	nd	nd	0,40	62,12	97,75	31,60	1,88	1512,13				
4	8	nd	nd	0,30	68,82	119,89	26,64	1,82	1692,39				
5	1	nd	nd	nd	52,47	55,22	51,39	2,13	982,05				
6	1	nd	nd	nd	56,41	58,79	55,53	2,21	996,45				

kryterium K2 wzrosła pomiędzy tymi wariantami z 54,16 do 119,89 s/poj., czyli o 65,73 s/poj., co oznacza przyrost o 121,36 %. Świadczy to o dużej wrażliwości efektów działania priorytetu statycznego na przyjęty poziom ingerencji w program sygnalizacji.

Nadmiernie intensywne i bezwarunkowe uprzywilejowanie PTZ prowadziło do częstego przerywania obsługi relacji kolizyjnych, narastania kolejek oraz wzrostu emisji CO₂ wynikającego z większej liczby zatrzymań i ponownego ruszania pojazdów.

Z kolei warianty strategii bez priorytetu, A_1^5 i A_1^6 , osiągały relatywnie niekorzystne wartości K3 i K4, co potwierdza, że zastosowanie któregośkolwiek z analizowanych sposobów priorytetyzacji poprawia warunki funkcjonowania PTZ. Wyniki nie wskazują jednak, aby maksymalizacja poziomu uprzywilejowania była rozwiązaniem najkorzystniejszym dla całego układu. Najlepsze rezultaty w poszczególnych kryteriach zostały osiągnięte przez różne warianty, a poprawie jednej grupy miar towarzyszyło zwykle pogorszenie pozostałych.

Z powyższej analizy wynika, że nie można wskazać jednego wariantu, który jednoznacznie dominowałby we wszystkich kryteriach oceny. Wobec braku rozwiązania o wyraźnej przewadze, przystąpiono do dalszej analizy wielokryterialnej z wykorzystaniem metody ELECTRE III (patrz 4.1.3).

4.4.7. Szeregowanie rozwiązań dla PDIII (E7)

Wybrane wyniki wielokryterialnego szeregowania wariantów strategii sterowania dla analizowanego poligonu przedstawiono wcześniej w pracy [169]. W niniejszej rozprawie analizę tę rozwinęto, przedstawiając szczegółowe wyniki szeregowania oraz ocenę ich stabilności względem zmian parametrów modelu preferencji.

Zgodnie z przyjętym bazowym modelem preferencji uszeregowano wszystkie niezdominowane rozwiązania tworząc bazowy ranking (ranking nr 1 w Tab. 44). Jego szczyt został zdominowany przez warianty reprezentujące pierwszą strategię sterowania. Na pierwszym i drugim miejscu znalazły się kolejno warianty A_{33}^1 oraz A_{57}^1 . Miejsce trzecie jednocześnie zajmują cztery warianty: A_{123}^1 , A_{120}^1 , A_{92}^1 , A_{43}^1 . Dopiero od piątej pozycji pojawiają się warianty strategii alternatywnych. W wyższych częściach rankingu współdzielą one lokaty z rozwiązaniami reprezentującymi autorskie podejście. W końcowym segmencie rankingu, obejmującym pozycje od czternastej do dwudziestej czwartej zauważa się wyłącznie warianty strategii alternatywnych. Ostatnie cztery miejsca zajmują w głównej mierze rozwiązania strategii czwartej (A_4^4 , A_5^4 , A_3^4 , A_6^4 , A_8^4 , A_7^4) oraz szóstej (A_1^6) co wskazuje na ich relatywnie niską skuteczność w ujęciu wielokryterialnym.

W ramach analizy wrażliwości, dla kolejnych modyfikacji modelu preferencji decydenta przygotowano kolejne 39 rankingów cząstkowych, które wraz z rankingiem bazowym stały się podstawą do wskazania rankingu ostatecznego. Zestawienie części wyników zamieszczono w Tab. 44 (pełne zestawienie umieszczono w *Załączniku nr 25*). Zauważono wysoką spójność rankingu bazowego i ostatecznego, szczególnie w kontekście miejsc najwyższych i najniższych. Otrzymane wyniki potwierdzają wyraźną dominację strategii pierwszej – autorskiej. Wariant A_{33}^1 zajął pierwsze miejsce w 39 z 40 rozpatrywanych rankingów ($\sigma = 0,16$), co pozwala uznać go za stabilną rekomendację wyboru. Drugie miejsce, również z wysoką powtarzalnością lokaty (36 na 40 rankingów) zajął wariant A_{57}^1 ($\sigma = 0,31$). Potwierdzono również relatywnie pewną trzecią lokatę dla wariantów A_{123}^1 , A_{120}^1 , A_{92}^1 , A_{43}^1 (σ między 0,61 a 1,17). Najwyższą niestabilność pozycji w rankingach (mierzoną wartością odchylenia standardowego) odnotowano dla wariantów A_1^4 ($\sigma = 2,18$) i A_1^5 ($\sigma = 2,16$). Co istotne, wszystkie zauważone przypadki znacznej zmienności pozycji w rankingach dotyczą wariantów wyraźnie oddalonych od strefy rozwiązań najlepszych i rekomendowanych.

Tab. 44. Wyniki szeregowania wariantów sterowania i analizy wrażliwości – PDIII. Źródło: Opr. własne

Oznaczenie A_W^S		Numer w rankingu						Min	Max	μ	σ	Dominanta. Ranking finalny
S	W	1	2	3	4	...	40					
1	33	1	1	1	1	...	1	1	2	1,03	0,16	1
1	57	2	2	2	2	...	2	1	3	1,95	0,31	2
1	123	3	3	3	3	...	2	1	4	2,83	0,67	3
1	120	3	3	3	4	...	2	2	4	3,33	0,61	3
1	92	3	3	5	4	...	3	2	6	3,60	0,92	3
1	43	3	3	4	3	...	6	2	7	3,88	1,17	3
1	87	4	4	6	5	...	4	4	7	4,78	0,85	4
1	21	4	4	7	5	...	5	4	7	5,28	0,89	5
1	115	5	5	8	6	...	5	5	8	6,25	0,99	6
3	7	5	5	8	6	...	7	5	10	6,85	1,54	6
1	55	6	6	9	8	...	7	6	10	7,28	1,00	7
1	82	6	6	9	7	...	7	6	9	7,30	0,93	7
3	8	6	6	9	7	...	8	6	10	7,33	0,98	7
3	5	5	5	8	7	...	6	5	9	6,95	1,24	8
3	4	7	7	10	9	...	8	7	10	8,35	0,85	8
2	19	7	7	10	9	...	8	7	11	8,70	1,17	8
1	65	7	7	10	9	...	8	7	12	8,80	1,19	9
2	70	8	8	11	10	...	9	8	11	9,40	0,89	9
2	20	8	8	11	10	...	9	8	13	10,00	1,34	9
4	1	9	9	12	11	...	9	9	17	11,05	2,18	9
3	3	9	9	12	11	...	11	9	12	10,38	0,89	10
1	135	9	10	12	11	...	10	9	14	10,88	1,25	10
2	38	11	10	13	13	...	10	10	14	11,70	1,03	11
1	69	11	12	13	13	...	12	10	17	12,85	1,89	11
2	41	10	10	13	12	...	10	10	13	11,20	0,93	12
1	134	10	12	14	12	...	12	10	15	12,10	1,30	12
2	55	12	11	14	14	...	12	11	15	12,70	1,03	12
1	139	11	13	15	13	...	11	11	16	12,78	1,44	12
1	125	10	11	14	12	...	13	10	15	12,50	1,50	13
1	73	13	13	15	15	...	14	12	16	14,13	1,14	13
2	9	12	12	16	15	...	13	11	16	13,95	1,36	14
1	140	12	14	16	14	...	14	12	18	14,45	1,64	14
1	137	13	15	17	15	...	15	13	19	15,30	1,69	15
2	37	14	15	17	16	...	14	13	20	15,40	1,62	15
3	6	14	16	18	16	...	16	14	20	16,33	1,69	16
2	66	15	16	18	17	...	16	14	20	16,68	1,49	16
2	63	16	17	19	18	...	15	14	21	17,15	1,53	16
5	1	15	17	19	14	...	13	13	21	16,28	2,16	17
2	58	17	17	19	17	...	15	14	21	17,00	1,50	17
2	7	16	17	19	18	...	17	15	21	17,40	1,45	17
2	67	17	18	20	19	...	16	16	22	18,15	1,57	17
2	39	18	18	20	19	...	16	16	22	18,38	1,35	18
2	29	19	19	21	20	...	18	17	23	19,55	1,41	19
4	2	19	19	21	20	...	17	17	23	19,58	1,58	19
2	68	19	21	21	21	...	18	18	24	20,08	1,39	19
3	1	20	20	22	20	...	19	17	24	20,05	1,43	20
6	1	21	22	23	21	...	18	18	25	21,23	1,62	21
4	4	21	22	23	22	...	20	19	25	21,65	1,44	21
4	5	22	23	24	23	...	21	20	26	22,43	1,28	22
4	3	22	23	24	23	...	21	20	26	22,65	1,44	22
4	6	23	24	25	24	...	22	21	27	23,43	1,28	23
4	8	23	24	25	24	...	22	21	27	23,65	1,44	23
4	7	24	25	26	25	...	23	22	28	24,43	1,28	24

4.4.8. Rekomendacja rozwiązania i weryfikacja realizacji celu badań dla PDIII (E8)

Na podstawie wyników szeregowania wielokryterialnego oraz przeprowadzonej analizy wrażliwości jako rozwiązanie rekomendowane dla PDIII wskazano wariant A_{33}^1 , należący do pierwszej strategii sterowania. Strategia ta uzależnia poziom priorytetu dla PTZ od napełnienia pojazdu PTZ, odchylenia kursu od harmonogramu oraz czasu oczekiwania na obsługę. Wariant A_{33}^1 zajął samodzielnie pierwszą pozycję w 37 spośród 40 analizowanych rankingów, a w dwóch dzielił ją z wariantem A_{57}^1 . W tylko jednym przypadku ustąpił mu pierwszeństwa, zajmując drugą pozycję. Oznacza to bardzo wysoką, choć niepełną, stabilność rekomendacji względem rozpatrywanych zmian preferencji decydenta.

Wyniki dla PDIII stanowią najbardziej wymagający spośród przeprowadzonych sprawdzianów możliwości zastosowania zaproponowanej metodyki. Analizę wykonano dla rzeczywistie funkcjonującego skrzyżowania o wysokim natężeniu ruchu kołowego i tramwajowego oraz największym stopniu złożoności spośród rozpatrywanych poligonów. W odróżnieniu od wcześniejszych przypadków ruch tramwajowy odbywa się tutaj pomiędzy wszystkimi wlotami, przez co w procesie sterowania konieczne jest również rozstrzyganie kolejności obsługi zgłoszeń PTZ kolizyjnych względem siebie. Uzyskanie w takich warunkach stabilnego rozwiązania kompromisowego wskazuje, że zaproponowany schemat postępowania może być stosowany także do analizy złożonych, funkcjonujących układów transportowych.

