

UNIVERZITET U BEOGRADU
SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Stanko A. Bajčetić

**MODEL ZA OPTIMIZACIJU VREMENA
OBRTA VOZILA NA LINIJI JAVNOG
GRADSKOG TRANSPORTA PUTNIKA**

doktorska disertacija

Beograd, 2017

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Stanko A. Bajčetić

**MODEL FOR OPTIMIZING THE
VEHICLE ROUND TRIP TIME ON
URBAN PUBLIC TRANSPORT LINE**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017

Mentor:

Prof. dr Slaven Tica, vanredni profesor
Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu

Članovi komisije:

Prof. dr Slaven Tica, vanredni profesor
Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu

Prof. dr Nebojša Bojović, redovni profesor
Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu

Dr Tatjana Davidović, viši naučni saradnik
Matematičkog instituta, SANU

Datum odbrane:

MODEL ZA OPTIMIZACIJU VREMENA OBRTA VOZILA NA LINIJI JAVNOG GRADSKOG TRANSPORTA PUTNIKA

REZIME

Dve su ključne odrednice koje ukazuju na predmet, osnovne ciljeve i pravce istraživanja koji su sprovedeni u okviru ove doktorske disertacije. Prva odrednica je sistem linijskog javnog transporta putnika kao predmet istraživanja, a druga je linija sistema, kao osnovni element njegove strukture.

Sistemski pristup u analizi i projektovanju sistema javnog gradskog transporta putnika pretpostavlja utvrđivanje uzajamnih veza između svih procesa, potprocesa i aktivnosti koje ga karakterišu, u cilju proizvodnje kvalitetne transportne usluge.

Osnovna polazna hipoteza u doktorskoj disertaciji je da karakteristike trase linije i ostali statički elementi linije utiču na varijaciju i na ukupno vreme obrta na liniji. Takođe, imajući u vidu osnovnu polaznu hipotezu, definisane su i dodatne hipoteze, koje pretpostavljaju da je navedene uticaje moguće identifikovati i kvantifikovati, te da je moguće definisati model za optimizaciju vremena obrta kao osnovne ulazne veličine za izradu reda vožnje.

U skladu sa polaznim hipotezama, u doktorskoj disertaciji izvršena je sveobuhvatna analiza elemenata trase i ostalih statičkih i dinamičkih elemenata linije koji utiču na vreme vožnje. Definisan je novi model za utvrđivanje i kvantifikaciju faktora koji utiču na vreme vožnje i metodologija za prikupljanje svih neophodnih podataka iz realnog sistema. Model višestruke regresije, koji je razvijen kao rezultat sprovedene multivarijacione statističke analize pomoću specijalizovanog SPSS softvera, primenjen je na odabranim reprezentativnim linijama realnog sistema. Rezultati primene definisanog regresionog modela pokazali su da odabrane nezavisne promenljive u značajnoj meri objašnjavaju karakteristike vremena obrta.

Takođe, imajući u vidu prethodno definisane modele i izvršene analize, u okviru disertacije je definisan novi model za optimizaciju vremena obrta vozila na liniji javnog transporta baziran na troškovima funkcionisanja linije. Na osnovu predloženog pristupa formulisan je matematički model u formi mešovitog celobrojnog programiranja sa ciljnom funkcijom minimizacije troškova. U okviru disertacije je razvijen i algoritam koji primenjuje definisani optimizacioni model. Model je primenjen i testiran na liniji realnog sistema. Matematički proračun za dobijanje optimalnih vrednosti funkcije cilja realizovan je korišćenjem specijalizovanog softvera za matematičko programiranje CPLEX/AMPL.

Rezultati testiranja definisanog modela za optimizaciju vremena obrta vozila na liniji javnog transporta pokazuju da model uspešno odlikava funkcionisanje realnog sistema.

Ključne reči: sistem, javni gradski transport putnika, linija, vreme obrta, kvalitet transportne usluge, multivarijaciona analiza, troškovi funkcionisanja, optimizacioni model, mešovito celobrojno programiranje

Naučna oblast: Saobraćajno inženjerstvo

Uža naučna oblast: Drumski i gradski transport putnika

MODEL FOR OPTIMIZING THE VEHICLE ROUND TRIP TIME ON URBAN PUBLIC TRANSPORT LINE

ABSTRACT

The systematic approach to the analysis and design of the urban public transport line assumes the establishment of interconnections between all processes, subprocesses and activities that characterize it, with the aim of producing quality transport services.

