

POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI I LOGISTYKI



mgr inż. Dariusz Masłowski

**WIELOKRYTERIALNY MODEL STEROWANIA
POJAZDAMI MIEJSKIEJ KOMUNIKACJI ZBIOROWEJ.
CASE STUDY NA PODSTAWIE MIASTA OPOŁA**

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Promotor:

dr hab. inż. Ewa Kulińska, prof. PO

Promotor pomocniczy:

dr Kinga Kijewska

OPOLE, 2019

1. STRESZCZENIE	3
2. WSTĘP	4
3. CEL, TEZA, ZAKRES PRACY	4
3.1. CELE PRACY	4
3.2. TEZA BADAWCZA PRACY	4
3.3. ZAKRES BADANIA NAUKOWEGO	5
3.4. ZAKRES PRACY	5
4. METODYKA BADANIA NAUKOWEGO	6
5. ASPEKTY TEORETYCZNE	6
6. CHARAKTERYSTYKA PODMIOTU BADAWCZEGO	8
7. BADANIA EMPIRYCZNE NATĘŻENIA RUCHU	12
8. WIELOKRYTERIALNY MODEL STEROWANIA POJAZDAMI MIEJSKIEJ KOMUNIKACJI ZBIOROWEJ (SPMKZ)	19
9. PODSUMOWANIE, KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ	28
9.1. PODSUMOWANIE	28
9.2. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ	28
10. LITERATURA (wybrane pozycje)	29

1. STRESZCZENIE

Słowa kluczowe: metoda PERT, planowanie tras, logistyka miejska, telematyka transportu, wielokryterialny model, komunikacja miejska

Celem rozprawy doktorskiej jest optymalizacja funkcjonowania komunikacji zbiorowej w miastach poprzez zastosowanie opracowanego wielokryterialnego modelu wykorzystującego metodę PERT. W dysertacji podjęto próbę oryginalnego rozwiązania problemu naukowego, jakim jest fakt iż linie komunikacji miejskiej wymagają ciągłej aktualności ze względu na swoją funkcjonalność, która jest rozumiana jako:

- zmieniające się w dużym tempie zaludnienie miast
- nieustannie zmieniające się preferencje co do wyboru środka lokomocji, czy też miejsc docelowych w procesie transportu miejskiego
- zauważalne w ostatnich latach dynamiczne zmiany w miastach spowodowane ich rozwojem
- ciągle zwiększający się ruch pojazdów samochodowych w miastach.

Na rynku rozwiązań w związku z tym nie pojawiają się konkretne rozwiązania służące niwelowaniu negatywnych aspektów miejskich, w związku z tym przyjęto tezę, mówiącą o tym, iż jest możliwe opracowanie wielokryterialnego modelu sterowania pojazdami miejskiej komunikacji zbiorowej, który będzie uwzględniał wieloaspektowość w postaci czasu przejazdu, łatwości przemieszczania się pasażerów między różnymi dzielnicami miasta, planowaniu nowych linii autobusowych oraz wpływowi na zużycie eksploatacyjne pojazdów.

W celu budowy modelu przeprowadzono na terenie miasta Opola liczne badania, które dotyczyły analizy natężenia ruchu, wpływu obiektów kształtujących miasto tj. ilość placówek publicznych, ilości obiektów rekreacyjnych oraz wiele innych do których mieszkańcy najczęściej są transportowani. Do wyboru odpowiedniego miasta, które mogłoby w przyszłości zastosować wielokryterialny model opisany w pracy, zostały wykorzystane oceny eksperckie, które zaprezentowały również kluczowe elementy kształtujące miasta.

Wnioskiem z wykonanego modelu jest możliwość optymalizacji dotychczasowych rozwiązań komunikacyjnych w miastach, przy jednoczesnym oszacowaniu dokładnego czasu przejazdu przez wskazaną linię autobusową na podstawie przeprowadzenia rozkładu normalnego i obliczenia prawdopodobieństwa takiego ruchu.

MULTI-CRITERIA MODEL OF URBAN PUBLIC TRANSPORT VEHICLE CONTROL. CASE STUDY BASED ON THE CITY OF OPOLE

Keywords: PERT method, route planning, city logistics, transport telematics, multicriteria model, public transport

The aim of the dissertation is to optimize the functioning of public transport in cities through the use of a multi-criteria model based on the PERT method. The dissertation attempts to solve an original scientific problem, which is the fact that lines of public transport require constant validity due to their functionality, which is understood as:

- changing densely populated cities,
- constantly changing preferences regarding the choice of means of transport or destinations in the urban transport process,
- the dynamic changes that have been observed in recent years in cities due to their development,
- constantly increasing car traffic in cities.

As a result, there are no specific solutions on the market to eliminate the negative aspects of the city, therefore, a thesis was adopted stating that it is possible to develop a multi-criteria model of urban public transport vehicle control, which will take into account the multifaceted aspects in the form of travel time, ease of movement of passengers between different districts of the city, planning new bus lines and influencing the wear and tear of vehicles.

In order to build the model, numerous studies were conducted in the city of Opole, which concerned the analysis of traffic intensity, the impact of objects shaping the city, i.e. the number of public facilities, the number of recreational facilities and many others to which residents are most often transported. In order to select a suitable city, which in the future could use the multi-criteria model described in the paper, expert assessments were used, which also presented the key elements shaping the cities.

The conclusion of the model is the possibility to optimize the existing transport solutions in cities, while estimating the exact time of crossing the indicated bus line on the basis of a normal distribution and calculation of the probability of such traffic.

2. WSTĘP

Profesjonalne firmy transportowe na co dzień stają przed różnymi wyzwaniami, począwszy od zwiększającej się liczby pasażerów, poprawy jakości usług, aż do zmniejszenia kosztów operacyjnych i obsługi pojazdów. W celu osiągnięcia założonych celów, przysparzających sukces w tej dziedzinie, niezbędne jest wdrożenie efektywnych rozwiązań systemowo-wdrożeniowych do sporządzania rozkładów jazdy. Planowanie rozkładów jazdy mogących sprostać dużym oczekiwaniom użytkowników komunikacji miejskiej, współcześnie staje się kompromisem pomiędzy czasem oczekiwania pasażerów, a możliwościami ekonomicznymi miast. Opracowanie optymalnych rozwiązań jest trudnym logistycznym problemem mającym na celu ograniczenie kosztów.¹ Ten problem dotyczy zarówno organizatorów jak i operatorów komunikacji miejskiej.² W związku z tym, problemem badawczym postawionym w pracy, jest to, iż **istniejące linie zbiorowej komunikacji miejskiej wymagają ciągłej aktualizacji ze względu na swoją funkcjonalność.**

3. CEL, TEZA, ZAKRES PRACY

3.1. CELE PRACY

Autor w związku z zaistniałą potrzebą ciągłego aktualizowania, czy to rozkładów jazdy autobusów, czy to przejazdów pojazdów, postawił cele realizacji pracy, a ich wykonanie ściśle jest związane z opracowaniem wielokryterialnego modelu sterowania miejską komunikacją zbiorową.

Celem głównym pracy była: **optymalizacja funkcjonowania komunikacji zbiorowej w miastach poprzez zastosowanie opracowanego wielokryterialnego modelu wykorzystującego metodę PERT.**

Autor postawił również dla osiągnięcia celu głównego, cele cząstkowe, które uwarunkowane były wykonaniem wielokryterialnego modelu sterowania pojazdami miejskiej komunikacji zbiorowej, w skład których wchodziły:

- wykluczenie powstawania problemów komunikacyjnych, tj. kongestia, zator komunikacyjny, poprzez działania optymalizacyjne ruchu pojazdów w miastach,
- efektywna organizacja rozkładów jazdy pojazdów miejskiej komunikacji zbiorowej, dzięki której racjonalnie odbywać powinien się ruch autobusów,
- przeciwdziałanie wzrostowi zanieczyszczeń miast powodowanych przez środki transportu, a mianowicie ograniczenie wpływu negatywnych substancji na środowisko naturalne w aspekcie miejskim,
- ograniczenie zmniejszenia niezadowolenia pasażerów wynikającego z funkcjonowania komunikacji miejskiej, który przez problemy transportowe nieustannie wzrasta,
- wpływanie na koszty eksploatacyjne pojazdów komunikacji miejskiej, których zmniejszenie może być spowodowane przez optymalizację ruchu pojazdów po mieście.

Realizacja postawionych przez autora celów, związana jest z wpływem na 3 aspekty ukierunkowane na rozwój miast (tabela 1).

Tabela 1. Cele pracy w odniesieniu do aspektów środowiskowych, ekonomicznych oraz społecznych

CELE	Aspekt środowiskowy	Aspekt ekonomiczny	Aspekt społeczny
CELE CZĄSTKOWE			
wpływanie na koszty eksploatacyjne pojazdów komunikacji miejskiej		x	
wykluczenie powstawania problemów komunikacyjnych, tj. kongestia, zator komunikacyjny	x	x	x
efektywna organizacja rozkładów jazdy pojazdów miejskiej komunikacji zbiorowej		x	x
przeciwdziałanie wzrostowi zanieczyszczeń miast powodowanych przez środki transportu	x		
ograniczenie zmniejszenia niezadowolenia pasażerów wynikającego z funkcjonowania komunikacji miejskiej			x
CEL GŁÓWNY			
Optymalizacja funkcjonowania komunikacji zbiorowej w miastach poprzez zastosowanie opracowanego wielokryterialnego modelu wykorzystującego metodę PERT.	x	x	x

Źródło: Opracowanie własne

Realizacja pracy pozwoli osiągnąć postawione cele przysparzając wymierne korzyści dla całego systemu miejskiego. Każdy etap w pracy został wnikliwie przeanalizowany, tak aby można było dokonywać różnorodnych zastosowań wieloaspektowych.

3.2. TEZA BADAWCZA PRACY

Autor postawił następującą tezę, która jest ściśle związana z opracowaniem wielokryterialnego modelu sterowania pojazdami miejskiej komunikacji zbiorowej:

jest możliwe opracowanie wielokryterialnego modelu sterowania pojazdami miejskiej komunikacji zbiorowej, który będzie uwzględniał następujące kryteria:

- (A) **czas przejazdu,**
- (B) **łatwość przemieszczania się pasażerów między różnymi dzielnicami miasta,**
- (C) **planowanie nowych linii autobusowych,**
- (D) **zużycie eksploatacyjne pojazdów.**

¹ Masłowski D., Kulińska E., Wojtynek L., Dendera – Gruszka M.: Analiza rozwiązań informatycznych wykorzystywanych w procesie planowania przejazdów komunikacji miejskiej, Autobusy, t.18, nr 6, 2017, CD, s. 1467-1473.

² Kisielewski P., Ulman B., Planowanie rozkładów jazdy komunikacji miejskiej w aspekcie punktualności i synchronizacji kursów, „Autobusy” 2016, nr 12, s. 648-653

Każde zaprezentowane kryterium należało by rozpatrywać wieloaspektowo, ponieważ zastosowanie modelu wpływa na poszczególne aspekty oraz, i co najważniejsze, aspekty oddziałują na tworzenie wielokryterialnego modelu. Zastosowanie wielokryterialnego modelu sterowania powinno wpływać na korzystne zarządzanie przepływami pojazdów po mieście, co w konsekwencji przynieść powinno usprawnienia organizacyjne w miastach.

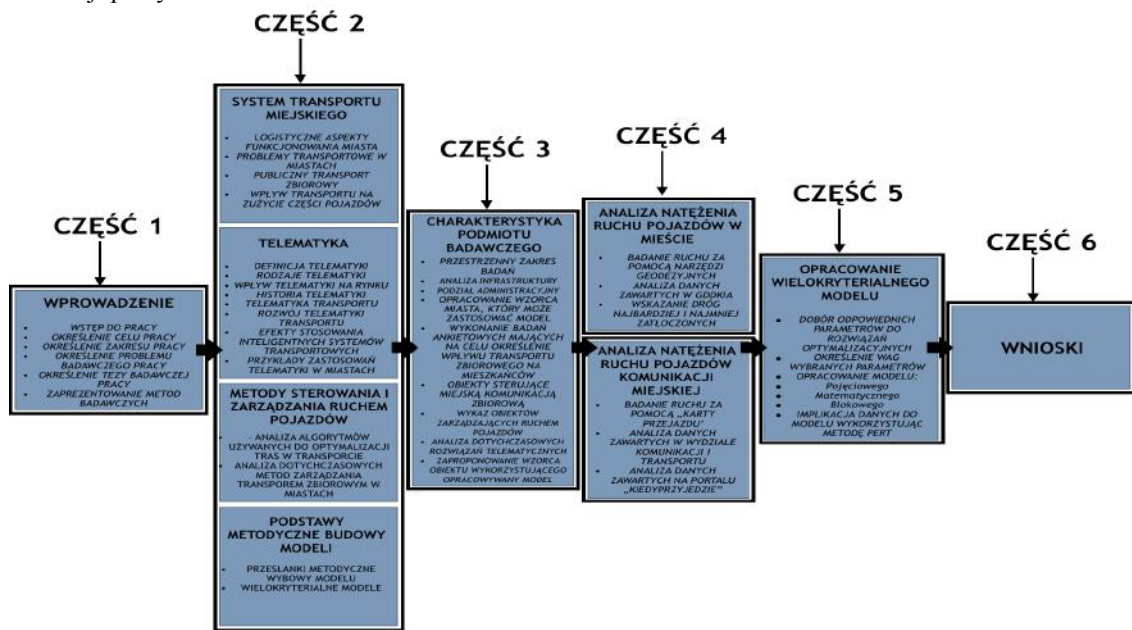
3.3. ZAKRES BADANIA NAUKOWEGO

Autor w związku z realizacją rozprawy doktorskiej zawężił zakres pracy do 4 grup, które zostały przedstawione w następujących aspektach:

- **czasowym:** realizacja pracy przebiegała w latach 2016 – 2019,
- **przestrzennym:** praca dotyczyła prowadzenia badań w miejskim systemie Opola, natomiast zostały również określone warunki przyłączenia innych miast do realizacji zastosowania wielokryterialnego modelu,
- **przedmiotowym:** przedstawione badania zostały przedstawione jako czynniki wpływu na przedsięwzięcia świadczące usługi transportowe,
- **podmiotowym:** przedmiotem badań był Miejski Zakład Komunikacji w Opolu.

3.4. ZAKRES PRACY

Zakres dysertacji wskazuje na wieloaspektowość prac badawczych, w związku z tym, praca została podzielona na sześć części prezentujących określone wartości realizacyjne (rys. 1): **część 1** - wprowadzenie do realizacji pracy, **część 2** - zagadnienia teoretyczne, **część 3** - charakterystyka podmiotu badawczego, **część 4** - przeprowadzenie badań empirycznych i ich analiza, **część 5** - wielokryterialny model sterowania pojazdami miejskiej komunikacji zbiorowej, **część 6** - wyciągnięte wnioski z realizacji pracy.



Rys. 1 Struktura pracy
Źródło: opracowanie własne

Pierwsza część pracy przybliża punkt odniesienia do realizacji pracy oraz wykonania modelu, który jest głównym tematem dysertacji. Znajdują się tu zagadnienia związane z problemem badawczym, tezą czy też celami.

Druga część pracy dotyczy wykonania przeglądu literatury w temacie transportu miejskiego jako systemu funkcyjnego. Oprócz tego podkreśla określenie problemów transportowych jako przyczyn powstawania kongestii. Autor szeroko również opisuje tu publiczny transport zbiorowy. W ostatnim podrozdziale tej części zostają przedstawione procesy zużycia części pojazdów samochodowych oraz autobusów spowodowane przez ciągłe podróże po miastach. Zostaje tutaj opisany drugi aspekt jakim jest telematyka transportu, w konsekwencji porównania jej jako czynnika, wpływającego na poprawę funkcjonowania miast oraz zaprezentowania konkretnych rozwiązań wdrażanych w aglomeracje miejskie i określenia ich wpływu na nie. W tej części zostały zaprezentowane ważne dla realizacji pracy metodyki optymalizacyjne ruch, metody sterowania komunikacją zbiorową czy też podstawy metodyczne budowy modeli i ich wielokryterialnych pochodnych.

Trzecia część pracy polega na przeprowadzeniu szczegółowej analizy podmiotu badawczego, którym w tym przypadku było miasto Opole. Została wykonana analiza przestrzenna obszaru miejskiego. W tej części zostały również poddane analizie obiekty sterujące miejską komunikacją zbiorową. Dokonano w tej części analizy badań ankietowych, które zostały wykonane w celu weryfikacji zadowolenia pasażerów jak również określenia w jakich punktach rozwoju miasta można szukać wąskich gardeł. Ostatnim elementem tej części jest opracowanie wyników przeprowadzonej ankiety eksperckiej dotyczącej wpływu czynników kształtujących miasto na organizowanie ruchu w nim. Ankieta pozwoliła na dobór wag mających na celu określenie pewnego wzorca miast, mogącego wykorzystać opracowywany model.

Czwartą częścią pracy jest szczegółowa analiza ruchu w mieście podzielona na dwie grupy badawcze. Pierwsza grupa dotyczy analizy ruchu całego miasta, natomiast druga grupa jedynie analizy ruchu dotychczasowych linii autobusowych. Wyniki tego rozdziału są głównie powiązane z wykonaniem wielokryterialnego modelu sterowania ruchem pojazdów miejskiej komunikacji zbiorowej, ponieważ wyniki są analizowane w różnych aspektach zastosowań wielokryterialnego modelu.

Dzięki przeprowadzonej analizie w trzeciej i czwartej części, uzyskano wyniki potrzebne do utworzenia modelu wielu kryteriów, mogących wpływać na ruch pojazdów komunikacji miejskiej. Opracowany model został wykonany w oparciu o metodę zarządzania projektem - metodę PERT. Która polega na określeniu ścieżki krytycznej realizacji projektu określającej

maksymalny czas wykonania projektu. W tej części pracy został zarysowany przykład zastosowania modelu, oraz jego porównanie z rzeczywistym środowiskiem miejskim.

Ostatnia część dotyczy wyprowadzenia wniosków z przeprowadzonej pracy doktorskiej, jak również zaprezentowania zastosowania modelu w aspektach dotyczących Inżynierii Produkcji. Autor w tej części wskazuje kierunki dalszych badań, które należy podjąć w celu weryfikacji opracowanego modelu.

4. METODYKA BADANIA NAUKOWEGO

Metody badawcze określają sposób postępowania poznania naukowego. Z uwagi na określone formy poznania naukowego wpływają planowane i celowe działania. Podstawą badań naukowych jest posługiwanie się poprawnymi, skutecznymi oraz celowo dobranymi, zaplanowanymi i zastosowanymi metodami badawczymi. Metoda badawcza charakteryzuje się postępowaniem według określonych czynności (tzw. procedury badawczej) wraz z zastosowaniem właściwych narzędzi badawczych.

Procedura badawcza zawiera szereg działań koncepcyjnych i rzeczowych połączonych z ogólną koncepcją badań. W związku z powyższymi metodami musi spełniać następujące warunki: zrozumiałość metody, jednoznaczność metody, celowość, niezawodność, efektywność, skuteczność.

Do weryfikacji problemów badawczych w analizowanym obszarze zostały wykorzystane następujące narzędzia badawcze:

- teoretyczne:
 - metoda analityczna, polegająca na analizowaniu stanów fizycznych i zakładach względem siebie, dzięki tej metodzie autor przeanalizował porównanie stanów rzeczywistych z wymodelowanymi,
 - metoda badania dokumentów, za pośrednictwem tej metody zostały przedstawione definicje logistyki miejskiej, jak również telematyki. Dokumentami badanymi były różne artykuły naukowe, akty prawne, itp.,
 - synteza, za pośrednictwem tej metody autor przedstawił pewne złożoności systemów miejskiej, na podstawie ich prostych składowych,
 - metody monograficzne, jako szczegółowe badania indywidualnego przypadku uwzględniające informacje w formie jakościowo-opisowej, w pracy zostały zastosowane do określania czynników kształtujących miasto potrzebnych do wykonania analizy podmiotów mogących zastosować model, jak również do przypisania ich w ścieżce modelu,
 - uogólnienia,
 - metoda porównawcza, dzięki której autor dokonywał porównania wielu czynników ujętych w pracy, tj. czynników kształtujących miasto, wyników przeprowadzonych analiz w stosunku do historycznych danych,
 - metoda studiów literaturowych, pozwalająca na szczegółową analizę literatury w zakresie badanych w pracy, tj. logistyka miejska, telematyka, modelowanie oraz optymalizacja,
- praktyczne:
 - badania natężenia ruchu,
 - badania przepływu osób w transporcie miejskim,
 - metody eksperckie, polegające na powołaniu pewnej grupy ekspertów w celu weryfikacji pewnego problemu, ta metoda użyta była do określenia wag czynników decydujących o rozwoju komunikacji miejskiej zbiorowej,
 - badania ankietowe skierowane do pasażerów, celem tego badania była odpowiedź na stosunek mieszkańców miast oraz ich wiedza nt. funkcjonowania miejskiej komunikacji zbiorowej,
 - metoda porządkowania, wykonana do uporządkowania danych dotyczących analizy natężenia ruchu wykonanych w celu utworzenia i zaprojektowania modelu,
 - metody obserwacyjne, jako metody zakładające wybór spostrzeżeń według z góry określonych warunków, w pracy zostały użyte do badania zachowań mieszkańców względem wykonywania ich podróży po mieście,
 - wywiady bezpośrednie z kadrą zarządczą miejskim zakładem komunikacyjnym oraz z mieszkańcami na temat funkcjonowania miejskiej komunikacji zbiorowej.

