

Uniwersytet Morski w Gdyni

Wydział Nawigacyjny



ROZPRAWA DOKTORSKA

MODELOWANIE NIEZAWODNOŚCI OPERACYJNEJ MIEJSKIEJ SIECI TRANSPORTOWEJ W ASPEKCIE ODDZIAŁYWANIA PORTU

mgr inż. Monika Ziemska

Promotor: dr hab. Leszek Smolarek, prof. UMG

Promotor pomocniczy: dr inż. kpt. ż.w. Przemysław Wilczyński, prof. UMG

Gdynia 2020

Podziękowania

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania Panu dr hab. Leszkowi Smolarkowi, prof. UMG za nieocenioną pomoc udzieloną w trakcie przygotowywania pracy doktorskiej, cierpliwość, wyrozumiałość oraz ogrom wiedzy z zakresu modelowania matematycznego jak i niezawodności.

Chciałam wyrazić głęboką wdzięczność Panu dr inż. kpt. ż.w. Przemysławowi Wilczyńskiemu, prof. UMG, bez którego moja praca doktorska nie wyglądałaby spójnie, dziękuję w szczególności za pomoc w redagowaniu pracy oraz nieocenione uwagi związane z transportem morskim.

Chciałabym również podziękować rodzinie oraz partnerowi, za nieustanną motywację oraz ogrom wsparcia. W szczególności dziękuję moim rodzicom za wiarę we mnie na każdym etapie mojej edukacji.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów.....	3
1. Wstęp	8
2. Analiza literatury	11
3. Teza i cel pracy.....	14
4. Modele i metody oceny niezawodności operacyjnej systemów transportowych.....	15
4.1 Analiza działania miejskiej sieci transportowej dla miasta portowego.....	19
4.2 Uwarunkowania wpływające na ruch w Miejskiej Sieci Transportowej	30
4.3 Stany niezawodnościowe w Miejskiej Sieci Transportowej.....	51
4.4 Niezawodność operacyjna a infrastruktura.....	54
4.5 Niezawodność operacyjna a charakter awarii.....	57
4.6 Niezawodność operacyjna a struktura rodzajowa strumienia ruchu	60
4.7 Wykorzystanie metod markowskich i semi-Markowskich do modelowania wielostanowej niezawodności operacyjnej w transporcie	62
5. Niezawodność operacyjna Miejskiej Sieci Transportowej	73
5.1. Modele strukturalne do oceny niezawodności operacyjnej sieci transportowej	75
5.2. Systemy z rezerwą w Miejskiej Sieci Transportowej.	82
5.3. Metody poprawy niezawodności w Miejskiej Sieci Transportowej	93
5.4. Nadmiarowość w Miejskiej Sieci Transportowej	95
6. Metody symulacyjne w transporcie drogowym	97
6.1 Niezawodność operacyjna Miejskiej Sieci Transportowej w aspekcie związków korelacyjnych	100

6.2	Zastosowanie metod modelowania symulacyjnych	104
6.3	Model symulacyjny wycinka sieci drogowej prowadzącej do terenów portowych – analiza przypadku	109
7.	Wnioski	147
	Załącznik 1 – Metody matematyczne	151
	Załącznik 2 - Metoda Bow-Tie	154
	Załącznik 3 – Model ARIMA	155
	Załącznik 4 - Model przejazdu autobusu	158
	Załącznik 5 – Wyprowadzenia niezbędne do obliczenia niezawodności systemów o różnych strukturach.....	159
	Załącznik 6 - Dane wynikowe z modelu	161
	Spis rysunków	173
	Spis tabel.....	178
	Spis bibliograficzny.....	179

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

ANOVA	— analiza wariancji - w schemacie jednoczynnikowym sprawdza czy jedna zmienna niezależna (czynnik) wpływa na wyniki jednej zmiennej zależnej
ANPR	— <i>ang. Automatic Number Plate Recognition</i> - kamera do automatycznego wykrywania i odczytywania tablic rejestracyjnych
ARIMA	— <i>ang. Auto Regressive Integrated Moving Average</i> - automatyczna regresyjna zintegrowana średnia ruchoma
BALANCE	— moduł sterowania obszarowego ruchem drogowym
BCT	— Bałtycki Terminal Kontenerowy w Gdyni
Bow-Tie	— metoda muchy
Box and Whisker Plot	— wykres pudełkowy/ wykres skrzynkowy/ wykres ramkowy – forma graficznej prezentacji rozkładu cechy statystycznej
CCA	— <i>ang. Causa–Consequence Analysis</i> – metoda analizy przyczyn i skutków
CO	— tlenek węgla
COST323	— metoda klasyfikacji pojazdów
DMC	— dopuszczalna masa całkowita
EPICS	— moduł sterowania lokalnego ruchem drogowym
ETA	— <i>ang. Event Tree Analysis</i> - analiza drzewa zdarzeń, metoda drzewa zdarzeń podążających od przyczyn do skutków.
FMEA	— <i>ang. Failure Modes and Effects Analysis</i> - metoda analizy przyczyn i skutków wad
FTA	— <i>ang. Fault Tree Analysis</i> - analiza drzewa błędów, jakościowa metoda analizy ryzyka wykorzystującą strukturę drzew logicznych
GCT	— Gdyński Terminal Kontenerowy
HAZOP	— <i>ang. Hazard and Operability Studies</i> - analiza zagrożeń i zdolności operacyjnych wykorzystywana najczęściej do oceny ryzyka procesowego.
HGV	— <i>ang. heavy goods vehicle</i> - pojazd ciężarowy
HIRA	— <i>ang. Human Reliability Analysis</i> - analiza niezawodności człowieka
ITS	— <i>ang. Intelligent Transportation System</i> – Inteligentne Systemy Transportowe

LOS	— <i>ang. level of service</i> - poziom obsługi skrzyżowania
MST	— Miejska Sieć Transportowa
NOx	— tlenki azotu
pojazdy ciężkie	— pojazdy powyżej 7,5 t masy całkowitej
Przełącznik	— włączenie do działania elementów rezerwowych, w każdym z występujących typów rezerwy odbywa się za pomocą jakiegoś bodźca np. przełącznika, decyzji, zmiany sterowania
PTV Vissim	— narzędzie służące do wykonywania modeli w skali mikroskopowej
PTV Visum	— narzędzie służące do wykonywania modeli w skali makroskopowej
SATURN	— narzędzie służące do wykonywania modeli transportowych skupiające się na wpływie kolejek na skrzyżowanie
STATGRAPHICS	— pakiet służący do wspomagania statystycznej analizy danych
Stres Nagły	— wystąpienie w sieci transportowej sytuacji nieplanowanej najczęściej mającej negatywny wpływ na poziom swobody ruchu.
Stres Planowany	— wystąpienie w sieci transportowej okazjonalnych, ale planowanych z wyprzedzeniem wzrostów w natężeniach ruchu bezpośrednio związanych np. z planowaną imprezą masową.
Stres Przewidywany	— wystąpienie w sieci transportowej sytuacji, której możemy się spodziewać, np.: wystąpienie szczytów natężeniowych porannych i popołudniowych.
Stres Systemu	— wystąpienie w sieci transportowej sytuacji zakłócającej swobodny przepływ potoków ruchu.
Szczyt komunikacyjny	— przedział czasowy w ciągu dnia, w którym ilość pojazdów jest znacznie większa niż w pozostałych przedziałach czasowych.
TRISTAR	— Trójmiejski Inteligentny System Sterowania Ruchem Aglomeracyjnym
VBA	— <i>ang. visual basic for application</i> - język programowania oparty na Visual Basicu
WIM	— <i>ang. Weight in Motion</i> – system do preselekcji pojazdów przeciążonych

Symbole:

a	— wartość brzegowa zmiennej losowej
A^2	— test statystyczny Andersona-Darlinga
a_j	— losowa próbka rozkładu normalnego
AR(1)	— proces autoregresyjny pierwszego rzędu
AR(2)	— proces autoregresyjny drugiego rzędu
b	— wartość brzegowa zmiennej losowej
c	— wartość brzegowa zmiennej losowej
D_k	— opóźnienie dla natężenia pojazdów stosujących się do wirtualnej tablicy zmiennej treści
D_N	— opóźnienie dla modelu wyjściowego bez dodatkowego natężenia pojazdów
D_n	— szacowana ogólna statystyka Kołmogorowa-Smirnowa
$D^2(X)$	— wariancja
$E(X)$	— średnia
ET	— wartość oczekiwana czasu zdatności
$F(t)$	— zawodność systemu szeregowego
$f(u)$	— funkcja gęstości rozkładu
$f(x)$	— gęstość funkcji prawdopodobieństwa
$F_{TPrzyst}$	— funkcja dystrybuanty czasu postoju na przystanku
I1	— skrzyżowanie typu 1
I2	— skrzyżowanie typu 2
k	— gęstość wyrażona w pojazdach na kilometr;
L	— odcinek między węzłowy
m	— liczba kroków na dojście do stanu r
m_r	— krotność rezerwy elementów grupy
MST_{NZ}	— funkcja niezawodności MST
MST_Z	— funkcja zawodności MST
P	— prawdopodobieństwo
p^{\wedge}	— prawdopodobieństwo stacjonarne wbudowane w łańcuch Markowa
p^{\wedge}_k	— prawdopodobieństwo stacjonarne

P-value	— poziom istotności
q	— natężenie ruchu wyrażone w pojazdach na godzinę
Q_{proc}	— natężenie pojazdów stosujących się do wirtualnej tablicy zmiennej treści zalecającej użycie objazdu
q_1	— frakcja elementów pierwszego typu, odcinki międzywęzłowe [km]
q_2	— frakcja elementów drugiego typu, węzłów (skrzyżowania lokalne)
$Q_{ij}(t)$	— funkcja rozkładu czasu przebywania w stanie i jeśli następnym stanem będzie j
r	— stan pośredni
$R(t)$	— niezawodność operacyjna w chwili t
R_j	— funkcje niezawodności składowych systemu takich jak odcinki międzywęzłowe oraz węzły
R^2	— wartość z analizy ANOVA
\overline{R}_n	— niezawodność podsystemu
R_{or}	— funkcja niezawodności operacyjnej
R_p	— niezawodność Przełącznika
R_R	— rezerwowanie
R_{Rg}	— rezerwa globalna
R_{Rj}	— rezerwa jednostkowa
R_S	— funkcja niezawodności systemu
S	— zbiór stanów
T	— nieujemna ciągła zmienna losowa
$T_{\text{średnie}}$	— średni czas przejazdu odcinków pomiędzy przystankami
T^*	— czasy zdatności elementów rezerwowych pierwszego i drugiego,
t_c	— czas między zielonym sygnałem w trakcie kolejnych cykli
T_{ij}	— zmienna losowa reprezentuje czas przejścia między stanami i i j
T_n	— zmienna losowa (czas)
T_p	— zmienna losowa
T_{przys}	— czas postoju na przystankach
$T_{\text{świ}}$	— czas oczekiwania na sygnał zielony
t_z	— minimalny czas zielony dla grupy sygnałowej w cyklu programu sygnalizacji

u	— zmienna losowa o rozkładzie jednostajnym
v	— prędkość wyrażona w kilometrach na godzinę
V	— test statystyczny Kuipera
$\Lambda(t)$	— funkcja wiodąca
W^2	— test statystyczny Craméra-von Misesa
X	— zmienna losowa
$X(n)$	— proces Markowa
$X(t)$	— semi-Markowski proces stochastyczny
Y	— zmienna losowa
α	— intensywność przejść między stanami
β	— intensywność przejść między stanami
$\lambda(t)$	— intensywność uszkodzeń
λ_{PC}	— zwiększenie intensywności napływu pojazdów ciężarowych w przekroju drogowym;
λ_{ZI}	— zamknięcie jednej jezdni w przekroju drogowym jednokierunkowym dwujezdniowym.
μ	— intensywność „obsługi” pojazdów – zdolność infrastruktury do umożliwienia pojazdom przejechania przez punkt zliczający uzależniony od warunków zewnętrznych
v	— intensywność przejść między Stanami
π_k	— prawdopodobieństwo graniczne dla Stanu k

1. Wstęp

Modelowanie procesu transportowego, systemu transportowego czy też przepływów w sieci transportowej jest procesem wielopłaszczyznowym i złożonym. Punkt początkowy (źródło) i cel destynacji (ujście) są znane, Dostępna jest także wiedza z zakresu: reguł poruszania się i obowiązujące ograniczenia prędkości (prawo o ruchu drogowym) oraz informacje w zakresie potencjalnej przepustowości danej sieci transportowej. Nie pozwala to jednak na w pełni deterministyczny opis ruchu w miejskiej sieci transportowej, gdyż jest on nie całkiem przewidywalny ze względu na występowanie wielu oddziaływań i zaburzeń losowych. Dlatego modelowanie przepływów w sieci transportowej wymaga zastosowania zaawansowanych metod matematycznych z wykorzystaniem modeli stochastycznych.

Złożoność współczesnych sieci transportowych, pod względem geometrii czy struktury organizacyjnej i panujących zasad, wymaga tworzenia modeli symulacyjnych. Te z kolei odwzorowują sytuacje bieżące jak i przewidywane, które pozwalają na spójne zarządzanie siecią w stanie aktualnym jak i w przyszłości. Celem każdego zarządcy, inżyniera ruchu czy planisty jest zapewnienie miastu jak największej przepustowości sieci drogowej z wykorzystaniem istniejącej infrastruktury oraz określenia zapotrzebowania na modernizację lub tworzenie nowej, dla zaspokojenia aktualnych potrzeb transportowych lub przewidywanych w przyszłości. W celu wykorzystania sieci w optymalny sposób – czyli taki, który pozwala na poruszanie się w sieci z prędkością niewymuszoną, ale również bez zbędnej ilości zatrzymań - należy poznać i zamodelować niezbędne cechy charakterystyczne danej sieci. Elementami tymi są: użytkownicy, panujące normy i prawa korzystania z sieci, a także mechanizmy zarządcze i kontrolne nad jej użytkownikami. Do uczestników ruchu drogowego należą: kierowcy, rowerzyści, piesi i inne osoby biorące czynny udział w poruszaniu się po sieci drogowej. W sieci drogowej każdy uczestnik ruchu jest inny, każdy kierowca ma inną zdolność podejmowania decyzji, oceniania odległości czy oceniania bezpieczeństwa w wykonywaniu manewrów. Wszystkie te cechy zmieniają się również w różnych scenariuszach drogowo-ruchowych niezależnych od uczestnika ruchu. Kierowcy mogą inaczej reagować w przypadku złych warunków atmosferycznych lub w zależności od indywidualnego chwilowego stanu emocjonalnego. Prawo określające reguły poruszania się

po drodze jest stałe i ustawowo zdefiniowane poprzez Ustawę z dnia 20 czerwca 1997 roku - Prawo o ruchu drogowym [47], mianowicie każdy uczestnik ruchu drogowego zobowiązany jest do przestrzegania przepisów prawa o ruchu drogowym. Prawo o ruchu drogowym generuje też dużą liczbę zmiennych, koniecznych do uwzględnienia przy modelowaniu sieci drogowej.[6]

Droga miejska różni się liczbą pasów ruchu, prędkością dopuszczalną czy profilowaniem łuków pionowych i poziomych itp. Prawo nakazuje lub zakazuje określonych manewrów na indywidualnie określonych typach odcinków; zakazy zatrzymywania się w określonych miejscach, nakazy jazdy w danym kierunku lub ograniczenia prędkości w zależności od miejsca i klasy drogi czy kategorii drogi. Odnosząc się do Dziennika Ustaw [63] Dz.U. z 2016 r. poz. 124, Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie rozróżniane są następujące klasy dróg publicznych: autostrady, drogi ekspresowe, drogi główne ruchu przyspieszonego, drogi główne, drogi zbiorcze, drogi lokalne i drogi dojazdowe. Istnieją organy uprawnione do pełnienia nadzoru nad uczestnikami ruchu, takie jak np.: policja, inspekcja transportu drogowego czy straż miejska. Każda jednostka organizacyjna ma inne zadania, lecz cel jest wspólny i jasny. W dobie rozwiniętej technologii informatycznej, telekomunikacyjnej i telematyki transportu jednostki zarządcze i organy ścigania często wykorzystują różne urządzenia teleinformatyczne do wykonywania swoich obowiązków. Przykładem regulacji ruchu drogowego może być zwykła sygnalizacja świetlna, która zezwala lub zakazuje na opuszczenie wlotu skrzyżowania.[84] Wymienione cechy i sytuacje są tutaj tylko przykładem jak dużo zmiennych niezależnych od siebie może zostać wprowadzonych do modelu, aby odwzorować z największą dokładnością ruch drogowy.

Sieci transportowe w miastach mogą mieć różną strukturę. Istnieją miasta, które posiadają infrastrukturę drogową o strukturze jeszcze przedwojennej. Są również takie, które zostały odbudowane na nowo po wojnie z nowym układem drogowym. Każde miasto jest inne i ruch, który odbywa się po miejskiej sieci różni się w zależności od konkretnego przypadku. Przykładem może być porównanie miast Gdyni z Krakowem. Ta pierwsza – Gdynia, która z uwagi na usytuowanie linii brzegowej, posiada infrastrukturę drogową zbudowaną w sposób

liniowy. Ruch mieszkańców głównie skupia się na dojeździe do miejsca pracy czy rekreacji, a także dzieli tę samą infrastrukturę z ruchem pojazdów ciężarowych generowanych przez port, innym skrajnie różnym przypadkiem jest centralna część miasta Kraków. W Krakowie celowo zostały wprowadzone liczne obostrzenia związane z uspokojeniem ruchu już w latach 1987-1988 w celu wyeliminowania ruchu tranzytowego z szerszego obszaru oraz dalsze ograniczenia dostępności śródmieścia dla ruchu samochodowego.[18]

Model może obejmować tylko jedno skrzyżowanie, kilka skrzyżowań połączonych ze sobą odcinkami między węzłowymi, tworząc ciąg skrzyżowań lub nawet całą sieć drogową w obszarze objętym przez granice terytorialne miasta. W pracy został przedstawiony przypadek ruchu w mieście o charakterze portowym, w którym port morski zajmuje centralną część miasta, a swoją infrastrukturą dzieli miasto na część północną i południową. Analizowany przypadek znajduje się w mieście, w którym ruch generowany przez port musi codziennie przeplatać się z ruchem generowanym przez mieszkańców chcących dostać się do swoich codziennych miejsc destynacji takich jak praca czy szkoła.

2. Analiza literatury

Niezawodność techniczna, ludzka czy też operacyjna jest jednym z najczęściej badanych, modelowanych i opisywanych zagadnień dla systemów technicznych. Istnieje szereg prac naukowych, zarówno artykułów jak i monografii poświęconych modelowaniu niezawodności. Każda z nich opisuje inne zjawiska towarzyszące w danej dziedzinie technicznej. W artykule [35] przedstawiono analizę związku pomiędzy niezawodnością techniczną, a niezawodnością operacyjną w sposób pogładowy. Wyniki końcowe pozwalają określić matematyczne zależności, które są pomocne dla konstruktorów i inżynierów. Dzięki zależnościom matematycznym mają oni szerszy pogląd na zakres minimalizacji prawdopodobieństwa niewykonania zadania, zależnego od kwalifikacji operatora lub stosowania konstrukcji przyjaznej dla operatora. Praca pokazuje jak ważna jest korelacja pomiędzy niezawodnością systemu i niezawodnością operacyjną, w aspekcie tworzenia struktury niezawodnościowej obiektu, jakim jest ruch w Miejskiej Sieci Transportowej (MST) w ujęciu miasta portowego. Literatura, wykazująca wyniki badań wykorzystujące modelowanie ruchu różnego rodzaju środków transportu takich, jak jednostek pływających [59] pozwoliła na pokazanie korelacji pomiędzy zastosowaniem metody teorii masowej obsługi do określania parametrów ruchu statków oraz zastosowanie Metody Monte Carlo [39] do symulacji tego ruchu czy analizy niezawodności funkcjonowania transportu kolejowego [21]. Analiza badawcza potwierdza, że istnieje potrzeba badania parametrów ruchu jednostek w różnych warunkach i dopiero na ich podstawie należy szacować wskaźniki emisji spalin. [46] Dobór wyżej wymienionych modeli matematycznych pozwolił na skrócenie czasu badań a metody te cechuje duża uniwersalność ukazując, iż spektrum zastosowania jest szerokie. Publikacja ta pokazuje, iż możliwym jest wykonanie modelu teoretycznego do odwzorowania zjawisk związanych z transportem morskim. Metoda ta jest również powszechnie znana w badaniach nad optymalizacją tras w transporcie drogowym.

Autorzy [14] przedstawiają przykład modelu obliczeniowego, który umożliwił wybór systemu tras do przewozu ładunków uwzględniając wpływ wielowymiarowego otoczenia środowiskowego.

Powszechnie znany jest podział modeli transportowych ze względu na zakres obejmowanego terytorium[49]: makroskopowy, mezoskopowy, mikroskopowy i submikroskopowy. Takie zaszeregowanie modeli pozwala na różny poziom agregacji, poziom dokładności i analogie do innych dziedzin nauki takich jak: mechanika płynów czy kinematyka gazów. W zależności od rezultatu, jaki badający chce otrzymać powinien dostosować dobór wielkości opisujących dany ruch. Inne niezbędne zależności będą potrzebne dla badań bezpośrednio związanych z planowaniem np. potoków ruchu i ich struktury.[33] Natomiast z punktu widzenia osób zarządzających ruchem np. w centrum sterowania i zarządzania ruchem, najważniejszymi danymi zewnętrznymi będą: liczba pojazdów, sposób sterowania lub jego brak a także organizacja ruchu na węzłach i odcinkach między węzłowymi.[76] W środowisku naukowym badane są również potoki ruchu w sieci miejskiej na potrzeby analizy zakłóceń. Autorka [96] przyznaje, że temat modelowania ruchu w MST jest szczególnie złożony z uwagi na wielowymiarowość czynników wpływających na ruch w takiej sieci. Niezbędnym jest, aby w trakcie badań dokładnie zidentyfikować miejsca szczególnie podatne na zakłócenia, ponieważ to one mają bezpośredni wpływ na całokształt pracy systemu miejskiej sieci drogowej. Nie istnieje doskonały sposób zamodelowania ruchu z uwagi na występujące w sposób losowy odchylenia od normy w sieci drogowej. Przyczynami odchylenia według autora[30] są węzły, jako punkty krytyczne sieci. To właśnie one są narażone na występowanie zakłóceń. W przypadku obliczania modelu mikroskopowego niezbędna jest identyfikacja takich miejsc. Autor[72] wyraźnie podkreśla jak ważną miarą efektywności jest płynność ruchu w sieci transportowej. Istnieją publikacje, które [97],[98],[1],[73], definiują zakłócenia w ruchu przede wszystkim jako: zatłoczenia sieci drogowej, roboty drogowe czy kolizje drogowe. Analizując wpływ sytuacji kolizyjnych i wypadków drogowych, autorki [3] w swojej monografii odnoszą się do teorii modelowania za pomocą szeregów czasowych w długich okresach czasu na obszarze krajowym i za ich pomocą wykazane zostały trendy w bezpieczeństwie ruchu drogowego. Pojazdy ciężarowe i ich wpływ na sieć transportową przeważnie badany jest pod kątem negatywnego oddziaływania na nawierzchnie drogową. Istnieją publikacje[36],[54],[56] skupiające się na przeciążonych pojazdach ciężarowych. Autorzy[65] stwierdzili, iż *„pojazdy przeciążone wywołują od 35% do 70% całkowitej szkody zmęczeniowej nawierzchni. Średnio połowa całkowitej szkody zmęczeniowej nawierzchni jest*

wywolana ruchem pojazdów przeciążonych.” Zatem infrastruktura w mieście portowym, bezpośrednio narażona jest na negatywne oddziaływanie portu, w tym pojazdów ciężarowych [20] a przede wszystkim pojazdów przeciążonych. Autorka [44] wskazuje w swojej monografii jak przebiegał proces ewolucji przestrzennej i funkcjonalnej terminali kontenerowych i jak zmienił się układ przestrzenny ich otoczenia. Trafnie zaznacza, iż terminale w dzisiejszych czasach nie ograniczają się już tylko do obszaru ich terytorium a są układem neuronowym, gdzie terminal leży w jego centrum i połączony jest z innymi terminalami intermodalnymi. Można zauważyć, iż terminal kontenerowy, który usytuowany jest w centralnej części miasta jest nierozłączny z jego infrastrukturą i zagospodarowaniem przestrzennym oraz nieustannie wpływa, na jakość życia jego mieszkańców a także może być powodem zakłóceń występujących sieci drogowej. W pracy tej zbadano problem wykorzystania modeli matematycznych do oszacowania wpływu ruchu drogowego, generowanego przez port, a przede wszystkim przez terminale kontenerowe czy pasażerskie na funkcjonowanie miejskiej sieci drogowej.

3. Teza i cel pracy

Analiza i ocena oddziaływania portu znajdującego się w centrum miasta na niezawodność operacyjną MST oraz zbadanie wpływu odporności tej sieci na zdarzenia sporadyczne (takie jak: incydenty spowodowane kolizjami lub wypadkami, chwilowe awarie infrastruktury drogowej, cykliczne wydarzenia kulturalne itp.)

Hipoteza: Opracowanie modelu niezawodności operacyjnej odwzorowującego układ drogowy obciążony ruchem portowym Miejskiej Sieci Transportowej pozwoli na analizę i ocenę jej działania ze względu na rozwój i zmiany struktury strumieni ruchu generowanych przez port znajdujący się w centrum miasta.

Cele dodatkowe:

- Określenie niezawodności operacyjnej funkcjonowania wycinka sieci transportowej miasta Gdynia.
- Opracowanie modelu operacyjno-niezawodnościowego, określenie zbioru stanów, kryteriów i zakresów zmian stanów;
- Określenie wartości granicznych dla stanów niezawodnościowych sieci takich jak: sieć zdatna, sieć częściowo zdatna (ruch lokalnie zakłócony), sieć niezdatna;
- Opracowanie modelu symulacyjnego i określenia reguł oraz zasad jego stosowania.

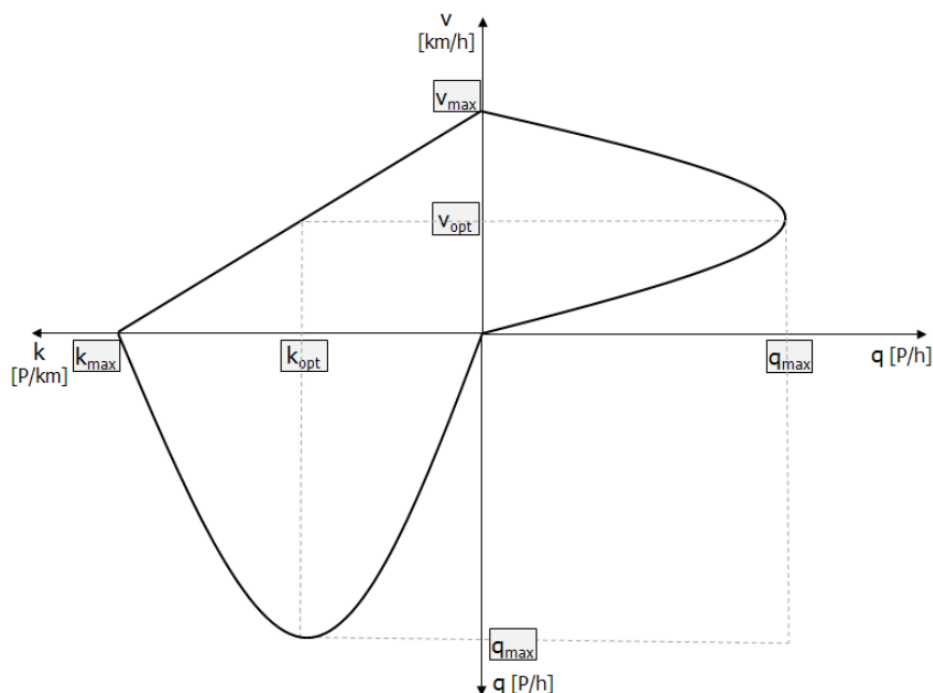
4. Modele i metody oceny niezawodności operacyjnej systemów transportowych

Modele występujące w inżynierii ruchu drogowego ze względu na różne czynniki można podzielić na cztery podstawowe rodzaje: modele makroskopowe, modele mezoskopowe, modele mikroskopowe i submikroskopowe. Każdy z tych poziomów modelowania wyróżnia inne charakterystyki i inne zmienne definiujące wyniki.[50] Modele makroskopowe charakteryzują się najwyższym poziomem agregacji danych, ale też najniższym poziomem dokładności. Analogią do potoków ruchu drogowego w skali makroskopowej jest mechanika płynów. Modele mezoskopowe wyróżniają się wysokim poziomem agregacji danych, jednakże nadal niskim poziomem dokładności. Analogią do modelu ruchu w skali mezoskopowej jest kinematyka gazów. Modele mikroskopowe charakteryzują się niskim poziomem agregacji danych i wysokim poziomem dokładności. Chcąc odwzorować ruch w sieci w skali mikro ważny jest zatem każdy pojazd poruszający się w sieci. Należy rozróżnić jego rodzaj, klasę a także prędkość swobodną. Czwarty poziom modelowania, do którego zaliczane są modele submikroskopowe, modele te mają najwyższy poziom agregacji i najwyższy poziom szczegółowości. Podobnie jak w modelach mikroskopowych należy uwzględnić dokładną charakterystykę każdego poruszającego się w sieci pojazdu. Przykładowe modele charakteryzujące się odpowiednim przyporządkowaniem w skali modelowania zostały przedstawione w Tabeli 1. W ocenie modeli głównym czynnikiem jest zależność pomiędzy wartościami empirycznymi trzech podstawowych charakterystyk: intensywności, gęstości i prędkości. W literaturze korelacja pomiędzy tymi charakterystykami określana jest jako równanie stanu strumienia ruchu. Oddziaływania te obrazuje wykres zależności przedstawiony na Rysunek 1 zwanym również fundamentalnym diagramem ruchu, opracowanym przez B.D. Greenshields'a. Na tej podstawie powstały kolejne modele np.: dynamiczny model cieczy pierwszego rzędu w odniesieniu do potoków ruchu (model Lighthill'a i Whitham'a). Model ten wykazał, iż wykres ruchu może różnić się w zależności od dnia czy rodzaju pojazdu poruszającego się w sieci. Model G. Newell'a rozwinął poprzednie teorie tworząc model fal kinetycznych w odniesieniu do teorii ruchu drogowego, szczegółowo koncentrując się na efekcie fali uderzeniowej.

Tabela 1 Przykłady modeli w różnych skalach [opracowanie własne]

Modele makroskopowe	Modele mezoskopowe	Modele mikroskopowe	Modele submikroskopowe
Model hydrodynamiczny Lighthill'a i Whitham'a	Model klastrowy Ben-Akiv'a	Model Chandler'a	Model Arem'a
Model Newell'a	Model rozkładu odstępów Branston'a	Model Kometani i Sasaki	Model Minderhoud'a
Model Richards'a	Model kinetyczny Prigogine'a i Herman'a	Model Gazis'a	Model Ludmann'a
Model Payne'a		Model Wiedemenn'a	
		Model automatu komórkowego Nagel-Schreckenberg'a	
		Model kolejkowy Heidemann'a	
		Model Treiber'a i Helbing'a	

Kolejną formą ewolucji podstawowego modelu ruchu jest model komórkowy C. Daganzo, model ten umożliwia wyznaczenie długości kolejek i średnich czasów podróży w sytuacji, gdy jeden z pasów zostanie wyłączony z ruchu [74],[28],[38],[77] Model L. Edie, jako pierwszy wprowadził rozróżnienie na dwa stany ruchu odnoszące się do modelu dwufazowego. Dokonano podziału na ruch swobodny i ruch zatłoczony. Następnie powstał trzyfazowy model strumienia ruchu opublikowany przez B. Kerener'a i H. Rehborn'a, model ten zakładał fazy: ruch swobodny, ruch synchronizowany oraz ruch zatłoczony. W literaturze[28] występuje rozszerzona wersja modelu trójfazowego, dzięki wyodrębnieniu kolejnych typów kongestii.



Rysunek 1 Prędkość, gęstość intensywność - wykres zależności [99]

Na powyższym rysunku następujące skróty oznaczają:

- k – gęstość wyrażona w pojazdach na kilometr;
- q – natężenie wyrażone w pojazdach na godzinę;
- v – prędkość wyrażona w kilometrach na godzinę.

W celu stworzenia modelu dostosowanego do potrzeb należy wyszczególnić podstawowe dane i zmienne. W zależności od posiadanych danych i ich szczegółowości należy dobrać poziom modelowania. Niemożliwym jest stworzenie modelu mikroskopowego bez danych odnośnie natężeń pojazdów, prędkości pojazdów, struktury rodzajowej pojazdów czy tras, po których się poruszają i ich destynacji. Ważnym elementem modelowania jest również obszar, który ma zostać poddany analizie. Wykonanie bardzo szczegółowego modelu na obszarze całego województwa czy kraju praktycznie jest niemożliwe z uwagi na zbyt duży obszar. Należy wówczas zmienić skalę modelu na makroskopowy, a także niektóre dane zagregować do bardziej ogólnych. Wyniki, które zostaną otrzymane nadal będą poprawne, pomimo uproszczeń akceptowalnych na danych poziomach modelowania.

Ocena niezawodności systemu transportowego [9] zależna jest od wielu czynników bezpośrednio związanych z uczestnikami ruchu (kierowcy), organizacją ruchu, aktualnym poziomem swobody ruchu itp., zależnych od poziomu i zaawansowania technicznego infrastruktury, jak i jej aktualnego stanu technicznego, określających oddziaływanie otoczenia, czy też warunków pogodowych i pory dnia. System transportowy, który złożony jest z elementów dwustanowych, może być ze względu na jego niezawodność operacyjną, analizowany zarówno, jako system dwustanowy (zbiór stanów systemu podzielony na dwa rozłączne podzbiory stanów: zdatny, niezdatny) jak i system wielostanowy (więcej niż dwa rozłączne podzbiory stanów: niezdatny, zdatny, częściowo zdatny na poziomie k dla $k=1, 2, \dots$).

Do dokonania oceny niezawodności operacyjnej wykorzystywane mogą być różnego rodzaju modele. [40] W celu poprawnego doboru modelu należy rozważyć wszystkie czynniki mające bezpośredni wpływ na analizowany model. W systemie człowiek – środek transportu – infrastruktura występują istotne zagrożenia mające bezpośredni wpływ na ryzyko awarii w aspekcie operacyjnym. Ryzyko może się wiązać z zagrożeniami spowodowanymi przez błąd ludzki, awarie środków transportu, uszkodzenie infrastruktury lub kombinacje tych czynników np.: błędem człowieka połączonym z awarią środka transportu, błędem człowieka i uszkodzeniem infrastruktury oraz awarią pojazdu. Literatura odnosi się do procesu analizy ryzyka systemu transportowego podzielonego na trzy fazy [75]:

- zebrania danych o środkach transportu, infrastrukturze i człowieku;
- rejestrowanie charakterystyk eksploatacyjnych systemu;
- budowania modeli, które opisują system ze względu na badane zjawiska.

4.1 Analiza działania miejskiej sieci transportowej dla miasta portowego

Miasto, w którym mieści się port rozwija swoją infrastrukturę w kierunku, który pozwoli na zaspokojenie potrzeb mieszkańców, ale również zapewni przepływ ładunków z i do portu. Istnieje wiele czynników wpływających na środowisko związanych z działalnością portu w mieście. Oddziaływania te są związane przede wszystkim z działalnością żeglugową w porcie, działalnością na obszarach lądowych oraz oddziaływaniem na środowisko przez transport. Środki transportu morskiego odpowiedzialne są również za generowanie tlenku węgla (CO) czy tlenki azotu (NO_x). [37] Dwutlenek węgla odpowiedzialny jest za zanieczyszczanie powietrza, jego zwiększona ilość w powietrzu powoduje powstawanie smogu w aglomeracjach miejskich. Wpływa to znacząco na jakość powietrza w mieście portowym i jest główną przyczyną chorób układu oddechowego i sercowo-naczyniowego. Środki transportu morskiego operujące w porcie są również przyczyną zanieczyszczeń wody. Głównym źródłem zanieczyszczeń wody jest rozlew substancji olejowych spowodowanych operacjami bunkrowania (dostawami) paliwa dla statków takich jak promy, statki kontenerowe, statki ro-ro lub występujące błędy spowodowane przez ludzi. Środki transportu obsługiwane przez terminale produkują też odpady związane z eksploatacją takie jak: wody zaolejone, śmieci kwalifikowane do kilku kategorii wg Konwencji MARPOL związane z eksploatacją statku lub ładunkiem – pozostałości po ładunku i jego opakowaniach. Obszary miasta usytuowane w sąsiedztwie portu mogą być narażone bardziej na zanieczyszczenia niż inne części miasta, przez to, stanowiąc zagrożenie dla zdrowia człowieka. Rozwój przemysłu stocznioowego w portach morskich doprowadził do zwiększenia zapotrzebowania na przestrzeń. Zajmowały one bardzo duże obszary, co jest negatywnym skutkiem dla miasta. Pomimo możliwego rozwoju aglomeracji miejskiej często rozwój ten jest blokowany poprzez brak niezabudowanych terenów. Struktura miasta portowego ewoluowała w czasie, dostosowując się do sytuacji gospodarczej a także wiedzy technologicznej wykorzystywanej w danym okresie. W literaturze [57] autorzy na podstawie publikacji B. Hoyle z 1998 roku twierdzą, iż powiązanie **port-miasto** ewoluowało w sześciu fazach:

- Faza I – Prymitywny układ port–miasto (przestrzenna i funkcjonalna jedność portu i miasta);

- Faza II – Rozwój układu port-miasto (Szybki rozwój handlowy i przemysłowy przesuwa rozbudowę portu poza miasto);
- Faza III – Nowoczesne miasto i port przemysłowy (rozwój przemysłu, w tym rafinerii i petrochemii) rozwój technologii przewozu kontenerowego czy technologii ro-ro, znaczne zapotrzebowanie na teren portowy);
- Faza IV – Odsunięcie się portu od linii brzegowej (wystąpiły liczne zmiany w technologii transportu morskiego, jak również odsunięcie przemysłu portowego od linii brzegowej);
- Faza V – Ponowny rozwój linii brzegowej (przywrócono stare rejony portowe i przekształcono je w duże obszarowo obiekty morsko-ładowe);
- Faza VI – Odnowa więzi portu (globalizacja i transport intermodalny mają bezpośredni wpływ na rolę portu w mieście).

Analizując proces przekształcania się portów należy zauważyć, iż pomimo próby odcięcia portu od miasta w Fazie IV nie przyniosło to pozytywnego skutku w przyszłości. Port jest miejscem pracy dla bardzo dużej liczby wykwalifikowanych pracowników z sektora operacyjnego, logistycznego, planistycznego, zarządczego, itp. W przypadku odsunięcia portu od miasta następuje problem zapewnienia mieszkańcom okolicznych terenów atrakcyjnego czasowo dojazdu do miejsca pracy, jakim jest port.[85] To tylko jeden z przykładów możliwych sytuacji, występujących w przypadku dużej odległości portu od miasta. Jednakże ulokowanie obszaru portowego w centralnej części miasta może również być problematyczne. Mieszkańcy na co dzień muszą dzielić tę samą infrastrukturę drogową ze środkami transportu służącymi do przewozu ładunków z i do portu. Występowanie zwiększonej liczby pojazdów ciężarowych w udziale ruchu dobowego niesie za sobą negatywne aspekty takie jak: wysoki poziom hałasu, podwyższony poziom spalin i zanieczyszczeń środowiska czy przyspieszenie zniszczenia eksploatacyjnego infrastruktury drogowej. Istotnym aspektem ruchu pojazdów ciężarowych w obrębie miasta portowego jest umiejscowienie parkingów. Parkingi te zajmują stosunkowo duży obszar najczęściej bezpośrednio przylegający do konkretnego terminala kontenerowego lub promowego. Kierowcy samochodów ciężarowych często zmuszeni są oczekiwać na ładunek lub odprawę celną ładunku. Zatem umiejscowienie parkingu jest niezmiernie istotne w infrastrukturze około portowej. W przypadku, gdy w jednym mieście

występuje więcej niż jeden punkt przeładunkowy danego ładunku np. punkt przeładunku kontenerów, jako terminale kontenerowe, może występować negatywne zjawisko poruszania się po sieci drogowej przeciążonych pojazdów ciężarowych na krótkich odcinkach, co stanowi negatywny wpływ na MST. Z uwagi na niski stopień ryzyka zweryfikowania takiego pojazdu, kierowcy lub firmy przewozowe podejmują i decydują się na ruch pojazdów przeciążonych. Przewożenie jednostek ładunkowych powyżej ich nominalnej nośności niesie za sobą negatywne konsekwencje, takie jak: przyspieszona eksploatacja nawierzchni drogowej czy wydłużona droga hamowania pojazdu. Analiza ryzyka w systemach transportowych bazuje nie tylko na ogólnym aspekcie metod oceny. Należy brać również pod uwagę inne aspekty mające wpływ bezpośrednio na system transportowy. Wykonanie modelu wiąże się z:

- skompletowaniem danych o środkach transportu, infrastrukturze a także uczestnikach ruchu – możliwe jest to za pomocą technologii związanej z Inteligentnymi Systemami Transportowymi (ITS) takimi jak: detektory ruchu, portale internetowe typu open data, dane logowań z sieci WI-FI lub pomiarów manualnych;
- rejestrowaniem i analizą charakterystyk eksploatacyjnych związanych bezpośrednio z systemem transportowym;
- budowaniem modeli systemu ze względu na ocenę ryzyka i niezawodność operacyjną.

W celu oszacowania ryzyka należy pozyskać bazę danych zawierającą zdarzenia jak i czynniki występujące w MST i wpływające na ryzyko. Przewidując na podstawie doświadczeń skutek danego czynnika za pomocą analizy ryzyka można sugerować przyczynę jego powstania. Prosty przykład opisującym ten proces, może być sytuacja, w której dochodzi do kolizji drogowej poprzez najechanie na tył pojazdu lub tył naczepy. Zatem skutkiem jest kolizja a przyczyną takiej sytuacji może być np. nieuwaga kierowcy jako czynnik ludzki, niesprawny układ hamulcowy pojazdu, jako czynnik związany ze środkiem transportu lub śliska nawierzchnia, jako czynnik infrastruktury. Bardzo często w raportach policyjnych oznaczone jest to, jako niedostosowanie prędkości i odległości do aktualnych warunków drogowo-ruchowych. Poprzez analizę przypadku można określić, który

z czynników miał bezpośredni wpływ na efekt końcowy. Jedną z najbardziej popularnych metod oceny ryzyka jest metoda drzewa zdarzeń FTA (*ang. Fault Tree Analysis*) polska nazwa tej metody to: metoda drzewa zdarzeń, metoda ta używana jest do analizy konsekwencji i barier ochronnych systemu.[5] Metoda ta zalicza się do metod ilościowych jak i jakościowych. Za pomocą przedstawienia barier ochronnych systemu i możliwych ścieżek wyboru działania lub niezadziałania poszczególnych elementów daje spójny obraz ciągu przyczynowo skutkowego danego procesu. Metoda ta jest dość uniwersalna pozwala na tworzenie analiz w szerokim spektrum przypadków, można nią także badać niezawodność człowieka, w sposób chronologiczny za pomocą graficznego przekazu całego ciągu zdarzeń. Diagram skonstruowany jest na zasadzie węzła i dwóch gałęzi z odpowiedziami *tak/prawda* lub *nie/falsz*. Można to przetłumaczyć jako działającą lub nie działającą barierę ochronną która zostaje poddana analizie. Inne stosowane metody to: ETA (*ang. Event Tree Analysis*), CCA (*ang. Causa – Consequence Analysis*), HAZOP (*ang. Hazard and Operability Studies*), FMEA (*ang. Failure Modes and Effects Analysis*).

Przydatnym narzędziem w analizowaniu przyczyn zawodności bezpieczeństwa jest analiza drzewa zdarzeń ETA inaczej nazywane drzewem porażen albo drzewem uszkodzeń. Metoda ta ma duże znaczenie podczas analizy ryzyka i niezawodności złożonych systemów technicznych. Pozwala zilustrować zależność pomiędzy zdarzeniami szczytowymi, czyli tych, od których rozpoczyna się analizę a zdarzeniami bazowymi, czyli takimi, które jako pierwotne uważane są za przyczynę uszkodzenia systemu.[75] Pozytywną właściwością tej metody jest niezawężanie obszaru poszukiwań tylko do systemu technicznego, ale również uwzględnianie pozostałych czynników takich jak: błąd ludzki, wpływ środowiska czy wpływ infrastruktury. Wyjaśniając na przykładzie kolizji najechania na tył pojazdu, z punktu widzenia uczestnika ruchu, analiza zagrożeń z nim związanych wymagałaby uwzględnienia:

- potencjalnych zagrożeń mogących wystąpić w procesie kierowania pojazdem przez kierowcę;
- możliwych zmian charakterystyk pojazdu osobowego w procesie użytkowania go, a także zmian w tych charakterystykach jako tolerancji charakterystyk;
- możliwości obciążenia psychicznego kierującego pojazdem;

- możliwości bycia pod wpływem czynników takich jak temperatura, hałas, nieprzyjazna infrastruktura przez kierowcę.

Opisując systemy transportowe a w szczególności odnosząc się do transportu drogowego

z wykorzystaniem pojazdów nieautonomicznych (czyli takich, do których poruszania się potrzebny jest kierowca), najważniejszą rolę pełni kierowca, od którego zależy niemal wszystko co może zdarzyć się na drodze. Określone to zostało jako czynnik decyzyjny. Do tego rodzaju analiz można wykorzystać metodę HIRA (*ang. Human Reliability Analysis*), która obejmuje ocenę czynników wpływających na zachowanie się kierujących pojazdami a nawet osób odpowiedzialnych za sterowanie ruchem drogowym. Metoda ta umożliwia identyfikację zdarzeń prowadzących do błędów, mogących być bezpośrednią przyczyną wypadków czy kolizji.

W przypadku analizowania ruchu drogowego użyteczna jest metoda Bow-Tie, w języku polskim występująca również pod nazwą Metoda Muchy. Nazwa ta ma zobrazowanie

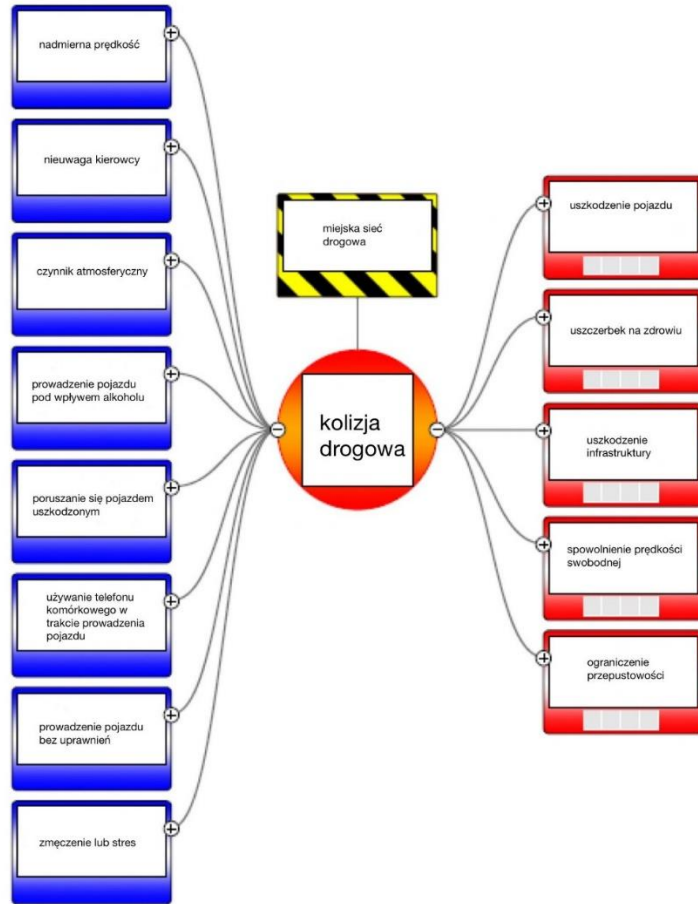
w kształcie grafu, który budowany jest poprzez połączenie odwzorowania zagrożeń wraz z potencjalnymi przyczynami ich powstawania, a także propozycje środków ograniczających konsekwencje. Tym samym jest to połączenie poprzednio opisywanej metody ETA i FTA. W ruchu drogowym każdy wypadek ma swoją przyczynę i swój skutek. Metoda ta potrafi obrazowo odwzorować zdarzenia występujące w rzeczywistości. Podstawowe składowe metody Bow-Tie to identyfikacja:

- zdarzenia najwyższego poziomu;
- zagrożenia;
- przyczyn;
- konsekwencji zdarzenia;
- barier redukcji przyczyn;
- barier redukcji konsekwencji zdarzenia;
- czynników eskalujących;

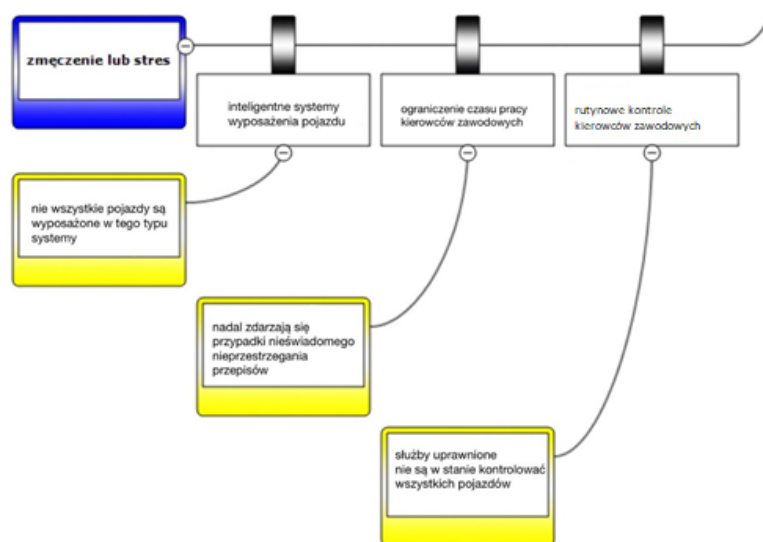
— barier kontrolowania czynników eskalujących.

Za pomocą programu BowTieXP przedstawiono przykład zastosowania metody Bow-Tie w ruchu drogowym. Przykładem możliwym do zanalizowania za pomocą metody Bow-Tie w ruchu drogowym jest kolizja drogowa. Każda kolizja może mieć inną przyczynę i inny szereg skutków. Za pomocą oprogramowania BowTieXP zostało przeanalizowane wystąpienie kolizji drogowej, ukazuje to Rysunek 2.

W pierwszej kolejności po lewej stronie zostały określone potencjalne przyczyny kolizji drogowej między innymi: nadmierna prędkość, nieuwaga kierowcy czy prowadzenie pojazdu pod wpływem alkoholu lub innych środków odurzających. Następnie po prawej stronie zostały określone możliwe skutki zaistniałej kolizji drogowej, między innymi: uszkodzenie pojazdu, uszczerbek na zdrowiu czy uszkodzenie infrastruktury. W kolejnym kroku analizy zostały dodane bariery mogące mieć bezpośredni wpływ na przyczynę. Przykładem może być tutaj zmęczenie lub stres, gdzie barierami mogą być między innymi: inteligentne systemy wyposażenia pojazdu, ograniczenia czasu pracy kierowców zawodowych, rutynowe kontrole kierowców zawodowych. Następnie do każdej bariery dodane zostały czynniki eskalujące. Opisana analiza została zobrazowana poprzez Rysunek 3.



Rysunek 2 Metoda Bow-Tie - analiza kolizji drogowej [opracowanie własne]



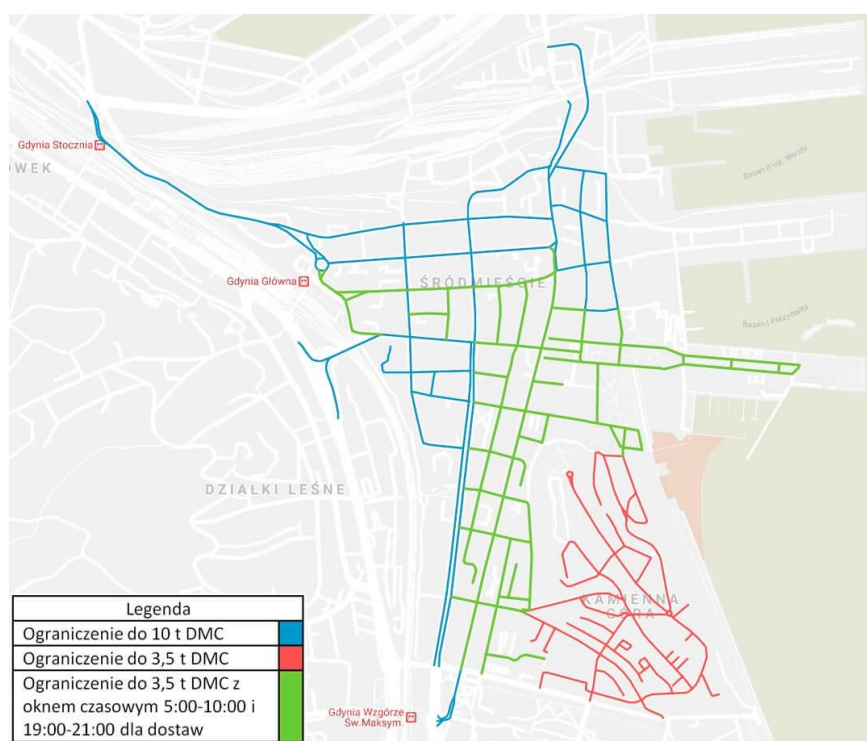
Rysunek 3 Metoda Bow-Tie - zmęczenie lub stres jako przyczyna kolizji drogowej [opracowanie własne]

W końcowym etapie zostały również dodane bariery do prawdopodobnych skutków kolizji drogowej. Całościowa ilustracja analizy metodą Bow-Tie przypadku kolizji drogowej została zamieszczona jako Załącznik 2 - Metoda Bow-Tie

Zastosowanie tej metody jest zasadne, ponieważ zdarzenia drogowe takie jak kolizje, wypadki, itd. zakłócają lub ograniczają „przepływ pojazdów” w strumieniu ruchu. Tym samym pogarszają niezawodność operacyjną sieci transportowej. Przykładem może być: dwupasmowa ulica jednokierunkowa, wypadek na jednym pasie wyłącza go z ruchu, zaś przyjazd personelu ratunkowego, straży pożarnej, pogotowia i innych służb blokuje drugi pas. W wyniku tego zdarzenia zablokowany jest cały przekrój. Czyli najpierw następuje pogorszenie niezawodności operacyjnej, a potem stan zawodności. Kolejnym odzwierciedleniem jest ulica dwupasmowa dwukierunkowa. Wypadek wyłącza jeden pas na kierunku **A**, przejazd służb ratunkowych drugi pas na kierunku **A** i wtedy jeden pas na kierunku **B** zostaje przekazany do jazdy w kierunku **A**. Czyli najpierw pogorszenie niezawodności na kierunku **A**, potem stan zawodności na kierunku **A** i na koniec przywrócenie pogorszonej niezawodności na kierunku **A**, i pogorszenie niezawodności operacyjnej na kierunku **B**.

Ruch odbywający się po miejskiej sieci transportowej miasta portowego można rozróżnić na: ruch miejski oraz ruch związany z transportem ładunków do i z terminali portowych. Ruch miejski można zdefiniować jako ruch ludzi od punktu *A* do punktu *B* z wykorzystaniem co najmniej jednego środka transportu. Cel podróży może być różny: przejazdy do miejsca pracy lub szkoły, miejsc rekreacji czy kultury. Ruch związany z transportem ładunków portowych na potrzeby niniejszej pracy można określić mianem *ruchu ciężkiego*. Ruch ciężki charakteryzuje się tym, że punktem docelowym lub punktem startowym jest zawsze miejsce przeładunku ładunku np. terminal. Coraz więcej miast decyduje się na ograniczenie ruchu pojazdów ciężarowych w obrębie ścisłego centrum miasta. Niesie to za sobą korzyści w postaci niższego poziomu zanieczyszczeń w powietrzu, polepszenia atrakcyjności obszaru, zmniejszenie hałasu itp. Na przykładzie miasta Gdynia, można zauważyć, że zarządcy dróg wprowadzili ograniczenia związane z poruszaniem się pojazdów ciężkich (na potrzeby niniejszej pracy zostało wprowadzone określenie „pojazdy ciężkie”, w dalszej części pracy mianem pojazdów ciężkich określane są wszystkie powyżej 7,5 tony dopuszczalnej masy

całkowitej (DMC)) w centralnej części miasta. Rysunek 4 przedstawia podział dróg znajdujących się w centrum miasta na trzy kategorie. Kolorem niebieskim zostały oznaczone drogi, po których możliwe jest poruszanie się pojazdów do 10 ton DMC, na zielono przedstawione są drogi z ograniczeniem tonażowym do 3,5 ton DMC jednak z wyszczególnieniem okna czasowego w godzinach 5:00-10:00 i 19:00 – 21:00 w celu zapewnienia dostaw do sklepów czy lokali gastronomicznych. Kolorem czerwonym zaznaczone zostały drogi, po których mogą poruszać się pojazdy do 3,5 ton DMC. Pozostałe drogi zaznaczone kolorem białym nie posiadają ograniczeń innych niż te określone przez dopuszczalną masę całkowitą pojazdów w Polsce.



Rysunek 4 Ograniczenia ciężaru pojazdu w Gdyni [źródło: www.zdiz.gdynia.pl]

W celu poprawnego doboru modelu należy rozważyć wszystkie czynniki mające bezpośredni wpływ na analizowany model. W systemie człowiek – środek transportu – infrastruktura występują istotne zagrożenia mające bezpośredni wpływ na ryzyko awarii w aspekcie operacyjnym. Ryzyko może się wiązać z zagrożeniami spowodowanymi przez błąd ludzki, awarie środków transportu, uszkodzenie infrastruktury lub kombinacje tych czynników np.: błędem człowieka połączonym z awarią środka transportu, błędem człowieka

i uszkodzeniem infrastruktury oraz awarią pojazdu. Dopiero wyniki danej analizy przy uwzględnieniu charakterystyk wykazują w jakim stopniu sieć transportowa działa w układzie miejskim. Pojedyncze wzrosty gęstości ruchu pojazdów mogą wpływać zarówno bardzo negatywnie jak i neutralnie w aspekcie całej MST, zależne jest to od liczby dróg alternatywnych w danym miejscu, liczby skrzyżowań czy sposobu zarządzania i sterowania ruchem drogowym. W celu zbadania oddziaływania różnego rodzaju zaburzeń w sieci drogowej należy uwzględnić rodzaje pojazdów jakie przemieszczają się w sieci. Potok ruchu pojazdów będzie cechował się innym zachowaniem w zależności od przeważającej liczby pojazdów ciężarowych a inaczej, jeśli będzie przeważał ruch rowerzystów. W inżynierii ruchu stosuje się najczęściej przelicznik pojazdów rzeczywistych na pojazdy umowne.

Tabela 2 Podział pojazdów na kategorie zastosowany w Generalnym Pomiarze Ruchu (2005 rok)[18]:

Lp	Symbol kategorii pojazdów	Kategorie Pojazdów	Współczynniki przeliczeniowe na pojazdy umowne
1	a	Rowery, motorowery	Nie przelicza się
2	b	Motocykle, skutery	0,5
3	c	Samochody osobowe, mikrobusy z przyczepą lub bez	1,0
4	d	Lekkie samochody ciężarowe o dopuszczalnej masie całkowitej do 3,5 t z przyczepą lub bez	1,0
5	e	Samochody ciężarowe o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 3,5 t z przyczepą lub bez	2,0
6	f	Samochody ciężarowe o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 3,5 t z jedną lub więcej przyczepami, ciągniki siodłowe, z naczepami, ciągniki balastowe z przyczepami standardowymi lub niskopodwoziowymi	3,0
7	g	Autobusy, trolejbusy	2,0
8	h	Ciągniki rolnicze z przyczepami lub bez, maszyny samobieżne (walce drogowe, koparki itp.)	3,0
9	i	Pojazdy zaprzęgowe	Nie przelicza się

Pojazdy umowne to nic innego jak liczba pojazdów danego typu przeliczona przez współczynnik zależny od kategorii pojazdu. Przykładem jest zastosowany podział pojazdów na kategorie w Generalnym Pomiarze Ruchu (2005 rok)[18] przedstawiony jako Tabela 2. Jednakże duży wpływ na zachowanie się pojazdów w sieci ma również ukształtowanie terenu. Samochód ciężarowy jadący pod wzniesienie lub ruszający z miejsca na wzniesieniu będzie miał większe straty czasu w porównaniu do pojazdów osobowych o mniejszych gabarytach i innych parametrach ruszania. Im większe straty czasu w porównaniu do samochodów osobowych, tym większy współczynnik należy przyjąć w celu przeliczania pojazdów rzeczywistych na umowne. Miarami porównawczymi w analizie przeważnie są: średni czas podróży czy procent jazdy w kolumnie.