The general dissertation hypothesis is that the characteristics of the line route and other static elements of the line affect the variation and the total round trip time of the vehicles in urban public transport. Additional hypotheses have been set that these impacts can be identified and quantified, and that a model for optimizing the vehicle round trip time, as the basic input for creating a timetable, can be defined.

Therefore, the analysis of the elements of the route and other static elements of the line that influence the driving time was carried out. A model for determining and quantifying influence factors and methodologies for collecting all necessary data was created. The multiple regression model, developed as a result of the conducted multivariate statistical analysis using the specialized SPSS software, was applied to the selected representative set of lines in the real urban public transport system. The results of the evaluation of the defined regression model showed that the selected independent variables are crucial for explaining the characteristics of round trip time.

Within this thesis, a model for optimizing the round trip time of the vehicles on urban public transport line based on the total costs of the functioning of the line was developed. Based on the proposed model, a mathematical mix integer programming model with the cost minimization function was defined. Moreover, the algorithm that uses the defined optimization model was presented. The model was applied and tested

on a line in the real system. The optimum values of the target function were obtained using specialized software for mathematical programming CPLEX/AMPL.

The test results showed that the developed model successfully represents real urban public transport system.

Key words: system, urban public transport, line, round trip time, quality of transport services, multivariate analysis, operating costs, optimization model, mixed integer programming.

Scientific field: Traffic Engineering

Field of Academic

Expertise: Road and Urban Passenger Transport

IZJAVA ZAHVALNOSTI

Rad na ovako teškom naučnom i stručnom izazovu predstavlja dug proces koji niko ne može uspešno završiti bez pomoći ljudi i institucija u okruženju.

Imajući to na umu, želeo bih da se, na prvom mestu, zahvalim svom mentoru, prof. dr Slavenu Tici, koji je zaista, kako često voli i sam da kaže, vitez nauke i struke u oblasti drumskog i gradskog transporta putnika. Zahvaljujem mu se za njegovo nepokolebljivo poverenje u moje sposobnosti da završim doktorsku disertaciju, neprekidnu veru u moje umeće da samostalno radim na njoj i za njegovo usmeravanje i podršku tokom samog procesa izrade disertacije. Nadam se da ćemo u decenijama pred nama imati prilike da se družimo i saradujemo i da naš odnos, koji je odavno prevazišao poslovni i kolegijalni nivo, još više unapredimo i učvrstimo.

Želeo bih da se zahvalim i prof. dr Nebojši Bojoviću, ne samo za rad u Komisiji za ocenu i odbranu doktorske disertacije, u okviru kog mi je pružio veoma korisne preporuke i ideje za poboljšanje kvaliteta disertacije, već kao osobi i profesionalcu koji je od samog početka doktorskih studija nesebično pružao podršku i meni i mnogim mojim kolegama na Saobraćajnom fakultetu.

Zahvaljujem se dr Tatjani Davidović za njenu podršku i uvek veoma korisne i utemeljene savete, ideje i preporuke u vezi sa izradom doktorske disertacije, koje sam dobijao tokom poseta Matematičkom institutu SANU. Zahvaljujem se i rukovodstvu Matematičkog instituta SANU, koje mi je stavilo na raspolaganje hardverske i softverske resurse neophodne za eksperimentalnu evaluaciju definisanog matematičkog modela.

Veoma sam srećan, privilegovani i zahvalan što sam imao priliku da prikažem svoj rad ovako uvažanim i cenjenim članovima naše naučne zajednice i dobijem savete od njih.

Velika zahvalnost ide i članovima Katedre za drumski i gradski transport Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu, prof. dr Snežani Filipović, prof. dr Branku Milovanoviću, Slobodanu Gavriloviću, Andrei Nađ, za česte stručne razgovore i konstruktivne diskusije koje smo do sada vodili i koji će se nastaviti u godinama pred nama. Takođe se zahvaljujem i prof. dr Vladislavu Marašu, koji je nesebično izdvojio svoje vreme i koji mi je svojim savetima i sugestijama pomogao u radu na disertaciji.