5. ASPEKTY TEORETYCZNE

Logistyczne aspekty charakteryzujące miasta to przede wszystkim racjonalne wdrożenia, jak również zarządzenia i badania, których celem jest polepszenie jakości życia mieszkańców. Autor w pracy przedstawia definicje miasta jak również określa koncepcje układów komunikacyjnych wskazując przy tym, iż zastosowania układów radialnych w miastach wpływają na szybki przepływ procesów przemieszczania osób w mieście.

Ponadto autor dokonuje przeglądu literatury przedmiotu, w kierunku rozwoju logistyki w mieście, przedstawiając zarazem różnice pomiędzy podejściami do tego tematu. Na podstawie wykonanego przeglądu została zaproponowana definicja logistyki miejskiej, określająca ją jako: „*ogół procesów usprawniających oraz optymalizacyjnych przepływy osób, ładunków, informacji w miastach poprzez odpowiednie nimi zarządzanie tak, aby zaspokajać potrzeby mieszkańców, jednocześnie uwzględniając aspekty środowiskowe, bezpieczeństwa oraz oszczędnego zużycia energii*”.

W pracy zostały również zaprezentowane główne cele logistyki miejskiej oraz cele cząstkowe, które w odniesieniu do całego systemu tworzą jednocześnie zadania wykonawcze w zakresie aspektów ekonomicznych, ekologicznych oraz społecznych. W planach rozwojowych miast należy uwzględniać wiele stron formalnych, jak również długo okresowość inwestycyjną oznaczającą tworzenie zintegrowanych planów rozwoju na przyszłe lata. W skład takich planów mogą wchodzić aspekty związane z zrównoważoną mobilnością mieszkańców czy też polityką transportową. Polityka transportowa miast została szeroko opisana pod względem jej celów, wdrażanych dokumentacji, jak również koncepcji miejskiego rozwoju transportowego.

Infrastruktura, a dokładnie jej odpowiednie rozmieszczenie odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu miasta. Dzięki niej w sposób sprawny i efektywny dokonywane są przepływy dóbr i usług, aczkolwiek nieraz przy źle zaprojektowanej infrastrukturze mówić można o występowaniu problemów transportowych. Praca przedstawia główne elementy składowe infrastruktury, którą wyróżnić można w miastach.

Problemy transportowe w aglomeracjach miejskich są jego nieodzownym elementem. Racjonalne podchodzenie do ich rozwiązywania, bądź też ograniczania wpływa na efektywność pracy miasta oraz procesów w nim zachodzących. Głównym problemem występującym w miastach jest kongestia. Autor w odniesieniu do problemów transportowych, wskazuje jakie

dokładnie można wyróżnić aspekty, wpływające negatywnie na funkcjonowanie miast, ukazując jednocześnie skutki i sposoby przeciwdziałania problemom. Szeroko w pracy zostaje opisana kongestia oraz jej skutki oddziaływania.

Problemy transportowe nieodzownie związane są z pojazdami miejskiej komunikacji, które dziennie przebywają setki kilometrów po ulicach w celu przetransportowania mieszkańców z punktu początkowego do punktu końcowego ich celów podróży. Realizowanie usług transportowych komunikacji miejskiej w dużej mierze zależy od preferencji użytkowników. Przegląd literatury ukazał jakie oczekiwania mieszkańców miast są względem transportu zbiorowego istotne i oczekiwane, m. in.: chęć skrócenia czasu, zamknięcie centrum miasta dla ruchu samochodów osobowych, dostosowanie rozkładu jazdy, wprowadzenie opłat za parkowanie lub wjazd do centrum, wprowadzenie zniżek/promocji dla pasażerów miejskiego transportu zbiorowego, zwiększenie częstotliwości kursów, liczby przystanków oraz zmniejszenie liczby przesiadek.

Praca uwidacznia cechy publicznego transportu zbiorowego, jak również ograniczenia prawne związane z jego wprowadzeniem. Przedstawia podział rodzajów środków komunikacji miejskiej, jak również uwidacznia analizę porównawczą tych środków. Przejazdy miejskiej komunikacji zbiorowej przez fakt, iż dokonywane są z dużą częstotliwością, uwarunkowują w dużym stopniu zużycie eksploatacyjne pojazdów, które zostało określone jako skutek wpływania na zmniejszenie zużycia.

W pracy oprócz określenia wpływu procesów transportowych w miastach na zużycie pojazdów poruszających się po ulicach, autor zaproponował konkretne działania i czynności dotyczące bezpośrednio części autobusowych. Zostały opracowane konkretne etapy czynności, które należy podejmować w celu zmniejszenia zużycia różnych części samochodowych, i tak:

- **ogumienie** (zastosowanie modelu może ograniczyć zużywanie się ogumienia w autobusach poprzez zmianę linii komunikacyjnych, jeżdżących po głównych drogach miast, jak również na krótszych odcinkach.),
- **układ hamulcowy** (zastosowany model ma za zadanie ograniczyć zużycie tego elementu poprzez wybór takich tras przejazdowych, gdzie czas przejazdu będzie jak najkrótszy. Zmniejszenie tego czasu będzie możliwe poprzez wybór dróg mniej zatłoczonych, a co za tym idzie autobusy będą potrzebowały mniej liczby zahamowań, niż dotychczas),
- **układ kierowniczy** (zastosowanie wielokryterialnego modelu ograniczy zużywanie się układu kierowniczego poprzez dobór linii przejazdowych z mniejszą ilością zakrętów. Jest to możliwe poprzez założenie modelu, przedstawiające, iż linie autobusowe będą jeździły (o ile jest taka możliwość) w linii prostej od centrum przesiadkowego do przystanku krańcowego,
- **mechanizm drzwiowy** (zastosowanie modelu ograniczy zużywanie tego mechanizmu dzięki wprowadzeniu w infrastrukturę drogową miasta częstszych kursów na danej linii. Częstsze kursy autobusowe ograniczą ilość pasażerów jadących w jednym pojeździe, którzy w przeciwieństwie do przepełnionych autobusów mogą niszczyć mechanizmy drzwiowe poprzez opieranie się podczas postoju o drzwi),
- **skrzynia biegów** (zastosowanie modelu podobnie jak w innych przypadkach ograniczy również zużycie tego elementu, dzięki bardziej efektywnej jeździe przez miasto. Kierowcy pojazdów nie będą tak często zmuszani do zmian biegów, dzięki założeniom opracowanego modelu),
- **elektronika poziomująca autobus** (wprowadzenie modelu wpłynie również na ten element. Mniejsza ilość pasażerów konkretnego autobusu, przyczynia się do niższego nacisku na oś autobusu i w konsekwencji mniejszego oddziaływania na elektronikę poziomującą autobus).

Autor szczegółowo przeanalizował istotę telematyki, gdzie dokonał przeglądu literatury badanego obszaru, dzięki czemu zaprezentował definicję telematyki: „**telematyka to rozwiązania, funkcjonujące efektywnie w danym systemie, obejmujące zastosowanie wszelkich narzędzi i technologii, które powstały w wyniku korelacji trzech aspektów: telekomunikacji, informatyzacji oraz informacji, przy jednoczesnej ich automatyzacji**”.

W ujęciu realizacji pracy *telematyka* rozumiana jest jako zastosowanie narzędzi i metod do optymalizacji procesów realizowanych w miastach. Ponadto zostały wyznaczone przez autora obszary funkcjonowania telematyki ze wskazaniem zastosowanych w nich systemów oraz ukazane zostały etapy rozwoju telematyki transportu na przełomie lat.

Autor wskazuje rodzaje systemów telematycznych, wyszczególnionymi zadaniami przez nie pełnionymi, ukazując przy tym wszechstronność telematyki w zastosowaniu gospodarczym. Zawarte wskazanie ITS (Inteligentnych Systemów Transportowych), przyczynia się do uzyskania twierdzenia odniesienia ich jako kluczowego elementu rozwojowego miast. Podczas analizy literatury wnioskiem ze stosowania ITS, jest ich potrzeba wdrożenia w większych ośrodkach miejskich, aczkolwiek, przed wdrożeniem stoi wiele przeszkód, m. in.:

- wysokie koszty wdrożenia technologii,
- długi czas implikacji systemu we wskazanych obiektach,
- pełna złożoność systemowa (błąd jednego podsystemu oddziałuje na cały system),
- brak gwarancji na efektywne działanie wdrożonego systemu.

Natomiast podczas, gdy zostanie z powodzeniem wdrożony system ITS w obszarze miejskim jest w stanie przynieść wymierne korzyści w postaci:

- poprawy komfortu podróżowania i warunków ruchu dla kierowców,
- wzrost przepustowości ulic (o około 20-30 %),
- zmniejszenie strat czasu w sieci ulic (o około 40-60%),
- poprawa bezpieczeństwa ruchu drogowego (zmniejszenie liczby wypadków) (o około 50-80%),
- poprawa skuteczności działania służb ratowniczych (o około 40-60%),
- wpływ na środowisko naturalne (redukcja emisji spalin, zmniejszenie zużycia paliwa) (o około 30-50 %).

Wynika z tego, iż zastosowanie systemów ITS w dużym stopniu poprawia funkcjonowanie miasta i daje możliwość do sprawnego jego rozwoju. W pracy autor dokonał szczegółowego opisu zastosowań rozwiązań telematycznych i ich wpływu na funkcjonowanie systemów w którym zostały one zastosowane. Wśród opisanych rozwiązań należy: system łączności radiowej (DAB, RDS, TMC, DMR), system komunikacji (GSM), globalny system pozycjonowania (GPS), system sterowania sygnalizacją świetlną (SCATS), urządzenia do monitorowania ruchu: radary mikrofalowe, pętla indukcyjne, czytniki numerów rejestracyjnych pojazdów, cyfrowe kamery (ITC), radary dopplerowskie, Light Detection and Ranging (LIDAR), detektory stosowane na drogach, internetowa sieć bezprzewodowa (WIFI).

Z przeprowadzonej analizy porównawczej metod i technik służących wyznaczaniu optymalnych tras wynika, iż różnorodność stosowania wszelakich algorytmów uzależniona jest w dużej mierze od problemu, który rozwiązuje. Funkcjonowanie opisanych w rozdziale technik i metod jest bardzo ze sobą zbliżone. Obserwuje się zasadność łączenia różnych algorytmów

mów, jak również wskazuje na konieczność badania algorytmów routingu w celach optymalizacji tras. Praca dodatkowo szeroko opisuje problemy związane z wyznaczaniem najkrótszych tras, tj. problem komiwojżera, marszrutyzacji, chińskiego listonosza, najkrótszej ścieżki oraz minimalne drzewo rozpinające. Autor wskazał jakimi algorytmami powinno się rozwiązywać poszczególne problemy optymalizacji tras i jakie cele są nim stawiane.

Proces planowania, organizowania oraz zarządzania publiczną komunikacją zbiorową stał się problemem współczesnych planistów. Z pomocą przychodzą rozwiązania informatyczne, które wspomagają te procesy. Firmy oferujące te rozwiązania nieustannie rozwijają się i szukają coraz to lepszych rozwiązań. Należy jednak pamiętać, że systemy lokalne powinny stanowić podstawowe narzędzie do konstrukcji i budowy rozkładów jazdy, przy zachowaniu spójności systemowej.

Z przeprowadzonej analizy rozwiązań stosowanych na rynku technologii oraz programów służących planowaniu i zarządzaniu ruchem w mieście wynika, iż w głównej mierze firmy skupiają się na tworzeniu takich programów, które poprawiają dotychczasowe rozkłady jazdy, przy jednoczesnym obniżaniu kosztów operacyjnych. Jednym z najciekawszych rozwiązań planistycznych funkcjonujących na rynku jest firma DPK System. To właśnie ona w swoim wachlarzu produktów wyselekcjonowała oprogramowanie, które w pełni dostosowuje się do warunków w których jest zaimplementowana przy zachowaniu początkowych założeń.

Autor przedstawił aspekty związane z modelowaniem problemów definiowanych w różnych aspektach życia gospodarczo-społecznego. Zostały przedstawione różne podejścia do modelowania jak również ich klasyfikacja. Co więcej zostały opisane wielokryterialne techniki podejmowania decyzji, które są kluczowe dla problemu. Na podstawie przeglądu literatury autor zaprezentował następujące etapy opracowywania wielokryterialnego modelu sterowania ruchem pojazdów miejskiej komunikacji zbiorowej:

1. określenie celowości, kryterialności oraz obiektowości modelu,
2. zebranie danych o badanym podmiocie,
3. przypisanie wartościom jednostek oraz wag,
4. identyfikacja struktury modelu oraz relacji między jego elementami,
5. dokonanie analizy dotychczasowych relacji w systemie,
6. dokonanie analizy porównawczej za pomocą przypisania wag badanych obiektów,
7. przypisanie zebranych danych do założeń opracowanego modelu,
8. wskazanie wyniku modelu,
9. jakościowa i ilościowa analiza modelu wykonana ex ante,
10. wdrożenie i weryfikacja poprawności modelu wykonana ex post.

W pracy została również wykonana charakterystyka opracowywanego modelu sterowania w zestawieniu z 5 grupami: określenie celu modelu, perspektywa modelowania, sposób konstruowania modelu, techniki modelowania oraz poziom agregacji i zakres analizy (tabela 2).

Tabela 2 Charakterystyka modelu referencyjnego sterowania ruchem pojazdów miejskiej komunikacji zbiorowej

Cel nadrzędny modelu	Perspektywa modelowania	Sposób tworzenia modelu	Techniki modelowania	Poziom agregacji i zakres analizy
minimalizacja kosztów; redukcja czasu ; rozwój infrastruktury; poprawa efektywności ; poprawa jakości życia	planistyczna technologiczna polityczna behawioralna	dedukcyjny indukcyjny mieszany	optymalizacja heurystyka symulacja	natężenie ruchu; drogi i inne obiekty przynależące; strumienie osób; mieszkańcy; administracja; komunikacja miejska; autobusy

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Witkowski J., Modelowanie logistyki miejskiej. W poszukiwaniu nadrzędnego celu i kryteriów oceny modelu, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu nr 234, s. 131

W związku z tym, iż w dysertacji zostały postawione następujące kryteria wpływające na wykonanie modelu: czas przejazdu, łatwość przemieszczania się pasażerów między różnymi dzielnicami miasta, planowanie nowych linii autobusowych, zużycie eksploatacyjne pojazdów, to celowością jego wykonania jest przede wszystkim wpływanie na redukcję czasu podróży po mieście, jak również poprawa efektywności funkcjonowania systemów miejskich, przy jednoczesnej poprawie jakości życia. Mimo stosowania metod statystycznych opracowany model ma być referencyjnym modelem opisowym (z wykorzystaniem wiedzy eksperckiej, sprawdzonych rozwiązań, metod, procedur, standardów oraz zachowań), który zostanie jedynie sprawdzony dla jednego systemu, natomiast wypracuje to pewną metodykę dalszych prac nad implementacją w systemy miejskie wielokryterialnego modelu. Wyniki analizy statystycznej służą do przyjęcia czasów przejazdu, natomiast które mogą zostać zastąpione innym rodzajem danych dotyczących natężenia ruchu. Jeżeli chodzi o sposób konstruowania modelu to wykorzystywane są metody mieszane, czyli takie które wykorzystują dedukcyjne i indukcyjne rozumowania. Technik zastosowania modelowania można by wymienić dużo, natomiast do głównych z pewnością zaliczyć można modele optymalizacyjne w skład których wchodzi wielokryterialne optymalizacje dróg i czasów przemieszczania oraz heurystyczne, które polegać będą na opisie i graficznym przedstawieniu modelu. Zakresem analizy i prób modelowania są przede wszystkim pojazd komunikacji zbiorowej i ich przejazdy. Oczywiście jednoczesnym obiektem, który będzie uwzględniany w modelu są mieszkańcy miast, dotychczasowa infrastruktura, oraz inni uczestnicy ruchu.

W związku z tym, wielokryterialny model sterowania pojazdami miejskiej komunikacji zbiorowej składać się będzie z następujących elementów: modelu blokowego, graficzne przedstawienie problemu decyzyjnego, sformowanego do rozwiązania, modelu matematycznego zapisanego w postaci zastosowanej metody PERT, wielokryterialnego modelu SPMKZ, przedstawiającego postawione kryteria i zestawienia ich w celu uzyskania rozwiązania.

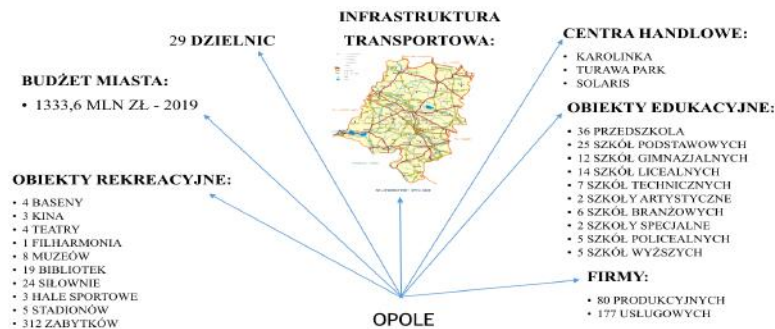
6. CHARAKTERYSTYKA PODMIOTU BADAWCZEGO

Czynników kształtujących miasto jest bardzo wiele, natomiast w pracy zostały przeanalizowane najważniejsze z nich i mające bezpośrednie znaczenie dla niego:³ dzielnice/osiedla miasta, centra handlowe, obiekty rekreacyjne (parki, kina, teatry, itp.), edukacja miasta, finansowanie miasta, firmy produkcyjno-usługowe, infrastruktura transportowa: drogowa, kolejowa, wodna - morska, wodna - śródlądowa, lotnicza.

³ Stajniak M., Racjonalizacja transportu w logistycznych procesach zaopatrzenia i dystrybucji, Instytut Logistyki i Magazynowania, 2012

Przeprowadzona w pracy analiza przestrzenna zakresu obiektu badawczego wykazała szczegółowy obraz badanego obiektu badawczego z uszczegółowieniem aspektów budujących miasta oraz ich wpływu na prowadzone podróże miejską komunikacją zbiorową: (rys. 2)

- dzielnice/osiedla miasta (możliwość podróży pomiędzy dzielnicami odgrywa istotną rolę w przemieszczaniu się po obszarach miejskich, ponieważ miasta powinny dawać możliwość swobodnego przemieszczania się mieszkańców pomiędzy nimi),
- centra handlowe (dotarcie do Centrów Handlowych ma istotny wpływ na rozwój społeczeństwa miasta pod względem osiągnięcia potrzeb pierwszego rzędu względem piramidy Masłowa),
- obiekty rekreacyjne tj. parki, kina, teatry, itp. (potrzeby mieszkańców uwarunkowane są przez osiąganie przez nich celów rozrywki oraz rozwijania samego siebie. Poza tym częstym wyborem środka transportu na dotarcie do tych miejsc jest komunikacja zbiorowa),
- edukacja miasta (szczyty komunikacyjne w znacznych przypadkach spowodowane są dojazdami do szkół oraz innych placówek edukacyjnych. Taki stan ma miejsce zazwyczaj w godzinach porannych kiedy rodzice, chcą odwieźć dziecko do szkoły oraz popołudniowych, kiedy chcą je zabrać),
- finansowanie miasta (potrzeby rozwojowe miast potrzebują dużych zasobów środków pieniężnych, dlatego też tak ważną rolę odgrywa finansowanie miasta, a mianowicie ich dochodowość, która w skali roku wpływa na inwestycje np. infrastrukturalne),
- firmy handlowo-usługowe (gospodarka miasta uwarunkowana jest od ilości firm produkcyjnych czy też usługowych. Dzięki rozwojowi tych obszarów miasto może gwarantować mieszkańcom stabilność zatrudnienia, lecz co za tym idzie powinno organizować łatwy sposób dotarcia do różnych podmiotów gospodarczych usytuowanych najczęściej w różnych miejscach w mieście),
- infrastruktura transportowa (infrastruktura transportowa jest wszelakim łącznikiem mieszkańców oraz podmiotów z obiektami użyteczności publicznej, innych podmiotów, rekreacji itd. Dlatego tak ważny jest jej rozwój oraz racjonalne zarządzanie ruchem po następujących rodzajach infrastruktury:
 - drogowa (główny środek łączący),
 - kolejowa (za pośrednictwem kolei większa część osób przyjeżdża i odjeżdża z miasta),
 - wodna - morska i śródlądowa (o ile znajduje się w mieście, wpływa na racjonalny przepływ dóbr),
 - lotnicza - głównie polega na dostarczeniu mieszkańcom potrzeby podróży w szybkim czasie i w skali międzynarodowej).