Rezultaty trzeciego poligonu dodatkowo potwierdzają korzystną ocenę autorskiej strategii sterowania. Dziesięć najkorzystniejszych wartości kryterium K1 uzyskano wyłącznie dla wariantów pierwszej strategii, a spośród 25 najlepszych wyników tego kryterium 16 należało właśnie do niej. Najmniejsze straty czasu indywidualnych podróży wyniosły 36,82 s/os., podczas gdy najlepszy rezultat spośród strategii nieuwzględniających napełnienia wyniósł 39,09 s/os. Przewaga strategii autorskiej nie ograniczała się zatem do pojedynczej konfiguracji jej parametrów, lecz była widoczna dla szerszej grupy analizowanych wariantów.

Na uwagę zasługuje również pozycja strategii o uproszczonym sposobie kształtowania priorytetu. W dolnej części rankingu znalazły się w dużej mierze warianty strategii czwartej, wykorzystującej statyczny poziom priorytetu oraz strategii szóstej, opartej na programie stałoczasowym. W zestawieniu z wysokimi pozycjami wariantów strategii pierwszej wskazuje to, że w warunkach intensywnego ruchu PTZ i występowania konkurencyjnych zgłoszeń korzystne jest różnicowanie sposobu ich obsługi na podstawie bieżących cech poszczególnych zgłoszeń.

Weryfikacja szczegółowych warunków realizacji celu pracy określonych w podrozdziale 1.3 wykazała, że strategia uwzględniająca informację o napełnieniu pozwoliła uzyskać mniejsze wartości kryterium K1 niż strategię porównawczą. Przeprowadzone szeregowanie wielokryterialne umożliwiło wskazanie rozwiązania kompromisowego w przyjętym zbiorze kryteriów K1-K5, należącego do strategii autorskiej i zachowującego przewagę pod względem K1 nad najlepszym wariantem nieuwzględniającym informacji o napełnieniu. Analiza wrażliwości potwierdziła ponadto odporność rekomendacji na niewielkie zmiany preferencji decydenta. Tym samym również dla PDIII potwierdzono spełnienie wszystkich warunków realizacji celu pracy.

5. PODSUMOWANIE

5.1. Weryfikacja założonego celu pracy

Celem niniejszej rozprawy było opracowanie metody priorytetowego sterowania ruchem miejskim w obszarze skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, w której informacja o napełnieniu pojazdów publicznego transportu zbiorowego, wraz z odchyleniem kursu od harmonogramu oraz czasem oczekiwania na obsługę, stanowi podstawę kształtowania decyzji o zakresie priorytetu. Metodę ukierunkowano na obniżenie strat czasu indywidualnych podróży oraz uzyskanie rozwiązania kompromisowego w przyjętym zbiorze kryteriów. Na potrzeby realizacji i weryfikacji tak sformułowanego celu opracowano również metodykę badawczą umożliwiającą projektowanie strategii sterowania, ich wdrażanie w środowisku symulacyjnym oraz wielowymiarową weryfikację uzyskanych wyników.

Realizację tak sformułowanego celu uzależniono od spełnienia czterech warunków:

- Pierwszy dotyczył sprawdzenia, czy wykorzystanie informacji o napełnieniu pojazdów PTZ w algorytmie sterowania, łącznie z odchyleniem kursu od harmonogramu oraz czasem oczekiwania na obsługę, pozwala ograniczyć straty czasu indywidualnych podróży względem strategii, które informacji o napełnieniu nie uwzględniają.
- Drugi odnosił się do możliwości uzyskania satysfakcjonującego rozwiązania kompromisowego w zbiorze kryteriów obejmującym: K1 – średnie straty czasu indywidualnych podróży, K2 – średnie straty czasu pojazdów, K3 – średnie straty czasu pojazdów PTZ, K4 – średnie odchylenie kursu od harmonogramu oraz K5 – emisję CO₂ do atmosfery.
- Trzeci dotyczył sprawdzenia, czy rozwiązanie rekomendowane jako kompromisowe zachowuje korzystniejszą wartość kryterium K1 niż najlepsze pod tym względem warianty strategii porównawczych nieuwzględniających informacji o napełnieniu pojazdów PTZ.
- Czwarty dotyczył odporności uzyskanej rekomendacji na niewielkie zmiany preferencji decyzyjnych.

Weryfikacji realizacji celu dokonano za pośrednictwem analiz przeprowadzonych na wybranych trzech poligonach doświadczalnych, cechujących się narastającym stopniem złożoności. Pierwszy poligon miał charakter testowy i pozwalał ocenić efektywność przyjętych założeń w możliwie uproszczonych warunkach. Drugi i trzeci poligon odnosiły się natomiast do rzeczywistych złożonych skrzyżowań zlokalizowanych w Poznaniu. W każdym z poligonów zastosowano jednakowy schemat postępowania określony w postaci metodyki badań. Obejmował on m.in. przygotowanie wariantów sterowania, przeprowadzenie eksperymentów symulacyjnych, analizę wielokryterialną i analizę wrażliwości na zmiany w modelu preferencji.

Odnosząc się do przytoczonych powyżej czterech warunków spełnienia celu, w przypadku pierwszego poligonu potwierdzono, że wariant strategii autorskiej wykorzystujący informację o napełnieniu pojazdów PTZ pozwolił uzyskać niższe straty czasu indywidualnych podróży niż najlepszy pod tym względem wariant strategii porównawczych. Wartość kryterium K1 wyniosła odpowiednio 29,9 s/os. wobec 31,9 s/os., co oznacza jej poprawę o około 2 s/os., tj. ok. 6,3 % (por. Tab. 31). Ten sam wariant został wskazany jako rozwiązanie rekomendowane w analizie wielokryterialnej i utrzymał pierwszą pozycję we wszystkich analizowanych wariantach preferencji decyzyjnych (por. Tab. 32). Oznacza to, że rozwiązanie kompromisowe wyznaczone dla pierwszego poligonu zachowało również przewagę w zakresie kryterium K1 względem strategii porów-

nawczych. Jeszcze wyraźniejszą skalę korzyści pokazuje porównanie z programem stałoczasowym, dla którego wartość K1 wyniosła 103,1 s/os. Wartość tego kryterium dla wariantu rekomendowanego była mniejsza o 73,2 s/os., tj. o około 71,0 %. Program stałoczasowy osiągnął zarazem najmniej korzystne wartości czterech pierwszych kryteriów i zajął ostatnią, 27. pozycję w rankingu finalnym.

Na drugim poligonie wszystkie niezdominowane warianty strategii autorskiej przewyższały warianty strategii alternatywnych zarówno pod względem strat czasu indywidualnych podróży (osiągały niższe straty), jak i oceny wielokryterialnej (por. Tab. 37 i por. Tab. 38). Rekomendowane rozwiązanie kompromisowe utrzymało ponadto pierwszą pozycję we wszystkich analizowanych wariantach preferencji decyzyjnych. Tym samym również dla drugiego poligonu rozwiązanie kompromisowe należało do strategii autorskiej i nie było uzyskane kosztem pogorszenia kryterium K1 względem strategii porównawczych. Najmniej korzystną wartość K1, równą 75,2 s/os., uzyskał wariant odpowiadający najwyższemu analizowanemu poziomowi priorytetu bezwarunkowego, natomiast dla programu stałoczasowego wyniosła ona minimalnie mniej, bo 75,1 s/os. Wartość K1 wariantu rekomendowanego, równa 62,2 s/os., była od tych rezultatów zatem mniejsza odpowiednio o 13,0 s/os., tj. o około 17,3 %, oraz o 12,9 s/os., tj. o około 17,2 %. Ponadto wariant z priorytetem bezwarunkowym uzyskał najmniej korzystne wartości K2 i K5, natomiast program stałoczasowy charakteryzował się najmniej korzystną wartością K4 i zajął ostatnią, 18. pozycję w rankingu finalnym.

Na trzecim poligonie, obejmującym układ Most Dworcowy – Roosevelta – Głogowska, dziesięć najkorzystniejszych wartości kryterium K1 należało wyłącznie do wariantów strategii autorskiej. Najniższa z nich, uzyskana dla A_{92}^1 , była o 2,3 s/os., tj. o około 5,9 %, mniejsza od wartości uzyskanej przez najlepszy pod tym względem wariant strategii porównawczych (por. Tab. 43). Również w analizie wielokryterialnej jako rozwiązanie rekomendowane wskazano wariant strategii autorskiej A_{33}^1 , który utrzymał najwyższą ocenę w 97,5% analizowanych rankingów (por. Tab. 44). Co istotne, rozwiązanie to także zachowało przewagę w zakresie kryterium K1 względem najlepszego wariantu strategii porównawczych. Wartość K1 dla wariantu A_{33}^1 wyniosła 37,7 s/os., natomiast najlepszy wariant alternatywny uzyskał 39,1 s/os. Oznacza to różnicę 1,4 s/os., tj. około 3,6 %. Potwierdza to, że także w najbardziej złożonym z analizowanych układów możliwe było jednoczesne uzyskanie korzystnych wyników w zakresie strat czasu indywidualnych podróży, wskazanie rozwiązania kompromisowego oraz zachowanie wysokiej stabilności rekomendacji. Najmniej korzystną wartość K1, równą 68,8 s/os., uzyskał wariant odpowiadający najwyższemu analizowanemu poziomowi priorytetu bezwarunkowego, natomiast dla programu stałoczasowego wyniosła ona 56,4 s/os. Wartość K1 wariantu rekomendowanego była od tych rezultatów mniejsza odpowiednio o 31,2 s/os., tj. o około 45,2 % oraz o 18,7 s/os., tj. o około 33,2 %. Wariant z priorytetem bezwarunkowym uzyskał również najmniej korzystne wartości K2 i K5, podczas gdy program stałoczasowy osiągnął najmniej korzystne wartości K3 i K4, co obrazuje konsekwencje obu skrajnych sposobów sterowania.

Uzupełnieniem analiz przeprowadzonych dla wszystkich trzech poligonów doświadczalnych jest przedstawione w Tab. 45 zestawienie wyników wariantów rekomendowanych na tle najwyżej ocenionych w rankingu finalnym wariantów poszczególnych strategii porównawczych. Zawarte w tabeli procentowe różnice względem wariantu rekomendowanego charakteryzują się dużym rozrzutem wartości. W skrajnych przypadkach, głównie w przypadku PDI, sięgają one nawet kilkuset procent na niekorzyść strategii porównawczych. Jednak na szczególną uwagę zasługują rezultaty uzyskane dla PDII i PDIII, gdyż poligony te odwzorowują fragmenty istniejących układów transportowych, co nadaje uzyskanym wynikom większe znaczenie praktyczne. Odnotowane w Tab. 45 korzyści wynikające z zastosowania rekomendowanych wariantów pokazują, że w zadanych warunkach

możliwe jest osiągnięcie zadowalających wyników w zakresie strat czasu indywidualnych podróży. Wartości K1 dla wariantów porównawczych były bowiem wyższe od wyników rekomendacji o 5,5 – 20,7 % dla PDII i 6,4 – 49,6 % dla PDIII. Przy czym, co najistotniejsze, korzyści te można uzyskać przy jednoczesnym niepogorszeniu warunków ruchu ogółu pojazdów, wśród których dominują pojazdy transportu indywidualnego – potwierdzają wartości K2 w PDII, lub przy ich relatywnie niewielkim pogorszeniu względem części najwyżej ocenionych alternatyw, jak w PDIII. W tym ostatnim przypadku wartości K2 tych alternatyw były niższe, a więc korzystniejsze, od wyniku rekomendacji jedynie o 1,2–8,9 %.