Posebnu zahvalnost dugujem svom prijatelju, kolegi i saborcu Predragu Živanoviću, bez kog, siguran sam, ovo ništa ne bi bilo ostvarivo i koji je od samog početka imao nemerljiv uticaj na moj naučni i stručni napredak i razvoj.

Zahvaljujem se svojim roditeljima, Slavici i Aleksandru, koji su svojim vaspitanjem i savetima doprineli razvoju moje ličnosti. Zahvalan sam im što su me usmeravali ka pravom putu i što su mi bili, a i dalje jesu, безусловna podrška u svim odlukama koje sam donosio kroz život.

Ipak, najdublju zahvalnost dugujem svojoj supruzi Jovani, koja je u toku mog angažovanja na izradi disertacije bila veoma strpljiva i koja je predstavljala glavni oslonac mojim sinovima i meni. Neizmernu zahvalnost joj dugujem iz razloga što me je slušala, razumela, bodrila, i što mi je pružila neophodan prostor i slobodu. Hvala za beskrajnu ljubav, strpljivost i razumevanje tokom veoma stresnih perioda i čestih odsustvovanja.

Posvećeno Segi i Kikirikiju

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. SISTEM JAVNOG GRADSKOG TRANSPORTA PUTNIKA.....	8
2.1. Definisane mesta sistema.....	8
2.2. Dekompozicija sistema i uloga podistema javnog masovnog transporta.....	13
2.3. Analiza linije kao osnovnog elementa sistema javnog masovnog transporta.....	22
2.3.1. Statički elementi linije	23
2.3.2. Dinamički elementi linije.....	31
2.3.3. Karakteristike transportnih zahteva na liniji	41
3. KRITIČKI PREGLED REFERENTNE LITERATURE I RELEVANTNIH ISTRAŽIVANJA	52
3.1. Pouzdanost funkcionisanja sistema javnog masovnog transporta putnika	52
3.2. Faktori od uticaja na vreme prevoza u javnom masovnom transportu putnika ..	64
3.3. Utvrđivanje vremena obrta kao ulaznog elementa za izradu redova vožnje	73

4. NOVA METODOLOGIJA ZA UTVRĐIVANJE I KVANTIFIKACIJU FAKTORA OD UTICAJA NA VREME VOŽNJE.....	82
4.1. Potencijalni faktori	82
4.1.1. Karakteristike strukture.....	82
4.1.2. Karakteristike funkcionisanja.....	87
4.2. Metodologija prikupljanja neophodnih podataka.....	89
4.2.1. Istraživanje karakteristika strukture.....	91
4.2.2. Istraživanje karakteristika funkcionisanja.....	92
4.3. Kodiranje podataka.....	95
4.4. Izbor metode multivarijacione analize.....	98
4.4.1. Osnovno o modelu višestruke regresije	100
4.4.2. Definisane regresionog modela primenom SPSS softvera	102
4.5. Primena definisane metodologije na odabranim linijama.....	109
4.5.1. Izbor sistema i linija javnog masovnog transporta putnika.....	109
4.5.2. Utvrđivanje karakteristika strukture odabranih linija.....	113
4.5.3. Utvrđivanje karakteristika funkcionisanja odabranih linija	113
4.5.4. Baza o karakteristikama strukture i funkcionisanja odabranih linija.....	124
4.6. Rezultati primene multivarijacione analize	125
4.6.1. Provera važenja pretpostavki.....	125
4.6.2. Vrednovanje regresionog modela	129
4.6.3. Vrednovanje nezavisnih promenljivih	131
4.7. Uporedna analiza vrednovanja i zaključna razmatranja	142
5. NOVI MODEL ZA OPTIMIZACIJU VREMENA OBRTA VOZILA NA LINIJI JAVNOG GRADSKOG TRANSPORTA.....	145
5.1. Formulisanje problema	146
5.2. Karakteristike realizovanog intervala po stajalištima duž linije	151