Rys. 2 Wyniki charakterystyki podmiotu badawczego
Źródło: opracowanie własne

Dodatkowo w pracy autor na podstawie gęstości zaludnienia zaprezentował kryteria podziału doboru ilości przejazdów linii autobusowych w czasie 1 godziny, przez poszczególne dzielnice: (tabela 3)

- od 0 do 0,5 - rzadkie kursy (1 kurs/godz.),
- od 0,51 do 1 - sporadyczne (3 kursy/godz.),
- od 1,01 do 10 częste kursy (4 kursy/godz.),
- od 10,01 i więcej - bardzo częste kursy (6 kursów/godz.).

Tabela 3 Analiza współczynnika zaludnienia względem dzielnic

Nazwa dzielnicy	Powierzchnia [km ²]	Liczba mieszkańców [tyś.]	Współczynnik zaludnienia [tyś./km ²]
Armii Krajowej	1,3	16,5	12,69
Malinka	1,7	11,5	6,76
Śródmieście	2,9	18,2	6,28
Stare Miasto	1,8	10,4	5,78
Zaodrże	2,9	11,6	4,00
Chabry	3,1	8,2	2,65
Nadodrże	3,3	6,1	1,85
Kolonia Gosławicka	5	6,6	1,32
Nowa Wieś Królewska	5,9	5	0,85
Grotowice	4	3,1	0,78
Borki	0,7	0,5	0,71
Szczepanowice - Wójtowa Wieś	7,1	4,7	0,66
Chmielowice	3,4	1,8	0,53
Półwieś	8	3,2	0,40
Groszowice	8,1	2,9	0,36
Zakrzów	4,3	1,4	0,33
Winów	2,4	0,7	0,29
Gosławice	7,7	2,1	0,27
Krzanowice	1,9	0,5	0,26

Nazwa dzielnicy	Powierzchnia [km ²]	Liczba mieszkańców [tyś.]	Współczynnik zaludnienia [tyś./km ²]
Czarnowasy	14,1	3,4	0,24
Grudzice	12,9	3,1	0,24
Malina	5,6	1,3	0,23
Zerkowice	1,5	0,3	0,20
Wróblin	4,7	0,9	0,19
Sławice	7,1	1	0,14
Bierkowice	5,5	0,6	0,11
Brzezie	2,1	0,2	0,10
Świerkle	8,6	0,6	0,07
Wrzoski	11,5	0,6	0,05

Źródło: Opracowanie własne

Analiza dotycząca obiektów sterujących miejską komunikacją zbiorową przeprowadzona na podstawie miasta Opola wykazała dużą różnorodność w rodzajach środków komunikacji, w którym wyróżnić można następujące rodzaje środków transportu publicznego: **MZK** - obsługujące 18 linii autobusowych, **PKS** - działający w porozumieniu z czterema dużymi firmami transportowymi, **PKP** - obsługujący linie dalekobieżne (międzynarodowe) oraz regionalne, **TAXI** - na terenie miasta funkcjonuje 6 firm świadczących usługi przewozowe, **OPOLE BIKE** - 19 stacji dokujących umiejscowionych na terenie miasta, mogących wypożyczyć 198 rowerów, do użyteczności publicznej

Analiza wykazała również możliwości rozwojowe firmy przewozowej Miejskiej Komunikacji Zbiorowej, której tabor autobusowy na dzień dzisiejszy wynosi 92 pojazdy mogące przemieścić jednocześnie 9883 pasażerów. Wykonana w pracy analiza zakresu wykorzystania rozwiązań telematycznych w mieście Opolu na przykładzie firmy świadczącej usługi przewozowe dla mieszkańców pozwala przedstawić jak miasto wojewódzkie wykorzystuje rozwiązania telematiki w transporcie oraz pozwala wykorzystać dotychczasowe wdrożenia do dalszych badań i rozwoju miasta. W Opolu rozwiązaniami z zakresu telematiki, dotychczas funkcjonujących w transporcie publicznym są: **system lokalizowania pojazdów** – GPS (mający zadanie lokalizowania autobusu w którym dokładnie miejscu się znajduje, oraz określeniu przybliżonego czasu dojazdu do najbliższego przystanku), **tablice zmiennej treści** (najnowsze rozwiązanie telematyczne, które ma za zadanie informowania pasażerów oczekujących na przystankach o czasie przyjazdu konkretnej linii autobusowej), **system dynamicznej informacji pasażerskiej** – kiedy przyjedzie (główną zaletą tego systemu jest informacja w czasie rzeczywistym o czasie przyjazdu pojazdu danej linii autobusowej, na następny przystanek. Niestety jeszcze tablice zmiennej treści oraz system dynamicznej informacji pasażerskiej nie są ze sobą połączone, a na tablicach wyświetla się czas planowanego przyjazdu autobusu).

W przeprowadzonej ankiecie wzięło udział 100 respondentów (48% mężczyzn oraz 52% kobiet), głównie uczniów ze szkół ponad gimnazjalnych. Powodem wyboru tak młodej grupy respondentów udzielających odpowiedzi w ankiecie był fakt, iż miasto Opole prowadzi kampanie promującą rozwój młodych osób, jak również, częsty wybór przez młodych ludzi komunikacji miejskiej. Pytania w ankiecie dotyczyły problematyki związanej z przejazdami komunikacji miejskiej w Opolu oraz ich usprawnień. Badania zostały wykonane w lutym 2019 roku. Analiza ankiet wykazała dużą elastyczność na zmiany komunikacji publicznej w Opolu względem opinii mieszkańców. Respondenci wskazują zapotrzebowanie głównie na zmiany względem czasu przejazdów komunikacji miejskiej, przez liczne opóźnienia działających dotychczas linii autobusowych. Po przeprowadzonej analizie ankietowej, wyciągnąć można następujące wnioski:

1. Udział w ankiecie wzięło 100 respondentów z czego 48% stanowiły mężczyźni, a 52% kobiety,
2. Wiek respondentów: 67% osoby do 18 roku życia, 27% osoby od 19 do 26 roku życia, 6% osoby od 27 do 65 roku życia (przyczyną wysokiej populacji osób do 18 roku życia jest częsty wybór przez nich komunikacji miejskiej),
3. Status społeczny: 89% osoby uczące się, 4% osoby studiujące, 7 % osoby pracujące,
4. Częstotliwość korzystania z przejazdu komunikacją miejską: 65% codziennie, 5% raz w tygodniu, 24% sporadycznie, 6% nie korzysta z usług komunikacji miejskiej,
5. 81% nie posiada własnego środka transportu, natomiast 88% wybiera autobus jako środek komunikacji,
6. 76% ankietowanych uważa, że potrzebne są zmiany dotyczące funkcjonowania komunikacji miejskiej,
7. 63% osób opowiedziało się za zwiększeniem liczby kursów autobusowych, 20% za wprowadzeniem pasa ruchu dla autobusu, a 13% za zmianą trasy przejazdu pojazdu. Dodatkowo 13 % respondentów uważa, żeby ograniczyć opóźnienia przyjazdu autobusu na przystanek (lepsza punktualność), poprawić kulturę osobistą kierowców, wprowadzić większą ilość linii nocnych, wprowadzić linie autobusowe łączące wszystkie dzielnice miasta.
8. 66% ankietowanych uważa że przebieg aktualnych linii autobusowych nie funkcjonuje właściwie,
9. Najczęstszy wybór komunikacji miejskiej jest podczas dojazdu do szkoły, na zakupy, do znajomych, rodziny,
10. Przyczynami ograniczenia wyboru komunikacji miejskiej są: zły rozkład jazdy (45%), odległość od przystanku (24%), cena biletu(22%) i konieczność przesiadania się (18%).

Założeniem wyboru miast, które może zastosować wykonany model jest oprócz oceny z przeprowadzonej analizy, warunek, aby po mieście funkcjonował jedynie 1 środek komunikacji miejskiej, jakim jest autobus. Wagi poszczególnych czynników zostały dobrane za pomocą metody eksperckiej, polegającej na przeprowadzeniu kwestionariusza ankiety (załącznik 11) wśród 12 ekspertów z dziedziny transportu. Ankieta została przeprowadzona wśród przedstawicieli ośrodków badawczych oraz gospodarczych, tj.: Politechnika Opolska, Akademia Morska w Szczecinie, Politechnika Warszawska, Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Politechnika Koszalińska, Politechnika Częstochowska.

Tabela 4 przedstawia wybór kryteriów wykorzystanych podczas wykonanej analizy porównawczej miast metodą średnich ważonych.

Tabela 4. Czynniki oceny doboru miast do wzorca metodą średniej ważonej

l.p.	Czynnik	Grupa	Waga czynnika	Ocena				
				1	2	3	4	5
1	Liczba ludności	Dane demograficzne	0,46	108668	123681	138694	159701	180708
2	Powierzchnia [km ²]		0,39	33	71	110	194	278

3	Gęstość zaludnienia [osób/km ²]		0,44	503	1017	1530	2401	3273
4	Liczba dzielnic		0,25	4	12	21	30	39
5	Ilość Centrów Handlowych (powierzchnia pow. 5 tys. m ²)	Handel	0,28	1	2	3	5	6
6	Ilość większych skupisk sklepów (pow. 10)		0,29	3	6	10	14	18
7	Ilość basenów	Kultura/rekreacja miasta	0,20	1	3	6	10	14
8	Ilość kin		0,23	1	2	3	4	6
9	Ilość teatrów i filharmoni		0,21	0	2	4	6	9
10	Ilość muzeów		0,17	1	3	5	10	15
11	Ilość bibliotek		0,19	1	6	11	15	20
12	Ilość siłowni/fitness		0,25	5	8	11	18	24
13	Ilość hal sportowych		0,31	1	3	5	9	12
14	Ilość stadionów	0,31	1	2	3	5	6	
15	Ilość szkół podstawowych	Edukacja miasta	0,41	20	25	30	37	43
16	Ilość szkół gimnazjalnych		0,40	1	4	7	11	15
17	Ilość szkół branżowych		0,40	4	5	7	8	10
18	Ilość szkół licealnych, w tym dla dorosłych		0,36	6	12	18	27	36
19	Ilość szkół technicznych, w tym artystyczne		0,36	5	8	11	21	32
20	Ilość szkół specjalnych		0,26	1	2	4	5	7
21	Ilość szkół policealnych, w tym dla dorosłych		0,31	2	9	16	24	32
22	Ilość przedszkoli		0,32	30	41	51	70	89
23	Ilość uczelni wyższych	0,37	0	2	3	6	8	
24	Budżet miasta [mln. zł]	Finansowanie miasta	0,43	645	795	945	1115	1284
25	Ilość firm produkcyjnych	Gospodarka miasta	0,39	4	14	23	45	66
26	Ilość firm usługowych		0,37	42	98	153	245	336
27	Ilość stref ekonomicznych		0,30	0	0	1	1	2
28	Ilość dróg krajowych przechodzących przez miasto	Infrastruktura miasta	0,32	0	1	2	4	5
29	Ilość dróg wojewódzkich przechodzących przez miasto		0,30	0	2	3	4	5
30	Ilość dróg powiatowych przechodzących przez miasto		0,31	2	21	41	88	135
31	Ilość dróg gminnych przechodzących przez miasto		0,30	49	176	303	483	663
32	Ilość pojazdów zarejestrowanych w mieście		0,42	31360	52750	74140	91826	109511
33	Ilość stacji kolejowych		0,34	1	3	5	8	11
34	Ilość linii kolejowych przechodzących przez miasto		0,31	1	2	3	5	8
35	Rodzaje komunikacji miejskiej	Komunikacja	0,41	5	4	3	2	1
36	Ilość taboru autobusowego		0,46	10	64	118	184	251
Suma wag			11,83					

Źródło: Opracowanie własne

Oceny w wybranej metodzie zostały dobrane zgodnie z zebranymi danymi, gdzie stanowiły odpowiednio: **1** - minimalna wartość badanego czynnika, **2** - średnia z minimalnej i średniej wartości, **3** - średnia wartość badanego czynnika, **4** - średnia ze średniej i maksymalnej wartości, **5** - maksymalna wartość badanego czynnika.

Dane do wykonania analizy porównawczej zostały, w zależności od grupy czynników, zaczerpnięte z różnych źródeł: dane demograficzne,⁴ handel,⁵ kultura/rekreacja miasta,⁶ edukacja miasta,⁷ finansowanie miasta,⁸ gospodarka miasta,⁹ infrastruktura miasta,¹⁰ komunikacja - strony internetowe miejskich zakładów komunikacyjnych.

W tabeli 5 zostały użyte skróty, będące jednocześnie wyjaśnieniem poszczególnych wartości:

- O_o - ocena ogólna danego miasta (suma wag danego miasta dzielona przez sumę wartości wag (11,83)),
- R - różnica pomiędzy O_o, a wartością O_o wzorca (Opola).

Miasta, które były dobrane zostały podzielone na grupy według liczby mieszkańców danych miast: (tabela 5)

- grupa 1 miasta od 100 000 do 120 600 liczby ludności,
- grupa 2 -miasta od 120 601 do 140 000 liczby ludności,
- grupa 3 miasta od 140 001 do 200 000 liczby ludności.

Dobór grup został dobrany jedynie w celu uporządkowania danych oraz zakwalifikowania ich względem pewnego porządku. Ponadto daje możliwość zbadania czy liczba zatrudnienia wpływa na wynik analizy.

⁴ <http://www.polskawliczbach.pl/Miasta> [dostęp 20.05.2019 r.]

⁵ <http://www.google.pl>, <http://www.google.maps.pl> [dostęp 20.05.2019 r.]

⁶ <http://www.google.pl>, <http://www.google.maps.pl> [dostęp 20.05.2019 r.]

⁷ <https://stat.gov.pl/> - vademecum według opracowania urzędów statystycznych na rok 2017 [dostęp 20.05.2019 r.]

⁸ <http://bip.um.pl/> [dostęp 20.05.2019 r.]

⁹ <https://panoramafirm.pl/> [dostęp 20.05.2019 r.]

¹⁰ <https://stat.gov.pl/>, <https://www.gddkia.gov.pl>, <https://www.mzd.pl>, <http://zdp.pl>, <http://www.gzd.eu/pl> [dostęp 20.05.2019 r.]

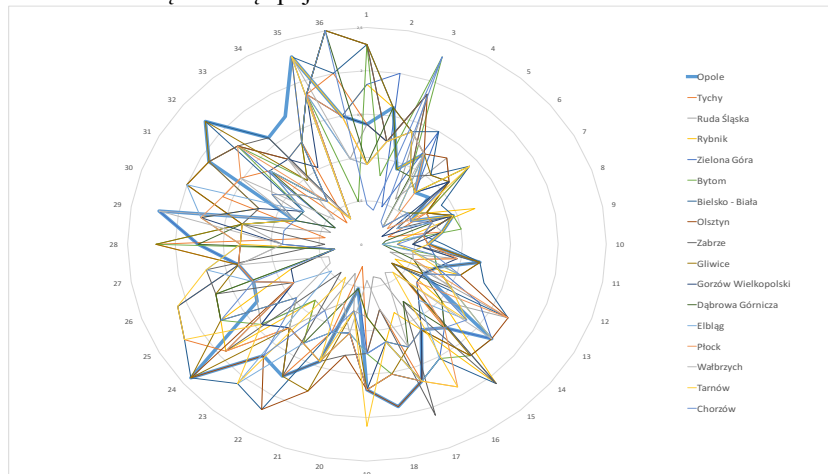
Tabela 5. Analiza porównawcza wszystkich grup polskich miast w kierunku możliwości zastosowania opracowanego modelu

	Elbląg	Płock	Wałbrzych	Tarnów	Chorzów	
O _o	2,924	3,294	2,521	3,306	2,769	
R	0,885	0,515	1,288	0,503	1,041	
	Opole	Tychy	Ruda Śląska	Rybnik	Gorzów Wielkopolski	Dąbrowa Górnicza
O _o	3,809	3,286	2,801	3,186	2,965	2,681
R	0,000	0,523	1,009	0,623	0,844	1,128
	Zielona Góra	Bytom	Bielsko - Biała	Olsztyn	Zabrze	Gliwice
O _o	3,463	3,447	4,078	4,051	3,488	3,963
R	0,347	0,363	-0,268	-0,242	0,322	-0,154

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych statystycznych

Analiza pierwszej grupy miast z najmniejszą liczbą ludności wykazała, iż miastem, który jest najbliższym wzorca, jest Tarnów z różnicą o 0,503 i średnią ocen 3,306. Miasto, korzysta z jednego rodzaju komunikacji miejskiej, jakim jest autobus. Biorąc to założenie pod uwagę miasto Tarnów nadaje się do zastosowania proponowanego modelu. Drugą grupą miast stanowiły miasta mające średni stopień ilości mieszkańców. W tej grupie znalazł się również wzorzec, czyli miasto Opole. Jedynym miastem z tej grupy, który może zastosować model jest Rybnik, ponieważ funkcjonujące na jego terenie środki komunikacji zbiorowej to autobusy. Wynik analizy dla Rybnika, kształtuje się na poziomie 3,186 punktów, co daje różnicę między wzorcem 0,623 punktu, choć nie jest to najlepszym dopasowaniem z tej grupy (Tychy - 3,286). Ostatnią analizowaną grupą są miasta, które mają największą ilość mieszkańców w spośród analizowanych ośrodków. Ta grupa, co ciekawe, stanowi najlepsze dopasowanie do wzorca. Ponieważ wartości różniące badane miasto od Opola są najmniejsze i wahają się od -0,268 do 0,363. Każde miasto z tej grupy wypadło lepiej w analizie niż wszystkie miasta z poprzednich grup. Najlepsze dopasowaniem do zastosowania wielokryterialnego modelu jest w Gliwicach, gdzie zostały ocenione na 3,963 punktów, co jednocześnie daje różnicę pomiędzy Opolem jedynie -0,154. Liczba ujemna oznacza, iż Gliwice posiadają wyższą ocenę, niż analizowany wzorzec. Rys. 3 przedstawia zestawienie łączne wszystkich analizowanych podmiotów ze wyszczególnieniem miasta Opola na wykresie radarowym.

Wykres w dosadny sposób ukazuje, które czynniki miały największy wpływ na budowaniu różnic pomiędzy analizowanymi obiektami. Zwrócić należy szczególną uwagę na wykres dotyczący zestawienia Opola z miastem Gliwice, który potwierdza wcześniej wyciągnięte wnioski, dotyczące najlepszego dopasowania. Wyczytać z niego można, iż linie praktycznie się nakładają, oznacza iż ich wartości są ze sobą spójne.



Rys. 3. Wykres radarowy zestawiający wszystkie miasta ze wyszczególnieniem wzorca
Źródło: opracowanie własne

Wyczytać z wykresu można następujące zależności miasta wzorcowego względem innych miast: mocne punkty, słabe punkty, obszary mające takie same wartości porównawcze. Punktami, które są na obrzeżach wykresu i dotyczą miast Opola w przeprowadzonej analizie są: ilość siłowni, ilość przedszkoli, ilość dróg powiatowych, ilość pojazdów zarejestrowanych. Jeżeli chodzi natomiast o dane które dotyczą słabych punktów względem innych miast są: ilość bibliotek, ilość szkół licealnych, ilość dróg krajowych. Podobnymi elementami miast będą takie czynniki jak: liczba ludności czy też liczba stadionów.

Przeprowadzona analiza wykazała, w których miastach najbardziej prawdopodobnie będzie można zastosować opracowany w pracy model oraz wskazała różne aspekty porównawcze dotyczące rozwoju miast. Przeprowadzanie takich analiz pomoże władzom miast w rozwoju terenów, jak również ukaże w jakich obszarach występują pewne niedociągnięcia względem innych ośrodków. Potencjalnymi miastami, które mogłyby w przyszłości zastosować zaprezentowany w pracy wielokryterialny model są: Gliwice (najlepsze dopasowanie), Tarnów, Rybnik, Zielona-Góra, Bielsko-Biała.

7. BADANIA EMPIRYCZNE NATĘŻENIA RUCHU

Uszczegółowienie analizy natężenia ruchu w mieście jest kluczowym elementem aby dokładnie mówić o problemach komunikacyjnych w miastach. Wykonanie takiej analizy ma na celu:

- wskazanie czy kierunek jazdy jest istotnym elementem natężenia ruchu,
- wskazanie w których dniach ruch w mieście jest do siebie podobny,
- zobrazowanie, w których dokładnie godzinach występuje wzmożony ruch na drogach,
- wyszukanie dróg, będących tzw. wąskim gardłem (ograniczenie przepływu pojazdów, tworząc jednocześnie granicę wydajności dla całego systemu) badanego obiektu.

Analiza została wykonana w programie Mathematica firmy Wolfram. Jest to komercyjny system obliczeń symbolicznych i numerycznych opracowany w 1988 przez Stephena Wolframa.

Analiza statystyczna zawiera następujące etapy:

- obliczenie statystyk opisowych w tym: średniej, mediany, mody, liczności (mody), minimum, maksimum, odchylenia standardowego oraz współczynnika zmienności,
- zbadanie czy określona cecha w populacji jest rozkładem normalnym,
- przeprowadzenie analizy ANOVA rang Kruskala-Wallisa w celu weryfikacji hipotezy o nieistotności różnic pomiędzy medianami badanej zmiennej w kilku populacjach,
- wyciągnięcie wniosków, polegające na przyporządkowaniu, które grupy danych są sobie bliskie.