4.2 Uwarunkowania wpływające na ruch w Miejskiej Sieci Transportowej

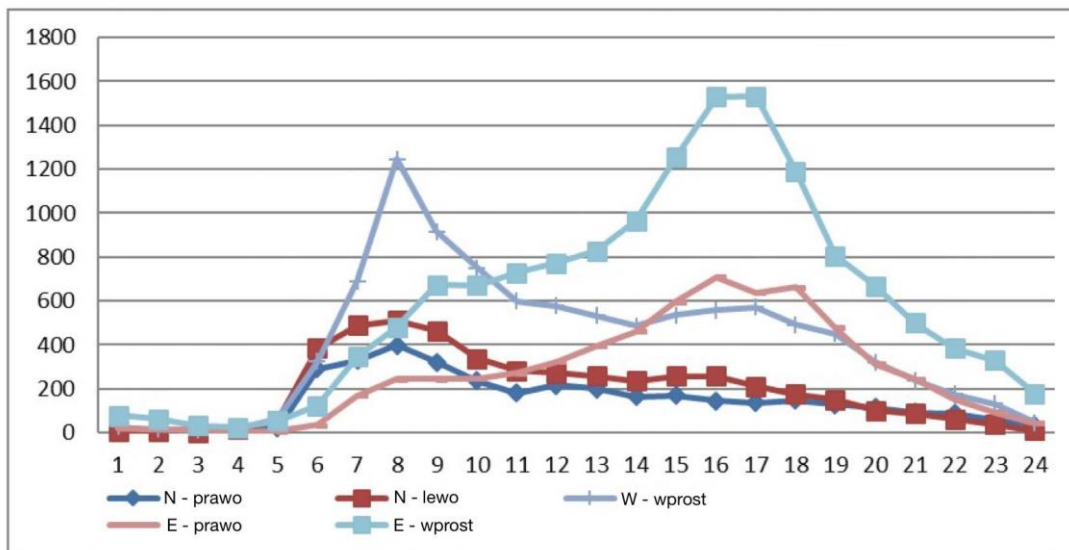
Dla MST, proces transportowy na niej realizowany jest niejednorodny na przestrzeni czasu zarówno w okresie dobowym, tygodniowym czy też rocznym. Dobowy rozkład ruchu może różnić się w zależności od dnia tygodnia czy pory roku. Przyjmowany za standardowy rozkład ruchu drogowego dobowego to taki, w którym występują dwa szczyty komunikacyjne, czyli przedziały czasowe, w których natężenie ruchu jest znacznie większe niż w pozostałych porach dnia. Szczyty komunikacyjne w większości przypadków występują w godzinach porannych (np. 07:00 - 09:00) i w godzinach popołudniowych (np. 15:00 – 17:00) godziny te mogą być ruchome a także mogą różnić się w zależności od miasta czy dnia tygodnia np. szczyt komunikacyjny może wydłużać się w piątkowe popołudnia. Niejednokrotnie mogą wystąpić w sieci drogowej sytuacje wpływające bezpośrednio na ruch drogowy można je określić mianem **Stresu**. Stres może przybierać trzy różne formy: Stres Planowany, Stres Przewidywany i Stres Nagły. Każde z tych zdarzeń może wystąpić niezależnie lub łącznie. Ponownie odnosząc się do typowego rozkładu natężeń w dobowym okresie można nazwać określić go jako Stres Planowany, na podstawie natężeń z poprzednich dni, miesięcy, lat - można określić pewnego rodzaju predykcję natężenia pojazdów. W tym samym czasie może wystąpić np. awaria infrastruktury a ruch musi przenieść się na drogi alternatywne tym samym następuje odchylenie od typowego rozkładu natężenia pojazdów, sytuacja ta może zostać ujęta jako Stres Nagły. Natomiast przykładem wystąpienia stresu przewidywanego, jest np. w przypadku planowanego zawinięcia do portu planowanego statku np. wycieczkowca, który spowoduje zwiększone natężenie ruchu z uwagi na ruch turystyczny.

- **Stres Planowany**

Sieć drogowa złożona jest z infrastruktury, która jest w stanie zapewnić poruszanie się po niej określonej liczbie pojazdów w określonym przedziale czasowym. W inżynierii ruchu można określić to jako przepustowość. Z definicji *przepustowość* jest to największa liczba jednostek (pojazdów lub pieszych), którą w określonych warunkach drogowych i ruchowych może

przepuścić przekrój drogi (ulicy, wlotu na skrzyżowania, przejścia dla pieszych, ścieżki rowerowej itp.) w jednostce czasu. Z reguły za jednostkę czasu przyjmuje się jedną godzinę. Z podanej definicji wynika, że przepustowość przekroju drogi lub innego elementu infrastruktury drogowej zależy zarówno od ich fizycznych cech jak i od zewnętrznych warunków oraz zachowań kierujących pojazdami. Zatem określenie ilościowe pojazdów w danych przedziałach czasowych na określonym wycinku drogowym z wykorzystaniem danych historycznych może posłużyć jako określenie zjawiska Stresu Planowanego. Zarządcy ruchu na podstawie danych są w stanie określić jakie warunki ruchu na sieci miejskiej mogą zaistnieć a tym samym być przygotowanym na wystąpienie Stresu Przewidywanego np. w okresie szczytu komunikacyjnego.

Przykładem obrazującym natężenie dobowe może być nałożenie uśrednionych danych z okresu miesiąca na jeden wykres.[86] Zostało to zobrazowane na Rysunek 5, na którym przedstawiono natężenie ruchu z rozróżnieniem struktury kierunkowej dla skrzyżowania trójwlotowego, gdzie wlot północny oznaczono jako N, zachodni – W i wschodni – E. Następnie zostały rozróżnione kierunki dla każdego wlotu, gdzie kierowcy mogą: skręcić w *lewo*, skręcić w *prawo*, jechać na *wprost*. Analizując poniższy wykres, gdzie na osi pionowej odwzorowane jest natężenie pojazdów (pojazdy na godzinę) a na osi poziomej wyrażony jest dobowy okres czasu w interwałach godzinnych, można zauważyć dwa szczyty komunikacyjne, przypadające na okresy wyraźnego zwiększenia natężenia ruchu na pasach do jazdy na wprost wlotów zachodniego i wschodniego (tam, gdzie wartości natężenia sięgają powyżej 1000 pojazdów (w przeliczeniu na pojazdy umowne).



Rysunek 5 Dobory rozkład ruchu na skrzyżowaniu Janka Wiśniewskiego - Kwiatkowskiego. Czerwiec 2017 Gdynia, natężenie pojazdów na osi pionowej w odniesieniu do godzinnych przedziałów czasowych na osi poziomej[86]

Przykładem zastosowania modelowania potoku ruchu na przykładzie miasta portowego może być wykorzystanie danych rzeczywistych pochodzących z systemu do preselekcji pojazdów przeciążonych WIM (*ang. Weight In Motion*).[32],[8],[66] Najczęściej stosowanym rozwiązaniem do wykrywania obecności pojazdu w punkcie pomiarowym są pętla indukcyjne. Pętla indukcyjna zbudowana jest z kilku zwojów drutu miedzianego umieszczonych w szczeliny, wyciętej w nawierzchni i zabezpieczonej odpowiednim materiałem.[52] System można rozbudować o czujniki działające w oparciu o nacisk kół pojazdu i czujnik umieszczony w nawierzchni drogi. To rozwiązanie pozwala na zweryfikowanie nacisku osi pojazdu na nawierzchnię przez pojazd. WIM złożony jest z następujących elementów:

- Kamera ANPR (*ang. Automatic Number Plate Recognition*) - kamery zainstalowane nad główną nawierzchnią drogi, skierowane głównie na linię zatrzymania w celu utworzenia obszaru wykrywania. Kamera ANPR została zaprojektowana w celu automatycznego wykrywania tablicy rejestracyjnej pojazdu i identyfikacji numeru, który znajdzie się w zdefiniowanym w jej polu widzenia obszarze. Obecnie stosowane systemy ANPR oferują rozszerzoną bazę

danych (stosunek długości do szerokości) pojazdów, aby umożliwić identyfikację typu, marki, modelu pojazdu, a także jego koloru;

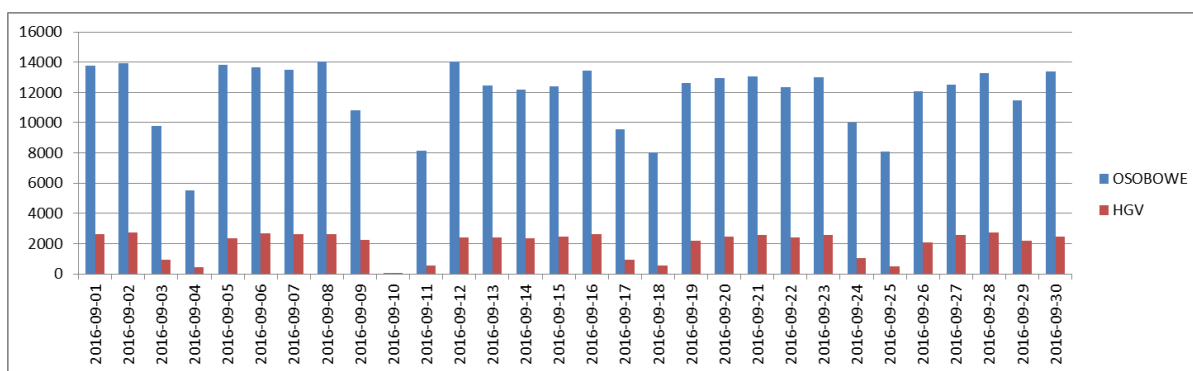
- Doświetlacze podczerwieni - są używane w połączeniu z kamerami ANPR do wykrywania pojazdów po zmroku, doświetlając wykonywane zdjęcia bez efektu oślepiania kierowców białym światłem (używany w fotoradarach). Reflektory podczerwieni pozwalają systemowi na robienie zdjęć w ciemności przy zachowaniu zadowalającej jakości automatycznego odczytu numeru rejestracyjnego;
- Panel preselekcyjny – stosowany do pomiaru tensometrycznego, który umożliwia: pomiar masy, pomiar całkowitej masy, pomiar nacisku na pojedynczą oś pojazdu;
- Baza Danych - dane z WIM przesyłane są do bazy danych, dzięki czemu zarządzający systemem ma dostęp do czasu, daty, numeru rejestracyjnego, całkowitej masy pojazdu, prędkości, z jaką poruszał się pojazd, nacisku na poszczególne osie, a także do zdjęcia zrobionego w momencie automatycznego pomiaru.

Tabela 3 Kategorie pojazdów zgodne z COST323[64]

Kategoria	Opis
Kategoria 1	Samochody Osobowe, samochody osobowe z lekkimi przyczepami i samochody dostawcze o masie do 35kN
Kategoria 2	Samochody Ciężarowe dwuosiove
Kategoria 3	Samochody Ciężarowe trzy-osiove, Samochody Ciężarowe czterosiove
Kategoria 4	Ciągniki siodłowe od trzech do sześciu osi (maksymalnie dwie osie w grupie)
Kategoria 5	Ciągniki siodłowe od pięciu do siedmiu osi (o maksymalnie trzech osiach w grupie)
Kategoria 6	Samochody ciężarowe z przyczepami
Kategoria 7	Autobusy
Kategoria 8	Inne pojazdy

Wszystkie dane po przetworzeniu matematycznym mogą służyć jako prognoza intensywności ruchu spodziewanej na skrzyżowaniu znajdującym się za punktem pomiarowym. Znajomość

struktury rodzajowej ruchu dla sterownika sygnalizacji świetlnej jest przydatna, ponieważ samochody ciężarowe, autobusy itp. potrzebują więcej czasu na wykonanie manewrów, jak skręcanie czy ruszanie z miejsca. W Europie stosuje się wiele klasyfikacji pojazdów, z których najpopularniejszą jest klasyfikacja COST 323 (metoda ta została również wykorzystana w gdyńskim systemie WIM). Według tej metody istnieje osiem kategorii pojazdów, zobrazowane zostały one w Tabeli 3. Do dalszej analizy posłużyły dane rzeczywiste z WIM zlokalizowanego w Gdyni, dane pochodzą z całego miesiąca września z 2016 roku.[87] Stosunek liczby pojazdów osobowych do ciężarowych przedstawia Rysunek 6.



Rysunek 6 Wrzesień 2016 WIM Gdynia, liczba pojazdów ciężarowych (HGV) i osobowych, dobowe natężenie pojazdów na osi pionowej w odniesieniu do dziennych interwałów czasowych na osi poziomej [opracowanie własne]

Metody analityczne wymagają użycia modelu matematycznego do określenia współczynników niezawodności. Metody symulacyjne składają się z wielu iteracji symulujących sekwencyjne losowe zachowanie systemu drogowego, a następnie wykorzystują narzędzia statystyczne do oceny współczynników niezawodności. W metodach sekwencyjnych występuje chronologiczne traktowanie zarówno czasu, jak i jego podokresów.[58] Teoria wieloetapowej niezawodności może być używana do opisu niezawodności procesu transportu. Wiarygodność definiuje się jako prawdopodobieństwo poprawnego działania obiektu w określonych warunkach i czasie. W przypadku sieci transportowych można uogólnić prawdopodobieństwo wykonania zadania transportowego na odpowiednim poziomie wydajności. Wybierając różne poziomy wydajności możliwym jest określenie niezawodności wielopoziomowej. Zmiany w funkcjonowaniu systemu transportowego zależą od cech niezawodności komponentów systemu i jego struktury

niezawodności. Niektóre elementy przeciążenia sieci zmniejszają przepustowość w sieci transportowej. Podczas realizacji zadania transportowego, każda sekcja sieci transportowej znajduje się w różnych stanach operacyjnych. Poziomy swobody przemieszczania się - jakościowa zmiana warunków ruchu uwzględniająca zachowania kierowców i innych użytkowników dróg. Zakres warunków ruchu dzieli się na sześć poziomów swobody ruchu oznaczonych literami A - F:[18][10]:

- A - swobodny ruch, swoboda doboru prędkości i zwrotności;
- B - stały ruch - prędkość ruchu i swoboda manewru są ograniczone w niewielkim stopniu;
- C - stały ruch, wybór prędkości jest wyraźnie ograniczony; manewry wymagają dużej uwagi ze względu na obecność innych pojazdów;
- D - nierównomierny ruch, szybkość i opcje manewrowania są bardzo ograniczone. Niski komfort jazdy. Chwilowy wzrost intensywności powoduje zakłócenia w ruchu;
- E - Nierówny ruch, gęstość ruchu odpowiada pojemności dróg. Prędkość ustabilizowana na stosunkowo niskim poziomie. Nieznaczny wzrost intensywności lub chwilowe zatrzymanie ruchu prowadzi do poważnych zniekształceń;
- F - Ruch zakłócony, prędkość minimalna, zakres manewrowości całkowicie wymuszony.

Model stochastyczny przejścia stanów swobody ruchu został zbudowany za pomocą kolejnych przejść między stanami określonymi przez stopnie swobody ruchu, przy założeniu, że występują zdarzenia, które skutkują każdym przejściem do sąsiedniego poziomu swobody, oraz zdarzenia, które skutkuje przejściem z niższego poziomu swobody do jakiegokolwiek lepszego poziomu swobody. Stopnie swobody C, D, E związane są z ograniczeniem prędkości pojazdu i manewrowością. Stopnie te traktowane są jako wady odcinka drogi. Mówimy, że system drogowy może przebywać w:

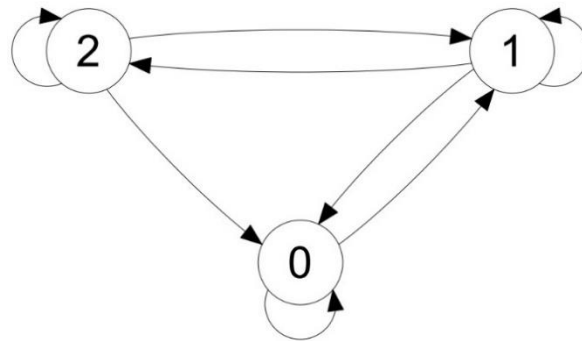
- Stanie 0 - system jest w stanie zdatności - pełna wydajność, jego stan operacyjny należy do klasy swobody ruchu A;

- Stanie 1 - system jest w stanie częściowej niezdatności - częściowa wydajność, jego stan operacyjny należy do klasy swobody ruchu B ;
- Stanie 2 - system jest w stanie niezdatności - jego stan operacyjny należy do klasy swobody ruchu C, D, E .

Miary charakteryzujące poziom swobody ruchu określają zależności:

- prędkości jazdy;
- intensywności ruchu.

Przy założeniu, że proces eksploatacji na dowolnym poziomie swobody ruchu może zostać zakłócony przez zdarzenie powodujące przejście na niższy poziom swobody przemieszczania się, w celu uproszczenia modelu przyjęto, że co najwyżej jedno takie zdarzenie może wystąpić na każdym poziomie swobody ruchu. Ponadto model czasu od momentu osiągnięcia kolejnego poziomu swobody ruchu, aż do momentu wystąpienia zdarzenia jest zmienną losową o rozkładzie wykładniczym. Powrót do lepszego stanu swobody ruchu jest nieujemną zmienną losową o rozkładzie określonym przez dany rozkład. Założono, że operacja ma charakter cykliczny. Obserwacje strumienia pojazdu pozwoliły na określenie zmian w stanie działania systemu opisanego jako graf na Rysunek 7.



Rysunek 7 Graf przejść stanów swobody ruchu [opracowanie własne]

$$p'_2(t) = \alpha_{12}p_2(t) - (\alpha_{21} + \alpha_{20})p_2(t) \quad (1)$$

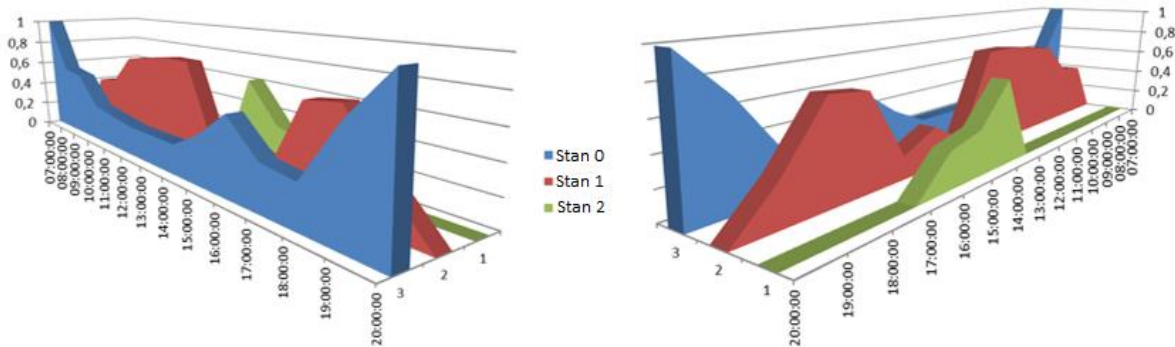
$$p'_1(t) = \alpha_{21}p_2(t) + \alpha_{01}p_0(t) - (\alpha_{12} + \alpha_{10})p_1(t) \quad (2)$$

$$p'_0(t) = \alpha_{20}p_2(t) + \alpha_{10}p_1(t) - \alpha_{01}p_0(t) \quad (3)$$

gdzie:

- p'_i – pochodna prawdopodobieństwa wystąpienia swobody ruchu odpowiadające Stanowi i , $i=\{0,1,2\}$;
- α_{ij} – intensywność przejścia ze stanu i do Stanu j , $i,j = \{0,1,2\}$;
- p_i – prawdopodobieństwo przebywania w Stanie i , $i = \{0,1,2\}$;

Możliwym jest założenie, że Stan układu drogowego w chwili $t_n + 1$ i przedział czasu osiągnięty w czasie t_n nie zależy od Stanów, które wystąpiły we wcześniejszych momentach tj. t_i , dla $i \in \{0,1, \dots, n-1\}$, i ich interwały czasowe. Tak więc proces opisujący zmiany w stanach systemu jest procesem semi-Markowa.[39][40] Przyjmując model semi-Markowski dla zmian Stanu systemu, niezbędnym jest zmapowanie macierzy prawdopodobieństwa przejść Stanów 0,1,2. Na podstawie pomiarów z WIM dane wynikowe z prawdopodobieństw przejść zostały przedstawione na Rysunek 8.



Rysunek 8 Wynik analizy swobody ruchu - Wrzesień 2016 Gdynia.[86]

• Stres Przewidywany

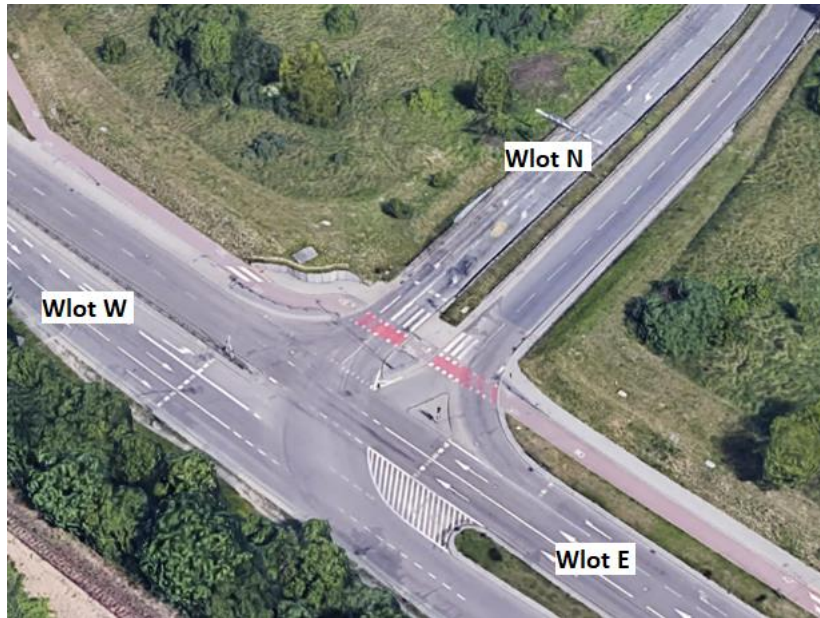
Najprostszym przykładem Stresu Przewidywalnego jest określenie szczytów komunikacyjnych. Z uwagi na to, że jest to proces powtarzalny w czasie łatwo jest zauważyć konkretne pory dnia, w których prędkość swobodna maleje. Proces ten może być różny w zależności od dnia tygodnia – czy jest to dzień powszedni czy np. dzień wolny od pracy. Kolejnym przykładem wystąpienia Stresu Przewidywanego w MST, jest przybycie statku

wycieczkowego do portu – znane są: godziny przybycia i potencjalna liczba pasażerów danego wycieczkowca, zatem z można oszacować liczbę osób (turystów) poruszających się po mieście. Osoby te mogą w znaczny sposób obciążać sieć miejską np. poprzez poruszanie się po mieście taksówkami lub samochodami prywatnymi, jeżeli takie są transportowane statkiem. Może również wzrosnąć liczba osób chcących skorzystać z transportu zbiorowego na trasie od terminala promowego do centrum miasta. Zatem nie chcąc narażać na utrudnienia drogowe i tak już obciążonej ruchem drogowym transportowej sieci miejskiej należy dostosować transport zbiorowy lub specjalnie przygotowane autokary, które będą przemieszczać się po trasie zainteresowania turystów.

Przykładem Stresu Przewidywanego może być wydarzenie masowe na dużą skalę w obrębie miasta. W Gdyni od 2003 roku cyklicznie co roku organizowany jest największy festiwal muzyczny w tej części Europy – Open'er Festiwal. Co roczne zwiększenie popularności wydarzenia spowodowało, że do miasta Gdynia przyjeżdżają fani muzyki z całego świata. Według organizatora, który udzielił wywiadu portalowi internetowemu www.onet.pl, w 2011 roku liczba uczestników na jeden dzień festiwalu wyniosła 60 tysięcy osób. Powołując się na informacje ze strony internetowej organizatora (www.opener.pl) w 2015 liczba osób, które odwiedziły festiwal to 120 tysięcy. 120 tysięcy osób to w przybliżeniu połowa liczby mieszkańców całego miasta. Taka liczba uczestników festiwalu chcących przemieścić się na teren wydarzenia muzycznego stanowi duże wyzwanie dla obsługi imprezy masowej a także dla osób zarządzających miastem. Miasto zapewnia uczestnikom festiwalu bezpłatny dojazd na teren festiwalu autobusami miejskimi specjalnie do tego wyznaczonymi. Autobusy te mają wyznaczoną trasę i zatrzymują się tylko na dwóch przystankach: Dworzec Gdynia Główna i miejsce docelowe festiwalu na Lotnisku Gdynia Babie Doły – Kosakowo. Festiwalowy autobus nie ma stałego rozkładu jazdy. Odjeżdża w momencie zapełnienia się w znacznym stopniu. W momencie odjazdu jednego autobusu podjeżdża kolejny. W szczytowych godzinach odjazdy autobusów są z częstotliwością mniejszą niż jedna minuta. Brak regularności w odjazdach sprawia trudność dla osób zarządzających ruchem drogowym. Inżynierowie pracujący w centrum sterowania ruchem w czasie trwania imprezy masowej muszą obsłużyć codzienny ruch drogowy wraz z dodatkowym napływem pojazdów transportu indywidualnego i dodatkowymi autobusami

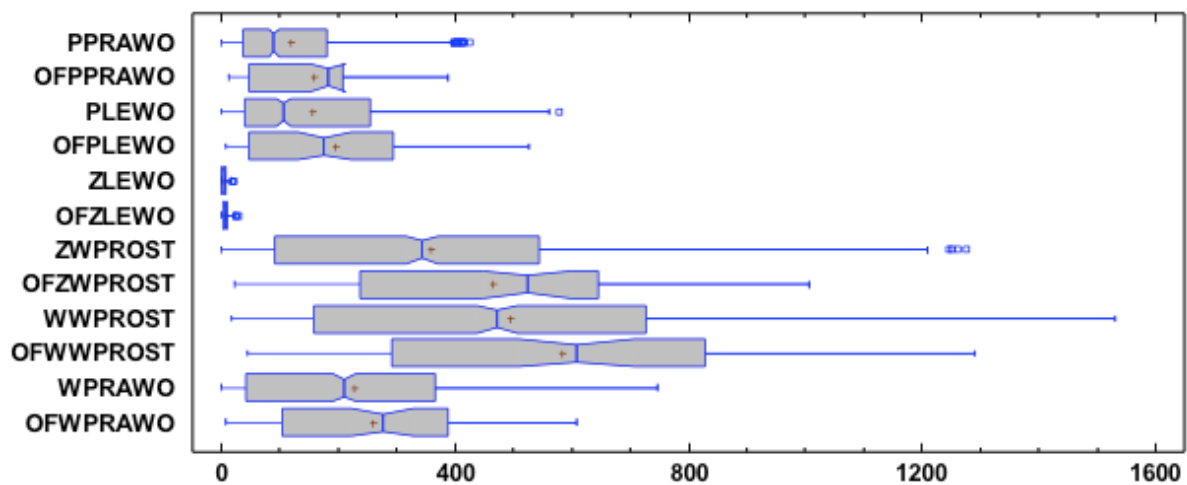
festiwalowymi. Jest to duże obciążenie dla sieci drogowej. Trasa na festiwal prowadzi przez Estakadę Kwiatkowskiego, która zdarza się być na granicy przepustowości w codziennych warunkach ruchu. Estakada bezpośrednio łączy się z Obwodnicą Trójmiasta co stanowi dobre połączenie z Gdańskiem i Sopotem a obwodnica Trójmiasta ma bezpośrednie połączenie z Autostradą A1. Jednym z bardziej obciążonych skrzyżowań podczas trwania festiwalu jest skrzyżowanie ulicy Janka Wiśniewskiego z ulicą Energetyków. W tym miejscu duże napływy ruchu są spowodowane mieszkańcami gminy sąsiadującej - Rumia a także z mieszkańcami północnych dzielnic Gdyni. Ulica Janka Wiśniewskiego łączy ze sobą terminale kontenerowe w Gdyni a także terminale masowe. Zapewnia również połączenie terminali masowych z obwodnicą a następnie autostradą. Skrzyżowanie jest trójwlotowe, posiada dwa pasy na wlocie północnym, trzy pasy na wlocie zachodnim i trzy pasy na wlocie wschodnim. Skrzyżowanie podłączone jest do Trójmiejskiego Inteligentnego Systemu Sterowania Ruchem Aglomeracyjnym (TRISTAR). Skrzyżowanie sterowane jest w sposób lokalny tzn., że długość zielonego światła dla poszczególnych faz dostosowywana jest do natężeń na obciążonej ruchem relacji. Pojazdy zliczane są dzięki pętłom indukcyjnym zatopionym w nawierzchni drogi. Dzięki stacji pomiaru ruchu znana jest też struktura rodzajowa pojazdów.

Dane rzeczywiste o ruchu dla okresów godzinowych zostały pogrupowane w dwa typy: w okresie czasowym trwania festiwalu i w okresie czasu bez festiwalu. Dane z okresu festiwalowego to trzy dni od 28.06.2017 do 30.06.2017. Dane okresowe bez festiwalu to dane z okresu 01.06 - 27.06.2017. Dane o natężeniu zostały również podzielone na różne kierunki P - Północ, W - Wschód, Z - Zachód. Następnym znakiem jest kierunek skrętu pojazdu: *WPROST* - wprost, *PRAWO* - skręt w prawo, *LEWO* - skręt w lewo. *OF* - oznacza okres danych dla dni, w których odbywał się festiwal np. *OFWPRAWO* oznacza dzień, w którym odbył się festiwal, wlot zachodni, kierunek w prawo. Rysunek 9 przedstawia usytuowanie wlotów na skrzyżowaniu Janka Wiśniewskiego z Estakadą Kwiatkowskiego.



Rysunek 9 Skrzyżowanie Janka Wiśniewskiego - Estakada Kwiatkowskiego. Usytuowanie wlotów [www.maps.google.com]

Box and Whisker Plot jest użytecznym narzędziem do identyfikowania wartości odstających i porównywania dystrybucji. Pole i wykres dostarczają ogólnych i podstawowych informacji o rozkładzie, graficznie przedstawia grupę danych liczbowych zgodnie z ich kwantylem. Wykres pola jest miarodajny tylko z wystarczającą ilością danych do dostarczenia statystyk.[62]



Rysunek 10 Box and Whisker Plot - dane ze skrzyżowania Janka Wiśniewskiego - Estakada Kwiatkowskiego [88]

W wyniku zastosowania narzędzia STATGRAPHICS do przeanalizowania danych rzeczywistych powstał wykres pokazujący, że największe zmiany zachodzą na wlocie E - Rysunek 10.

Posługując się przykładem miasta portowego Gdynia zastosowano model ARIMA (*ang. Autoregressive Integrated Moving Average*). [88] Model ten został szczegółowo opisany w Załącznik 3 – Model ARIMA. Wyniki modelu ARIMA obejmują:

- Obserwacje - pierwotne obserwacje lub środki podgrupy;
- Zakresy, sigma lub zakresy ruchome - wartości wykreślone na wykresie dyspersji;
- Rozmiary - rozmiary podgrup;
- Etykiety - etykiety podgrup;
- Średnia proc. - szacowana średnia procesowa;
- Proces Sigma - szacowane odchylenie standardowe procesu;
- Reszty - reszty z modelu ARIMA.

Podsumowując otrzymane wyniki analizy natężenia ruchu:

- **Włot wschodni – kierunek w prawo, dzień bez festiwalu (WPRAWO)**

- Liczba obserwacji = 648, 0 obserwacji wykluczonych
- Rozkład: Normalny,
- Transformacja: brak.
- górna granica kontroli: $+3,0 = 702\ 006$,
- Centralin = 227 553,
- dolna granica kontroli: $-3,0$
- sigma = -24,96,9,
- 5 poza granicami.
- Średnia procesu = 227 553,
- sigma procesowa 158.151,
- Średnia resztkowa MR(2) = 57,8697,

— Resztkowa sigma = 51 3029.

— Sigma oszacowana na podstawie średniego zakresu ruchomości reszt.

Podsumowanie modelu ARIMA pokazuje Tabela 4. Prognozy zwrotne: tak. Szacowana wariancja białego szumu = 3866,31 przy 645 stopniach swobody. Szacowane odchylenie standardowe białego szumu = 62 177. Tabele kontrolne są konstruowane przy założeniu, że dane pochodzą z rozkładu normalnego ze średnią równą 227,553 i odchyleniem standardowym równym 158.151.

- **Wlot wschodni – Kierunek w prawo, dzień festiwalowy (OFWPRAWO)**

— Liczba obserwacji = 71,0 obserwacji wykluczonych,

— Rozkład: Normalny,

— Transformacja: brak.

— górna granica kontroli: +3,0 = 673,516,

— Centralin = 248,28,

— dolna granica kontroli: -3,0

— sigma = -176,956,

— 0 poza granicami.

— Średnia procesu = 248,28,

— proces sigma 141,745,

— Średnia resztkowa MR (2) = 76 8482,

— wartość resztkowa sigma = 681279.

— Sigma oszacowana na podstawie średniego zakresu ruchomości reszt.

— Prognozy zwrotne: tak. Szacowana wariancja białego szumu = 6706,79 z 68 stopniami swobody.

— Szacowane odchylenie standardowe białego szumu = 81,895.

Wykresy kontrolne są konstruowane przy założeniu, że dane pochodzą z rozkładu normalnego ze średnią równą 248,28 i odchyleniem standardowym = 81,895. Tabele kontrolne są konstruowane przy założeniu, że dane pochodzą z rozkładu normalnego ze średnią równą 248,28 i odchyleniem standardowym równym 147 745.

- **Wlot wschodni – Kierunek wprost, dzień bez festiwalu (WWPROST)**

- Liczba obserwacji = 648.
- 0 obserwacji pominiętych.
- Dystrybucja: normalna.
- Transformacja: brak.
- górna granica kontroli: $+3,0 = 1460,94$,
- Centralin = 492,078,
- dolna granica kontroli: $-3,0$
- sigma = -476,779,
- 3 poza granicami.
- Średnia procesu = 492,078,
- proces sigma 322,953,
- Średnia resztkowa MR (2) = 97 1624,
- Resztkowa sigma = 86, 1369.
- Sigma oszacowana na podstawie średniego zakresu ruchomości reszt.

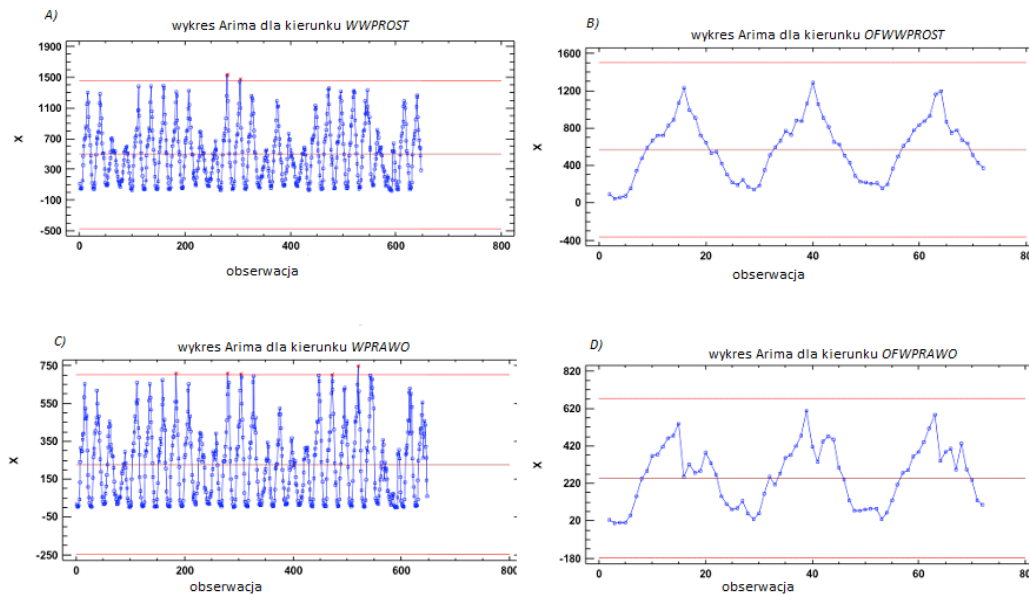
Podsumowanie modelu ARIMA pokazuje Tabela 4. Szacowana wariancja białego szumu = 8967,2 z 645 stopniami swobody. Szacowane odchylenie standardowe dla białego szumu = 94.6953. Tabele kontrolne są konstruowane przy założeniu, że dane pochodzą z rozkładu normalnego ze średnią równą 492,078 i odchyleniem standardowym równym 322 953.

- **Wlot wschodni – Kierunek wprost, dzień festiwalowy (OFWWPROST)**

- Liczba obserwacji = 71.
- 0 obserwacji pominiętych.
- Dystrybucja: normalna.
- Transformacja: brak.

- główna granica kontroli: $+3,0 = 1503,85$,
- Centralin = $568,988$,
- dolna granica kontroli: $-3,0$
- sigma = $-365,878$,
- 5 poza granicami.
- Średnia procesu = $568,988$,
- proces sigma $311,622$,
- Średnia resztkowa MR (2) = 108.977 ,
- Resztkowa sigma = 96.611 .
- Sigma oszacowana na podstawie średniego zakresu ruchomości reszt.

Prognozy zwrotne: tak. Szacowana wariancja białego szumu = $10682,6$ z 68 stopniami swobody. Szacowane odchylenie standardowe białego szumu = 103357 . Tabele kontrolne są konstruowane przy założeniu, że dane pochodzą z rozkładu normalnego ze średnią równą $568,988$ i odchyleniem standardowym równym $311,622$. Wyniki przedstawiono za pomocą wykresów. Dla porównania wykresy te zostały przedstawione obok siebie, aby były widoczne różnice pomiędzy wskazaniem.



Rysunek 11 Wykresy modelu ARIMA[89]

Dane wynikowe odnośnie wlotów zostały przedstawione i zagregowane jako Tabela 4. Dodatkowo wyniki zostały przedstawione za pomocą wykresu dla pokazania skali zmian w poszczególnych przypadkach. Wykresy te zostały przedstawione jako poszczególne zmiany dla parametrów. Każda grupa wykresów przedstawia porównanie wyników dla różnych kierunków (wprost lub prawo) i dla różnych dni (dzień bez festiwalu i dzień z festiwalem). Graficzne przedstawienie wyników porównawczych zawarte są w Załącznik 3 – Model ARIMA.

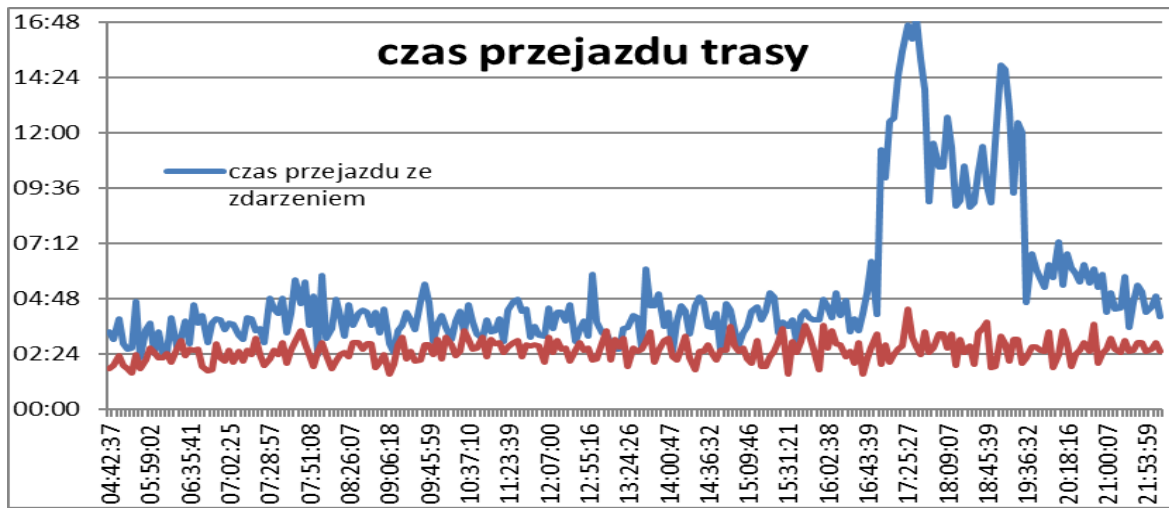
Tabela 4 Model ARIMA - tabela wynikowa[89]

wlot	kierunek	dzień	parametr	oszacowanie	błąd standardowy	t	P-value
wschód	wprost	dzień niefestiwalowy	AR(1)	1,49408	0,031721	47,1001	0
			AR(2)	-0,58149	0,031713	- 18,3357	0
			średnia	492,078	41,9597	11,7274	0
			stała	43,0095			
		dzień festiwalowy	AR(1)	1,3811	0,105838	13,0492	0
			AR(2)	-0,47582	0,105481	- 4,51095	0
			średnia	568,988	126,469	4,49904	0
			stała	53,8959			
	w prawo	dzień niefestiwalowy	AR(1)	1,33367	0,03539	37,6854	0
			AR(2)	-0,429	0,035387	-12,123	0
			średnia	227,553	25,0922	9,06868	0
			stała	21,6914			
		dzień festiwalowy	AR(1)	0,94473	0,120818	7,81945	0
			AR(2)	-0,07833	0,120579	-0,6496	0,5181
			średnia	248,28	65,3447	3,79954	0,0003
			stała	33,1697			

- **Stres Nagły**

Stres Nagły w MST występuje stosunkowo rzadko w porównaniu do pozostałych stresów w systemie. Sytuacje nagłe w sieci transportowej mają bardzo duży wpływ na warunki ruchu, zwłaszcza w ruchu miejskim. W zależności od gęstości pokrycia drogami odcinka miejskiego wywołanie nagłego zakłócenia w sieci jako Stresu Nagłego może spowodować całkowity lub częściowy zator w sieci. W przypadku drogi jednokierunkowej, w której nie ma możliwości zmiany kierunku ruchu spowodowanie Stresu Nagłego np. poprzez uszkodzenie infrastruktury drogowej może spowodować zator drogi na całej jej długości, a powrót do stanu przed wystąpieniem stresu może zająć bardzo długi okres czasu z uwagi na ruszanie z miejsca poszczególnych pojazdów, które poprzednio były częścią kongestii. Innymi przykładami wystąpienia Stresu Nagłego w sieci drogowej może być: awaria pojazdu, wypadek lub kolizja drogowa, uszkodzenie systemu sterowania ruchem, strajk na przejściach dla pieszych, awaria infrastruktury przydrożnej, wtargnięcie zwierzęcia na drogę itp. Przykładem opisującym modelowanie **Stresu Nagłego** może być awaria infrastruktury drogowej w mieście Gdynia.[95] Do zdarzenia doszło 06.10.2015, awaria wodociągu na buspasie w Gdyni na ulicy Władysława IV w Gdyni spowodowała duże opóźnienie w ruchu nie tylko autobusów transportu zbiorowego, ale również dla wszystkich uczestników ruchu. Buspas na ulicy Władysława IV wynosi niecałe 1000 metrów rozpoczyna się przy wlocie na skrzyżowaniu ulic Obrońców Wybrzeża z Władysława IV w stronę Gdańska a kończy się w pobliżu przystanku autobusowego przy Alei Marszałka Piłsudskiego. Awaria wodociągu miała miejsce w pobliżu przystanku autobusowego Kilińskiego. Awaria wodociągu spowodowała uszkodzenie nawierzchni drogowej, ponieważ woda wypłukała znaczną ilość piachu, tworząc dużych rozmiarów wyrwę pod asfaltem. Ruch został poprowadzony objazdem przez ulicę równoległą do ulicy Władysława IV (ul. Świętojańska). Ulica zastępcza ma przekrój dwupasowy – po jednym pasie w każdym kierunku ruchu. Do analizy posłużyły dane z czasu przejazdu autobusów miejskich. Punktem początkowym pomiaru jest przystanek Armii Krajowej a punktem końcowym przystanek Wzgórze Świętego Maksymiliana. Trasa pomiarowa jest o długości 1000 metrów a w jej obszarze znajduje się pięć skrzyżowań, w tym

cztery z sygnalizacją świetlną (obecnie pięć skrzyżowań wyposażonych jest w sygnalizację świetlną, pomiar został wykonany w 2016 roku).[90]



Rysunek 12 Czas przejazdu analiza porównawcza ul. Władysława IV w Gdyni, długość czasu przejazdu pomiędzy punktami meldunkowymi autobusu w formacie mm:ss na osi pionowej przedziały czasowe w ciągu doby w formacie hh:mm:ss na osi poziomej [90]

Rysunek 12 przedstawia wykres czasu przejazdu autobusów w dniu, w którym doszło do zdarzenia wraz z porównaniem do czasów przejazdu autobusów w dniu, bez zdarzenia (20.10.2015). Współczynnikami powodującymi różnice w czasie przejazdu są:

- czas oczekiwania na zielone światło na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną;
- różna liczba pasażerów wsiadających jak i wysiadających na przystankach autobusowych;
- natężenie ruchu pojazdów na odcinkach, gdzie autobus nie porusza się po buspasie;
- liczba pojazdów parkujących na miejscach postojowych wzdłuż buspasa;
- różnorodność autobusów: pospieszne/normalne. Autobusy pospieszne nie zatrzymują się na jednym przystanku - Kilińskiego w ciągu trasy. Rozkładowy czas pomiędzy przejazdu trasy przez autobusy wynosi 3 minuty i 4 minuty w godzinach szczytu.

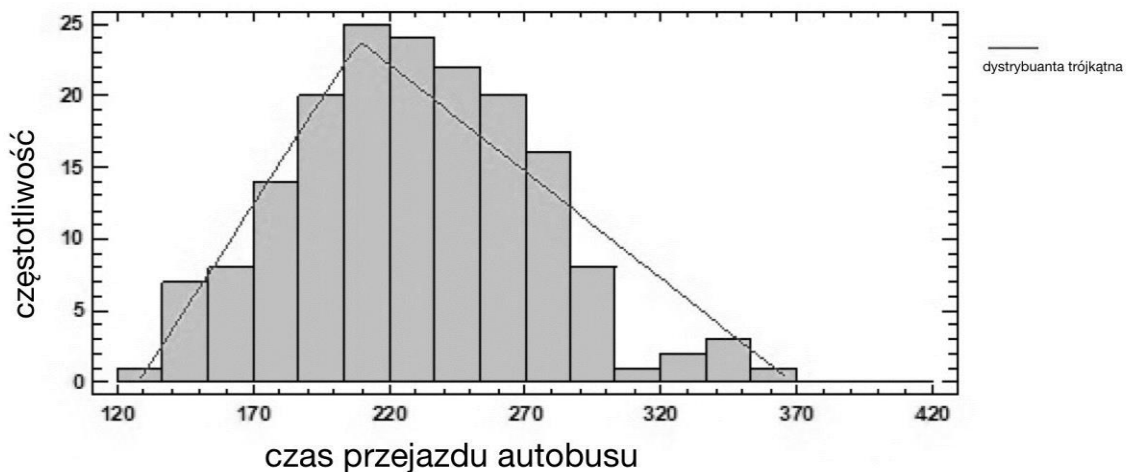
Na trasie przejazdu (buspas) zlokalizowane są przystanki oraz pięć skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Czas przejazdu autobusu T_p jest zmienną losową daną wzorem:

$$T_p = T_{\text{średnie}} + T_{\text{przys}} + T_{\text{świ}} \quad (4)$$

gdzie:

- $T_{\text{średnie}}$ – średni czas przejazdu odcinków pomiędzy przystankami;
- T_{przys} – czas postoju na przystankach;
- $T_{\text{świ}}$ – czas oczekiwania na sygnał zielony.

Szczegóły modelu zostały przedstawione w Załącznik 4 - Model przejazdu autobusu. Zmienna losowa T_p jest zmienną o rozkładzie trójkątnym z parametrami zależnymi od ograniczeń na minimalne czasy zielone (minimalne czasy trwania światła zielonego w fazach w trakcie trwania jednego cyklu pracy sygnalizacji świetlnej) oraz modalnych wartości liczby pasażerów czekających na przystanku. Analiza statystyczna czasów przejazdu autobusów, z wykorzystaniem programu STATGRAPHICS, pozwoliła na opracowanie modelu rozkładu czasów. Rozkład czasów opisany jest rozkładem trójkątnym z parametrami: minimum = 127,736, dominanta = 209, maksimum = 368,408 i przedstawione jako Rysunek 13.



Rysunek 13 Histogram z próby i gęstość rozkład trójkątnego[91]

Tabela 5 przedstawia wyniki przeprowadzonych testów zgodności. Wykorzystano testy:

- Kuipera – jest on modyfikacją testu Kołmogorowa–Smirnowa poprawiającą jego właściwości w krańcowych obszarach rozkładu;
- Cramera – von Mises’a porównuje obserwacje w próbie z próbą losową pobraną z hipotetycznego rozkładu;
- Andersona – Darlinga - ocenia stopień dopasowania dystrybuanty testowanego rozkładu z obliczoną na podstawie próby dystrybuantą empiryczną[19].

Tabela 5 Porównanie testów zgodności[90]

Kuiper V		Cramer-Von Mises W^2		Anderson-Darling A^2	
V	0,114365	W^2	0,321581	A^2	2,12943
Forma zmodyfikowana	1,51971	Forma zmodyfikowana	0,321132	Forma zmodyfikowana	2,12943
Wartość - P	≥ 0.10	Wartość - P	≥ 0.10	Wartość - P	< 0.10

Wartość statystyki P wskazuje, że żaden z testów nie daje podstaw do odrzucenia hipotezy o dopasowaniu rozkładu trójkątnego. Analiza czasów przejazdów autobusów zarejestrowanych w czasie trwania awarii pozwoliła na stwierdzenie, że można je opisać rozkładem trójkątnym o parametrach: minimum = 230,537, dominanta = 323, maksimum = 1126,04. Tabela 6 przedstawia wyniki przeprowadzonych testów zgodności.

Tabela 6 Porównanie rozkładu trójkątnego - dzień awarii[90]

Kuiper V		Cramer-Von Mises W^2		Anderson-Darling A^2	
V	0,208783	W^2	0,140163	A^2	0,74098
Forma zmodyfikowana	1,57341	Forma zmodyfikowana	0,135423	Forma zmodyfikowana	0,74098
Wartość - P	≥ 0.10	Wartość - P	≥ 0.10	Wartość - P	≥ 0.10

Wartość statystyki P wskazuje, że żaden z testów nie daje podstaw do odrzucenia hipotezy o dopasowaniu rozkładu trójkątnego. Test zgodności Kołmogorowa-Smirnowa wykazał, że dystrybuanty empiryczne obu rozkładów są statystycznie istotnie różne. Tabela 7 przedstawia

test ten w przypadku dwóch prób, pozwala na porównanie rozkładów dwóch zmiennych losowych. Jest on wrażliwy zarówno na różnice w położeniu, jak i w kształcie dystrybuant empirycznych porównywanych próbek.[19]

Tabela 7 Wartości statystyk testowych, test Kołmogorowa-Smirnowa[19]

Szacowana ogólna statystyka Kołmogorowa-Smirnowa D_n	0,928079
Dwustronna próbka statystyczna Kołmogorowa-Smirnowa	5,94966
Statystyka testowa - P	0

Wartość statystyki testowej $P = 0$ daje podstawy do odrzucenia hipotezy o zgodności rozkładów.

4.3 Stany niezawodnościowe w Miejskiej Sieci Transportowej

MST można określić jako system techniczny, który może występować w wielu stanach. Stany te mogą być ograniczone czasowo i są bezpośrednio związane z infrastrukturą, która wchodzi w skład analizowanej MST.

Stanem zdatości operacyjnej został nazwany stan *czasu zdatości*, w którym sieć jest całkowicie sprawna tzn. ma zdolność do realizacji nakładanych zadań w określonych warunkach i określonym przedziale czasowym zatem MST przebywa w stanie zdatości. Może zostać opisany jako nieujemna ciągła zmienna losowa T . Podstawową miarą niezawodności obiektu (MST) w przedziale czasowym $[0, t]$ jest funkcja niezawodności wyrażona wzorem:

$$MST_{NZ}(t) = P(T \geq t), \text{ dla } t \geq 0 \quad (5)$$

gdzie:

- $MST_{NZ}(t)$ – funkcja niezawodności MST;
- P – prawdopodobieństwo;
- T – nieujemna ciągła zmienna losowa.

W przypadku rozpatrywania wariantu dwustanowego niezawodności operacyjnej można zapisać odwrotność takiej funkcji nazywaną funkcją zawodności. Funkcja zawodności dla każdego ustalonego $t \geq 0$ przyjmuje wartości prawdopodobieństwa, że obiekt MST_Z w chwili t jest uszkodzony i niezdatny do przeprowadzenia procesu transportowego, można ją opisać wzorem:

$$MST_Z(t) = P(T < t) = 1 - MST_{NZ}(t) \quad (6)$$

gdzie:

- $MST_Z(t)$ – funkcja zawodności MST;
- P – prawdopodobieństwo;
- T – nieujemna ciągła zmienna losowa.

Jeżeli funkcja niezawodności MST_{NZ} jest absolutnie ciągła:

$$MST_{NZ}(t) = \int_t^{+\infty} f(u) du, \text{ dla } t \geq 0 \quad (7)$$

gdzie:

— $f(u)$ – funkcja gęstości rozkładu czasu T

to istnieje funkcja gęstości $f(t)$ taka, że:

$$f(t) = \frac{d}{dt} [MST_Z(t)] = -\frac{d}{dt} [MST_{NZ}(t)] \quad (8)$$

gdzie:

— $f(t)$ – funkcja gęstości.

Jeżeli istnieje gęstość prawdopodobieństwa, można określić intensywność uszkodzeń:

$$\lambda(t) = \frac{d}{dt} [\ln MST_{NZ}(t)] = \frac{f(t)}{MST_{NZ}(t)} \quad (9)$$

gdzie:

— $\lambda(t)$ – intensywność uszkodzeń – intensywność napływu pojazdów, intensywność pogarszania się warunków ruchu.

Oraz funkcję wiodącą $\Lambda(t)$, którą można interpretować jako informację o wyczerpaniu się zapasu niezawodności obiektu jakim jest MST:

$$\Lambda(t) = -\ln[MST_{NZ}(t)] = \int_0^t \lambda(u) du, \quad \text{dla } t \geq 0 \quad (10)$$

gdzie:

— $\Lambda(t)$ – funkcja wiodąca;

Wszystkie wyżej wymienione funkcje mogą być zależne od wielu czynników zewnętrznych takich jak: liczba pojazdów, warunki atmosferyczne, struktura rodzajowa pojazdów czy

zdarzenia wpływające na ruch drogowy takie jak stres. Opis niezawodności MST to między innymi funkcja niezawodności i intensywność uszkodzeń. Zależności między charakterystykami funkcyjnymi czasu zdatności umożliwiają otrzymanie różnego rodzaju informacji o czasie zdatności MST z danego przedziału czasowego poddanego analizie. Do wstępnej analizy danych wylicza się także średnie charakterystyki np.: wartość oczekiwaną czasu zdatności czy odchylenie standardowe.

$$ET = \int_0^{+\infty} tf(t) dt = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad (11)$$

gdzie:

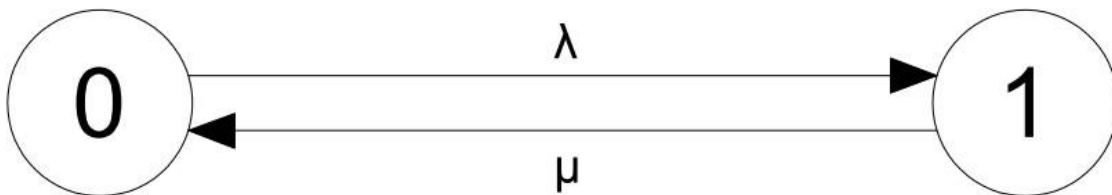
- ET – wartość oczekiwana czasu zdatności;
- $R(t)$ - funkcja niezawodności.

4.4 Niezawodność operacyjna a infrastruktura

Jedną z metod analitycznych oceny niezawodności operacyjnej jest, tworzenie stochastycznych modeli Markowskich, wykorzystując graf zmiany stanów opisujący właściwości niezawodnościowe systemu. Modeluje on niezawodnościowe aspekty zachowania się wybranego podsystemu transportowego w czasie. Element modelowanego podsystemu może znajdować się tylko w jednym spośród dwóch stanów: niezdatności albo zdatności. Podsystem jako całość może znajdować się w wielu różnych stanach, z których każdy wyznaczony jest przez kombinację niezdatnych i zdatnych elementów (zdatny; częściowo zdatny - ograniczenia w ruchu, mniejsza przepustowość; częściowo niezdatny - ograniczenia w ruchu np. zakaz ruchu dla pojazdów ciężarowych; niezdatny). Gdy element systemu (pas ruchu; zwężenie) uszkodza się bądź jest naprawiany, podsystem "przechodzi" od jednego stanu do następnego. Ten rodzaj modelu jest ogólnie nazywany modelem ze stanami dyskretnymi i czasem ciągłym.

Przykład ulicy jednojezdniowej, który przedstawia Rysunek 14 ukazuje, że model niezawodności operacyjnej może występować w dwóch stanach. Występowanie w Stanie 0 jako stanie zdatności, gdzie droga jest całkowicie przejezdna. W przypadku tego modelu na zdatności nie ma wpływu stan pośredniej zdatności w momencie, gdy czas przejazdu jest niższy niż średni. Podsumowując, jeśli jest możliwość przejechania ulicą w takim wypadku model ulicy jednojezdniowej jest w Stanie zdatności 0. W przypadku, kiedy wystąpi np. kolizja blokująca cały przekrój jezdni model jest w Stanie niezdatności 1. Zatem:

- Stan 0 – system jest w stanie zdatności - sprawny
- Stan 1 – system jest w stanie niezdatności - niesprawny



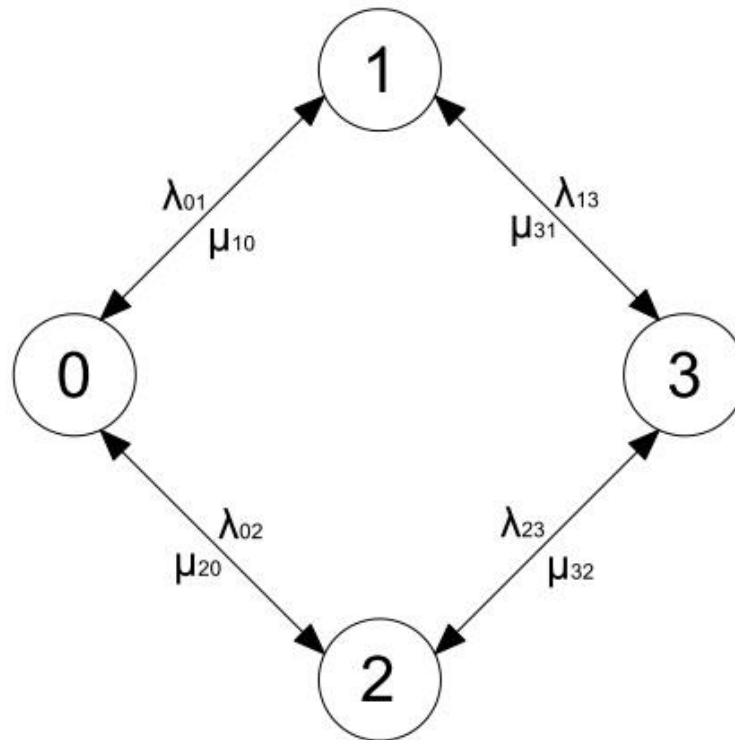
Rysunek 14 Markowski Model Stochastyczny - ulica jednojezdniowa [opracowanie własne]

gdzie:

- λ – intensywność uszkodzeń – intensywność napływu pojazdów, intensywność pogarszania się warunków ruchu.
- μ - intensywność „obsługi” pojazdów – zdolność infrastruktury do umożliwienia pojazdom przejechania przez punkt zliczający uzależniony od warunków zewnętrznych

Przykładem bardziej rozbudowanym jest model stochastyczny ulicy dwupasmowej przedstawiony jako Rysunek 15. W odróżnieniu do modelu ulicy jednopasmowej ważne są stany pośrednie. System może występować w czterech różnych Stanach:

- Stan 0 – system jest w stanie zdatności – sprawny;
- Stan 1 – system jest w stanie częściowej zdatności – pas nr 1 niesprawny;
- Stan 2 – system jest w stanie częściowej zdatności – pas nr 2 niesprawny;
- Stan 3 – system jest w stanie całkowitej niezdatności – pas 1 i pas 2 niesprawny.