5.3. Troškovi angažovanja resursa (vozila)	154
5.4. Troškovi putnika.....	157
5.4.1. Troškovi vožnje	158
5.4.2. Troškovi čekanja.....	160
5.5. Trošak kvaliteta usluge	162
5.6. Matematički model i algoritam optimizacije	168
5.7. Primena i testiranje modela u realnom sistemu.....	178
5.7.1. Utvrđivanje vrednosti jediničnih troškova angažovanja resursa	178
5.7.2. Utvrđivanje karakteristika transportnih zahteva i skupa potencijalnih intervala	182
5.7.3. Karakteristike funkcionisanja linije	185
5.7.4. Utvrđivanje vrednosti ostalih jediničnih troškova.....	191
5.8. Rezultati primene optimizacionog modela	196
5.9. Analiza osetljivosti modela.....	201
5.9.1. Promena inicijalne vrednosti jedinične cene varijacije.....	201
5.9.2. Promena vrednosti jedinične cene vremena vožnje.....	205
6. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA	212
7. LITERATURA	221
8. PRILOZI.....	231

SPISAK SLIKA:

Slika 2.1.	Pozicija sistema javnog gradskog transporta putnika.....	10
Slika 2.2.	Klasifikacija sistema javnog gradskog transporta u odnosu na osnovne sistemske karakteristike	14
Slika 2.3.	Transportni proces u sistemu javnog masovnog transporta putnika u Beogradu.....	17
Slika 2.4.	Mesto linije u sistemu javnog masovnog transporta putnika i hijerarhija upravljanja.....	22
Slika 2.5.	Šematski prikaz linije JMTP.....	24
Slika 2.6.	Klasifikacija linija prema položaju trase i terminusa u odnosu na urbano područje	28
Slika 2.7.	Šematski prikaz kretanja vozila na liniji – put–vreme dijagram.....	32
Slika 2.8.	Šematski prikaz složenog putovanja	42
Slika 2.9.	Proces transformacije transportnih potreba	43
Slika 2.10.	Proces nastanka transportnih zahteva na liniji javnog masovnog transporta putnika	45
Slika 2.11.	Promena transportnih zahteva u prostoru	49
Slika 3.1.	Petlja kvaliteta usluge	53
Slika 3.2.	Svojstva kvaliteta usluge i sistema javnog masovnog transporta	54
Slika 3.3.	Struktura istraživanja i glavni rezultati.....	56
Slika 3.4.	Prosečan rang značaja pojedinih svojstava transportne usluge.....	58
Slika 3.5.	Primena kuće kvaliteta u unapređenju kvaliteta transportne usluga u sistemu JMTP.....	62
Slika 3.6.	Komponente vremena prevoza vozila na međustaničnom rastojanju	66
Slika 3.7.	Unutrašnji i spoljašnji faktori.....	72
Slika 4.1.	Metodologija za utvrđivanje i kvantifikaciju faktora koji utiču na vreme vožnje.....	90
Slika 4.2.	Algoritam izbora multivarijacione metode	99
Slika 4.3.	Vidovna raspodela kretanja za grad Beograd – Modal Split	110
Slika 4.4.	Arhitektura sistema za upravljanje javni masovnim transportom u Beogradu.....	115
Slika 4.5.	Dijagram procesa upravljanja sistemom transporta putnika u Beogradu	116
Slika 4.6.	Predefinisani događaju na trasi u sistemu za upravljanje u Beogradu	117
Slika 4.7.	Realizovana vremena prevoza na odabranim linijama u toku perioda funkcionisanja	120
Slika 4.8.	Raspodela zajedničkih frekvencija po karakterističnim periodima.....	123
Slika 4.9.	Normal P-P dijagram rasturanja standardizovanog reziduala.....	128
Slika 4.10.	Scatterplot dijagram rasturanja standardizovanog reziduala	128