Szczegółowe dane początkowe zostały dołączone w załącznikach 9 i 13.

Statystyki ogólne danych

Przeprowadzone badania mają na celu przedstawienie czy dane są znacząco od siebie różne i czy wyniki nie będą wskazywać nie pożądanym czynników do wykonania pracy (tabela 6).

Tabela 6. Statystyki opisowe bez podziału na grupy

Zmienna	Bez podziału na grupy Statystyki opisowe (STATISTICA)								
	Nważnych	Średnia	Mediana	Moda	Liczność (Mody)	Minimum	Maksimum	Odch.std	Wsp.zmn.
Czas	52353	31,89	22,25	18,29	421	3,02	1965,6	54,56	171,05

Źródło: opracowanie własne

Średni czas przejazdu w badaniu wynosi 31,89 s, a odchylenie standardowe dla tej cechy to 54,56 s (zatem wartości średnio różnią się od średniej o niemal 55 s). Mediana, czyli wartość środkowa danych, wynosi 22,25 s. Najczęściej występującą daną (moda) jest czas 18,29 s. Współczynnik zmienności na poziomie 171 % świadczy o dużym zróżnicowaniu danych. Potwierdzić to może minimalny oraz maksymalny czas przejazdu, gdzie minimalny czas przejazdu wynosi 3,02 s., natomiast maksymalny czas to już 1965,6 s, dając różnicę pomiędzy tymi dwoma czasami aż 1932,58 s.

Przeprowadzając test normalności dla wszystkich danych stwierdzić można, iż badana populacja nie przyjmuje rozkładu normalnego, niezależnie dla których badanych grup, ponieważ w każdym przypadku $p < ,01$ (tabela 7).

Tabela 7 Test normalności z podziałem na wszystkie grupy

Wyniki zagregowane Testy normalności (STATISTICA)	Zależna: Czas				
	Zmienna	N	maks D	K-S (p)	Lillief. (p)
Czas	Wszystkie dane	52353	0,300021	p < ,01	p < ,01
Czas	Kierunek: 2	25704	0,301006	p < ,01	p < ,01
Czas	Kierunek: 1	26649	0,299156	p < ,01	p < ,01
Czas	Poniedziałek	7479	0,305744	p < ,01	p < ,01
Czas	Wtorek	7479	0,312852	p < ,01	p < ,01
Czas	Środa	7479	0,296878	p < ,01	p < ,01
Czas	Czwartek	7479	0,303700	p < ,01	p < ,01
Czas	Piątek	7479	0,315213	p < ,01	p < ,01
Czas	Sobota	7479	0,231959	p < ,01	p < ,01
Czas	Niedziela	7479	0,272077	p < ,01	p < ,01
Czas	Godzina: 6	5817	0,261547	p < ,01	p < ,01
Czas	Godzina: 8	5817	0,337002	p < ,01	p < ,01
Czas	Godzina: 10	5817	0,271444	p < ,01	p < ,01
Czas	Godzina: 12	5817	0,287355	p < ,01	p < ,01
Czas	Godzina: 14	5817	0,276791	p < ,01	p < ,01
Czas	Godzina: 16	5817	0,330531	p < ,01	p < ,01
Czas	Godzina: 18	5817	0,262565	p < ,01	p < ,01
Czas	Godzina: 20	5817	0,288831	p < ,01	p < ,01
Czas	Godzina: 22	5817	0,262091	p < ,01	p < ,01

Źródło: opracowanie własne

Analiza wykazała, iż dane nie będą w znaczący sposób zniekształcały wyników przeprowadzonej analizy, natomiast w jasny sposób przedstawia postawione na początku rozdziału cele wykonawcze. Poniżej została wykonana analiza statystyczna dotycząca grup tj.:

- kierunek jazdy w którym pojazdy się poruszają,
- dni tygodnia w których pojazd się przemieszcza,
- godziny w których następuje przejazd.

Opracowanie statystyczne dla kierunku jazdy

Tabela 8 przedstawia statystyki opisowe zestawiając ze sobą kierunek jazdy poruszających się pojazdów po mieście.

Tabela 8 Statystyki opisowe z podziałem na kierunek jazdy

Zmienna	Wyniki zagregowane Statystyki opisowe (STATISTICA)								
	Kierunek	Nważnych	Średnia	Mediana	Moda	Liczność (Mody)	Minimum	Maksimum	Odch.std
Czas	2	25704	31,93	22,32	8,78	205	3,02	1731,60	54,93
Czas	1	26649	31,86	22,18	10,51	228	3,02	1965,60	54,20

Źródło: opracowanie własne

Zaobserwować można, iż dane są do siebie podobne. Natomiast kierunek 1 ma więcej Nważnych dlatego, że w tej grupie zostały dodane dane z ulic jednokierunkowych i dlatego też mogą zachodzić zmiany w wynikach przeprowadzonej analizy. Różnice pomiędzy 1 i 2 kierunkiem jazdy kształtują się następująco: średnia - 0,07 s, mediana - 0,14 s, moda - 1,73, licznosc (mody) - 23, minimum - 0 s, maksimum - 234 s oraz odchylenie standardowe - 0,77.

Analizując dalej kierunek jazdy badanych dróg można zaobserwować iż w teście Kruskala-Wallisa statystyka testowa wynosi odpowiednio $H=1,565610$ oraz $p=0,2108$ (tabela 9). Tak mała wartość H oznacza, iż dane są do siebie podobne i nie wskazują dużych różnic pomiędzy badaną grupą. A więc następuje przyjęcie hipotezy o nieistotności różnic pomiędzy medianami.

Tabela 9 Test Kruskala-Wallisa dla kierunku jazdy (ANOVA - podstawowe wartości)

Zależna: Czas	ANOVA rang Kruskala-Wallisa; Czas (STATISTICA); Zmienna niezależna (grupująca): Kierunek; Test Kruskala-Wallisa: $H(1, N=52353) = 1,565610$ $p = 0,2108$			
	Kod	N (ważnych)	Suma (Rang)	Średnia (Ranga)
1	1	26649	699753911	26258,17
2	2	25704	670690570	26092,85

Źródło: opracowanie własne

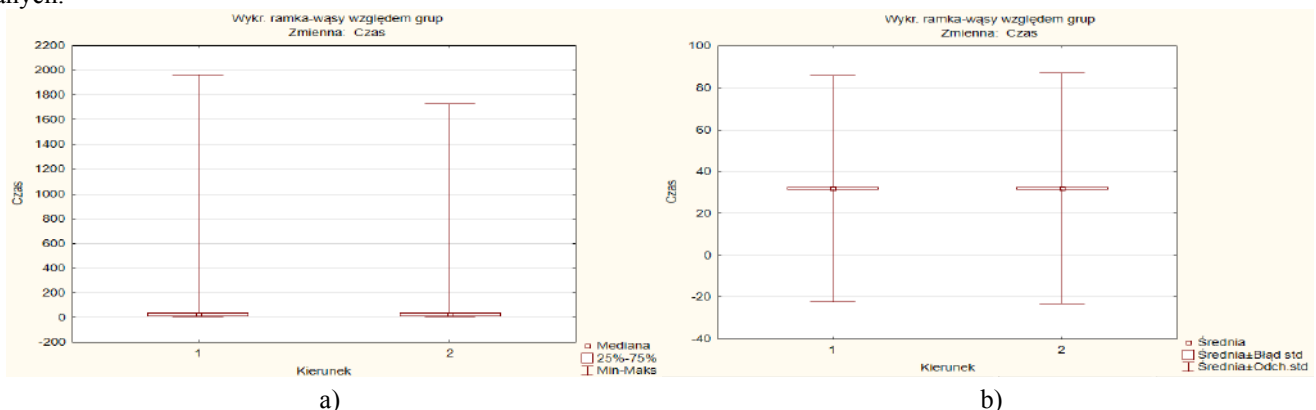
Przy wartościach p dla porównań wielokrotnych, z której wynik 0,21 świadczy o małym odchyleniu od wartości zerowej i braku powiązania tych danych (tabela 10).

Tabela 10. Test Kruskala-Wallisa dla kierunku jazdy (wartość p dla porównań wielokrotnych (dwustronnych))

Zależna: Czas	Wartość p dla porównań wielokrotnych (dwustronnych); Czas (STATISTICA); Zmienna niezależna (grupująca): Kierunek; Test Kruskala-Wallisa: $H(1, N=52353) = 1,565610$ $p = 0,2108$	
	1 (R:26258,)	2 (R:26093,)
1	0,00	0,21
2	0,21	0,00

Źródło: opracowanie własne

Rys. 4 przedstawia wykres pudełkowy zestawiający medianę, wartości minimalne i maksymalne oraz kwartyle 2 i 3 (a), oraz średnią z błędem standardowym oraz odchyleniem standardowym czasów przejazdu (b). Wąsy dla wartości maksymalnej bardzo zaburzają wyniki oraz dobry odczyt wykresu, jest to spowodowane tym, iż dane wejściowe zostały podzielone na różne długości etapów przez co, na dłuższych odcinakach czas może się znacząco wydłużyć. Wydać natomiast, że kwartyle 2 i 3 oraz mediana są bliskie 0. Jedyna różnica pomiędzy tymi wartościami zachodzi przy maksymalnych czasach badanych danych.



Rys. 4. Wykres pudełkowy uwzględniający medianę oraz minimum i maksimum względem kierunku ruchu (a), średnią z błędem standardowym oraz odchyleniem standardowym czasów przejazdu (b)

Źródło: opracowanie własne

Duże wąsy na wykresie świadczą o dużym odchyleniu badanych czasów przejazdu spowodowanych różnorodnością dobranych odcinków w mieście.

Opracowanie statystyczne dla dni tygodnia

Kolejną grupą wziętą do badań na podstawie danych jest dzień tygodnia. Analiza ma wykazać w które dni tygodnia natężenie ruchu jest do siebie podobne. Pomoże to w układaniu rozkładów jazdy oraz doborze odpowiednich grup przejazdowych. Analogicznie jak w poprzedniej grupie została wykonana statystyka opisowa (tabela 11).

Tabela 11. Statystyki opisowe z podziałem na dzień tygodnia

Zmienna	Wyniki zagregowane Statystyki opisowe (STATISTICA)								
	Dzień tygodnia	Średnia	Mediana	Moda	Licznosc (Mody)	Minimum	Maksimum	Odch.std	Wsp.zmn.
Czas	ND	27,59	18,94	11,45	68	3,024	1965,6	40,09	145,32
Czas	PT	34,19	23,33	10,51	61	3,024	1929,6	64,29	188,03
Czas	PN	33,90	23,18	18,29	58	3,024	1731,6	60,03	177,12
Czas	WT	33,40	22,90	Wielokr.	60	3,024	1731,6	61,63	184,54
Czas	SR	33,29	22,82	18,29	66	3,024	1731,6	56,03	168,32
Czas	CZ	33,48	23,04	Wielokr.	62	3,024	1731,6	58,58	174,97
Czas	SB	27,42	19,58	9,72	62	3,024	692,6	32,68	119,18

Źródło: opracowanie własne

Maksymalny średni czas przejazdu w badaniu wyniósł 34,19 s i miało to miejsce w piątek, natomiast minimalny czas wystąpił w sobotę (27,42 s). Natomiast jednoznacznie ze średniej można wyczytać, iż dni od poniedziałku do piątku mają zbliżoną wartość do siebie, tak samo jak sobota i niedziela są do siebie podobne. Mediana wyszła bardzo zbliżona jak średnia, tak samo grupując poszczególne dni tygodnia. Ze statystyk opisowych wnioskować można, iż dniem najmniej zatłoczonym jest sobota, w której wartości wychodzą najmniejsze. Odchylenie standardowe kształtuje się w sobotę od 32,68 s do 64,29 w piątek. Takie wyniki mogą nasunąć pewne wnioski o istotności grup.

W pierwszej fazie analizy została wykonana analiza ANOVA rang Kruskala -Wallisa, gdzie po teście współczynnik H wyniósł 561,8778 oraz $p=0,00$. Oznacza to, iż są duże zależności danych względem siebie (tabela 12).

Tabela 12. Test Kruskala-Wallisa dla dnia tygodnia (ANOVA - podstawowe wartości)

Zależna: Czas	ANOVA rang Kruskala-Wallisa; Czas (STATISTICA); Zmienna niezależna (grupująca): Dzień tygodnia; Test Kruskala-Wallisa: H (6, N= 52353) =561,8778 p =0,000		
	N (ważnych)	Suma (Rang)	Średnia (Ranga)
PN	7479	203821107	27252,45
WT	7479	201576059	26952,27
SR	7479	202236022	27040,52
CZ	7479	203355701	27190,23
PT	7479	204697152	27369,59
SB	7479	179082495	23944,71
ND	7479	175675948	23489,23

Źródło: opracowanie własne

Najmniejsze sumy rang wyszły w sobotę i niedzielę, co potwierdza również przeprowadzoną wcześniej statystykę opisową. Wartość p, która w teście wyniosła 0, wskazuje konieczność przeprowadzenia porównań poszczególnych dni tygodnia ze sobą. I tak z analizy wynika, iż dni od poniedziałku do piątku w znaczący sposób nie odbiegają od siebie co można uznać za zakwalifikowanie ich do jednej grupy dni tygodnia. Drugą grupą, którą wyczytać można z tabeli są dni sobota i niedziela. Dla potwierdzenia została opracowana macierz wartości p dla porównań wielokrotnych (tabela 13).

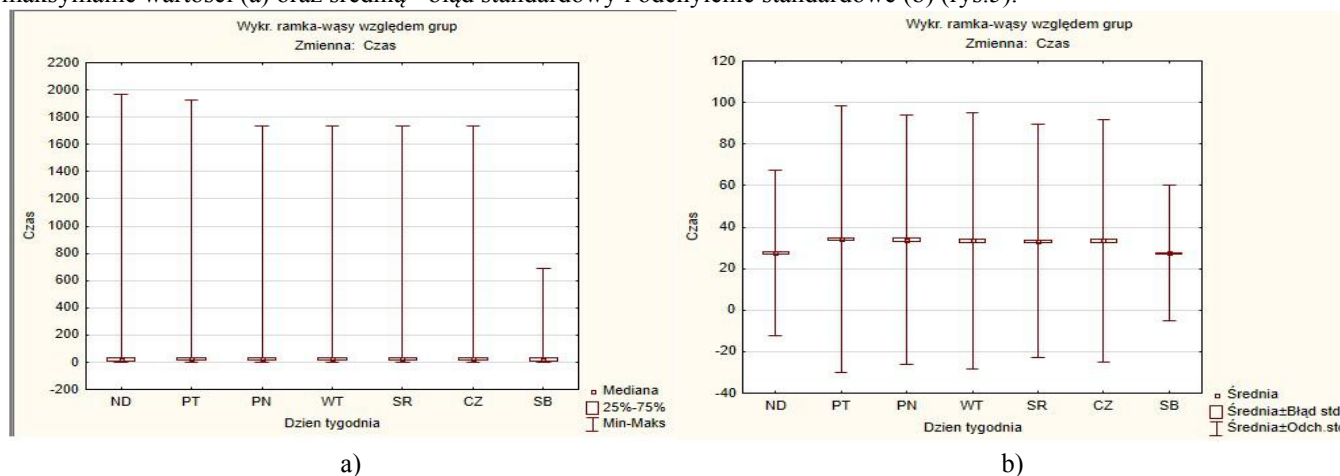
Tabela 13 Test Kruskala-Wallisa dla dnia tygodnia (wartość p dla porównań wielokrotnych (dwustronnych))

Zależna: Czas	Wartość p dla porównań wielokrotnych (dwustronnych); Czas (STATISTICA); Zmienna niezależna (grupująca): Dzień tygodnia; Test Kruskala-Wallisa: H (6, N= 52353) =561,8778 p =0,000						
	ND (R:23489,)	PT (R:27370,)	PN (R:27252,)	WT (R:26952,)	SR (R:27041,)	CZ (R:27190,)	SB (R:23945,)
ND	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
PT	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000
PN	0,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	0,000
WT	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,000
SR	0,000	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	0,000
CZ	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	0,000
SB	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Źródło: opracowanie własne

Wartości zerowe wskazują brak powiązania pomiędzy dniami tygodnia, natomiast wartości jedności określają zależność wyczytaną z tabeli poszczególnych dni tygodnia.

Dla sprawdzenia został opracowany wykres pudełkowy przedstawiający medianę, kwartyle 2 i 3 oraz minimalne oraz maksymalne wartości (a) oraz średnią - błąd standardowy i odchylenie standardowe (b) (rys.5).



Rys. 5 Wykres pudełkowy uwzględniający medianę oraz minimum i maksimum względem dnia tygodnia (a), oraz średnią - błąd standardowy i odchylenie standardowe (b)

Źródło: opracowanie własne

Podobnie jak we wcześniejszym przypadku, czyli kierunku ruchu wąsy określające maksimum przedziału istotnie zaburzają obraz wykresu. Natomiast widać, iż największe maksyma liczb występują w niedzielę oraz piątek. Na rys. 5b jednoznacznie widać jaki następuje podział na grupy dni tygodnia. Odchylenie standardowe jest o wiele niższe w soboty i niedzielę co oznacza mniejsze rozrzucenie wyników wokół ich średnich.

Opracowanie statystyczne dla różnej godziny

Ostatnią analizowaną grupą wziętą pod pryzmat badań są godziny w jakich następuje ruch. Taka analiza ma na celu wyznaczyć przedziały czasowe w których jazda przez miast występuje podobnie. Początkowo zostały wykonane statystyki opisowe (tabela 14).

Tabela 14 Statystyki opisowe z podziałem na godzinę jazdy

Zmienna	Wyniki zagregowane Statystyki opisowe (STATISTICA)								
	Godzina	Nważnych	Średnia	Mediana	Moda	Liczność (Mody)	Minimum	Maksimum	Odch.std
Czas	6	5817	29,25	20,45	12,24	53	3,02	692,6	40,484
Czas	8	5817	35,46	23,11	10,51	53	3,02	1731,6	77,112
Czas	10	5817	31,17	22,61	18,29	51	3,02	806,4	45,148
Czas	12	5817	32,26	23,18	18,43	56	3,02	1731,6	50,809
Czas	14	5817	33,30	23,62	18,43	52	3,02	1731,6	49,736
Czas	16	5817	39,46	24,91	10,51	51	3,02	1929,6	81,902
Czas	18	5817	30,18	21,89	18,29	56	3,02	806,4	41,919
Czas	20	5817	28,84	20,09	18,29	52	3,02	1965,6	46,065
Czas	22	5817	27,11	18,29	11,45	54	3,02	1245,6	37,555

Źródło: opracowanie własne

Godziny zostały podzielone na okres czasowy od 6 do 22, gdzie badania wykonano w odstępach dwugodzinnych. Dzięki średniej jednoznacznie kształtują się szczyty komunikacyjne, które mają miejsce o godzinie 8:00 oraz 16:00, z tym, że o godzinie 16 występuje najwyższa wartość średnich (39,46 s) i porównując ją z minimum (27,11 s) daje 12,35 s różnicy. Mediana również wskazuje iż w piątek wartość środkowa dla danych jest najwyższa. Minimalna wartość tej cechy występuje o godzinie 22:00. Takie wartości dają potrzebę przeprowadzenia testów na istotność zmiennych czasowych. Tabela 15 przedstawia sumę rang w teście ANOVA rang Kruskala-Wallisa.

Tabela 15. Test Kruskala-Wallisa dla godziny jazdy (ANOVA - podstawowe wartości)

Zależna: Czas	ANOVA rang Kruskala-Wallisa; Czas (STATISTICA); Zmienna niezależna (grupująca): Godzina; Test Kruskala-Wallisa: H (8, N= 52353) =788,0849 p =0,000		
	N (ważnych)	Suma (Rang)	Średnia (Ranga)
6	5817	142277007	24458,83
8	5817	157358495	27051,49
10	5817	154504800	26560,91
12	5817	159281029	27381,99
14	5817	162071517	27861,70
16	5817	169273229	29099,75
18	5817	151159617	25985,84
20	5817	141140219	24263,40
22	5817	133378571	22929,10

Źródło: opracowanie własne

Wartość H (788,0849) wyszła bardzo wysoka oraz wartość p (0) zerowa, co oznacza, podobnie jak w poprzednim przypadku, iż występują istotne podobieństwa i różnice pomiędzy badanymi danymi. Widać, iż wartości uszeregowywały się, tworząc pewne grupy czasowe przejazdu przez miasto. Aczkolwiek trudno wyczytać grupy ważne dla tych wartości, dlatego też został przeprowadzony test dla wartości p, obrazujący powiązania między poszczególnymi porami dnia (tabela 16).