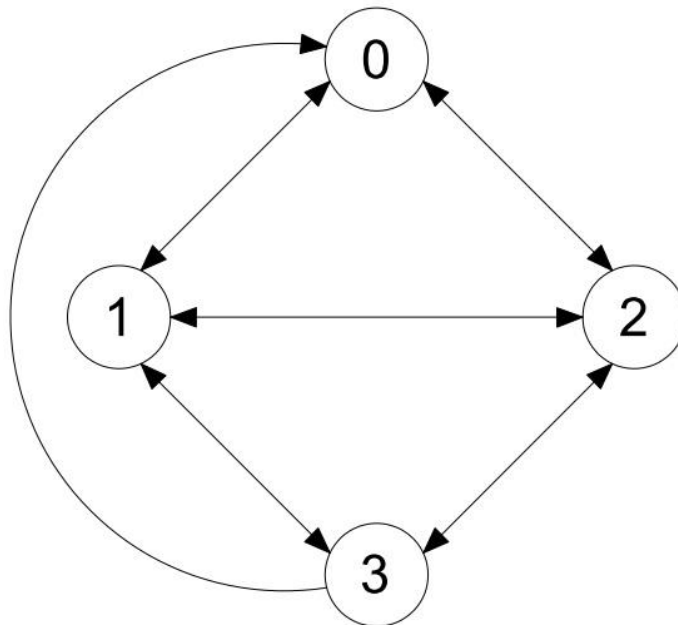
Rysunek 15 Markowski Model Stochastyczny - ulica dwupasmowa [opracowanie własne]

gdzie:

- λ_{ij} – intensywność napływu pojazdów, osiągające wartości graniczne dla poszczególnych Stanów $ij; i,j=\{0,1,2,3\}$;
- μ_{ij} - intensywność „obsługi” pojazdów osiągające wartości graniczne dla poszczególnych Stanów $ij; i,j=\{0,1,2,3\}$, – zdolność infrastruktury do umożliwienia pojazdom przejechania przez punkt zliczający zależna od warunków zewnętrznych.

4.5 Niezawodność operacyjna a charakter awarii

W literaturze[71],[45],[70],[92],[12] istnieją przykłady zastosowań modeli bazujących na procesach markowskich jako skończony dyskretny model Markowa. Przykładem może być model jako fragment sieci drogowej (transportowej). Wyróżnić można dwa czynniki wpływające na niezawodność operacyjną tego fragmentu sieci jest to błąd ludzki i awaria techniczna infrastruktury lub środka transportu. W modelu tym przyjęty został skończony zbiór Stanów, dyskretny czas oraz rozkłady wykładnicze, które opisują czas przebywania w każdym ze Stanów. Rysunek 16 przedstawia graf, w którym następują zmiany Stanów niezawodnościowych systemu.



Rysunek 16 Graf zmian Stanów niezawodnościowych systemu [opracowanie własne]

W modelu występują następujące stany:

- Stan 0 – system jest w stanie zdadności - sprawny;
- Stan 1 – system jest w stanie częściowej zdadności w wyniku błędu ludzkiego;
- Stan 2 – system jest w stanie częściowej zdadności w wyniku awarii technicznej;
- Stan 3 – system jest w stanie niezdadności - niesprawny.

Macierz prawdopodobieństw przejść w jednym kroku jest postaci:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & p_{01} & p_{02} & 0 \\ p_{10} & 0 & p_{12} & p_{13} \\ p_{20} & p_{21} & 0 & p_{23} \\ p_{30} & 0 & 0 & p_{33} \end{bmatrix} \quad (12)$$

gdzie:

- p_{ij} – prawdopodobieństwo przejścia Stanów $i, j, i, j = \{0, 1, 2, 3\}$;
- P – macierz prawdopodobieństw przejść.

$$\begin{aligned} p_{01} + p_{02} &= 1 \\ p_{10} + p_{12} + p_{13} &= 1 \\ p_{20} + p_{21} + p_{23} &= 1 \\ p_{30} + p_{33} &= 1 \end{aligned} \quad (13)$$

Wykorzystując fakt, iż model jest Markowski otrzymano następujący układ równań Chapmana - Kołmogorowa:

$$\begin{aligned} p_{ij}(k, k+n) &= \sum_{r,m} p_{ir}(k, k+m) \cdot p_{rk}(k+m, k+n) \\ i, j &\in \{0, 1, 2, 3\}, \quad 0 \leq m \leq n \end{aligned} \quad (14)$$

gdzie:

- k – Stan, w którym system przebywa;
- n – liczba sposobów;
- m - liczba kroków na dojście do stanu r ;
- r – stan pośredni.

Rozkład stacjonarny jest rozwiązaniem równania postaci:

$$\begin{aligned} p_{10}\pi_1 + p_{20}\pi_2 + p_{30}\pi_3 &= \pi_0 \\ p_{01}\pi_0 + p_{21}\pi_2 &= \pi_1 \\ p_{02}\pi_1 + p_{23}\pi_2 + p_{33}\pi_3 &= \pi_3 \\ \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 &= 1 \end{aligned} \quad (15)$$

gdzie:

- π_k - prawdopodobieństwo graniczne dla Stanu $k, k = 0, 1, 2, 3$;

— p_{jk} - prawdopodobieństwo przejścia określone w macierzy $j,k=0,1,2,3$.

Postać macierzowa dla równania (15):

$$\begin{bmatrix} -1 & p_{10} & p_{20} & p_{30} \\ p_{01} & -1 & p_{21} & 0 \\ p_{02} & p_{12} & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \pi_0 \\ \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

jeżeli:

$$\det \begin{bmatrix} -1 & p_{10} & p_{20} & p_{30} \\ p_{01} & -1 & p_{21} & 0 \\ p_{02} & p_{12} & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \neq 0 \quad (17)$$

To rozwiązanie dane jest równaniami[67]:

$$\begin{aligned} \pi_0 &= \frac{(p_{12}p_{21} - 1)}{(1 + p_{30})(p_{12}p_{21} - 1) + (p_{02}p_{21} + p_{01})(p_{10} - p_{30}) + (p_{01}p_{12} + p_{02})(p_{20} - p_{30})} & (18) \\ \pi_1 &= \frac{-p_{01} - p_{02}p_{21}}{(1 + p_{30})(p_{12}p_{21} - 1) + (p_{02}p_{21} + p_{01})(p_{10} - p_{30}) + (p_{01}p_{12} + p_{02})(p_{20} - p_{30})} \\ \pi_2 &= \frac{-p_{02} - p_{01}p_{12}}{(1 + p_{30})(p_{12}p_{21} - 1) + (p_{02}p_{21} + p_{01})(p_{10} - p_{30}) + (p_{01}p_{12} + p_{02})(p_{20} - p_{30})} \\ \pi_3 &= \frac{p_{10}p_{21}p_{02} + p_{01}p_{12}p_{20} + p_{20}p_{02} + p_{12}p_{21} + p_{10}p_{01} - 1}{(1 + p_{30})(p_{12}p_{21} - 1) + (p_{02}p_{21} + p_{01})(p_{10} - p_{30}) + (p_{01}p_{12} + p_{02})(p_{20} - p_{30})} \end{aligned}$$

W przypadku jednakowych prawdopodobieństw przejść otrzymano:

$$\begin{aligned} \pi_0 &= \frac{1}{1 + p} & (19) \\ \pi_1 &= \frac{p}{1 - p^2} \\ \pi_2 &= \frac{p}{1 - p^2} \\ \pi_3 &= 1 - \frac{p}{1 - p} \end{aligned}$$

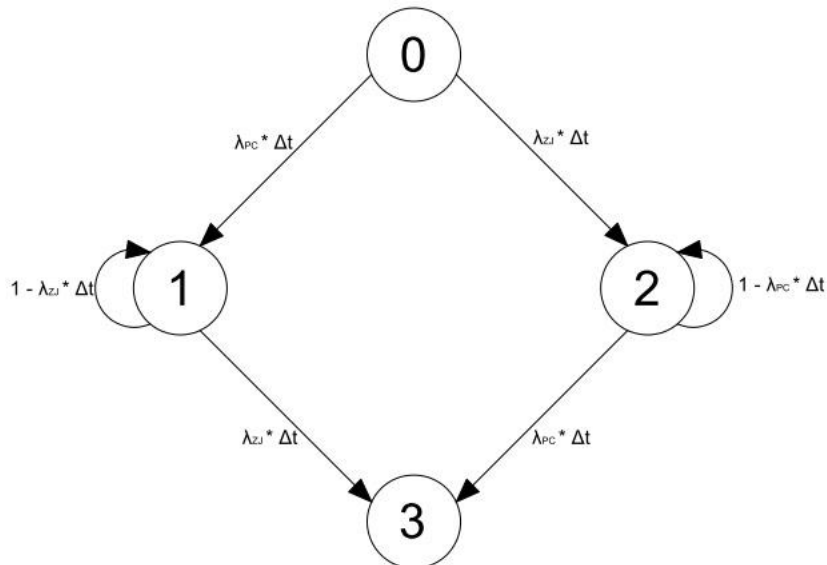
4.6 Niezawodność operacyjna a struktura rodzajowa strumienia ruchu

Analizując dane rzeczywiste z przekroju drogowego dwupasowego na prostym odcinku drogi zlokalizowanej w Gdyni przy ulicy Janka Wiśniewskiego otrzymano skończony dyskretny model Markowa. Dane pochodzą z WIM z przedziału czasowego 01.09.2016 – 30.09.2016.

W modelu wyróżnione zostały cztery Stany:

- Stan 0 – system jest w stanie zdatności - sprawny;
- Stan 1 – system jest w stanie zdatności częściowej niezdatności w wyniku zwiększenia liczby pojazdów ciężarowych a tym samym prędkości swobodnej, badanej w przekroju drogi dwujezdniowej;
- Stan 2 – system jest w stanie zdatności częściowej niezdatności w wyniku awarii technicznej jednego pasa z przekroju drogowego dwujezdniowego jednokierunkowego;
- Stan 3 – system jest w stanie niezdatności - niesprawny.

Graf obrazujący niezawodność operacyjną wyżej opisanego systemu został przedstawiony jako Rysunek 17.



Rysunek 17 Graf niezawodności operacyjnej [opracowanie własne]

Korzystając z układu równań Chapmana-Kołmogorowa otrzymano:

$$\begin{aligned}
P_0(t + \Delta t) &= P_0(t) \cdot (1 - (\lambda_{PC} + \lambda_{ZJ})\Delta t) & (20) \\
P_1(t + \Delta t) &= P_0(t) \cdot \lambda_{PC}\Delta t + P_1(t) \cdot (1 - \lambda_{ZJ}\Delta t) \\
P_2(t + \Delta t) &= P_0(t) \cdot \lambda_{ZJ}\Delta t + P_2(t) \cdot (1 - \lambda_{PC}\Delta t) \\
P_3(t + \Delta t) &= P_1(t) \cdot \lambda_{ZJ}\Delta t + P_2(t) \cdot \lambda_{PC}\Delta t + P_3(t)
\end{aligned}$$

gdzie:

- P_i – prawdopodobieństwo przebywania w Stanie i , $i=\{0,1,2,3\}$ w określonym chwili t ;
- λ_{PC} - zwiększenie intensywności napływu pojazdów ciężarowych w przekroju drogowym;
- λ_{ZJ} - zamknięcie jednej jezdni w przekroju drogowym jednokierunkowym dwujezdniowym.

Do kolejnych obliczeń została wykorzystana metoda transformaty Laplace'a. Założono, że Stan początkowy systemu to Stan 1, otrzymano:

$$P_3(t) = \lambda_{PC} \exp\{-\lambda_{PC}t\} [1 - \exp\{-\lambda_{ZJ}t\}] + \lambda_{ZJ} \exp\{-\lambda_{ZJ}t\} [1 - \exp\{-\lambda_{PC}t\}] \quad (21)$$

$$R(t) = 1 - P_3(t) \quad (22)$$

Końcowa postać niezawodności operacyjnej przyjmuje postać:

gdzie:

- $R(t)$ – niezawodność operacyjna w chwili t .

4.7 Wykorzystanie metod markowskich i semi-Markowskich do modelowania wielostanowej niezawodności operacyjnej w transporcie

Poprzez system transportu rozumiemy część sieci transportu drogowego (określana również na potrzeby pracy „wycinkiem sieci”) lub miejskiego. Stany systemu, ze względu na jego niezawodność działania, są określane przez poziom przeszkód w ruchu, to znaczy:

- Stan 0 - dla poziomu usług A i B;
- Stan 1 - dla poziomu usługi C;
- Stan 2 - dla poziomu usług D i E;
- Stan 3 - dla poziomu usługi F.

W przypadku modelowania na poziomie składowych linii komunikacyjnych założono, że:

- system jest zbudowany z podsystemów serii S ;
- system ma skończoną liczbę elementów;
- czas życia dowolnego elementu c podsystemu szeregowego jest wykładniczy, z parametrem λ_c ;
- czas naprawy ma rozkład $G(t)$, o skończonej oczekiwanej wartości równej m_r ;
- czasy życia komponentów i czas naprawy są stochastycznie niezależne;
- komponenty są naprawiane zgodnie z kolejnością, w której zawiodły;
- tylko jeden element może być naprawiony w tym samym czasie.

Układ o skończonej lub policzalnej liczbie stanów można opisać za pomocą procesu **semi-Markowa**, jeżeli spełnia on następujący warunek: prawdopodobieństwo, że system, który jest w stanie i , przejdzie do stanu j i pozostanie w tym stanie przez czas t_0 , jest niezależne od historii procesu przed czasem t i rzeczywistym czasem t . [43]

W celu określenia funkcji, niech:

- $X(t)$ będzie procesem stochastycznym będącym w stanie k lub jego policzalne elementy zawierają się w zbiorze $S = \{0, 1, \dots\}$,
- początek stanu został określony jako X_0 ,

- proces Markowa $X(n)$ - stan procesu po n -tej zmianie i zmienna losowa T_n – czas, w którym proces $X(t)$ pozostanie w stanie $k-1$, $k=1,2,\dots$
- Proces $\mathbf{X}(t)$ jest semi-Markowskim procesem jeśli dla dowolnego momentu $0 \leq t_1 < t_2, \dots, t_{n-1} < t$; $i, l, \dots, k, j \in S$ i $n > 1$ otrzymano: [27][43][54][55]

$$P\left(\left\{T_n < t, X(n) = \frac{j}{X(0)} = i, T_1 = t_1, \dots, X(n-2) = k, T_{n-1} = t_{n-1}, X(n-1) = i\right\}\right) \quad (23)$$

$$= P\left(\left\{T_n < t, X(n) = \frac{j}{X(n-1)} = i\right\}\right)$$

i

$$P\left(\left\{T_n < t, X(n) = \frac{j}{X(n-1)} = i\right\}\right) = Q_{ij}(t), \quad \text{dla } n = 1, 2, \dots \quad (24)$$

gdzie:

— P – prawdopodobieństwo.

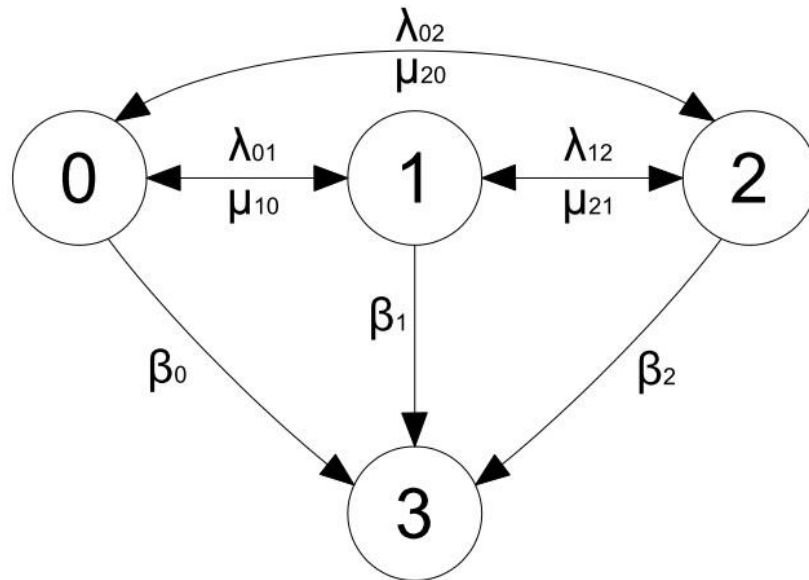
Funkcja $Q_{ij}(t)$ może zostać zapisana jako:

$$Q_{ij}(t) = p_{ij} F_{ij}(t) \quad (25)$$

gdzie:

- p_{ij} - prawdopodobieństwo przejścia osadzonego w łańcuchu Markowa $X(n)$, $i, j = \{0, 1, 2, 3\}$;
- $F_{ij}(t)$ – rozkład warunkowy, który proces $X(t)$ pozostawia w Stanie i jeśli następny skok będzie w Stanie j ;
- $Q_{ij}(t)$ – funkcja rozkładu czasu przebywania w Stanie i jeśli następnym stanem będzie j .

Model operacyjny działania systemu został przedstawiony za pomocą grafu na Rysunek 18.



Rysunek 18 Graf operacyjny systemu [opracowanie własne]

gdzie:

- β_i - intensywność przejścia do Stanu 3 ze Stanu i , $i=0,1,2$;
- λ_{jk} - intensywność przejścia ze Stanu j do Stanu k , $(j,k=0,1,2,3)$;
- μ_{jk} - intensywność „obsługi” pojazdów – zdolność infrastruktury do umożliwienia pojazdom przejechania przez punkt zliczający zależna od warunków zewnętrznych ze Stanu j do Stanu k , $(j,k=0,1,2,3)$.

Założenia teoretyczne[43]:

- Jeśli dowolny $F_{ij}(t)$ nie jest rozkładem wykładniczym, wówczas proces $X(t)$ nie jest Markowski;
- Jeśli wszystkie rozkłady prawdopodobieństwa są wykładnicze, to proces $X(t)$ jest Markowski;
- Zbiór $\{0, 1, 2, 3\}$ jest przestrzenią stanu łańcucha Markowa procesu $X(t)$;
- Ponieważ liczba Stanów jest skończona, to możemy wykorzystać łańcuch Markowa procesu $X(t)$;
- Używając metod przedstawionych w [31] istnieje rozkład stacjonarny prawdopodobieństwa łańcucha Markowa: $p_0 = 1 - (p_1 + p_2 + p_3)$.

Układ równań stacjonarnych opisujących proces zmiany stanów niezawodności działania ma postać:

$$\begin{cases} -\lambda_{01}p_0 - \lambda_{02}p_0 + \lambda_{30}p_3 + \lambda_{10}p_1 + \lambda_{20}p_2 = 0 \\ -\lambda_{13}p_2 - \lambda_{10}p_1 - \lambda_{12}p_1 + \lambda_{01}p_0 + \lambda_{20}p_2 = 0 \\ -\lambda_{23}p_2 - \lambda_{20}p_2 - \lambda_{21}p_2 + \lambda_{02}p_0 + \lambda_{21}p_2 = 0 \\ -\lambda_{30}p_3 + \lambda_{03}p_0 + \lambda_{13}p_1 + \lambda_{23}p_2 = 0 \end{cases} \quad (26)$$

gdzie:

— p_k – prawdopodobieństwo graniczne dla Stanu k ($k = 0, 1, 2, 3$).

Zastępując ostatnie równanie warunkiem normalizującym, otrzymano równanie macierzowe postaci:[43][42]

$$\begin{bmatrix} -\lambda_{01} - \lambda_{02} & \lambda_{10} & \lambda_{20} & \lambda_{30} \\ \lambda_{01} & -\lambda_{13} - \lambda_{10} - \lambda_{12} & \lambda_{20} & 0 \\ \lambda_{02} & \lambda_{21} & -\lambda_{23} - \lambda_{20} - \lambda_{21} & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Założono, że stosunek intensywności λ_{02} do intensywności λ_{01} jest równy p , a pozostałe intensywności są sobie równe. Otrzymano z układu równań[68]:

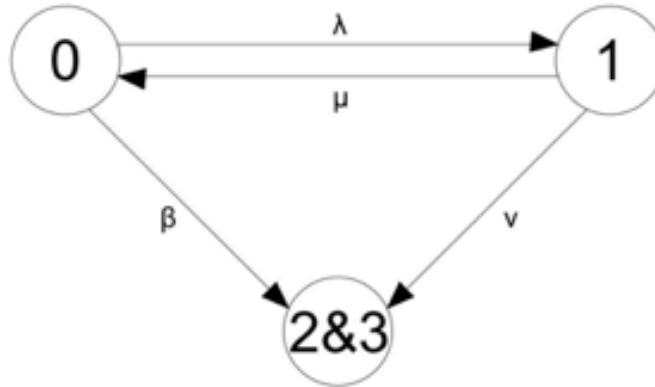
$$p_0 = \frac{1}{2+p}, \quad p_1 = \frac{1}{2(2+p)}, \quad p_2 = \frac{1+3p}{8(2+p)}, \quad p_3 = \frac{1}{2+p} \quad (28)$$

• Przykład 1: Model Markowski, trzy stany

System, w którym cały rozkład prawdopodobieństwa jest wykładniczy, a system może przejść tylko przez trzy stany:

- Stan 0 – system jest w stanie zdadności - sprawny
- Stan 1 - system jest w stanie częściowej zdadności
- Stan 2 i 3 – system jest w stanie niezdadności - niesprawny

Pomimo prostoty modelu uzyskuje się wyniki dotyczące zachowania systemu w zależności od zmian w ruchu drogowym[58],[59]. Graf przejścia dla tego procesu został przedstawiony jako Rysunek 19 Graf niezawodności działania systemu, przypadek trzech stanów Markowa. [opracowanie własne]**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..**



Rysunek 19 Graf niezawodności działania systemu, przypadek trzech stanów Markowa. [opracowanie własne]

Równania Chapmana-Kołmogorowa wynoszą:

$$\begin{aligned}
 p'_0(t) &= -(\lambda + \beta)p_0(t) + \mu p_1(t) \\
 p'_1(t) &= -(\mu + \nu)p_1(t) + \lambda p_0(t) \\
 p'_{2\&3}(t) &= \beta p_0(t) + \nu p_1(t)
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

gdzie:

- p_i - prawdopodobieństwo przebywania w Stanie i , $i=0,1,2\&3$;
- ν – intensywność przejść między Stanami 1 i 2&3;
- β - intensywność przejść między Stanami 0 i 2&3;
- λ – intensywność przejść między Stanami 0 i 1;
- μ intensywność przejść między Stanami 1 i 0.

Funkcją niezawodności operacyjnej $R_{or}(t)$, odnosząc się do[59][60] wynosi:

$$R_{or}(t) = 1 - \int_0^t [\beta p_0(t) + \nu p_1(t)] d\tau
 \tag{30}$$

Założono, że w czasie zero system jest w Stanie 0. Używając metod transformacji Laplace'a otrzymano:

$$\begin{aligned}
 p_0(t) &= \frac{s_1 + \mu + \nu}{s_1 - s_2} e^{s_1 t} - \frac{s_2 + \mu + \nu}{s_1 - s_2} e^{s_2 t}; \\
 p_1(t) &= \frac{\lambda}{s_1 - s_2} e^{s_1 t} - \frac{\lambda}{s_1 - s_2} e^{s_2 t}
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

$$p_{2&3}(t) = 1 + \frac{(s_1 + \mu + \nu)\beta + \lambda\nu}{(s_1 - s_2)s_1} e^{s_1 t} - \frac{(s_2 + \mu + \nu)\beta + \lambda\nu}{(s_1 - s_2)s_2} e^{s_2 t}$$

gdzie:

$$s_1 = \frac{1}{2} \left(-(\lambda + \beta + \mu + \nu) - \sqrt{1 + \frac{4\lambda * \mu}{(-\lambda - \beta + \mu + \nu)^2} * (-\lambda - \beta + \mu + \nu)} \right) \quad (32)$$

$$s_2 = \frac{1}{2} \left(-(\lambda + \beta + \mu + \nu) + \sqrt{1 + \frac{4\lambda * \mu}{(-\lambda - \beta + \mu + \nu)^2} * (-\lambda - \beta + \mu + \nu)} \right) \quad (33)$$

• **Przykład 2: Model semi-Markowa, cztery stany niezawodności, podejście symulacyjne**

Założono, że p_1, p_2, p_3, p_4 oznaczają prawdopodobieństwa bycia w odpowiednich stanach modelu niezawodności działania systemu (Rysunek 18). Zdefiniowany został proces stochastyczny $(i_n, T_{i_n i_{n+1}})$ jako niejednorodny proces odnowy markowskiej, w którym[27][2][25]:

- n – liczba iteracji, $n \in N$;
- S – zbiór Stanów;
- T_{ij} - zmienna losowa reprezentuje czas przejścia między Stanami i i j ;
- i_n , jest zmienną losową z zestawem Stanów: $S = \{S_B, S_{ZB}, S_{NB}, C\}$ reprezentująca Stan na n -tym przejściu;
- $\{i_n: n \in N\}$ – sekwencja realizacji osadzonego niejednorodnego łańcucha Markowa, $\{\xi_n : n \in N\}$;
- $\{T_{i_n i_{n+1}} : n \in N\}$, jest sekwencją niezależnych zmiennych losowych, która reprezentuje czas przejścia ze Stanu $w \in S$ to $i_{n+1} \in S$;
- $\mathbf{P}(t) = [p_{ij}(t)]$ – jest macierzą przejściową w chwili t osadzonego niejednorodnego łańcucha Markowa.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & p_{12}(t) & p_{13}(t) & 0 \\ p_{21}(t) & 0 & p_{23}(t) & p_{24}(t) \\ 0 & p_{32}(t) & 0 & p_{34}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (34)$$

Założono, że $i \in S$ jest początkowym Stanem procesu semi-Markowa. Następny Stan procesu, $j \in S$, uzyskuje się przez losowanie zgodnie z rozkładem podanym w i -tej linii macierzy P .

Algorytm ustalania charakterystyk niezawodności działania systemu:

- wybiera Stan początkowy i ;
- generuje realizację zmiennej losowej u o rozkładzie jednolitym $u(0, 1)$;
- określa Stan j zgodnie ze wzorami;
- generuje realizację zmiennej losowej T_{ij}
- ocenia czas do momentu osiągnięcia Stanu 2;
- ocenia czas do momentu osiągnięcia Stanu 3;
- dokonuje analizy statystycznej wyników symulacji: histogram, wartości średnie, drugie momenty i odchylenia standardowe.

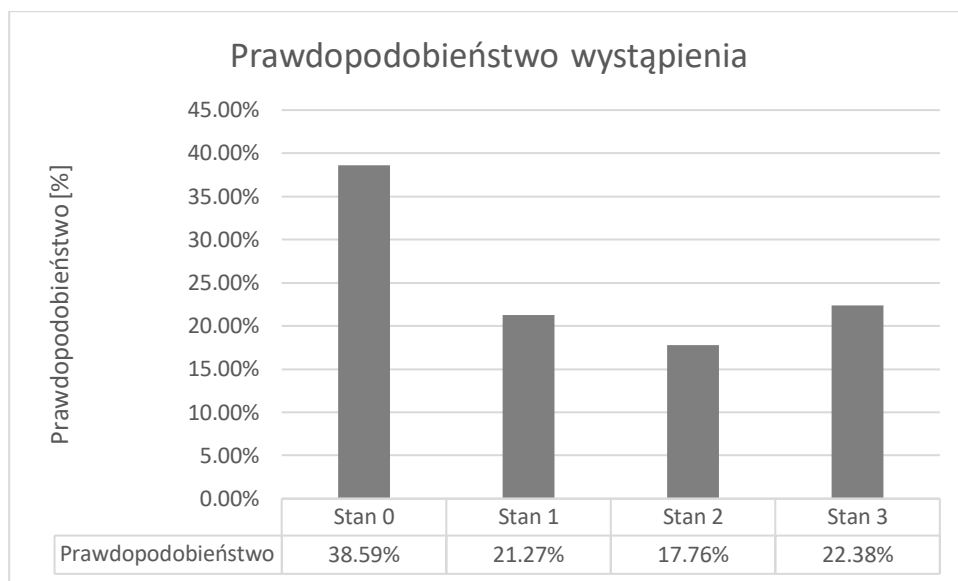
• Zastosowanie metody Monte-Carlo

Przypadek, w którym czas początkowy wynosi 0, czas końcowy 60, Stanem początkowym jest Stan 2 a liczba iteracji wynosi 500. Graf przejść stanów zobrazowany jest na Rysunek 18.

Macierz przejść Stanów:

Tabela 8 Macierz, stan początkowy – Stan 2. Symulacja Monte Carlo[93]

	Stan 0	Stan 1	Stan 2	Stan 3
Stan 0	0,3	0,4	0,2	0,1
Stan 1	0,51	0,1	0,3	0,09
Stan 2	0,5	0,2	0,2	0,1
Stan 3	0,4	0,0	0,0	0,6



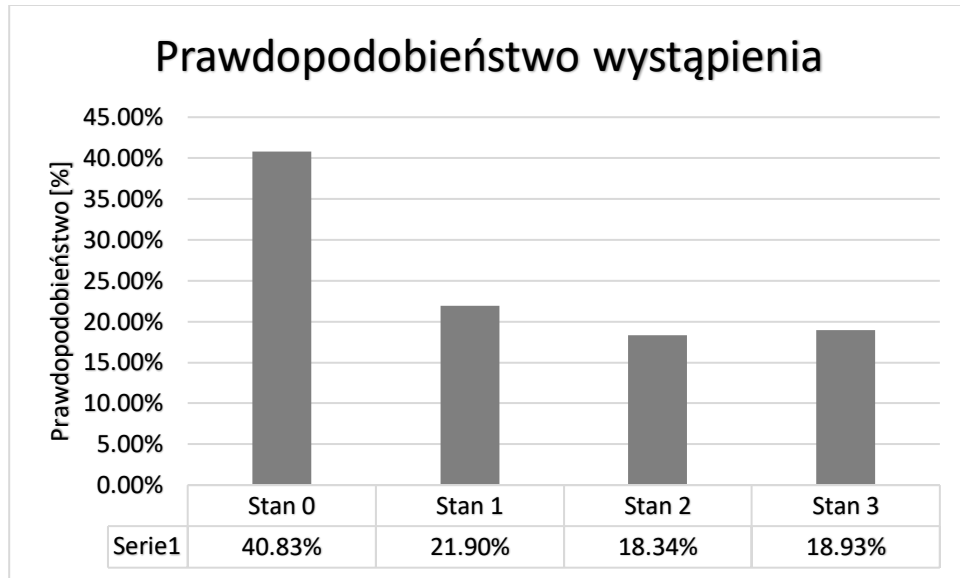
Rysunek 20 Przykład wyników symulacji, stan początkowy – Stan 2. Symulacja Monte Carlo[93]

Przypadek, w którym czas początkowy wynosi 0, czas końcowy 60, stanem początkowym jest Stan 0 a liczba iteracji wynosi 500. Graf przejść stanów zobrazowany jest na Rysunek 18.

Macierz przejść Stanów:

Tabela 9 Macierz, stan początkowy – Stan 0. Symulacja Monte Carlo[93]

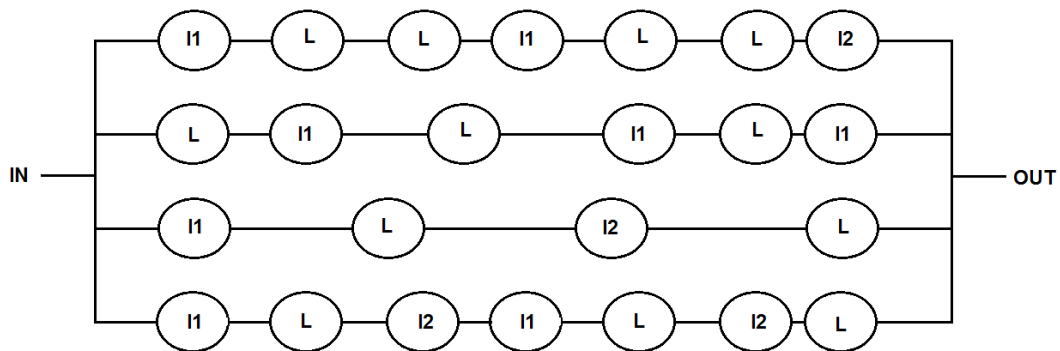
	Stan 0	Stan 1	Stan 2	Stan 3
Stan 0	0,3	0,4	0,2	0,1
Stan 1	0,51	0,1	0,3	0,09
Stan 2	0,5	0,2	0,2	0,1
Stan 3	0,4	0,0	0,0	0,6



Rysunek 21 Przykład wyników symulacji, stan początkowy – Stan 0. Symulacja Monte Carlo[93]

- **Przykład 3: Model semi-Markowa, układ prostokątny**

Założono, że system zbudowany jest z równoległych podsystemów połączonych na końcach: wejściowym i wyjściowym. Wszystkie podsystemy szeregowo mają ten sam typ funkcji niezawodności o skończonej wartości oczekiwanej (podsystemy szeregowo są jednorodne). Stan systemu jest równy liczbie nieuszkodzonych podsystemów szeregowych. Przykłady takiego systemu pokazano jako Rysunek 22 Prostokątny przykład modelu systemu.



Rysunek 22 Prostokątny przykład modelu systemu.[93]

Gdzie:

— I1 - skrzyżowanie typu 1;

- I_2 - skrzyżowanie typu 2;
- L - odcinek między węzłowy.

Założono, że:

- system jest w Stanie k , jeśli tylko podsystemy serii k są w Stanie roboczym, a inne są zepsute;
- $X(t)$ - liczba działających podsystemów szeregowych (komponentów) w chwili t ;
- $P=(P_0, P_1, \dots, P_s)$ - stacjonarne, ergodyczne prawdopodobieństwa procesu stochastycznego $X(t)$;
- t_n - moment, w którym kończy się n -ta naprawa;
- ζ_n - liczba działających podsystemów szeregowych przed czasem t_n , jest to osadzony łańcuch Markowa procesu $X(t)$;
- $\hat{p} = (\hat{p}_0, \hat{p}_1, \dots, \hat{p}_s)$ - prawdopodobieństwa stacjonarne wbudowanego łańcucha Markowa ζ_n .

Ponieważ zbiór skończony $S=\{0,1,2, \dots, s-1, s\}$ jest przestrzenią stanu procesu ζ_n , wówczas proces jest ergodyczny (wartości parametrów statystycznych po zbiorze realizacji są równe wartościom tych parametrów w dowolnej realizacji czasowej) łańcuch Markowa ζ_n ma prawdopodobieństwo przejścia, które zostało zapisane jako formuły:

$$p_{ij} = \begin{cases} \int_0^{\infty} \binom{i+1}{j} \{\exp[-\lambda \cdot t]\}^j \{1 - \exp[-\lambda \cdot t]\}^{i-j+1} dG(t) & \text{dla } j \leq i+1, i = 0,1, \dots, s-2 \\ \int_0^{\infty} \binom{i}{j} \{\exp[-\lambda \cdot t]\}^j \{1 - \exp[-\lambda \cdot t]\}^{i-j} dG(t) & \text{dla } i = s-1 \\ 0 & \text{dla każdego innego } i \end{cases} \quad (35)$$

gdzie:

- p_{ij} - prawdopodobieństwo przejścia;
- λ - intensywność zmian stanu;
- S - zbiór stanów;
- $G(t)$ - funkcja rozkładu czasu odnowy.

Prawdopodobieństwa stacjonarne $\hat{\mathbf{p}} = (\hat{p}_0, \hat{p}_1, \dots, \hat{p}_s)$ wbudowane w łańcuch Markowa ζ_n , można określić za pomocą następujących wzorów:[69]

$$\hat{p}_0 = 1 - \sum_{k=1}^s \hat{p}_k; \hat{p}_{k+1} = \frac{s\hat{p}_k}{(k+1)(s\lambda m_r + \hat{p}_{s-1})} \quad (36)$$

$$\hat{p}_k = \sum_{i=1}^s (-1)^{i-1} \binom{i}{k} \frac{s C_{i-1}}{i} \frac{\sum_{j=i-1}^{s-1} \binom{s-1}{j} C_j^{-1}}{(1 + sm_r \lambda) \sum_{j=0}^{s-1} \binom{s-1}{j} C_j^{-1}} \quad (37)$$

$$C_0, C_j = \prod_{w=1}^j \frac{G^*(wm_r)}{1 - G^*(wm_r)} \quad (38)$$

gdzie $k=0,1,\dots,s$.

Opisane przykłady jako modele niezawodności można wykorzystać do oceny i prognozowania w codziennej praktyce. Metody te mogą być przydatne do oszacowania wybranych charakterystyk niezawodności operacyjnej systemu transportu miejskiego. Możliwe jest rozszerzenie wyników na systemy o innych złożonych strukturach niezawodności. Możliwe jest uzyskanie szczegółowych wyników przy użyciu opisanego modelu opartego na danych wejściowych, takich jak natężenie ruchu, natężenie na relacjach skrzyżowanych, czas trwania zielonego światła (w przypadku skrzyżowania z sygnalizacją świetlną) itp.

Obliczenia mogą być niezbędnym elementem w aspekcie ITS, a dokładniej modułów związanych z wykrywaniem zdarzeń. Zastosowanie rozwiązań matematycznych jest niezbędne przy definiowaniu stanów granicznych, w których ruch miejski jest określony przez prędkość pojazdu w ruchu w MST zdefiniowaną i ograniczoną przez istniejącą infrastrukturę.

5. Niezawodność operacyjna Miejskiej Sieci Transportowej

Skuteczna ocena niezawodności i bezpieczeństwa MST zależna jest od wielu czynników zewnętrznych bezpośrednio związanych z organizacją i uczestnikami ruchu, infrastrukturą czy też wpływami otoczenia. Niezawodność MST ma bezpośrednie powiązanie z bezpieczeństwem. Przykładem na to jest powiązanie infrastruktury z niezawodnością. Doposażanie dróg w elementy infrastruktury wybaczącej – takiej, która powoduje minimalizację negatywnych skutków kolizji, bezpośrednio wpływa na poprawę bezpieczeństwa na drodze a także poprawia niezawodność tej drogi. W przypadku wystąpienia kolizji straty materialne będą mniejsze, ryzyko wystąpienia ofiar śmiertelnych również spadnie a także okres czasu odnowy sieci po kolizji zmniejszy się, zatem niezawodność danej MST również wzrośnie.

MST może być, ze względu na awarie, modelowana jako system o elementach niezależnych. Mianowicie każdy odcinek między węzłowy jest niezależnym elementem dużego systemu MST. Pod pojęciem takiego systemu należy rozumieć zespół określonej liczby elementów n - odcinków międzywęzłowych, które są niezależne od siebie. Każdy taki element może znajdować się w dwóch stanach zdatny lub niezdatny do prowadzenia ruchu po nim. Zatem zgodnie z definicją: *stanem niezdatności nazywamy taki stan elementu, który nie pozwala na realizowanie przez niego założonych zadań*; Zdatny odcinek międzywęzłowy charakteryzuje się możliwością przejechania przez niego bez ograniczeń czasowych zatem odcinek, na którym występuje zatłoczenie pojazdami, ale ruch odbywa się z obniżoną prędkością nadal jest zdatny (częściowo zdatny).

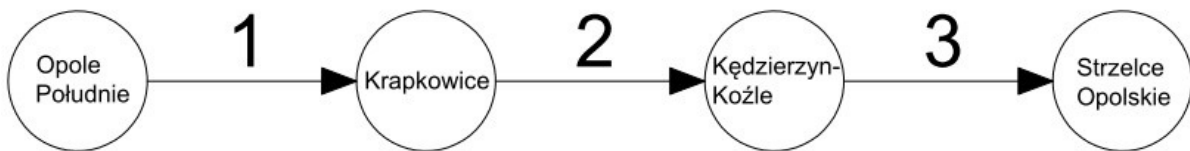
Niezdatność występuje w momencie, kiedy nie ma fizycznej możliwości poruszania się po odcinku np.: następuje awaria infrastruktury, następuje wypadek bądź kolizja drogowa i ruch jest zablokowany itp. Pozwala to na zróżnicowane podejście do oceny niezawodności zarówno jako systemu dwustanowego (zdatny, niezdatny) jak i systemu wielostanowego (np. zdatny, częściowo zdatny, niezdatny) Ważnym jest uwzględnienie, iż system może być zdatny pomimo niezdatności poszczególnych elementów tego systemu, czyli potraktowanie MST w ujęciu całościowym oraz dynamicznym w celu stwierdzenia w jakim stanie zdatności

się ona aktualnie znajduje. Niezbędne jest też zdefiniowanie struktury połączeń jakie można wyodrębnić dla fragmentów czy podsystemów MST np.: połączenia równoległe, szeregowe, szeregowo-równoległe i inne.

5.1. Modele strukturalne do oceny niezawodności operacyjnej sieci transportowej

- system o układzie szeregowym

Przykładem połączenia szeregowego może być odcinek obwodnicy miasta: odcinki międzywęzłowe połączone są węzłami. W momencie, kiedy element - odcinek międzywęzłowy jest w stanie niezdatności np. poprzez wypadek drogowy lub uszkodzenie infrastruktury ruch nie odbywa się również na pozostałych odcinkach międzywęzłowych z uwagi na fizyczną blokadę jednego. Zatem poprawne jest stwierdzenie, że w momencie wystąpienia awarii w systemie jednego z elementów cały system nie może wykonywać czynności transportowych z punktu *A* do *B*. Graficzny uproszczony schemat przedstawia Rysunek 23.



Rysunek 23 Uproszczony przykład struktury szeregowej [opracowanie własne]

Uproszczony przykład połączenia szeregowego (Rysunek 23) przedstawia odcinek autostrady A4 od węzła Opole Południe do węzła Strzelce Opolskie jako system, który składa się z trzech odcinków międzywęzłowych:

1. Opole Południe – Krapkowice
2. Krapkowice – Kędzierzyn – Koźle
3. Kędzierzyn – Koźle – Strzelce Opolskie

Przykład: w momencie zablokowania odcinka międzywęzłowego numer 2 cały system jest niezdatny, ponieważ element 2 jest w stanie niezdatności a elementy połączone są szeregowo.

Sformułowanie: awaria któregośkolwiek elementu jest równoznaczna z uszkodzeniem systemu, zatem możliwym jest wyznaczenie czasu życia systemu T jako $T = \min \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$. Założono, że T_k jest zmienną losową k -tego elementu ponieważ k przyjmuje wartości $k=1, 2, \dots, n$ niezawodność systemu szeregowego określa się wzorem:

$$R(t) = \prod_{k=1}^n R_k(t) \quad \text{dla } t \geq 0 \quad (39)$$

Tym samym możliwa jest do wyznaczenia funkcja zawodności $F(t)$:

$$F(t) = 1 - \prod_{k=1}^n R_k(t) \quad \text{dla } t \geq 0 \quad (40)$$

Zatem rozkład czasu życia elementu jest rozkładem typu ciągłego to intensywność uszkodzeń systemu można określić wzorem:

$$\lambda(t) = \sum_{k=1}^n \lambda_k(t) \quad \text{dla } t \geq 0 \quad (41)$$

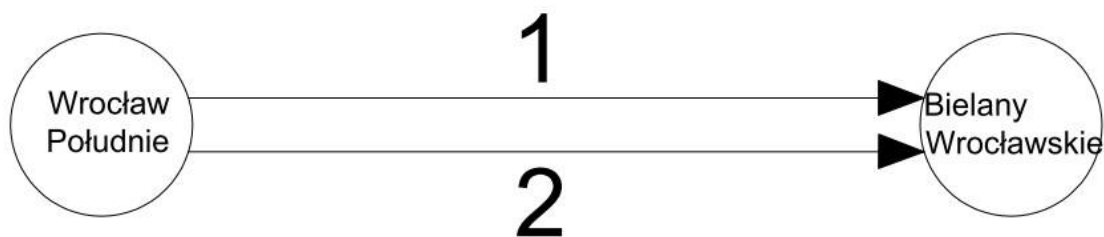
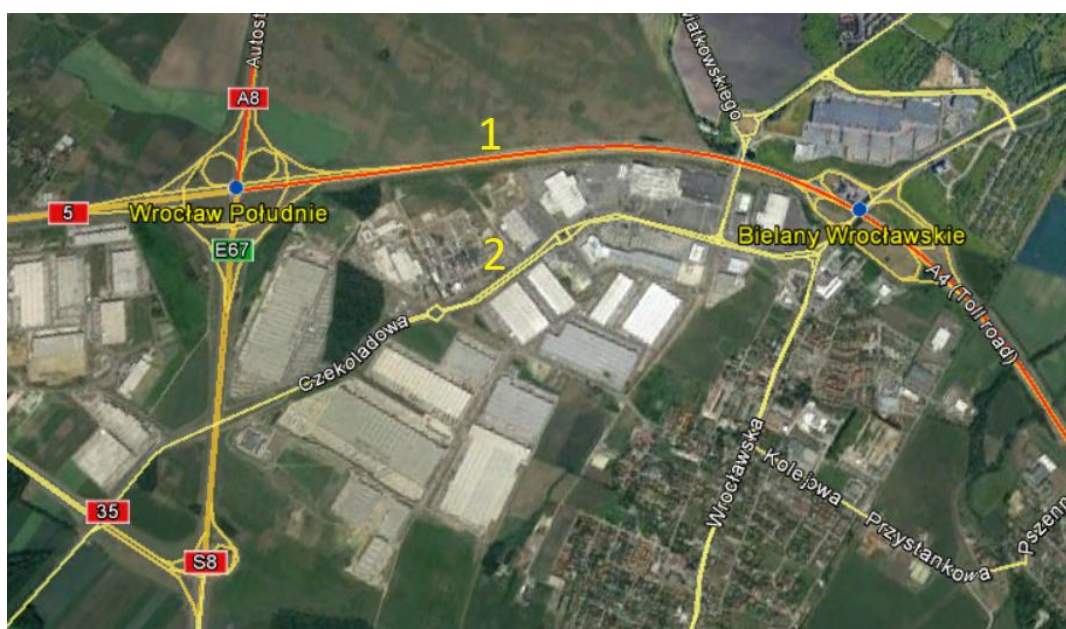
- **system o układzie równoległym**

System z połączeniem równoległą strukturą niezawodnościową charakteryzuje się tym, że w momencie uszkodzenia jednego z elementów system nadal jest zdatny. System jest niezdatny w momencie, w którym wszystkie jego elementy są niezdatne. Na tej podstawie można wyznaczyć zależność czasu życia systemu T : $T = \max\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, dla T_k jako zmienna losowa oznaczająca czas życia k -tego elementu. Jeżeli elementy te są niezależne to niezawodność systemu z połączeniami równoległymi można przedstawić za pomocą wzoru:

$$R(t) = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - R_k(t)) \quad \text{dla } t \geq 0 \quad (42)$$

Przykładem obrazującym system z połączeniami równoległymi w MST jest sieć ulic połączonych do siebie w sposób równoległy tak, że pomiędzy dwoma węzłami istnieją co najmniej dwa od siebie niezależne odcinki między węzłowe.

Przykład: Systemem równoległym można określić dwa odcinki między węzłowe znajdujące się pomiędzy węzłami: Wrocław Południe i Bielany Wrocławskie. Uproszczony schemat połączenia równoległego został przedstawiony na Rysunek 24. System będzie zdalny do czasu, kiedy będzie zdalny element numer 1 odcinek międzywęzłowy autostrady A4 lub element numer 2 odcinek międzywęzłowy drogi 35 ulica Czekoladowa. Analogicznie w momencie wystąpienia awarii obydwóch elementów 1 i 2 system przejdzie w stan niezdatności.



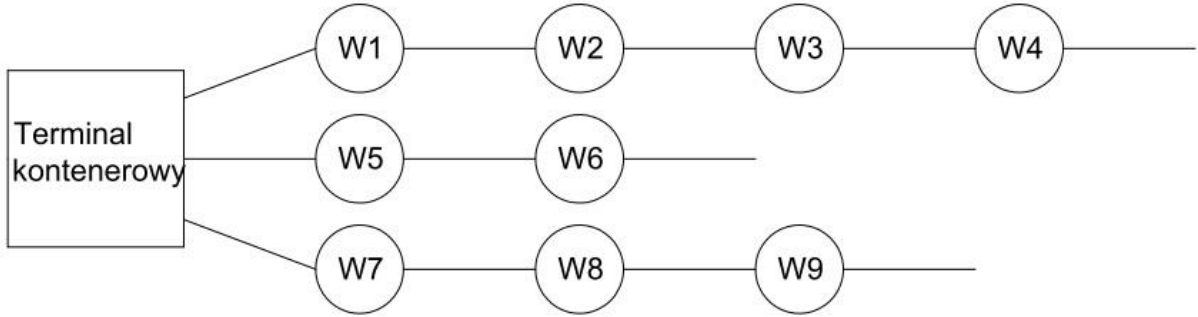
Rysunek 24 Uproszczony przykład struktury równoległej [opracowanie własne]

- **system o układzie szeregowo-równoległym**

Struktury opisane w powyższych podpunktach mają zastosowanie do analiz poszczególnych wycinków MST. Analizując większy obszar najbardziej trafnym jest zdefiniowanie MST jako system o strukturze szeregowo-równoległej. W większości przypadkach możliwe jest wykonanie podróży a tym samym zakwalifikowanie systemu jako zdatnego w momencie, kiedy uczestnik ruchu jest w stanie przemieścić się z punktu *A* do punktu *B* po miejskiej sieci transportowej w jakikolwiek sposób. W momencie, kiedy wystąpi awaria na jednym odcinku międzywęzłowym uczestnik ruchu jest w stanie dokonać zmiany trasy na drogę inną równoległą. Ważnym aspektem w projektowaniu układu drogowego jest zapewnienie, aby w sieci nie pojawiły się elementy – odcinki międzywęzłowe, które nie posiadają drogi alternatywnej (równoległej). W praktyce spotykamy się ze strukturami niezawodnościowymi mieszanymi w obrębie jednego systemu. Struktura taka nie jest jednolita tzn. obok połączeń równoległych znajdują się połączenia szeregowo. Określenie niezawodności takiego złożonego systemu wymaga podjęcia uporządkowanych kroków obliczeniowych: obliczenie niezawodności zespołów elementów złożonych w jednolitą strukturę równoległą lub szeregową a następnie wyznaczenie niezawodności występującej między nimi.

- **system o układzie dendrytowym**

Układ dendrytowy odwzorowuje przykład jakim jest umiejscowienie terminala kontenerowego w mieście i sieć dróg, którymi ładunek może dotrzeć do terminala. Dojazd ten odbywa się za pomocą sieci dróg, które posiadają połączenia szeregowo. Połączenia te w modelu semi-Markowskim posiadają połączenia szeregowo-dendrytowe składające się z trzech typów elementów: odcinki między węzłowe, węzły (skrzyżowania), parkingi. Uproszczona forma systemu dendrytowego przedstawiająca dwa typy elementów *W* jako kolejne węzły i odcinki międzywęzłowe prowadzące do terminala kontenerowego przedstawiono na Rysunek 25.



Rysunek 25 System o układzie dendrytowym [opracowanie własne]

Funkcja niezawodności podsystemu szeregowego, bez uwzględnienia parkingu dana jest wzorem:

$$\overline{R}_n(t) = [R^{(1)}(t)]^{q_1 n} \cdot [R^{(2)}(t)]^{q_2 n} \quad (43)$$

gdzie:

- n – liczba elementów w podsystemie szeregowym;
- q_1 – frakcja elementów pierwszego typu, odcinki międzywęzłowe [km];
- q_2 – frakcja elementów drugiego typu, węzłów (skrzyżowania lokalne).
- $\lambda, \beta, \gamma, \alpha$ – parametry rozkładów prawdopodobieństwa zawodności.

$$R^{(1)}(t) = \begin{cases} 1, & \text{dla } t < 0 \\ \exp[-\lambda t], & \text{dla } t \geq 0 \end{cases} \quad R^{(2)}(t) = \begin{cases} 1, & \text{dla } t < 0 \\ \exp[-\beta t^\gamma], & \text{dla } t \geq 0 \end{cases} \quad (44)$$

Korzystając z wyników, przedstawionych w publikacji[41] otrzymano, że asymptotyczna funkcja niezawodności każdego z podsystemów szeregowych może przyjmować postać:

$$\overline{R}_2(t) = \begin{cases} 1, & \text{dla } t < 0 \\ \exp[-d(t)t^\alpha], & \text{dla } t \geq 0 \end{cases} \quad (45)$$

Funkcja $d(t)$ jest niemalejącą funkcją zależną od poszczególnych składowych podsystemu i ich proporcjonalnego udziału w systemie, ponadto:

$$a_n = \frac{1}{\lambda \cdot n}; \quad b_n = 0; \quad \alpha = 1; \quad d(t) = \begin{cases} 0, & \text{dla } t < 0 \\ q_1 \cdot t, & \text{dla } t \geq 0 \end{cases} \quad (46)$$

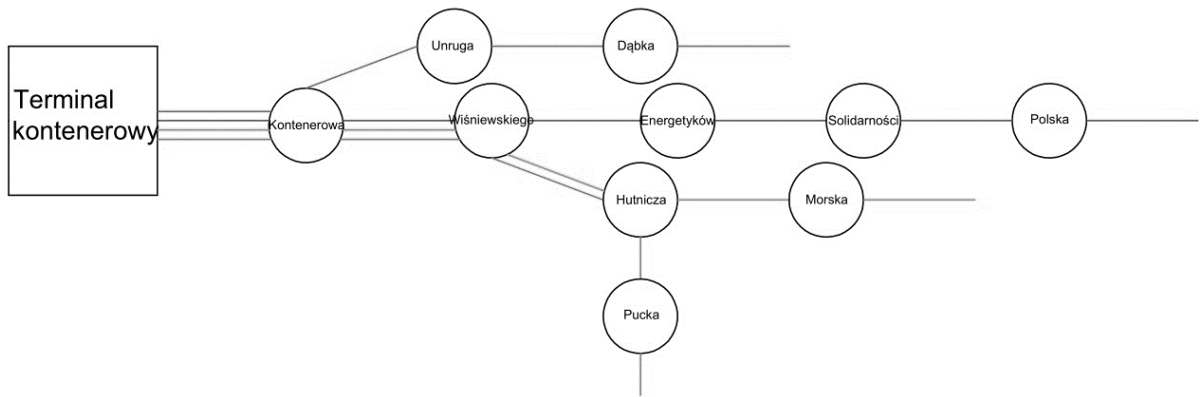
Ponieważ czas życia systemu jest równy minimum czasów życia poszczególnych elementów to jako wniosek z twierdzenia szacującego szybkość zbieżności k -tych statystyk pozycyjnych[15], przyjmując $k = n$, otrzymano następujące twierdzenie:

Jeżeli niezawodność podsystemu szeregowego dana jest wzorem (43) to dla asymptotycznej funkcji niezawodności otrzymano:

$$\begin{aligned}
 & \left| \overline{R}_n \left(\frac{1}{\lambda \cdot n} t \right) - R_2^i(t) + \frac{1}{2} n \left(R^{(1)} \left(\frac{q_1 t}{\lambda \cdot n} \right) \right)^2 \right. & (47) \\
 & \cdot \exp \left[-R^{(1)} \left(\frac{q_1 t}{\lambda \cdot n} \right) \right] \left[\frac{\left(n R^{(1)} \left(\frac{q_1 t}{\lambda \cdot n} \right) \right)^{n-1}}{(n-1)!} - \frac{\left(n R^{(1)} \left(\frac{q_1 t}{\lambda \cdot n} \right) \right)^{n-2}}{(n-2)!} \right] \\
 & \leq \exp[-q_1 \cdot t] \cdot \left| 1 - \exp \left[-\beta \left(\frac{1}{\lambda} \right)^\gamma \cdot q_2 \cdot t^\gamma \cdot n^{1-\gamma} \right] \right| + \frac{\pi}{2 \cdot n^2} \exp[2n \\
 & \cdot \exp[-\frac{q_1 t}{n}]] \cdot \left[n \cdot \exp \left[\frac{q_1 t}{n} \right] \right]^3 \cdot \left[\frac{4}{3 \left(1 - 2 \exp \left[\frac{q_1 t}{n} \right] \right)} \right. \\
 & \left. + \left[\frac{16}{9} \cdot \frac{n \cdot \exp \left[-\frac{3q_1 t}{n} \right]}{\left(1 - 2 \exp \left[-\frac{q_1 t}{n} \right] \right)^2} + \frac{8}{3} \cdot \frac{n \cdot \exp \left[-\frac{2q_1 t}{n} \right]}{\left(1 - 2 \exp \left[-\frac{q_1 t}{n} \right] \right)} + n \cdot \exp \left[-\frac{q_1 t}{n} \right] \right] \\
 & \cdot \exp \left[\frac{8}{3} \cdot \frac{n \cdot \exp \left[-\frac{3q_1 t}{n} \right]}{\left(1 - 2 \exp \left[-\frac{q_1 t}{n} \right] \right)} + 2n \cdot \exp \left[-\frac{2q_1 t}{n} \right] \right] \\
 & \left. + \left| \frac{1}{(n-1)!} \int_{n R^{(1)} \left(\frac{q_1 t}{\lambda \cdot n} \right)}^{q_1 t} n^{n-1} e^{-u} du \right| \right.
 \end{aligned}$$

Przykładem zastosowania systemu dendrytowego jest dojazd pojazdów ciężarowych do jednego z gdyńskich terminali kontenerowych. System ten składa się z miejsca docelowego – Terminal Kontenerowy, następnie z 10 węzłów (skrzyżowań), które nazwane zostały od nazwy ulicy, z którą przecina je droga główna kolejnym elementem są odcinki międzywęzłowe. Rysunek 26 obrazuje rozłożenie węzłów a także kolorami zostały

zaznaczone możliwe trasy obejmujące odcinki międzywęzłowe. Dla uproszczenia zostały pominięte mniejsze skrzyżowania.



Rysunek 26 System dendrytowy, przykład dojazdu do terminala kontenerowego [opracowanie własne]

5.2. Systemy z rezerwą w Miejskiej Sieci Transportowej.

Zwiększenie trwałości obiektu można uzyskać również za pomocą obsługiwanie i odnawiania. W MST obsługiwane to nic innego niż zarządzanie ruchem a odnawianie to oddawanie do użytku w czasowo zamkniętych odcinków drogowych. Istnieje jeszcze zagadnienie rezerwowania, zjawisko to wymaga niezbędnej znajomości struktury systemu. Rezerwowanie wpływa bezpośrednio na zwiększenie niezawodności obiektów, dotyczyć może poszczególnych elementów, grup tych elementów lub całych obiektów. Można rozróżnić różne typy rezerw:

- Globalną – przykładem rezerw stałej może być obwodnica miasta która stanowi rezerwę dla sieci dróg miejskich, w tego typu rezerwie elementy rezerwowe są ogólnie dostępne dla systemu, niezależnie od tego który element systemu uległ uszkodzeniu;
- Grupowa – w sieci dróg miejskich zdarzają się drogi o podwyższonej prędkości są one przeważnie wyizolowane od ruchu pieszego czy skrzyżowań zatem kilka elementów odcinków między węzłowych jest objętych rezerwą w postaci dodatkowej drogi, która umożliwi wykonanie czynności transportowej z punktu *A* do *B* w skrócie: każda grupa elementów systemu posiada własne elementy rezerwowe;
- Jednostkowa – uzyskanie rezerwy jednostkowej jest niezmiernie trudne w MST, ponieważ istnieje ona, jeżeli każdy element posiada swój element lub elementy rezerwowe, w MST układy równoległe mogą zostać w sposób ten przybliżone i określone jako rezerwa jednostkowa.