Tab. 45. Porównanie najwyżej uszeregowanych wariantów poszczególnych strategii sterowania dla analizowanych poligonów doświadczalnych. Źródło: Opr. własne

Poligon	Strategia	Najwyżej uszeregowany wariant (pozycja w rankingu finalnym)	Kryteria oceny				
			K1	K2	K3	K4	K5
			[s/os.]	[s/poj.]	[s/poj. PTZ]	[min]	[kg]
PDI	1	A_{57}^1 * (1.)	29,9	50,1	20,8	2,6	289,5
	2	A_6^2 (5.)	31,9 (+6,7 %)	52,6 (+5,0 %)	21,8 (+4,8 %)	2,6 (0,0 %)	287,8 (-0,6 %)
	3	A_8^3 (6.)	59,7 (+99,7 %)	168,3 (+235,9 %)	4,6 (-77,9 %)	2,4 (-7,7 %)	380,7 (+31,5 %)
	4	A_1^4 (27.)	103,1 (+244,8 %)	240,9 (+380,8 %)	37,3 (+79,3 %)	2,9 (+11,5 %)	340,8 (+17,7 %)
	5	A_8^5 (5.)	55,0 (+83,9 %)	154,2 (+207,8 %)	4,6 (-77,9 %)	2,4 (-7,7 %)	371,9 (+28,5 %)
	6	A_1^6 (4.)	40,3 (+34,8 %)	96,0 (+91,6 %)	11,9 (-42,8 %)	2,5 (-3,8 %)	310,3 (+7,2 %)
PDII	1	A_{23}^1 * (1.)	62,2	65,2	55,7	3,5	963,6
	2	A_4^2 ** (10.)	65,6 (+5,5 %)	69,2 (+6,1 %)	59,7 (+7,2 %)	3,5 (0,0 %)	971,7 (+0,8 %)
	3	A_{25}^3 (10.)	73,0 (+17,4 %)	81,6 (+25,2 %)	56,0 (+0,5 %)	3,5 (0,0 %)	984,6 (+2,2 %)
	4	A_1^4 (18.)	75,1 (+20,7 %)	69,7 (+6,9 %)	73,5 (+32,0 %)	3,8 (+8,6 %)	979,2 (+1,6 %)
PDIII	1	A_{33}^1 * (1.)	37,7	59,5	19,1	1,7	902,7
	2	A_{19}^2 (8.)	40,1 (+6,4 %)	55,4 (-6,9 %)	26,3 (+37,7 %)	1,8 (+5,9 %)	886,7 (-1,8 %)
	3	A_7^3 (6.)	46,8 (+24,1 %)	81,9 (+37,6 %)	14,7 (-23,0 %)	1,7 (0,0 %)	1176,1 (+30,3 %)
	4	A_1^4 (9.)	50,3 (+33,4 %)	54,2 (-8,9 %)	48,9 (+156,0 %)	2,1 (+23,5 %)	979,5 (+8,5 %)
	5	A_1^5 (17.)	52,5 (+39,3 %)	55,2 (-7,2 %)	51,4 (+169,1 %)	2,1 (+23,5 %)	982,1 (+8,8 %)
	6	A_1^6 (21.)	56,4 (+49,6 %)	58,8 (-1,2 %)	55,5 (+190,6 %)	2,2 (+29,4 %)	996,5 (+10,4 %)

* wariant rekomendowany

** w przypadku PDII trzy warianty strategii 2 (A_3^2 , A_4^2 , A_5^2) zajęły 10. miejsce w rankingu finalnym; w tabeli wskazano wariant A_4^2 ze względu na najkorzystniejszą średnią pozycję w rankingach cząstkowych.

Istotnych spostrzeżeń dostarcza także porównanie strat czasu (K3) i punktualności PTZ (K4). Wyniki PDII wskazują, że silniejsze uprzywilejowanie tramwajów nie musi poprawiać funkcjonowania całego PTZ, ponieważ korzyści tramwajów mogą być niwelowane stratami autobusów. Z kolei w PDIII korzyściom dla PTZ towarzyszyło znaczne pogorszenie pozostałych kryteriów. W konsekwencji, spośród wariantów statycznego priorytetu bezwarunkowego najwyżej w ocenie wielokryterialnej uplasował się wariant o

najmniejszej intensywności priorytetu (A_1^4), choć zapewniał znacznie gorsze warunki przejazdu PTZ niż rozwiązanie rekomendowane.

Syntetyczna ocena wyników uzyskanych dla trzech poligonów potwierdza spełnienie warunków realizacji celu pracy. W każdym przypadku rozwiązanie rekomendowane jako kompromisowe należało do strategii autorskiej i jednocześnie zachowywało przewagę w zakresie kryterium K1 względem najlepszych pod tym względem wariantów strategii porównawczych. Rekomendacje te były ponadto stabilne względem niewielkich zmian preferencji decyzyjnych. W konsekwencji można stwierdzić, że cel rozprawy został osiągnięty w granicach przyjętego zakresu badań.

5.2. Wnioski ogólne i rekomendacje

Przeprowadzone badania pozwalają sformułować wnioski o charakterze metodycznym, poznawczym i praktycznym. Najważniejszy z nich dotyczy zasadności wykorzystania informacji o napełnieniu pojazdów publicznego transportu zbiorowego w algorytmach priorytetowego sterowania ruchem. Napełnienie pojazdu może stanowić użyteczną przesłankę kształtowania decyzji o zakresie priorytetu, ponieważ pozwala oceniać skutki decyzji sterującej nie tylko z perspektywy pojedynczego pojazdu, lecz także z perspektywy pasażerów, których podróże są w nim realizowane.

Jednocześnie napełnienie nie powinno być traktowane jako jedyna i bezwzględna podstawa decyzji priorytetowej. Aktualna liczba pasażerów w pojeździe nie zawsze odzwierciedla pełne znaczenie danego kursu dla systemu transportowego. Z tego względu zasadne jest wykorzystywanie tego parametru jako jednej z przesłanek szerszego modelu wartościowania potrzeby priorytetowej. W pracy model ten obejmował również odchylenie kursu od harmonogramu oraz czas oczekiwania na obsługę. Takie ujęcie ogranicza ryzyko decyzji opartych wyłącznie na chwilowym stanie napełnienia, a jednocześnie zachowuje wartość tego parametru jako miary liczby pasażerów objętych skutkami decyzji sterującej.

Wyniki badań potwierdziły zasadność stosowania priorytetu warunkowego i stopniowalnego. W warunkach ograniczonego czasu sygnalizacyjnego oraz występowania relacji kolizyjnych nie każde zgłoszenie pojazdu PTZ powinno skutkować identyczną reakcją sterownika. Bardziej uzasadnione jest różnicowanie zakresu priorytetu w zależności od rzeczywistej potrzeby obsługi danego zgłoszenia oraz przewidywanych skutków dla pozostałych uczestników ruchu. Dotyczy to zwłaszcza skrzyżowań, na których występują konkurencyjne zgłoszenia pojazdów PTZ.

Uzyskane rezultaty wskazują również na duże znaczenie właściwej parametryzacji metod sterowania, dostosowanej do lokalnych uwarunkowań skrzyżowania. O efektywności rozwiązania decydują w dużej mierze sposób wykorzystania dostępnych informacji, dobór parametrów metody, zakres możliwej ingerencji w program sygnalizacji oraz zasady rozstrzygania konkurencyjnych zgłoszeń. W przypadku proponowanej metody samo uwzględnienie informacji o napełnieniu pojazdu, odchyleniu kursu od harmonogramu oraz czasie oczekiwania na obsługę w procesie sterowania nie gwarantuje uzyskania korzystnych wyników. Potwierdza to fakt, że nie wszystkie testowane konfiguracje autorskiego podejścia należały do rozwiązań najwyższej ocenianych. Parametryzację wariantów rekomendowanych dla poszczególnych poligonów doświadczalnych zestawiono w Tab. 46. Przedstawione w niej nastawy różnią się zarówno pod względem współczynników wagowych α i β , jak i wartości współczynników priorytetowych przypisanych kolejnym poziomom napełnienia ($o_1 - o_4$) i odchylenia od harmonogramu ($s_1 - s_5$). W PDII i PDIII, opartych na rzeczywistych układach transportowych, najwyższej oceniono w analizie wielokryterialnej warianty o jednakowych wagach obu składowych ($\alpha = \beta$),

natomiast w PDI rekomendowano wariant przypisujący większą wagę składowej związanej z napełnieniem pojazdu ($\alpha > \beta$). Wyniki te uzyskano jednak dla konkretnych warunków ruchowych i zestawów pozostałych nastaw, dlatego zbieżność stosunku wag w dwóch przypadkach nie wystarcza, aby traktować taką konfigurację jako zalecaną dla innych poligonów doświadczalnych.

Tab. 46. Parametryzacja wariantów rekomendowanych dla poszczególnych poligonów doświadczalnych. Źródło: Opr. własne

Poligon	Wariant rekomendowany	Stosunek param. $\alpha : \beta$	Kombinacja współczynników $[s_1, o_1, s_2, o_2, s_3, o_3, s_4, o_4, s_5]$
PDI	A_{57}^1	3 : 2	1,00 0,89 0,78 0,67 0,45
PDII	A_{23}^1	1 : 1	1,00 0,87 0,74 0,61 0,22
PDIII	A_{33}^1	1 : 1	1,00 1,00 0,60 0,50 0,30

Porównanie zastosowanych kombinacji współczynników $s_1 - s_5$ i $o_1 - o_4$ również nie pozwala wskazać uniwersalnej zasady doboru ich wartości. W każdej kombinacji spadek między dwiema ostatnimi wartościami jest większy od spadku bezpośrednio go poprzedzającego. Warto zaznaczyć, że poza wartościami nastaw przedstawionymi w tabeli na rezultat działania metody wpływa również sposób wyznaczenia granic poszczególnych poziomów napełnienia i odchylenia od harmonogramu. Granice te określają zakres wartości danego parametru przypisywany do poszczególnych poziomów, a tym samym wpływają na sposób wykorzystania odpowiadających im współczynników w procesie sterowania.

Powyższe obserwacje wskazują, że na tym etapie nie można określić uniwersalnych zasad kształtowania parametrów nastawczych metody. Ich dobór wymaga dostosowania do charakterystyki analizowanego układu. W praktyce oznacza to, że wdrożenie strategii wykorzystującej założenia proponowanej metody powinno być poprzedzone analizą wariantową i symulacyjną.