Tabela 16. Test Kruskala-Wallisa dla godziny jazdy (wartość p dla porównań wielokrotnych (dwustronnych))

Zależna: Czas	Wartość p dla porównań wielokrotnych (dwustronnych); Czas (STATISTICA); Zmienna niezależna (grupująca): Godzina; Test Kruskala-Wallisa: H (8, N= 52353) =788,0849 p =0,000								
	6 (R:24459,)	8 (R:27051,)	10 (R:26561,)	12 (R:27382,)	14 (R:27862,)	16 (R:29100,)	18 (R:25986,)	20 (R:24263,)	22 (R:22929,)
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
8	0,000	0,000	1,000	1,000	0,138	0,000	0,005	0,000	0,000
10	0,000	1,000	0,000	0,122	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
12	0,000	1,000	0,122	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,000	0,138	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,000	0,005	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
22	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Źródło: opracowanie własne

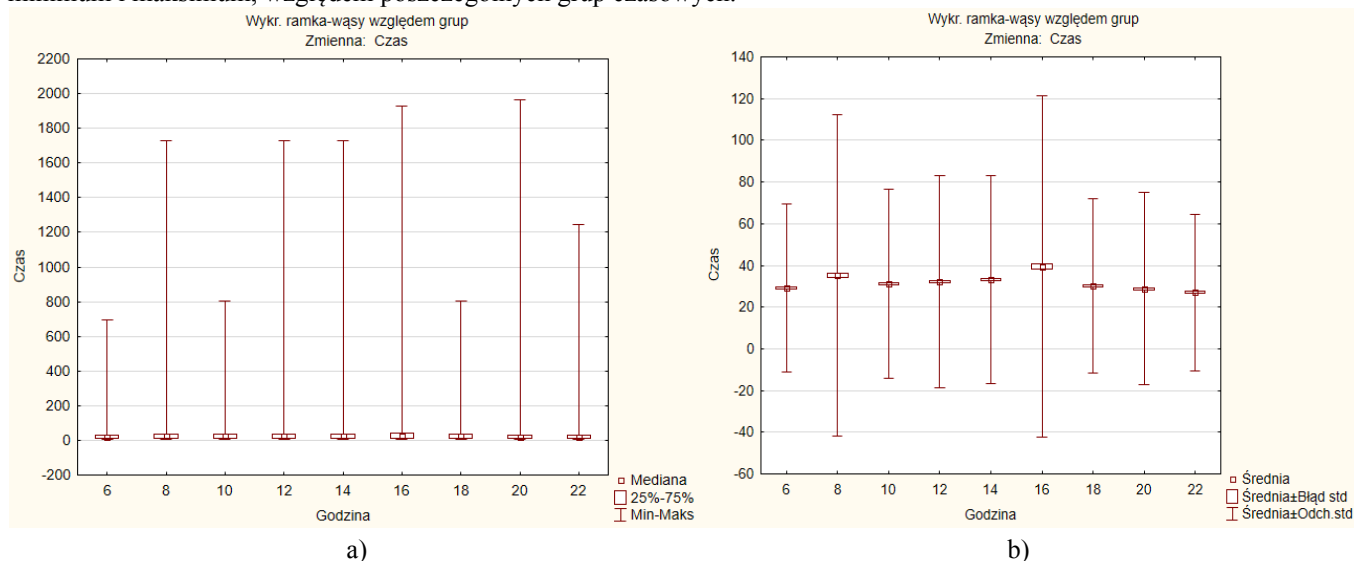
Z tabeli 16 wynika, iż podobieństwa dla godziny ruchu kształtowały się różnie, gdzie autor, czasy zgodnie z analizą, podzielił na 5 grup:

- 1 grupa: godzina 6:00, 20:00,
- 2 grupa: godzina 8:00, 10:00, 12:00, 14:00,
- 3 grupa: godzina 8:00, 10:00, 12:00, 18:00,

- 4 grupa: godzina 16:00,
- 5 grupa: godzina 22:00,
- 6 grupa: godzina 10:00, 18:00.

Grupy jednocześnie przyporządkować można od najbardziej zatłoczonych do najmniej zatłoczonych. Tak więc najbardziej zatłoczoną grupą jest grupa 4, następnie grupa 2, grupa 3, kolejna grupa 1 i na samym końcu grupa 5.

Potwierdzeniem utworzonych grup jest rys. 6. Który przedstawia na wykresie pudełkowym medianę, kwartyle oraz minimum i maksimum, względem poszczególnych grup czasowych.



Rys. 6. Wykres ramka wąsy uwzględniający medianę oraz minimum i maksimum względem godziny jazdy (a) oraz średnią - błąd standardowy i odchylenie standardowe (b)
Źródło: opracowanie własne

Na wykresie widać, iż godzina 6 jest najmniej odbiegającą od maksimum wartością. Natomiast nieproporcjonalnie wyszło, że w sobotę wartość maksymalna jest najwyższa. Podobnie jak o godzinie 16:00. Wnioski, które należy wyciągnąć po takiej analizie jest fakt, iż godzina 16 w Opolu jest najbardziej problemową godziną. I dla tej też godziny rozkłady jazdy powinny być bardzo rozważnie dobierane, ponieważ to właśnie o tej godzinie większa część mieszkańców podróżuje po mieście. Dlatego też na potrzeby pracy zostaną dobrane zaproponowane grupy przez autora w celu układania dokładnych rozkłady jazdy autobusów.

Opracowanie statystyczne ulic najbardziej zatłoczone

Analiza zatłoczenia odcinków dróg została wykonana za pomocą różnicy pomiędzy czasem optymistycznym przejazdu (przyjmując prędkość poruszania się 50 km/h), a średnią przejazdu przez ten odcinek od poniedziałku do niedzieli w godzinach od 6:00 do 22:00.

Z analizy wynika, iż najbardziej zatłoczoną ulicą miasta Opola jest droga 46 na odcinku Partyzancka-Wrocławska oraz Luboszycka - Obwodnica Czarnowąsów, która jest jednocześnie obwodnicą miasta. Z danych wynika, iż średnio przejazd przez odcinek od Partyzanckiej do Wrocławskiej na drodze 46 jest o 285,85 s dłuższy niż czas przejazdu jego z prędkością 50 km/h. Uciążliwymi drogami w Opolu są również ulice: (tabela 17)

- Bohaterów Monte Casino - różnica w czasie 67,30 s,
- Obwodnica Czarnowąsów - różnica w czasie 44,58 s,
- Niemodlińska - różnica w czasie 42,59 s,
- Wrocławska - różnica w czasie 32,47 s,
- Światowida - różnica w czasie 31,82 s,
- Sosnkowskiego - różnica w czasie 28,53 s,
- Tarnopolska - różnica w czasie 27,15 s,
- Górna - różnica w czasie 27,07,
- Piastowska - różnica w czasie 27,07 s.

Tabela 17. Najbardziej zatłoczone ulice Opola

Lp	ULICA	ODCINEK	S [km]	t(o) [s]	Średnia	Odch.std	t(o)-Średnia
1	46	Partyzancka-Wrocławska	4,81	346,32	632,17	364,09	-285,85
2	46	Luboszycka-Ob. Czarnowąs	2,24	161,28	245,76	191,06	-84,48
3	Bohaterów Monte Casino	BP-Katowicka	0,45	32,62	99,92	312,62	-67,30
4	Obwodnica Czarnowąsów	Mikołaja-Sobieskiego	1,66	119,52	164,10	58,03	-44,58
5	Niemodlińska	Wrocławska-Licealna	0,29	20,88	63,47	200,21	-42,59
6	Wrocławska	Kanałowa-Partyzancka	0,54	38,59	71,06	170,53	-32,47
7	Światowida	Głogowska-Sandomierska	0,55	39,31	71,14	172,95	-31,82
8	Sosnkowskiego	Horoszkiewiczza-Rataja	0,64	46,08	74,61	22,47	-28,53
9	Tarnopolska	Lwowska-Wiejska	0,56	40,25	67,40	33,70	-27,15
10	Górna	Ozimska-Wygonowa	1,03	74,16	101,23	53,56	-27,07
11	Piastowska	Barlickiego-Zamkowa	0,13	9,14	36,21	94,78	-27,07

Źródło: opracowanie własne

Biorąc pod uwagę takie wyniki, należy wykluczyć lub ograniczyć przejazdy miejskiej komunikacji zbiorowej przez te ulice lub nawet tylko przez te odcinki ulic. Wykorzystanie tych dróg podczas przejazdów miejskiej komunikacji zbiorowej może doprowadzić do licznych utrudnień w czasach przejazdu pomiędzy przystankami.

Tabela 18 przedstawia natomiast drogi, które po przeprowadzonej analizie nie zanotowały żadnych utrudnień. Na tych odcinkach różnica pomiędzy optymistycznym przejazdem, a średnim wynosi 0 s. Brak różnicy oznacza, iż na tych odcinkach w żadnym dniu tygodnia oraz o żadnej porze nie było utrudnień komunikacyjnych.

Tabela 18. Najmniej zatłoczone ulice Opola

Lp	ULICA	ODCINEK	S [km]	t(o) [s]	Średnia	Odch.std	t(o)-Średnia
1	Krapkowicka	„Latex”-Dworska	0,474	34,13	34,13	34,13	0
2	Budowlanych	46-Rondo455	0,194	13,97	13,97	13,97	0
3	Partyzancka	94-Spokojna	0,417	30,02	30,02	30,02	0
4	46	94-Turawa Park	2,37	170,64	170,64	170,64	0
5	Witosza	CH Turawa-Wygonowa	0,636	45,79	45,79	45,79	0
6	Wrocławska	Czysta-Ceglana	0,76	54,72	54,72	54,72	0
7	Strzelecka	Granica-Rondo Jerzego Szczakiela	2,99	215,28	215,28	215,28	0
8	Prószkowska	Hłouszka-Wawrzynka	0,333	23,98	23,98	23,98	0
9	Popieluski	Jana-Kasperska	0,435	31,32	31,32	31,32	0
10	Krapkowicka	Odrodzenia-Wyszomirskiego	0,347	24,98	24,98	24,98	0
11	94	Rondo J. Szczakiela - Przed Światła	3,27	235,44	235,44	235,44	0
12	Budowlanych	Rondo454-Budowlanych	0,512	36,86	36,86	36,86	0
13	Lipowa	Siewna-Lipowa	0,983	70,78	70,78	70,78	0
14	Reymonta	Struga-Przed Światłami	0,203	14,62	14,62	14,62	0
15	Krapkowicka	Wawrzynka-Odrodzenia	0,375	27,00	27,00	27,00	0
16	Rejtana	Wschodnia-Wagon	0,146	10,51	10,51	10,51	0
17	Krapkowicka	Wyszomirskiego-Krapkowicka	0,317	22,82	22,82	22,82	0

Źródło: opracowanie własne

Dokonana statystyczna analiza w programie Statistica wskazuje się następujące wnioski:

- dla badań nie jest istotny kierunek poruszania się pojazdów w mieście,
- wyniki analizy wskazują na podobieństwa dni tygodnia od poniedziałku do piątku, które tworzą jedną grupę przejazdową oraz drugą grupę przejazdu, w skład w którą wchodzi sobota i niedziela,
- z analizy wynika, iż podobieństwa dla godziny ruchu kształtowały się różnie, aczkolwiek przy jednoczesnym podziale ich na 6 grup:
 - 1 grupa: godzina 6:00, 20:00,
 - 2 grupa: godzina 8:00, 10:00, 12:00, 14:00,
 - 3 grupa: godzina 8:00, 10:00, 12:00, 18:00,
 - 4 grupa: godzina 16:00,
 - 5 grupa: godzina 22:00,
 - 6 grupa: godzina 10:00, 18:00.

- natężenie ruchu grup można podzielić od najbardziej do najmniej zatłoczonych godzin:

• grupa 4 → grupa 2 → grupa 3 → grupa 1 → grupa 5,

- ulicami najbardziej zatłoczonymi w Opolu są: obwodnica Opola (droga nr 46), ul. Bohaterów Monte Casino, Niemodlińska, Wrocławska, Piastowska

Szczegółowe dane wszystkich ulic i odcinków miasta Opola zostały zawarte w załączniku nr 13.

Analiza porównawcza czasów przejazdów pojazdów miejskiej komunikacji zbiorowej nasunęła następujące wnioski:

- linie autobusowe, które nie jeździły zgodnie z planowanym rozkładem to: 3, 5, 9, 13, 14, 15, 18, 25, 28 (wskazanie, gdzie rzeczywiste dojazdy na przystanki nie były zgodne z czasami planowanych przyjazdów - min. 50 % wszystkich przystanków całej linii oraz czas przekraczający 1 minutę),
- najczęściej opóźnione linie autobusowe miały miejsce od godz. 7:30 do godz. 8:15 oraz od godz. 15:00 do godz. 17:00, co wskazuje na szczyty komunikacyjne oraz złe dopasowanie rozkładów jazdy do specyfiki miasta,
- najczęściej po godzinach szczytowych linie autobusowe rozpoczynające swój kurs były opóźnione już na przystankach początkowych,
- maksymalne czasy opóźnień przyjazdu autobusy na przystanek dochodziły do 25 minut. Najczęściej miało to miejsce na liniach nr 5, 9 oraz 13, które jeżdżą w kierunku CH Karolinka,
- w niektórych liniach autobusowych kierowcy nie zatrzymywali się na przystankach, choć nie były to przystanki na żądanie,
- pojazdy niemalże wszystkich linii autobusowych wyjeżdżały z przystanku przed planowanym odjazdem, co było spowodowane chęcią nadrobienia przez kierowcę czasu przez postoje związane z większym natężeniem ruchu (wcześniejsze odjazdy dochodziły do 5 minut),
- linie autobusowe, które najczęściej nie jeździły zgodnie z planowanym rozkładem to: 3, 15, 13, 5,

Założenia, które zostały postawione przy obliczeniach prędkości poruszania się autobusów miejskiej komunikacji zbiorowej to: czas postoju na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną: 1 minuta, czas postoju na przystanku: 0,5 minuty, czas postoju na przystanku końcowym: 15 minut.

Podsumowując dokonaną analizę średnich prędkości poruszania się pojazdów komunikacji miejskiej w Opolu to można stwierdzić że są one dość zróżnicowane i co może jednocześnie martwić to ich stosunkowo bardzo niska wartość. Z przeprowadzonej analizy wynika, iż średnie prędkości autobusów wynoszą następująco:

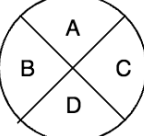
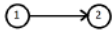
- prędkość techniczna - 20,81 km/h,
- prędkość komunikacyjna - 15,14 km/h,
- prędkość eksploatacyjna - 11,38 km/h.

Takie wartości w dużym stopniu spowodowane są dużymi utrudnieniami w podróży po mieście związanymi.

8. WIELOKRYTERIALNY MODEL STEROWANIA POJAZDAMI MIEJSKIEJ KOMUNIKACJI ZBIOROWEJ (SPMKZ)

W pracy zostanie wykorzystana metoda PERT do wyznaczenia najkrótszego czasu przejazdu pomiędzy przestankami końcowymi oraz obliczenia dokładnych czasów przejazdu pomiędzy przystankami pośrednimi miejskiej komunikacji. Tabela 19 przedstawia porównanie klasycznego podejścia metody PERT z zaproponowanym przez autora.

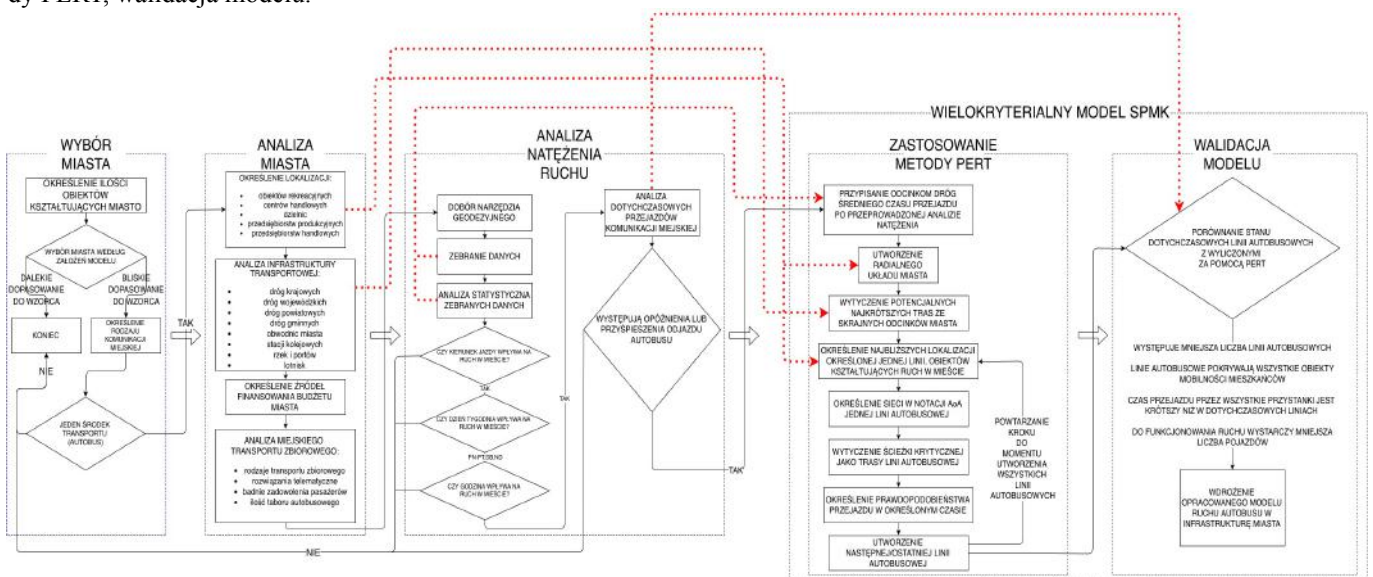
Tabela 19. PERT w logistycznym transporcie zbiorowym

Opis	Zastosowanie w klasycznym PERT	Zastosowanie PERT w logistyce miejskiej
t_a - czas optymistyczny	najkrótszy możliwy czas trwania danej czynności (wystąpi w warunkach szczególnie korzystnych dla realizacji zadania),	najkrótszy możliwy czas przejazdu danego odcinka drogi ($V = 50 \text{ km/h}$)
t_b - czas pesymistyczny	najdłuższy możliwy czas trwania danej czynności (wystąpi w przypadku szeregu trudności powodujących opóźnienie realizacji zadania)	najdłuższy możliwy czas przejazdu danego odcinka drogi ($V = 1 \text{ km/h}$)
t_m - czas realistyczny	najbardziej prawdopodobny (in. realistyczny) czas trwania danej czynności ($t_a < t_m < t_b$)	realny uśredniony czas przejazdu danego odcinka wynikającego z przeprowadzonych badań
Węzeł notacji AoA 	A - numer zdarzenia, B - najwcześniejszy możliwy moment wystąpienia zdarzenia, C - najpóźniejszy możliwy moment wystąpienia zdarzenia, D - różnice pomiędzy najpóźniejszym momentem a najwcześniejszym momentem wystąpienia zdarzenia (luzem zdarzenia).	A - numer danego skrzyżowania drogi B - najwcześniejszy czas wjazdu pojazdu na dane skrzyżowanie C - najpóźniejszy czas wjazdu pojazdu na dane skrzyżowanie D - różnice pomiędzy najpóźniejszym wjazdem a najwcześniejszym wjazdem autobusu na skrzyżowanie (zwłoka jazdy)
Strzałka łącząca 	czas wykonania danego zdarzenia	Czas przejazdu od skrzyżowania do skrzyżowania
Cel rozwiązania sieci	określenie najkrótszego czasu ukończenia projektu, z uwzględnieniem wszelkich ograniczeń, zależności logicznych i estymowanego czasu trwania poszczególnych czynności	określenie optymalnej trasy linii autobusu pomiędzy określonymi punktami w mieście, z uwzględnieniem różnych zależności i ograniczeń
Ścieżka krytyczna	ciąg takich zadań (podzadań projektu), że opóźnienie któregokolwiek z nich opóźni zakończenie całego projektu.	wyznaczona trasa komunikacji miejskiej

Źródło: Opracowanie własne

Opracowany model przedstawia pewną rzeczywistość miejską, którą jest ruch pojazdów komunikacji miejskiej. W związku ze zdefiniowaną wielokryterialnością modelu wśród wymienionych powyżej kryteriów, wyróżnić można pewne podkryteria, które w istotny sposób oddziałują na mieszkańców oraz funkcjonowanie miast. Każde kryterium należało by rozpatrywać wieloaspektowo, ponieważ zastosowanie modelu wpływa na poszczególne aspekty oraz i co najważniejsze, aspekty oddziałują na tworzenie wielokryterialnego modelu.

Rys. 7 przedstawia realizację pracy w związku z opracowaniem wielokryterialnego modelu SPMKZ. Etapów realizacji wyróżnić można 5, w skład których wchodziły: wybór miasta, analiza miasta, analiza natężenia ruchu, zastosowanie metody PERT, walidacja modelu.