Slika 5.1.	Funkcija gustine i raspodele realizovanog vremena obrta.....	146
Slika 5.2.	Primer nomograma kojim se ilustruju modeli veza ulaznih elemenata za definisanje reda vožnje	149
Slika 5.3.	Funkcija gustine empirijske raspodele realizovanih intervala po stajalištima duž linije	151
Slika 5.4.	Funkcija gustine empirijske raspodele intervala za odabrana stajališta ..	152
Slika 5.5.	Funkcija gustine realizovanih vremena prevoza	162
Slika 5.6.	Primeri unimodalne i bimodalne distribucije realizacija vremena vožnje	167
Slika 5.7.	Algoritam procesa optimizacije	177
Slika 5.8.	Broj ulazaka putnika po stajalištima duž linije u toku definisanog perioda – Smer A	183
Slika 5.9.	Broj ulazaka putnika po stajalištima duž linije u toku definisanog perioda – Smer B	183
Slika 5.10.	Intenzitet protoka putnika po stajalištima duž linije u toku definisanog perioda – Smer A	184
Slika 5.11.	Intenzitet protoka putnika po stajalištima duž linije u toku definisanog perioda – Smer B	184
Slika 5.12.	Linearna korelacija koeficijenta varijacije intervala i rednog broja stajališta – Smer A	190
Slika 5.13.	Linearna korelacija koeficijenta varijacije intervala i rednog broja stajališta – Smer B	190
Slika 5.14.	Struktura korisnika u jutarnjem vršnom periodu prema zanimanju	193
Slika 5.15.	Struktura korisnika prema svrhama putovanja u jutarnjem vršnom periodu	193
Slika 5.16.	Vrednost funkcije cilja i potreban broj vozila.....	198
Slika 5.17.	Vrednosti vremena poluobrti i vremena obrta.....	199
Slika 5.18.	Uporedni prikaz vrednost funkcije cilja i potrebnog broja vozila za različite vrednosti jedinične cene varijacije.....	202
Slika 5.19.	Uporedni prikaz optimalnog vremena obrta za različite vrednosti jedinične cene varijacije.....	203
Slika 5.20.	Vrednost funkcije cilja i potrebnog broja vozila za proširen skup intervala	206
Slika 5.21.	Vrednost funkcije cilja i potrebnog broja vozila za proširen skup intervala i uvećanu vrednost vremena vožnje za 25%	208
Slika 5.22.	Vrednost funkcije cilja i potrebnog broja vozila za proširen skup intervala i uvećanu vrednost vremena vožnje za 50%	209
Slika 5.23.	Uporedni prikaz krive funkcije cilja za različite vrednosti jedinične cene vremena vožnje	210
Slika 5.24.	Uporedni prikaz krive optimalnih vremena obrta za različite vrednosti jedinične cene vremena vožnje	211

SPISAK TABELA:

Tabela 2.1. Rezultati utvrđivanja statističke značajnosti pomoći hi-kvadrat testa nezavisnosti.....	19
Tabela 3.1. Matrica međuzavisnosti korisničkih zahteva i karakteristika usluge	60
Tabela 3.2. Preventivne strategije unapređenja pouzdanosti funkcionisanja linije.....	74
Tabela 3.3. Korektivne strategije unapređenja pouzdanosti funkcionisanja linije.....	74
Tabela 4.1. Stepen nezavisnosti trase linije	84
Tabela 4.2. Kodiranje podataka o strukturi i funkcionisanju	96
Tabela 4.3. Analiza varijansi za model višestruke regresije	108
Tabela 4.4. Statičke i dinamičke karakteristike mreže gradskog i prigradskog transporta putnika po podsistemima.....	110
Tabela 4.5. Izabrane karakteristike strukture i funkcionisanja reprezentativnih linija	112
Tabela 4.6. Prosečne vrednosti planiranih intervala po karakterističnim periodima .	122
Tabela 4.7. Dijagnostika kolinearnosti nezavisnih promenljivih.....	126
Tabela 4.8. Dijagnostika kolinearnosti nezavisnih promenljivih bez C1	127
Tabela 4.9. Vrednovanje regresionog modela.....	129
Tabela 4.10. Vrednovanje nezavisnih promenljivih za zavisnu promenljivu AVERAGE	134
Tabela 4.11. Vrednovanje nezavisnih promenljivih za zavisnu promenljivu MIN	136
Tabela 4.12. Vrednovanje nezavisnih promenljivih za zavisnu promenljivu MAX....	138
Tabela 4.13. Vrednovanje nezavisnih promenljivih za zavisnu promenljivu SD.....	140
Tabela 4.14. Vrednovanje nezavisnih promenljivih za zavisnu promenljivu SDLOG	141
Tabela 4.15. Uporedna analiza vrednovanja nezavisnih promenljivih.....	143
Tabela 5.1. Tabelarni prikaz empirijske raspodele realizovanih vremena prevoza ...	163
Tabela 5.2. Matrica jediničnih troškova transportnog rada po kategoriji linije k i tipu vozila $v - Ckmk, v$ [RSD/km]	179
Tabela 5.3. Jedinične cene angažovanja resursa	180
Tabela 5.4. Struktura ključnih faktora koji utiču na veličinu troškova angažovanja resursa	180
Tabela 5.5. Skup potencijalnih intervala	185
Tabela 5.6. Karakteristike funkcionisanja linije – Smer A.....	187
Tabela 5.7. Karakteristike funkcionisanja linije – Smer B	188
Tabela 5.8. Distribucija raspodele realizovanih vremena prevoza po smerovima....	189
Tabela 5.9. Vrednovanje regresionog modela za utvrđivanje očekivane vrednosti intervala	190
Tabela 5.10. Vrednovanje regresionog modela za utvrđivanje očekivane vrednosti intervala	190