Rezerwy można również identyfikować ze względu na stan w jakim się znajdują elementy:

- Gorącą / obciążoną – w stanie gorącym może być odcinek drogi, który posiada zmienną kierunkowość. Przykłady takie występują w infrastrukturze np. w Barcelonie, gdzie odcinki posiadają zmienny kierunek w zależności od pory dnia. Przykładem może być również kontra-buspas występujący w mieście Gdynia na ulicy Chwarznieńskiej W godzinach porannych odcinek ten prowadzi w kierunku centrum a w popołudniowych w przeciwnym. Rozwiązanie to

zaoszczędza miejsca (terenu) potrzebnego na wybudowanie kolejnego pasa ruchu, ale wymaga odpowiedniego osprzętu ITS. Zatem własności niezawodnościowe elementów rezerwowych zmieniają się tak samo jak elementów podstawowych im odpowiadających. Wszystkie systemy z nadmiarowością strukturalną są systemami z rezerwą gorącą. Czas zdatności elementu rezerwowanego jest czasem zdatności elementu najdłużej zdatnego.

- Zimną / nieobciążoną – w stanie zimnym system charakteryzuje się tym, że wykorzystuje istniejącą infrastrukturę drogową, ale w innym celu niż do tego została przeznaczona. Często takim zjawiskiem jest używanie szerokiego pasa pobocza przez pojazdy uprzywilejowane spieszące się do miejsca zdarzenia. Pas pobocza nie służy do poruszania się, w sytuacji nagłej zostaje do tego wykorzystany. Zatem stan gorący występuje, gdy własności niezawodnościowe elementów rezerwowych nie zmieniają się w czasie oczekiwania na włączenie do działania. Czasy zdatności elementu rezerwowanego jest sumą czasów od uszkodzenia n -tego elementu rezerwowanego.
- Letnią / chłodną / częściowo obciążoną – stan chłodny na drogach może pojawiać się stosunkowo rzadko w porównaniu do poprzednich, przykładem może być udostępnienie drogi prywatnej do ogólnych celów transportowych, np. w przypadku wystąpienia awarii infrastruktury droga wewnętrzna prywatna może zostać udostępniona jako droga alternatywna na kierowców. Zatem stan chłodny występuje, gdy własności niezawodnościowe elementów rezerwowych ulegają zmianie w czasie oczekiwania na włączenie do działania, lecz w stopniu znacząco mniejszym niż odpowiadające im elementy podstawowe.

Włączenie do działania elementów rezerwowych, w każdym z występujących typów rezerwy odbywa się za pomocą jakiegoś bodźca np. przełącznika, decyzji, zmiany sterowania - dla uproszczenia zostanie to nazwane w dalszej części *Przełącznikiem*, z uwagi na identyczny efekt końcowy - rezerwa zostaje uruchomiona. Przełącznik ma określoną niezawodność R_p wyrażającą włączenie element rezerwowego. Niezawodność Przełącznika może występować jako zmienna w czasie $R_p(t)$ lub stałą wyrażaną jako R_p . W momencie, gdy Przełącznik uznaje się za całkowicie niezawodny przyjmuje on wartość $R_p=1$. Modele matematyczne

tworzone dla systemów z rezerwą można podzielić na te, w których elementy są odnawialne lub są nieodnawialne. Przykładem dla MST systemu z elementem nieodnawialnym może być trwałe uszkodzenie infrastruktury drogowej nie pozwalającej na prowadzenie ruchu drogowego. Kolejnym przykładem systemu z elementem odnawialnym może być zator drogowy spowodowany chwilowym uszkodzeniem pojazdu, pojazd się zatrzymuje tym samym blokuje jezdnię na jakiej się znajduje i tworzy się kolejka pojazdów oczekujących na przejazd. Po czasie następuje odnowienie systemu w postaci przywrócenia do ruchu blokującego pojazdu lub usunięcie go z jedni a tym samym jezdnie staje się zdatna.

W celu zobrazowania zastosowania rezerwy w systemie jakim jest MST zostały w niniejszym rozdziale przedstawione przykłady zastosowania kolejnych systemów z rezerwowaniem. Rozdział ten wskaże różnice pomiędzy zastosowaniem konkretnej rezerwy a także w sposób numeryczny zobrazuje różnice z czasie zdatności odpowiadającym przy zastosowaniu różnego typu rezerw.

- **Zastosowanie rezerwy zimnej w systemie z połączeniami szeregowymi**

Jako przykład został zastosowany odcinek drogi podzielony za pomocą węzłów i odcinków międzywęzłowych, które odpowiadają w systemie elementom. Dla uogólnienia przykładu założono, że odcinek drogi ma n elementów (odcinków między węzłowych). System posiada dwa elementy rezerwowe znajdujące się w rezerwie zimnej. Zatem istnieje infrastruktura poboczna nie używana w normalnym użytkowaniu do prowadzenia po niej ruchu pojazdów. Założono, że Przełącznik, którego niezawodność wynosi 1 ($R_p=1$) zatem jego niezawodność jest stała w czasie i określana jako całkowicie niezawodna, zatem w momencie wystąpienia awarii zadziała on natychmiastowo. Rezerwa, która występuje w systemie jest globalna - elementy rezerwowe są ogólnie dostępne dla systemu niezależnie od tego, który element systemu uległ uszkodzeniu.

Podsumowując:

- liczba elementów – n ;
- Rezerwa – globalna zimna – 2 elementy rezerwowe;

- Całkowita niezawodność Przełącznika - $R_p=1$;
- Połączenie – szeregowo.

Załącznik 5 zawiera kolejne działania.

Możliwym jest zapisanie niezawodności systemu jako:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) + \sum_{i,j=1, i <> j, i > j}^n [R_{i, i n+i}(t) R_{j, j n+2}(t) \prod_{k=1, k <> i, k <> j}^n R_k(t)] \quad (48)$$

$$+ \sum_{i=1}^n [R_{i, i n+1}(t) \prod_{k=1, k <> i}^n R_k(t)] + \sum_{i=1}^n [R_{i, i n+1, i n+i n+2}(t) \sum_{i=1}^n R_k(t)]$$

Przyjęto, że wszystkie elementy są jednakowe:

$$R_s(t) = R^n(t) + \binom{n}{2} R^{n-2}(t) R^{*2}(t) + n R^{n-1}(t) R^*(t) + n R^{**}(t) + R^{n-1}(t) \quad (49)$$

gdzie:

$$R^*(t) = P((T < t) \wedge (T + T^*) \geq t) \quad (50)$$

$$R^{**}(t) = P((T < t) \wedge ((T + T^*) < t) \wedge (T + T^* + T^{**}) \geq t) \quad (51)$$

- n – liczba elementów;
- P – prawdopodobieństwo;
- T^*, T^{**} – czasy zdatności elementów rezerwowych pierwszego i drugiego,
- R_j – funkcje niezawodności składowych systemu takich jak odcinki międzywęzłowe oraz węzły,
- R_s – funkcja niezawodności systemu.

Natomiast po zastosowaniu rezerwy jednostkowej dla ustalonych elementów o indeksach: r, p otrzymano:

$$R_s(t) = \prod R_i(t) + R_{r, r n+1}(t) \left(\prod R_i(t) \right) \quad (52)$$

$$+ R_{p, p n+2}(t) \left(\prod_{i=1}^n R_i(t) \right)$$

$$+ R_{r, r n+1}(t) R_{p, p n+2}(t) \left(\prod_{i=1, i <> r, i <> p}^n R_i(t) \right)$$

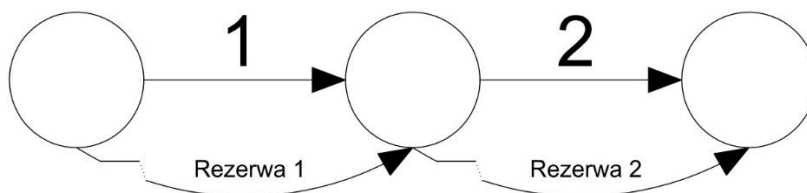
Dodatkowo, jeśli elementy byłyby jednakowe:

$$R_s(t) = R^n(t) + 2R^{n-1}(t)R^*(t) + R^{n-2}(t)R^{*2}(t) \quad (53)$$

Porównując równanie (49) i (53) można zauważyć, że w tym konkretnym przypadku rezerwowanie globalne jest lepsze od rezerwowania jednostkowego dla ustalonych elementów w rezerwie zimnej dla tego systemu. Przyjęcie większej liczby elementów rezerwowych oraz wprowadzenie obok rezerwy jednostkowej, grupowej dałoby ten sam rezultat.

- **Zastosowanie rezerwy w systemie dwuelementowym z elementami rezerwowymi w rezerwie gorącej**

Przykładem w systemie dwuelementowym jest sieć ulic połączonych ze sobą szeregowo, z czego każdy element posiada oddzielny element zapasowy. Każdy odcinek międzywęzłowy posiada drogę zapasową - alternatywną. Załącznik 5 – Wyprowadzenia niezbędne do obliczenia niezawodności systemów o różnych strukturach zawiera kolejne działania.



Rysunek 27 System dwuelementowy z zastosowaniem rezerwy gorącej [opracowanie własne]

Założono, że elementy (odcinki międzywęzłowe) systemu podstawowe, jak i zapasowe są jednakowe, otrzymano równanie:

$$R_s(t) = R^4(t) + 4R^3(t)F(t) + 4R^2(t)F^2(t) \quad (54)$$

Dla porównania rezerwa gorąca została zastąpiona rezerwą zimną. Element rezerwowy włączany jest do pracy poprzez Przełącznik tylko w momencie awarii. Założono, że oba Przełączniki, gdzie Przełącznik oznacza możliwość skorzystania z drogi alternatywnej, posiadają jednakową niezawodność $R_p(t)$, niezawodność systemu została wyznaczona jako:

$$R_s(t) = P(T_s \geq t) = P(T_1 \geq t)P(T_2 \geq t) + P(T_1 \geq t)P((T_2 < t) \wedge (T_2 + T_4) \geq t)P(T_p \geq t) + P(T_2 \geq t)P((T_1 < t) \wedge (T_1 + T_3) \geq t)P(T_p \geq t) + P((T_2 < t) \wedge (T_2 + T_4) \geq t)P(T_p \geq t)P((T_1 < t) \wedge (T_1 + T_3) \geq t)P(T_p \geq t) \quad (55)$$

gdzie:

— T_s – zmienna losowa określająca czas bezawaryjnej pracy składowe odcinek między węzłowy lub element rezerwowy, $s=1,2,3,4$

— T_p - zmienna losowa określająca czas bezawaryjnej pracy Przełącznika.

Założono, że wszystkie elementy są jednakowe, niezawodność systemu wynosi (25):

$$R_s(t) = R^2(t) + 2R(t)P((T < t) \wedge (T + T^*) \geq t)R_p(t) + p^2((T < t) \wedge (T + T^*) \geq t)R_p(t) \quad (56)$$

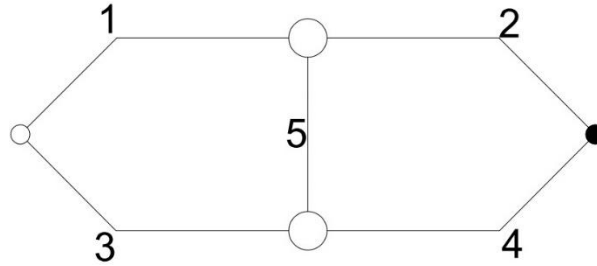
Zostały porównane oba równania (54) i (56), niezbędnym jest, aby dokonać przekształcenia przyjęto $F(t) = 1 - R(t)$. Następnie porównanie zostało zapisane jako:

$$R_s(t) = R^2(t) + 2R(t)P((T < t) \wedge (T + T^*) \geq t)R_p(t) + p^2((T < t) \wedge (T + T^*) \geq t)R_p(t) > R^2(t) + 2R^2(t)R_p(t) + R^2(t)R_p^2(t) = R^2(t)(1 + 2R_p(t) + R_p^2(t)) = R^2(t)(R_p(t) + 1)^2 \quad (57)$$

Do porównania należy zaznaczyć główne założenia: niezawodność Przełącznika, czyli włączenia odcinka międzywęzłowego w przypadku awarii wynosi bardzo blisko 1 - jako Przełącznik niezawodny. Wnioskując: zastosowanie rezerwy zimnej jest bardziej korzystne niż zastosowanie rezerwy gorącej (analizując ten konkretny przykład).

- **Zastosowanie rezerwy w systemie typu mostkowego pięcioelementowego**

Rozpatrując układ mostkowy złożony z pięciu elementów, elementy te są jednakowe. Element centralnie połączony o numerze 5 pełni funkcję rezerwy. Dla porównania został przedstawiony przykład rezerwy zimnej i rezerwy gorącej tego samego piątego elementu. W przypadku zastosowania rezerwy zimnej element włączany jest do systemu za pomocą Przełącznika. System ten odpowiada układowi ulic, gdzie, aby dotrzeć do celu należy poruszyć się po co najmniej dwóch odcinkach międzywęzłowych.



Rysunek 28 Schemat struktury mostkowej - punkt początkowy został oznaczony okręgiem bez czarnego wypełnienia a punkt końcowy jako okrąg z czarnym wypełnieniem [opracowanie własne]

Odnosząc się do Rysunek 28 system jest sprawny, jeżeli sprawne są odcinki międzywęzłowe: 1-2, 4-3, 1-5-3, 4-5-2.

Niezawodność jest następująca:

$$\begin{aligned}
 R_s(t) &= 2R^2(t)[R^3(t) + 3R^2(t)F(t) + 3R(t)F^2(t) + F^3(t)] & (58) \\
 &+ 2R^3(t)[R^2(t) + 2F(t)R(t) + F^2(t)] \\
 &= 2R^2(t)[R(t) + F(t)]^3 + 2R^3(t)[R(t) + F(t)]^2 \\
 &= 2R^2(t) + 2R^3(t) = 2R^2(t)(1 + R(T))
 \end{aligned}$$

Poddano analizie przypadek z zastosowaniem rezerwy zimnej (przedstawiony na Rysunek 28) niezawodność w tym przypadku, przy uwzględnieniu, że element rezerwowy zostanie włączony w momencie uszkodzenia systemu a czas włączenia tego odcinka międzywęzłowego numer 5 następuje natychmiastowo a jego czas włączenia jest pomijalnie krótki równy 0. Niezawodność tego systemu zatem wynosi:

$$\begin{aligned}
 R_s(t) &= 2R^2(t)[R^2(t) + 2R(t)F(t)] + 2R^2(t)R_p(t) & (59) \\
 &+ P((T < t) \wedge (T^* < t) \wedge (\max(T, T^*) + T^{**}) \geq t) \\
 &= 2R^2(t)[R(t) + F(t)] \\
 &+ 2R^2(t)R_p(t)P((T < t) \wedge (T^* < t) \wedge (\max(T, T^*) + T^{**}) \geq t) \\
 &= 2R^2(t)[1 + R_p(t)P((T < t) \wedge (T^* < t) \wedge (\max(T, T^*) + T^{**}) \\
 &\geq t)]
 \end{aligned}$$

Porównano oba systemy z rezerwą zimną i gorącą w przypadku układu mostkowego przy elementach jednakowych można zauważyć, że sprowadza się to do wyrażen:

$$R(t) \text{ i } P((T < t) \wedge (T^* < t) \wedge (\max(T, T^*) + T^{**}) \geq t). \quad (60)$$

Przy praktycznym założeniu, że Przełącznik ma wysoką niezawodność oraz przy nierówności:

$$R(t) < P((T < t) \wedge (T^* < t) \wedge (\max(T, T^*) + T^{**}) \geq t) \quad (61)$$

wynika nierówność:

$$R(t) < R_p(t) P((T < t) \wedge (T^* < t) \wedge (\max(T, T^*) + T^{**}) \geq t). \quad (62)$$

Przy założeniu dużej niezawodności elementów - odcinków międzywęzłowych (przynajmniej do pewnego czasu) wyrażenia te nie dzieli istotna różnica i wówczas rezerwa zimna nie polepsza znacząco niezawodności systemu w odniesieniu do rezerwy gorącej.

- **Przykład systemu o strukturze n-odcinków międzywęzłowych w strukturze szeregowej z podziałem na r-grup**

Przykładem struktury szeregowej o n - odcinkowej drodze, zgrupowanej i podzielonej na r -grup są drogi osiedlowe zgrupowane jako grupa i odcinki kolejne prowadzące z osiedla do osiedla jako odcinki międzywęzłowe. Do dokonania analizy niezbędne jest założenie, iż liczba grup musi być większa lub równa od 1 a liczbą elementów, czyli odcinków międzywęzłowych musi być również większa lub równa od liczbie grup ($1 \leq r \leq n$) o licznosciach odpowiednio:

$$\sum_{k=1}^r n_k = n. \quad (63)$$

Założono, że każda grupa elementów jest m_k – krotnie rezerwowana. W przypadku uszkodzenia się co najmniej jednego elementu z danej grupy, Przełącznik bezzwłocznie włącza do działania grupę rezerwową. Przełącznik k – tej grupy ma niezawodność $R_{pk}(t)$, niezawodność j – tego elementu w k -tej grupie rezerwowej $R_{jk}(t)$ i odpowiednio elementu podstawowego $R_{0j}(t)$. Przy tych założeniach niezawodność systemu z rezerwą jest następująca:

$$R_p(t, n_1, \dots, n_r, m_1, \dots, m_r) = \prod_{k=1}^r \{1 - [1 - \prod_{j=n_{k-1}+1}^{n_k} R_{jk}(t)]\} \quad (64)$$

gdzie:

$$\begin{cases} n_o = 1 \\ n_k = \sum_{i=1}^k n_i, 0 < k \leq r \quad (n_r = n) \end{cases}$$

Analogicznie można wyznaczyć wzory dotyczące szczególnych przypadków takich jak:

a) Wszystkie Przełączniki do dróg rezerwowych są niezawodne

$$R_p(t, n_1, \dots, n_r, m_1, \dots, m_r) = \prod_{k=1}^r \{1 - [1 - \prod_{i=0}^{m_k} [1 - \prod_{j=n_{k-1}+1}^{n_k} R_{ij}(t)]]\} \quad (65)$$

b) Rezerwowanie jest jednostkowe

$$R_R(t, n, m_1, \dots, m_n) = \prod_{k=1}^n \{1 - [1 - R_{ok}(t)] \prod_{i=1}^{m_k} [1 - R_{pk}(t) R_{ik}(t)]\} \quad (66)$$

c) Rezerwowanie jest globalne

$$R_R(t, n, m) = 1 - [1 - \prod_{j=1}^n R_{oj}(t)] \prod_{i=1}^m [1 - R_p(t) \prod_{j=n_{k-1}+1}^{n_k} R_{ij}(t)] \quad (67)$$

Przykładem dróg z rezerwą o strukturze szeregowej jest system ulic równoległych do siebie względem położenia, jednakże z określonym poruszaniem się po nich – system dróg jednokierunkowych lub wyłączenie lewoskrętów z struktury organizacji ruchu na węzłach (skrzyżowaniach). W przypadku, gdy własności odcinków międzywęzłowych jak i dróg rezerwowych są jednakowe można podać następujące rozwiązania:

d) Rezerwowania grupowego z zawodnym Przełącznikiem

$$\begin{aligned} R_R(t, n_1, \dots, n_n, m_1, \dots, m_r) & \quad (68) \\ &= \prod_{k=1}^r \{1 - [1 - \prod_{j=n_{k-1}+1}^{n_k} R_j(t)] [1 - R_{pk}(t) \prod_{j=n_{k-1}+1}^{n_k} R_j(t)]^{m_k}\} \end{aligned}$$

e) Rezerwowania grupowego z niezawodnym Przełącznikiem

$$R_R(t, n_1, \dots, n_r, m_1, \dots, m_r) \quad (69)$$

$$= \prod_{k=1}^r \{1 - [1 - \prod_{j=n_{k-1}+1}^{n_k} R_j(t)] [1 - R_{pk}(t)]^{m_k+1}\}$$

f) Rezerwowania jednostkowego z niezawodnym Przełącznikiem

$$R_R(t, n, m_1, \dots, m_n) = \prod_{k=1}^n \{1 - [1 - R_k(t)] [1 - R_k(t)]^{m_k}\} \quad (70)$$

g) Rezerwowania globalnego z niezawodnym Przełącznikiem

$$R_R(t, n, m) = 1 - (1 - \prod_{j=1}^n R_j(t)) (1 - \prod_{j=1}^n R_j(t))^m \quad (71)$$

W celu rozstrzygnięcia, który sposób rezerwowania jest korzystniejszy czy jest to rezerwowanie jednostkowe czy globalne należy określić założenia, iż system składa się z jednakowych elementów o niezawodności $R(t)$ oraz niezawodnych Przełączników. Dokonując więc porównania systemów z rezerwą jednostkową w systemie, w którym istnieje n - elementów podstawowych – odcinków międzywęzłowych a każdy odcinek k -krotnie jest rezerwowany jako system z rezerwą globalną. Dokonując odpowiednich podstawień do równań f) (70) i g) (71) otrzymane zostało następujące równania (szczegółowe rozwinięcie założenia znajduje się w Załącznik 5 – Wyprowadzenia niezbędne do obliczenia niezawodności systemów o różnych strukturach.

Porównanie rezerw:[4]

1) Dla systemu z rezerwą jednostkową:

$$R_{Rj}(t, n, k) = \prod_{i=1}^n (1 - (1 - R(t))^{k+1}) \quad (72)$$

2) Dla systemu z rezerwą globalną;

$$R_{Rg}(t, n, kn) = 1 - (1 - R^n(t))^{kn+1} \quad (73)$$

MST jest na tyle rozbudowana, że w spojrzeniu globalnym nie jest możliwym wyszczególnienie jednej struktury dla całej sieci. Struktura ta jest bardziej skomplikowana, posiada elementy szeregowej struktury, równoległej jak i szeregowo – równoległej a także wariantów mieszanych. Każda struktura, która nie jest ani szeregową, ani równoległą, ani szeregowo-równoległą jest strukturą inną.

5.3. Metody poprawy niezawodności w Miejskiej Sieci Transportowej

Niezawodność operacyjna procesu transportowego jest jednym z ważniejszych zadań w MST. Pomimo dużych starań jednak zdarzają się awarie, które są przyczyną zakłócenia pracy MST a nawet stwarzają one zagrożenie dla ludzi i środowiska. MST można traktować jako system składający się z sieci ulic, zespołu ludzi zarządzających ruchem, miejsc parkingowych – postojowych czy jednostek transportowych (trolejbusy, autobusy, samochody osobowe, itp.). Prawie wszystkie zespoły i układy funkcjonalne posiadają nadmiarową strukturę niezawodnościową, co oznacza, że występujące awarie techniczne lub operacyjne niektórych elementów nie powodują niezdatności operacyjnej całej miejskiej sieci transportowej i nie zagrażają realizacji procesu transportowego. Wszystkie podzespoły są ściśle ze sobą powiązane. Wyszczególnione zostały następujące nadmiary[80]:

- **Nadmiar strukturalny** - polega na zastosowaniu układów i elementów podstawowych realizujących przypisane funkcje oraz układy i elementy rezerwowe włączające się do pracy w przypadku uszkodzenia elementów podstawowych. Reprezentantem systemu z nadmiarem strukturalnym jest system wypuszczania podwozia na samolocie, składający się z podsystemu podstawowego i awaryjnego (rezerwowego). Układ rezerwowy wykorzystuje się w przypadku, gdy zawiedzie układ podstawowy.

Przykładami nadmiaru strukturalnego dla MST, są równoległe ciągi komunikacyjne oraz sieć drogowa, która ma wystarczającą przepustowość na zaspokojenie potrzeb transportowych w mieście. Sieć posiadająca możliwość dojazdu co najmniej z dwóch różnych źródeł i połączenie między tymi drogami.

- **Nadmiar funkcjonalny** - polega na tym, że element wykonuje swoją ściśle określoną funkcję, ale w określonych sytuacjach może on pełnić dodatkową funkcję zamiast elementu uszkodzonego.

W przypadku MST dotyczy to na przykład zezwolenie poruszania się pojazdów po drogach normalnie wyłącznych z ruchu, np. terenach prywatnych.

- **Nadmiar czasowy** - sprowadza się do współdziałania elementów systemu, a w szczególności do współdziałania człowieka z systemem technicznym.

Przykładem może być dostosowanie rozkładu jazdy dla transportu zbiorowego w konkretnych sytuacjach, może to występować w skali tygodniowej takiej jak inny rozkład jazdy w niedziele i święta lub okazjonalny w przypadku wystąpienia uroczystości lub wydarzenia masowego.

- **Nadmiar parametryczny** - w przypadku nadmiaru parametrycznego cechy systemów muszą odpowiadać określonym wymaganiom dotyczącym zakresu ich zmienności. Istotne cechy – wielkości systemu noszą nazwę parametrów.

Przykładem nadmiaru parametrycznego w MST jest w sieci drogowej prowadzenie ruchu wahadłowego lub zamiana kierunku poruszania się w okresie czasu występowania awarii.

- **Nadmiar wytrzymałości** - w procesie projektowania konstrukcji wprowadza się tak zwany współczynnik bezpieczeństwa. Współczynnik bezpieczeństwa ustala się zarówno dla konstrukcji mechanicznych, jak też dla urządzeń elektrycznych i pneumatycznych.

Systemy takie określa się jako mające nadmiar wytrzymałości. W MST przykładem są ograniczenia prędkości, limitu wysokości pojazdu dla przejazdu pod wiaduktem lub w tunelu. Limitem może być też dopuszczalna masa pojazdu, infrastruktura drogowa projektowana jest na określone normy uzależnione od różnych czynników, między innymi natężenie ruchu, udział procentowy pojazdów ciężarowych itp.

5.4. Nadmiarowość w Miejskiej Sieci Transportowej

W MST występują formy nadmiaru które łącznie zwiększają zarówno bezpieczeństwo czynne jak i bierne. Bezpieczeństwo czynne uzależnione jest od nadmiarów zabezpieczających poprawne funkcjonowanie MST a bezpieczeństwo bierne ma na celu złagodzenie skutków awarii technicznych i operacyjnych. Przykładem bezpieczeństwa czynnego jest całkowicie sprawny pojazd, którym porusza się kierowca, pojazd wyposażony w odpowiedni układ kierowniczy, układ hamulcowy itp. Należy również pamiętać o aspekcie poprawnie zaprojektowanej jak i wykonanej drogi, po której porusza się kierowca, droga ta musi być odpowiednio wyprofilowana a także oświetlona w miejscach newralgicznych. Przykładem bezpieczeństwa biernego mogą być np. bariery energochłonne, które w momencie zderzenia drogowego powodują częściowe wchłonięcie energii wynikającej z uderzenia. Czy odpowiednie zabezpieczone pobocze jezdni. W związku z bezpieczeństwem biernym powstał termin „wybaczące drogi”, który między innymi jest zawarty w celach 4 i 5 Programu GAMBIT[60], który oznacza, że droga powinna być tak zaprojektowana, aby zminimalizować skutki ewentualnych błędów kierowców. Droga powinna być między innymi wolna od przeszkód na poboczu. Bezpieczeństwem biernym może być również sprawny system reagowania na kolizje i wypadki drogowe, składający się z powiadomienia odpowiednich jednostek czy trasę służb ratowniczych na miejsce zdarzenia a nawet udzielenie sprawnej oceny zagrożenia życia ludzkiego.

Badania eksploatacyjne systemów bezpieczeństwa napotykają duże trudności[100]. Wynika to z ograniczonych możliwości zbierania danych eksploatacyjnych. Zapewnienie dostatecznej wiarygodności oceny wskaźników bezpieczeństwa jest trudne, dlatego istotną rolę odgrywa prowadzenie modelowych badań systemu bezpieczeństwa. Wyznacza się na podstawie doświadczenia parametrów modelu, a następnie szacuje wskaźniki niezawodności i bezpieczeństwa systemu. Proces modelowania rozpoczyna się od tworzenia modelu funkcjonalnego z punktu widzenia niezawodności i bezpieczeństwa.

Przydatnymi danymi w miejskiej sieci drogowej są wszystkie parametry związane z ruchem drogowym; między innymi: natężenie ruchu z rozróżnieniem na rodzaj pojazdu, średnie natężenie godzinne, dobowe a także wyznaczenie szczytów komunikacyjnych, czyli

okresów, w których ruch drogowy jest najintensywniejszy. Ważnym elementem jest również parametr związany z siecią drogową a mianowicie gęstość dróg w obszarze modelowanym, połączenia pomiędzy ciągami drogowymi a także ich stan techniczny, który bezpośrednio wpływa na komfort jazdy, prędkość chwilową a także bezpieczeństwo.

6. Metody symulacyjne w transporcie drogowym

Modelowanie symulacyjne systemów i procesów transportowych wykorzystywane jest od wielu lat, publikacje naukowe odnoszące się do modelowania zarządzania portem a także jego przeładunkami można znaleźć już z 1980 roku[78]. Wiele zagadnień związanych z ruchem poszczególnych jednostek – środków transportu - oraz operacji przemieszczania ładunku analizowano poprzez stosowanie złożonych modeli symulacyjnych z uwagi na rozległe jak i skomplikowane procesy zachodzące w trakcie ich trwania. Ruch pojazdów w MST można modelować analitycznie zwłaszcza dla przypadków średnio i wielkoskalowych za pomocą wielu narzędzi specjalnie do tego stworzonych. Z uwagi na niejednorodność ruchu pojazdów nie da się w całości odwzorować za pomocą modelu wszystkich zachowań kierowców czy sytuacji incydentalnych mających bezpośredni wpływ na ruch drogowy. Modele symulacyjne mogą zostać podzielone ze względu na obszar i szczegółowość opisu systemu, który obejmują. Zatem można rozróżnić modele:

- makroskopowy model symulacyjny;
- mezoskopowy model symulacyjny;
- mikroskopowy model symulacyjny.

W dziedzinie nauki jaką jest Inżynieria Ruchu Drogowego stosuje się istniejące od wielu lat programy do symulacyjnego modelowania ruchu. Programy te umożliwiają odwzorować rzeczywistość na konkretnym obszarze analizy w znacznym stopniu nie odbiegającym od rzeczywistych warunków ruchu. Najbardziej popularnym narzędziem w skali makroskopowej jest PTV Visum. Zaletą programu jest możliwość modelowania zgodnie z klasyczną czterostopniową procedurą[34]: generowanie podróży, rozkład tych podróży na sieci w sposób przestrzenny, podział zadań transportowych, a następnie rozkład ruchu w sieci transportowej. Symulację można przeprowadzić na znacznym obszarze obejmującym np.: obszar miasta, aglomeracji miejskich, województw czy nawet całego kraju. Poprzez zaimplementowanie do narzędzia danych a także określenie sieci transportowej: zdefiniowanie odcinków dróg między węzłowych (skrzyżowania lub węzły) oraz cechy tras prowadzących po wyznaczonej sieci transportowej linii transportu zbiorowego. Modelowanie symulacyjne za pomocą wyżej opisanego narzędzia może być wykorzystywane do

dostarczania danych pozostałym modelom (w skali mikroskopowej i mezoskopowej). Od 1976 roku Instytut Studiów Transportowych na Uniwersytecie w Leeds[79] rozwija narzędzie do modelowania symulacyjnego w skali mezoskopowej o nazwie SATURN.[82] Narzędzie to daje możliwość modelowania w sposób konwencjonalny, makroskopowy, statystyczny – rozkład ruchu w sieciach transportowych o różnej wielkości jak i symulacji w skali mezoskopowej, czyli z uwzględnieniem cech skrzyżowań ich typów a także typów użytkowników, w tym wariacie model bazuje między innymi na metodzie Webstera.

Możliwym jest wykorzystanie również kombinacji podejścia konwencjonalnego z symulacyjnym. Użycie wyżej opisanego narzędzia może być wykorzystywane do przeprowadzania różnego rodzaju analiz bazujących na obszarach z siecią drogową i otrzymaniem danych analitycznych np. o skrzyżowaniach w zależności od ich organizacji ruchu. W skali mikroskopowej do celów analizy symulacyjnej wykorzystuje się np. narzędzie PTV Vissim[61][56]. Program ten w przystępny użytkownikowi sposób pozwala tworzyć analizy ruchu: drogowego (w tym indywidualnego samochodowego, rowerowego a także zbiorowego) a także ruchu pieszego. Narzędzie pozwala również na badanie metodą symulacyjną oddziaływań wzajemnych generowanych przez poszczególne grupy użytkowników ruchu poruszających się po tej samej sieci drogowej. Podstawą symulacji jest w przypadku narzędzia PTV Vissim model Wiedemann'a kojarzący się z nazwą „jazdy za liderem” ponieważ pojazd jadący za innym pojazdem osiąga swoją prędkość maksymalną a następnie zwalnia i przyspiesza, aby zachować bezpieczną odległość od pojazdu poruszającego się przed nim.[81] Modelowanie za pomocą narzędzia PTV Vissim [75][76] odbiega od standardowego rozumienia modelowania za pomocą grafu, gdzie występują: węzły i odcinki.

W odróżnieniu od modelowania klasycznego pozwala na bardziej rozległe i dokładne zamodelowanie odcinka drogi, dodając takie aspekty jak ruch pieszych[56], rodzaj skrzyżowania w tym zamodelowanie skrzyżowania o ruchu okrężnym czy uwzględnienie różnych strategii sterowania, podejście to daje ogromne możliwości i dowolność w modelowaniu.[48] Model ten najczęściej wykorzystywany jest na obszarach w skali mikro np.: ciąg skrzyżowań w odcinku miejskim czy odcinek drogi wraz z parkingiem samochodowym. Funkcjonalność modelowania za pomocą narzędzia PTV Vissim osiąga się

poprzez wprowadzenie danych odnośnie wielkości potoku ruchu, jego rodzaju, struktury rodzajowej, istotnych elementów infrastruktury drogowej (np. krzywizny, łuków poziomych i pionowych czy szerokość pasa ruchu), istotnych elementów infrastruktury związanej z transportem zbiorowym czy odwzorowania miejsc związanych z poruszaniem się pieszych. Przeprowadzona analiza mikro-symulacyjna pozwala na uzyskanie podstawowych danych wynikowych w zamodelowanej sieci transportowej w wyznaczonym przedziale czasowym takich jak: długości kolejek, czasy przejazdu, straty czasu, liczba zatrzymań, prędkości podróży, emisji spalin czy zużycia paliwa.

6.1 Niezawodność operacyjna Miejskiej Sieci Transportowej w aspekcie związków korelacyjnych

Jednym z zagadnień, które zostało zbadane jest oddziaływanie zawodności infrastruktury transportowej lub środków transportu na realizację zadania lub procesu transportowego. System transportowy jak i sieć transportowa podlega oddziaływaniom o charakterze losowym, dlatego określimy dwie zmienne losowe \mathbf{X} i \mathbf{Y} . Zmienna losowa \mathbf{X} określa niezawodnościowy stan infrastruktury transportowej oraz środków transportu (niezawodność obiektów technicznych w aspekcie czynników zakłócających), zaś zmienna losowa \mathbf{Y} stan realizacji zadania lub procesu transportowego (niezawodność operacyjna). Założenia modelu:

- niezależność zdarzeń powodujących zawodność infrastruktury i środków transportu;
- występowanie losowych oddziaływań.

Niezawodność operacyjną określono jako zdolność systemu do zachowania spójności i przeciwstawiania się zakłóceniom takim jak np. kolizje lub wypadki drogowe, nieoczekiwane wyłączenia z eksploatacji elementów infrastruktury drogowej, czynniki atmosferyczne (mgła, oblodzenie, ulewa), zmiany przepustowości systemu lub sieci transportowej, wraz z ograniczeniami procesu transportu.

Zmienna losowa \mathbf{X} przyjmuje wartości:

- **1** – brak zakłóceń;
- **0** – zawodność elementów infrastruktury (chwilowe wyłączenie części jezdni lub drogi z ruchu);
- **-1** – zawodność środka transportu (kolizja, wypadek, awaria techniczna).

Zmienna losowa \mathbf{Y} przyjmuje wartości:

- **2** – pełna sprawność operacyjna;
- **1** – ograniczona sprawność operacyjna;
- **0** – zawodność operacyjna.

$$P(Y = n) = \sum_{k=-1}^1 P(Y = n; X = k) \circ P(X = k); \quad (74)$$

gdzie:

- n – wartości dla zmiennej losowej Y $n=\{0,1,2\}$
- k – wartości dla zmiennej losowej X $k=\{-1,0,1\}$

Prawdopodobieństwo realizacji zadania lub procesu transportowego wyznaczone jest przez prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia: „wartość zmiennej losowej Y jest różna od zera”:

$$P(Y \neq 0) = \sum_{n=1}^2 P(Y = n) \quad (75)$$

Rozkład wektora losowego (X, Y) opisany jest macierzą:

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{X} \quad \mathbf{Y} \quad \mathbf{2} \quad \mathbf{1} \quad \mathbf{0} \\
 \mathbf{1} \\
 \mathbf{0} \\
 \mathbf{-1}
 \end{array}
 P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{12} & p_{11} & p_{10} \\ p_{02} & p_{01} & p_{00} \\ p_{-12} & p_{-11} & p_{-10} \end{bmatrix} \quad (76)$$

Rozkłady brzegowe zmiennych X oraz Y przyjmują postać:

X	1	0	-1
P_X	$p_{12} + p_{11} + p_{10}$	$p_{02} + p_{01} + p_{00}$	$p_{-12} + p_{-11} + p_{-10}$

Y	2	1	0
P_Y	$p_{12} + p_{02} + p_{-12}$	$p_{11} + p_{01} + p_{-11}$	$p_{10} + p_{00} + p_{-10}$

W przypadku przyjęcia założenia, że jeśli nie występują zakłócenia system realizuje zadanie lub proces transportowy bez ograniczeń efektywności tzn.:

$$P(Y = 2; X = 1) = 1 \quad (77)$$

A także, że wystąpienie zakłócenia pogarsza efektywność realizacji zadania lub procesu transportowego tzn.:

$$P(Y = 2; X \neq 1) = 0 \quad (78)$$

Otrzymano:

$$X \quad Y \quad \quad 2 \quad \quad 1 \quad \quad 0 \quad (79)$$

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{(X=1)} & 0 & 0 \\ 0 & p_{01} & p_{00} \\ 0 & p_{-11} & p_{-10} \end{bmatrix}$$

-1

X	1	0	-1
P _x	P(X = 1)	p ₀₁ + p ₀₀	p ₋₁₁ + p ₋₁₀

$$E(X) = P(X = 1) - p_{-11} - p_{-10} \quad (80)$$

$$E(X^2) = P(X = 1) + p_{-11} + p_{-10} \quad (81)$$

gdzie:

— E(X) – wartość oczekiwana;

— E(X²) – drugi moment zwykły.

Y	2	1	0
P _y	P(X = 1)	p ₀₁ + p ₀₀	p ₋₁₁ + p ₋₁₀

$$E(Y) = 2P(X = 1) + p_{-11} + p_{01} \quad (82)$$

$$E(Y^2) = 4P(X = 1) + p_{-11} + p_{01} \quad (83)$$

XY	2	0	-1
P _{XY}	P(X = 1)	p ₀₀ + p ₀₁ + p ₋₁₀	p ₋₁₁

$$E(XY) = 2P(X = 1) - p_{-11} \quad (84)$$

Kowariancja pomiędzy zmiennymi losowymi X i Y dana jest wzorem:

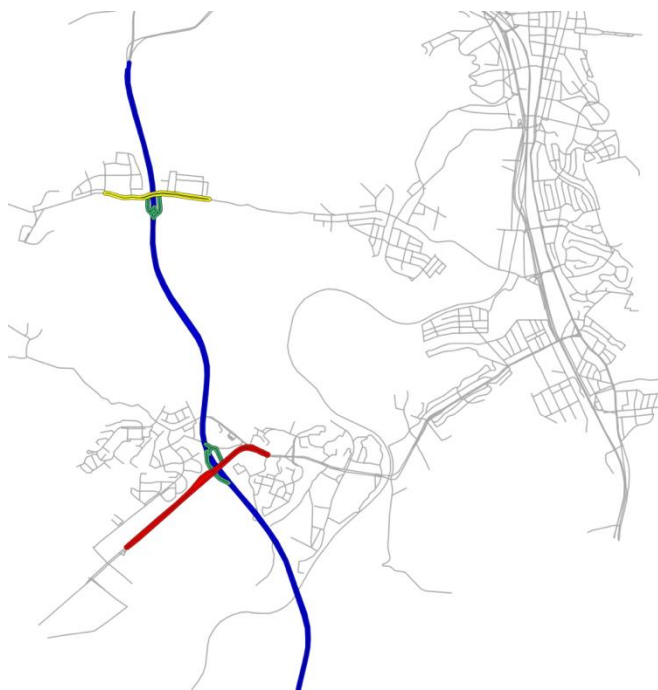
$$\begin{aligned} cov(XY) &= 2P(X = 1) - p_{-11} && (85) \\ &\quad - (P(X = 1) - p_{-11} - p_{10})(2P(X = 1) + p_{-11} + p_{01}) \\ &= -2[P(X = 1)]^2 \\ &\quad + P(X = 1)[2 + 2(p_{-11} + p_{-10}) - (p_{-11} + p_{01})] - p_{-11} + (p_{-11} \\ &\quad + p_{-10})(p_{-11} + p_{01}) \end{aligned}$$

6.2 Zastosowanie metod modelowania symulacyjnych

Przykładem zastosowania modelowania symulacyjnego do oszacowania wpływu procentowego udziału kierowców stosujących się do wyświetleń na tablicach zmiennej treści z podaną trasą alternatywną na warunki ruchu panujące na dwóch węzłach obwodnicy Trójmiasta. Model, opracowany w programie PTV Vissim może być przydatny dla zarządców dróg miejskich jak i dróg krajowych w celu poprawy efektywności sterowania ruchem na węzłach. Dostosowanie programów sygnalizacji do panujących warunków ruchu na modelowanym odcinku obwodnicy pozwoli na wykorzystanie przepustowości skrzyżowań dróg miejskich i krajowych. Do modelu została wykorzystany wycinek MST obejmujący dwa węzły na obwodnicy Trójmiasta – Węzeł Karwiny i Węzeł Witomino znajdujące się w mieście Gdynia a także odcinek między tymi węzłami.[91] W modelu został przeanalizowany „wypadek” zlokalizowany w połowie odległości między dwoma węzłami i obejmujący zasięgiem całą szerokość jezdni. Wypadek ma miejsce w kierunku węzła Witomino, kierowcy informowani są o zdarzeniu 5 minut po zaistniałym wypadku poprzez tablicę zmiennej treści, na której widnieje podana trasa alternatywna. Z danych uzyskanych w modelu porównane zostały długości czasu trwania podróży i opóźnienia wynikające z utrudnień w ruchu drogowym.

Porównane zostały dane w tych samych warunkach dla różnego udziału procentowego kierowców, którzy stosują się do wyświetlanej informacji na tablicy zmiennej treści został przyjęty w wariantach: 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%. Model został zasilony w dane z Gdyńskiego makro modelu TRISTAR na rok 2012 – szczyt poranny (6:00-7:00) wykonanego przez Fundację Rozwoju Inżynierii Lądowej na zlecenie firmy Qumak – Sekom w programie PTV Visum. Za pomocą programu PTV Visum[17] została wycięta sieć transportowa obejmująca modelowany obszar międzywęzłowy – przedstawiony został jako Rysunek 29. Kolorem niebieskim została oznaczona Obwodnica Trójmiasta, kolorem żółtym ulica Chwarznieńskiej, kolorem czerwonym ulica Chwaszczyńska, zaś kolorem zielonym zostały oznaczone łącznice. Następnie na wyciętej sieci został wykonany rozkład ruchu. Uzyskane wyniki z macierzy podróży umożliwiły otrzymanie danych o natężeniach ruchu. Natężenia ruchu uzyskane z programu PTV Visum zasilili model

w programie PTV Vissim. Po rozkładzie uzyskano i przyjęto 6% udział pojazdów ciężarowych.



Rysunek 29 Wycinek sieci transportowej - Obwodnica Trójmiasta [91]

Wykonany model[91] w programie PTV Vissim odzwierciedla istniejącą sytuację drogową na modelowanym odcinku pod względem: natężeń, zachowania kierowców, struktury rodzajowej pojazdów, natężeń pojazdów transportu zbiorowego, została również przyjęta sygnalizacja stała czasową obowiązująca na węzłach. Do modelu sieci zostały dodane dodatkowe sygnalizatory, które są odpowiednikiem wypadku (w tym przypadku wypadek to odpowiednik zablokowania całej szerokości jezdni) przypadku ustawienia ręcznego z poziomu programu VBA (*ang. Visual Basic for Applications*) Excel światła czerwonego na danym sygnalizatorze. Na podstawie gotowych przykładów przygotowanych przez firmę PTV GROUP został w znaczący sposób zmodyfikowany kod w programie VBA umożliwiając dodanie funkcjonalności modelu. Do istniejącego już kodu zostały dodane następujące funkcje uruchamiające:

- „Włączenie/wyłączenie wypadku” - czerwone światło na sygnalizatorze, które ma zastępować wyłączenie pasa z ruchu, mogące być spowodowane wypadkiem lub innym zdarzeniem losowym.

- Określenie czasu, po którym kierowcy zostaną poinformowani o „wypadku”. W modelu została określona komórka w arkuszu kalkulacyjnym Excel, w którym użytkownik zobowiązany jest do wpisania interesującego go czasu, po którym nastąpi informacja. Dana ta musi być wpisana w jednostce sekundowej – w modelu 5 minut.
- Uruchomienie informacji na tablicy zmiennej treści o „wypadku”, tablice zostały wprowadzone wirtualnie w miejscach, gdzie znajdują się generatory ruchu. Odpowiadają one zmianie trasy przez część kierowców.
- zmiana trasy przez daną część kierowców, którzy zastosują się do wyświetlanej informacji.
- Określenie udziału procentowego kierowców stosujących się do informacji na tablicy zmiennej treści. W modelu została określona komórka w arkuszu kalkulacyjnym Excel, w którym użytkownik zobowiązany jest do wpisania interesującego go udziału procentowego kierowców. Dana ta musi być wpisana w formie ułamka dziesiętnego – w modelu od 0% do 100%.

Dane uzyskane z modelu symulacyjnego (zmienna D_k dla $k= 10, 20, 30, \dots, 90, 100$) zostały zbadane statystycznie za pomocą programu STATGRAPHICS.

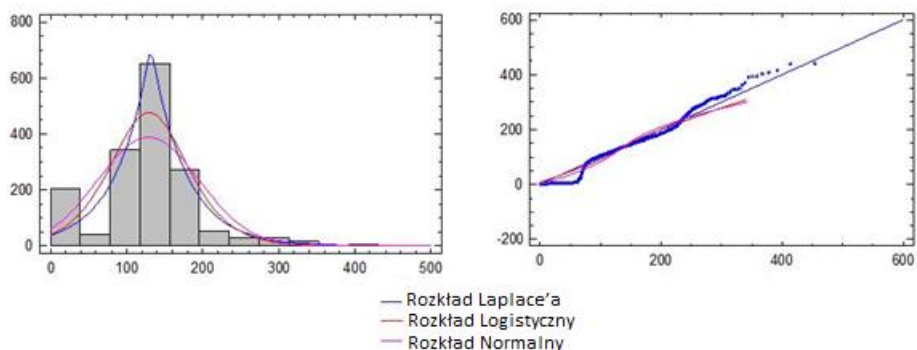
Gdzie:

- D_k – opóźnienie dla natężenia pojazdów stosujących się do wirtualnej tablicy zmiennej treści o k procent $k=\{10,30,50,70,100\}$;
- D_N - opóźnienie dla modelu wyjściowego bez dodatkowego natężenia pojazdów;
- Q_{proc} – natężenie pojazdów stosujących się do wirtualnej tablicy zmiennej treści zalecającej użycie objazdu.

Wyniki przedstawione w publikacji[92] wykazały zależności między średnim czasem opóźnienia kierowców a procentem kierowców, którzy skorzystali z drogi alternatywnej (%). Model opóźnienia dla płynnego ruchu (D_N) pokazano na Rysunek 30, a parametry rozkładów w Tabela 10.

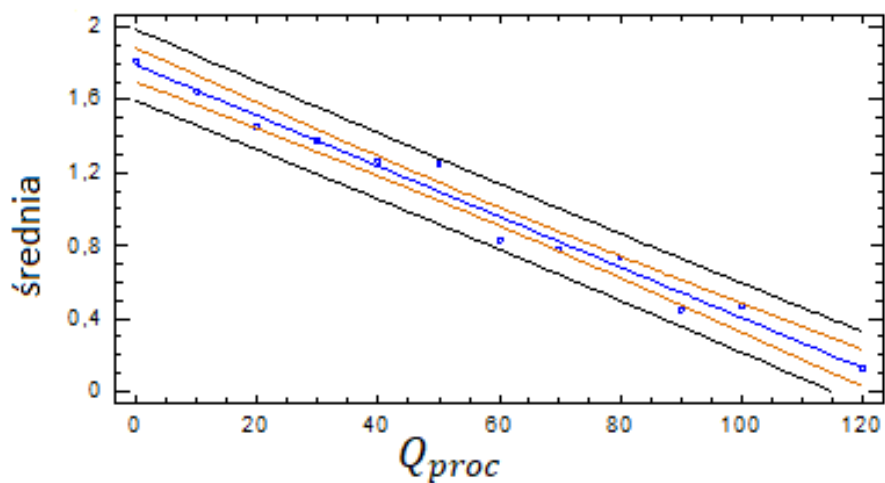
Tabela 10 Porównanie wyników dopasowanych rozkładów[92]

Laplace	Logistyczny	Normalny
średnia = 131,9	średnia = 129,281	średnia= 128,497
skala = 0,0220228	Odchylenie standardowe = 61,8741	Odchylenie standardowe = 66,6317



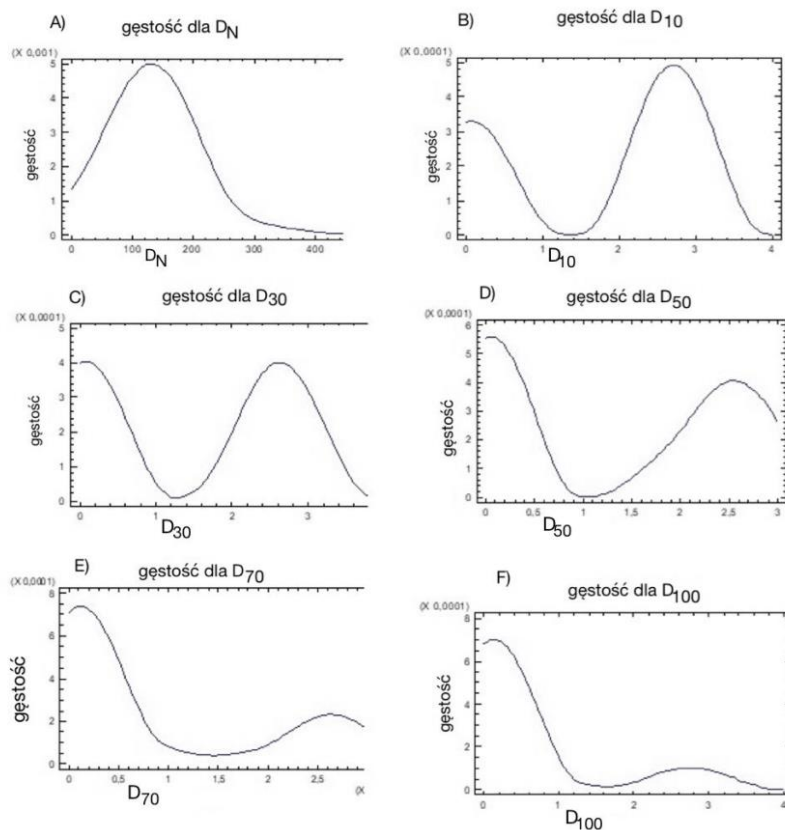
Rysunek 30 Histogram dla opóźnień N i wykres kwantylowy[92]

Równanie modelu regresji między średnimi zmiennych D_k a Q_{proc} obrazuje Rysunek 31. Istnieje statystycznie istotny związek między średnią a Q_{proc} na poziomie ufności 95,0%, ponieważ wartość P -value w analizie ANOVA jest mniejsza niż 0,05. R^2 równy 0,98 statystyki wskazuje, że dopasowany model wyjaśnia 98% zmienności średniej. Współczynnik korelacji wynosi - 0,989969, co wskazuje na względnie silny związek między zmiennymi.



Rysunek 31 Wykres dopasowanego modelu[92]

Zastosowano technikę analizy wrażliwości, aby określić, w jaki sposób różne wartości zmiennej Q_{proc} wpłynęły na zmienne zależne od D_k przy danym zestawie założeń. Wyniki dla różnego udziału procentowego zostały zobrazowane na Rysunek 32.



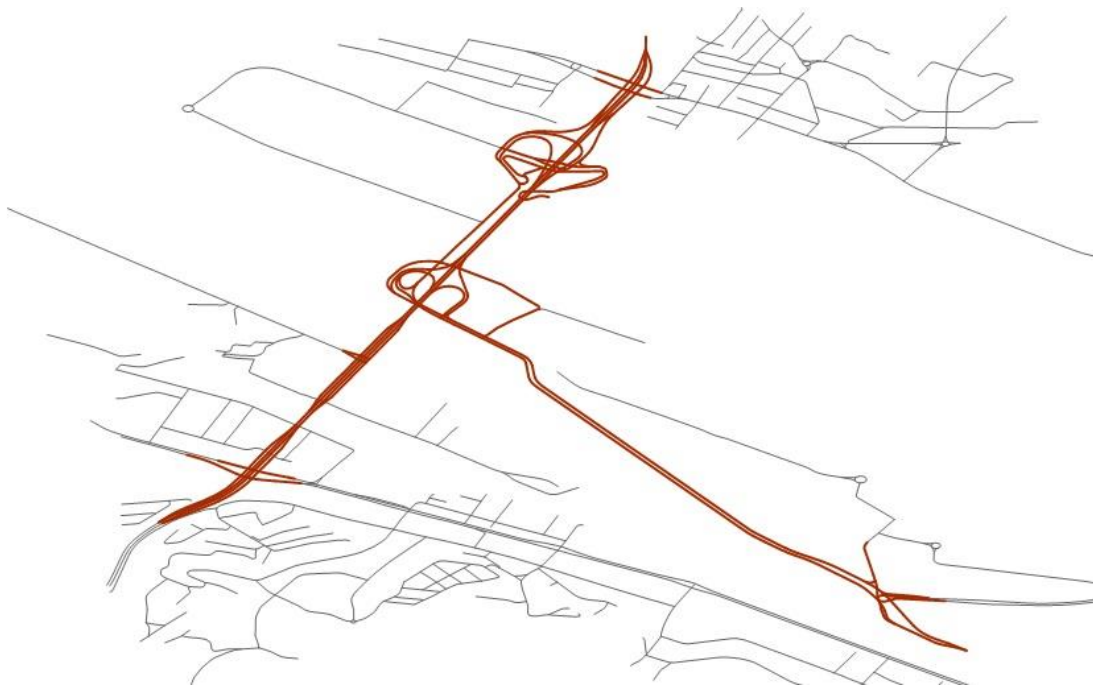
Rysunek 32 Wyniki gęstości dla udziału procentowego 0,10,30,50,70,100 %[92]

Możliwą formą analizy wrażliwości jest zmiana jednej wartości w modelu Q_{proc} i zbadanie wpływu zmiany na wyniki modelu D_k (opóźnienie zależne od Q_{proc}). Dzięki raportowaniu obszernych wyników analizy wrażliwości model jest w stanie rozważyć szeroki zakres scenariuszy a także zwiększyć poziom pewności. Wyniki modelu ukazują jak ważna jest współpraca pomiędzy jednostkami zarządzającymi drogami tak aby podziały administracyjne nie miały wpływu na jakość podróżowania, zwłaszcza podczas występowania różnego rodzaju incydentów drogowych istotnie oddziałujących na ruch drogowy.

6.3 Model symulacyjny wycinka sieci drogowej prowadzącej do terenów portowych – analiza przypadku

W celu przeprowadzenia analizy wpływu pojazdów ciężarowych na MST. Zrealizowano model, który odzwierciedla stan istniejący na przykładzie miasta portowego Gdynia. Model jest aktualny na dzień 10.02.2020. Późniejsze możliwe zmiany w modelowanej sieci czy sposobie zarządzania ruchem nie zostały uwzględnione. Stan istniejący zamodelowanej sieci porównano do zwiększonych natężeń ruchu pojazdów ciężarowych wynikających z podróży do i z portu. Model ma na celu sprawdzenie okresów czasowych w których nie zostanie przekroczony poziom swobody ruchu w aspekcie niezawodności operacyjnej. Poszczególne wartości graniczne niezawodności operacyjnej dla poszczególnych stanów zostały określone na podstawie modelu stanu istniejącego. Do wykonania opisanej analizy został stworzony model symulacyjny w programie PTV Vissim. Model ten został zasilony w dane rzeczywiste otrzymane od Gdynińskiego Zarządu Dróg i Zieleni w Gdyni i dane policzone manualnie. Dane pochodzą z Inteligentnego Systemu Sterowania Ruchem TRISTAR. Dane w godzinach szczytu zostały dodatkowo pomierzone ręcznie w celu kalibracji modelu o dokładną strukturę rodzajową pojazdów. Wszystkie szczegółowe dane zostały zamieszczone w Załącznik 6 - Dane wynikowe z modelu. Przykładem sieci transportowej znajdującej się w pobliżu portu jest wycinek sieci w mieście Gdynia. Odcinki drogowe wchodzące w skład modelu to: Estakada Kwiatkowskiego z węzłami: Kwiatkowskiego - Unruga, Kwiatkowskiego - Kontenerowa, Kwiatkowskiego - Energetyków Kwiatkowskiego - Hutnicza, Kwiatkowskiego - Morska, ulica Janka Wiśniewskiego wraz ze skrzyżowaniami: Janka Wiśniewskiego - Energetyków, Janka Wiśniewskiego - Gołębia, Janka Wiśniewskiego - Portowa, Janka Wiśniewskiego - Polska. Poniższa mapa przedstawia zakres zamodelowanego wycinka MST miasta Gdynia -

Rysunek 33.



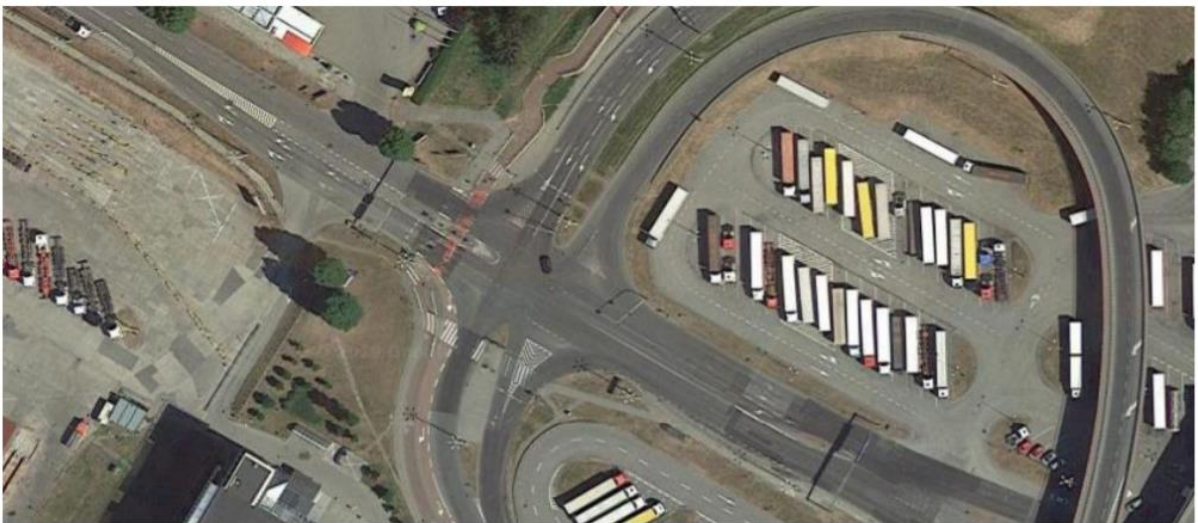
Rysunek 33 Wycinek MST miasta Gdynia poddanej analizie poprzez modelowanie symulacyjne [opracowanie własne]

- 1) Zakres modelu wykonanego w PTV Vissim 2020 w celu uzyskania odwzorowania stanu istniejącego:
 - odwzorowano sieć drogową wraz z układem połączeń;
 - dodano natężenia pojazdów w ujęciu godzinowym od 05:00 do 20:00;
 - dodano strukturę rodzajową pojazdów;
 - dodano relacje skrętne na każdym skrzyżowaniu z określeniem udziału procentowego;
 - dodano programy sygnalizacji świetlnej dla przedziału czasowego 05:00 do 20:00 wraz z harmonogramem zmiany programów w zależności od godziny;
 - wyposażono skrzyżowania w sygnalizatory;
 - dodano rozkłady jazdy transportu zbiorowego a także infrastrukturę taką jak przystanki autobusowe, miejsca oczekiwania dla pieszych a także krawędzie przystankowe;
 - przyporządkowane zostały prędkości dopuszczalne na poszczególnych odcinkach;
 - ograniczone zostały prędkości na relacjach skrętnych w obrębie skrzyżowania;

- przyporządkowano i określono pierwszeństwo ruchu w sytuacjach spornych;
- dodano ruch pieszych;
- dodano punkty pomiarowe;
- skalibrowano i przeprowadzono walidację modelu.