Rys. 7 Algorytm wielokryterialnego modelu SPMKZ

Źródło: opracowanie własne

Założeniami początkowymi opracowania modelu były następujące czynniki, które w sposób naturalny wpływają na komunikację:

- zaprojektowanie rozkładów jazdy powinno być związane ze znajomością:
 - trasy linii autobusowej,

2. punktów początkowych oraz końcowych linii autobusowej,
3. punktów pośrednich linii autobusowej,
4. czasu przejazdu między przystankami końcowymi a początkowymi,
2. układanie systemu rozkładów jazdy powinno uwzględniać takie zmienne jak:
 1. pora tygodnia (poniedziałek, wtorek, itd.),
 2. pora dnia (6:00, 8:00, itd.).
3. czynnikami bezpośrednio wpływającymi na ruch miejski są:
 1. ilość parkingów w danym miejscu,
 2. ilość zakładów pracy,
 3. ilość pojazdów poruszających się po mieście,
 4. ilość centrów handlowych,
 5. duże osiedla mieszkaniowe wraz z dzielnicami,
 6. miejsca rekreacyjne ludności,
 7. ludność miasta (gęstość zaludnienia dzielnic),
4. przy określaniu rozkładów jazdy powinno się brać pod uwagę takie informacje jak:
 1. najmniej zatłoczone drogi w mieście,
 2. najbardziej zatłoczone drogi w mieście,
 3. określone wąskie gardła (drogi), które należało by zmodernizować,
5. określenie linii autobusowych obsługiwanych tylko i wyłącznie przez jeden pojazd,
6. umożliwić mieszkańcom podróż po wszystkich dzielnicach miasta z jak najmniejszą liczbą przesiadek.

W związku z określonymi założeniami został opracowany wielokryterialny model wykorzystujący metodę PERT. Model został podzielony na 2 części: projektowa oraz weryfikacyjna.

Sam przebieg modelu odbywa się w VIII etapach. Każdy z etapów rozwiązania problemu został opisany na rys. 8. Poszczególne etapy zostały natomiast, przedstawione następująco:

Etap I polega na wyliczeniu uśrednionej wartości z przeprowadzonej analizy natężenia za pomocą narzędzia geodezyjnego, uwzględniając następujące kryteria:

1. podział infrastruktury drogowej na odcinki według następujących wytycznych:
 1. odcinki uwzględniają czasy przejazdu przynajmniej pomiędzy jednym skrzyżowaniem, a drugim, aczkolwiek mogą występować krótsze odcinki,
 2. odcinki uwzględniają każde zmiany natężenia ukazane na stronie google.maps,
 3. odcinki, które zostały zgodnie z analizą natężenia ruchu uznane za wąskie gardła zostały odrzucone,
 4. odcinki nie nadające się do przejazdu autobusu z powodu utrudnień w ruchu zostały odrzucone,
2. wyliczenie czasu przejazdu za pomocą długości 1 odcinka i prędkości z jaką może się poruszać po niej pojazd, korzystając ze wzoru (1).

$$t = \frac{s}{V} \quad (1)$$

gdzie:

s - odległość odcinka drogi wyliczona na podstawie <http://mapy.geoportal.gov.pl/>

V - w zależności od koloru na <http://google.maps> wynosi:

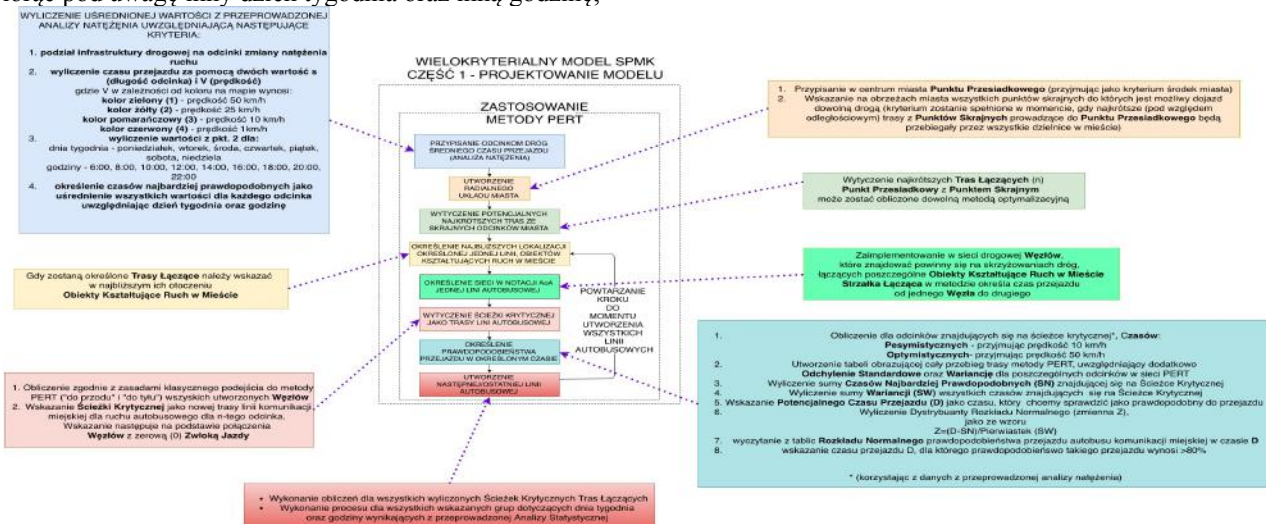
kolor zielony (1) - prędkość 50 km/h

kolor żółty (2) - prędkość 25 km/h

kolor pomarańczowy (3) - prędkość 10 km/h

kolor czerwony (4) - prędkość 1 km/h

3. powtórzenie czynności z pkt. 2 dla odpowiednio:
 1. dnia tygodnia - poniedziałek, wtorek, środa, czwartek, piątek, sobota, niedziela
 2. godziny - 6:00, 8:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00, 18:00, 20:00, 22:00
4. określenie czasów najbardziej prawdopodobnych jako uśrednienie wszystkich wartości dla każdego analizowanego odcinka, biorąc pod uwagę inny dzień tygodnia oraz inną godzinę,



Rys. 8 Wielokryterialny model SPMKZ - część 1 - projektowanie modelu
Źródło: opracowanie własne

Etap II polega na zaprojektowaniu układu radialnego dla analizowanego miasta (układy miast zostały opisane w rozdziale 1.1 niniejszej pracy). Oznacza to wykonanie dwóch czynności:

1. wyznaczenie w centrum miasta **Punktu Przesiadkowego** (przyjmując jako kryterium środek miasta lub lokalizację blisko Dworca Głównego danego miasta), który służyć powinien jako punkt dystrybucyjny/rozwozu osób podróżujących miejską komunikacją zbiorową,
2. wskazanie na obrzeżach miasta wszystkich punktów skrajnych do których jest możliwy dojazd dowolną drogą (kryterium zostanie spełnione w momencie, gdy najkrótsze (pod względem odległościowym) trasy z **Punktów Skrajnych** prowadzące do **Punktu Przesiadkowego** będą przebiegały przez wszystkie dzielnice w mieście),

Etap III polega na wyznaczeniu najkrótszych **Tras Łączących** (w ilości n , gdzie n oznacza ilość wskazanych **Punktów Skrajnych** z Etapu II, pkt. 2) pomiędzy **Punktem Przesiadkowy**, a **Punktem Skrajnym**. Najkrótsza droga pomiędzy tymi dwoma punktami może zostać wskazana za pomocą dowolnej metody optymalizacyjnej,

Etap IV polega na określeniu, dla każdej linii autobusowej osobno, punktów znajdujących się w najbliższym otoczeniu **Tras Łączących**, dotyczących **Obiektów Kształujących Ruch w Mieście**

Etap V polega na wykonaniu sieci PERT w notacji AoA wszystkich linii autobusowych, uwzględniając:

- **Węzeł** jako skrzyżowanie (dobór Węzłów powinien być kierowany najbliższym otoczeniem związanym z Obiektami Kształującymi Ruch w Mieście, przebiegający możliwie jak najlepiej Trasy Łączącej),
- **Strzałka Łącząca** jako czas przejazdu najbardziej prawdopodobny (t_m) (Etap 1, pkt. 2) od jednego **Węzła (skrzyżowania)** do drugiego,

Etap VI polega na wyliczeniu na podstawie Etapu V, zgodnie z zasadami klasycznego podejścia do metody PERT (opisane w rozdziale 7.2.) podstawowych obliczeń zgodnych z zasadą "do przodu" i "do tyłu", wszystkich utworzonych **Węzłów**. Ponadto metoda zakłada wskazanie **Ścieżki Krytycznej**, która w modelu ukazuje nową trasy linii komunikacji miejskiej dla ruchu autobusowego dla n -tej linii, przechodzącą przez istotne dla tej trasy Obiekty Kształujące Ruch w Mieście. Wskazanie Ścieżki Krytycznej następuje na podstawie połączenia **Węzłów** z zerową (0) **Zwłoką Jazdy**,

Etap VII polega na określeniu stopnia prawdopodobieństwa przejazdu planowanej trasy zgodnie z wytyczonym czasem przejazdu. Ten etap przebiega w 8 procesach:

1. obliczenie dla odcinków tworzących ścieżkę krytyczną, **czasów pesymistycznych** ($t_b = 10 \text{ km/h}$) oraz **optymistycznych** ($t_a = 50 \text{ km/h}$), uwzględniając dane z przeprowadzonej analizy natężenia, wykonanej w Etapie 1, pkt. 1.
2. utworzenie tabeli obrazującej cały przebieg trasy metody PERT, uwzględniający dodatkowo dla wszystkich odcinków w analizowanej sieci PERT następujące wartości:

1. czas najbardziej prawdopodobny przejazdu (t_e):

$$t_e = \frac{t_a + 4 * t_m + t_b}{6} \quad (2)$$

2. odchylenie Standardowe (δ):

$$\delta = \left(\frac{t_b - t_a}{6} \right) \quad (3)$$

3. wariancję (δ^2):

$$\delta^2 = \left(\frac{t_b - t_a}{6} \right)^2 \quad (4)$$

3. wyliczenie sumy Czasów Najbardziej Prawdopodobnych ($\sum t_m$) znajdujących się na Ścieżce Krytycznej,
4. wyliczenie sumy **Wariancji** ($\sum \delta^2$) wszystkich czasów znajdujących się na Ścieżce Krytycznej,
5. wskazanie **Potencjalnego Czasu Przejazdu (D)** jako czasu, który chcemy sprawdzić jako prawdopodobny do przejazdu,
6. wyliczenie Dystrybuanty Rozkładu Normalnego (zmienna Z),
gdzie:

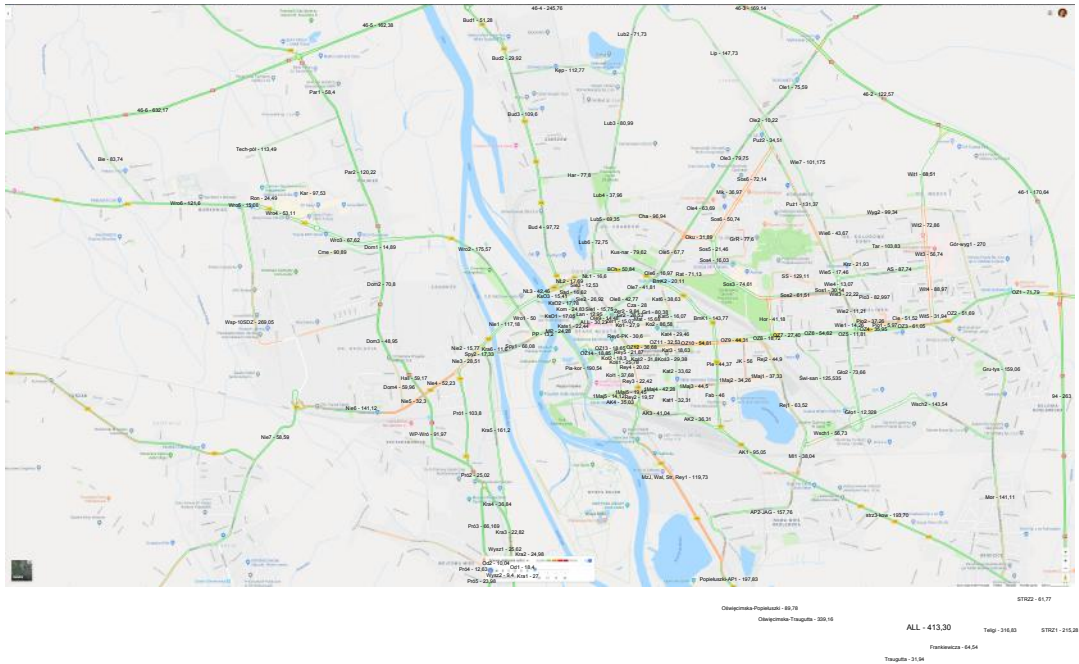
$$Z = \frac{D - \sum t_m}{\sqrt{\sum \delta^2}} \quad (5)$$

7. wyczytanie z tablic **Rozkładu Normalnego** prawdopodobieństwa przejazdu autobusu komunikacji miejskiej w czasie **D**,
8. wskazanie czasu przejazdu **D**, dla którego prawdopodobieństwo takiego przejazdu wynosi $>80\%$,

Etap VIII polega na powtórzeniu etapów IV-VII dla wszystkich wyznaczonych **Tras Łączących**. Natomiast w celu późniejszego obliczenia prawdopodobieństwa przejazdu określonych linii autobusowych dla konkretnego dnia tygodnia oraz godziny ruchu, z uwagi na fakt, iż trasy przejazdów miejskich autobusów nie powinny często się zmieniać, należy wykonać jeszcze raz etap VII, z tą różnicą iż czasy t_m powinny zostać dobrane dla konkretnego dnia i konkretnej godziny.

Implikacja danych odbyła się w mieście Opole. Zostały wypracowane etapy, realizacji wielokryterialnego modelu SPMKZ. Wizualizacja modelu wygląda następująco:

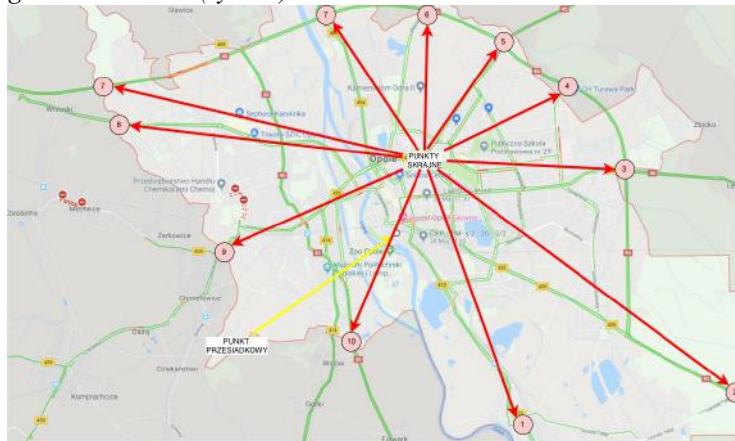
Etap 1 - Przypisanie odcinków dróg średniego czasu przejazdu (rys. 9)



Rys. 9 Etap 1 - Przypisanie odcinków dróg średniego czasu przejazdu
 Źródło: opracowanie własne

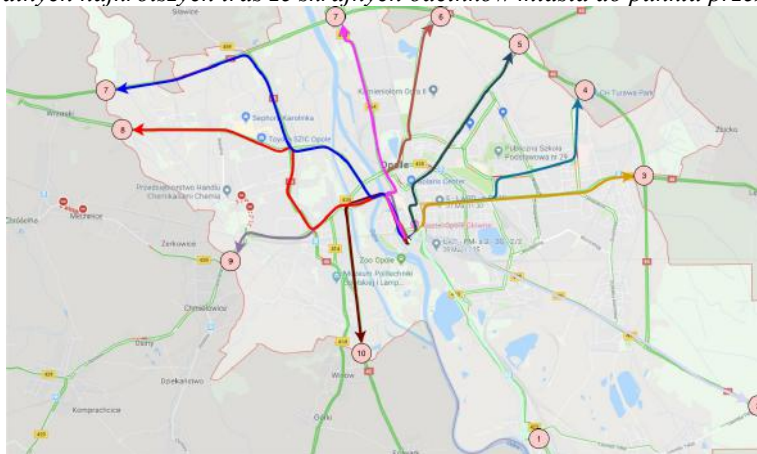
Etap 1 jest najbardziej czasochłonnym etapem z uwagi na fakt iż dane, które posłużą do dalszej analizy powinny być na tyle szczegółowe, aby określały wszystkie możliwe warianty przejazdu przez badany ośrodek, jak również byłoby możliwość określania konkretnych odcinków.

Etap 2 - Utworzenie radialnego układu miasta (rys. 10)



Rys. 10 Etap 2 - Utworzenie radialnego układu miasta
 Źródło: opracowanie własne

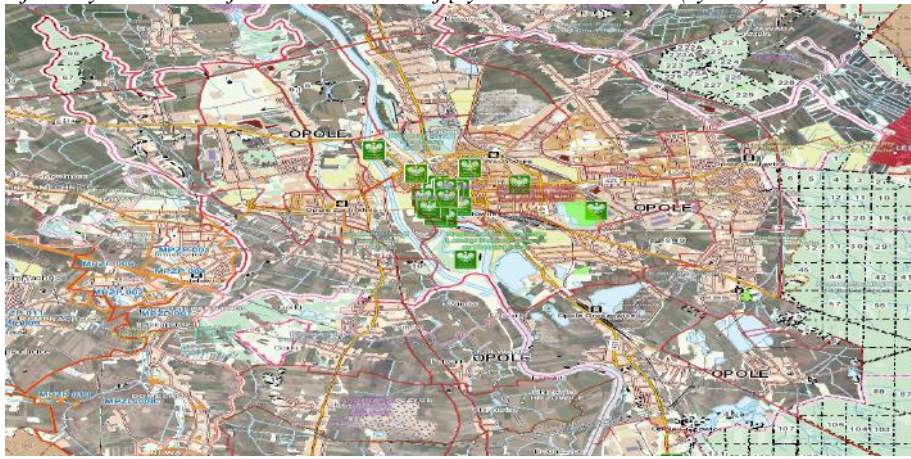
W tym etapie należy wskazać wszystkie punkty będące punktami skrajnymi przynależące do analizowanego miasta.
 Etap 3 - Wytyczenie potencjalnych najkrótszych tras ze skrajnych odcinków miasta do punktu przesiadkowego (rys. 11)



Rys. 11 Etap 3 - Wytyczenie potencjalnych najkrótszych tras ze skrajnych odcinków miasta do punktu przesiadkowego
 Źródło: opracowanie własne

Do wyliczenia w tym etapie najkrótszej trasy został wykorzystany algorytm węgierski, który wskazuje możliwie najkrótszą trasę pomiędzy jednym punktem, a drugim.

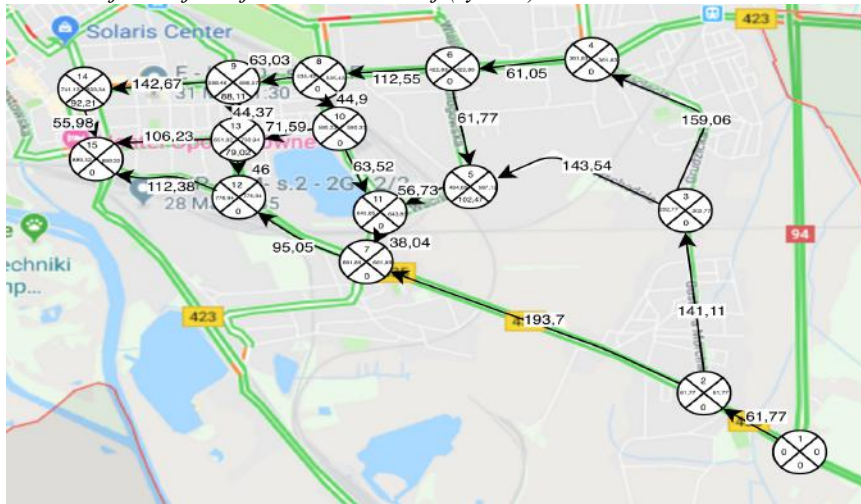
Etap 4 - Określenie najbliższych lokalizacji obiektów kształtujących ruch w mieście (rys. 12)



*Rys. 12 Etap 4 - Określenie najbliższych lokalizacji obiektów kształtujących ruch w mieście
Źródło: opracowanie własne*

Etap 4 wymaga największego skupienia, ponieważ w prezentowanym modelu istotną kwestią jest określenie wszystkich punktów kształtujących ruch w mieście. Punkty potrzebne do analizy zostały wskazane w rozdziale 5.1 niniejszej pracy

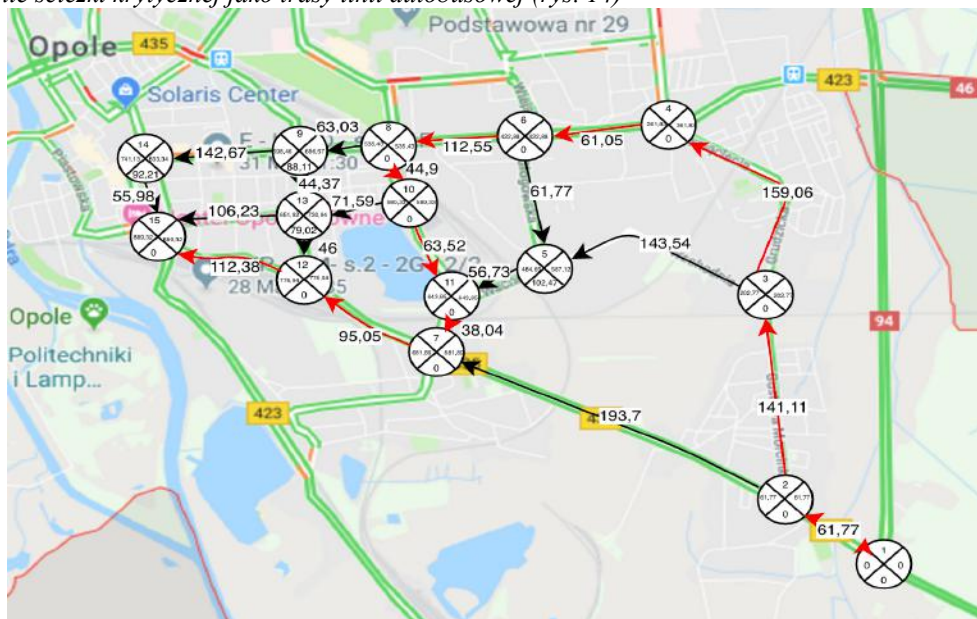
Etap 5 - Określenie sieci w notacji AoA jednej linii autobusowej (rys. 13)



*Rys. 13 Etap 1 - Przypisanie odcinków dróg średniego czasu przejazdu
Źródło: opracowanie własne*

Etap 5 polega na przypisaniu najkrótszej trasy wyliczonej w etapie 3, punktów które znajdują się w jej najbliższym otoczeniu, które istotnie wpływają na mobilność mieszkańców, i do których użytkownicy komunikacji miejskiej chcieliby się sprawnie przedostać.