Odrębny wniosek dotyczy opracowanej metodyki badań. Należy ją traktować jako **procedurę projektowania, testowania i oceny wariantów sterowania dla konkretnego przypadku**, a nie jako źródło gotowych, uniwersalnych reguł sterowania. Wynika to z jej funkcji, którą jest uporządkowanie sposobu przygotowania, porównania i wyboru wariantów odpowiednich dla konkretnego układu, a nie narzucenie jednego rozwiązania lub zestawu nastaw. Przeprowadzone analizy potwierdziły możliwość jej zastosowania zarówno do układu testowego, jak i do istniejącego skrzyżowania oraz projektu zmian rzeczywistego układu transportowego. Wskazuje to na jej przydatność w analizach prowadzonych na różnych etapach projektowania i eksploatacji. Metodyka może zatem wspomagać decyzje projektowe dotyczące wyboru wariantów różnych strategii sterowania, również takich, które nie opierają się na autorskiej metodzie. Jej praktyczna wartość polega na połączeniu symulacyjnej oceny skutków zastosowania wariantów z formalną procedurą wyboru rozwiązania rekomendowanego.

Kolejny wniosek dotyczy konieczności wielokryterialnej oceny strategii priorytetowego sterowania ruchem. Poprawa warunków ruchu jednej grupy użytkowników może następować kosztem pogorszenia warunków ruchu innej grupy albo zwiększenia oddziaływania środowiskowego. Z tego względu ocena strategii nie powinna opierać się wyłącznie na jednej mierze efektywności. Wskazane jest jednoczesne uwzględnianie kryteriów opisujących straty czasu indywidualnych podróży, warunki ruchu wybranych grup pojazdów, punktualność pojazdów PTZ oraz emisję CO₂. Przy czym warto podkreślić, że sposób przypisania wag poszczególnym kryteriom odzwierciedla przyjęte

priorytety polityki transportowej, natomiast zastosowanie WWD umożliwia ich jawne i transparentne uwzględnienie w procesie oceny wariantów.

Zastosowanie metody WWD umożliwiło uporządkowanie wariantów w sytuacji, w której żaden z nich nie dominował nad pozostałymi we wszystkich kryteriach. WWD pełniło w pracy funkcję narzędzia oceny i porównania rezultatów, wspierając wybór rozwiązania kompromisowego. Szczególnie ważnym uzupełnieniem tej procedury była analiza wrażliwości, pozwalająca sprawdzić, czy rekomendacja pozostaje stabilna przy niewielkich zmianach preferencji decyzyjnych. W przeprowadzonej analizie wrażliwości wartości parametrów 39 zmodyfikowanych modeli preferencji losowano, przyjmując ich odchylenie od wartości bazowych w przedziale od $\pm 5\%$ do $\pm 15\%$.

Ważny wniosek praktyczny dotyczy środowiska badawczego. Weryfikacja strategii wykorzystujących informację o napełnieniu pojazdów PTZ wymaga zapewnienia funkcjonalności umożliwiających implementację algorytmu sterowania, odwzorowanie działania sygnalizacji oraz przekazywanie do algorytmu zmiennych decyzyjnych opisujących zgłoszenie i sytuację ruchową. W zależności od zastosowanych narzędzi funkcjonalności te mogą być dostępne bezpośrednio albo, jak w niniejszej pracy, wymagać dodatkowej konfiguracji, integracji lub rozbudowy mechanizmów wymiany danych.

Podobny wniosek dotyczy kryteriów środowiskowych. Uwzględnienie emisji CO₂ rozszerza ocenę wariantów sterowania poza klasyczne miary ruchowe, ale wymaga efektywnej procedury obliczeniowej. W rozbudowanych planach eksperymentalnych, obejmujących wiele wariantów i powtórzeń symulacji, uzasadnione może być stosowanie modeli zastępczych, pod warunkiem ich wcześniejszego opracowania i weryfikacji.

Na podstawie wyników pracy można sformułować kilka rekomendacji aplikacyjnych:

- informacja o napełnieniu pojazdu PTZ powinna być wykorzystywana łącznie z innymi zmiennymi opisującymi potrzebę obsługi zgłoszenia,
- projektowanie strategii powinno obejmować analizę różnych parametryzacji algorytmu,
- przed wdrożeniem rozwiązania zalecane jest przeprowadzenie analiz symulacyjnych, pozwalających ocenić skutki dla różnych grup użytkowników,
- wybór wariantu sterowania powinien być prowadzony w ujęciu wielokryterialnym i uzupełniony analizą wrażliwości,
- praktyczne zastosowanie strategii wykorzystujących napełnienie wymaga zapewnienia wiarygodnego, aktualnego i odpowiednio szybko dostępnego źródła danych pasażerskich.

Sformułowane wnioski należy odnosić do przyjętego zakresu badań. Rozprawa dotyczyła lokalnego sterowania ruchem na wyizolowanych skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną, w warunkach odwzorowanych za pomocą modeli mikrosymulacyjnych. Wyniki nie stanowią gotowego projektu wdrożeniowego z uwzględnieniem priorytetu PTZ, lecz potwierdzają skuteczność opracowanej metody sterowania w analizowanych warunkach oraz zasadność i przydatność opracowanej metodyki badań jako narzędzia wspomagającego proces projektowania, testowania i oceny strategii sterowania, w tym zastosowania autorskiej metody priorytetyzacji.

5.3. Kierunki dalszych badań

Przeprowadzone badania potwierdziły zasadność dalszego rozwijania podjętej tematyki. Przyjęty zakres rozprawy, obejmujący lokalne sterowanie na wyizolowanych

skrzyżowaniach oraz symulacyjną ocenę wariantów sterowania, wyznacza kilka naturalnych kierunków kontynuacji prac.

Pierwszym kierunkiem jest wykorzystanie metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji bezpośrednio w algorytmie sterowania. W niniejszej pracy metody te zastosowano jako narzędzie oceny i porównania rezultatów uzyskanych dla wariantów sterowania. Takie zastosowanie powinno zostać utrzymane. Równolegle zasadne jest jednak zbadanie możliwości użycia WWD na poziomie operacyjnym, np. do dynamicznego porządkowania faz sygnalizacyjnych, zgłoszeń priorytetowych albo możliwych interwencji w program sygnalizacji. W takim ujęciu poszczególne fazy lub zgłoszenia mogłyby być traktowane jako warianty decyzyjne oceniane na podstawie kryteriów lokalnych. Mogłyby one obejmować m.in. napełnienie pojazdów PTZ, odchylenie od harmonogramu, czas oczekiwania na obsługę, wpływ na relacje kolizyjne, długości kolejek oraz dopuszczalny zakres ingerencji w cykl. WWD pełniłoby wówczas dwie funkcje: operacyjną, związaną z bieżącym rankin-giem decyzji sterujących, oraz ewaluacyjną, związaną z końcową oceną rezultatów różnych strategii.

Drugim kierunkiem jest szersze uwzględnienie stochastycznego charakteru wyników symulacji w procedurze wielokryterialnej oceny. W pracy wykorzystywano powtórzenia symulacji, których wyniki następnie sprowadzono do wartości średnich. Takie podejście ogranicza wpływ losowości, ale upraszcza opis niepewności wyników. W dalszych badaniach warto rozważyć zastosowanie stochastycznych metod WWD, pozwalających uwzględnić nie tylko wartości średnie, lecz także rozrzut wyników, przedziały ufności, prawdopodobieństwo dominacji lub ryzyko pogorszenia wybranych kryteriów.

Trzecim kierunkiem jest rozwinięcie proponowanej metody sterowania w stronę adaptacyjnego doboru parametrów algorytmu sterowania. W niniejszej pracy ich wartości ustalano dla określonych warunków funkcjonowania poszczególnych poligonów doświadczalnych. W warunkach rzeczywistych zmiany natężenia i struktury ruchu oraz charakterystyki zgłoszeń PTZ mogą powodować, że w różnych okresach korzystne będą odmienne parametry sterowania. Zasadne jest zatem zbadanie możliwości bieżącego rozpoznawania warunków ruchu i przypisywania im najkorzystniejszego zestawu parametrów algorytmu.

Czwartym kierunkiem jest zastosowanie bardziej zaawansowanych technik decyzyjnych i predykcyjnych. Dotyczy to m.in. uczenia maszynowego, uczenia ze wzmocnieniem albo innych metod sztucznej inteligencji, które mogłyby wspierać dobór parametrów strategii, przewidywanie skutków obsługi danej fazy lub estymację przyszłego napełnienia.

Piątym kierunkiem jest rozszerzenie zakresu przestrzennego analiz. Rozprawa koncentrowała się na wyizolowanych skrzyżowaniach, co pozwoliło precyzyjnie ocenić lokalne skutki działania strategii. W praktyce decyzje priorytetowe mogą jednak oddziaływać na sąsiednie skrzyżowania, koordynację sygnalizacji oraz warunki ruchu w całym korytarzu transportowym. Zasadne jest więc sprawdzenie opracowanego podejścia na większych poligonach, obejmujących kilka powiązanych skrzyżowań, ciągi tramwajowe lub autobusowe oraz obszary o bardziej złożonej strukturze ruchu.

Szóstym kierunkiem jest rozszerzenie zakresu weryfikacji proponowanej metody sterowania priorytetowego na przypadki, w których pojazdy PTZ poruszają się po pasach wspólnych z TI. W takich warunkach samo przyznanie priorytetu sygnalizacyjnego może być niewystarczające, jeżeli pojazd PTZ nie ma możliwości dojazdu do linii zatrzymania z powodu kolejki pojazdów. Dalsze badania powinny więc uwzględniać położenie pojazdu w kolejce, możliwość faktycznego skorzystania z priorytetu oraz wpływ zatoru na skuteczność interwencji sygnalizacyjnej.

Siódmym kierunek dotyczy pozyskiwania i przetwarzania informacji o napełnieniu pojazdów. W badaniach symulacyjnych możliwe było przyjęcie założenia o dostępności tej informacji. W warunkach rzeczywistych dane o napełnieniu mogą być jednak obciążone

błędami pomiarowymi, opóźnieniami transmisji lub niepełną dostępnością. W dalszych pracach warto zatem sprawdzić odporność metody na różną jakość danych oraz porównać źródła ich pozyskiwania, takie jak automatyczne liczniki pasażerów, systemy biletowe, dane historyczne lub metody estymacyjne. W przypadku braku bieżących danych wejściem do algorytmu mogłaby być również wartość estymowana, np. średnie napełnienie przypisane do danego kursu, kierunku i okresu dnia. Wpływ zastąpienia wartości bieżącej wartością średnią na trafność decyzji sterujących wymaga jednak odrębnej weryfikacji.

Z tym kierunkiem wiąże się możliwość uwzględnienia prognozowanego napełnienia oraz popytu pasażerskiego na dalszym odcinku trasy. Aktualne napełnienie opisuje stan w chwili zgłoszenia, ale nie zawsze odzwierciedla znaczenie kursu w kolejnych fragmentach linii. Pojazd o niewielkim napełnieniu może obsługiwać odcinek, na którym oczekuje wielu pasażerów, natomiast pojazd silnie napełniony może znajdować się blisko końca trasy. Włączenie do algorytmu informacji o prognozowanym popycie, liczbie pasażerów oczekujących na kolejnych przystankach lub znaczeniu przesiadek mogłoby rozszerzyć spektrum decyzji priorytetowych.