2) Dane pomiarowe

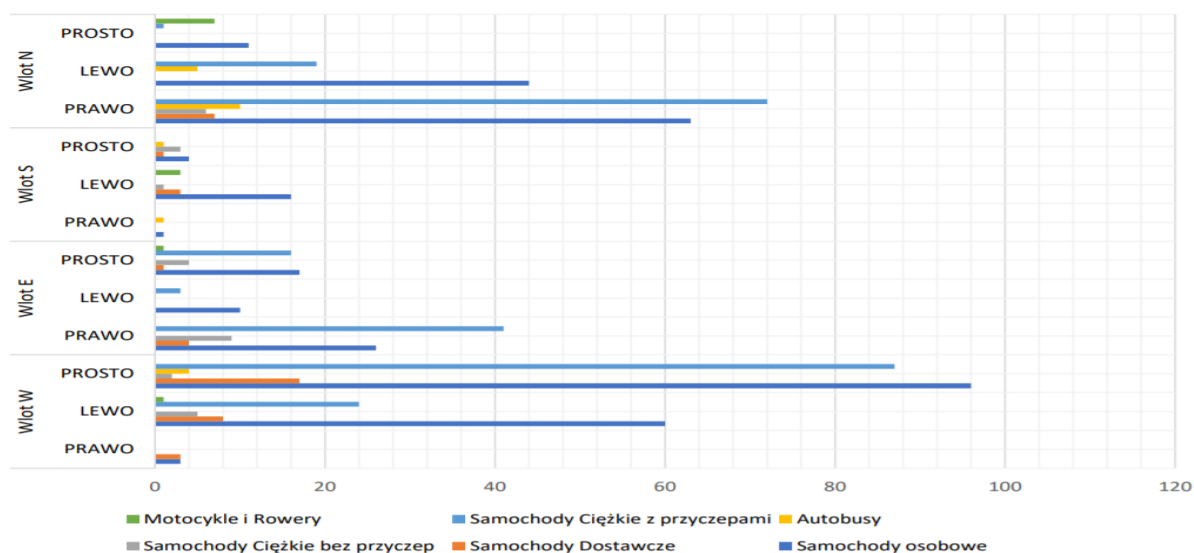
Dane pomiarowe wykorzystane do stworzenia modelu. Przykład skrzyżowania: Kwiatkowskiego - Kontenerowa znajdującego się поблизу Bałtyckiego Terminala Kontenerowego (BCT). (Rysunek 34)



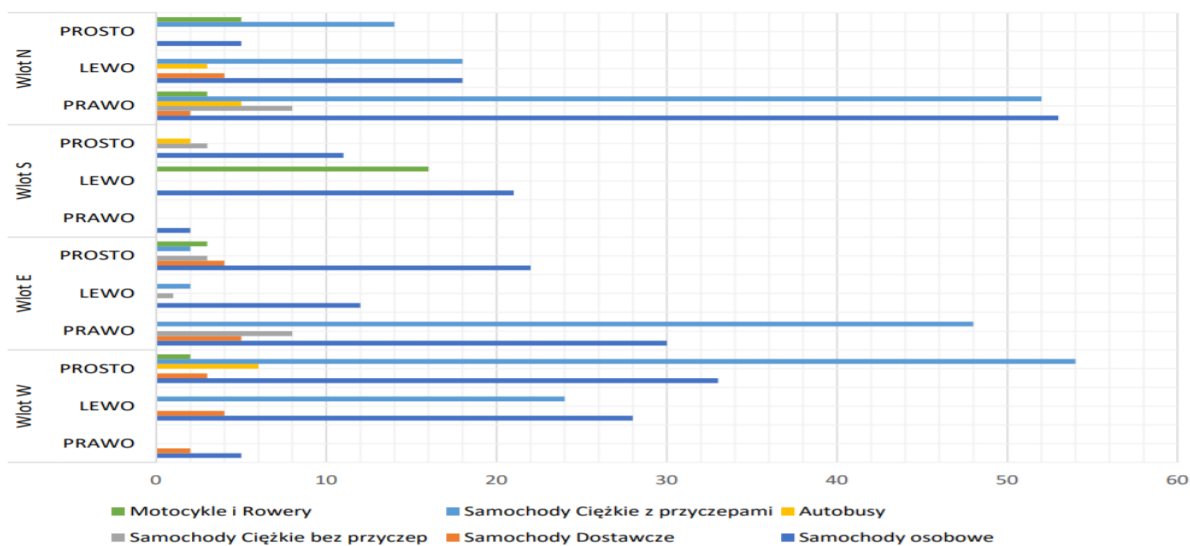
Rysunek 34 Skrzyżowanie Kwiatkowskiego – Kontenerowa [www.maps.google.com]

Skrzyżowanie, na którym dokonano pomiarów znajduje się przed wjazdem do Bałtyckiego Terminalu Kontenerowego w Gdyni. Przebiega przez nie ulica Kontenerowa wraz ze zjazdem z Estakady Eugeniusza Kwiatkowskiego. Skrzyżowanie składa się z czterech wlotów dalej zwanych (N, S, W, E) Wlot N znajduje się na północy pomiędzy stacją benzynową a parkingiem dla samochodów ciężarowych. Pozostałe wloty analogicznie zostały nazwane zgodnie z kierunkami świata. Ze względu na sąsiedztwo BCT, stacji paliw oraz połączeniu centrum miasta z dzielnicami północnymi, na skrzyżowaniu przeważa ruch samochodów ciężarowych oraz osobowych. Pomiary zostały wykonane w dwóch szczytach porannym i popołudniowym (o godzinie 07:20 – 8:20 i 16:00-17:00). Szczegółowe wyniki pomiarów

zostały przedstawione na wykresach jako Rysunek 35 dla szczytu porannego i Rysunek 36 dla szczytu popołudniowego.



Rysunek 35 Kwiatkowskiego - Kontenerowa pomiar - szczyt poranny 07:20 - 08:20, natężenie pojazdów na osi poziomej z rozróżnieniem struktury kierunkowej wlotu na osi pionowej [opracowanie własne]

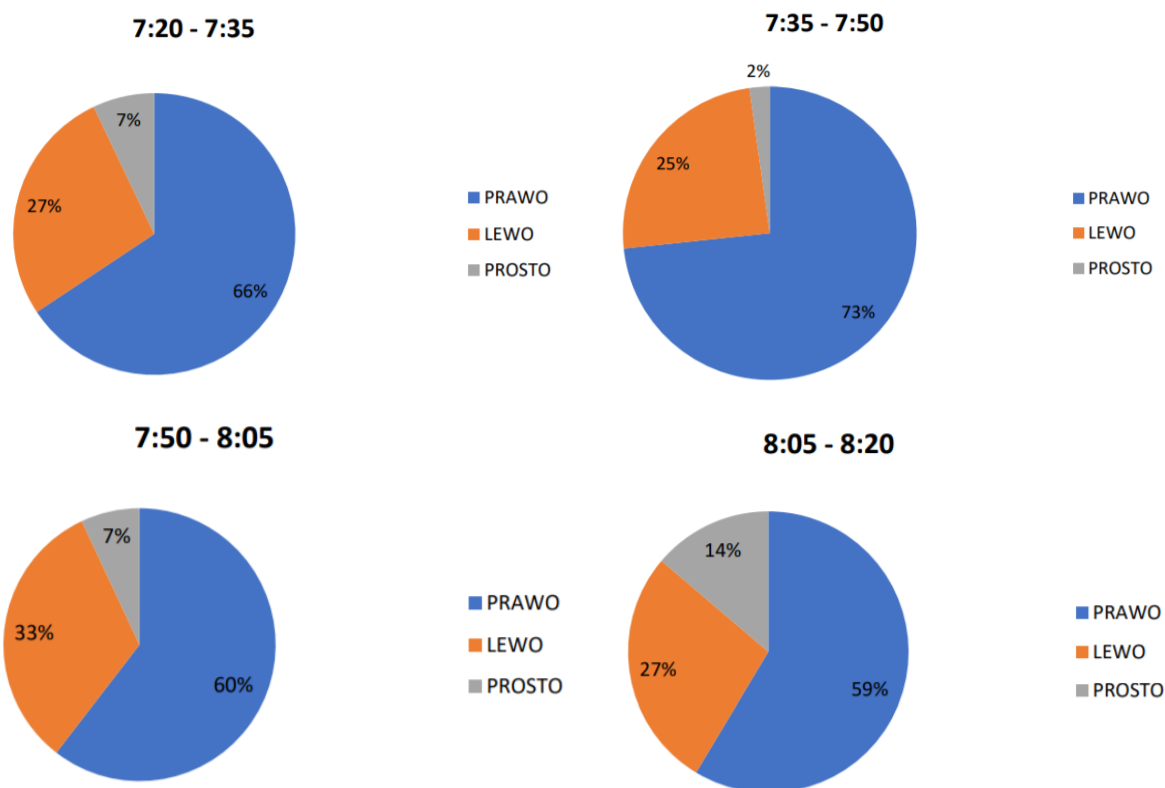


Rysunek 36 Kwiatkowskiego - Kontenerowa pomiar - szczyt popołudniowy 16:00 - 17:00, natężenie pojazdów na osi poziomej z rozróżnieniem struktury kierunkowej wlotu na osi pionowej [opracowanie własne]

Dla przeanalizowania atrakcyjności kierunków a także w celu wyeliminowania chwilowych trendów zachowań kierowców (takich jak opuszczanie miejsca pracy w tym samym czasie przez większość pracowników i generowanie natężeń na wlotach w konkretnej relacji

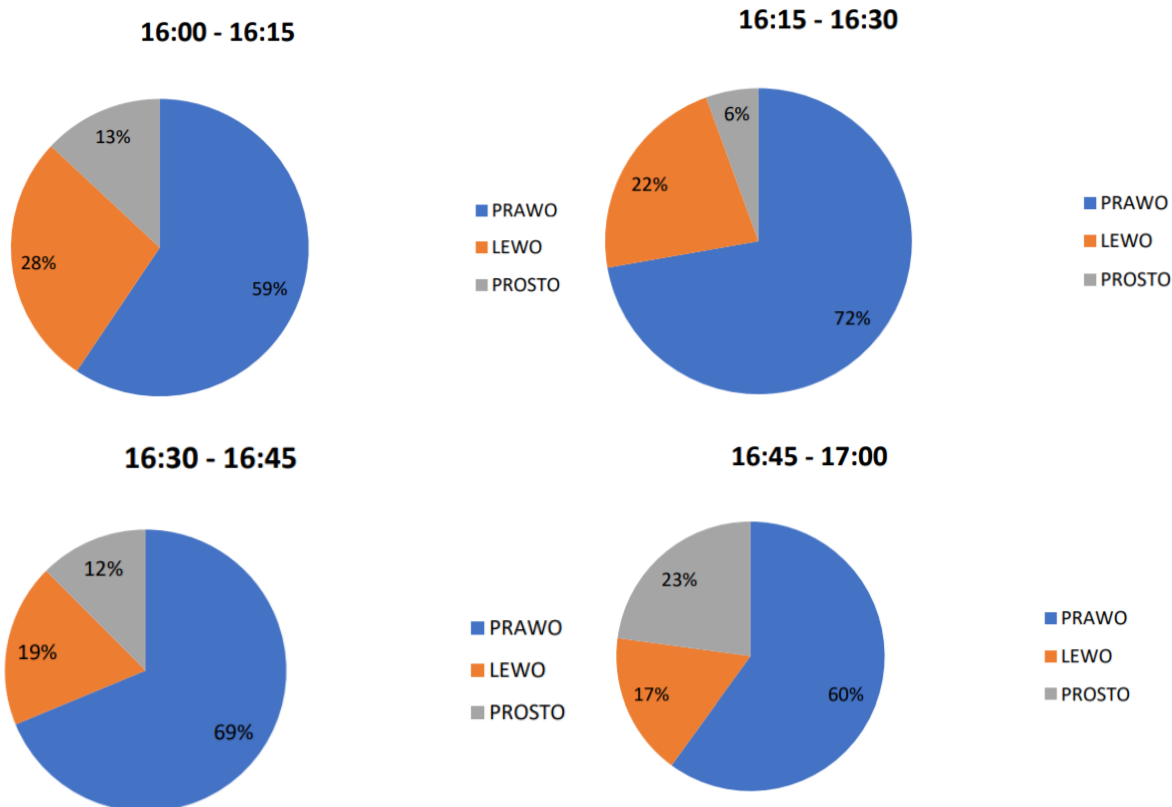
skrętnej) na każdym wlocie, pomiar godzinny został podzielony na cztery okresy, każdy po 15 minut.

Wlot N: podczas szczytu porannego największy udział na wlocie N ma relacja skrętna w prawo w całej godzinie około 64% pojazdów na wlocie N skręcało w prawo w kierunku stacji benzynowej. Następnie 28% pojazdów skręcało w lewo w kierunku BCT Gdynia a tylko 8% kierujących jechało na wprost. Interwały 15 minutowe zostały przedstawione na wykresach jako Rysunek 37.



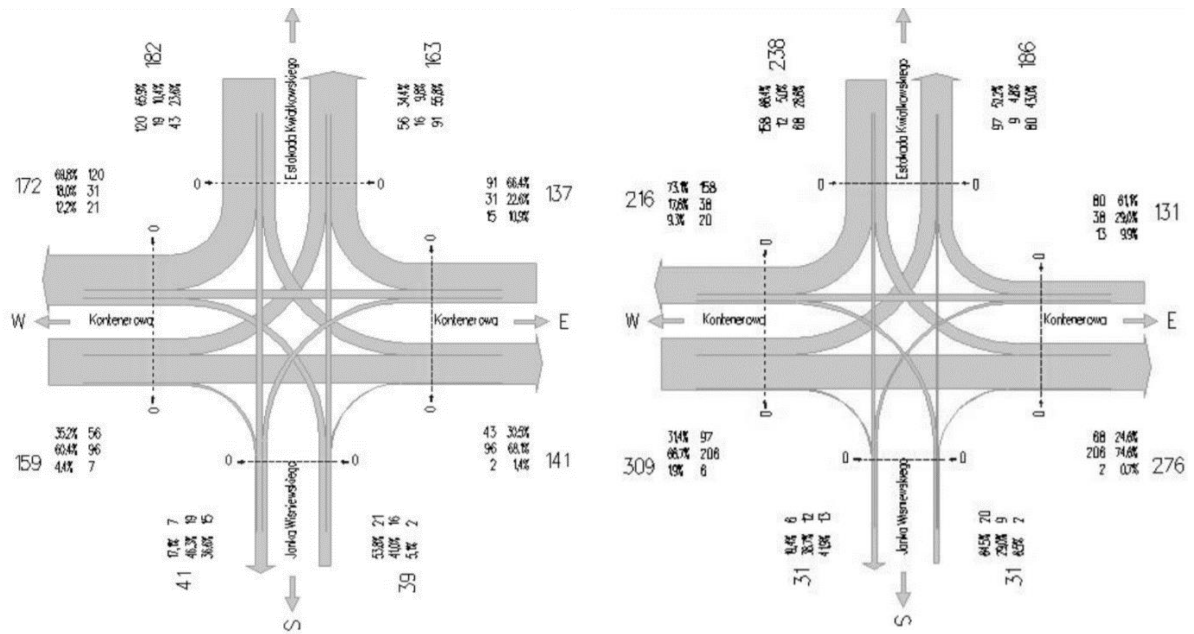
Rysunek 37 Natężenia w interwałach 15 minutowych - Skrzyżowanie Kwiatkowskiego - Kontenerowa szczyt poranny wlot N [opracowanie własne]

Podczas szczytu popołudniowego analogicznie jak podczas szczytu porannego największy udział miał również kierunek w prawo 65%, 22% pojazdów skręcało w lewo a w prawo 13%. Interwały 15 minutowe zostały przedstawione na wykresach jako



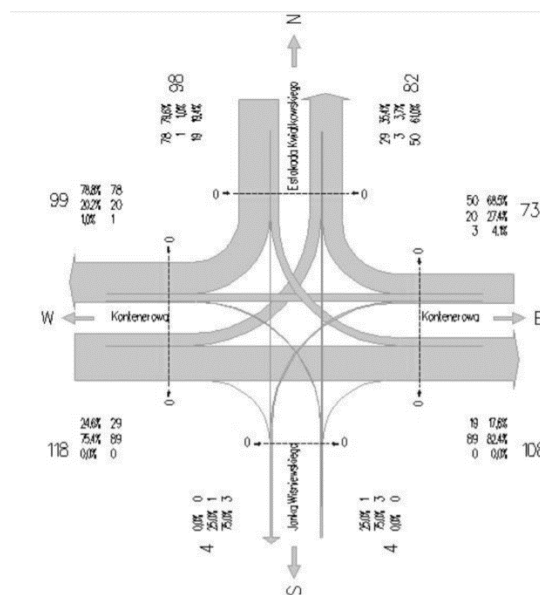
Rysunek 38 Natężenia w interwałach 15 minutowych - Skrzyżowanie Kwiatkowskiego - Kontenerowa szczyt popołudniowy wlot N [opracowanie własne]

Analogicznie zostały przeanalizowane pozostałe wloty. Szczegółowe dane analizy natężeń wynikających z pomiarów zostały przedstawione w Załącznik 6 - Dane wynikowe z modelu. Porównane zostały kartodiagramy przedstawiające natężenie ruchu na poszczególnych wlotach. Zauważono, bardzo porównywalne wyniki podczas obu szczytów w relacjach skrętnych na wlotach.



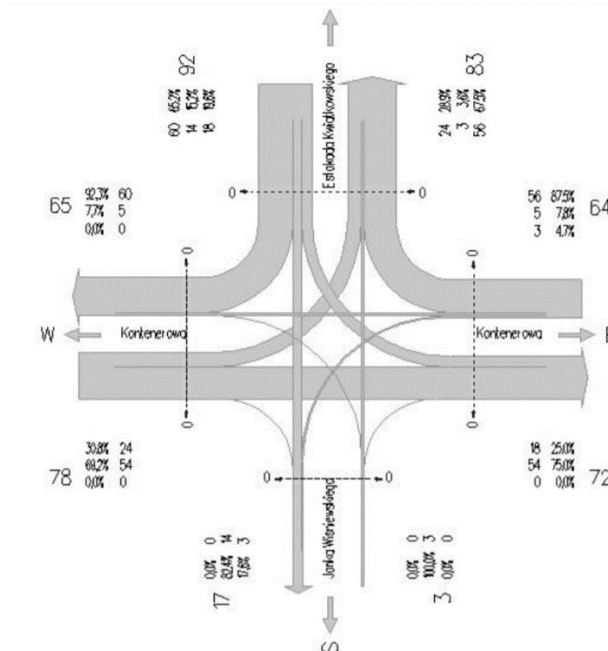
Rysunek 39 Kartodiagramy natężeń ruchu, skrzyżowanie Kwiatkowskiego – Kontenerowa szczyt poranny (prawy), szczyt popołudniowy (lewy) [opracowanie własne]

Analizując ruch pojazdów ciężarowych w obrębie skrzyżowania można zauważyć, że pojazdy ciężarowe głównie korzystają z trzech wlotów: N - 98 pojazdów, W - 118 pojazdów, E - 73 pojazdy. Kartodiagram przedstawia Rysunek 40.



Rysunek 40 Kartodiagram - szczyt poranny skrzyżowanie Kwiatkowskiego – Kontenerowa – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

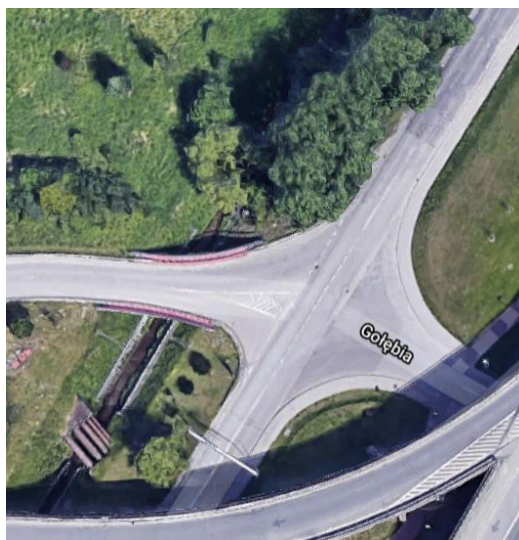
Analizując szczyt popołudniowy, najwięcej pojazdów ciężarowych przyjechało z kierunku północnego *N* – 92 pojazdy, Następnie z zachodniego *W* - 78 pojazdów a także 64 pojazdy z kierunku wschodniego *E*. Kartodiagram przedstawia Rysunek 41.



Rysunek 41 Kartodiagram - szczyt popołudniowy skrzyżowanie Kwiatkowskiego – Kontenerowa – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

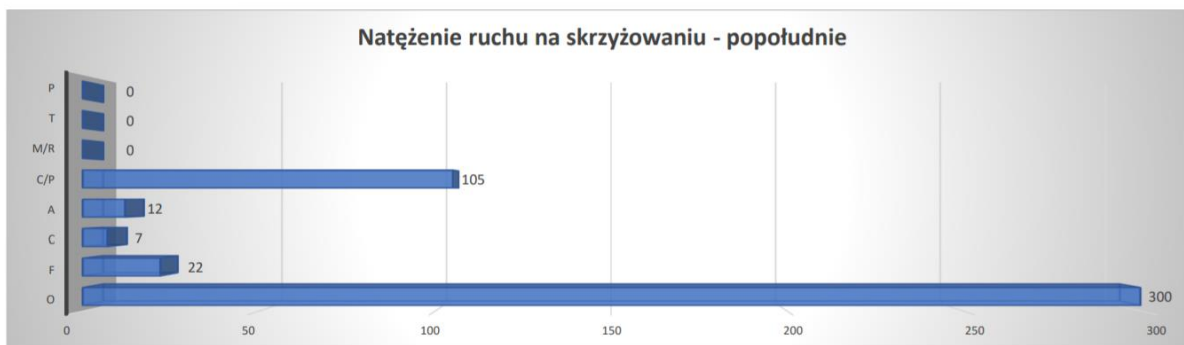
Analiza danych empirycznych - wnioski:

Skrzyżowanie Kwiatkowskiego - Gołębia (Rysunek 42). Ulica Gołębia prowadzi do Gdyńskiego Terminala Kontenerowego, a na ulicy logistycznej znajdują się liczne magazyny. Jezdnia na wlotach N, S, E składa się z 2 pasów ruchu – po jednym w każdym kierunku.



Rysunek 42 Skrzyżowanie Janka Wiśniewskiego - Gołębia [www.googlemaps.pl]

Na skrzyżowaniu ulicy Janka Wiśniewskiego z ulicą Gołębią między godziną 09:15, a 10:15 przejechało 187 pojazdów. Większość stanowiły samochody osobowe (71 pojazdów), lecz tylko o sześć sztuk więcej niż samochodów ciężarowych z naczepą. Szczegółowy podział klas pojazdów przedstawia Rysunek 43. W porze popołudniowej w godzinie 17:15 - 18:15 liczba pojazdów zwiększyła się do 446. Większość stanowią samochody osobowe (300 pojazdów), a ciężarowych przejechało 105. Wlot północny w obu porach był dominowany przez samochody osobowe kolejno 58% i 68%. Wlot od strony ulicy Wiśniewskiego z rana był wykorzystywany przez dużą liczbę samochodów ciężarowych z naczepą (23%) oraz furgonów (28%). W czasie szczytu popołudniowego przez *wlot S* przejechało aż 191 pojazdów osobowych stanowiących 72% natężenia ruchu. Spowodowane jest to powrotem dużej liczby mieszkańców dzielnic północnych Gdyni z powrotem do domu z pracy z centrum miasta. Wlot wschodni, jako że stanowi wjazd oraz wyjazd z Gdynińskiego Terminala Kontenerowego (GTC) w obu porach dnia został zdominowany przez samochody ciężarowe. Można zauważyć, że najczęściej kierowcy z *wlotu N* kierowali się w stronę centrum, a więc przejeżdżali przez skrzyżowanie nie skręcając. Kierowcy z *wlotu S* wybierali przejazd na wprost, kierowcy z wlotu wschodniego częściej wybierali skręt w lewo niż w prawo. Natężenia pojazdów ciężarowych pokazują, że ich celem jest GCT oraz magazyny na ulicy Logistycznej.



Rysunek 43 Rozróżnienie klas pojazdów na skrzyżowaniu Janka Wiśniewskiego – Gołębia, natężenie pojazdów z rozróżnieniem na kategorie: P- piesi, T-tramwaje, M/R – motocykle/ rowery, C/P- ciężarowe z przyczepą, A – autobusy, C – pojazdy ciężarowe, F – furgony, O - osobowe [opracowanie własne]

Programy sygnalizacji świetlnej wraz z harmonogramem pracy skrzyżowania zostały uzyskane od Zarządu Dróg i Zieleni w Gdyni, dane te zostały odwzorowane w modelu w sposób uproszczony. Z uwagi na to, iż w Gdyni działa sygnalizacja świetlna, która podlega pod sterowanie Inteligentnego Systemu Sterowania Ruchem, bez niezbędnych plików służących do odwzorowania sterowania akomodacyjnego *BALANCE* i *EPICS*[84],[94] nie jest możliwym odwzorowanie sygnalizacji zmiennej w czasie przypadającym na jeden przedział czasowy jakim jest cykl danego programu. Z uwagi na to sygnalizacja świetlna została uproszczona do programów stało czasowych ze zmiennym harmonogramem pracy.

W Gdyni pojazdy transportu zbiorowego wyposażone są w urządzenia umożliwiające zgłaszanie do sterownika sygnalizacji świetlnej żądań priorytetu z uwagi na brak danych odnośnie priorytetów żądania te nie zostały uwzględnione w modelu. W modelu przyjęto formę uproszczoną – pojazdy transportu zbiorowego poruszają się według rozkładu jazdy aktualnego na dzień 25.02.2020 dostępnego na stronie internetowej lokalnego zarządcy (www.zkm.gdynia.pl) Gdynia.

Modelowany jest okres czasowy od 05:00 do 21:00, w przedziale czasowym 05:00 – 06:00 ruch w sieci ma na celu wypełnienie sieci pojazdami w celu uniknięcia zaniżonych wyników pomiarowych z okresu szczytu porannego

- **Punkty pomiarowe**

W celu przeprowadzenia badań w modelu, umieszczone zostały punkty pomiarowe wykonujące obliczenia w okresie czasu od 08:00 do 19:00 w interwałach godzinnych.

Punkty te dotyczą:

- opóźnień w sieci;
- długości kolejek na wlotach;
- czasy podróży w sieci;
- czasy przejazdu tylko dla pojazdów ciężarowych.

Umieszczenie punktów pomiarowych w sieci:

- 1) Odcinek pomiarowy o długości 250 metrów umiejscowiony na Estakadzie Kwiatkowskiego w kierunku Obwodnicy Trójmiasta, umiejscowiony pomiędzy węzłami z ulicą Kontenerową i ulicą Hutniczą.
- 2) Odcinek pomiarowy o długości 250 metrów umiejscowiony na Estakadzie Kwiatkowskiego w kierunku dzielnicy Obłuże, umiejscowiony pomiędzy węzłami z ulicą Hutniczą i ulicą Kontenerową.
- 3) Odcinek pomiarowy o długości 700 metrów umiejscowiony na Estakadzie Kwiatkowskiego w kierunku Obwodnicy Trójmiasta, umiejscowiony pomiędzy węzłami z ulicą Janka Wiśniewskiego i ulicą Morską.
- 4) Odcinek pomiarowy o długości 700 metrów umiejscowiony na Estakadzie Kwiatkowskiego w kierunku dzielnicy Obłuże, umiejscowiony pomiędzy węzłami z ulicą Morską i ulicą Janka Wiśniewskiego.
- 5) Odcinek pomiarowy o długości 500 metrów umiejscowiony na ulicy Janka Wiśniewskiego w kierunku Centrum Gdyni.

- 6) Odcinek pomiarowy o długości 500 metrów umiejscowiony na ulicy Janka Wiśniewskiego w kierunku ulicy Energetyków.
- 7) Licznik kolejek pojazdów na wlocie północnym skrzyżowania ulic Janka Wiśniewskiego i łącznicy Estakady Kwiatkowskiego.
- 8) Licznik kolejek pojazdów na wlocie zachodnim skrzyżowania ulic Janka Wiśniewskiego i łącznicy Estakady Kwiatkowskiego.
- 9) Licznik kolejek pojazdów na wlocie wschodnim skrzyżowania ulic Janka Wiśniewskiego i łącznicy Estakady Kwiatkowskiego.

- **Model zmodyfikowany**

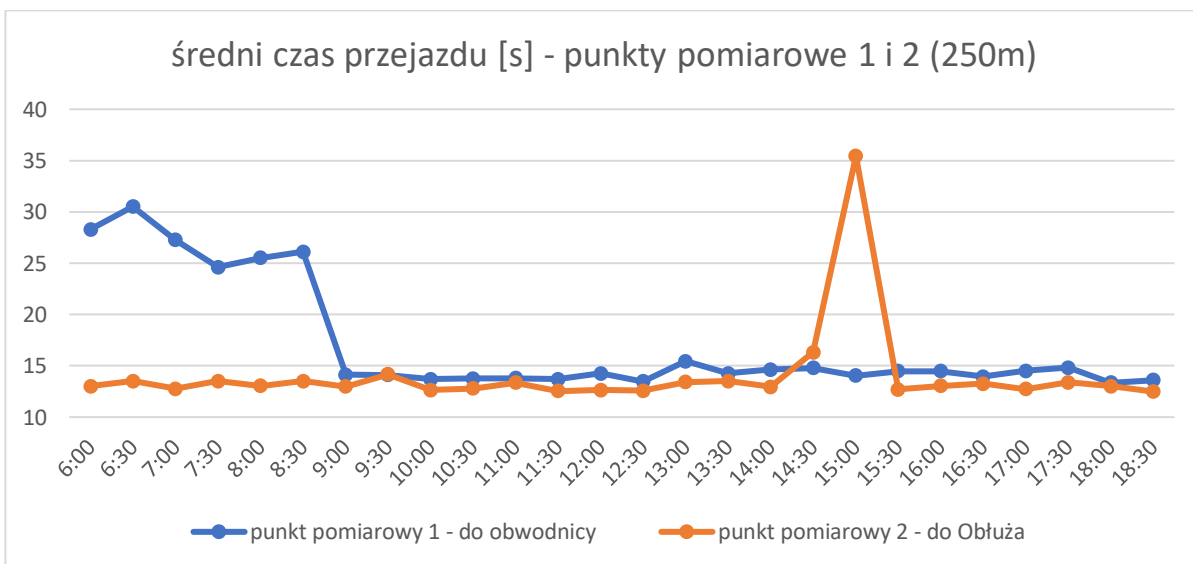
W celu wykonania analizy wpływu pojazdów ciężarowych generowanych przez port morski wprowadzono modyfikacje do modelu odwzorowującego stan istniejący. Do modelu zostały wprowadzone dane odnośnie natężeń pojazdów ciężarowych bez zmiany natężeń pozostałych typów pojazdów występujących w sieci. Zmiany te następowały o 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 100%. Zwiększone natężenia rozlokowano na drogach prowadzących bezpośrednio do terminali kontenerowych a także z dróg w sąsiedztwie terminali masowych przy Alei Solidarności i ulicy Polskiej. Następnie wykonano pomiary w dokładnie tych samych punktach pomiarowych i porównano wyniki.

- **Wyniki dla modelu odwzorowującego bieżący stan - stan istniejący**

Za pomocą narzędzia PTV Vissim po wprowadzeniu danych rzeczywistych i wykonaniu mikro-symulacji w przedziale czasowym 05:00 – 21:00, jednakże okres pomiarowy do wyników sięga zakresu od 06:00 do 19:00 z uwagi na konieczność napełnienia sieci pojazdami symulacja zaczyna się o godzinie 05:00 a kończy o 21:00, otrzymano wyniki:

A. Punkty pomiarowe 1 i 2 zlokalizowane na Estakadzie Kwiatkowskiego na odcinku międzywęzłowym pomiędzy węzłami Hutnicza i Kontenerowa, oba odcinki są długości 250 metrów. Odcinki pomiarowe zlokalizowane są w dwóch kierunkach 1 - w kierunku do Obwodnicy Trójmiasta, 2 – w kierunku do Obłuża (dzielnica miasta Gdynia

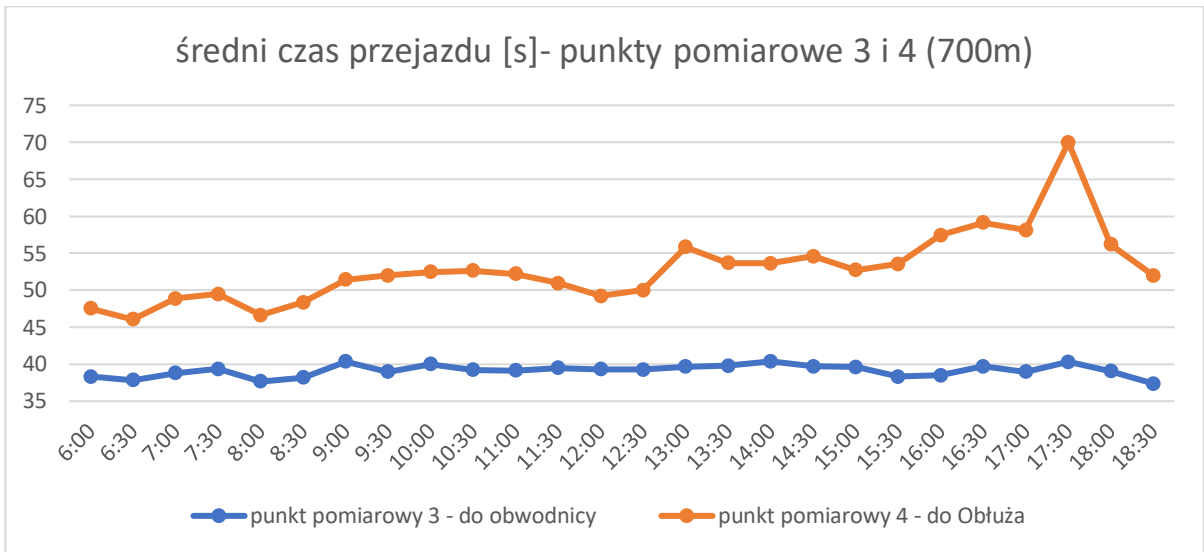
zlokalizowana na północy). Punkty pomiarowe zlokalizowane są na newralgicznym odcinku Estakady Kwiatkowskiego z uwagi na sąsiedztwo dróg dojazdowych do dwóch terminali kontenerowych. Wyniki przedstawione zostały w 30 minutowych interwałach czasowych. Dane wynikowe z modelu dla punktów pomiarowych 1 i 2 przedstawia wykres jako Rysunek 44, wykres ten obrazuje czas przejazdu wyrażony w sekundach przez 250 metrowy odcinek pomiarowy. Wyniki symulacji wskazują, że kierunek do Estakady Kwiatkowskiego w czasie trwania szczytu porannego (od 06:00 do 9:00) czas przejazdu wzrasta i występuje w granicach od 25 do 30 sekund. W pozostałych godzinach czas przejazdu oscyluje w granicach 15 sekund. Punkt pomiarowy 2 zlokalizowany w kierunku do dzielnicy miasta Gdynia – Obłuże wykazuje wydłużony czas przejazdu w okresie szczytu porannego. Od godziny 15:00 do 15:30 średni czas przejazdu wynosi 35 sekund.



Rysunek 44 Punkty Pomiarowe 1 i 2, Estakada Kwiatkowskiego – średni czas przejazdu wyrażony w sekundach na osi pionowej, półgodzinne interwały czasowe w cyklu pomiarowym na osi poziomej [opracowanie własne]

B. Punkty pomiarowe 3 i 4 zlokalizowane na Estakadzie Kwiatkowskiego na odcinku międzywęzłowym pomiędzy węzłami Morska i Janka Wiśniewskiego, oba odcinki są długości 700 metrów. Odcinki pomiarowe zlokalizowane są w dwóch kierunkach 3 - w kierunku do Obwodnicy Trójmiasta, 4 – w kierunku do Obłuża (dzielnica miasta Gdynia zlokalizowana na północy). Wyniki przedstawione zostały w 30 minutowych interwałach czasowych. Dane wynikowe z modelu dla punktów pomiarowych 3 i 4

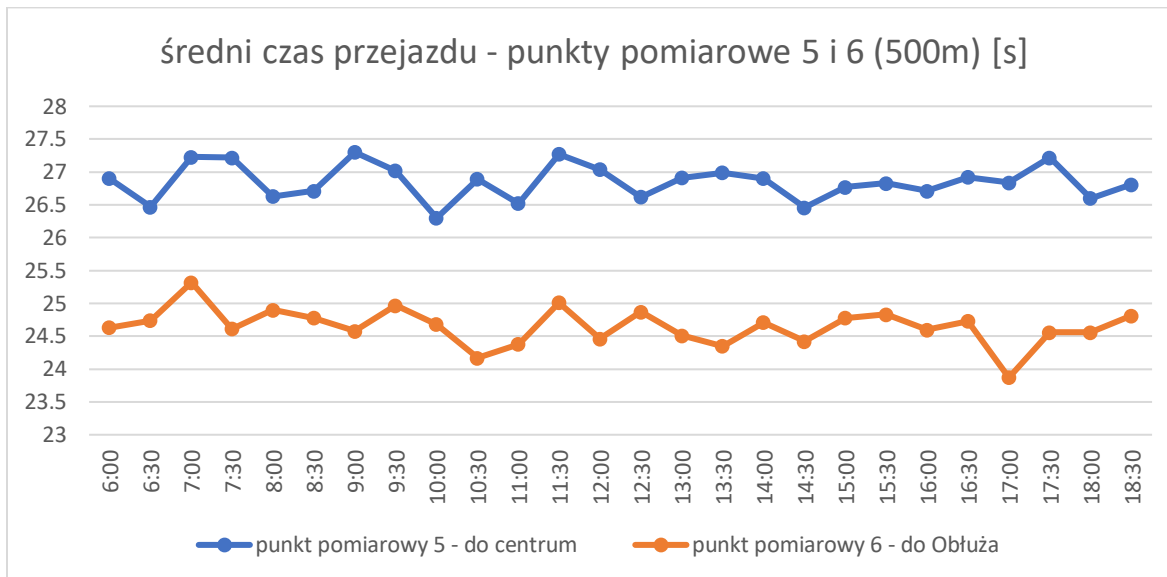
przedstawia wykres na Rysunek 45, wykres ten obrazuje czas przejazdu wyrażony w sekundach przez 700 metrowy odcinek pomiarowy. Z wyników symulacyjnych wynika, iż kierunek do Obwodnicy Trójmiasta jest obciążony równomiernie a czas przejazdu oscyluje 40 sekund. Przez punkt pomiarowy 4 w kierunku dzielnicy Obłęża czas przejazdu przez odcinek pomiarowy wydłuża się w godzinach popołudniowych, od godziny 13:00 czas ten wynosi już ponad 55 sekund a maksimum przyjmuje w przedziale czasowym 17:30 -18:00 – 70 sekund.



Rysunek 45 Punkty Pomiarowe 3 i 4, Estakada Kwiatkowskiego – średni czas przejazdu wyrażony w sekundach na osi pionowej, półgodzinne interwały czasowe w cyklu pomiarowym na osi poziomej [opracowanie własne]

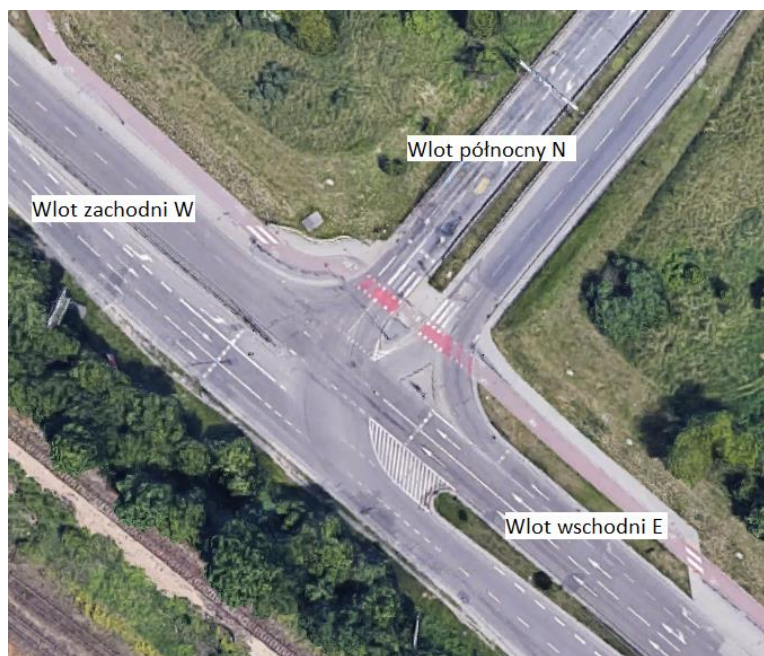
C. Punkt pomiarowy 5 i 6 zlokalizowane na ulicy Janka Wiśniewskiego na prostych odcinkach dwupasowych, oba odcinki są długości 500 metrów. Odcinki pomiarowe zlokalizowane są w dwóch kierunkach 5 - w kierunku do centrum miasta Gdynia, 6 – w kierunku do Obłęża (dzielnica miasta Gdynia zlokalizowana na północy). Wyniki przedstawione zostały w 30 minutowych interwałach czasowych. Dane wynikowe z modelu dla punktów pomiarowych 5 i 6 przedstawia wykres (Rysunek 46). Z danych wynika, iż średni czas przejazdu przez odcinki pomiarowe zlokalizowane na ulicy Janka Wiśniewskiego oscyluje w granicach od 24 do 27,5 sekundy i nie jest on zależny od szczytów komunikacyjnych. Odcinki pomiarowe zlokalizowane są w dalekiej odległości od najbliższych skrzyżowań zatem nie wpływają negatywnie na nie straty czasu związane

z oczekiwaniem na zielone światło na wlocie skrzyżowania. Czas przejazdu na odcinkach pomiarowych 5 i 6 zależny jest od natężenia pojazdów.



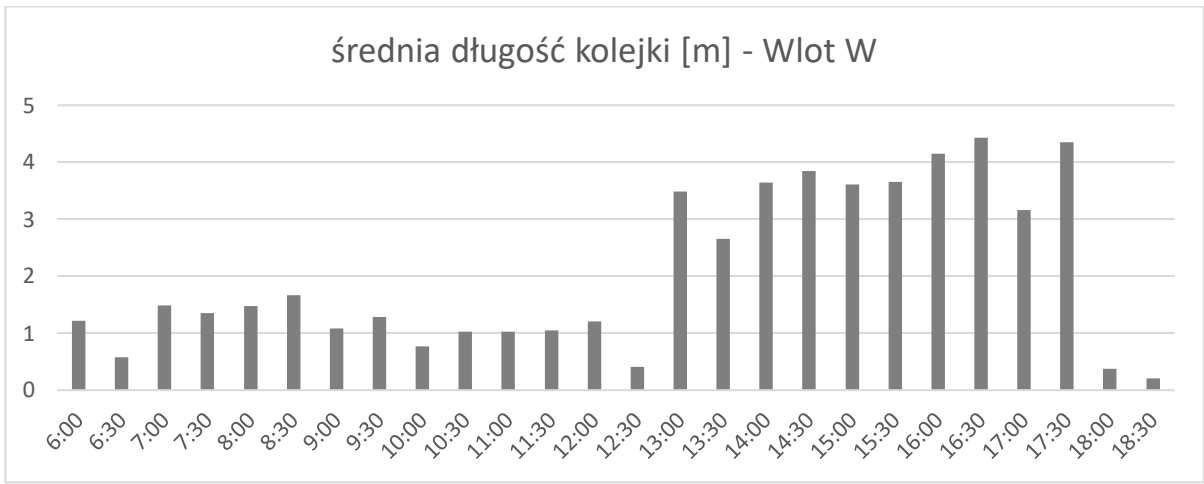
Rysunek 46 Pomiarowe 5 i 6, Janka Wiśniewskiego – średni czas przejazdu wyrażony w sekundach na osi pionowej, półgodzinne interwały czasowe w cyklu pomiarowym na osi poziomej [opracowanie własne]

Lokalizacje punktów pomiarowych służących do zliczania kolejek na wlotach skrzyżowania przedstawia Rysunek 47.



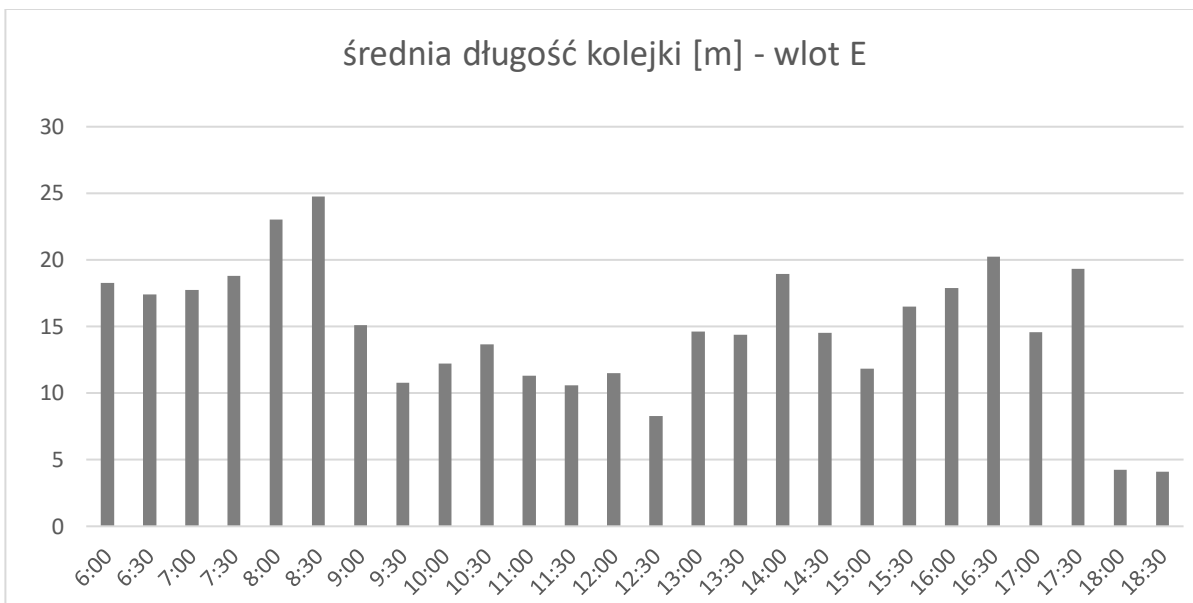
Rysunek 47 Skrzyżowanie Janka Wiśniewskiego - Estakada Kwiatkowskiego [www.maps.google.com]

D. Punkt pomiarowy długości kolejek na wlocie zachodnim *W* skrzyżowania Janka Wiśniewskiego – Estakada Kwiatkowskiego. Na wlocie w każdym interwale czasowym trwającym 30 minut, narzędzie PTV Vissim podczas trwania symulacji wyliczyło średnią długość kolejki pojazdów na wlocie liczoną w metrach. Dane wynikowe wskazują na to, iż najdłuższa kolejka występuje w trakcie trwania szczytu popołudniowego od 14:00 do 18:00 – najdłuższą kolejkę wykazał pomiar o 16:30 do 17:00 ponad 4 metry. Wyniki przedstawia Rysunek 48.



Rysunek 48 Wlot zachodni *W* – średnia długość kolejki na wlocie [m] na osi pionowej, półgodzinne interwały czasowe na osi poziomej – stan istniejący [opracowanie własne]

E. Punkt pomiarowy długości kolejek na wlocie wschodnim *E* skrzyżowania Janka Wiśniewskiego – Estakada Kwiatkowskiego. Na wlocie w każdym interwale czasowym trwającym 30 minut, narzędzie PTV Vissim podczas trwania symulacji wyliczyło kolejkę średnią pojazdów na wlocie liczoną w metrach. Dane wynikowe wskazują na to, iż najdłuższa kolejka występuje w trakcie trwania szczytu porannego od 08:30 do 09:00 – około 25 metrów. Również w czasie trwania szczytu popołudniowego w godzinach 16:00-17:00 kolejka pojazdów wynosi ponad 300 metrów. Wyniki zostały przedstawione na Rysunek 49.



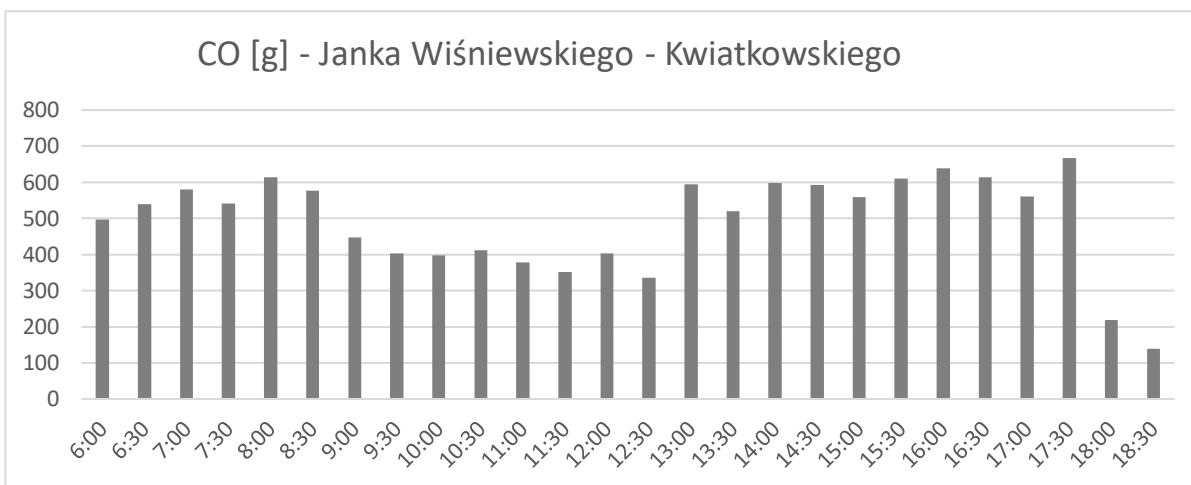
Rysunek 49 Wlot wschodni E – średnia długość kolejki na wlocie[m] na osi pionowej, półgodzinne interwały czasowe na osi poziomej – stan istniejący [opracowanie własne]

F. Punkt pomiarowy długości kolejek na wlocie N skrzyżowania Janka Wiśniewskiego - Estakada Kwiatkowskiego. Na wlocie w każdym interwale czasowym trwającym 30 minut, narzędzie PTV Vissim podczas trwania symulacji wyliczyło kolejkę średnią pojazdów na wlocie liczoną w metrach. Dane wynikowe wskazują na to, iż najdłuższa kolejka występuje w trakcie trwania szczytu popołudniowego od 13:00 do 18:00 – około 9 metrów w momencie osiągnięcia maksimum. Wyniki przedstawia Rysunek 50.



Rysunek 50 Wlot północny N – średnia długość kolejki na wlocie[m] na osi pionowej, półgodzinne interwały czasowe na osi poziomej – stan istniejący [opracowanie własne]

G. W modelu przeprowadzono analizę średniej ilości tlenu węgla emitowanego do atmosfery przez pojazdy w sieci. Zostały wyodrębnione dwa węzły (skrzyżowania) na których dokonano pomiaru. Skrzyżowanie Janka Wiśniewskiego z Estakadą Kwiatkowskiego średnio emituje więcej gramów tlenu węgla w trakcie trwania szczytu popołudniowego maksymalnie ponad 650 gramów w trakcie półgodzinnego okresu pomiarowego od 17:30 do 18:00. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 51.



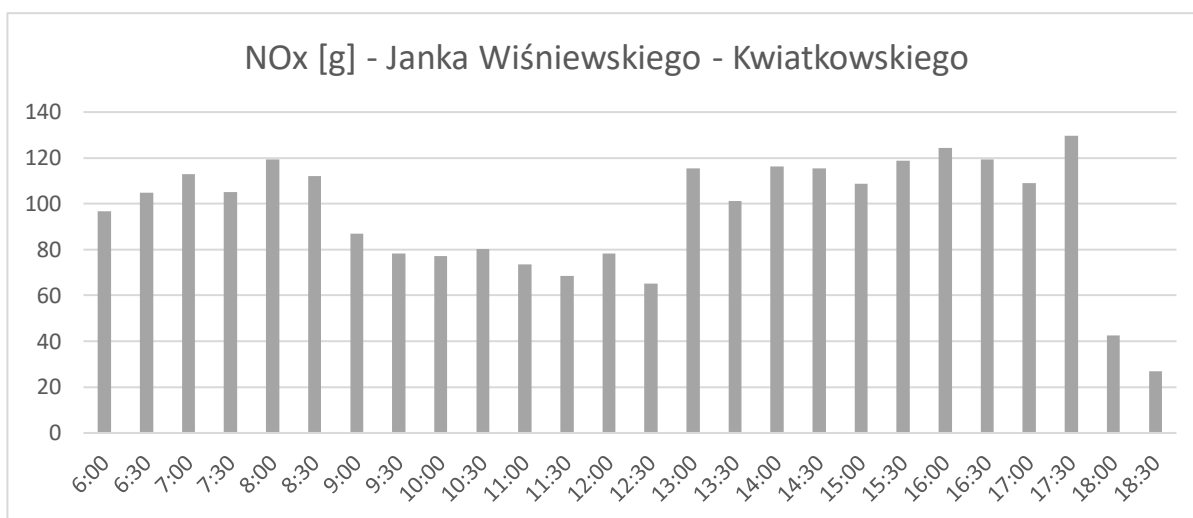
Rysunek 51 Średnia ilość tlenu węgla [g] – stan istniejący Janka Wiśniewskiego – Estakada Kwiatkowskiego [opracowanie własne]

Skrzyżowanie Morska i Estakada Kwiatkowskiego średnio emituje więcej gramów tlenu węgla w trakcie trwania szczytu porannego maksymalnie ponad 5000 gramów w trakcie półgodzinnego okresu pomiarowego od 06:30 do 07:00. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 52.



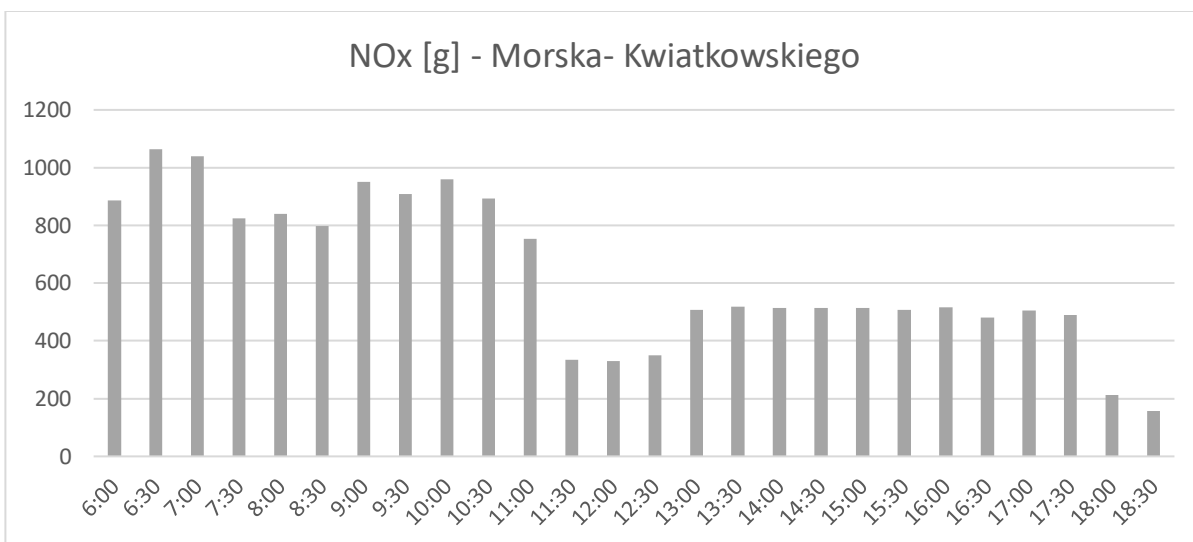
Rysunek 52 Średnia ilość tlenu węgla [g] – stan istniejący Morska – Estakada Kwiatkowskiego [opracowanie własne]

H. W modelu przeprowadzono analizę średniej ilości tlenków azotu powstającego w wyniku spalania paliwa w silniku samochodowym. Skrzyżowanie Janka Wiśniewskiego i Estakada Kwiatkowskiego średnio emituje więcej gramów tlenków azotu w trakcie trwania szczytu popołudniowego maksymalnie około 130 gramów w trakcie półgodzinnego okresu pomiarowego od 17:30 do 18:00. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 53.



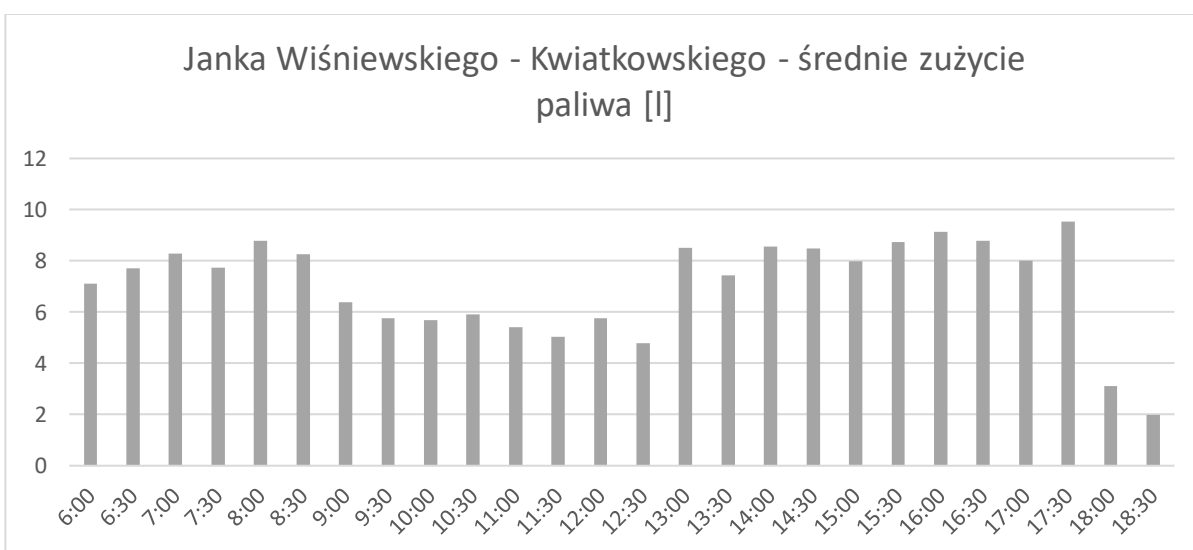
Rysunek 53 Średnia ilość tlenków azotu [g] – stan istniejący – Janka Wiśniewskiego – Estakada Kwiatkowskiego [opracowanie własne]

Skrzyżowanie Morska i Estakada Kwiatkowskiego średnio emituje więcej gramów tlenków azotu w trakcie trwania szczytu popołudniowego maksymalnie ponad 1000 gramów w trakcie godzinowego okresu pomiarowego od 06:30 do 07:30. Graficzny obraz wyników przedstaw Rysunek 54.