Tabela 5.11. Prosečne neto zarade i broj časova rada stanovnika grada Beograda	192
Tabela 5.12. Prosečne neto zarade i broj časova rada vozača GSP „Beograd“	196
Tabela 5.13. Vrednosti funkcije cilja, vremena obrta i vremena rada CPLEX/AMPL-a	197
Tabela 5.14. Uporedna analiza izlaznih rezultata optimizacionog modela sa postojećim vrednostima	200
Tabela 5.15. Vrednosti funkcije cilja, vremena obrta i vremena rada CPLEX/AMPL-a sa izmenjenom vrednošću cene varijacije	201
Tabela 5.16. Uporedna analiza homogenosti distribucije vremena vožnje i vremena čekanja	204
Tabela 5.17. Vrednosti funkcije cilja, vremena obrta i vremena rada CPLEX/AMPL-a za dodate tri vrednosti intervala	206
Tabela 5.18. Vrednosti jedinične cene vremena vožnje i vrednosti ostalih jediničnih cena (inicijalne i nakon povećanja)	207
Tabela 5.19. Vrednosti funkcije cilja, vremena obrta i vremena rada CPLEX/AMPL-a za proširen skup intervala i uvećanu vrednost vremena vožnje za 25% .	207
Tabela 5.20. Vrednosti funkcije cilja, vremena obrta i vremena rada CPLEX/AMPL-a za proširen skup intervala i uvećanu vrednost vremena vožnje za 50% .	209

1. UVOD

Fleksibilnost, dinamičnost i adaptibilnost osnovne su karakteristike savremenog grada koji se u vremenu i prostoru konstantno razvija i prilagođava intenzivnim potrebama i zahtevima savremenog društva.

Jedan od primarnih ciljeva razvoja gradova pogodnih za život je realizacija strategije razvoja efikasnih gradskih transportnih sistema, uz ograničeno korišćenje privatnih putničkih automobila i podsticanja upotrebe sistema javnog gradskog transporta putnika i drugih aktivnih vidova transporta – prvenstveno pešačenja. (Tica, 2016).

Zbog jake međusobne zavisnosti između transporta i gradova, jedan od osnovnih ciljeva gradskih transportnih sistema treba da bude prilagođavanje ovih sistema funkcijama savremenog grada kao višeg sistema.

Promene u gradskom transportnom sistemu, razvoj gradske infrastrukture, tehnike i tehnologije (posebno u pogledu razvoja savremenih vidova transporta) konstantno utiču na izmenu strukture gradova, a naročito u smislu njihovog prostornog širenja. S druge strane posmatrano, razvoj gradova utiče na sistem javnog gradskog transporta kroz ispostavljanje novih zahteva koje sistem treba da ispuni. Međusobna simbioza, izražena veza i interakcija između grada i sistema javnog gradskog transporta putnika zahteva konstantno prilagođavanja ovog sistema funkcijama savremenog grada kao višeg sistema.

U povratnoj vezi, sistem javnog gradskog transporta putnika svojim performansama, tehnologijom, kvalitetom, efektivnošću, efikasnošću i uticajem na okruženje predstavlja jedan od bitnih faktora koji utiču na lokaciju, razvoj, veličinu, strukturu i funkcionisanje savremenih gradova, njihovu ekonomiju i održivi razvoj (Tica i dr., 2016b).

Sistem javnog gradskog transporta putnika, predstavlja otvoren složen organizaciono-tehnološki transportni sistem, sa stohastičkom promenom stanja sa ciljem zadovoljenja transportnih potreba i transportnih zahteva njegovih korisnika, koji kao proizvod ima transportnu uslugu (Tica, 2016).