Kolejnym kierunkiem jest weryfikacja metody w środowisku zbliżonym do wdrożeniowego. Obejmuje to testy typu *software-in-the-loop* lub *hardware-in-the-loop*, a w dalszej perspektywie również pilotażowe zastosowanie algorytmu w rzeczywistym systemie sterowania ruchem. Takie badania pozwoliłyby ocenić wpływ opóźnień transmisji danych, ograniczeń sterowników, niedoskonałości detekcji, wymagań bezpieczeństwa oraz procedur eksploatacyjnych na możliwość praktycznego wykorzystania metody.

Dalszego rozwinięcia wymagają także metody szacowania oddziaływania środowiskowego. W pracy uwzględniono kryterium emisji CO₂, co pozwoliło rozszerzyć ocenę strategii poza klasyczne miary ruchowe. W kolejnych badaniach można rozważyć bardziej szczegółowe modele emisji, obejmujące dodatkowe składniki spalin, zużycie energii, typ napędu pojazdów, udział pojazdów elektrycznych oraz wpływ zatrzymań i ruszania z postoju na energochłonność ruchu. Istotne byłoby także porównanie dokładności modeli zastępczych z wynikami uzyskiwanymi z bardziej zaawansowanych narzędzi emisyjnych.

Wskazane kierunki pokazują, że zarówno opracowana metoda sterowania, jak i metodyka badań mogą stanowić podstawę dalszych prac nad bardziej adaptacyjnym i zorientowanym pasażersko sterowaniem ruchem miejskim. Szczególne znaczenie mają trzy obszary: rozwój algorytmów decyzyjnych, rozszerzenie analiz na większe układy sieciowe oraz weryfikacja praktyczna wykorzystania danych o napełnieniu pojazdów PTZ w systemach sterowania sygnalizacją świetlną.

BIBLIOGRAFIA

1. Abdelhalim A., Abbas M.: *A Value Proposition of Cooperative Bus-Holding Transit Signal Priority Strategy in Connected and Automated Vehicles Environment*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 23, 2022, s. 9301 – 9306, DOI: 10.1109/TITS.20-21.3086776
2. Abhilash M., Magadum H., Benoygopal E., Satheesh G., Rosayyan P.: *Bus Priority System for Heterogeneous Traffic Conditions*, 2022 First International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT), 2022, s. 20–22, DOI: 10.1109/ICEEICT53079.2022.9768536
3. Abolfathi S., Saffarzadeh M., Mirzahosseini H., Hosseini S.: *Signalized intersection delay analysis using transit signal priority (TSP) and dedicated short-range communication (DSRC) system for bus rapid transit (BRT)*, Innovative Infrastructure Solutions, Vol. 7, 2022, s. 1–19, DOI: 10.1007/s41062-022-00892-y
4. Adamski A.: *Inteligentne Systemy Transportowe: sterowanie, nadzór i zarządzanie*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2003
5. Ahmed T., Liu H., Gayah V.: *OCC-MP: A Max-Pressure framework to prioritize transit and high occupancy vehicles*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 166, 2024, s. 1 – 19, DOI: 10.1016/j.trc.2024.104795
6. Aleksandrowicz J., Piwowarczyk M.: *Sposoby detekcji pojazdów transportu zbiorowego i ich funkcjonalność*, Transport Miejski i Regionalny, Vol. 5, 2016, s. 49–52.
7. Aleksandrowicz J., Strózek A.: *Priorytet dla pojazdów transportu zbiorowego w programie sygnalizacji świetlnej na podstawie liczby pasażerów w pojeździe*, Transport Miejski i Regionalny, Vol. 3, 2021, s. 14–18
8. Al-Hyasat E., Alhadidi T. I.: *Evaluating the performance of implementing regionally coordinating bus priority signals under different control schemes*, Computational Urban Science, Vol. 4, 2024, s. 1–16, DOI: 10.1007/s43762-024-00131-3
9. Anderson P., Daganzo C.F.: *Effect of transit signal priority on bus service reliability*, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 132, 2020, s. 2–14, DOI: 10.1016/j.trb.20-19.01.016
10. Barceló J.: *Models, Traffic Models, Simulation, and Traffic Simulation*, w: J. Barceló (red.): *Fundamentals of Traffic Simulation*, Springer, New York, 2010, s. 1–62
11. Bauer M., Szarata A.: *Wykorzystanie techniki GPS w podejmowaniu decyzji o lokalizacji przystanków tramwajowych na przykładzie projektu Galileo Signal Priority*, TTS Technika Transportu Szynowego: koleje, tramwaje, metro, Vol. 21, 2014, s. 29–32
12. Bauer M.: *Identyfikacja zachowań kierowców na pasach autobusowych*, Logistyka, Vol. 3, 2012, s. 93–102
13. Bąk R., Ostrowski K.: *Analiza konieczności kalibracji programu Vissim w modelowaniu skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*, Logistyka, 2014, Vol 6, s. 1–10
14. Behbahani H., Poorjafari M.: *Passenger-based adaptive transit signal priority for BRT systems with multiple loading areas*, IET Intelligent Transport Systems, Vol. 18, 2024, s. 1089–1108, DOI: 10.1049/itr2.12488
15. Bie Y., Liu Z., Wang H.: *Integrating Bus Priority and Presignal Method at Signalized Intersection: Algorithm Development and Evaluation*, Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, Vol. 146, 2020, s. 1 – 11, DOI: 10.1061/JTEPBS.0000360
16. Browne D., Ryan L.: *Comparative analysis of evaluation techniques for transport policies*, Environmental Impact Assessment Review, Vol. 31, 2011, s. 226–233, DOI: 10.1016/j.eiar.2010.11.001
17. Burstein F., Holsapple C.W. (red.): *Handbook on Decision Support Systems 1: Basic Themes*, International Handbooks on Information Systems, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2008, DOI: 10.1007/978-3-540-48713-5

18. Carlsson C., Fullér R.: *Fuzzy multiple criteria decision making: Recent developments*, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 78, 1996, s. 139–153, DOI: 10.1016/0165-0114(95)00165-4
19. Carson J. S. II: *Introduction to Modelling and Simulation*, w: Kuhl M. E., Steriger N. M., Armstrong F. B., Joines J. A. (red.): *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, IEEE, Piscataway, 2005, s. 16–23
20. Cejrowski M., Borowski Ł.: *Projekt ITS Poznań. Projekt sterowania sygnalizacją świetlną – skrzyżowanie nr 3 ul. Most Dworcowy – ul. Głogowska – ul. Roosevelta w Poznaniu*, Poznań, 2015
21. Charnes A., Cooper W.: *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*. John Wiley & Sons, New York, 1961
22. Chen J.: *Research on Bus Priority Method for Induction Coordination*, Intelligent Transportation and Smart Cities, Vol. 55, 2024, s. 65 – 75, DOI: 10.3233/ATDE240376
23. Cheng G., Liu X., Pei Y.: *A review of research on public transport priority based on CiteSpace*, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Vol. 10, 2023, s. 1118–1147
24. Chow A., Li S., Zhong R.: *Multi-objective optimal control formulations for bus service reliability with traffic signals*, Transportation Research B: Methodological, Vol. 103, 2017, s. 248–268, DOI: 10.1016/j.trb.2017.02.006
25. Christofa E., Ampountolas K., Skabardonis A.: *Arterial traffic signal optimization: A person-based approach*. Transportation Research Part C, Vol. 66, 2016, s. 27–47, DOI: 10.1016/j.trc.2015.11.009
26. Christofa E., Skabardonis A.: *Traffic signal optimization with application of transit signal priority to an isolated intersection*, Transportation Research Record, 2011, s. 192–201
27. Ciesielski M.: *Koszty kongestii transportowej w miastach*, Akademia Ekonomiczna w Poznaniu, Poznań, 1986.
28. Colombaroni C., Fusco G., Isaenko N.: *A Simulation-Optimization Method for Signal Synchronization with Bus Priority and Driver Speed Advisory to Connected Vehicles*, Transportation Research Procedia, Vol. 45, 2020, s. 890–897, DOI: 10.1016/j.trpro.2020.02.079
29. Czerepicky A., Krukowicz T., Górka A., Szustek J.: *Traffic Light Priority for Trams in Warsaw as a Tool for Transport Policy and Reduction of Energy Consumption*, Sustainability, Vol. 13, 2021, s. 1–22, DOI: 10.3390/su13084180
30. De Keyser O., Hillewaere M., Audenaert P., Maenhout B.: *Optimising the public transport priority at road intersections*, IET Intelligent Transport Systems Vol. 12, 2018 s. 986 – 994, DOI: 10.1049/iet-its.2018.5133
31. Desta R., Tóth J.: *Competence of bus rapid transit systems coupled with transit signal priority at signalized junctions*, Transport and Telecommunication, Vol. 23, 2022, s. 81 – 92, DOI: 10.2478/ttj-2022-0008
32. Diakaki C., Papageorgiou M., Papamichail I., Malandraki G., Dinopoulou V.: *State-of-the-art and practice review of public transport priority strategies*, IET Intelligent Transport Systems, Vol. 9, 2015, s. 391–406
33. Doumpos M., Zopounidis C.: *Multicriteria Decision Aid Classification Methods*, Springer New York, 2002, DOI: 10.1007/b101986
34. Drabicki A., Szarata A., Kucharski R.: *Suppressing the effects of induced traffic in urban road systems: impact assessment with macrosimulation tools – results from the city of Krakow (Poland)*, Transportation Research Procedia, Vol. 47, 2020, s. 131–138.
35. Duranton G., Turner M. A.: *The fundamental Law of Road Congestion: Evidence from US Cities*, American Economic Review, Vol. 101, 2011, s. 2616–2652.
36. Dziaduch I., Peternek P.: *Assessing Public Transport Quality Using AHP and SUTI Indicator 4: A Case Study of the Sustainable Mobility Plan in Wrocław, Poland*, Sustainability, Vol. 16, 2024