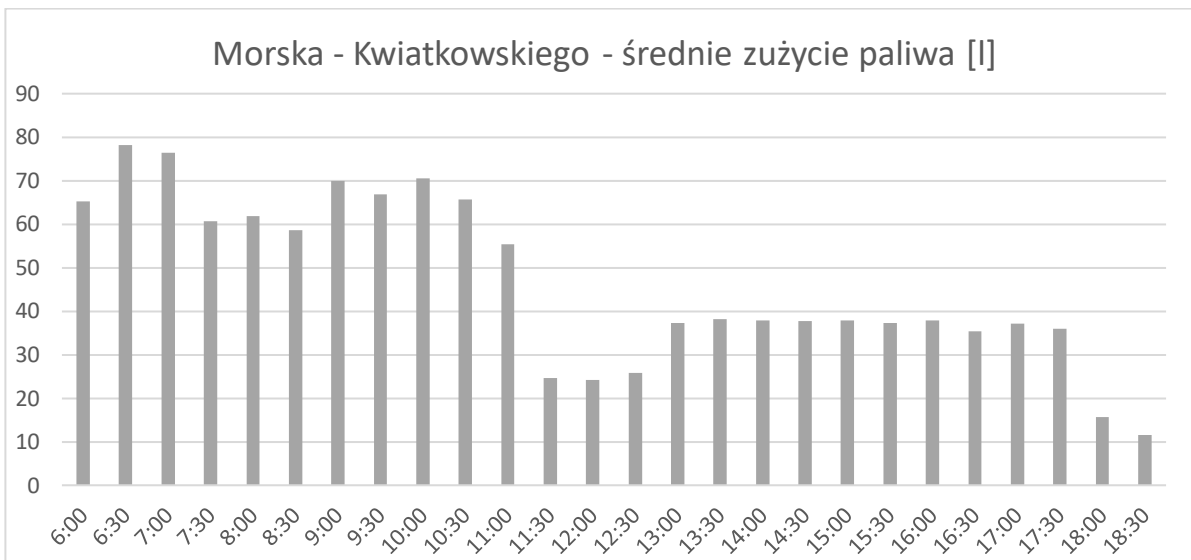
Rysunek 54 Średnia ilość tlenków azotu [g] – stan istniejący – Morska – Estakada Kwiatkowskiego [opracowanie własne]

I. W modelu przeprowadzono analizę średniej ilości zużywanego paliwa przez wszystkie pojazdy poruszające się w modelowanym odcinku sieci. Analogicznie jak w przypadku tlenku węgla zostały te same dwa węzły (skrzyżowania) na których dokonano pomiaru. Pomiar został dokonany w interwałach 30 minutowych od godziny 07:00 do godziny 19:00, Na skrzyżowaniu Janka Wiśniewskiego – Estakada Kwiatkowskiego średnio więcej zużywanego jest paliwa podczas trwania szczytu popołudniowego. Maksymalnie pomiar wykazał ponad 9 litrów. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 55.



Rysunek 55 Średnie zużycie paliwa wyrażone w litrach na półgodzinny interwał czasowy – stan istniejący – Janka Wiśniewskiego – Estakada Kwiatkowskiego [opracowanie własne]

Na skrzyżowaniu Morska – Estakada Kwiatkowskiego średnio więcej zużywanego jest paliwa podczas trwania szczytu porannego. Maksymalnie pomiar wykazał ponad 75 litrów. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 55.



Rysunek 56 Średnie zużycie paliwa wyrażone w litrach na półgodzinny interwał – stan istniejący – Morska – Estakada Kwiatkowskiego

J. W modelu przeprowadzono analizę liczby pojazdów w sieci. Analogicznie jak w poprzednich przypadkach analizie poddane zostały te same dwa węzły (skrzyżowania) na których dokonano pomiaru. Pomiar został dokonany w interwałach 30 minutowych od godziny 07:00 do godziny 19:00. Na skrzyżowaniu Janka Wiśniewskiego – Estakada Kwiatkowskiego najczęściej pojazdów porusza się w godzinach szczytu popołudniowego. Maksymalna wartość wyniosła w przedziale czasowym 17:30-18:00 – około 750 pojazdów. Dodatkowo na wykresie została wyszczególniona liczba pojazdów ciężarowych. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 57.



Rysunek 57 Natężenie pojazdów na półgodzinny interwał czasowy- stan istniejący Janka Wiśniewskiego – Estakada Kwiatkowskiego [opracowanie własne]

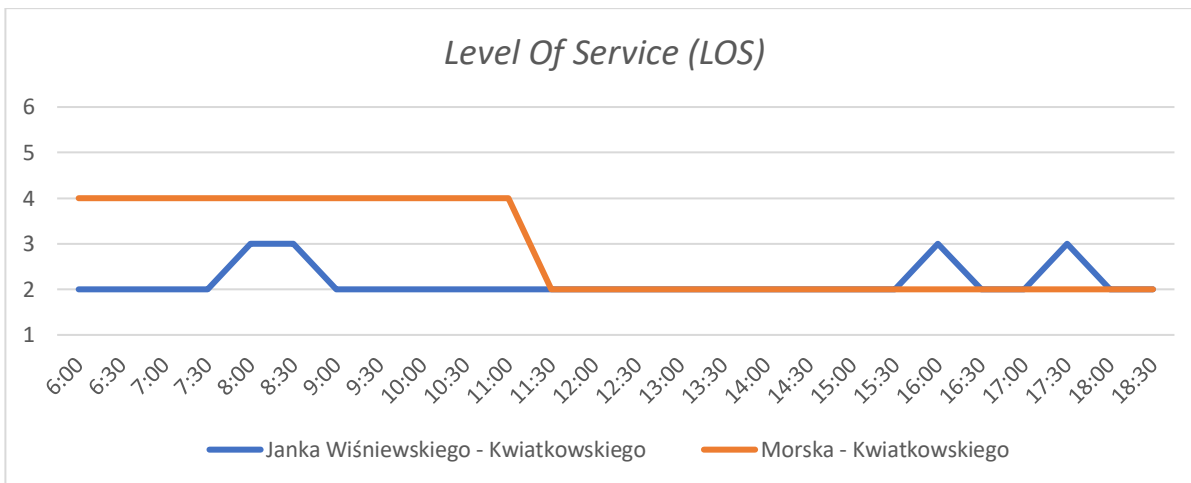
Na skrzyżowaniu Morska – Estakada Kwiatkowskiego najczęściej pojazdów porusza się w godzinach szczytu porannego. Maksymalna wartość wyniosła w przedziale czasowym 6:30-7:00 – ponad 2500 pojazdów. Dodatkowo na wykresie została wyszczególniona liczba pojazdów ciężarowych. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 57.



Rysunek 58 Natężenie pojazdów na półgodzinny interwał czasowy - stan istniejący Morska – Estakada Kwiatkowskiego [opracowanie własne]

K. W modelu przeprowadzono analizę LOS – (ang. *Level of Service* - poziom obsługi). LOS jest miarą jakościową wykorzystywaną w inżynierii ruchu do powiązania jakości obsługi ruchu samochodowego i analizowania dróg i skrzyżowań poprzez kategoryzację przepływu ruchu i przypisywanie poziomów jakości ruchu na podstawie miar wydajności takich jak: prędkość pojazdu, gęstość i natężenie. Miara LOS występuje w sześciu

poziomach zazwyczaj określana jest literami alfabetu od A do F (A – najlepszy poziom obsługi, F 0 najgorszy poziom obsługi). Dla możliwości pokazania danych na wykresie przyjęto odwzorowanie poziomów od A do F na sposób liczbowy od 1 do 6, przy czym 1 jest najlepszą możliwą oceną a 6 najgorszą. Analogicznie jak w poprzednich przypadkach analizie poddane zostały te same dwa węzły (skrzyżowania) na których dokonano pomiaru. Pomiar został dokonany w interwałach 30 minutowych od godziny 07:00 do godziny 19:00. Na skrzyżowaniu Janka Wiśniewskiego - Estakada Kwiatkowskiego można zauważyć lepszy poziom obsługi niż na skrzyżowaniu Morska - Kwiatkowskiego, na którym w trakcie trwania szczytu porannego od godziny 06:00 do 11:30 poziom obsługi jest na poziomie 4 (D) a w pozostałym okresie czasowym na poziomie 2 (B). Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 57.



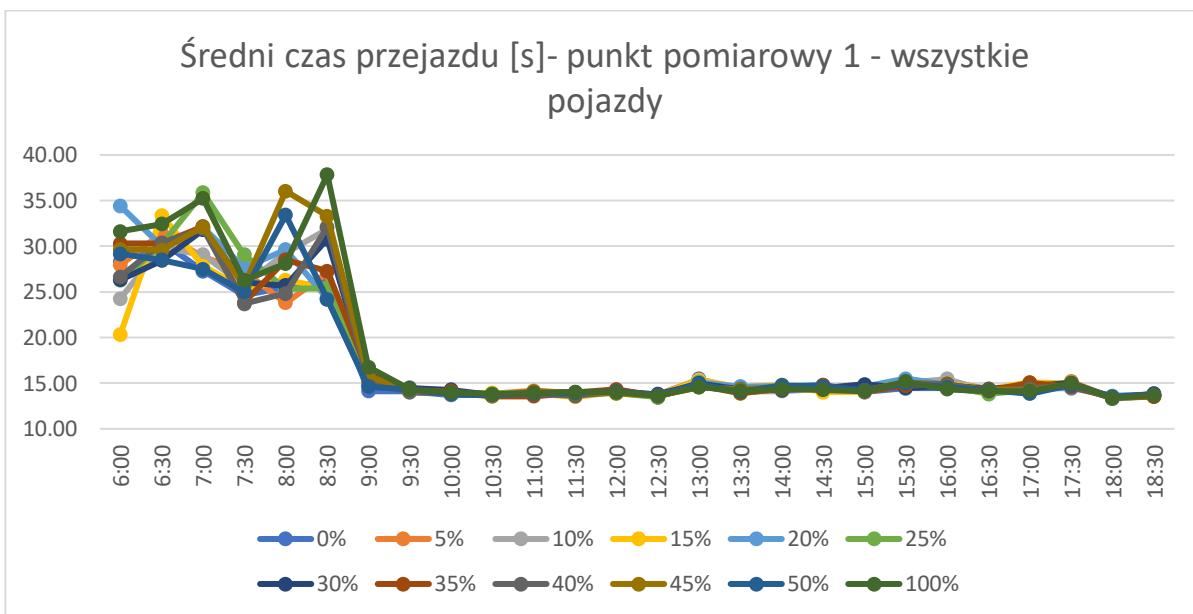
Rysunek 59 Level of Service na półgodzinny interwał czasowy -stan istniejący [opracowanie własne]

- **Analiza porównawcza**

W celu przeanalizowania wpływu zwiększonych przeładunków morskich w portach w modelu wprowadzono skokowe zmiany natężeń pojazdów ciężarowych generujących przez port. Zostały dodane trzy punkty generujące pojazdy ciężarowe, umiejscowione: wyjazd z terminala BCT, wyjazd z terminala GCT, sumaryczny wyjazd z terminali masowych przy Alei Solidarności. W tych miejscach natężenie pojazdów ciężarowych zostało o: 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% 40%, 45%, 50%, 100% w ujęciu dobowym a następnie

przeprowadzono analogiczną do analizy stanu istniejącego analizę wariantów. Wyniki szczegółowe zostały zamieszczone w Załącznik 6 - Dane wynikowe z modelu.

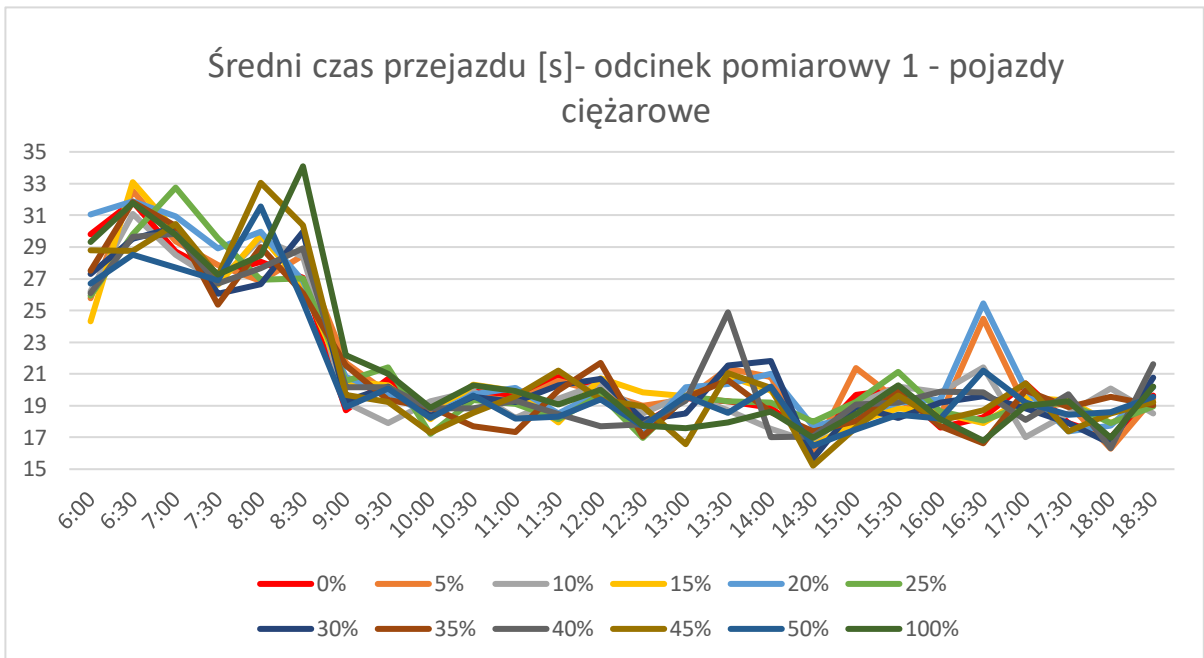
L. Punkt pomiarowy 1 umieszczony na Estakadzie Kwiatkowskiego na odcinku międzywęzłowym pomiędzy węzłami Hutnicza i Kontenerowa, odcinek o długości 250 metrów. Odcinek w kierunku do Obwodnicy Trójmiasta. Największe odchylenia w czasie przejazdu występują w trakcie trwania szczytu porannego. Największe różnice w czasie przejazdu w których występuje wydłużenie podróży występuje w przypadku 25% zwiększenia liczby pojazdów ciężarowych generowanych przez port – w godzinach 07:00-07:30. W przedziale czasowym 08:00 - 08:30 w przypadku zwiększenia pojazdów ciężarowych o 45 procent czas podróży wydłuży się do ponad 35 sekund. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 60.



Rysunek 60 Odcinek pomiarowy 1 – średni czas przejazdu [s] na półgodzinny interwał czasowy - analiza porównawcza [opracowanie własne]

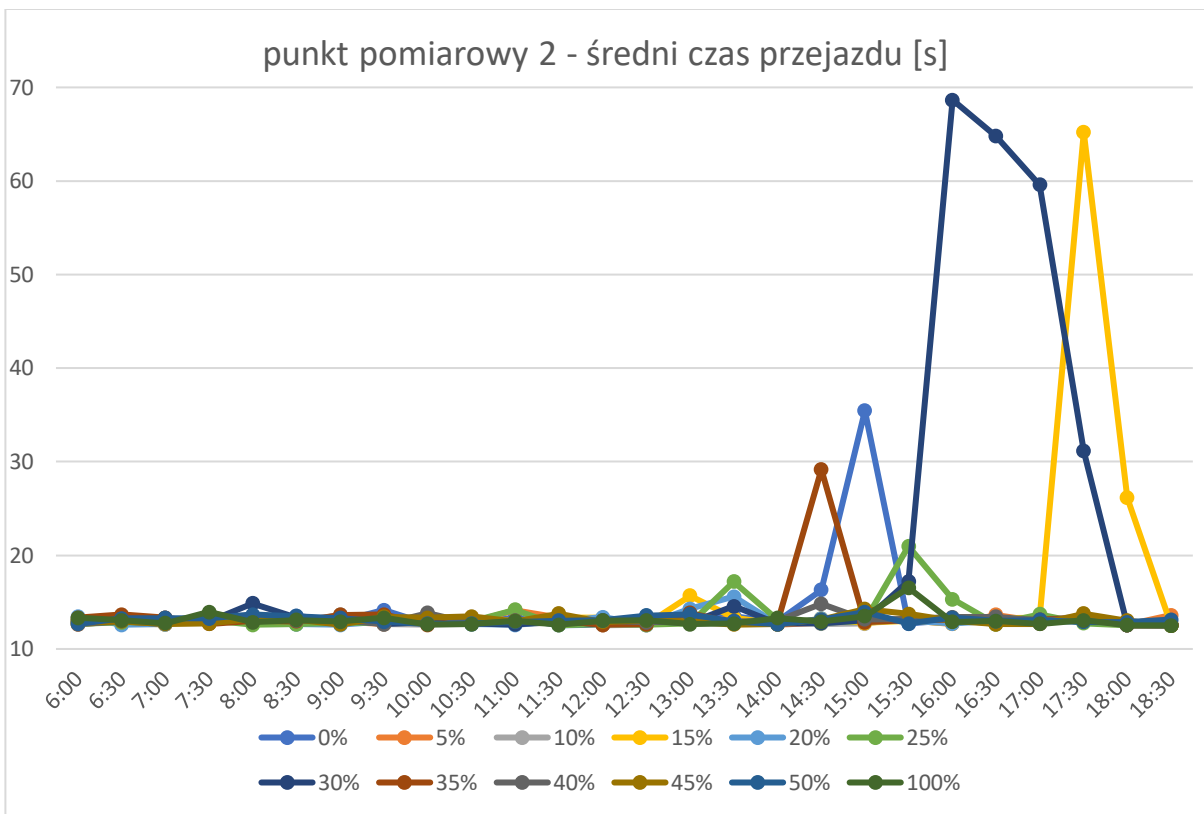
Analiza średnich czasów przejazdów pojazdów ciężarowych wykazała, iż poruszanie się po odcinku pomiarowym 1 największe straty czasu kierowcy będą otrzymywać w czasie trwania szczytu porannego. Zwiększenie liczby pojazdów już o 15% wpłynie niekorzystnie na poruszanie się pojazdów ciężarowych a także pozostałych po odcinku pomiarowym nr 1. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 61 Odcinek

pomiarowy 1 - średni czas przejazdu [s] na półgodzinny interwał czasowy - analiza porównawcza – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]



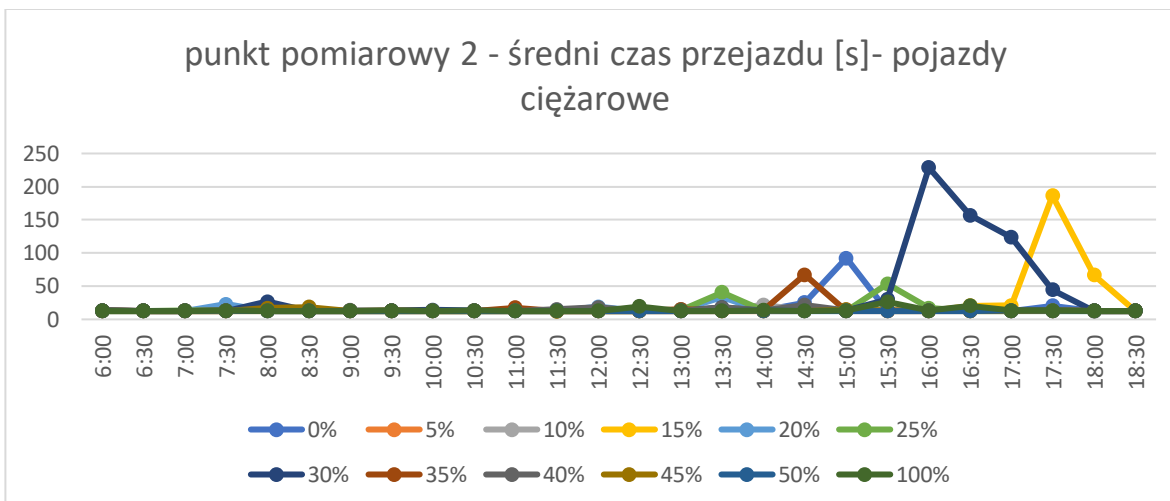
Rysunek 61 Odcinek pomiarowy 1 - średni czas przejazdu [s] na półgodzinny interwał czasowy - analiza porównawcza – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

M. Punkt pomiarowy 2 umieszczony na Estakadzie Kwiatkowskiego na odcinku międzywęzłowym pomiędzy węzłami Hutnicza i Kontenerowa, odcinek o długości 250 metrów. Odcinek w kierunku do dzielnicy Obłuże. Największe odchylenia w czasie przejazdu występują w trakcie trwania szczytu popołudniowego. Największe różnice w czasie przejazdu w których występuje wydłużenie podróży występuje w przypadku 15% zwiększenia liczby pojazdów ciężarowych generowanych przez port – w godzinach 17:30-18:30. W przedziale czasowym 16:00-17:30 w przypadku zwiększenia pojazdów ciężarowych o 30% czas podróży wydłuży się do prawie 70 sekund. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 62.



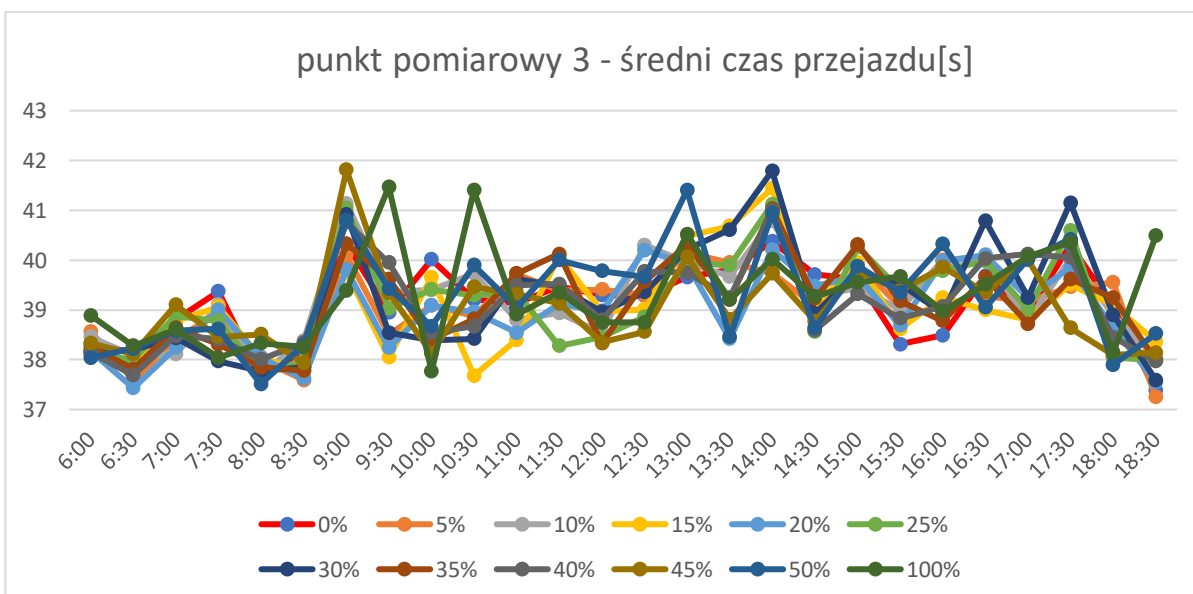
Rysunek 62 Odcinek pomiarowy 2 - średni czas przejazdu [s] na półgodzinny interwał czasowy - analiza porównawcza [opracowanie własne]

Analiza średnich czasów przejazdów pojazdów ciężarowych wykazała, iż poruszanie się po odcinku pomiarowym 2 największe straty czasu kierowcy będą otrzymywać w czasie trwania szczytu popołudniowego. Zwiększenie liczby pojazdów już o 15% wpłynie niekorzystnie na poruszanie się pojazdów ciężarowych a także pozostałych pojazdów po odcinku pomiarowym nr 2. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 63.



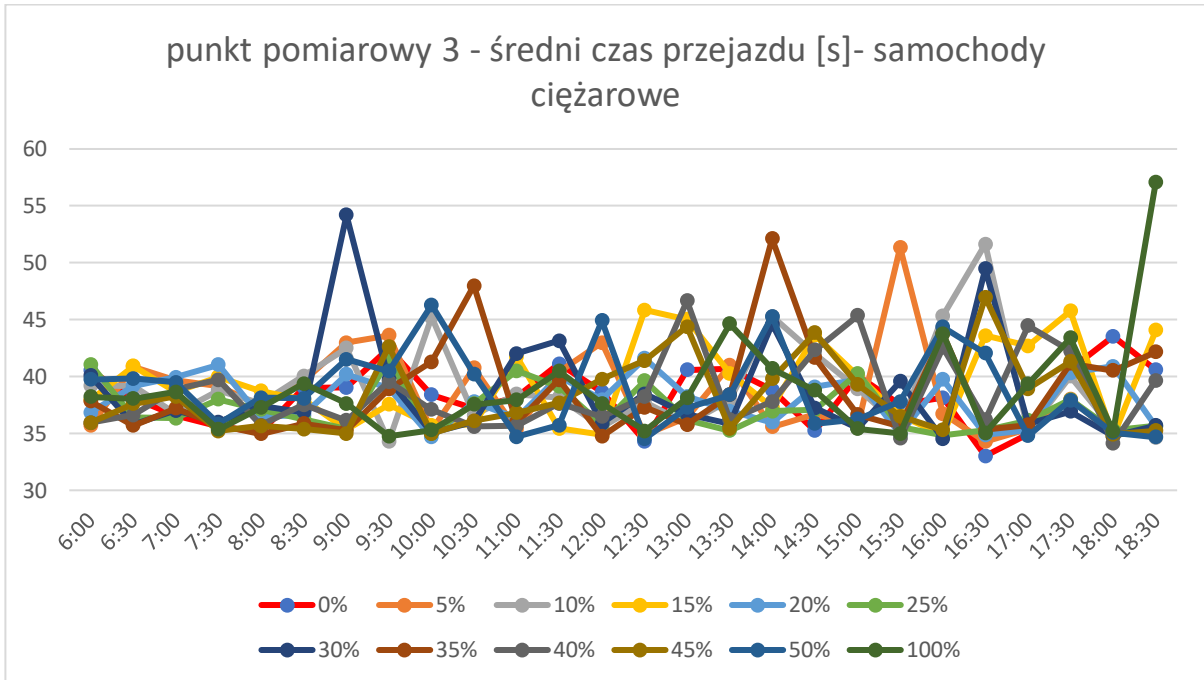
Rysunek 63 Odcinek pomiarowy 2 - średni czas przejazdu [s] na półgodzinny interwał czasowy - analiza porównawcza – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

N. Punkt pomiarowy 3 o długości 700 metrów umiejscowiony na Estakadzie Kwiatkowskiego w kierunku Obwodnicy Trójmiasta, pomiędzy węzłami z ulicą Janka Wiśniewskiego i ulicą Morską. Różnice w czasie przejazdu można zauważyć podczas całego cyklu pomiarowego. Największe odchylenia od wariantu istniejącego występują podczas zwiększenia liczby pojazdów o 30 w godzinach szczytu popołudniowego od 16:30 do 18:00. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 64.



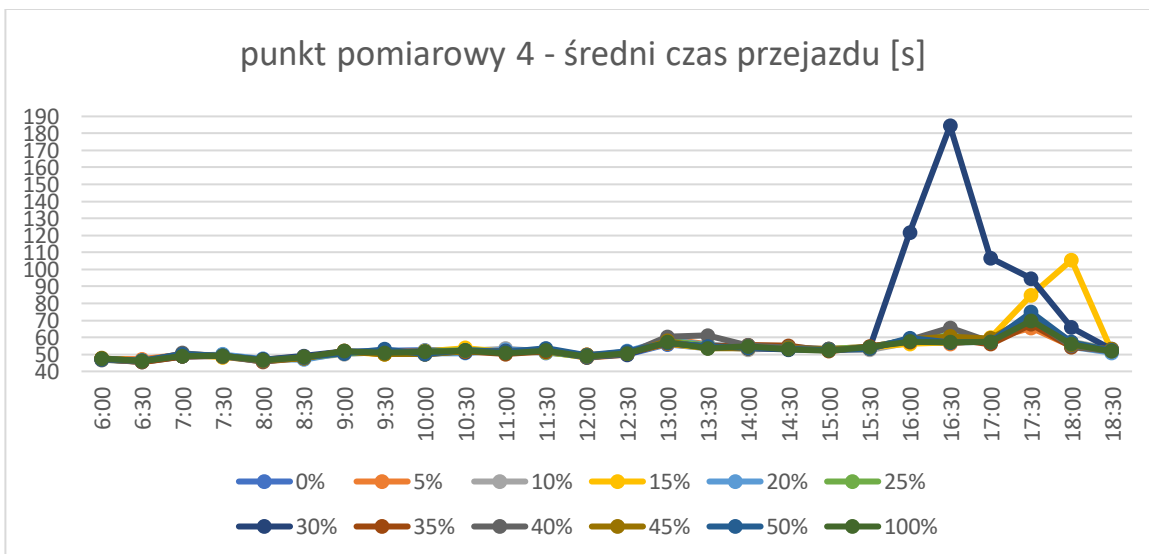
Rysunek 64 Odcinek pomiarowy 3 - średni czas przejazdu [s] na półgodzinny interwał czasowy - analiza porównawcza [opracowanie własne]

Analiza średnich czasów przejazdów pojazdów ciężarowych wykazała, iż poruszanie się po odcinku pomiarowym 3 największe straty czasu kierowcy będą otrzymywać w czasie trwania szczytu popołudniowego 15:30-16:00 już przy zwiększeniu liczby pojazdów o 5%. Zwiększenie liczby pojazdów o 30% wpłynie niekorzystnie na poruszanie się pojazdów ciężarowych w trakcie trwania szczytu porannego. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 65.



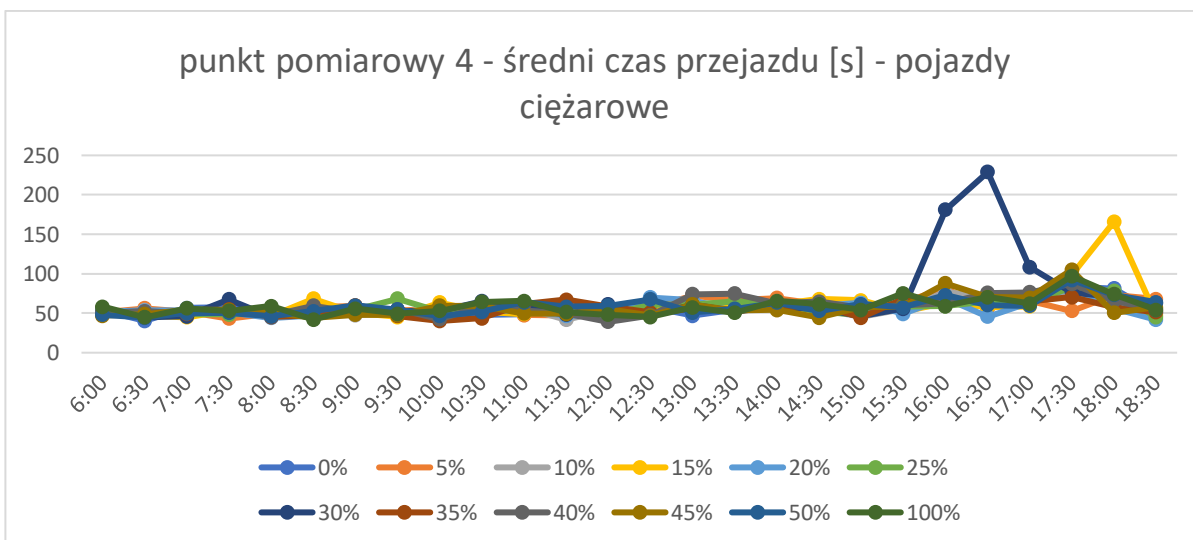
Rysunek 65 Odcinek pomiarowy 3 - średni czas przejazdu [s] na półgodzinny interwał czasowy - analiza porównawcza – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

O. Punkt pomiarowy 4 o długości 700 metrów umiejscowiony na Estakadzie Kwiatkowskiego w kierunku dzielnicy Obłuże, pomiędzy węzłami z ulicą Janka Wiśniewskiego i ulicą Morską. Niewielkie różnice w czasie przejazdu można zauważyć podczas całego cyklu pomiarowego. Największe odchylenia od wariantu istniejącego występują podczas zwiększenia liczby pojazdów o 30% w godzinach szczytu popołudniowego od 16:00 do 18:00 a także o 15% w godzinach 17:30 – 18:30. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 66.



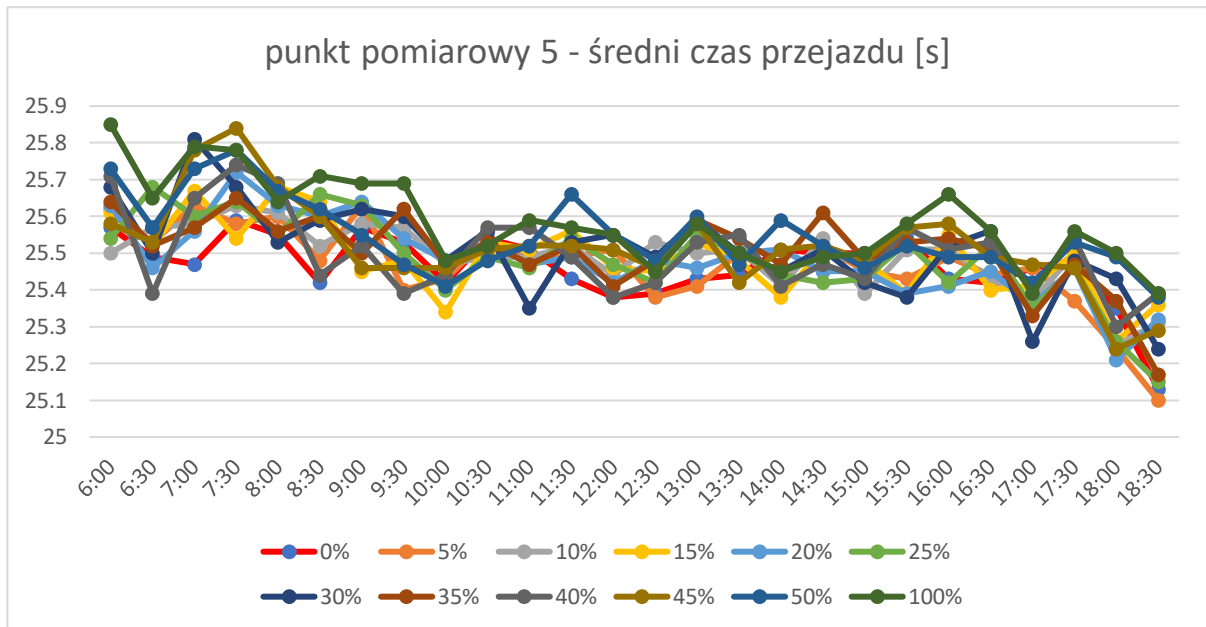
Rysunek 66 Odcinek pomiarowy 4 - średni czas przejazdu [s] na półgodzinny interwał czasowy - analiza porównawcza [opracowanie własne]

Analiza średnich czasów przejazdów pojazdów ciężarowych wykazała, iż poruszanie się po odcinku pomiarowym 4 największe odchylenia od wariantu istniejącego występują podczas zwiększenia liczby pojazdów o 30% w godzinach szczytu popołudniowego od 16:00 do 18:00 a także o 15% w godzinach 17:30 – 18:30. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 67.



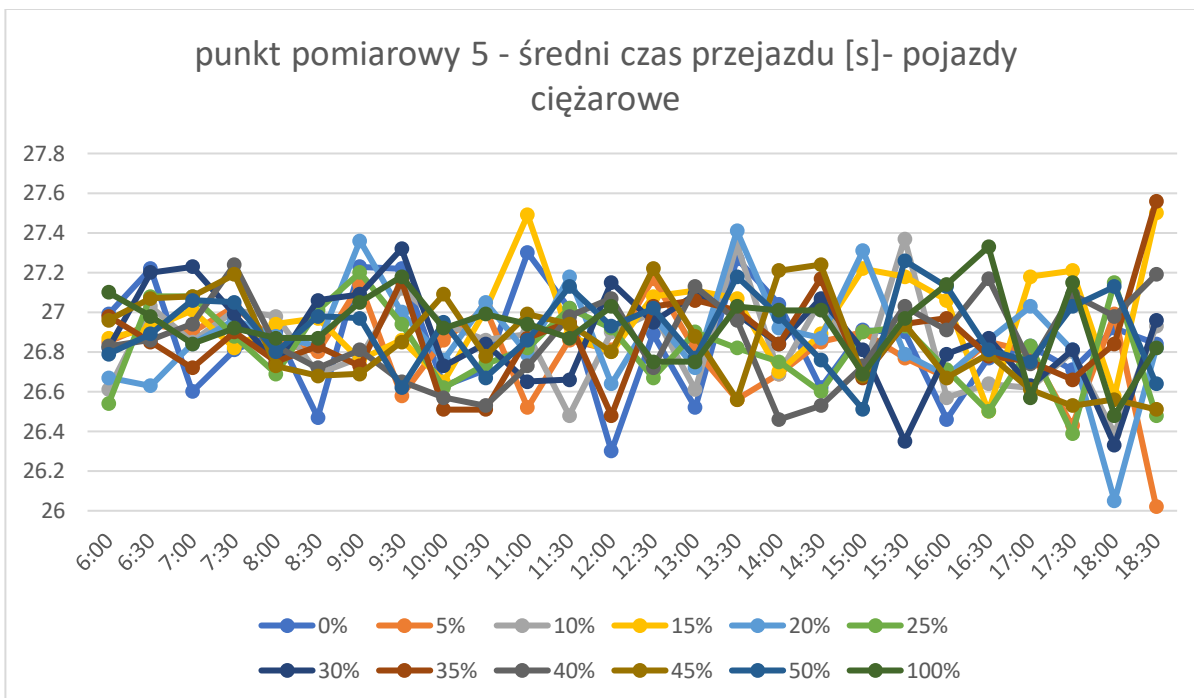
Rysunek 67 Odcinek pomiarowy 4 - średni czas przejazdu [s] na półgodzinny interwał czasowy - analiza porównawcza – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

P. Punkt pomiarowy 5 o długości 500 umiejscowiony na ulicy Janka Wiśniewskiego w kierunku Centrum Gdyni. Niewielkie różnice w czasie przejazdu można zauważyć podczas całego cyklu pomiarowego. Największe odchylenia od wariantu istniejącego występują podczas zwiększenia liczby pojazdów o 100%. Zmiany długości trwania czasu przejazdu zachodzą w granicach 1,5 sekundy. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 68.



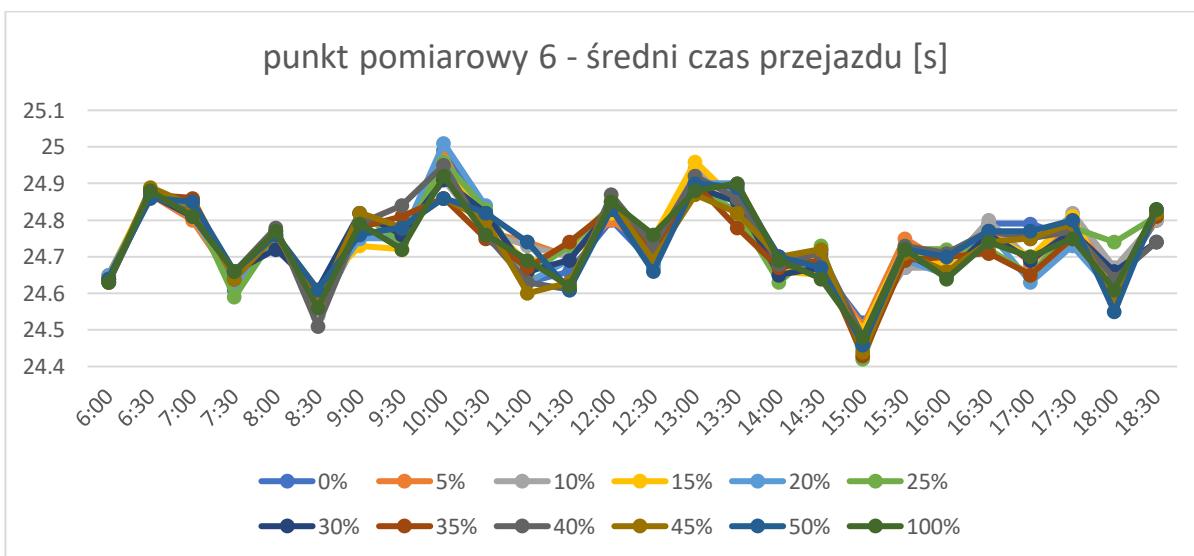
Rysunek 68 Odcinek pomiarowy 5 - średni czas przejazdu [s] na półgodzinny interwał czasowy - analiza porównawcza [opracowanie własne]

Analiza średnich czasów przejazdów pojazdów ciężarowych wykazała, iż poruszanie się po odcinku pomiarowym 5 największe odchylenia od wariantu istniejącego występują podczas zwiększenia liczby pojazdów o 15% w godzinach między szczytu. Zmiany te oscylują w zakresie 1 sekundy. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 69.



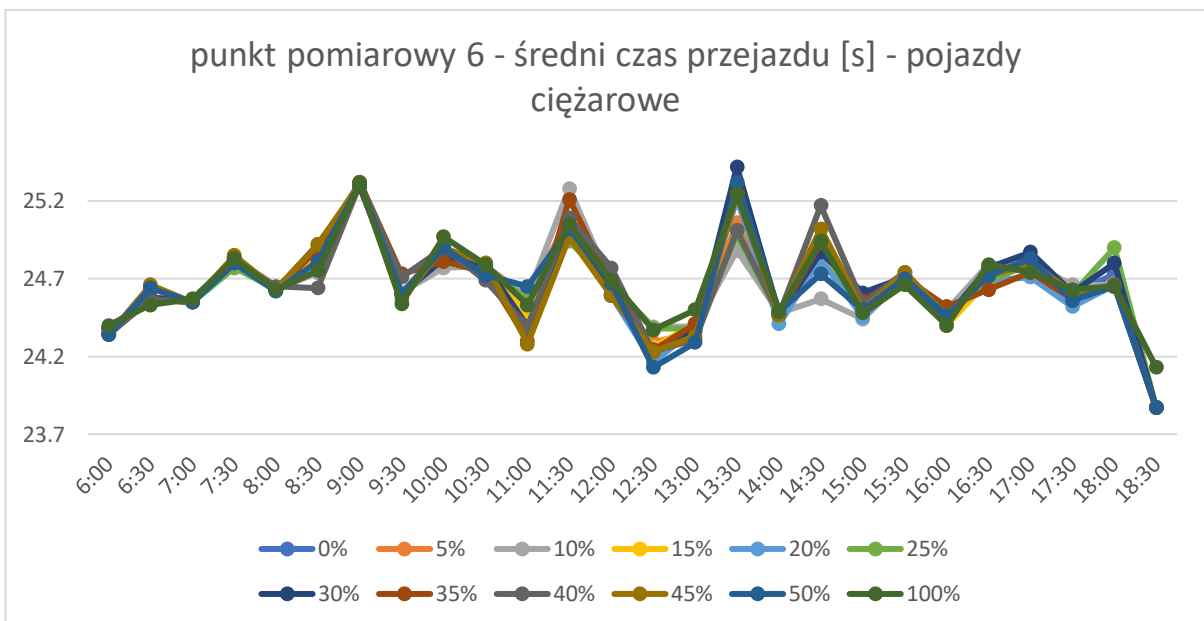
Rysunek 69 Odcinek pomiarowy 5 - średni czas przejazdu [s] na półgodzinny interwał czasowy - analiza porównawcza – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

Q. Punkt pomiarowy 6 o długości 500 umiejscowiony na ulicy Janka Wiśniewskiego w kierunku dzielnicy Obłuże. Niewielkie różnice w czasie przejazdu można zauważyć podczas całego cyklu pomiarowego. Zmiany długości trwania czasu przejazdu zachodzą w granicach 1 sekundy. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 70.



Rysunek 70 Odcinek pomiarowy 6 - średni czas przejazdu [s] na półgodzinny interwał czasowy - analiza porównawcza [opracowanie własne]

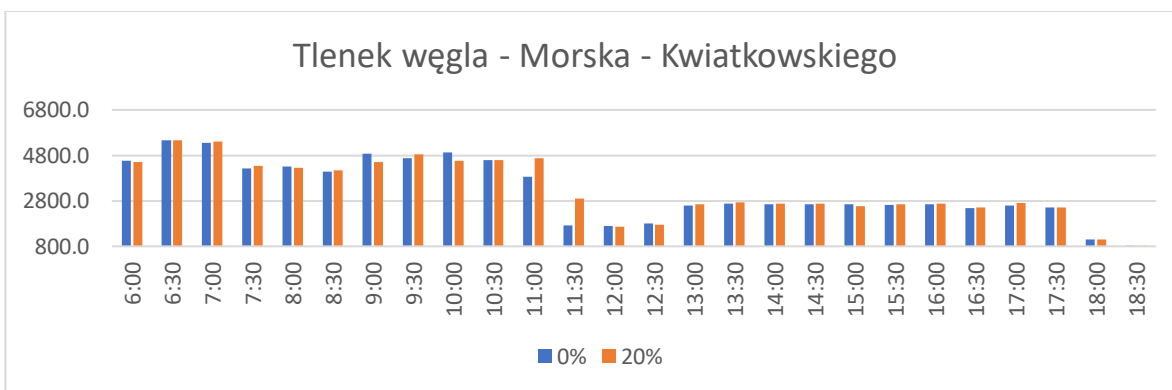
Analiza średnich czasów przejazdów pojazdów ciężarowych wykazała, iż poruszanie się po odcinku pomiarowym 6 nie wykazują znaczących zmian w długości czasu przejazdu. Zmiany te oscylują w zakresie 1 sekundy. Graficzny obraz wyników przedstawia Rysunek 71.



Rysunek 71 Odcinek pomiarowy 6 - średni czas przejazdu [s] na półgodzinny interwał czasowy - analiza porównawcza – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

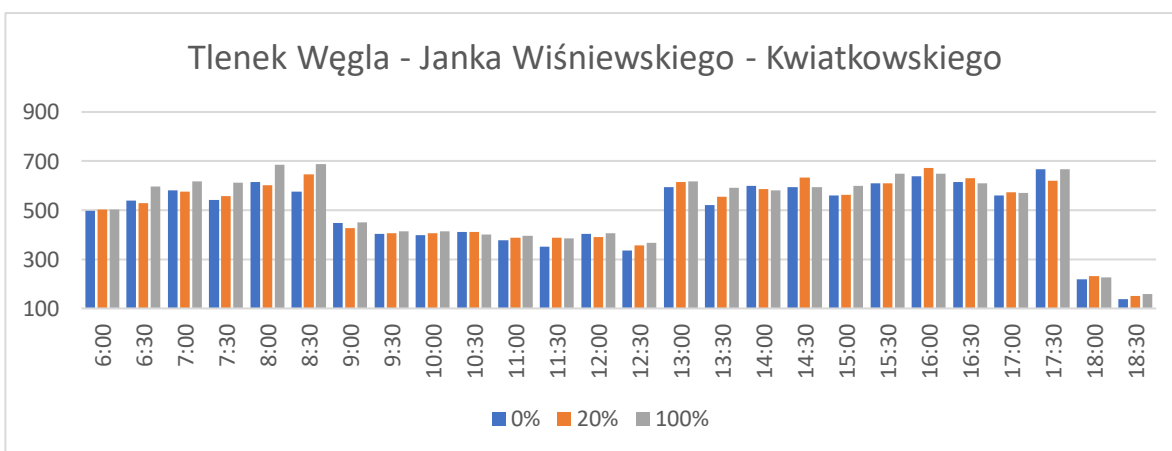
R. Analiza porównawcza zanieczyszczenia powietrza - CO – tlenek węgla

Punkt pomiarowy Skrzyżowanie Morska – Kwiatkowskiego. Sumaryczne stężenie tlenu węgla produkowanego przez pojazdy w obrębie skrzyżowania w wersji „0” (stanie istniejącym) wyniosła 84151 gram natomiast przy podwyższeniu natężenia pojazdów ciężarowych w miejscach bezpośrednio przylegających do dróg w sąsiedztwie portu o 20% spowodowało podwyższenie wydzielanego tlenu węgla do 85894.1 gram. W ujęciu całego okresu pomiarowego największe odchylenia można zauważyć w przedziale czasowym 11:00 – 12:00 – około 1000 gram. Diagram zmian przedstawiony został jako Rysunek 72.



Rysunek 72 Tlenek węgla - Morska - Kwiatkowskiego - porównanie wariantów – ilość CO [g] w półgodzinnych interwałach czasowych [opracowanie własne]

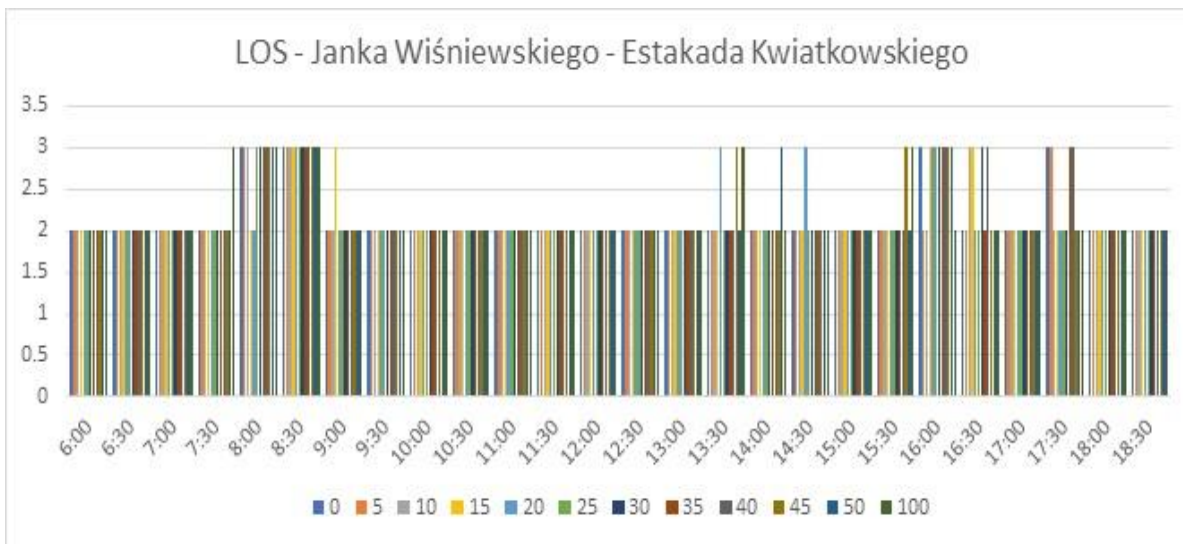
Punkt pomiarowy na skrzyżowaniu Janka Wiśniewskiego z Kwiatkowskiego. Sumaryczne stężenie tlenu węgla produkowanego przez pojazdy w obrębie skrzyżowania w wersji „0” (stanie istniejącym) wyniosła 12783,46 gram natomiast przy podwyższeniu natężenia pojazdów ciężarowych w miejscach bezpośrednio przylegających do dróg w sąsiedztwie portu o 20% spowodowało podwyższenie wydzielanego tlenu węgla do 13026,94 gram. W przypadku zwiększenia liczby pojazdów o 100% sumaryczna wartość tlenu węgla wyniosła 13448.51 gram. W ujęciu całego okresu pomiarowego największe odchylenia można zauważyć w przedziale czasowym 08:00 – 09:00 – około 90 gram. Diagram zmian przedstawiony został jako Rysunek 73.



Rysunek 73 Tlenek węgla – Janka Wiśniewskiego - Kwiatkowskiego - porównanie wariantów – ilość CO [g] w półgodzinnych interwałach czasowych [opracowanie własne]

S. Porównanie wariantów w przypadku LOS - Skrzyżowanie Janka Wiśniewskiego – Estakada Kwiatkowskiego.

Na skrzyżowaniu Janka Wiśniewskiego z Estakadą Kwiatkowskiego został pomierzony i porównany z różnymi wariantami LOS. Z wyników pomiarowych widać, iż zastosowanie większego natężenia pojazdów ciężarowych o 15% wpływa negatywnie na przedłużenie przebywania skrzyżowania w stanie C(3) aż do godziny 09:30. Natomiast zmiany podczas szczytu popołudniowego odnotowywane są prawie w każdym z możliwych zwiększeń natężeń pojazdów ciężarowych. Przejście do stanu C(3) w wyniku zwiększenia pojazdów występuje w innym okresie czasowym, im więcej pojazdów tym wcześniejsze spiętrzenie pojazdów a co za tym idzie obniżenie poziomu obsługi skrzyżowania. Diagram zmian przedstawiony został jako Rysunek 74.

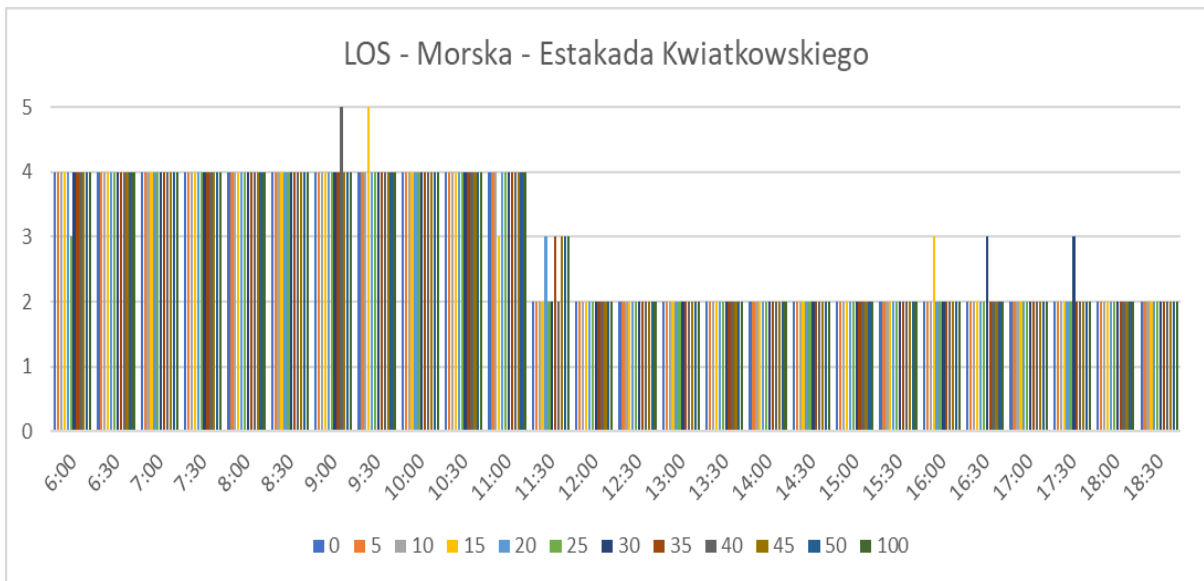


Rysunek 74 Janka Wiśniewskiego - Estakada Kwiatkowskiego – Level Of Service – porównanie wariantów – poziom obsługi w odniesieniu do półgodzinnych interwałów czasowych [opracowanie własne]

T. Porównanie wariantów w przypadku Level Of Service (LOS) - Skrzyżowanie Morska – Estakada Kwiatkowskiego.

Na skrzyżowaniu ulicy Morskiej z Estakadą Kwiatkowskiego został pomierzony i porównany z różnymi wariantami LOS. Z wyników pomiarowych widać, iż zastosowanie większego natężenia pojazdów ciężarowych o 15% lub 40% wpływa negatywnie na przedłużenie przebywania skrzyżowania w stanie C(3) aż do godziny 09:30. Natomiast zmiany podczas szczytu popołudniowego odnotowywane są prawie

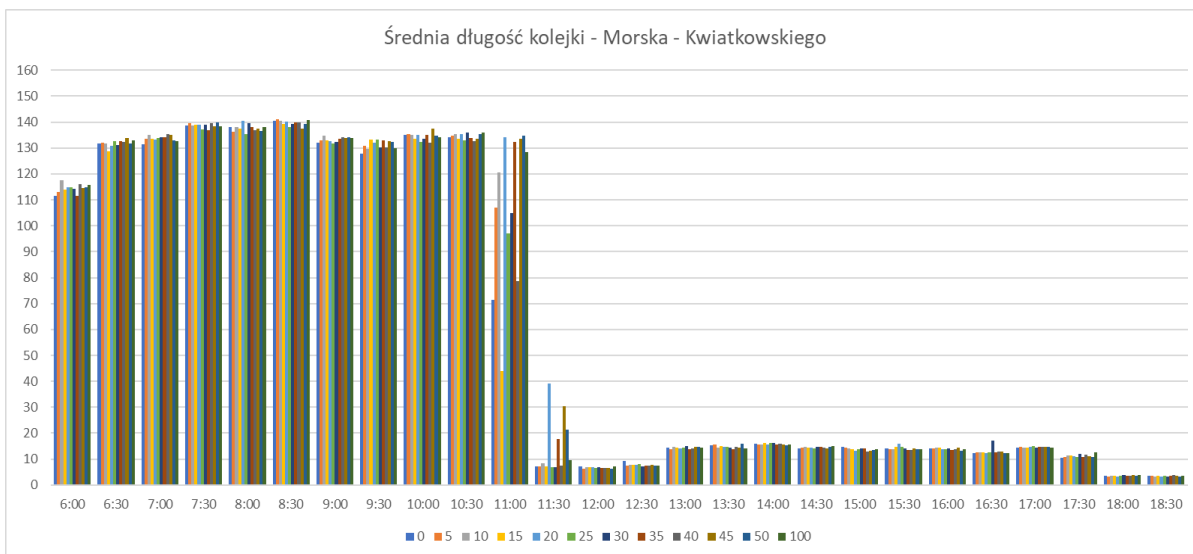
w każdym z możliwych zwiększeń natężeń pojazdów ciężarowych. Przejście do stanu C (3) w wyniku zwiększenia pojazdów występuje w innym okresie czasowym, im więcej pojazdów tym wcześniejsze spiętrzenie pojazdów a co za tym idzie obniżenie poziomu obsługi skrzyżowania. Diagram zmian przedstawiony został jako Rysunek 74.



Rysunek 75 Morska - Estakada Kwiatkowskiego – Level Of Service – porównanie wariantów - poziom obsługi w odniesieniu do półgodzinnych interwałów czasowych [opracowanie własne]

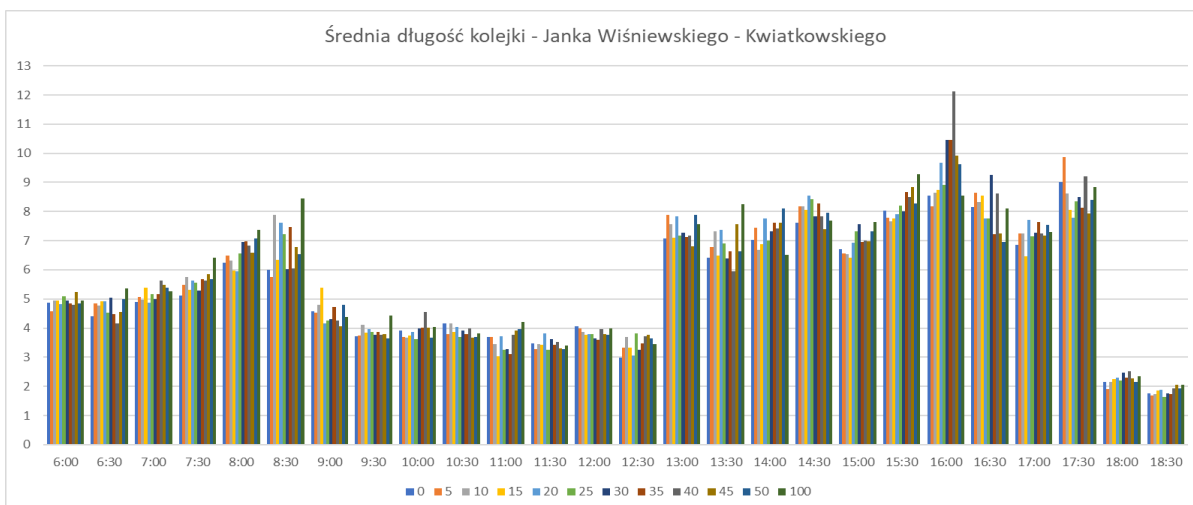
U. Średnia długość kolejki.