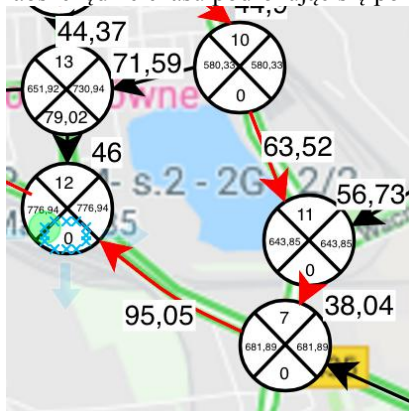
Etap 6 - Wytyczenie ścieżki krytycznej jako trasy linii autobusowej (rys. 14)



*Rys. 14 Etap 6 - Wytyczenie ścieżki krytycznej jako trasy linii autobusowej
Źródło: opracowanie własne*

Określenie ścieżki krytycznej polega na tradycyjnym obliczeniu realizacji trasy zgodnie z metodą PERT. Widać na rysunku 14, iż jest to najdłuższa możliwa droga, którą może przebyć autobus pomiędzy tymi punktami.

Dodatkowo należy zauważyć iż punkty nie będące na ścieżce krytycznej wskazują ile, przebywając drogę przez te punkty, autobus jadący tą linią jest w stanie zaoszczędzić czasu podróżując się po innej drodze (rys. 15).



Rys. 15 Działanie optymalizacyjne stosowanego modelu
Źródło: opracowanie własne

Zaobserwować można (rys. 15), iż pojazd poruszający się po innej trasie nie będącej na ścieżce krytycznej jest w stanie przebyć od pkt. 10 do pkt. 12 drogę, analizując trasę w jednym i drugim kierunku, o 79 s. szybciej, niż potencjalnie jadąc po drodze planowanej.

Dzięki temu można wytyczać trasy krótsze czasowo przejezdne, natomiast należy pamiętać, iż wskazana inna droga powinna przebiegać przez Punkty Kształtujące Ruch w mieście.

Etap 7 - Określenie prawdopodobieństwa przejazdu w określonym czasie (tabela 20, 21)

Wyliczenie prawdopodobieństwa przejechania po określonej trasie w określonym czasie pozwala na efektywne układanie dokładnych rozkładów jazdy.

Tabela 20. Wyliczenie wariancji i odchylenia standardowego na podstawie ścieżki krytycznej

l.p	Relacja	Ulica	t _m	t _a	t _b	t _o	σ	σ ²
1	1 - 2	STRZ2	61,77	57,24	286,2	98,42	38,16	1456,19
2	2 - 3	Mor	141,11	11,38	551,88	187,95	90,08	8115,01
3	3 - 4	Gru-tys	159,06	123,19	615,96	229,23	82,13	6745,06
4	4 - 6	Oz3	61,05	37,08	185,4	77,78	24,72	611,08
5	3 - 5	Wsch2	143,54			95,69	0,00	0,00
6	2 - 7	Strz3-kow	193,7			129,13	0,00	0,00
7	6 - 5	Gło2	61,77			41,18	0,00	0,00
8	6 - 8	Oz 5, 6, 7, 8	112,55	79,63	398,16	154,67	53,09	2818,37
9	8 - 9	Oz 8, 9	63,03			42,02	0,00	0,00
10	8 - 10	Rej2	44,9	33,34	166,68	63,27	22,22	493,88
11	10 - 11	Rej1	63,52	59,26	296,28	101,60	39,50	1560,51
12	5 - 11	Wsch1	56,73			37,82	0,00	0,00
13	11 - 7	MI-1	38,04	27,36	136,8	52,72	18,24	332,70
14	10 - 13	1Maj 1, 2	71,59			47,73	0,00	0,00
15	7 - 12	Ak1	95,05	71,71	358,56	135,08	47,81	2285,64
16	9 - 13	Ple	44,37			29,58	0,00	0,00
17	13 - 12	Fab	46			30,67	0,00	0,00
18	9 - 14	Oz 10, 11	142,67			95,11	0,00	0,00
19	13 - 15	1Maj 3, 4, 5	106,23			70,82	0,00	0,00
20	12 - 15	Ak2, 3, 4	112,38	90,65	453,24	165,57	60,43	3651,99
21	14 - 15	Koł 1, 2	55,98			37,32	0,00	0,00
		Suma:	889,43	590,84	3449,16	1923,36	476,39	28070,42

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 21 przedstawia narzędzie sporządzone w arkuszu kalkulacyjnym służące to wyliczenia prawdopodobieństwa wystąpienia zakładanego czasu.

Tabela 21. Etap 7 - Określenie prawdopodobieństwa przejazdu w określonym czasie

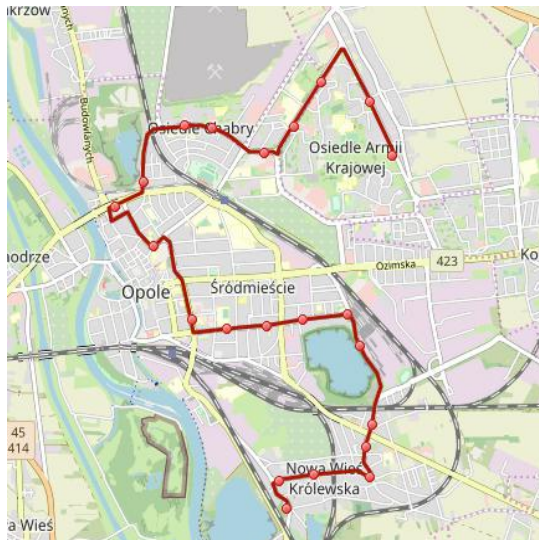
Rozkład normalny
Wartość sprawdzana (D)
1035
Prawdopodobieństwo
0,87
Odczytana z tablic wartość
80,78%
Istnieje 80,78% szans, że autobus trasę wytyczone przez ścieżkę krytyczną przejedzie w czasie 1035 sekund, czyli 17 minut

Źródło: Opracowanie własne

Rozwiązanie linii nr 1, przy zastosowaniu wielokryterialnego modelu SPMKZ, wskazuje duży potencjał wykorzystania opracowanego w pracy wielokryterialnego modelu. Przede wszystkim może zarządzać ruchem pojazdów komunikacji miejskiej jak również decydować o pomyślności układu całego systemu komunikacyjnego w miastach.

Ewaluacja modelu

Ocena opracowanego modelu polega na weryfikacji zastosowania go w rzeczywistym systemie. Do takiej weryfikacji została wykorzystana dotychczasowa linia autobusowa (rys. 16), która została wymodelowana na nowo, przy użyciu wielokryterialnego modelu.



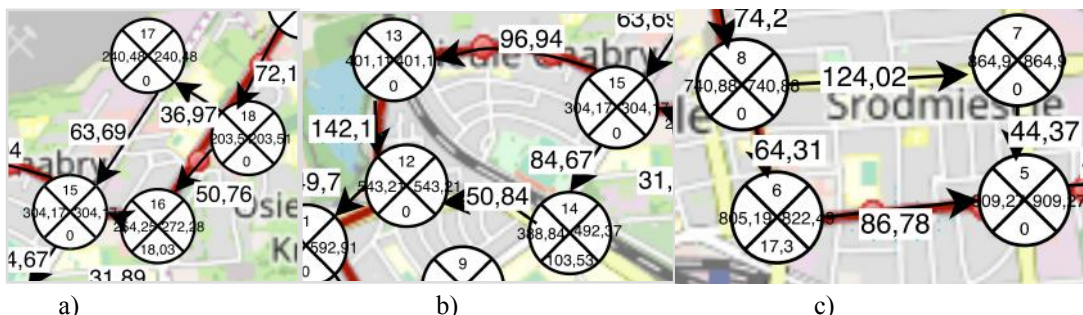
Rys. 16 Linia na 3 w kierunku Pużaka-Pętla
Źródło: mzk.opole.pl [dostęp 15.05.2019 r.]

Na aktualną linię autobusową nr 3 został nałożony model wykorzystujący metodę PERT, której celem jest optymalizacja dotychczasowego ruchu tego pojazdu (rys. 17). Po przeprowadzonej analizie miejsc mogących mieć niewrażliwe znaczenie dla przebiegu tej linii można było zaproponować rozwiązanie, które polegać będzie na przeliczeniu czy daną trasę można by zmodyfikować tak, aby poruszała się po mieście w krótszym czasie oraz przejeżdżając przy tym przez krótszą trasę.



Rys. 17 Zmodelowana trasa aktualnej linii nr 3
Źródło: Opracowanie własne

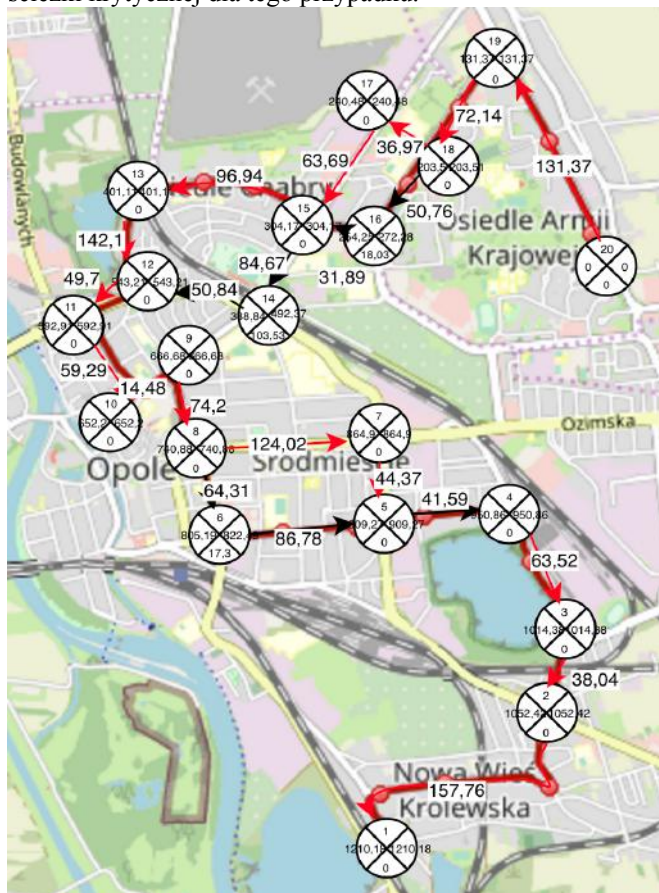
Punktami zwrotnymi, które mogą świadczyć o optymalizacji badanej trasy są trasy pomiędzy następującymi ulicami (rys. 18).



Rys. 18 punkty optymalizacji linii autobusowej nr 3 a) Punkt 1 (Sosnkowskiego - Mikolajczyka - Okulickiego), b) Punkt 2 (Oleska - Chabrów - Batalionów Chłopskich), c) Punkt 3 (Ozimska - Reymonta - 1 Maja - Plebiscytowa)
Źródło: Opracowanie własne

W przypadku a i c aktualnie zaprojektowana sieć jest krótszym czasowo rozwiązaniem wynikającym z obliczeń zgodnie z modelem, natomiast w drugim przypadku, istnieje możliwość, iż przejazd inną, alternatywną drogą pomiędzy dwoma punktami może przynieść szybsze rozwiązanie niż w planowanej nowej linii autobusowej, aczkolwiek przejazd ten przebiega przez więcej punktów kształtujących ruch w mieście.

Kolejnym krokiem wielokryterialnego modelu jest wytyczenie ścieżki krytycznej, która wskazywać będzie linię autobusową o najkorzystniejszym przykryciu miejsc kształtujących ruch w mieście, natomiast o najdłuższym czasie przejazdu. Rys. 19 przedstawia wytyczenie ścieżki krytycznej dla tego przypadku.



Rys. 19 Ścieżka krytyczna linii autobusowej nr 3
Źródło: Opracowanie własne

Widać, iż potwierdziły się wcześniejsze przypuszczenia. Ścieżka krytyczna w punktach niewralgicznych wskazuje na tożsame rozwiązania aktualnych dwóch pierwszych przypadków. Wybór korzystniejszej trasy musi być uwarunkowany pewnymi założeniami, dotyczącymi, przez które punkty pośrednie powinna przebyć dana linia autobusowa oraz o ile będzie się różnić czas tych dwóch wariantów przewozu. W tym celu należy obliczyć prawdopodobieństwo z jakim dany autobus jest w stanie przejechać po planowo nowej trasie linii autobusowej, wytyczonej przez ścieżkę krytyczną. I tak tabela 22 przedstawia czasy przejazdu przez wszystkie punkty w sieci. Jedynie do punktów znajdujących się na ścieżce krytycznej zostały dodane czasy optymistyczne i pesymistyczne.

Tabela 22. Wyliczenie wariancji i odchylenia standardowego dla aktualnej linii nr 3

Lp	Relacja	Ulica	t	t	t	Tp	Tnp	O	W
1	20 - 19	Puz1	131,37	101,45	507,24	246,69	189,03	67,63	4574,04
2	19 - 18	Sos7	72,14	47,74	238,68	119,52	95,83	31,82	1012,72
3	18 - 17	Mik	36,97	20,52	102,6	53,36	45,17	13,68	187,14
4	17 - 15	Ole4	63,69	47,52	237,6	116,27	89,98	31,68	1003,62
5	18 - 16	Sos6	50,74			50,74	33,83	0,00	0,00
6	16 - 15	Oku	31,89			31,89	21,26	0,00	0,00
7	15 - 14	Ole5,6	84,67			84,67	56,45	0,00	0,00
8	14 - 12	BCh	50,84			50,84	33,89	0,00	0,00
9	15 - 13	Cha	96,94	63,94	319,68	160,19	128,56	42,62	1816,75
10	13 - 12	Lub5,6	142,1	104,33	521,64	256,02	199,06	69,55	4837,43
11	12 - 11	NH1,2KsO3	49,7	37,58	187,92	91,73	70,72	25,06	627,84
12	11 - 10	Sad, Sie2,1	59,29	44,28	221,4	108,32	83,81	29,52	871,43
13	10 - 9	Ole9	14,48	9,86	49,32	24,55	19,52	6,58	43,25
14	9 - 8	Gr2Żer1Rey6-Pk	74,2	32,9	164,52	90,54	82,37	21,94	481,22
15	8 - 7	Oz12,11,10	124,02	68,94	344,52	179,16	151,59	45,93	2109,56
16	7 - 5	Ple	44,37	32,47	162,36	79,73	62,05	21,65	468,65
17	8 - 6	Rey 3,4,5	64,31			64,31	42,87	0,00	0,00
18	6 - 5	1Maj 4,5	86,78			86,78	57,85	0,00	0,00
19	5 - 4	1Maj2,1	41,59	38,52	247,68	109,26	75,43	34,86	1215,22

I.p	Relacja	Ulica	t	t	t	TP	Tnp	O	W
20	4 - 3	Rej1	63,52	59,26	296,28	139,69	101,60	39,50	1560,51
21	3 - 2	MII	38,04	27,36	136,8	67,40	52,72	18,24	332,70
22	2 - 1	AP2-JAG	157,76	126,5	632,52	305,59	231,68	84,34	7112,67
Suma:			1210,18	863,17	4370,76	2517,27	1925,26	584,60	28254,77

Źródło: Opracowanie własne

Duża suma wariancji wskazuje na duże rozproszenie danych w stosunku do ich średniej. W tym przypadku jest to normalna sytuacja spowodowana bardzo zróżnicowanym rodzajem ruchu i odcinków branych pod uwagę przy analizie. Wynikiem zastosowania metody PERT w infrastrukturę dotychczasowej linii autobusowej, jest odpowiedź w jakim czasie z jakim prawdopodobieństwem autobus przejedzie tą trasę. Tabela 23 prezentuje z jakim prawdopodobieństwem wskazana linia autobusowa przejedzie trasę w czasie 23 minut.

Tabela 23. Prawdopodobieństwo przejechania aktualnej linii autobusowej w planowanym czasie

Rozkład normalny	
Wartość sprawdzana (D)	1353
Prawdopodobieństwo	0,85
Odczytana z tablic wartość	80,23%
Istnieje 80,23% szans, że autobus trasę wytyczone przez ścieżkę krytyczną przejedzie w czasie 1353 sekund, czyli 23 minut	

Źródło: Opracowanie własne

Prawdopodobieństwo wystąpienia tego zjawiska wynosi 80,23 %. co według kryteriów modelu spełnia wskazane założenia. W związku z tym, ostatnim elementem służącym ocenie zastosowanego modelu jest sprawdzenie czy wyliczony czas przejazdu jest korzystniejszy po zastosowaniu modelu czy też nie.

Tabela 24 przedstawia porównanie rzeczywistego czasu przejazdu z jego wymodelowanym odzwierciedleniem.

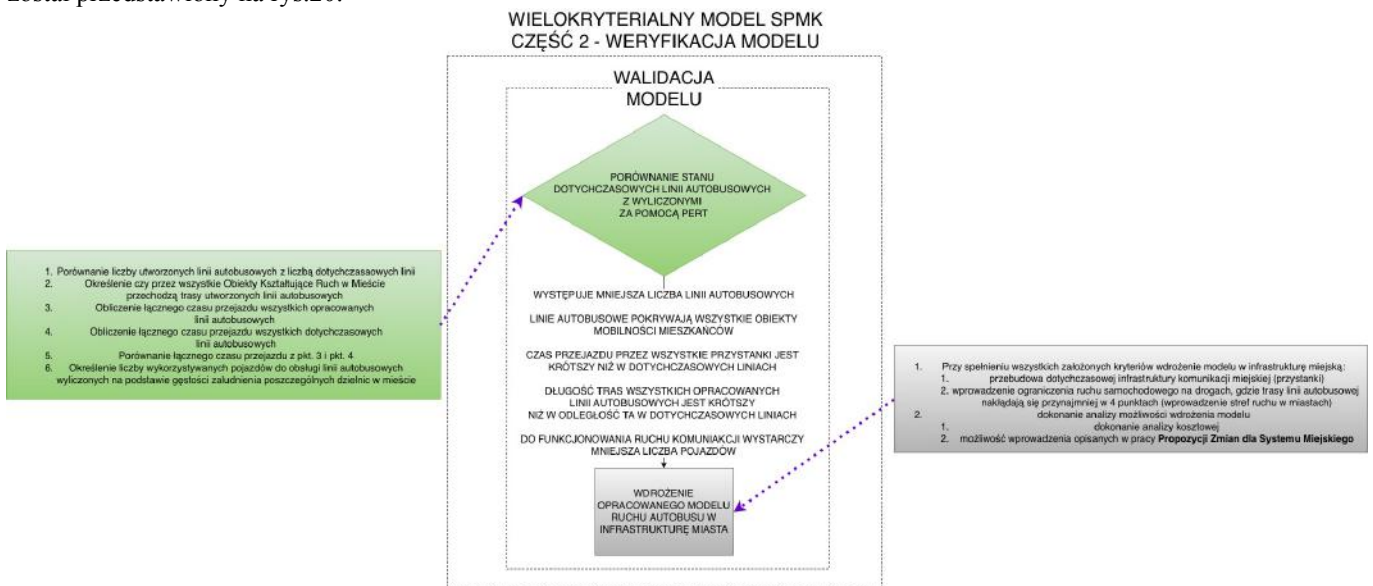
Tabela 24. Porównanie średnich czasów jazdy autobusu przed i po zastosowaniu modelu

	Sredni rzeczywisty czas przejazdu autobusu przed optymalizacją [min]	Sredni zoptymalizowany czas przejazdu autobusu [min]	Czas przejazdu samochodem osobowym [godz. 13.30, wtorek] [min]
Czas jazdy autobusu (z uwzględnieniem postoju na przystankach)	36		
Liczba przystanków	23		
Czas postoju na przystankach	11,5		
Czas samej jazdy autobusu	25	23	21

Źródło: Opracowanie własne

Wynika z tego, iż wskazana trasa przy zastosowaniu wielokryterialnego modelu przebywa trasę tej samej linii o niemalże 1,5 min, co w konsekwencji jest to wynik bardzo dobry. Oczekiwanym efektów końcowych powinno spodziewać się po zaprojektowaniu całego systemu komunikacji miejskiej w Opolu, natomiast przedstawione wyniki przeprowadzonej analizy wykazują wymierne korzyści optymalizacji tras i ruchu pojazdów komunikacji miejskiej.