37. Efimenko D., Bogumil V., Vlasov V., Demin V., Akhterov A.: *Priority transfer management algorithm, based on interaction of the public transport dispatch systems information and traffic lights control*, Transport and Telecommunication, Vol. 19, 2018, s. 315–324, DOI: 10.2478/ttj-2018-0026
38. Fierek S., Gawełek L., Góral-Gawełek E., Pluta G.: *Priorytety w ruchu dla środków transportu zbiorowego oraz rowerów na przykładzie bus-pasa na ulicy Garbary w Poznaniu*, WJTE, Vol. 120, 2018, s. 111–121, DOI: 10.5604/01.3001.0014.4731
39. Fierek S., Szarata A., Żak J.: *Wykorzystanie symulacyjnych modeli podróży i wielokryterialnej metody rankingowej do projektowania rozbudowy sieci tramwajowej*, Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, Oddział w Krakowie, Vol. 2, 2012, s. 87–98
40. Figueira J., Mousseau V., Roy B.: *ELECTRE Methods*, w: Figueira J., Greco S., Ehrgott M.: *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art. Surveys*, Springer, Nowy Jork, 2005, s. 133 - 153
41. Frost M., Isan S.: *Comparison of noise impacts from urban transport*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport, Vol. 160, 2007, s. 165–172
42. Furth P. G., Muller T. H. J.: *Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service Quality with Less Traffic Disruption*, Transportation Research Record, Vol. 1731, 2000, s. 23–30
43. Furth P. G., SanClemente J. L.: *Near side, far side, uphill, downhill: Impact of bus stop location on bus delay*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2006, No. 1971 s. 66–73
44. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M.: *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2011.
45. Gajda J.: *Pomiary parametrów ruchu drogowego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2015
46. Gamper C. D., Turcanu C.: *On the governmental use of multi-criteria analysis*, Ecological Economics, Vol. 62, 2007, s. 298–307, DOI: 10.1016/j.ecolecon.2007.01.010
47. Gershon M.: *Model choice in multi-objective decision-making in natural resource systems*, Praca doktorska, University of Arizona, 1981
48. Gipps P. G.: *A behavioural car-following model for computer simulation*, Transportation Research Part B: Methodological, 1981, Vol. 15, s. 105–111, DOI: 10.1016/0191-2615-(81)90037-0
49. Girijan A., Vanajakshi L., Chilukuri B.: *Dynamic Thresholds Identification for Green Extension and Red Truncation Strategies for Bus Priority*, IEEE Access, Vol. 9, 2021, s. 64291 – 64305, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3074361
50. Göransson J., Andersson H.: *Factors that make public transport systems attractive: a review of travel preferences and travel mode choices*, European Transport Research Review, Vol. 15, 2023, s. 1–14
51. Greco S., Słowiński R., Wallenius J.: *Fifty years of multiple criteria decision analysis: From classical methods to robust ordinal regression*, European Journal of Operational Research, 2025, Vol. 323, s. 351–377, DOI: 10.1016/j.ejor.2024.07.038
52. Greenshields B. D.: *A study of traffic capacity*, w: Highway Research Board Proceedings, 1935, Vol. 14, s. 448–477
53. Guo G., Wang Y.: *An integrated MPC and deep reinforcement learning approach to trans-priority active signal control*, Control Engineering Practice, Vol. 110, 2021, s. 1–12, DOI: 10.1016/j.conengprac.2021.104758
54. Guo J., Wu X., Wu H., Liu Y., Zhang B.: *Bus Signal Priority System Based On GNSS Electronic Fence Technology*, ICMSS 2021: Proceedings of the 5th International Conference on Management Engineering, Software Engineering and Service Sciences, 2021, s. 17 – 22, DOI: 10.1145/3459012.3459015

55. Handajani M., Jayati A., Ardina E., Hasrito E., Octaviany S.: *Bus Signal Priority: Enhancing Urban Mobility and Communication Efficiency in Smart Cities in Semarang*, Indonesia, Journal of Communications, Vol. 20, 2025, s. 491 – 500, DOI: 10.12720/jcm.20.4.491-500
56. He J., Wang F., Duan Y., Yang Z., Yang J.: *Energy-efficient train timetable optimization for tram system under multi-signal priority strategies*, Scientific Reports, Vol. 15, 2025, s. 1 – 20, DOI: 10.1038/s41598-025-91891-3
57. Hoogendoorn S. P., Bovy P. H. L.: *State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2001, Vol. 215, s. 283–303, DOI: 10.1243/0959651011541120
58. https://cgi.ptvgroup.com/vision-help/VISSIM_2022_ENG/Content/1_Einfuehrung/Zusatz-module.htm, dostęp: [04.09.2025]
59. <https://eclipse.dev/sumo/>, dostęp: [20.07.2026]
60. https://mtmug.iowadot.gov/Presentations/PTV-MTMUG_Giese-Hayes-2008.PDF, dostęp: [13.10.2025]
61. <https://sjp.pwn.pl/slowniki/priorytet.html>, dostęp: [13. 09. 2025]
62. <https://stadtraum.pl/LISA.pdf>, dostęp: [15.10.2024]
63. <https://stat.gov.pl/>, dostęp: [16.08.2025]
64. <https://www.aimsun.com/>, dostęp: [20.06.2022]
65. <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/air-quality-solutions/environmentally-sensitive-traffic-management/>, dostęp: [04.09.2025]
66. <https://www.geoportal.gov.pl/>, dostęp: [14.06.2022]
67. <https://www.gevas.eu/losungen/crossig>, dostęp: [15.10.2024]
68. <https://www.hbefa.net/>, dostęp: [10.09.2024]
69. <https://www.itna.tugraz.at/en/research/areas/em/simulation/phem.html>, dostęp: [12.05.2020]
70. <https://www.mpk.poznan.pl/poznanski-szybki-tramwaj-konczy-25-lat/>, dostęp: [13.09.2025]
71. <https://www.mpk.poznan.pl/remonty-torowisk-na-ulicach-glogowskiej-i-kornickiej-pocza-tek-prac-28-czerwca-br/#pid=1>, dostęp: [13.09.2025]
72. <https://www.mtp.pl/pl/uslugi/podroz-i-pobyt/webcam/>, dostęp: [21.02.2023]
73. <https://www.oponeo.pl/ranking-miast-przyjaznych-kierowcom>, dostęp: [18.08.2025]
74. <https://www.poznan.pl/mim/info/news/przystanki-wiedenskie-korzystanie-przez-pieszch-i-kierowcow.174614.html>, dostęp: [13. 09. 2025]
75. https://www.ptvgroup.com/en/terms_of_use_estm_en.pdf?inline, dostęp: [10.09.2024]
76. <https://www.ptvgroup.com/pl/products/ptv-vissim>, dostęp: [12.05.2020]
77. <https://www.schlothauer.de/en/software-lisa>, dostęp: [12.05.2020]
78. <https://www.scopus.com/home.uri>, dostęp: [13.10.2025]
79. <https://www.ztm.poznan.pl/infrastruktura/przystanki-typu-wiedenskiego-i-antyzatoki/>, dostęp: [13.09.2025]
80. Imran N., Vanajakshi L.: *Bus Signal Priority Solution for Non-Uniform Vehicle Arrival Conditions*, IEEE Access, Vol. 13, 2025, s. 36537 – 36549, DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3544873
81. Iwanowicz D., Hasiewicz J. *Dylematy interpretacyjne stosowania sygnałów drogowych ze szczególnym uwzględnieniem sygnalizatora S-2 w „bezpiecznym” zarządzaniu ruchem drogowym, Część II/III. Paragraf na Drodze*, 2023, Vol. 4, s. 29–57.
82. Jacyna M.: *Wybrane zagadnienia modelowania systemów transportowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2009.

83. Jaskiewicz A., Słowiński R.: *The LBS package – a microcomputer implementation of the Light Beam Search method for the multiple objective non-linear mathematical programming*, Working Paper of the International Institute for Applied Systems Analysis, No. WP-94-07, 1994, Luxemburg, Austria
84. Ji Y., Tang Y., Shen Y., Du Y., Wang W.: *An Integrated Approach for Tram Prioritization in Signalized Corridors*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 21, 2020, s. 2386–2395, DOI: 10.1109/TITS.2019.2918204
85. Jon K., Han K., Jo C., Kim C.: *Traffic signal priority control for public transport rapid transit based on a step-by-step prediction algorithm*, Public Transport, Vol. 17, 2025, s. 267 – 280, DOI: 10.1007/s12469-024-00364-9
86. Kaczmarek M., Rychlewski J.: *Detekcja jako niezbędny element systemu zmiennoczasowej sygnalizacji świetlnej w miastach*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Transport, Vol. 52, 2004, s. 233–241
87. Kaczorowski M., Ułamek K.: *Porównanie metod zbierania danych dla mikroskopowej symulacji ruchu w programie Vissim na przykładzie planowania przestrzennego fragment osiedla Złotno w Łodzi*, Konwersatorium Wiedzy o Mieście, Vol. 38, 2025, s. 7–23, DOI: 10.18778/2543-9421.10.01
88. Kim M., Han Y., Kim Y.: *Coordinated Transit Signal Priority and Vehicle Guidance for Automated Buses*, IEEE Access, Vol. 12, 2024, s. 117143–117153, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3419901
89. Klein L. A., Mills M. K., Gibson D. R. P.: *Traffic Detector Handbook: Third Edition*, Vol. I - II, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2006, Report No. FHWA-HRT-06-108 / FHWA-HRT-06-139
90. Köksalan M., Wallenius J., Zionts S.: *An Early History of Multiple Criteria Decision Making*, w: Greco S., Ehrgott M., Figueira J. (red.): *Multiple Criteria Decision Analysis*, International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 233, Springer, New York, NY, 2016, s. 3–17, DOI: 10.1007/978-1-4939-3094-4_1
91. Köksalan M., Wallenius J., Zionts S.: *Multiple Criteria Decision Making: From Early History to the 21st Century*, World Scientific, 2011, DOI: 10.1142/8042
92. Koopmans T.: *An Analysis of Production as an Efficient Combination of Activities*, w: Koopmans T. (red.): *Activity Analysis of Production and Allocation.*, Cowles Commission for Research in Economics, Monograph No. 13, John Wiley & Sons, New York, 1951
93. Krukowicz T.: *Sygnalizatory S-2 oraz wyświetlacze czasu w sygnalizacji świetlnej*, Materiały Budowlane, 2019, Vol. 561, s. 48–49
94. Krych A.: *Energochłonność jako kryterium optymalizacji miejskiego transportu publicznego*, Transport Miejski i Regionalny, Vol. 6, 2019, s. 10–18
95. Kuhn H., Tucker A.: *Nonlinear Programming*, w: Neyman J. (red.): *Proceedings of the 2nd Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, University of California Press, Berkeley, 1951, s. 481–491
96. Lai Y., Xu X., Easa S., Lian P.: *Modeling arterial signal coordination for bus priority using mobile phone GPS data*, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 47, 2020, s. 1094–1104, DOI: 10.1139/cjce-2018-0601
97. Law A. M.: *Simulation Modeling and Analysis*, 5th ed., McGraw-Hill Education, New York, 2015
98. Lay M. G.: *Measuring Traffic Congestion*. Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practise, Vol. 20, No. 2, 2011, s. 42–53
99. Lee W., Kao Y., Wang M.: *The Impacts of Bus Priority Signs on Energy and Emissions*, Proceedings - 2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan, ICCE-Taiwan 2022, 2022, s. 313–314, DOI: 10.1109/ICCE-Taiwan55306.2022.9869261
100. Leško M., Guzik J.: *Sterowanie Ruchem drogowym, sygnalizacja świetlna i detektory ruchu pojazdów*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.