Analiza średniej długości kolejek na wlotach na skrzyżowaniu Morska – Kwiatkowskiego wykazała, że największe różnice w długości kolejki następują w przedziale czasowym 11:00-11:30. Średnia długość kolejki w przypadku wariantu 0 wyniosła około 70 metrów a w przypadku zwiększenia liczby pojazdów o 5% średnia długość kolejki wzrosła do ponad 100 metrów. Maksymalna średnia długość kolejki w tym przedziale czasowym wyniosła około 135 metrów. W przypadku zwiększenia liczby pojazdów o 20% zwiększenie kolejki pojazdów wystąpiło również w kolejnym przedziale czasowym od 11:30 do 12:00 do prawie 40 metrów. Diagram zmian przedstawiony został jako Rysunek 76.



Rysunek 76 Średnia długość kolejki [m]- Morska - Estakada Kwiatkowskiego – analiza wariantów – średnia długość kolejki w metrach wyrażona na osi pionowej w półgodzinnych interwałach czasowych [opracowanie własne]

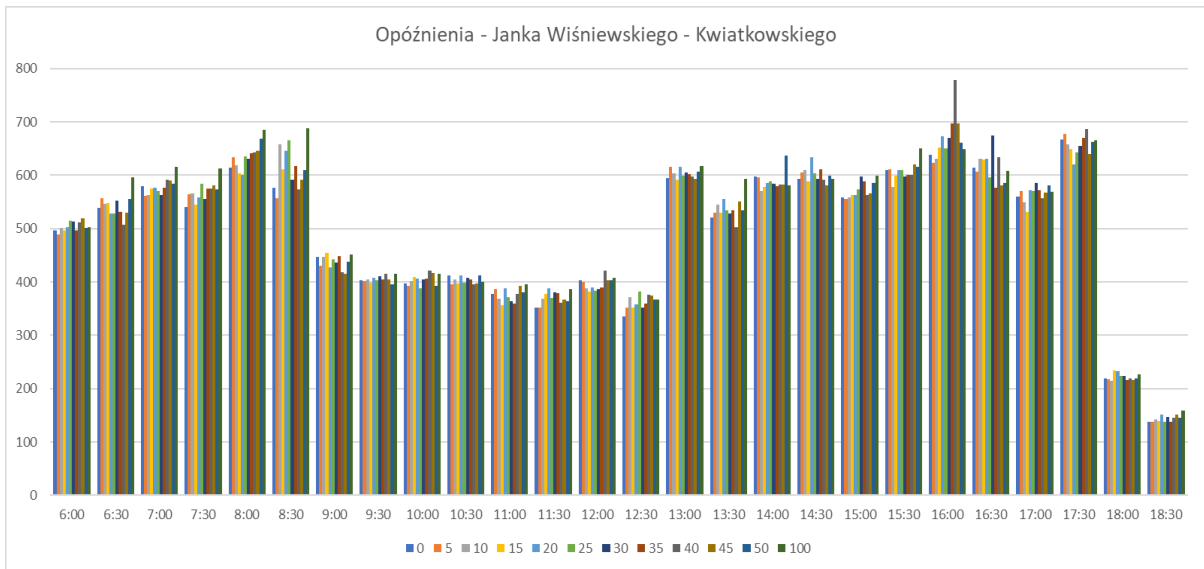
Analiza średniej długości kolejek na wlotach na skrzyżowaniu Janka Wiśniewskiego – Kwiatkowskiego wykazała, że największe różnice w długości kolejki następują w przedziale czasowym 08:30 - 09:00 i 16:00 - 16:30. Średnia długość kolejki w trakcie trwania szczytu porannego wzrosła z 6 metrów do około 8 metrów w przypadku zwiększenia liczby pojazdów o 10%. W trakcie trwania szczytu popołudniowego średnia długość kolejki wzrosła z około 8 metrów do nawet 12 metrów w przypadku zwiększenia liczby pojazdów o 40%. Diagram zmian przedstawiony został jako Rysunek 77.



Rysunek 77 Średnia długość kolejki – Janka Wiśniewskiego - Estakada Kwiatkowskiego – analiza wariantów - średnia długość kolejki w metrach wyrażona na osi pionowej w półgodzinnych interwałach czasowych [opracowanie własne]

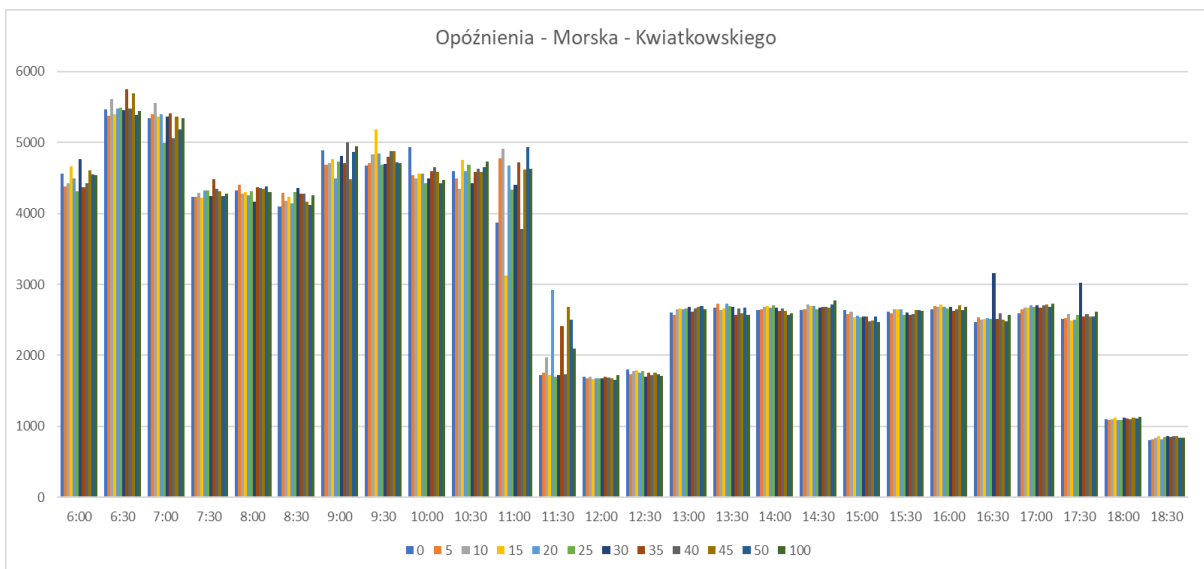
V. Opóźnienia

Analiza średnich opóźnień na skrzyżowaniu Janka Wiśniewskiego - Kwiatkowskiego wykazały, że największe różnice występują w trakcie trwania szczytu popołudniowego w okresie czasowym 16:00-16:30. Wzrost do około 780 sekund w przypadku zwiększenia liczby pojazdów ciężarowych w punktach generatorach o 40% gdzie w przypadku wariantu 0 straty te wynosiły około 600 sekund. Diagram zmian przedstawiony został jako Rysunek 78.



Rysunek 78 Opóźnienia - Janka Wiśniewskiego - Estakada Kwiatkowskiego – analiza wariantów - średnia długość kolejki w metrach wyrażona na osi pionowej w półgodzinnych interwałach czasowych [opracowanie własne]

Analiza średnich opóźnień na skrzyżowaniu ulicy Morskiej z Estakadą Kwiatkowskiego wykazały, że największe różnice występują w trakcie trwania szczytu popołudniowego w okresie czasowym 16:30-17:00 wzrost występuje w trakcie zwiększenia liczby pojazdów o 40% i wynosi około 500 sekund. Również w okresie szczytu porannego w godzinach 11:00-12:00 występują największe różnice w średnim czasie opóźnień, największa różnica wynosi nawet 1000 sekund – pomiędzy wariantem 0 a wariantem zwiększenia o 20% liczby pojazdów ciężarowych w punktach generatorach. Diagram zmian przedstawiony został jako Rysunek 79.



Rysunek 79 Opóźnienia – Morska - Estakada Kwiatkowskiego – analiza wariantów - średnia długość kolejki w metrach wyrażona na osi pionowej w półgodzinnych interwałach czasowych [opracowanie własne]

7. Wnioski

Systemy transportu odgrywają ważną rolę w społeczeństwie, gospodarce, obronie narodowej i innych. Są one klasyfikowane jako systemy infrastruktury krytycznej ze względu na daleko idące skutki zakłóceń w tych systemach. Analizę niezawodności różnych elementów systemów transportowych, takich jak infrastruktura czy środki transportu, prowadzono od połowy XX wieku.[11] Systemy transportu drogowego w aspekcie transportu odbywającego się w MST należą do klasy systemów, dla których jedną z najważniejszych cech jest efektywność realizacji procesów transportowych. W przypadku zachodzenia procesów bezpośrednio oddziaływających na sieć np. zdarzenia losowe lub wydarzenia planowane, skutki mają wpływ na wszystkich uczestników ruchu poruszających się w określonym wycinku MST. Zapewnienie wysokiego poziomu efektywności MST wiąże się z zarządzaniem ruchem w sieci, a także z planowaniem działań mających na celu dostosowywanie sterowania do zmiennych warunków ruchu.

Zarządzanie ruchem w czasie rzeczywistym jest na tyle skomplikowane, że zachodzi konieczność wprowadzania kosztownych Inteligentnych Systemów Transportowych w obszary miejskiej. Infrastruktura ITS umożliwia reagowanie na sytuacje nagłe w celu polepszenia efektywności. Z uwagi za złożoność procesów sterowania niezbędnym jest opracowywanie i stosowanie odpowiednich metod i modeli matematycznych, umożliwiających opis zmieniających się w czasie wielkości losowych. Opracowane modele w pracy uwzględniają różne zastosowania modeli w zależności od struktury wycinka MST.

Na podstawie otrzymanych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

1. Tworzenie modeli z wykorzystaniem procesów Markowa i semi-Markowa pozwala na określenie stanów sprawności MST. W zależności od badanego układu drogowego koniecznym jest dostosowanie modelu w parametry, które w miarodajny sposób pozwolą na analizę niezawodności operacyjnej.
2. Wykonanie badania wycinka MST za pomocą modelu symulacyjnego z wykorzystaniem narzędzi do mikrosymulacji transportu wykazały możliwość wykonania analizy niezawodności operacyjnej miejskiej sieci transportowej. Wyniki potwierdziły, że zmiany

zachodzące w sieci pod napływem pojazdów nie są liniowe. Zmiany te zależą od wielu czynników niemających bezpośredniego wpływu na natężenie pojazdów takich jak: geometria drogi, liczba pieszych poruszających się w sieci, odległość generatora ruchu od punktu pomiarowego. MST z uwagi na swój układ (szeregowy, równoległy, dendrytowy, mieszany) wykazuje inne wyniki w analizie stanów niezawodności operacyjnej.

3. Różne warianty modeli pozwalają na ocenę statyczną lub dynamiczną parametrów eksploatacyjnych, które można wykorzystać do określenia stanów systemu i wyróżnienia stanów niezawodności operacyjnej. Sprawnie działający system transportu to definicja dobrze funkcjonującego miasta. Połączenia infrastrukturalne między generatorami ruchu mają nieodłączny wpływ na płynność poruszania się po mieście.
4. Poprzez wykonanie modelu symulacyjnego w odniesieniu do analizy niezawodności operacyjnej MST możliwe jest:

- przeprowadzenie analizy danych wyjściowych z modelu tylko, jeżeli model zostanie wykonany w sposób prawidłowy a następnie skalibrowany tak, aby wyniki modelu wariantu istniejącego pokrywały się z rzeczywistymi pomiarami;
- zastosowanie metody symulacyjnej na każdym badanym wycinku sieci transportowej. Jednakże wprowadzone dane do modelu muszą odzwierciedlać pomiary rzeczywiste takie jak: natężenia ruchu, struktura kierunkowa, udział pojazdów ciężarowych, natężenie pieszych, ruch pojazdów transportu zbiorowego, sterowanie sygnalizacją świetlną, zachowania kierowców. Sieć drogowa musi być odwzorowana łącznie ze wzniesieniami i zachowaniem geometrii skrętów. Stworzenie modelu na zbyt niskim poziomie dokładności nie będzie wiarygodnym źródłem danych do analizy niezawodności operacyjnej;
- przeprowadzenie analizy przypadku zasymulowania warunków zbliżonych do dobowego rozkładu ruchu drogowego, a także takich w których występuje stres – np. stres nagły, którego zdarzenie ma bezpośredni wpływ na ruch drogowy zachodzący w czasie rzeczywistym. Podejście te umożliwia dokładną analizę przypadku i wykluczenie nieprawidłowości w działaniu sieci drogowej;
- otrzymanie wyników, które będą opierały się na wartościach zbliżonych do rzeczywistych w przeciwieństwie do danych otrzymanych w modelach

matematycznych, gdzie zastosowanie mają uproszczenia, spowodowane ograniczeniami metod. W modelach symulacyjnych możliwe jest wprowadzenie wielu czynników zewnętrznych oddziałujących bezpośrednio na sieć drogową takich jak: ruch pieszych, długość trwania zielonego światła w określonych porach dnia, odpowiednie zredukowanie prędkości na kierunkach skrajnych przez różne typy pojazdów itp.;

- uzyskanie danych z wykonanego modelu do wykonania scenariuszy zarządzania ruchem w sieci. Przewidywanie na podstawie modelu poszczególnych stanów sprawności w miejskiej sieci transportowej pozwala na dostosowanie strategii zarządzania ruchem w sytuacjach występujących w sieci jako stres. Zarządzanie siecią transportową wraz z wyposażeniem jej w infrastrukturę ITS, umożliwia lokalnym centrom sterowania ruchu na optymalne wykorzystanie sieci, a także na wcześniejsze informowanie podróżnych o możliwych utrudnieniach w ruchu;
- określenie oddziaływania, procentowego obciążenia sieci dodatkowymi pojazdami ciężarowymi generowanymi przez miejsca zdefiniowane jako generatory (np. terminale kontenerowe). Wyniki te umożliwiają przedsiębiorcom zlecającym przewozy drogą lądową na wybranie przedziałów czasowych, w których kierowca będzie mógł uniknąć zbędnych opóźnień w dostarczeniu ładunku, spowodowanym przez kongestię;
- określenie oddziaływania ruchu drogowego na środowisko, poprzez wyliczenie emitowanych szkodliwych substancji przez pojazdy. Model ten może posłużyć do zarządzania ruchem w oparciu o zanieczyszczenie środowiska np. poprzez wprowadzenie ograniczeń w ruchu na wybranych odcinkach lub uspokojenie ruchu na wybranych odcinkach najbardziej narażonych na zanieczyszczenia.
- określenie na poziomie 15% zwiększenia liczby pojazdów ciężarowych, generowanych dodatkowo do sieci, znacząco pogorszyło wyniki w większości punktach pomiarowych odnośnie czasu przejazdu. Kolejnym progiem pogorszenia warunków ruchu był poziom 30% zwiększenia liczby pojazdów ciężarowych. Kolejne zwiększenia nie spowodowały znacznych zmian z uwagi na

spowolnienie lub całkowite zatrzymanie ruchu zanim pojazdy te dojechały do punktu pomiarowego. Co wskazuje na nieliniowe wyniki uzyskane z modelu.

Zaprezentowane wyniki badań w pełni oddają rzeczywiste oddziaływanie intensywności napływu pojazdów do sieci z uwagi na zastosowanie danych rzeczywistych, uzyskanych ze stacji pomiaru ruchu jak i pomiaru manualnego. Jednakże brak bazy danych o małych incydentach drogowych, o których nie jest zawiadamiana policja, a które wpływają na częściowe zajęcie pasa drogowego na czas oszacowania szkód, prowadzi do uzyskania wyników lepszych niż mogą występować w rzeczywistości.

Zauważono, że istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań i rozwijanie powyższej koncepcji. W opracowanym modelu zbadano dodatkowe natężenie pojazdów ciężarowych, generowanych przez obiekty takie jak terminale kontenerowe w przypadku zwiększenia liczby transportowanych ładunków za pomocą transportu drogowego. W przyszłości należałoby również rozszerzyć obiekt badań o kolejne scenariusze natężeń pojazdów związane z obiektami portowymi. Takim przykładem jest rozbudowa modelu o kolejne elementy sieci np. zbadanie wpływu na ruch lokalny planowanego centrum dystrybucyjnego, zlokalizowanego w pobliżu terminali kontenerowych. Zasilenie modelu w przypadki losowe na podstawie bazy danych wypadków i kolizji drogowych. Zbadanie wpływu zmian w strukturze rodzajowej pojazdów w sieci, a oddziaływanie na środowisko poprzez zwiększenie natężenia pojazdów transportu zbiorowego, a zmniejszenie indywidualnego.

W konkluzji stwierdzono, iż istnieje potrzeba analizy oddziaływania obiektów związanych z przeładunkiem ładunków w porcie na MST za pomocą niezawodnościowych modeli matematycznych w oparciu o metody symulacyjne. Losowość czynników wpływających na efektywność MST jak i samego procesu transportowego na wycinku sieci determinuje wybór typu modelu i uzasadnia celowość wykorzystania modeli stochastycznych w tym procesie Markowa i semi-Markowa do oceny niezawodności operacyjnej.

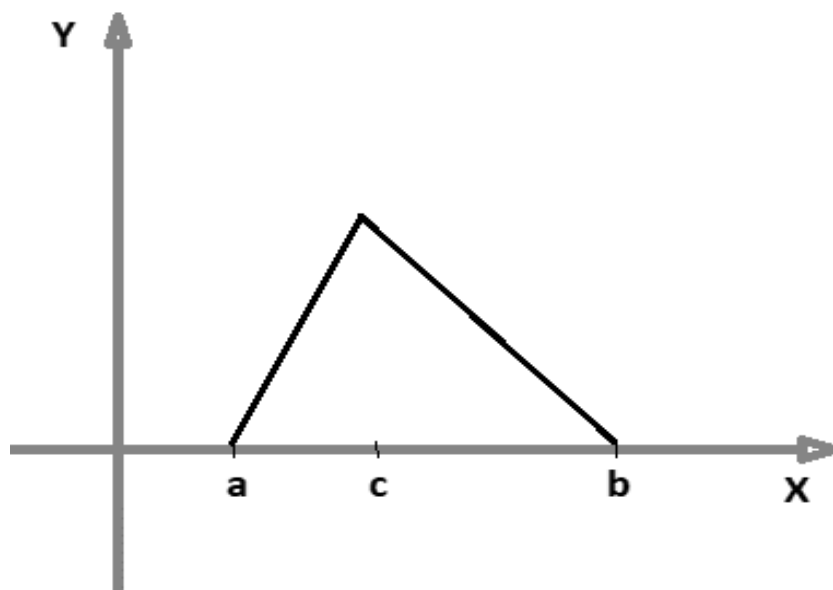
Załącznik 1 – Metody matematyczne

Rozkład Trójkątny

Rozkład trójkątny ciągły wykorzystywany jest, gdy nie jest znany rozkład rzeczywisty, jednak znane są wartości brzegowe zmiennej losowej a , b oraz wartość c , dla której prawdopodobieństwo wystąpienia jest największe (moda, maksimum globalne funkcji gęstości prawdopodobieństwa), czyli znane jest wartość minimalna, maksymalna i najczęściej występująca. Rozkład trójkątny może wystąpić jako efekt łączenia różnych typów pojazdów w jeden strumień ruchu, będąc efektem operacji splotu rozkładów prostokątnych, przypisywanych wartości każdego z odczytów liczby pojazdów, wynikającej z procentowego udziału w strumieniu ruchu dla dwóch klas, dla określonego przedziału czasowego.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \text{dla } x \in [a, c] \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & \text{dla } x \in (c, b] \end{cases} \quad (86)$$

$$E(X) = \frac{a+b+c}{3}; \quad D^2(X) = \frac{a^2 + b^2 + c^2 - ab - ac - bc}{18} \quad (87)$$

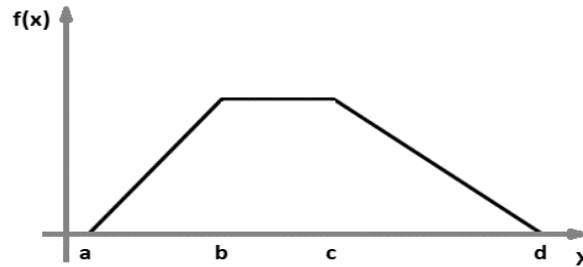


Rysunek 80 Rozkład trójkątny [opracowanie własne]

Rozkład Trapezowy

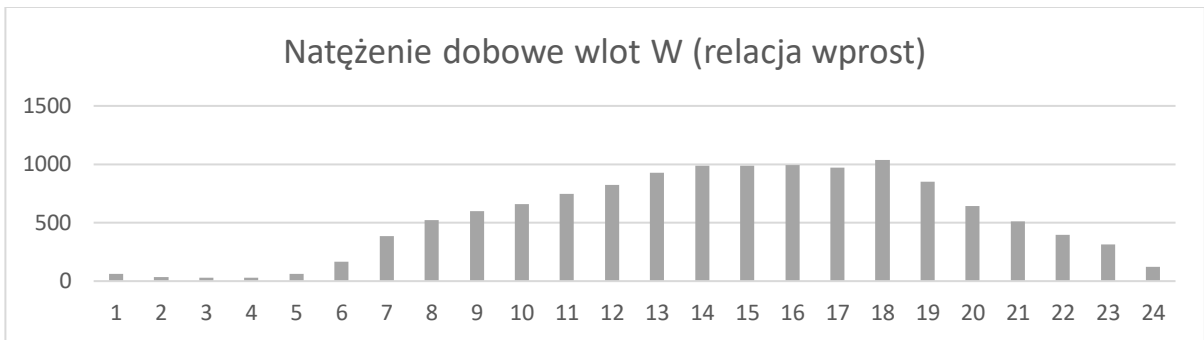
W teorii prawdopodobieństwa rozkład trapezoidalny jest rozkładem ciągłym skupionym na przedziale $[a,d]$. Każdy rozkład trapezoidalny ma dolną granicę a i górną granicę d gdzie $a \leq d$, poza przedziałem $[a,d]$ prawdopodobieństwo jest zero. Wykres gęstości funkcji prawdopodobieństwa tego rozkładu $f(x)$ jest łamaną która przypomina trapez. Ponadto istnieją dwa punkty załamania gęstości prawdopodobieństwa, które nazwiemy b i c , takie, że $a \leq b \leq c \leq d$.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2}{d+c-a-b} \cdot \frac{x-a}{b-a} & \text{dla } x \in (a,b) \\ \frac{2}{d+c-a-b} & \text{dla } x \in (b,c) \\ \frac{2}{d+c-a-b} \cdot \frac{d-x}{d-c} & \text{dla } x \in (c,d) \end{cases} \quad (88)$$



Rysunek 81 Rozkład trapezowy [opracowanie własne]

Niekiedy rozkłady dobowe natężeń mogą być spójne z rozkładem trapezowym. W przypadku, gdy nie występują dwa charakterystyczne szczyty komunikacyjne a szczyt poranny rozciąga się w czasie aż do godzin popołudniowych w tym czasie natężenie pojazdów jest sobie równe to charakterystyka ta przyjmuje rozkład trapezowy. Przykładem może być natężenie pojazdów na wlocie zachodnim skrzyżowania Energetyków z Janka Wiśniewskiego w Gdyni. Rysunek 82 Dobowy rozkład ruchu na wlocie zachodnim Energetyków - Janka Wiśniewskiego



Rysunek 82 Dobowy rozkład ruchu na wlocie zachodnim Energetyków - Janka Wiśniewskiego [opracowanie własne]

Załącznik 3 – Model ARIMA

ARIMA (*ang. Auto Regressive Integrated Moving Average*) oznacza automatyczną regresywną zintegrowaną średnią ruchomą. Procedura *ARIMA Charts* tworzy tabele kontrolne dla pojedynczej zmiennej numerycznej, w której dane zostały zebrane indywidualnie lub w podgrupach. W przeciwieństwie do innych kart kontrolnych, wykresy ARIMA nie zakładają, że kolejne obserwacje są niezależne. Zamiast tego konstruuje się model statystyczny, aby opisać szeregową korelację pomiędzy obserwacjami bliskimi w czasie. Sygnały niekontrolowane są następnie oparte na odchyleniach procesu z tego dynamicznego modelu szeregów czasowych. Procedura tworzy zarówno wykres ARIMA, jak i wykres *R*, wykres *S* lub *MR(2)* wykres[88][7]. Wykresy mogą być skonstruowane w trybie Studium Początkowego, gdzie aktualne dane określają granice kontrolne lub w trybie Kontroli do Standardu, gdzie granice pochodzą albo ze znanego standardu, albo z wcześniejszych danych. Przyjmuje się, że dane (x_j) różnią się losowo (a_j) od ustalonej średniej (μ), zgodnie z[88][101][13]:

$$x_j = \mu + a_j , \quad (89)$$

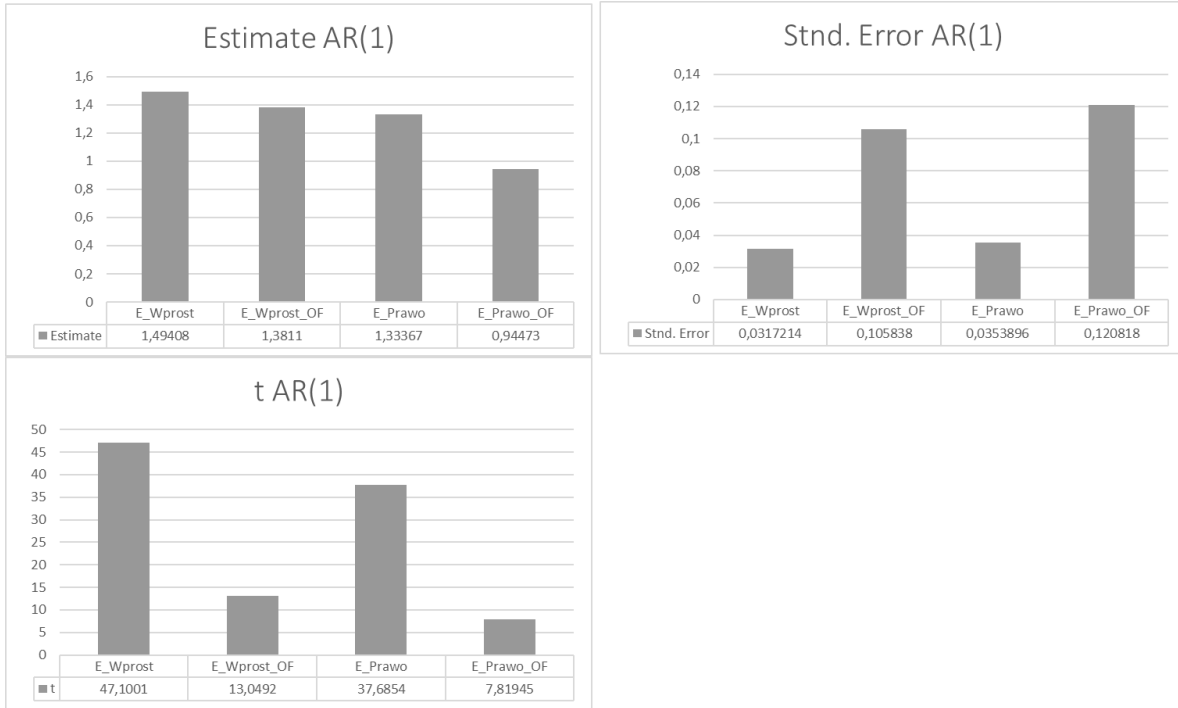
gdzie a_j są losowymi próbkami z rozkładu normalnego ze średnią 0 i stałą wariancją σ_a^2 (zwaną "białym szumem"). Wykresy ARIMA zbudowane są na bardziej skomplikowanej klasie modeli zdefiniowanych przez:

$$z_j = \theta_0 + \phi_1 z_{j-1} + \phi_2 z_{j-2} + \dots + \phi_p z_{j-p} + a_j - \theta_1 a_{j-1} - \theta_2 a_{j-2} - \dots - \theta_q a_{j-q} \quad (90)$$

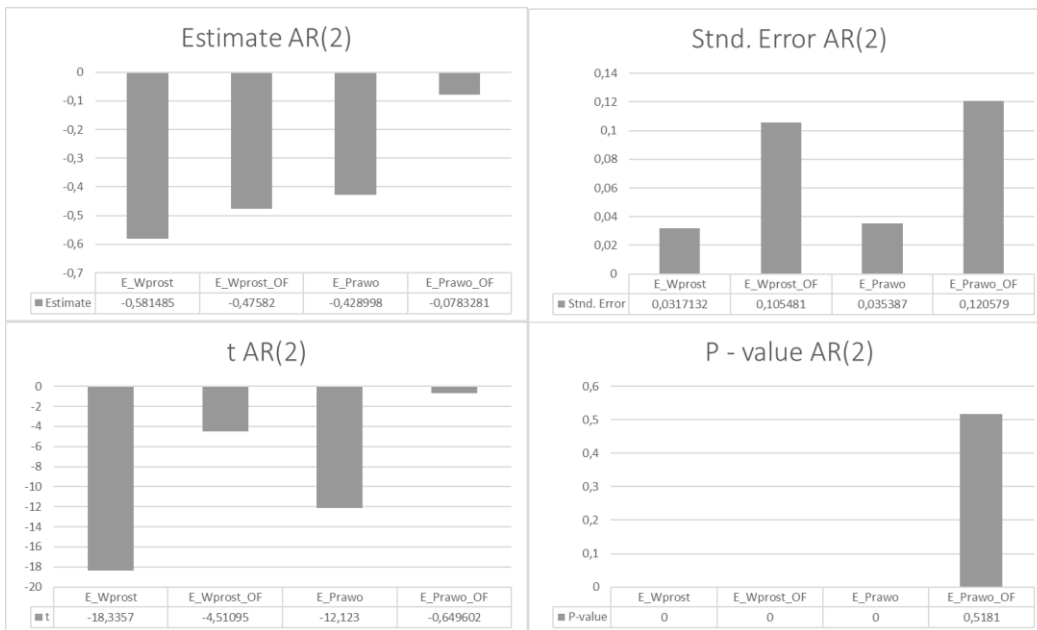
gdzie:

$$z_j = \nabla^d x_j . \quad (91)$$

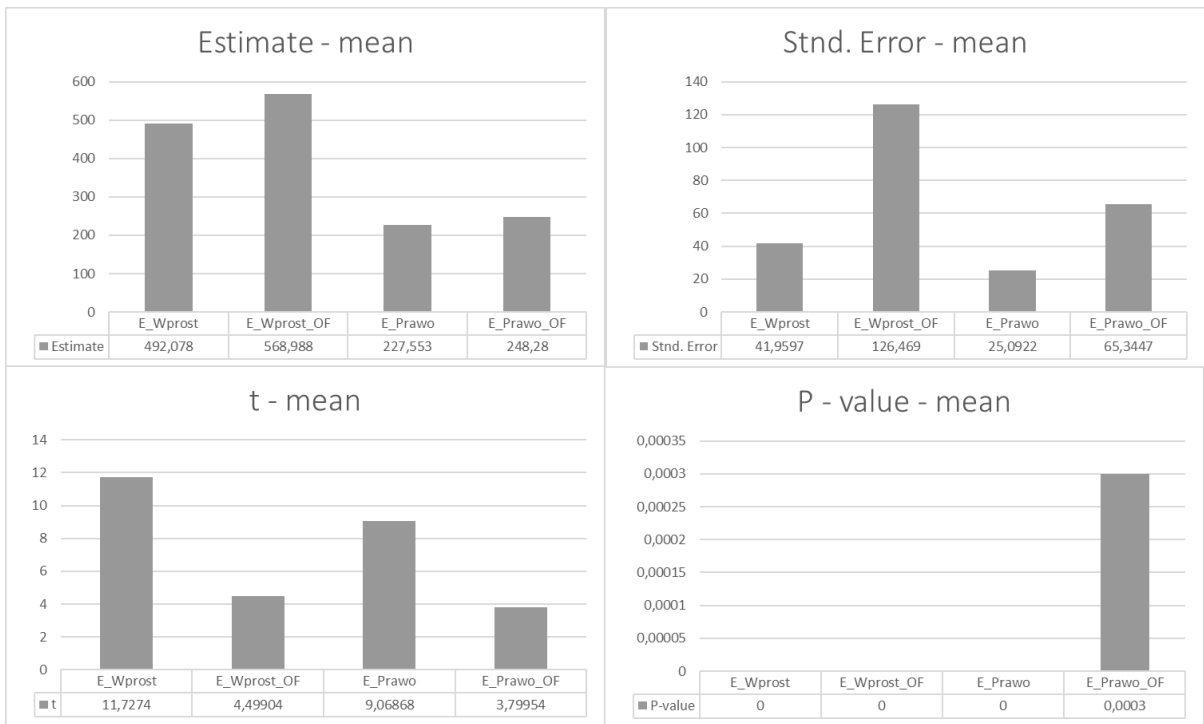
- Wyniki graficzne dla modelu ARIMA



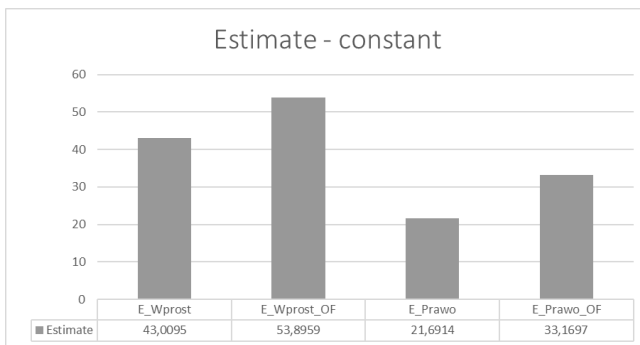
Rysunek 83 ARIMA - porównanie parametrów wynikowych - AR(1) [88]



Rysunek 84 ARIMA - porównanie parametrów wynikowych - AR(2)[88]



Rysunek 85 ARIMA - porównanie parametrów wynikowych – mean [88]



Rysunek 86 ARIMA - porównanie parametrów wynikowych – constant [88]

Załącznik 4 - Model przejazdu autobusu

Czas przejazdu autobusu (T_p) jest zmienną losową dana wzorem:

$$T_p = T_{\text{średnie}} + T_{\text{przys}} + T_{\text{świ}} \quad (92)$$

gdzie:

- $T_{\text{średnie}}$ – średni czas przejazdu odcinków pomiędzy przystankami,
- T_{przys} – czas postoju na przystankach,
- $T_{\text{świ}}$ – czas oczekiwania na światłach na sygnał zielony.

Czas oczekiwania na światłach jest zmienną losową o rozkładzie z funkcją dystrybuanty postaci:

$$F_{T_{\text{świ}}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t \leq 0 \\ \frac{t_z}{t_z + t_c} & \text{dla } 0 < t \leq t_z \\ \frac{t_z}{t_z + t_c} + \frac{1 - t_z}{t_z + t_c} & \text{dla } t_z < t < t_z + t_c \\ 1 & \text{dla } t_z + t_c \leq t \end{cases} \quad (93)$$

gdzie:

- t_c – czas między zielonym sygnałem w trakcie kolejnych cykli,
- t_z – minimalny czas zielony.

Czas postoju na przystanku jest zmienną losową o rozkładzie jednostajnym z funkcją dystrybuanty postaci:

$$F_{T_{\text{przyst}}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t \leq a \\ \frac{t - a}{b - a} & \text{dla } a < t \leq b \\ 1 & \text{dla } b \leq t \end{cases} \quad (94)$$

T_{przys} i $T_{\text{świ}}$ to niezależne zmienne losowe o dystrybuantach w postaci odpowiednio:

$F_{T_{\text{świ}}}(t)$ i $F_{T_{\text{przyst}}}(t)$. Wówczas $T_p - T_{\text{średnie}}$ ma rozkład o dystrybuancie: [83]

$$F_{T_{\text{śp}}}(t) = \int_0^{\infty} F_{T_{\text{świ}}}(t - \tau) dF_{T_{\text{przyst}}}(t) \quad (95)$$

Załącznik 5 – Wyprowadzenia niezbędne do obliczenia niezawodności systemów o różnych strukturach

- Zastosowanie rezerwy zimnej w systemie z połączeniami szeregowymi

$$\begin{aligned}
 R_s(t) &= P(T_S \geq t) & (96) \\
 &= \prod_{i=1}^n P(T_i = t) \\
 &+ \sum_{i,j=1, i < j, i > j}^n [P((T_i < t) \wedge (T_i + T_{n+1}) \geq t) P((T_j < t) \\
 &\wedge (T_j + T_{n+2}) \geq t) (\prod_{k=1, k < i, k < j}^n P(T_k \geq t))] + \sum_{i=i}^n (P((T_i \\
 &< t) \wedge ((T_i + T_{n+1}) \\
 &< t) (\prod_{k=1, k < i}^n P(T_k \geq t) \\
 &+ \sum_{i=1}^n (P((T_i < t) \wedge ((T_i + T_{n+1}) < t) \\
 &\wedge (T_i + T_{n+1} + T_{n+2} \geq t)) (\prod_{k=1, k < i}^n P(T_k \geq t))
 \end{aligned}$$

- Zastosowanie rezerwy w systemie dwuelementowym z elementami rezerwowymi w rezerwie gorącej

Założono, że elementy systemu podstawowe, jak i zapasowe są jednakowy można otrzymać równanie:

$$R_s(t) = R^4(t) + 4R^3(t)F(t) + 4R^2(t)F^2(t) \quad (97)$$

Założono, że oba Przełączniki posiadają jednakową niezawodność $R_p(t)$, niezawodność systemu może zostać wyznaczona jako:

$$R_S(t) = P(T_S \geq t) = P(T_1 \geq t)P(T_2 \geq t) + P(T_1 \geq t)P((T_2 < t) \wedge (T_2 + T_4) \geq t)P(T_p \geq t) + P(T_2 \geq t)P((T_1 < t) \wedge (T_1 + T_3) \geq t)P(T_p \geq t) + P((T_2 < t) \wedge (T_2 + T_4) \geq t)P(T_p \geq t)P((T_1 < t) \wedge (T_1 + T_3) \geq t)P(T_p \geq t) \quad (98)$$

- **Porównanie rezerw**

Dla systemu z rezerwą jednostkową:

$$R_{Rj}(t, n, k) = \prod_{i=1}^n (1 - (1 - R(t))^{k+1}) \quad (99)$$

Dla systemu z rezerwą globalną;

$$R_{Rg}(t, n, kn) = 1 - (1 - R^n(t))^{kn+1} \quad (100)$$

Powyższe wzory można zatem zapisać w dwóch postaciach:

$$R_{Rj}(t, n, k) = \left(1 - (1 - R(t))^{k+1}\right)^n \quad (101)$$

$$R_{Rg}(t, n, kn) = 1 - (1 - R^n(t))^{kn+1} \quad (102)$$

Zatem:

Rezerwowanie globalne jest korzystniejsze od rezerwowania jednostkowego dla systemu wyżej opisanego. Dowodem na to jest:

$$R_{Rg}(t, n, kn) \geq R_{Rj}(t, n, k) \quad (103)$$

Załącznik 6 - Dane wynikowe z modelu

- Czasy przejazdu odcinki pomiarowe od 1 do 6

Tabela 11 Punkt pomiarowy 1 – czas przejazdu – wszystkie pojazdy [opracowanie własne]

	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	100%
6:00	28.29	27.93	24.27	20.35	34.41	26.27	26.32	30.30	26.63	29.67	29.17	31.62
6:30	30.51	31.42	29.91	33.39	30.04	30.14	28.44	30.32	30.32	29.60	28.49	32.42
7:00	27.27	28.86	29.08	27.85	32.03	35.85	31.79	32.16	31.95	32.12	27.49	35.22
7:30	24.60	27.22	25.78	25.26	27.65	29.08	26.00	23.84	23.70	25.69	24.99	26.25
8:00	25.51	23.81	29.28	26.31	29.61	25.35	25.69	28.51	24.84	36.04	33.41	28.13
8:30	26.11	27.11	31.87	25.42	24.29	25.42	30.78	27.26	32.10	33.29	24.20	37.82
9:00	14.13	15.60	15.41	16.64	14.71	15.05	15.58	16.16	15.26	15.71	14.61	16.77
9:30	14.10	14.19	14.26	14.33	14.49	14.48	14.45	14.20	13.99	14.22	14.30	14.34
10:00	13.70	13.98	13.98	13.73	13.75	13.92	14.27	14.12	13.88	13.81	13.79	13.99
10:30	13.77	13.80	13.65	13.91	13.78	13.80	13.68	13.58	13.76	13.61	13.70	13.82
11:00	13.78	14.16	13.80	13.92	14.00	13.95	13.87	13.56	13.80	14.08	13.87	13.91
11:30	13.68	13.91	13.71	13.51	13.76	14.00	13.94	13.99	13.59	13.91	13.91	14.04
12:00	14.26	14.01	13.95	14.07	13.95	13.87	14.12	14.31	14.02	13.93	14.09	14.04
12:30	13.47	13.77	13.67	13.65	13.53	13.48	13.77	13.56	13.64	13.59	13.70	13.62
13:00	15.45	15.35	15.02	15.36	15.13	15.04	14.96	14.78	14.62	14.54	14.89	14.60
13:30	14.25	14.37	14.13	14.55	14.64	13.89	14.30	13.92	14.33	14.31	14.05	14.14
14:00	14.62	14.52	14.12	14.79	14.69	14.42	14.25	14.37	14.41	14.62	14.77	14.39
14:30	14.80	14.61	14.43	14.03	14.47	14.37	14.44	14.78	14.40	14.43	14.67	14.29
15:00	14.04	14.22	14.10	14.05	14.58	14.49	14.87	14.05	14.22	14.19	14.19	14.13
15:30	14.46	15.29	15.00	14.90	15.50	15.02	14.50	14.74	15.05	15.08	14.98	15.20
16:00	14.48	15.07	15.45	14.96	14.84	14.66	14.72	14.92	14.90	14.63	14.59	14.34
16:30	13.95	14.37	14.08	14.36	14.27	13.83	14.37	14.17	14.12	14.31	14.22	14.14
17:00	14.51	14.38	14.03	15.08	14.37	14.28	14.70	15.06	14.46	14.23	13.85	14.12
17:30	14.83	15.17	14.97	14.97	14.44	15.04	15.01	14.60	14.76	14.87	14.79	14.98
18:00	13.34	13.37	13.29	13.46	13.62	13.34	13.41	13.42	13.39	13.44	13.53	13.38
18:30	13.61	13.68	13.63	13.56	13.76	13.58	13.86	13.54	13.76	13.65	13.76	13.67

Tabela 12 Punkt pomiarowy 2 – czas przejazdu – wszystkie pojazdy [opracowanie własne]

	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	100%
6:00	13.02	12.66	13.01	13.03	13.44	12.68	12.98	13.32	12.66	12.82	12.67	13.34
6:30	13.52	12.94	12.97	12.90	12.59	12.84	13.03	13.67	12.97	12.96	13.27	13.05
7:00	12.75	12.64	12.64	12.62	12.63	12.82	13.28	13.32	12.68	12.67	13.28	12.75
7:30	13.52	13.38	13.35	13.76	13.48	13.06	12.96	12.67	13.27	12.71	13.26	13.93
8:00	13.03	13.15	13.10	13.27	12.68	12.58	14.87	12.99	13.41	13.22	13.66	12.86
8:30	13.52	12.68	12.72	13.13	12.65	12.64	13.32	12.97	13.01	13.17	13.49	13.08
9:00	12.97	12.94	13.67	13.13	12.59	12.81	13.22	13.65	13.06	12.62	13.28	12.93
9:30	14.16	12.64	12.64	13.38	12.92	12.77	12.68	13.66	12.63	13.42	12.91	13.34
10:00	12.63	13.22	12.61	12.98	12.94	13.33	12.89	12.58	13.85	13.32	12.67	12.60
10:30	12.79	12.85	13.17	13.18	12.65	12.92	12.70	12.99	12.75	13.46	12.73	12.65
11:00	13.35	14.13	12.62	13.00	12.58	14.18	12.60	12.95	13.07	12.94	12.89	13.00
11:30	12.53	13.32	12.87	13.35	12.93	12.55	12.99	13.01	12.83	13.77	13.02	12.58
12:00	12.62	12.56	12.56	13.33	13.40	12.66	12.61	12.57	13.02	12.89	13.05	13.02
12:30	12.58	12.65	12.59	12.60	12.62	12.57	12.94	12.64	12.84	13.07	13.56	13.06
13:00	13.43	13.06	13.12	15.68	14.29	12.76	12.79	13.84	12.93	12.96	13.72	12.64
13:30	13.51	13.24	12.85	13.32	15.60	17.19	14.56	12.81	12.96	12.61	12.96	12.72
14:00	12.94	12.62	13.13	12.66	12.64	13.13	12.72	12.70	12.98	12.63	12.66	13.30
14:30	16.30	12.80	12.67	13.24	13.23	12.77	12.75	29.18	14.82	13.14	13.11	12.92
15:00	35.44	12.99	12.70	12.77	12.96	13.03	13.07	12.84	13.16	14.25	13.94	13.51
15:30	12.70	13.09	13.28	13.02	13.03	20.97	17.23	13.08	13.18	13.73	12.70	16.54
16:00	13.05	12.68	13.14	12.73	12.70	15.30	68.66	13.17	13.40	12.98	13.34	12.90
16:30	13.25	13.63	12.68	13.31	12.99	12.66	64.80	13.03	13.44	12.66	13.00	12.99
17:00	12.73	12.97	13.04	13.36	13.12	13.71	59.59	13.13	13.10	12.69	13.09	12.68
17:30	13.38	13.41	13.58	65.19	12.95	12.74	31.13	13.34	13.22	13.78	12.89	13.05
18:00	13.00	12.59	12.55	26.15	12.60	12.54	12.54	12.55	12.54	13.01	12.86	12.54
18:30	12.49	13.61	12.52	12.61	12.53	12.51	12.55	12.53	12.55	12.52	13.13	12.52

Tabela 13 Punkt pomiarowy 3 – czas przejazdu – wszystkie pojazdy [opracowanie własne]

	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	100%
6:00	38.32	38.57	38.46	38.19	38.17	38.11	38.17	38.26	38.14	38.33	38.04	38.89
6:30	37.83	37.58	38.08	37.82	37.43	38.01	38.2	37.81	37.69	38.12	38.22	38.28
7:00	38.8	38.41	38.11	38.77	38.24	38.88	38.44	38.64	38.48	39.1	38.58	38.61
7:30	39.37	38.93	39.1	39.06	39	38.78	37.97	38.31	38.41	38.46	38.62	38.04
8:00	37.65	38.01	37.71	38.05	38.05	37.74	37.78	37.85	38.01	38.51	37.51	38.33
8:30	38.19	37.59	38.38	37.78	37.62	37.97	37.85	37.78	38.34	37.93	38.3	38.26
9:00	40.33	40.1	41.14	39.76	39.81	41.04	40.92	40.33	40.76	41.81	40.8	39.39
9:30	38.95	38.5	39.36	38.05	38.24	39.03	38.54	39.62	39.95	39.34	39.43	41.47
10:00	40.01	39.09	39.4	39.66	39.09	39.41	38.39	38.4	38.54	38.13	38.67	37.77
10:30	39.21	38.88	39.73	37.68	38.96	39.29	38.42	38.82	38.67	39.46	39.9	41.4
11:00	39.13	39.72	38.8	38.4	38.54	39.36	39.62	39.73	39.49	39.31	39.04	38.91
11:30	39.47	39.39	38.94	40.08	39.12	38.28	39.47	40.12	39.52	39.13	40	39.35
12:00	39.3	39.41	38.53	38.97	38.97	38.45	38.96	38.33	38.8	38.35	39.78	38.75
12:30	39.28	39.3	40.3	39.01	40.2	38.86	39.36	39.57	39.77	38.56	39.66	38.75
13:00	39.66	40.15	39.95	40.49	39.92	39.95	40.22	40.31	39.75	40.07	41.4	40.52
13:30	39.8	39.95	39.67	40.68	38.42	39.9	40.61	39.21	39.25	38.81	38.46	39.2
14:00	40.37	39.74	40.79	41.44	40.21	41.12	41.79	41.03	41	39.73	40.94	40.02
14:30	39.71	39.09	39.27	39.1	39.48	38.57	38.93	39.23	38.59	38.77	38.64	39.27
15:00	39.61	39.93	39.44	39.95	39.68	40.26	39.76	40.31	39.32	39.76	39.88	39.55
15:30	38.31	39.06	39.01	38.62	38.69	39.4	39.52	39.18	38.83	39.39	39.35	39.67
16:00	38.49	40	39.98	39.25	39.98	39.79	38.93	38.78	39.07	39.86	40.32	38.97
16:30	39.68	39.28	40.03	39	40.1	39.98	40.79	39.65	40.03	39.36	39.05	39.51
17:00	38.95	39.17	38.79	38.8	39.24	39.01	39.25	38.72	40.12	40	40.02	40.08
17:30	40.3	39.46	40.02	39.51	39.86	40.6	41.15	39.62	40.05	38.64	40.42	40.35
18:00	39.06	39.55	38.9	39.1	38.63	38.05	38.9	39.24	38.45	38.1	37.9	38.15
18:30	37.38	37.25	38.03	38.36	37.55	37.99	37.59	37.99	37.97	38.14	38.52	40.49

Tabela 14 Punkt pomiarowy 4 – czas przejazdu – wszystkie pojazdy [opracowanie własne]

	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	100%
6:00	47.51	47.18	47.14	47.49	47.24	46.96	47.29	47.33	46.77	47.76	47.1	47.55
6:30	46.04	47.04	46.1	46.17	46.2	45.95	45.59	45.42	45.83	46.28	46.28	46.01
7:00	48.86	50.03	49.31	49.81	49.08	49.03	48.87	48.8	50.66	49.7	50.07	49.04
7:30	49.49	49.34	49.57	48.29	49.98	49.12	48.99	49.04	48.7	48.97	49.12	49.01
8:00	46.64	46.86	46.88	46.53	47.28	46.62	46.88	45.72	45.81	46.42	46.76	46.61
8:30	48.36	48.55	47.75	48.5	47	47.96	49.06	47.8	48.41	47.64	48.24	48.48
9:00	51.42	50.6	50.12	51.73	50.91	50.7	51.65	51.83	51.22	51.77	50.45	51.83
9:30	51.99	51.91	51.52	49.89	51.2	51.08	51.54	50.25	51.4	50.08	52.9	50.92
10:00	52.46	51.73	50.39	51.82	50.66	51.65	51.63	50.63	50.01	50.13	50.08	51.41
10:30	52.65	51.64	52.08	53.75	50.8	52.34	51.3	51.56	51.97	51.8	52.45	52.22
11:00	52.18	52.29	53.39	51.49	52.8	51.64	52.08	50.16	51.69	51.29	51.53	50.63
11:30	50.94	52	51.92	51.25	51.72	51.3	52.18	51.61	52.61	52.43	53.54	52.24
12:00	49.23	48.05	49.26	48.33	48.79	48.51	48.19	49.52	48.4	49.64	49.47	48.76
12:30	49.99	49.94	50.45	50.49	51.81	50.28	49.81	51.12	50.31	50.57	51.64	50.51
13:00	55.83	59.09	57.68	56.33	58.39	57.99	56.83	56.43	60.36	57.85	56.65	57.02
13:30	53.69	55.72	55.12	53.78	55.68	55.07	54.28	54.68	60.99	53.8	54.74	53.46
14:00	53.62	53.13	52.87	53.53	54.47	54.3	53.48	55.4	55.24	53.99	53.85	54.72
14:30	54.56	53.67	53.45	53.86	52.91	53.17	52.77	55.12	54.01	53.64	53.19	52.94
15:00	52.74	53.18	52.97	52.48	52.59	53.12	53.01	51.87	53.04	52.83	52.66	52.27
15:30	53.52	54.35	52.6	53.98	54.32	54.32	53.35	54.64	53.8	53.62	53.28	54.31
16:00	57.42	58.67	56.94	56.24	58.51	58.46	121.68	57.39	58.56	58.86	59.65	57.53
16:30	59.14	56.2	58.06	57.15	59.02	61.04	184.37	59.43	65.64	60.43	56.86	57.2
17:00	58.11	58.73	58.92	59.75	58.4	58.19	106.7	56.06	57.21	59.43	57.26	57.32
17:30	69.98	65.62	73.06	84.85	69.34	70.76	94.57	67.58	70.58	72.49	74.76	69.78
18:00	56.18	54.78	57.21	105.54	54.46	56.92	65.78	54.32	54.79	55.65	57.13	55.89
18:30	51.98	51.69	52.82	51.61	50.82	51.97	53.04	52.29	51.75	52.95	52.17	51.86

Tabela 15 Punkt pomiarowy 5 – czas przejazdu – wszystkie pojazdy [opracowanie własne]

	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	100%
6:00	25.57	25.62	25.5	25.61	25.63	25.54	25.68	25.64	25.71	25.58	25.73	25.85
6:30	25.49	25.53	25.57	25.52	25.46	25.68	25.5	25.52	25.39	25.53	25.57	25.65
7:00	25.47	25.63	25.58	25.67	25.56	25.6	25.81	25.57	25.65	25.78	25.73	25.79
7:30	25.59	25.58	25.63	25.54	25.72	25.64	25.68	25.65	25.74	25.84	25.78	25.78
8:00	25.55	25.6	25.61	25.68	25.63	25.55	25.53	25.56	25.69	25.68	25.67	25.64
8:30	25.42	25.48	25.52	25.64	25.6	25.66	25.59	25.6	25.44	25.6	25.62	25.71
9:00	25.57	25.63	25.58	25.45	25.64	25.63	25.62	25.5	25.52	25.46	25.55	25.69
9:30	25.53	25.4	25.57	25.48	25.54	25.5	25.6	25.62	25.39	25.46	25.47	25.69
10:00	25.42	25.43	25.47	25.34	25.48	25.4	25.48	25.47	25.44	25.46	25.41	25.48
10:30	25.54	25.54	25.49	25.53	25.53	25.49	25.56	25.53	25.57	25.51	25.48	25.52
11:00	25.51	25.48	25.49	25.51	25.47	25.46	25.35	25.47	25.57	25.52	25.52	25.59
11:30	25.43	25.49	25.52	25.56	25.49	25.54	25.53	25.52	25.49	25.52	25.66	25.57
12:00	25.38	25.51	25.44	25.46	25.42	25.47	25.55	25.41	25.38	25.51	25.55	25.55
12:30	25.39	25.38	25.53	25.45	25.48	25.42	25.49	25.48	25.42	25.46	25.48	25.45
13:00	25.43	25.41	25.5	25.53	25.46	25.55	25.59	25.59	25.53	25.58	25.6	25.58
13:30	25.44	25.5	25.51	25.48	25.5	25.5	25.5	25.54	25.55	25.42	25.47	25.5
14:00	25.51	25.43	25.41	25.38	25.51	25.44	25.45	25.47	25.41	25.51	25.59	25.45
14:30	25.5	25.52	25.54	25.51	25.45	25.42	25.51	25.61	25.47	25.52	25.52	25.49
15:00	25.5	25.45	25.39	25.48	25.45	25.43	25.42	25.48	25.43	25.48	25.46	25.5
15:30	25.54	25.43	25.51	25.39	25.39	25.53	25.38	25.53	25.57	25.57	25.52	25.58
16:00	25.43	25.49	25.51	25.55	25.41	25.42	25.52	25.54	25.51	25.58	25.49	25.66
16:30	25.42	25.44	25.43	25.4	25.45	25.52	25.56	25.51	25.53	25.49	25.49	25.56
17:00	25.46	25.46	25.37	25.41	25.36	25.35	25.26	25.33	25.41	25.47	25.42	25.39
17:30	25.48	25.37	25.5	25.5	25.46	25.46	25.48	25.47	25.54	25.46	25.53	25.56
18:00	25.35	25.24	25.25	25.26	25.21	25.26	25.43	25.37	25.3	25.24	25.49	25.5
18:30	25.13	25.1	25.31	25.36	25.32	25.15	25.24	25.17	25.39	25.29	25.38	25.39

Tabela 16 Punkt pomiarowy 6 – czas przejazdu – wszystkie pojazdy [opracowanie własne]

	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	100%
6:00	24.63	24.65	24.64	24.65	24.65	24.64	24.64	24.64	24.63	24.63	24.64	24.63
6:30	24.87	24.87	24.88	24.88	24.87	24.88	24.87	24.87	24.87	24.89	24.86	24.88
7:00	24.82	24.8	24.81	24.83	24.82	24.84	24.81	24.86	24.82	24.84	24.85	24.81
7:30	24.61	24.63	24.63	24.65	24.62	24.59	24.66	24.64	24.66	24.64	24.66	24.66
8:00	24.77	24.77	24.77	24.76	24.76	24.76	24.72	24.76	24.78	24.76	24.76	24.77
8:30	24.54	24.57	24.54	24.61	24.58	24.58	24.61	24.58	24.51	24.57	24.61	24.56
9:00	24.76	24.76	24.76	24.73	24.75	24.82	24.82	24.78	24.79	24.82	24.76	24.79
9:30	24.75	24.75	24.75	24.72	24.75	24.74	24.76	24.81	24.84	24.78	24.78	24.72
10:00	24.99	24.98	24.91	24.96	25.01	24.96	24.91	24.86	24.95	24.86	24.86	24.92
10:30	24.82	24.77	24.77	24.8	24.84	24.83	24.82	24.75	24.76	24.8	24.82	24.76
11:00	24.63	24.74	24.73	24.68	24.63	24.65	24.66	24.67	24.63	24.6	24.74	24.69
11:30	24.66	24.7	24.7	24.73	24.69	24.73	24.69	24.74	24.61	24.63	24.61	24.62
12:00	24.8	24.8	24.83	24.82	24.84	24.84	24.83	24.83	24.87	24.85	24.83	24.85
12:30	24.68	24.72	24.74	24.75	24.67	24.73	24.71	24.72	24.73	24.69	24.66	24.76
13:00	24.91	24.88	24.94	24.96	24.9	24.9	24.89	24.9	24.92	24.87	24.9	24.88
13:30	24.88	24.9	24.85	24.85	24.9	24.82	24.85	24.78	24.86	24.82	24.89	24.9
14:00	24.7	24.69	24.7	24.66	24.68	24.63	24.65	24.67	24.68	24.7	24.7	24.69
14:30	24.67	24.67	24.65	24.65	24.72	24.73	24.67	24.69	24.71	24.72	24.67	24.64
15:00	24.52	24.51	24.49	24.5	24.45	24.42	24.48	24.43	24.48	24.44	24.46	24.48
15:30	24.67	24.75	24.67	24.73	24.69	24.72	24.71	24.69	24.73	24.71	24.72	24.72
16:00	24.68	24.68	24.67	24.67	24.65	24.72	24.65	24.7	24.71	24.66	24.7	24.64
16:30	24.79	24.79	24.8	24.76	24.77	24.72	24.76	24.71	24.77	24.74	24.77	24.74
17:00	24.79	24.68	24.69	24.7	24.63	24.65	24.69	24.65	24.75	24.75	24.77	24.7
17:30	24.75	24.79	24.82	24.81	24.73	24.78	24.77	24.75	24.77	24.79	24.8	24.75
18:00	24.62	24.65	24.67	24.6	24.6	24.74	24.66	24.61	24.64	24.58	24.55	24.61
18:30	24.8	24.8	24.8	24.82	24.82	24.81	24.74	24.81	24.74	24.82	24.83	24.83