Autor prezentuje dodatkowo schemat weryfikacji zastosowania modelu w rzeczywistym systemie miejskim, który został przedstawiony na rys.20.



Źródło: opracowanie własne

Dzięki takiej weryfikacji uniknąć można wielu negatywnych czynników wynikających z wprowadzenia modelu w miastach, jak również można uzyskać jasny obraz ukierunkowujący postawione cele.

Model wykazuje duży potencjał realizacji usług komunikacji zbiorowej w miastach, poprzez: optymalizację

- czasu przejazdu autobusu,
- łącznej długości tras przejazdów autobusów w miastach,
- tras komunikacji miejskiej względem doboru mniejszej ilości pojazdów do ich obsługi,
- lini autobusowych pokrywających większą ilość punktów kształtujących ruch w mieście.

Wnioskiem z wykonanego modelu jest możliwość optymalizacji dotychczasowych rozwiązań komunikacyjnych w miastach, przy jednoczesnym oszacowaniu dokładnego czasu przejazdu przez wskazaną linię autobusową na podstawie przeprowadzenia rozkładu normalnego i obliczenia prawdopodobieństwa takiego ruchu.

Z przeprowadzonych badań wynika, iż wskazana trasa przez zastosowania wielokryterialnego modelu przebywa trasę tej samej linii o niemalże 1,5 min szybciej, co daje to wynik bardzo dobry, dodatkowo zważywszy na fakt iż przejazd tej samej trasy samochodem osobowym jest jedynie o 2 minuty krótszy. Oczekiwanym efektów końcowych powinno spodziewać się po zaprojektowaniu całego systemu komunikacji miejskiej w Opolu, natomiast przedstawione wyniki przeprowadzonej analizy wykazują wymierne korzyści optymalizacji tras i ruchu pojazdów komunikacji miejskiej w postaci:

- skrócenia czasu przejazdu,
- skrócenia trasy przejazdu,
- zaprojektowania wszystkich tras tak, aby przebiegały przez wszystkie punkty użyteczności publicznej mieszkańców,
- spadek zużycia części autobusowych przez skrócenie ich jazdy,
- wzrost zadowolenia pasażerów miast dzięki optymalniejszemu rozwiązaniu.

W związku z powyższymi zaletami autor widzi duży potencjał w opracowanym modelu, który w przyszłości może stać się dodatkowym narzędziem wspomagającym pracę miejskich zakładów komunikacyjnych.

3. PODSUMOWANIE, KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

3.1. PODSUMOWANIE

W dysertacji podjęto próbę oryginalnego rozwiązania problemu naukowego, jakim jest fakt iż linie komunikacji miejskiej wymagają ciąglej aktualności ze względu na swoją funkcjonalność, która jest rozumiana jako:

- zmieniające się w dużym tempie zaludnienie miast
- nieustannie zmieniające się preferencje co do wyboru środka lokomocji, czy też miejsc docelowych w procesie transportu miejskiego
- zauważalne w ostatnich latach dynamiczne zmiany w miastach spowodowane ich rozwojem
- ciągle zwiększający się ruch pojazdów samochodowych w miastach,

Na rynku rozwiązań w związku z tym nie pojawiają się konkretne rozwiązania służące niwelowaniu negatywnych aspektów miejskich, w związku z tym przyjęto tezę, mówiącą o tym, iż jest możliwe opracowanie wielokryterialnego modelu sterowania pojazdami miejskiej komunikacji zbiorowej, który będzie uwzględniał wieloaspektowość w postaci czasu przejazdu, łatwości przemieszczania się pasażerów między różnymi dzielnicami miasta, planowaniu nowych linii autobusowych oraz wpływowi na zużycie eksploatacyjne pojazdów.

W celu budowy modelu przeprowadzono na terenie miasta Opola liczne badania, które dotyczyły analizy natężenia ruchu, wpływu obiektów kształtujących miasto tj. ilość placówek publicznych, ilości obiektów rekreacyjnych oraz wiele innych do których mieszkańcy najczęściej są transportowani. Do wyboru odpowiedniego miasta, które mogłoby w przyszłości zastosować wielokryterialny model opisany w pracy, zostały wykorzystane oceny eksperckie, które zaprezentowały również kluczowe elementy kształtujące miasta.

Każdy z opisanych rozdziałów i części pracy wpływa efektywnie na osiągnięcie postawionych celów w pracy. I tak:

- **część 1** - zagadnienia teoretyczne, odpowiadają na pytanie jakie konkretne problemy występują w miastach oraz jak można je eliminować, które zostały postawione w pierwszym celu szczegółowym. Zostały również wyartykułowane dwie definicje związane z tematyką pracy: logistyka miejska oraz telematyka, jak również ta część prezentuje jakie są braki w postaci innowacyjnych rozwiązań stosowanych do zarządzania i organizacji miejskiej komunikacji zbiorowej,
- **część 2** - charakterystyka podmiotu badawczego, wykazała jak ważne są elementy kształtujące miasta, które rzutują na opracowywaniu pewnych strategii rozwoju, uzależnianych głównie od ich infrastruktury. Dodatkowo ta część wykazała, za pośrednictwem badania eksperckiego, jakie czynniki najbardziej wpływają na realizację przewozów miejskich w zakresie transportu zbiorowego, wskazując i określając pewne wagi, wykorzystane do doboru innych obiektów do analizowanego wzorca - miasta Opola,
- **część 3** - przeprowadzenie badań empirycznych i ich analiza, nakreśliła pewien obraz obiektu przyjętego do badań, jak również określiła pewne problemy występujące w nim jakoby przez to określona została celowość wykonania pracy. Analiza zawarta w tej części ukształtowała pewien szkielet wielokryterialnego modelu, przez określenie kryteriów dających zakres realizacji pracy,
- **część 4** - wielokryterialny model sterowania pojazdami miejskiej komunikacji zbiorowej, wykazuje duży potencjał realizacji usług komunikacji zbiorowej w miastach, poprzez: optymalizację czasu przejazdu autobusu; łącznej długości tras przejazdów autobusów w miastach, co daje spadek zużycia elementów konstrukcyjnych pojazdów, przez krótsze przejazdy na jednej linii; tras komunikacji miejskiej względem doboru mniejszej ilości pojazdów do ich obsługi; lini autobusowych pokrywających większą ilość punktów kształtujących ruch w mieście.

Wnioskiem z wykonanego modelu jest możliwość optymalizacji dotychczasowych rozwiązań komunikacyjnych w miastach, przy jednoczesnym oszacowaniu dokładnego czasu przejazdu przez wskazaną linię autobusową na podstawie przeprowadzenia rozkładu normalnego i obliczenia prawdopodobieństwa takiego ruchu

3.2. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

W ramach dysertacji opracowano metodę, która jako szkielet narzędzia odpowiadającego na potrzeby funkcjonowania miast, powinna być nieustannie weryfikowana i doskonalona.

Najważniejszym kierunkiem dalszych badań związanych z wielokryterialnym modelem sterowania pojazdami miejskiej komunikacji zbiorowej jest określenie czy zastosowanie modelu w rzeczywistym systemie miejskim, ma wymierne korzyści. W związku z tym, powinno podjąć się działania skupiające na wdrożeniu modelu w fizyczną jednostkę, jak również w opracowaniu planu szczegółowego wdrażania w rzeczywistą infrastrukturę elementów związanych z modelem.

Autor zaleca również prowadzenie dalszych badań nad funkcjonowaniem modelu w zakresie porównawczym otrzymanych wyników ze stanem rzeczywistym funkcjonowania badanego w pracy miasta. Pozwoli to w jeszcze lepszym aspekcie zapatrywać się na proces funkcjonowania miasta i samego modelu.

Istotnym elementem opracowanego modelu jest jego weryfikacja oraz uaktualnianie, ponieważ zmienną decyzyjną w modelu są preferencje mieszkańców związane z podróżami po mieście. Ten aspekt również wymaga ciągłości badawczej, przez fakt, że preferencje mieszkańców mogą się z biegiem czasu zmieniać.

Ponadto autor wykazuje potrzebę badania następujących elementów związanych z opracowanym wielokryterialnym modelem SPMKZ:

- badanie miast europejskich (i nie tylko) w kierunku zastosowania opracowanego modelu,
- opracowanie autorskiego programu komputerowego zarządzającego zaproponowanym modelem.
- przeprowadzenie badań nad implementacją opracowanego modelu w rzeczywisty systemie miejski, w skład w których wchodzi:
 - metody statyczne opłacalności inwestycji,
 - metody dynamiczne opłacalności inwestycji,
 - analiza wrażliwości,
 - analiza powiązań SWOT/TOWS w kierunku wpływu modelu na systemy miejskie,
 - wykonanie analizy za pomocą metod scenariuszowych konieczności wprowadzenia zmian,
- dokonanie badań w kierunku określenia przepustowości przystanków, która będzie potrzebna do określania częstotliwości kursowania autobusów zgodna z wielokryterialnym modelem, która może zostać określona wzorem (8),

$$a=Z*wsp+P*wsp+dt *wsp+zp*wsp+T*wsp \quad (6)$$

gdzie:

a - przepustowość przystanku

Z - gęstość zaludnienia

P - pora dnia (6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 godzina)

dt - dzień tygodnia (pn-pt - 0,1-1; sb-nd - 0)

zp - ilość zakładów pracy/,placówek oświatowych

T - tabor autobusowy (ilość autobusów przejeżdżających przez dany przystanek)

4. LITERATURA (wybrane pozycje)

1. Iwan S., An idea of genetic algorithm using for Urban Consolidation Centres localization, Polish Journal of Environmental Studies, Olsztyn 2008
2. Iwan S., Implementation of telematics-based good practices to support urban freight transport systems, applying a city's adaptability level, Int. J. of Shipping and Transport Logistics 2016 - Vol. 8, No.5 pp. 531 – 551
3. Iwan S., Małecki K., Analiza wybranych krajowych architektur ITS i wskazania dla architektury dla Polski, Logistyka nr 6, Poznań 2010.
4. Iwan S., Małecki K., Korczak J., Impact of Telematics on Efficiency of Urban Freight Transport, Communications in Computer and Information Science, Volume 395, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, pp 50-57
5. Iwan S., Małecki K., Zaborowski Ł., Nürnberg M.: Mobile driver assistance system based on data from the diagnostic port of vehicle. Archives of Transport Systems Telematics, Volume 11, Issue 1, s.13-19, ISSN 1899-8208
6. Iwan S., Projektowanie struktury chromosomów dla algorytmów genetycznych wykorzystywanych do rozwiązywania problemów logistycznych w monografii Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2006
7. Iwan S., Rozwiązywanie problemu lokalizacji punktów tranzytowych w sieci logistycznej z zastosowaniem algorytmu genetycznego, Logistyka nr 3/2007, Poznań 2007
8. Iwan S., Thompson R. G., Macharis C., Application of genetic algorithms in optimizing the logistics network in an urban bicycle delivery system, TRB 94th Annual Meeting, Washington, 2015
9. Iwan S., Wdrażanie dobrych praktyk w obszarze transportu dostawczego w miastach, Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2012, s. 23-113
10. Kijewska K., Iwan S., Nürnberg M., Małecki K.: Telematic tools as the suport for unloading bays utilization. Archives of Transport Systems Telematics, Volume 11, Issue 4, s.23-28, ISSN 1899-8208
11. Kijewska K., Torbacki W., Iwan S., Application of AHP and DEMATEL Methods in Choosing and Analysing the Measures for the Distribution of Goods in Szczecin Region, Sustainability 2018, 10(7), 2365; doi: 10.3390/ su10072365; IF: 2,075
12. Knosala R. (red.) Inżynieria produkcji. Kompendium wiedzy, Polskie wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2017
13. Kulińska E., Aksjologiczny wymiar zarządzania ryzykiem procesów logistycznych. Modele i eksperymenty ekonomiczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2011
14. Kulińska E., Dendera-Gruszka M., Wojtynek Ł., Masłowski D., Szczurek M., Analiza techniczno – ekonomiczna Europejskiego Systemu Sterowania Ruchem Kolejowym i perspektywy jego rozwoju w Polsce, Autobusy, t.18, nr 6, 2017, CD, s. 1454-1457.
15. Kulińska E., Krupa T., Model oceny aksjologicznego wymiaru zarządzania ryzykiem procesów logistycznych, Logistyka, nr 4, 2009, CD
16. Kulińska E., Masłowski D., Improving the Organization of Urban Transport by Using of Electronic Passenger's Cards - Case Study. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej; W: Manufacturing Processes. Actual Problems - 2016. Volume I: Basic science applications in manufacturing processes. Red: Gajek Maksymilian, Hachkevych Oleksandr, Stanik-Besler Anida, Wołczański Tomasz. Opole: 2016, s. 95-110.
17. Kulińska E., Masłowski D., Dendera-Gruszka M., Analiza PEST/PESTEL jako narzędzie wspomagające rozwój miast. Studium przypadku na podstawie miasta Opola. Studia i Materiały. Miscellanea Oeconomicae, Rok 21, Nr 4/2017, tom I, s. 155-169

- 18.Kulińska E., Masłowski D., Wojtynek L.: Improvement of the process of handling participants in road traffic events by the police in the Opole voivodship, *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*, ISSN: 2544-7122, pp.40-60, DOI: 10.5604/01.3001.0011.7357
- 19.Kulińska E., Masłowski D., Krzyszkowska D.: Racjonalizacja przepływu i zarządzania informacją z wykorzystaniem baz danych – case study, *Przedsiębiorczość I Zarządzanie*, z. 18, 12/2016, T.II, s. 293-315.
- 20.Kulińska E., Model parametryzacji kosztów ryzyka w procesie transportu, *Logistyka* 6/2013, s. 315-321.
- 21.Kulińska E., Znaczenie komunikacji elektronicznej w parametryzacji kosztów ryzyka w procesach logistycznych, *Ekonomiczne Problemy Usług* nr 104, 2013, s. 33-43
- 22.Kulińska E., Rut J., Partyka P., Ograniczenie zjawiska kongestii z wykorzystaniem elastycznych pasów ruchu. *Logistyka* 2/2014, s. 26-34
- 23.Małecki K., Iwan S., Kijewska K., Influence of Intelligent Transportation Systems on reduction of the environmental negative impact of urban freight transport based on Szczecin example, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 151, Elsevier 2014, Pages 215-229
- 24.Małecki K., Iwan S., Zastosowanie rozwiązań telematycznych jako czynnik warunkujący efektywne zarządzanie miejskim transportem towarowym, *Logistyka* 3/2014, ILiM, Poznań 2014, s. 4128-4136
- 25.Małecki K., Pietruszka P., Iwan S. (2017) Comparative Analysis of Selected Algorithms in the Process of Optimization of Traffic Lights. In: Nguyen N., Tojo S., Nguyen L., Trawiński B. (eds) *Intelligent Information and Database Systems. ACIIDS 2017. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10192. Springer, Cham
- 26.Masłowski D., Kulińska E., Ligęzka M.: System telematyczny wspomagający zarządzanie transportem samochodowym w przedsiębiorstwie SALTRANS, *Przedsiębiorczość I Zarządzanie*, z. 18, 12/2016, T.II, s. 331-357.
- 27.Masłowski D., Inteligentne miasta remedium na kongestię, *ZNPO Inżynieria Środowiska*, z.10, nr 364/2017, s. 65-69
- 28.Masłowski D.: Analiza rozwiązań wykorzystywanych podczas wyznaczania optymalnych tras przewozowych, [w:] *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej - Inżynieria Środowiska*, 1428-8540, Opole 2018, z. 11, nr 366, s. 89-94.
- 29.Masłowski D.: Analiza czynników wyboru przez osoby podróżujące miejską komunikacją w Opolu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej. Mechanika*. nr 358/2016 X Środowiskowe Warsztaty Doktorantów Politechniki Opolskiej Opole-Pokrzywna 2016-06-15 - 2016-06-17, 2016, 129-132
- 30.Masłowski D., Miłaszewicz B.: Problematyka Układu Komunikacyjnego W Kontekście Logistyki Miejskiej. Case Study Na Podstawie Wyspy Bolko. *Gospodarka Materiałowa I Logistyka*. 2016, 181-191.
- 31.Masłowski D., Kulińska E.: Poprawa bezpieczeństwa ruchu drogowego z wykorzystaniem rozwiązań telematycznych w aglomeracjach miejskich. *Studia i Materiały "Miscellanea Oeconomicae"*, nr 4/2017, Tom I, s. 187-201.
- 32.Masłowski D., Kulińska E., Dendera – Gruszka M., Klak A.: Wpływ infrastruktury drogowej na bezpieczeństwo ruchu drogowego, *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, T. II, red. R. Knosala, Oficyna wydawnicza PTZP, Opole 2018, s. 41-53
- 33.Masłowski D., Kulińska E., Dendera-Gruszka M., Analiza i ocena systemów telematycznych stosowanych w aglomeracjach miejskich, *Wybrane prace z obszaru prawa, ekonomii i nauk społecznych*, red. E. Chodźko, P. Szymczyk, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL, Lublin 2018, s. 262-282
- 34.Masłowski D., Kulińska E., Kulińska K. Application of routing methods in city logistics for sustainable road traffic. 3rd International Conference Green Cities 2018 – Green Logistics for Greener Cities, 13-14 September 2018, Szczecin, Poland
- 35.Masłowski D., Kulińska E., Wojtynek L., Dendera – Gruszka M.: Analiza rozwiązań informatycznych wykorzystywanych w procesie planowania przejazdów komunikacji miejskiej, *Autobusy*, t.18, nr 6, 2017, CD, s.1467-1473.
- 36.Masłowski D., Kulińska E., Wojtynek L., Dendera – Gruszka M.: Analiza procesu planowania przewozu towarów w aspekcie międzynarodowym, *Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją*, w: *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, XX Konferencja Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, red. Knosala R., Zakopane, 26.02- 28.02.2017, s.53-64.
- 37.Saniuk S., Szopik-Depczyńska K., Cheba K., Rola innowacyjnych rozwiązań transportowych w modelowaniu zachowań komunikacyjnych mieszkańców miast *Logistyka* .- 2014, nr 6, s. 14697--14705,
- 38.Saniuk S., Witkowski K., Zadania infrastruktury transportu miejskiego w logistyce miejskiej, *Logistyka*, 2/2011, s. 495-506
- 39.Stajniak M., Hajdul M., Foltyński M., Krupa A., *Transport i Spedycja*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań, 2008, s. 15-56
- 40.Stajniak M., Koliński A., Identyfikacja działań operacyjnych wpływających na efektywność procesu transportowego, *ZN WSH Zarządzanie* 2016, s. 323-335
- 41.Stajniak M., *Racjonalizacja transportu w logistycznych procesach zaopatrzenia i dystrybucji*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2012
- 42.Stasiak A. (red.), *Modelowanie systemów informatycznych w języku UML 2.1.*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009 s.32
- 43.Witkowski J., Modelowanie logistyki miejskiej. W poszukiwaniu nadrzędnego celu i kryteriów oceny modelu, *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu* nr 234, Wrocław 2011, s. 131
- 44.Witkowski K., Aspekt logistyki miejskiej w gospodarowaniu infrastrukturą transportową miasta, *Prace Instytutu Prawa i Administracji PWSZ w Sulechowie, „Studia Lubuskie”*, nr 3, PWSZ Sulechów, Sulechów 2007, s. 203.
- 45.Witkowski, K., Saniuk S., Aspekt logistyczny zarządzania infrastrukturą komunalną miasta, *Total Logistic Management - TLM 2010 : XIV konferencja logistyki stosowanej*. Zakopane, 2010, s. [12]
- 46.Witkowski, K., Saniuk S., Logistics management aspects of the city infrastructure, *Trade and freight: from soil to consumer : VIII. International Logistics & Supply Chain*. Istanbul, Turcja, 2010 .- Istanbul : Logistics Association, 2010 .- Logistics Association Publication, No 9, s. 294–302
- 47.Witkowski, K., Saniuk S., *Logistyka miejska a jakość życia mieszkańców Zielonej Góry - wstęp do badań*, *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu* .- 2011, Nr 234, s. 171–181,
- 48.Witkowski, K., Saniuk S., *Oczekiwania mieszkańców wobec rozwiązań usprawniających system transportu miejskiego*, *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, 2011, Nr 234, s. 182–191