101. Li H., Li S., Zhang X.: *Coordination Optimization of Real-Time Signal Priority of Self-Driving Buses at Arterial Intersections Considering Private Vehicles*, Applied Sciences, Vol. 13, 2023, s. 1 – 15, DOI: 10.3390/app131910803
102. Li J., Liu Y., Yang H., Chen B.: *Bus Priority Signal Control Considering Delays of Passengers and Pedestrians of Adjacent Intersections*, Journal of Advanced Transportation, Vol. 2020, 2020, s. 1–12, DOI: 10.1155/2020/3935795
103. Li S., Xu H., Liang Z., Mao C.: *Bus Signal Priority Control Method Based on Video Detection Technology at Urban Intersection*, 2020 IEEE 5th International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC), 2020, s. 256–260, DOI: 10.1109/ICIVC50857.2020.9177475.
104. Lian P., Wu Y., Li Z., Keel J., Guo J., Kang Y.: *An Improved Transit Signal Priority Strategy for Real-World Signal Controllers that Considers the Number of Bus Arrivals*, Sustainability, Vol. 12, 2020, s. 1–22, DOI: 10.3390/su12010287
105. Lighthill M. J., Whitham G. B.: *On kinematic waves II: A theory of traffic flow on long crowded roads*, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1955, Vol. 229, s. 317–345, DOI: 10.1098/rspa.1955.0089
106. Lin Y., Yang X., Zou N., Franz M.: *Transit Signal Priority Control at Signalized Intersections: A Comprehensive Review*, Transportation Letters The International Journal of Transportation Research, Vol. 7, 2014, s. 1–13, DOI: 10.1179/1942787514Y.0000000044
107. Liu M., Zhao Y., Chu F., Zheng F., Chu C.: *A Mathematical Model for Bus Scheduling with Conditional Signal Priority*, IFIP Advances in Information and Communication Technology, Vol. 632, 2021, s. 274 – 281, DOI: 10.1007/978-3-030-85906-0_31
108. Liu M., Zhao Y., Chu F., Zheng F., Chu C.: *New MDP Model and Learning Algorithm for Bus Scheduling Problem with Conditional Signal Priority*, IFAC PapersOnLine, Vol. 55, 2022, s. 3160 – 3165, DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.10.215
109. Macfarlane G., Sheffield M., Bennett L., Schultz G.: *The Effect of Transit Signal Priority on Bus Rapid Transit Headway Adherence*, Transport Findings, 2021, s. 1 – 6, DOI: 10.32866/001c.24499
110. Machelski A.: *Identyfikacja niewłaściwych zachowań kierowców na pasach autobusowych w Poznaniu*, Transport Miejski i Regionalny, Vol. 5, 2021, s. 9–14
111. Mansouryar S., Shojaei K., Colombaroni C., Fusco G.: *A microsimulation study of bus priority system with pre-signaling*, Transportation Research Procedia, Vol. 78, 2024, s. 507–514, DOI: 10.1016/j.trpro.2024.02.063
112. Matoga P.: *Przystanki wiedeńskie w Krakowie*, Transport Miejski i Regionalny, Vol. 6, 2013, s. 41–45
113. Merksiz J., Gis W.: *Exhaust emission from vehicles under real conditions*, Proceedings of the Ninth Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization: APISCEU, Beijing, November 02-06, 2008.
114. Merksiz-Guranowska A., Mroziak M.: *Sustainable Transport and Selected Environmental Assessment Tools*, European Research Studies Journal Vol. 28, 2025, s. 635–645
115. Mogridge M. J. H.: *The self-defeating nature of urban road capacity policy*, Transport Policy, Vol. 4, 1997, s. 5–23
116. Molecki A.: *Powiązanie systemów nadzoru transportu publicznego i sygnalizacji świetlnej dla podnoszenia jakości obsługi komunikacją zbiorową*, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, Vol. 17, 2016, s. 30–35
117. Mouwen A.: *Drivers of customer satisfaction with public transport services*, Transportation Research Part A: Policy and practice, Vol 78, 2015, s. 1–20
118. Mumford L.: *The sky line: the roaring traffic's boom – III*, The New Yorker, 16 April, 1955, s. 78.

119. Neila B., Mayorano F. J., Lotito P. A., Haj S. H., Lebacque J. P.: *Public transport priority for multimodal urban traffic control*, Cybernetics and Information Technologies, Vol. 15, 2015, s. 17–36
120. Ni Y., Lo H., Hsu Y., Huang H.: *Exploring the effects of passive transit signal priority design on bus rapid transit operation: a microsimulation-based optimization approach*, Transportation Letters, Vol. 14, 2022, s. 14–27, DOI: 10.1080/19427867.2020.1805681
121. Niedzielski M., Goliszek S., Górka A.: *Signals, tracks, and trams: public transport signal priority impact on job accessibility over time*, Scientific Reports, Vol. 14, 2024, s. 1–16, DOI: 10.1038/s41598-024-74960-x
122. Noland R. B.: *Relationships between highway capacity and induced vehicle travel*, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 35, 2001, s. 47–72
123. Okoński G.: *Remont PST: Już wkrótce stanie Poznański Szybki Tramwaj – mają go zastąpić autobusy. Sprawdź, jakie linie pojadą “za tramwaj”*, Głos Wielkopolski, 14.07.2022. Artykuł dostępny pod adresem: <https://gloswielkopolski.pl/remont-pst-juz-wkrotce-stanie-poznanski-szybki-tramwaj-maja-go-zastapic-autobusy-sprawdz-jakie-linie-pojada-za-tramwaj/ar/c1-16493375>, dostęp: [13.09.2025]
124. Ortúzar J. de D., Willumsen L. G.: *Modelling transport*, 4th ed., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2011
125. Oskarbski J., Kuprewicz B.: *Priorytety dla transportu zbiorowego z wykorzystaniem systemu sterowania ruchem*, Czasopismo Logistyka, Vol. 3, 2014, s. 4878–4887
126. Paszkowski J., Kucharski R.: *Paradoksy przepustowości miejskiej sieci drogowej i sposoby ich odwzorowania w modelu czterostadiowym*, Transport Miejski i Regionalny, Vol. 10, 2017, s. 5–11
127. Pipes L. A.: *An Operational Analysis of Traffic Dynamics*, Journal of Applied Physics, 1953, Vol. 24, s. 274–281, DOI: 10.1063/1.1721265
128. Prikster A. A. B.: *Principles of Simulation Modelling*, w: Banks J. (red.): *Handbook of Simulation*, John Wiley & Sons, New York, s. 31–51
129. PTV Planung Transport Verkehr GmbH: *PTV Vissim 2022 Manual* [instrukcja użytkownika], Karlsruhe, 2023
130. Ren Y., Zhao J., Zhou X.: *Optimal design of scheduling for bus rapid transit by combining with passive signal priority control*, International Journal of Sustainable Transportation, Vol. 15, 2021, s. 407–418, DOI: 10.1080/15568318.2020.1740954
131. Richards P. I.: *Shock waves on the highway*, Operations Research, 1956, Vol. 4, s. 42–51, DOI: 10.1287/opre.4.1.42
132. Roy B., Bouyssou D.: *Decision-aid: an elementary introduction with emphasis on multiple criteria*, Cahiers et Documents du LAMSADE, No. 106, LAMSADE, Université Paris-Dauphine, Paris, 1991, s. 1–18
133. Roy B., Vincke P.: *Multicriteria analysis: survey and new directions*, European Journal of Operational Research, Vol. 8, No. 3, 1981, s. 207–218, DOI: 10.1016/0377-2217(81)90168-5
134. Roy B.: *The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods*, w: Bana e Costa C. A. (red.): *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, Springer, Berlin, 1990, s. 155–183, DOI: 10.1007/978-3-642-75935-2_8
135. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach, wraz z załącznikami nr 1-4. (Dz. U. nr 220 z 23 grudnia 2003 r., pozycja 2181).
136. Rychlewski J.: *Doświadczenia ze stosowania priorytetu tramwajowego w Poznaniu*, Przegląd Komunikacyjny, Vol. 4-6, 2010, s. 42–47
137. Rydzkowski W., Wojewódzka-Król K. (red.): *Transport*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2000

138. Sawicka H., Wiedemann R.: *The Redesign Methodology of a Transportation Network*, w: Sierpiński G., Macioszek E. (red.): *Decision Support Methods in Modern Transportation Systems and Networks. Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, 2021, Vol. 208, DOI: 10.1007/978-3-030-71771-1_1
139. Sawicka H.: *The methodology of solving stochastic multiple criteria ranking problems applied in transportation*, *Transportation Research Procedia*, Vol. 47, 2020, s. 219–226, DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.092
140. Sawicki P.: *Wielokryterialny wybór operatora usług logistycznych*, *Logistyka*, Vol. 4, 2001, s. 59–66
141. Schmidt K., Steinmetz N., Margreiter M.: *Bus Priority Procedure for Signalized Intersections Based on Bus Occupancy and Delay*, *SUMO Conference Proceedings*, Vol. 5, 2024, s. 127–145, DOI: 10.52825/scp.v5i.1111
142. Seredynski M., Laskaris G., Viti F.: *Analysis of Cooperative Bus Priority at Traffic Signals*, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 21, 2020, s. 1929 – 1940, DOI: 10.1109/TITS.2019.2908521
143. Shen W., Zou L., Deng R., Wu H., Wu J.: *A Bus Signal Priority Control Method Based on Deep Reinforcement Learning*, *Applied Sciences*, Vol. 13, 2023, s. 1–14, DOI: 10.3390/app13116772
144. Siwek K.: *Modele mikrosymulacyjne na Wyspach Brytyjskich, teoria i praktyka, część 1*, *Transport Miejski i Regionalny*, 2017, Vol. 8, s. 25–32
145. Smith H. R., Hemily B., Ivanovic M.: *Transit Signal Priority (TSP): A Planning and Implementation Handbook*, ITS America, Washington, DC, 2005
146. Sobota A.: *Wspomaganie decyzji w procesie doboru typu skrzyżowania drogowego w miastach*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2019
147. Solecka K., Szarata A., Nosal Hoy K.: *The Application of the Multiple Criteria Decision Aid to Assess Transport Policy Measures Focusing on Innovation, Sustainability*, Vol. 11, 2019, DOI: 10.3390/su11051472
148. Solecka K.: *Wielokryterialna ocena wariantów zintegrowanego systemu miejskiego transportu publicznego*, Praca Doktorska, Politechnika Krakowska, 2013
149. Sun X., Lin K., Jiao P., Lu H.: *Signal Timing Optimization Model Based on Bus Priority*, *Information*, Vol. 11, 2020, s. 1–17, DOI: 10.3390/info11060325
150. Sun Y., Li J., Wei X., Jiao Y.: *Tandem Design of Bus Priority Based on a Pre-Signal System*, *Sustainability*, Vol. 13, 2021, s. 1–19, DOI: 10.3390/su131810109
151. Szustek J.: *Modelowanie mikroskopowe w kontekście testowania algorytmów z priorytetem dla tramwajów*, *Transport Miejski i Regionalny*, Vol. 7, 2016, s. 24–28
152. Szymalski W.: *Prawo Lewisa-Mogridge’a w warszawskich inwestycjach*, *Przegląd Komunikacyjny*, Vol. 3, 2014, s. 26–31
153. Szymalski W.: *Energy and CO₂ emission intensities of various modes of passenger transport in Warsaw*, *Transport Problems*, Vol. 16, 2021, s. 131 – 140
154. Światowa Komisja ds. Środowiska i Rozwoju (WCED): *Report of the World Commission on Environment and Development: “Our Common Future”*, United Nations, General Assembly A/42/427, 1987. Materiał dostępny na stronie: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>, dostęp: [04.09.2025]
155. Tarski I.: *Czynnik czasu w procesie transportowym*. WKiŁ, Warszawa, 1976.
156. Tecle A.: *Choice of multi-criteria decision-making techniques for watershed management*, Praca doktorska, University of Arizona, 1988
157. Thakkar J. J.: *Multi-Criteria Decision Making*, Springer Nature Singapore Pte Ltd, Singapore, 2021, DOI: 10.1007/978-981-33-4745-8