- **Czasy przejazdów samochodów ciężarowych**

Tabela 17 Punkt pomiarowy 1– czas przejazdu – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	100%
6:00	29.79	25.79	26.23	24.34	31.07	25.95	27.32	27.51	26.09	28.81	26.7	29.33
6:30	31.86	32.55	31.09	33.09	31.88	29.8	29.52	31.84	29.63	28.77	28.5	31.8
7:00	28.73	29.38	28.53	30.01	30.94	32.75	30.24	30.34	29.83	30.47	27.72	29.75
7:30	27.31	27.87	26.83	26.61	28.93	29.55	26.07	25.35	26.68	27.18	26.91	27.28
8:00	28.07	26.86	29.53	29.75	29.95	26.95	26.64	28.99	27.66	33.05	31.56	28.49
8:30	27.06	28.47	28.39	26.59	26.85	27.03	29.96	26.08	28.91	30.38	25.52	34.09
9:00	18.7	21.68	19.21	20.54	20.81	20.57	19.26	21.54	20.15	19.69	18.9	22.18
9:30	20.69	19.82	17.89	20.29	19.8	21.4	20.22	19.34	20.17	19.25	20.08	21
10:00	18.29	18.68	19.28	18.15	18.35	17.24	18.33	18.92	18.82	17.29	18.21	18.88
10:30	19.87	19.58	19.91	20.32	19.72	19.35	19.54	17.72	18.83	18.56	19.64	20.27
11:00	19.68	19.28	18.22	19.91	20.12	19.11	19.22	17.36	19.32	19.6	18.17	19.93
11:30	20.81	20.55	19.43	17.94	18.51	18.13	20.3	19.96	18.49	21.23	18.32	19.06
12:00	20.25	19.84	20.42	20.74	19.87	19.67	20.67	21.71	17.71	19.39	19.39	20
12:30	17.84	18.98	18.51	19.85	17.18	16.97	18.09	17.07	17.82	18.96	17.72	17.76
13:00	19.49	19.39	19.74	19.59	20.15	19.61	18.53	19.52	19.32	16.58	19.61	17.59
13:30	19.29	21.32	18.71	20.86	20.36	19.27	21.54	20.62	24.89	21.04	18.54	17.96
14:00	18.87	20.8	17.54	19.98	21.02	19.21	21.82	18.59	17.03	20.12	20.2	18.63
14:30	16.84	16.03	16.67	16.49	17.69	17.98	15.67	17.38	17.05	15.22	16.47	16.99
15:00	19.67	21.37	19.07	17.94	18.33	19.22	18.94	18.02	19.06	17.64	17.49	18.47
15:30	20.05	19.32	20.2	18.85	19.21	21.12	18.21	19.88	19.18	19.66	18.42	20.3
16:00	17.61	18.39	19.84	18.57	19.4	18.62	19.18	17.7	19.87	18.06	18.18	18.13
16:30	18.28	24.5	21.42	17.9	25.44	18.07	19.61	16.63	19.85	18.73	21.2	16.79
17:00	20.41	18.94	17.03	19.52	20.04	19.04	18.84	19.98	18.09	20.41	19.2	18.99
17:30	17.92	19.1	18.5	19.32	17.39	19.14	17.89	18.93	19.73	17.38	18.44	19.26
18:00	17.03	16.29	20.09	17.9	17.74	17.89	16.6	19.57	16.32	18.51	18.58	16.99
18:30	19.64	19.45	18.51	19.2	20.15	18.94	20.77	19.03	21.6	19.23	19.54	20.2

Tabela 18 Punkt pomiarowy 2 – czas przejazdu – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	100%
6:00	12.97	13.01	12.96	12.94	12.92	12.88	13.03	12.98	12.95	13.01	13.07	12.92
6:30	12.55	12.76	12.78	12.6	12.83	12.67	12.9	12.63	12.66	12.65	12.54	12.71
7:00	12.89	12.82	12.71	12.59	12.52	13.22	12.72	12.64	12.71	12.71	12.62	12.83
7:30	13.45	12.89	12.81	12.81	22.8	13.11	12.69	12.98	12.76	12.82	13.27	13.04
8:00	12.78	21.47	12.63	12.74	12.86	12.75	26.91	12.51	12.73	17.1	12.81	12.71
8:30	12.76	12.66	12.72	12.8	12.71	12.75	12.64	12.74	14.72	18.3	12.67	12.82
9:00	12.9	12.76	14.27	12.78	12.72	12.94	12.78	12.78	12.82	12.78	12.82	12.93
9:30	12.95	12.81	12.73	12.71	12.78	12.74	12.97	12.88	12.77	12.97	12.73	13.3
10:00	13.08	12.79	12.78	12.83	12.68	12.62	14.4	12.84	12.85	12.55	12.71	12.87
10:30	12.88	12.77	12.77	12.76	12.64	12.79	13.1	12.93	12.96	12.95	12.88	13.03
11:00	12.78	12.6	12.75	12.85	12.64	12.6	12.75	17.57	12.64	12.68	12.56	12.64
11:30	12.64	12.7	12.72	12.54	12.69	12.51	12.58	12.59	15.17	12.44	12.63	12.75
12:00	12.87	12.66	12.68	12.56	19.02	12.68	12.84	12.91	17.97	12.68	12.9	12.66
12:30	12.82	12.78	12.97	12.88	12.71	12.71	12.77	12.92	12.72	12.76	12.58	19.27
13:00	13.11	12.78	12.77	14.51	14.69	12.97	12.55	15.06	12.75	12.65	12.76	12.7
13:30	12.81	12.86	12.9	12.81	33.34	40.72	18.04	13.05	18.12	12.7	12.78	12.87
14:00	13.04	12.82	22.08	13.02	12.72	12.97	12.64	13.13	12.97	12.78	13.03	13.76
14:30	25.37	13.05	13.12	12.98	12.9	13.07	12.93	67.27	21.51	12.91	12.84	12.92
15:00	92.47	12.79	12.98	12.99	12.79	12.92	13.14	12.74	13.6	14.59	12.85	13.13
15:30	12.89	12.88	12.88	12.69	12.9	53.42	30.14	13.06	12.82	13.64	12.81	26.32
16:00	12.87	12.89	13.21	12.78	12.79	17.18	228.62	13.06	13.02	12.9	12.82	13.03
16:30	13.73	13.33	12.84	20.22	12.92	12.88	157.07	13.01	12.84	12.9	12.75	20.58
17:00	12.72	12.75	12.69	20.99	12.97	12.71	123.74	12.97	13.24	12.92	12.99	13.11
17:30	20.32	12.98	12.94	186.29	12.95	12.92	44.35	13.33	13.38	13.29	13.1	13.15
18:00	12.67	12.51	12.48	66.65	12.72	12.82	12.71	12.79	12.89	12.79	12.55	12.57
18:30	12.55	12.85	12.49	12.52	12.5	12.56	12.5	12.57	12.63	12.7	12.67	12.68

Tabela 19 Punkt pomiarowy 3 – czas przejazdu – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	100%
6:00	40.51	35.69	39.21	37.93	36.83	41.05	40.08	37.83	35.95	35.94	39.74	38.22
6:30	38.11	40.87	39.14	40.91	39.18	36.42	35.8	35.69	36.61	37.6	39.83	38.04
7:00	36.55	39.66	36.75	38.67	39.94	36.32	37.01	37.21	38.88	38.24	39.47	38.64
7:30	35.62	39.14	38.79	39.96	41.04	37.98	36	35.7	39.7	35.22	35.83	35.36
8:00	35.12	37.41	37.66	38.73	36.48	37.09	37.42	34.95	35.71	35.66	38.12	37.26
8:30	39.01	39.6	40.05	37.96	36.62	36.25	36.86	35.86	37.5	35.38	38.09	39.37
9:00	39.04	42.98	42.49	35.35	40.2	35.38	54.18	35.25	36.13	34.97	41.51	37.64
9:30	42.46	43.62	34.3	37.53	38.98	41.43	39.75	38.89	39.53	42.64	40.48	34.75
10:00	38.4	35.27	45.22	35.68	34.66	34.99	35.05	41.29	37.08	34.98	46.29	35.29
10:30	37.21	40.75	36.61	35.8	37.76	37.6	36.01	47.98	35.6	36.1	40.22	37.53
11:00	38.2	35.35	38.45	41.73	36.36	40.5	42.02	35.98	35.66	36.81	34.69	37.95
11:30	41.11	40.4	38.17	35.43	40.03	39.12	43.15	39.71	37.63	37.69	35.71	40.47
12:00	38.63	42.98	35.56	34.91	37.96	35.81	35.88	34.74	36.47	39.77	44.92	37.62
12:30	34.31	34.87	37.77	45.85	41.58	39.63	38.46	37.29	38.23	41.4	34.53	35.2
13:00	40.57	36.39	35.85	45.03	38.25	36.15	36.67	35.76	46.65	44.37	37.27	38.11
13:30	40.68	40.98	37.95	40.27	36.94	35.24	35.84	38.38	36.18	35.43	38.4	44.64
14:00	38.81	35.56	45.29	37.3	35.97	36.94	44.61	52.11	37.8	39.78	45.29	40.68
14:30	35.23	36.7	41.97	43.62	39.08	37.06	37.24	41.66	42.33	43.84	35.86	38.77
15:00	40.06	35.71	38.91	40.05	39.7	40.27	35.45	36.64	45.36	39.28	36.25	35.41
15:30	37.51	51.34	35.62	36.57	34.93	35.58	39.57	35.61	34.55	36.51	37.8	34.97
16:00	38.12	36.73	45.33	34.89	39.73	34.83	34.52	43.72	42.56	35.29	44.36	43.77
16:30	33.02	34.28	51.63	43.59	34.88	35.27	49.46	35.33	36.2	46.97	42.05	35.03
17:00	34.93	35.41	35.22	42.68	35.26	36.13	35.84	35.74	44.47	38.93	34.79	39.33
17:30	40.64	38.03	40.01	45.76	40.34	37.97	36.93	41.15	42.23	41.32	37.9	43.38
18:00	43.53	34.95	35.37	34.72	40.89	35.29	34.75	40.53	34.12	34.93	35.07	35.17
18:30	40.58	35.24	34.64	44.06	35.59	35.65	35.69	42.16	39.65	35.24	34.66	57.1

Tabela 20 Punkt pomiarowy 4 – czas przejazdu – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	100%
6:00	53.74	51.21	50.86	50.58	52.01	50.54	51.72	49.51	50.57	46.89	47.94	58.37
6:30	40.31	56.1	53.74	47.12	53.26	48.81	44.7	48.5	52.7	49.02	44.54	45.06
7:00	56.81	52.35	50.9	44.87	53.63	49.09	46.18	49.39	49.56	54.46	49.98	56.03
7:30	57.69	43.15	53.94	53.55	51.31	48.32	67.76	54.79	51.39	54.09	50.39	53.11
8:00	50.44	49.2	44.69	46.23	44.05	49.72	45.55	45.08	47.19	51.15	46.27	59.21
8:30	50.2	57.85	51.14	68.5	47.44	54.28	51.87	47.23	59.3	44.14	52.72	41.95
9:00	50.34	59.55	47.8	50.68	54.54	54	49.78	59.78	51.26	48.12	59.72	55.97
9:30	53.65	53.53	50.6	45.1	52.11	68.56	52.83	46.39	55.14	47.86	54.41	49.37
10:00	49.62	55.22	58.51	63.71	52.25	51.69	52.65	40.2	42.59	59.49	46.33	52.77
10:30	47.96	57.37	60.11	52.19	53.02	53.72	65.19	43.59	58.91	59.41	51.91	64.44
11:00	48.31	47.73	56.61	48.94	53.72	55.14	57.24	61.91	53.35	49.77	63.77	65.52
11:30	54.45	47.49	41.64	61.25	46.77	55.08	47.96	67.03	49.8	49.5	58.36	51.27
12:00	41.86	49.26	54.32	43.19	46.03	47.98	61.23	58.15	39.05	55.6	59.3	48.22
12:30	57.53	56.54	48.31	58.05	69.97	60.52	46.69	50.83	47.22	46.72	67.7	45.46
13:00	46.97	72.35	64.18	57.76	66.73	61.27	60.59	55.51	74.14	60.92	50.83	57.32
13:30	54.05	66.86	59.24	58.24	52.16	64.82	52.85	52.72	74.74	53.82	55.49	50.52
14:00	63.48	69.27	57.27	60.71	59.13	61.84	56.68	57.14	62.3	54.13	63.57	65.62
14:30	62.34	61.9	55.44	67.85	59.31	51.81	55.79	60.47	64.65	44.59	53	61.68
15:00	54.9	56.01	45.85	66.54	63.06	47.76	46.2	44.34	56.76	57.7	61.47	54.19
15:30	58.55	64.02	54.85	52.21	49.17	58.16	55.92	68.43	60.15	58.62	57.58	75.45
16:00	64.64	81.19	76.81	62.94	69.14	59	180.96	62.24	62.86	87.65	72.82	59.25
16:30	69.21	55.76	70.19	57.73	45.68	65.3	228.8	72.44	75.56	70.56	60.28	70.43
17:00	61.44	65.96	65.81	58.71	62.98	62.76	108.7	65.16	76.35	69.68	59.61	62.37
17:30	83.57	52.77	77.01	98.51	82.29	83.18	76.63	70.27	87.22	104.98	92.31	97.03
18:00	81.2	73.31	67.87	165.69	56.18	78	70.34	57.31	65.78	50.67	73.17	74.2
18:30	50.55	68.15	56.74	47.38	41.73	44.82	62.93	51.53	54.38	57.37	63.78	54.01

Tabela 21 Punkt pomiarowy 5 – czas przejazdu – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	100%
6:00	26.99	26.85	26.61	26.87	26.67	26.54	26.82	26.98	26.83	26.96	26.79	27.1
6:30	27.22	26.94	27.03	26.92	26.63	27.08	27.2	26.85	26.86	27.07	26.89	26.98
7:00	26.6	26.9	26.85	27.01	26.84	27.08	27.23	26.72	26.94	27.08	27.06	26.84
7:30	26.81	27.03	27.01	26.82	26.96	26.88	26.99	26.9	27.24	27.19	27.05	26.92
8:00	26.9	26.85	26.98	26.94	26.88	26.69	26.74	26.75	26.83	26.73	26.8	26.87
8:30	26.47	26.8	26.69	26.97	26.83	27.01	27.06	26.83	26.72	26.68	26.98	26.87
9:00	27.23	27.14	26.77	26.76	27.36	27.2	27.09	26.73	26.81	26.69	26.97	27.05
9:30	27.22	26.58	27.12	26.86	27	26.94	27.32	27.16	26.65	26.85	26.62	27.18
10:00	26.63	26.86	26.94	26.65	26.76	26.62	26.73	26.51	26.57	27.09	26.95	26.92
10:30	26.71	27.02	26.86	27.01	27.05	26.74	26.84	26.51	26.53	26.78	26.67	26.99
11:00	27.3	26.52	26.89	27.49	26.79	26.82	26.65	26.87	26.73	26.99	26.86	26.94
11:30	27.02	26.86	26.48	26.88	27.18	27.02	26.66	26.95	26.98	26.94	27.13	26.87
12:00	26.3	26.81	26.9	26.8	26.64	26.92	27.15	26.48	27.07	26.8	26.93	27.03
12:30	26.89	27.17	27	27.08	26.98	26.67	26.95	27.03	26.72	27.22	27.02	26.75
13:00	26.52	26.81	26.61	27.11	26.72	26.9	27.09	27.06	27.13	26.88	26.77	26.75
13:30	27.27	26.56	27.34	27.07	27.41	26.82	26.99	27.01	26.96	26.56	27.18	27.03
14:00	27.04	26.69	26.69	26.7	26.92	26.75	26.84	26.84	26.46	27.21	26.98	27.01
14:30	26.62	26.85	27.06	26.89	26.87	26.6	27.07	27.17	26.53	27.24	26.76	27.01
15:00	26.91	26.9	26.69	27.22	27.31	26.9	26.81	26.67	26.73	26.68	26.51	26.69
15:30	26.9	26.77	27.37	27.18	26.79	26.93	26.35	26.94	27.03	26.94	27.26	26.97
16:00	26.46	26.67	26.57	27.06	26.68	26.71	26.79	26.97	26.91	26.67	27.13	27.14
16:30	26.77	26.85	26.64	26.5	26.86	26.5	26.87	26.78	27.17	26.79	26.81	27.33
17:00	26.83	26.8	26.62	27.18	27.03	26.83	26.63	26.75	26.74	26.61	26.75	26.57
17:30	26.71	26.43	26.8	27.21	26.81	26.39	26.81	26.66	27.09	26.53	27.03	27.15
18:00	26.92	26.99	26.39	26.58	26.05	27.15	26.33	26.84	26.98	26.56	27.13	26.48
18:30	26.84	26.02	26.93	27.5	26.82	26.48	26.96	27.56	27.19	26.51	26.64	26.82

Tabela 22 Punkt pomiarowy 6 – czas przejazdu – pojazdy ciężarowe [opracowanie własne]

	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	100%
6:00	24.63	24.65	24.64	24.65	24.65	24.64	24.64	24.64	24.63	24.63	24.64	24.63
6:30	24.87	24.87	24.88	24.88	24.87	24.88	24.87	24.87	24.87	24.89	24.86	24.88
7:00	24.82	24.8	24.81	24.83	24.82	24.84	24.81	24.86	24.82	24.84	24.85	24.81
7:30	24.61	24.63	24.63	24.65	24.62	24.59	24.66	24.64	24.66	24.64	24.66	24.66
8:00	24.77	24.77	24.77	24.76	24.76	24.76	24.72	24.76	24.78	24.76	24.76	24.77
8:30	24.54	24.57	24.54	24.61	24.58	24.58	24.61	24.58	24.51	24.57	24.61	24.56
9:00	24.76	24.76	24.76	24.73	24.75	24.82	24.82	24.78	24.79	24.82	24.76	24.79
9:30	24.75	24.75	24.75	24.72	24.75	24.74	24.76	24.81	24.84	24.78	24.78	24.72
10:00	24.99	24.98	24.91	24.96	25.01	24.96	24.91	24.86	24.95	24.86	24.86	24.92
10:30	24.82	24.77	24.77	24.8	24.84	24.83	24.82	24.75	24.76	24.8	24.82	24.76
11:00	24.63	24.74	24.73	24.68	24.63	24.65	24.66	24.67	24.63	24.6	24.74	24.69
11:30	24.66	24.7	24.7	24.73	24.69	24.73	24.69	24.74	24.61	24.63	24.61	24.62
12:00	24.8	24.8	24.83	24.82	24.84	24.84	24.83	24.83	24.87	24.85	24.83	24.85
12:30	24.68	24.72	24.74	24.75	24.67	24.73	24.71	24.72	24.73	24.69	24.66	24.76
13:00	24.91	24.88	24.94	24.96	24.9	24.9	24.89	24.9	24.92	24.87	24.9	24.88
13:30	24.88	24.9	24.85	24.85	24.9	24.82	24.85	24.78	24.86	24.82	24.89	24.9
14:00	24.7	24.69	24.7	24.66	24.68	24.63	24.65	24.67	24.68	24.7	24.7	24.69
14:30	24.67	24.67	24.65	24.65	24.72	24.73	24.67	24.69	24.71	24.72	24.67	24.64
15:00	24.52	24.51	24.49	24.5	24.45	24.42	24.48	24.43	24.48	24.44	24.46	24.48
15:30	24.67	24.75	24.67	24.73	24.69	24.72	24.71	24.69	24.73	24.71	24.72	24.72
16:00	24.68	24.68	24.67	24.67	24.65	24.72	24.65	24.7	24.71	24.66	24.7	24.64
16:30	24.79	24.79	24.8	24.76	24.77	24.72	24.76	24.71	24.77	24.74	24.77	24.74
17:00	24.79	24.68	24.69	24.7	24.63	24.65	24.69	24.65	24.75	24.75	24.77	24.7
17:30	24.75	24.79	24.82	24.81	24.73	24.78	24.77	24.75	24.77	24.79	24.8	24.75
18:00	24.62	24.65	24.67	24.6	24.6	24.74	24.66	24.61	24.64	24.58	24.55	24.61
18:30	24.8	24.8	24.8	24.82	24.82	24.81	24.74	24.81	24.74	24.82	24.83	24.83

Spis rysunków

RYSUNEK 1 PRĘDKOŚĆ, GĘSTOŚĆ INTENSYWNOŚĆ - WYKRES ZALEŻNOŚCI [99]	17
RYSUNEK 2 METODA BOW-TIE - ANALIZA KOLIZJI DROGOWEJ [OPRACOWANIE WŁASNE]	25
RYSUNEK 3 METODA BOW-TIE - ZMĘCZENIE LUB STRES JAKO PRZYCZYNA KOLIZJI DROGOWEJ [OPRACOWANIE WŁASNE].....	25
RYSUNEK 4 OGRANICZENIA CIĘŻARU POJAZDU W GDYNI [ŹRÓDŁO: WWW.ZDIZ.GDYNIA.PL]	27
RYSUNEK 5 DOBORY ROZKŁAD RUCHU NA SKRZYŻOWANIU JANKA WIŚNIEWSKIEGO - KWIATKOWSKIEGO. CZERWIEC 2017 GDYNIA, NATĘŻENIE POJAZDÓW NA OSI PIONOWEJ W ODNIESIENIU DO GODZINNYCH PRZEDZIAŁÓW CZASOWYCH NA OSI POZIOMEJ[86]	32
RYSUNEK 6 WRZESIEŃ 2016 WIM GDYNIA, LICZBA POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH (HGV) I OSOBOWYCH, DOBOWE NATĘŻENIE POJAZDÓW NA OSI PIONOWEJ W ODNIESIENIU DO DZIENNYCH INTERWAŁÓW CZASOWYCH NA OSI POZIOMEJ [OPRACOWANIE WŁASNE]	34
RYSUNEK 7 GRAF PRZEJŚĆ STANÓW SWOBODY RUCHU [OPRACOWANIE WŁASNE]	36
RYSUNEK 8 WYNIK ANALIZY SWOBODY RUCHU - WRZESIEŃ 2016 GDYNIA. [86]	37
RYSUNEK 9 SKRZYŻOWANIE JANKA WIŚNIEWSKIEGO - ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO. USYTUOWANIE WLOTÓW [WWW.MAPS.GOOGLE.COM]	40
RYSUNEK 10 BOX AND WHISKER PLOT - DANE ZE SKRZYŻOWANIA JANKA WIŚNIEWSKIEGO - ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO [88]	40
RYSUNEK 11 WYKRESY MODELU ARIMA[89]	44
RYSUNEK 12 CZAS PRZEJAZDU ANALIZA PORÓWNAWCZA UL. WŁADYSŁAWA IV W GDYNI, DŁUGOŚĆ CZASU PRZEJAZDU POMIĘDZY PUNKTAMI MELDUNKOWYMI AUTOBUSU W FORMACIE MM:SS NA OSI PIONOWEJ PRZEDZIAŁY CZASOWE W CIĄGU DOBY W FORMACIE HH:MM:SS NA OSI POZIOMEJ [90]	47
RYSUNEK 13 HISTOGRAM Z PRÓBY I GĘSTOŚĆ ROZKŁAD TRÓJKĄTNEGO[91]	48
RYSUNEK 14 MARKOWSKI MODEL STOCHASTYCZNY - ULICA JEDNOJEZDNIOWA [OPRACOWANIE WŁASNE]	54
RYSUNEK 15 MARKOWSKI MODEL STOCHASTYCZNY - ULICA DWUPASMOWA [OPRACOWANIE WŁASNE]	55
RYSUNEK 16 GRAF ZMIAN STANÓW NIEZAWODNOŚCIOWYCH SYSTEMU [OPRACOWANIE WŁASNE]	57
RYSUNEK 17 GRAF NIEZAWODNOŚCI OPERACYJNEJ [OPRACOWANIE WŁASNE]	60
RYSUNEK 18 GRAF OPERACYJNY SYSTEMU [OPRACOWANIE WŁASNE]	64
RYSUNEK 19 GRAF NIEZAWODNOŚCI DZIAŁANIA SYSTEMU, PRZYPADEK TRZECH STANÓW MARKOWA. [OPRACOWANIE WŁASNE]	66
RYSUNEK 20 PRZYKŁAD WYNIKÓW SYMULACJI, STAN POCZĄTKOWY – STAN 2. SYMULACJA MONTE CARLO[93]	69
RYSUNEK 21 PRZYKŁAD WYNIKÓW SYMULACJI, STAN POCZĄTKOWY – STAN 0. SYMULACJA MONTE CARLO[93]	70
RYSUNEK 22 PROSTOKĄTNY PRZYKŁAD MODELU SYSTEMU. [93]	70
RYSUNEK 23 UPROSZCZONY PRZYKŁAD STRUKTURY SZEREGOWEJ [OPRACOWANIE WŁASNE].....	75
RYSUNEK 24 UPROSZCZONY PRZYKŁAD STRUKTURY RÓWNOLEGŁEJ [OPRACOWANIE WŁASNE]	77
RYSUNEK 25 SYSTEM O UKŁADZIE DENDRYTOWYM [OPRACOWANIE WŁASNE]	79
RYSUNEK 26 SYSTEM DENDRYTOWY, PRZYKŁAD DOJAZDU DO TERMINAŁA KONTENEROWEGO [OPRACOWANIE WŁASNE]	81
RYSUNEK 27 SYSTEM DWUELEMENTOWY Z ZASTOSOWANIEM REZERWY GORĄCEJ [OPRACOWANIE WŁASNE]	86

RYSUNEK 28 SCHEMAT STRUKTURY MOSTKOWEJ - PUNKT POCZĄTKOWY ZOSTAŁ OZNACZONY OKRĘGIEM BEZ CZARNEGO WYPEŁNIENIA A PUNKT KOŃCOWY JAKO OKRĄG Z CZARNYM WYPEŁNIENIEM [OPRACOWANIE WŁASNE].....	88
RYSUNEK 29 WYCINEK SIECI TRANSPORTOWEJ - OBWODNICA TRÓJMIASTA [91]	105
RYSUNEK 30 HISTOGRAM DLA OPÓŹNIEŃ N I WYKRES KWANTYLOWY[92].....	107
RYSUNEK 31 WYKRES DOPASOWANEGO MODELU[92]	107
RYSUNEK 32 WYNIKI GĘSTOŚCI DLA UDZIAŁU PROCENTOWEGO 0,10,30,50,70,100%[92]	108
RYSUNEK 33 WYCINEK MST MIASTA GDYNIA PODDANEGO ANALIZIE POPRZEZ MODELOWANIE SYMULACYJNE [OPRACOWANIE WŁASNE]	110
RYSUNEK 34 SKRZYŻOWANIE KWIATKOWSKIEGO – KONTENEROWA [WWW.MAPS.GOOGLE.COM]	111
RYSUNEK 35 KWIATKOWSKIEGO - KONTENEROWA POMIAR - SZCZYT PORANNY 07:20 - 08:20, NATĘŻENIE POJAZDÓW NA OSI POZIOMEJ Z ROZRÓŻNIENIEM STRUKTURY KIERUNKOWEJ WLOTU NA OSI PIONOWEJ[OPRACOWANIE WŁASNE].....	112
RYSUNEK 36 KWIATKOWSKIEGO - KONTENEROWA POMIAR - SZCZYT POPOŁUDNIOWY 16:00 -17:00, NATĘŻENIE POJAZDÓW NA OSI POZIOMEJ Z ROZRÓŻNIENIEM STRUKTURY KIERUNKOWEJ WLOTU NA OSI PIONOWEJ [OPRACOWANIE WŁASNE]	112
RYSUNEK 37 NATĘŻENIA W INTERWAŁACH 15 MINUTOWYCH - SKRZYŻOWANIE KWIATKOWSKIEGO - KONTENEROWA SZCZYT PORANNY WLOT N [OPRACOWANIE WŁASNE].....	113
RYSUNEK 38 NATĘŻENIA W INTERWAŁACH 15 MINUTOWYCH - SKRZYŻOWANIE KWIATKOWSKIEGO - KONTENEROWA SZCZYT POPOŁUDNIOWY WLOT N [OPRACOWANIE WŁASNE]	114
RYSUNEK 39 KARTODIAGRAMY NATĘŻEŃ RUCHU, SKRZYŻOWANIE KWIATKOWSKIEGO – KONTENEROWA SZCZYT PORANNY (PRAWY), SZCZYT POPOŁUDNIOWY (LEWY) [OPRACOWANIE WŁASNE].....	115
RYSUNEK 40 KARTODIAGRAM - SZCZYT PORANNY SKRZYŻOWANIE KWIATKOWSKIEGO – KONTENEROWA – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE]	115
RYSUNEK 41 KARTODIAGRAM - SZCZYT POPOŁUDNIOWY SKRZYŻOWANIE KWIATKOWSKIEGO – KONTENEROWA – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE]	116
RYSUNEK 42 SKRZYŻOWANIE JANKA WIŚNIEWSKIEGO - GOŁĘBIA [WWW.GOOGLEMAPS.PL]	117
RYSUNEK 43 ROZRÓŻNIENIE KLAS POJAZDÓW NA SKRZYŻOWANIU JANKA WIŚNIEWSKIEGO – GOŁĘBIA, NATĘŻENIE POJAZDÓW Z ROZRÓŻNIENIEM NA KATEGORIE: P- PIESI, T-TRAMWAJE, M/R – MOTOCYKLE/ ROWERY, C/P- CIĘŻAROWE Z PRZYCZEPĄ, A – AUTOBUSY, C – POJAZDY CIĘŻAROWE, F – FURGONY, O - OSOBOWE [OPRACOWANIE WŁASNE]	118
RYSUNEK 44 PUNKTY POMIAROWE 1 I 2, ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO – ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU WYRAŻONY W SEKUNDACH NA OSI PIONOWEJ, PÓŁGODZINNE INTERWAŁY CZASOWE W CYKLU POMIAROWYM NA OSI POZIOMEJ [OPRACOWANIE WŁASNE]	121
RYSUNEK 45 PUNKTY POMIAROWE 3 I 4, ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO – ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU WYRAŻONY W SEKUNDACH NA OSI PIONOWEJ, PÓŁGODZINNE INTERWAŁY CZASOWE W CYKLU POMIAROWYM NA OSI POZIOMEJ [OPRACOWANIE WŁASNE]	122
RYSUNEK 46 POMIAROWE 5 I 6, JANKA WIŚNIEWSKIEGO – ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU WYRAŻONY W SEKUNDACH NA OSI PIONOWEJ, PÓŁGODZINNE INTERWAŁY CZASOWE W CYKLU POMIAROWYM NA OSI POZIOMEJ [OPRACOWANIE WŁASNE]	123
RYSUNEK 47 SKRZYŻOWANIE JANKA WIŚNIEWSKIEGO - ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO [WWW.MAPS.GOOGLE.COM]	123

RYSUNEK 48 WLOT ZACHODNI W – ŚREDNIA DŁUGOŚĆ KOLEJKI NA WLOCIE [M] NA OSI PIONOWEJ, PÓŁGODZINNE INTERWAŁY CZASOWE NA OSI POZIOMEJ – STAN ISTNIEJĄCY [OPRACOWANIE WŁASNE]	124
RYSUNEK 49 WLOT WSCHODNI E – ŚREDNIA DŁUGOŚĆ KOLEJKI NA WLOCIE [M] NA OSI PIONOWEJ, PÓŁGODZINNE INTERWAŁY CZASOWE NA OSI POZIOMEJ – STAN ISTNIEJĄCY [OPRACOWANIE WŁASNE]	125
RYSUNEK 50 WLOT PÓŁNOCNY N – ŚREDNIA DŁUGOŚĆ KOLEJKI NA WLOCIE [M] NA OSI PIONOWEJ, PÓŁGODZINNE INTERWAŁY CZASOWE NA OSI POZIOMEJ – STAN ISTNIEJĄCY [OPRACOWANIE WŁASNE]	125
RYSUNEK 51 ŚREDNIA ILOŚĆ TLENKU WĘGLA [G] – STAN ISTNIEJĄCY JANKA WIŚNIEWSKIEGO – ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO [OPRACOWANIE WŁASNE]	126
RYSUNEK 52 ŚREDNIA ILOŚĆ TLENKU WĘGLA [G] – STAN ISTNIEJĄCY MORSKA – ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO [OPRACOWANIE WŁASNE]	126
RYSUNEK 53 ŚREDNIA ILOŚĆ TLENKÓW AZOTU [G] – STAN ISTNIEJĄCY – JANKA WIŚNIEWSKIEGO – ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO [OPRACOWANIE WŁASNE]	127
RYSUNEK 54 ŚREDNIA ILOŚĆ TLENKÓW AZOTU [G] – STAN ISTNIEJĄCY – MORSKA – ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO [OPRACOWANIE WŁASNE]	128
RYSUNEK 55 ŚREDNIE ZUŻYCIE PALIWA WYRAŻONE W LITRACH NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY – STAN ISTNIEJĄCY – JANKA WIŚNIEWSKIEGO – ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO [OPRACOWANIE WŁASNE]	128
RYSUNEK 56 ŚREDNIE ZUŻYCIE PALIWA WYRAŻONE W LITRACH NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ – STAN ISTNIEJĄCY – MORSKA – ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO	129
RYSUNEK 57 NATĘŻENIE POJAZDÓW NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY- STAN ISTNIEJĄCY JANKA WIŚNIEWSKIEGO – ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO [OPRACOWANIE WŁASNE]	130
RYSUNEK 58 NATĘŻENIE POJAZDÓW NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY - STAN ISTNIEJĄCY MORSKA – ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO [OPRACOWANIE WŁASNE]	130
RYSUNEK 59 LEVEL OF SERVICE NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY -STAN ISTNIEJĄCY [OPRACOWANIE WŁASNE].....	131
RYSUNEK 60 ODCINEK POMIAROWY 1 – ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU [S] NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY - ANALIZA PORÓWNAWCZA [OPRACOWANIE WŁASNE]	132
RYSUNEK 61 ODCINEK POMIAROWY 1 - ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU [S] NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY - ANALIZA PORÓWNAWCZA – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE]	133
RYSUNEK 62 ODCINEK POMIAROWY 2 - ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU [S] NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY - ANALIZA PORÓWNAWCZA [OPRACOWANIE WŁASNE]	134
RYSUNEK 63 ODCINEK POMIAROWY 2 - ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU [S] NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY - ANALIZA PORÓWNAWCZA – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE]	135
RYSUNEK 64 ODCINEK POMIAROWY 3 - ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU [S] NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY - ANALIZA PORÓWNAWCZA [OPRACOWANIE WŁASNE]	135

RYSUNEK 65 ODCINEK POMIAROWY 3 - ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU [s] NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY - ANALIZA PORÓWNAWCZA – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE]	136
RYSUNEK 66 ODCINEK POMIAROWY 4 - ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU [s] NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY - ANALIZA PORÓWNAWCZA [OPRACOWANIE WŁASNE]	137
RYSUNEK 67 ODCINEK POMIAROWY 4 - ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU [s] NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY - ANALIZA PORÓWNAWCZA – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE]	137
RYSUNEK 68 ODCINEK POMIAROWY 5 - ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU [s] NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY - ANALIZA PORÓWNAWCZA [OPRACOWANIE WŁASNE]	138
RYSUNEK 69 ODCINEK POMIAROWY 5 - ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU [s] NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY - ANALIZA PORÓWNAWCZA – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE]	139
RYSUNEK 70 ODCINEK POMIAROWY 6 - ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU [s] NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY - ANALIZA PORÓWNAWCZA [OPRACOWANIE WŁASNE]	139
RYSUNEK 71 ODCINEK POMIAROWY 6 - ŚREDNI CZAS PRZEJAZDU [s] NA PÓŁGODZINNY INTERWAŁ CZASOWY - ANALIZA PORÓWNAWCZA – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE]	140
RYSUNEK 72 TLENEK WĘGLA - MORSKA - KWIATKOWSKIEGO - PORÓWNANIE WARIANTÓW – ILOŚĆ CO [g] W PÓŁGODZINNYCH INTERWAŁACH CZASOWYCH [OPRACOWANIE WŁASNE]	141
RYSUNEK 73 TLENEK WĘGLA – JANKA WIŚNIEWSKIEGO - KWIATKOWSKIEGO - PORÓWNANIE WARIANTÓW – ILOŚĆ CO [g] W PÓŁGODZINNYCH INTERWAŁACH CZASOWYCH [OPRACOWANIE WŁASNE]	141
RYSUNEK 74 JANKA WIŚNIEWSKIEGO - ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO – LEVEL OF SERVICE – PORÓWNANIE WARIANTÓW – POZIOM OBŚLUGI W ODNIESIENIU DO PÓŁGODZINNYCH INTERWAŁÓW CZASOWYCH [OPRACOWANIE WŁASNE]	142
RYSUNEK 75 MORSKA - ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO – LEVEL OF SERVICE – PORÓWNANIE WARIANTÓW - POZIOM OBŚLUGI W ODNIESIENIU DO PÓŁGODZINNYCH INTERWAŁÓW CZASOWYCH [OPRACOWANIE WŁASNE]	143
RYSUNEK 76 ŚREDNIA DŁUGOŚĆ KOLEJKI [m]- MORSKA - ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO – ANALIZA WARIANTÓW – ŚREDNIA DŁUGOŚĆ KOLEJKI W METRACH WYRAŻONA NA OSI PIONOWEJ W PÓŁGODZINNYCH INTERWAŁACH CZASOWYCH [OPRACOWANIE WŁASNE]	144
RYSUNEK 77 ŚREDNIA DŁUGOŚĆ KOLEJKI – JANKA WIŚNIEWSKIEGO - ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO – ANALIZA WARIANTÓW - ŚREDNIA DŁUGOŚĆ KOLEJKI W METRACH WYRAŻONA NA OSI PIONOWEJ W PÓŁGODZINNYCH INTERWAŁACH CZASOWYCH [OPRACOWANIE WŁASNE]	144
RYSUNEK 78 OPÓŹNIENIA - JANKA WIŚNIEWSKIEGO - ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO – ANALIZA WARIANTÓW - ŚREDNIA DŁUGOŚĆ KOLEJKI W METRACH WYRAŻONA NA OSI PIONOWEJ W PÓŁGODZINNYCH INTERWAŁACH CZASOWYCH [OPRACOWANIE WŁASNE]	145
RYSUNEK 79 OPÓŹNIENIA – MORSKA - ESTAKADA KWIATKOWSKIEGO – ANALIZA WARIANTÓW - ŚREDNIA DŁUGOŚĆ KOLEJKI W METRACH WYRAŻONA NA OSI PIONOWEJ W PÓŁGODZINNYCH INTERWAŁACH CZASOWYCH [OPRACOWANIE WŁASNE].....	146
RYSUNEK 80 ROZKŁAD TRÓJKĄTNY [OPRACOWANIE WŁASNE]	151

RYSUNEK 81 ROZKŁAD TRAPEZOWY [OPRACOWANIE WŁASNE]	152
RYSUNEK 82 DOBOWY ROZKŁAD RUCHU NA WŁOCIE ZACHODNIM ENERGETYKÓW - JANKA WIŚNIEWSKIEGO [OPRACOWANIE WŁASNE]	153
RYSUNEK 83 ARIMA - PORÓWNANIE PARAMETRÓW WYNIKOWYCH - AR(1) [88].....	156
RYSUNEK 84 ARIMA - PORÓWNANIE PARAMETRÓW WYNIKOWYCH - AR(2)[88]	156
RYSUNEK 85 ARIMA - PORÓWNANIE PARAMETRÓW WYNIKOWYCH – MEAN [88].....	157
RYSUNEK 86 ARIMA - PORÓWNANIE PARAMETRÓW WYNIKOWYCH – CONSTANT [88].....	157

Spis tabel

TABELA 1 PRZYKŁADY MODELI W RÓŻNYCH SKALACH [OPRACOWANIE WŁASNE]	16
TABELA 2 PODZIAŁ POJAZDÓW NA KATEGORIE ZASTOSOWANY W GENERALNYM POMIARZE RUCHU (2005 ROK)[18]:	28
TABELA 3 KATEGORIE POJAZDÓW ZGODNE Z COST323[64]	33
TABELA 4 MODEL ARIMA - TABELA WYNIKOWA[89]	45
TABELA 5 PORÓWNANIE TESTÓW ZGODNOŚCI[90].....	49
TABELA 6 PORÓWNANIE ROZKŁADU TRÓJKĄTNEGO - DZIEŃ AWARII[90]	49
TABELA 7 WARTOŚCI STATYSTYK TESTOWYCH, TEST KOŁMOGOROWA-SMIRNOWA[19]	50
TABELA 8 MACIERZ, STAN POCZĄTKOWY – STAN 2. SYMULACJA MONTE CARLO[93]	68
TABELA 9 MACIERZ, STAN POCZĄTKOWY – STAN 0. SYMULACJA MONTE CARLO[93]	69
TABELA 10 PORÓWNANIE WYNIKÓW DOPASOWANYCH ROZKŁADÓW[92]	107
TABELA 11 PUNKT POMIAROWY 1 – CZAS PRZEJAZDU – WSZYSTKIE POJAZDY [OPRACOWANIE WŁASNE]	161
TABELA 12 PUNKT POMIAROWY 2 – CZAS PRZEJAZDU – WSZYSTKIE POJAZDY [OPRACOWANIE WŁASNE]	162
TABELA 13 PUNKT POMIAROWY 3 – CZAS PRZEJAZDU – WSZYSTKIE POJAZDY [OPRACOWANIE WŁASNE]	163
TABELA 14 PUNKT POMIAROWY 4 – CZAS PRZEJAZDU – WSZYSTKIE POJAZDY [OPRACOWANIE WŁASNE]	164
TABELA 15 PUNKT POMIAROWY 5 – CZAS PRZEJAZDU – WSZYSTKIE POJAZDY [OPRACOWANIE WŁASNE]	165
TABELA 16 PUNKT POMIAROWY 6 – CZAS PRZEJAZDU – WSZYSTKIE POJAZDY [OPRACOWANIE WŁASNE]	166
TABELA 17 PUNKT POMIAROWY 1– CZAS PRZEJAZDU – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE]	167
TABELA 18 PUNKT POMIAROWY 2– CZAS PRZEJAZDU – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE]	168
TABELA 19 PUNKT POMIAROWY 3 – CZAS PRZEJAZDU – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE].....	169
TABELA 20 PUNKT POMIAROWY 4 – CZAS PRZEJAZDU – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE].....	170
TABELA 21 PUNKT POMIAROWY 5 – CZAS PRZEJAZDU – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE].....	171
TABELA 22 PUNKT POMIAROWY 6 – CZAS PRZEJAZDU – POJAZDY CIĘŻAROWE [OPRACOWANIE WŁASNE].....	172

Spis bibliograficzny

- [1] Anagnostopoulos, C.-N., "Modeling Transport, 4th Edition," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2012, doi: 10.1109/mits.2011.2178881.
- [2] Bartholomew, D. J., "Stochastic Models," in *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences: Second Edition*, 2015.
- [3] Bergel-Hayat, R. and J. Żukowska, *Time-series analysis of road safety trends aggregated at national level in Europe for 2000–2010*. 2015.
- [4] Bobrowski, D., *Modele i metody matematyczne teorii niezawodności w przykładach i zadaniach*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1985.
- [5] Boryczko, K., "Drzewa logiczne jako narzędzie wspomagające operatorów systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę," *Logistyka*, vol. 6, pp. 2237–2246, 2014.
- [6] Budzynski, M., K. Jamroz, W. Kustra, L. Michalski, and S. Gaca, "Road Infrastructure Safety Management in Poland," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/245/4/042066.
- [7] C.S.Thirumalai, "Data analysis using Box plt and Control Chart for Air Quality," in *International Conference on Trends in Electronics and Informatics ICOEI 2017*, 2017.
- [8] Caprez, M., E. Doupal, B. Jacob, A. J. O'Connor, and E. J. O'Brien, "Test of WIM sensors and systems on an urban road," *Heavy Vehicle Systems*, 2000, doi: 10.1504/ijhvs.2000.005003.
- [9] Cascetta, E., *Transportation Systems Analysis, Models and Applications*. 2009.
- [10] Chodur, J., M. Kieć, and K. Ostrowski, "Wybrane aspekty analizy warunków ruchu na odcinkach dróg dwupasowych, dwukierunkowych z wykorzystaniem metody HCM-2010," *Logistyka*, vol. 3, pp. 687-, 2015.
- [11] Chrysaphinou, O., N. Limnios, and S. Malefaki, "Multi-state reliability systems under discrete time semi-Markovian hypothesis," *IEEE Transactions on Reliability*, 2011, doi: 10.1109/TR.2010.2104210.
- [12] Craig, R., L. and C. Dwight., P., Miller, James, E., *Human Performance Modeling for System of Systems Analyt cs: Soldier Fatigue*. New Mexico, California: Sandia National Laboratories, 2005.
- [13] Cressie, N., "STATISTICS FOR SPATIAL DATA," *Terra Nova*, 1992, doi: 10.1111/j.1365-3121.1992.tb00605.x.
- [14] Dytczak, M., G. Ginda, and B. Jastrząbek, "Identyfikacja optymalnego systemu tras przewozu towaru przy użyciu metody Monte Carlo," *Autobusy Technika, Eksploatacja, systemy Transportowe*, vol. 3, 2013.
- [15] Dziubdziela, W., *Rozkłady graniczne ekstremalnych statystyk pozycyjnych*,

Matematyka Stosowana IX. 1977.

- [16] Fellendorf, M. and P. Vortisch, "Microscopic traffic flow simulator VISSIM," in *International Series in Operations Research and Management Science*, 2010.
- [17] Friedrich, M., "A multi-modal transport model for integrated planning," *World Transport Research, Vols 1 to 4*, 1999.
- [18] Gaca, S., W. Suchorzewski, and M. Tracz, *Inżynieria Ruchu Drogowego Teoria i praktyka*, 1st ed. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2014.
- [19] Gajek, L., Kałużka, M., *Wnioskowanie statystyczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000.
- [20] Gardziejczyk, W., P. Gierasimiuk, and M. Motylewicz, "Klimat akustyczny w otoczeniu ulic prowadzących ruch tranzytowy pojazdów ciężarowych," in *Metody ochrony środowiska przed hałasem - Teoria i praktyka. Konferencja Transnoise 2013*, 2013.
- [21] Garlikowska, M., "Czynniki wpływające na postrzeganie transportu kolejowego w kategoriach niezawodności," *Problemy Kolejnictwa*, 2014.
- [22] Grabski, F., "Teoria semi-markowskich procesów eksploatacji obiektów technicznych," *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, vol. 75A, 1982.
- [23] Grabski, F., *Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance*. 2014.
- [24] Grabski, F., "Zastosowanie pewnych pojęć i twierdzeń teorii procesów semi-markowskich w teorii niezawodności," *Zeszyty Naukowe WSI*, vol. 109, pp. 131–145, 1985.
- [25] Grabski, F., "Semi-markowskie modele niezawodności i eksploatacji," *Monografia, Polska Akademia Nauk, IBS, Seria: Badania Systemowe*, vol. Tom 30, 2002.
- [26] Grabski, F., "Zastosowanie pewnych pojęć i twierdzeń teorii procesów semi-markowskich w teorii niezawodności," *Zeszyty Naukowe WSI*, vol. 109, 1985.
- [27] Guan, Y., S. E. Li, J. Duan, W. Wang, and B. Cheng, "Markov probabilistic decision making of self-driving cars in highway with random traffic flow: a simulation study," *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*, 2018, doi: 10.1108/jicv-01-2018-0003.
- [28] Helbing, D., A. Hennecke, and M. Treiber, "Phase diagram of traffic states in the presence of inhomogeneities," *Physical Review Letters*, 1999, doi: 10.1103/PhysRevLett.82.4360.
- [29] Hoogendoorn, S. and V. Knoop, "Traffic flow theory and modelling," *The Transport System and Transport Policy: An Introduction*, 2012.
- [30] J. Woch, *Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transportowych*. Kielce: Polska Akademia Nauk – oddział w Katowicach, Komisja Transportu. Wydawnictwo Szumacher, 1998.

- [31] Jackson, R. R. P. and L. Takacs, "Introduction to the Theory of Queues," *OR*, 1963, doi: 10.2307/3007378.
- [32] Jacob, B. and L. M. Cottineau, "Weigh-in-motion for Direct Enforcement of Overloaded Commercial Vehicles," in *Transportation Research Procedia*, 2016, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.214.
- [33] Jacyna, M., *Modelowanie i ocena systemów transportowych*. 2009.
- [34] Jamroz, K. Oskarbski, J. Kustra, W., Gumińska, L., "Wielopoziomowe modelowanie ruchu – koncepcja i doświadczenie praktyczne," in *VIII Konferencja Naukowo – Technologiczna z cyklu Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego: Nowoczesny Transport publiczny w obszarach zurbanizowanych*, 2011.
- [35] Jaźwiński, J., Z. Smalko, and J. Żurek, "Niezawodność operacyjna systemów transportowych," *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, vol. 1, 2004.
- [36] Jessup, E. L., "An economic analysis of trucker's incentive to overload as affected by the judicial system," *Research in Transportation Economics*, 1996, doi: 10.1016/S0739-8859(96)80008-4.
- [37] Just, J., S. Maziarka, Z. Misiakiewicz, and H. Wyszynska, "Pojazdy samochodowe i rodzaj nawierzchni jezdni jako źródło zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego substancjami rakotwórczymi i ołowiem," *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*, 1971.
- [38] Kachroo, P. and K. M. A. Özbay, "Traffic flow theory," in *Advances in Industrial Control*, 2018.
- [39] Koch, K. R., "Monte Carlo methods," *GEM - International Journal on Geomathematics*, 2018, doi: 10.1007/s13137-017-0101-z.
- [40] Kołowrocki, K., "Reliability of Large Multi-State Systems," in *Reliability of Large and Complex Systems*, 2014.
- [41] Kołowrocki, K., "Semi-Markov processes and reliability," *Reliability Engineering & System Safety*, 2003, doi: 10.1016/s0951-8320(02)00112-6.
- [42] Korolyuk, Vladimir, S., Korolyuk, Vladimir, V., *Stochastic Models of Systems*. Springer, 1999.
- [43] Korolyuk, V. S., S. M. Brodi, and A. F. Turbin, "Semi-markov processes and their applications," *Journal of Soviet Mathematics*, 1975, doi: 10.1007/BF01097184.
- [44] Krośnicka, K. A., *Przestrzenne aspekty kształtowania i rozwoju morskich terminali kontenerowych*, 1st ed. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2016.
- [45] Kurowicka, D., "Domains of attraction of asymptotic reliability functions," *Applied Mathematics and Computation*, 2002, doi: 10.1016/S0096-3003(00)00156-9.
- [46] Kutrzyk, A. and J. Filipczyk, "Określanie poziomu emisji składników spalin dla

- różnych warunków pracy silnika,” *Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska*, 2008.
- [47] Legislacji, P. R. M. R. C., “Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r. Prawo o ruchu drogowym,” *Dziennik Ustaw*. 1997.
- [48] Maciejewski, M. and M. Maciejewski, “Mikrosymulacja ruchu drogowego dla obszaru miejskiego z zastosowaniem systemu VISSIM,” *Logistyka*, 2010.
- [49] Maerivoet, S. and B. De Moor, “Transportation Planning and Traffic Flow Models,” 2005.
- [50] Magnanti, T. L. and R. T. Wong, “NETWORK DESIGN AND TRANSPORTATION PLANNING: MODELS AND ALGORITHMS.,” *Transportation Science*, 1984, doi: 10.1287/trsc.18.1.1.
- [51] Manjunatha, P., P. Vortisch, and T. Mathew, “Methodology for the Calibration of VISSIM in Mixed Traffic,” *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, 2013.
- [52] Marszałek, Z., “Aktualne problemy w metrologii,” *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, vol. 34, 2013.
- [53] Mohammadi, J. and N. Shah, “Statistical evaluation of truck overloads,” *Journal of Transportation Engineering*, 1992, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1992)118:5(651).
- [54] Morse, P. M., “Introduction to the Theory of Queues. Lajos Takacs. Oxford University Press, New York, 1962. x + 268 pp. Illus. \$7.50,” *Science*, 1962, doi: 10.1126/science.137.3532.742-c.
- [55] Mulyono, A. T., M. Antameng, D. Parikesit, and R. RAHIM, “Analysis of Loss Cost of Road Pavement Distress due to Overloading Freight Transportation,” *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2010.
- [56] Oskarbski, J. and L. Gumińska, “The application of microscopic models in the study of pedestrian traffic,” in *MATEC Web of Conferences*, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201823103003.
- [57] Palmowski, T., M. Pacuk, and T. Michalski, “Przemiany przestrzeni miejskiej miast portowych na przykładach Gdańska i Gdyni,” in *V KONWERSATORIUM WIEDZY O MIEŚCIE*, 2001.
- [58] Paska, J., “Metodyka analizy i oceny niezawodności systemu elektroenergetycznego w warunkach rynku energii elektrycznej,” *Rynek Energii*. 2010.
- [59] Pawlak, M. and L. Piaseczny, “Modelowanie ruchu jednostek morskich dla określenia emisji związków toksycznych spalin,” *Czasopismo Techniczne Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, 2008.
- [60] Politechnika Gdańska, Politechnika Krakowska, I. T. S., *Krajowy Program Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego na lata 2005 – 2007 -2013 “GAMBIT 2005.”*

Gdańsk/Kraków/Warszawa, 2005.

- [61] Prauzner, T. and P. Szewczyk, "Ocena bezpieczeństwa ruchu drogowego w programie symulacyjnym PTV VISSIM," *Prace Naukowe Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie. Technika, Informatyka, Inżynieria Bezpieczeństwa*, 2017, doi: 10.16926/tiib.2017.05.10.
- [62] Praveen, V., T. Delhi Narendran, R. Pavithran, and C. Thirumalai, "Data analysis using box plot and control chart for air quality," in *Proceedings - International Conference on Trends in Electronics and Informatics, ICEI 2017*, 2018, doi: 10.1109/ICOEI.2017.8300877.
- [63] Prezes Rady Ministrów Rządowe Centrum Legislacji, "ROZPORZĄDZENIE MINISTRA TRANSPORTU I GOSPODARKI MORSKIEJ z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usy," *Dziennik Ustaw*. 2013.
- [64] Ryguła, A., W. Loga-Ksieska, and K. Brzozowski, "ESTYMACJA NAPEŁNIENIA POJAZDÓW KOMUNIKACJI ZBIOROWEJ Z WYKORZYSTANIEM PRESELEKCYJNYCH SYSTEMÓW WAŻENIA POJAZDÓW," *TTS Technika Transportu Szynowego*, vol. 12, p. 1341, 2015.
- [65] Rys, D., J. Judycki, and J. Jaskula, "Impact of overloaded vehicles on load equivalency factors and service period of flexible pavements," in *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields - Proceedings of the 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, BCRRRA 2017*, 2017, doi: 10.1201/9781315100333-66.
- [66] Rys, D., J. Judycki, and P. Jaskula, "Analysis of effect of overloaded vehicles on fatigue life of flexible pavements based on weigh in motion (WIM) data," *International Journal of Pavement Engineering*, 2016, doi: 10.1080/10298436.2015.1019493.
- [67] Smolarek, L., "Finite discrete Markov model of ship safety," *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 4, no. 2, pp. 589–592, 2009, doi: 10.1201/9780203869345.ch99.
- [68] Smolarek, L., "The reliability models of large scale rectangular Weibull multistate systems," in *ESREL '99 Safety and Reliability*, 1999, pp. 85–91.
- [69] Smolarek, L., "A Semi Markovian Model of Multistate Dendrite System, Mathematical Methods in Reliability," *Statistique Mathématique et ses Applications*, vol. 2, pp. 973–977, 2000.
- [70] Smolarek, L. and J. Soliwoda, "Human fatigue model at maritime transport," in *Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and Applications - Proceedings of the Joint ESREL and SRA-Europe Conference*, 2009.
- [71] Soares, C. G. and A. P. Teixeira, "Risk assessment in maritime transportation," *Reliability Engineering and System Safety*, 2001, doi: 10.1016/S0951-8320(01)00104-

1.

- [72] Sobota, A., "Płynność ruchu w świetle badań naukowych," in *Systemy transportowe. Teoria i praktyka, VI Konferencja naukowo-techniczna, Katowice, 22 września 2009. Materiały konferencyjne*, 2009, pp. 457–464.
- [73] Sobota, A. and G. Karoń, "Postrzeganie warunków ruchu miejskiego – płynność ruchu – wyniki badań ankietowych," *Zeszyty naukowo-techniczne SITK RP*, vol. 90, pp. 215–234, 2009.
- [74] SZARATA, M., "WYKORZYSTANIE MODELU MIKROSYMULACYJNEGO DO ANALIZY FUNKCJONOWANIA DYNAMICZNEGO PASA AUTOBUSOWEGO," *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, 2017, doi: 10.7862/rb.2017.23.
- [75] Szpytko, J. and A. Kocerba, *Wybrane aspekty bezpieczeństwa i niezawodności rozproszonych środków transportu*. Kraków - Radom: Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, 2008.
- [76] Szymanek, A., "Sterowanie ruchem w transporcie. Koncepcja podstaw teoretycznych," *Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, Seria: Transport*, vol. 35, 1996.
- [77] Transportation Research Board, "75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory. Greenshields Symposium," *Transportation Research Circular*, 2011.
- [78] Tuğcu, S., "A simulation study on the determination of the best investment plan for istanbul seaport," *Journal of the Operational Research Society*, 1983, doi: 10.1057/jors.1983.115.
- [79] Van Vliet, D. Hall, M., *SATURN 9.3 user manual*. Leeds / Surrey, 1997.
- [80] Warzyńska-Fiok, K. and J. Jaźwiński, *Niezawodność systemów technicznych*. Warszawa, 1990.
- [81] Wiedemann, R., "Simulation des Strassenverkehrsflusses," *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Band 8, Karlsruhe, Germany.*, 1975.
- [82] Willumsen, L. G., J. Bolland, M. D. Hall, and Y. Arezki, "Multi-modal modelling in congested networks: SATURN and SATCHMO," *Traffic Engineering and Control*, 1993.
- [83] Zieliński, R., *Rachunek prawdopodobieństwa z elementami statystyki matematycznej*. Warszawa: WSiP, 1976.
- [84] Ziemska, M., "The idea of using intelligent transport systems and coordination of traffic lights," *Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni*, vol. 29, pp. 107–112, 2014, doi: 10.12716/1002.29.10.
- [85] Ziemska, M., E. Płodzik, and M. Falkowska, "Comparative analysis of ports practices and activities in the tri-city and China," *TransNav*, 2019, doi: 10.12716/1001.13.03.22.
- [86] Ziemska, M. and L. Smolarek, "Modeling of transport network resilience in gdynia for

- disturbing events,” in *Communications in Computer and Information Science*, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-97955-7_12.
- [87] Ziemska, M. and L. Smolarek, “Using information collected by weigh in motion for modeling traffic structure of vehicles,” *Archives of Transport System Telematics*, vol. 10, pp. 32–37, 2017.
- [88] Ziemska, M. and L. Smolarek, “Analysis of the effect of mass events on car traffic in the city in the daily interval,” in *2017 2nd International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)*, Dec. 2017, vol. 2018-Janua, pp. 521–525, doi: 10.1109/ICSRS.2017.8272876.
- [89] Ziemska, M. and L. Smolarek, “Modeling the Participation of Heavy Vehicles Stream, Using the System of Automatic Weigh Control of Vehicles in the City of Gdynia,” in *Proceedings - 2018 3rd International Conference on System Reliability and Safety, ICSRS 2018*, 2019, doi: 10.1109/ICSRS.2018.8688879.
- [90] Ziemska, M. and L. Smolarek, “Analiza warunków ruchu drogowego w przypadku zamknięcia jezdni w sieci ulic miejskich,” *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, vol. 97, pp. 121–130, 2016.
- [91] Ziemska, M. and L. Smolarek, “Traffic model as an instrument of measuring impact of disabling one street lane on bus movement in the rush hours,” *Journal of KONES. Powertrain and Transport*, 2016, doi: 10.5604/12314005.1213746.
- [92] Ziemska, M. and L. Smolarek, “Analysis of Traffic Conditions Based on the Percentage of Drivers Using the Instructions Displayed on VMS Boards,” *Journal of Konbin*, 2015, doi: 10.1515/jok-2015-0028.
- [93] Ziemska, M. and L. Smolarek, “Modelling of transport system operational reliability a Markov approach,” *Journal of KONES. Powertrain and Transport*, vol. Volume 26, pp. 227–234, 2019.
- [94] Ziemska, M. and M. Srubka, “Comparative analysis of intelligent transportation systems using in traffic control, method BALANCE and method SCATS,” *Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni*, vol. 31, pp. 201–207, 2016, doi: 10.12716/1002.31.19.
- [95] Ziemska, M. and P. Szumacher, “Analysis of infrastructure ports and access road and rail to tri-city seaport,” in *Safety of Sea Transportation - Proceedings of the International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, TRANSSNAV 2017*, 2017, doi: 10.1201/9781315099088-6.
- [96] Żochowska, R., “Modelowanie potoków ruchu w sieci miejskiej dla potrzeb analizy zakłóceń,” *Logistyka*, vol. 4, pp. 2619–2632, 2014.
- [97] Żochowska, R., “Modelowanie wyboru trasy w gęstych sieciach miejskich,” *Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska*, 2011.
- [98] Żochowska, R., “Dynamic approach to the Origin-destination matrix estimation in

- dense street networks,” *Archives of Transport*, 2012, doi: 10.2478/v10174-012-0025-1.
- [99] Żochowska, R. and A. Sobota, “Fundamentalny diagram ruchu – teoria i praktyka,” *Logistyka*, vol. 6, pp. 11862–11871, 2016.
- [100] Żurek, J., “Model oceny nadmiarów w lotniczych systemach bezpieczeństwa,” *Logistyka*, vol. 4, 2010.
- [101] *ARIMA charts STATGRAPHICS-Rev. 7/3/2009.*, vol. Rev 7/3. StatPoint Technologies, Inc., 2009.