158. Thonnam B., Chilukuri B., Vanajakshi L.: An analytical approach to real-time bus signal priority system for isolated intersections, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 26, 2022, s. 145 – 167, DOI: 10.1080/15472450.2020.1797504
159. Transport for London: *Traffic Modelling Guidelines*, Version 4.0, London, 2021, Dokument dostępny pod adresem: <https://content.tfl.gov.uk/traffic-modelling-guidelines.pdf>, dostęp: [07.02.2026]
160. Trzaskalik T.: *Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Przegląd metod i zastosowań*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Organizacja i Zarządzanie, 2014, z. 74, nr. Kol. 1921, s. 239–263
161. Tundys B.: *Logistyka miejska. Koncepcje, systemy, rozwiązania*, Centrum Doradztwa i Informacji Difin, Warszawa, 2008 r.
162. Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r.: *Prawo o ruchu drogowym* (tekst jednolity: Dz.U. z 2024 r. poz. 1251). Materiał dostępny na stronie: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU19970980602/U/D19970602Lj.pdf>, dostęp: [11.09.2025]
163. van Wageningen-Kessels F., van Lint H., Vuik K., Hoogendoorn S. P.: *Genealogy of traffic flow models*, *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2014, Vol. 4, s. 445–473, DOI: 10.1007/s13676-014-0045-5
164. Vincke P.: *Analysis of multicriteria decision aid in Europe*, *European Journal of Operational Research*, Vol. 25, 1986, s. 160 - 168, DOI: 10.1016/0377-2217(86)90082-2
165. Vincke P.: *Multicriteria decision-aid*, Chichester: John Wiley & Sons, 1992
166. Wang F., Hao Z., Wang Y., Zhang C., Yang X.: *Machine Learning Transit Signal Priority Control of Bus Rapid Transit Based on Connected Vehicles Environment*, The 6th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 2021, s. 152–156, DOI: 10.1109/ICTIS54573.2021.9798410
167. Wang S.: *A flexible model-free tram signal priority method with a large coordination scope in China*, *Transportation Safety and Environment*, Vol. 6, 2024, s. 1 – 7, DOI: 10.1093/tse/tdad027
168. Wątróbski J., Jankowski J., Ziemia P., Karczmarczyk A., Ziolo M.: *Generalised framework for multi-criteria method selection*, *Omega*, Vol 86, 2019, s. 107–124, DOI: 10.1016/j.omega.2018.07.004
169. Wiedemann R., Sawicki P.: *Wybór strategii sterowania ruchem w kontekście priorytetyzacji transportu zbiorowego*, w: Rychlewski J., Fierek S.: *Przesunięcie modalne na rzecz zrównoważonych trybów mobilności*, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej. Oddział w Poznaniu, 2025, s. 117-120
170. Wiedemann R., Strug M.: *Projekt zmiany stałej organizacji ruchu na skrzyżowaniu Garbary-Estkowskiego*, Poznań, 2020.
171. Wiedemann R., Strug M.: *Wielowariantowa koncepcja optymalizacji ruchu tramwajowego obejmującego trzy linie tramwajowe funkcjonujące na terenie Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii, przebiegające przez miasta Bytom, Chorzów, Katowice, Świętochłowice i Sosnowiec*, 2021. Dokument dostępny pod adresem: <https://bip.metropolii-agzm.pl/artukul/34552/128721/wielowariantowa-koncepcja-optymalizacji-ruchu-tramwajowego>, dostęp: [10.09.2024]
172. Wiedemann R.: *Method of occupancy-based traffic light priority for public transport*, *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, Vol. 115, 2022, s. 227–248, DOI: 10.20858/sjsutst.2022.115.16
173. Wiedemann R.: *Simulation des Straßenverkehrsflusses*, Schriftenreihe des IfV, Institut für Verkehrswesen. Universität Karlsruhe, 1974.
174. Wittpohl M., Plötz P.-A., Urquhart N.: *Real Time Optimisation of Traffic Signals to Prioritise Public Transport*, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 12694, 2021, s. 162 – 177, DOI: 10.1007/978-3-030-72699-7_11

175. Wu B., Wang H., Wang Y., Zhai B., Xue T.: *A Collaborative Transit Signal Priority Method Considering Gaming among Traffic Participants*, Journal of Advanced Transportation, Vol. 2023, 2023, s. 1 – 12, DOI: 10.1155/2023/1974771
176. www.mpk.poznan.pl/tabor/moderus-gamma-lf04-ac-bd/, dostęp: [06.09.2025]
177. www.mpk.poznan.pl/tabor/solaris-urbino-18/, dostęp: [06.09.2025]
178. www.openstreetmap.org, dostęp: [10.09.2024]
179. www.tomtom.com/trafficindex, dostęp: [18.08.2025]
180. Zavadskas E. K., Turskis Z.: *Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: An overview*, Technological and Economic Development of Economy, Vol. 17, 2011, s. 397–427, DOI: 10.3846/20294913.2011.593291
181. Zdanowicz-Dejnak M.: *Zachowania kierowców na pasach autobusowych*, Transport Miejski i Regionalny, Vol. 8, 2012
182. Zeng X., Zhang Y., Jiao J., Yin K.: *Route-Based Transit Signal Priority Using Connected Vehicle Technology to Promote Bus Schedule Adherence*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 22, 2021, s. 1174–1184, DOI: 10.1109/TITS.2020.2963839
183. Zhai X., Guo F., Krishnan R.: *An Online Optimal Bus Signal Priority Strategy to Equalise Headway in Real-Time*, Information, Vol. 14, 2023, s. 1–18, DOI: 10.3390/info14020101
184. Zhang T., Du L.: *Optimization of Tram Scheduling under Passive Signal Priority Based on Fuzzy Mathematical Programming*, 2024 4th International Conference on Neural Networks, Information and Communication Engineering (NNICE), 2024, s. 1443–1451, DOI: 10.1109/NNICE61279.2024.10498273
185. Zhang X., Liu Y., Mu C.: *Optimizing Bus Priority Signal Control Considering Queue Length and Average Passenger Delay*, 2024 20th International Conference on Mobility, Sensing and Networking (MSN), 2024, s. 997–1002, DOI: 10.1109/MSN63567.2024.00136
186. Zhang Y.: *An adaptive pre-signal setting to provide bus priority under a coordinated traffic-responsive network*, 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2020, s. 1–6, DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294380
187. Zhou B., Hu S., Yang Y., Na X., Escibano J., Ma D., Jin S., Zhang B., Lee D.: *Transit Signal Priority Strategy With Heterogeneous Graph-Based Deep Reinforcement Learning for Autonomous Public Transit Vehicles*, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Vol. 10, 2025, s. 2174–2192, DOI: 10.1109/TIV.2024.3445299
188. Zhou R., Nousch T., Wei L., Wang M.: *Constrained traffic signal control under competing public transport priority requests via safe reinforcement learning*, Expert Systems With Applications, Vol. 284, 2025, s. 1 – 19, DOI: 10.1016/j.eswa.2025.127676
189. Ziemba P., Fabisiak L.: *Metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji w ocenie użyteczności serwisów internetowych*, Informatyka Ekonomiczna, 2011, Vol. 20, s. 303–312
190. Zmuda-Trzebiatowski P.: *Partycypacyjna ocena miejskich projektów transportowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2016

PRIORITY-BASED URBAN TRAFFIC CONTROL ACCOUNTING FOR PUBLIC TRANSPORT VEHICLE OCCUPANCY

Remigiusz WIEDEMANN

SUMMARY

This dissertation investigates public transport priority at isolated signalised intersections. The study is based on the premise that decisions about granting priority to a particular public transport trip, including the extent to which signal operation is modified, should reflect the vehicle's actual need for service rather than merely its arrival in the detection zone. The research therefore examines how priority levels can be adjusted according to the characteristics of individual requests and the potential effects of control decisions on other road users. Within this framework, public transport vehicle occupancy is treated as a key control variable, alongside schedule deviation and the time a vehicle has been waiting to be served.

The aim of the dissertation is to develop an urban traffic control method that uses these variables to determine the level of priority granted to public transport vehicles. The method is designed to reduce person delay and achieve a compromise solution across the selected evaluation criteria.

The proposed approach was evaluated using traffic microsimulation at three independent test sites with different geometric layouts and traffic conditions. At each site, an eight-stage research methodology developed as part of the dissertation was applied. The stages involved characterising the study area; specifying the basic parameters of the signal control plan; defining the control algorithm and strategies; developing a test environment; running simulations; selecting non-dominated solutions; ranking control variants; and recommending a solution and assessing whether the research objective had been met. The evaluation covered variants of the control strategy developed to implement the proposed method, together with variants of reference strategies that did not account for public transport vehicle occupancy.

The results confirmed that incorporating public transport vehicle occupancy information alongside the other decision inputs enabled reductions in average person delay at the sites studied. For this measure, the best-performing variants of the reference strategies yielded values approximately 4–7% higher than those achieved by the recommended variants, depending on the test site. Although the recommended variants did not always achieve the best values for the remaining measures, the multi-criteria evaluation identified them as favourable compromise solutions consistent with the specified decision-maker preferences. Sensitivity analysis confirmed that the recommendations were highly stable under small changes in these preferences. The developed method may thus provide a basis for further research on conditional and graded public transport priority. The research methodology can support the comparison and selection of control variants in design applications, whether or not the proposed control method is used.

ZAŁĄCZNIKI

1. Tabela zbiorcza przeglądu literatury
2. Model preferencji decydenta i jego warianty
3. Kod źródłowy modułu obliczeniowego
4. Zestawienie danych do budowy modelu regresji dla szacowania emisji CO₂
5. PDI – Plan sytuacyjny
6. PDI – Harmonogram kursowania pojazdów PTZ
7. PDI – Obliczenia czasów międzyzielonych
8. PDI – Przejścia międzyfazowe
9. PDI – Zestawienie detektorów
10. PDI – Wyniki eksperymentów symulacyjnych
11. PDI – Rankingi rozwiązań
12. PDII – Plan sytuacyjny
13. PDII – Harmonogram kursowania pojazdów PTZ
14. PDII – Obliczenia czasów międzyzielonych
15. PDII – Przejścia międzyfazowe
16. PDII – Zestawienie detektorów
17. PDII – Wyniki eksperymentów symulacyjnych
18. PDII – Rankingi rozwiązań
19. PDIII – Plan sytuacyjny
20. PDIII – Harmonogram kursowania pojazdów PTZ
21. PDIII – Obliczenia czasów międzyzielonych
22. PDIII – Przejścia międzyfazowe
23. PDIII – Zestawienie detektorów
24. PDIII – Wyniki eksperymentów symulacyjnych
25. PDIII – Rankingi rozwiązań