Ovakav sistem je jedan od najznačajnijih i najsloženijih podсистема grada i, prema svojoj strukturi i karakteru promena, zahteva strogo poštovanje i primenu metoda i procedura sistemskih nauka. Sistemska analiza transportnih sistema je široka tema sa mnoštvom elemenata, uključujući ljudsko ponašanje, konfiguraciju mreže, geografske

karakteristike sistema, eksterne uticaje na sistem (politika i ekonomija, na primer) i vrste vidova transporta koje su dostupne (Manheim, 1979). U poslednjoj deceniji procesi planiranja i upravljanja ovim složenim sistemom transporta putnika se menjaju i od cilja da se postigne maksimalna proizvodna i ekonomska efikasnost sistema, težište ovih procesa se usmerava na korisnike i na kvalitet pružene transportne usluge.

Sistem javnog gradskog transporta putnika predstavlja veoma složen sistem sa kompleksnom strukturom više tehnoloških i organizacionih podsistema sa višeslojnim vezama među njima, a koji zajedno, u interakciji ispunjavaju ispostavljene zahteve. Delovi sistema mogu istovremeno biti i podsistemi i elementi, što ukazuje na njihovu dvojnu prirodu – oni se mogu posmatrati kao samostalni sistemi, ali istovremeno i kao podsistemi višeg sistema. Ovo važi do nivoa elemenata sistema koji su najniži podsistemi u sistemu, na kojima se mogu meriti efekti celine sistema.

Osnovni element strukture sistema javnog gradskog transporta putnika i njegov najniži hijerarhijski nivo u upravljanju predstavlja linija javnog gradskog transporta putnika.

Ako liniju posmatramo kao sistem, sa aspekta funkcionisanja i upravljanja postoje dve grupe elemenata kojima se linija javnog gradskog transporta putnika može kvantitativno definisati u prostoru i vremenu:

- Statički elementi linije ili elementi strukture linije – predstavljaju elemente koji se ne menjaju u određenom dužem vremenskom periodu u normalnom režimu rada linije.
- Dinamički elementi linije ili elementi funkcionisanja linije – predstavljaju one elemente linije čijom se promenom u skladu sa transportnim zahtevima i projektovanim kvalitetom usluge vrši optimizacija funkcionisanja linije.

Poznavanje međusobne korelacije elemenata strukture i elemenata funkcionisanja linije kao sistema je ključni i ujedno polazni korak u procesu unapređenja funkcionisanja sistema kao celine, a sve u cilju postizanja željenog nivoa kvaliteta usluge koju sistem pruža korisnicima.

Funkcionisanje linije javnog gradskog transporta putnika podrazumeva operativnu realizaciju svih procesa, potprocesa i aktivnosti u skladu sa definisanom funkcijom cilja celine sistema, odnosno predstavlja proces promene stanja dela sistema tokom vremena,

koja nastaje kao posledica materijalnih, energetskih i informacionih razmena sa okolinom ili unutar delova sistema.

Linija funkcioniše u promenljivim uslovima u okruženju (uslovi puta, vremena i saobraćaja) i poremećajnim impulsima unutar sistema (tehnologija i kvalitet upravljanja, otkazi vozila, saobraćajne nezgode i dr.), tako da, osim kod podsistema sa izdvojenom trasom, najčešće dolazi do odstupanja u realizaciji vremena obrta. Ovi uslovi imaju za posledicu nestabilno i nepouzdanu funkcionisanje linije i sistema, što prouzrokuje i pad u kvalitetu transportne usluge, a naročito u pogledu ravnomernosti i tačnosti, kao jednih od najznačajnijih pokazatelja performansi funkcionisanja.

Sistemski pristup u analizi i projektovanju linije javnog gradskog transporta putnika pretpostavlja utvrđivanje uzajamnih veza između svih procesa, potprocesa i aktivnosti koji ga karakterišu, a sve u cilju proizvodnje transportne usluge određenog nivoa kvaliteta.

Vreme obrta, zajedno sa transportnim zahtevima, predstavlja bazni dinamički parametar linije i ulaznu veličinu za projektovanje reda vožnje, što ga istovremeno čini jednim od najvažnijih dinamičkih elementa rada linije javnog gradskog transporta putnika.

Redom vožnje se usklađuju ponuđeni transportni kapaciteti sa ispostavljenim transportnim zahtevima, tako da su bazne veličine za projektovanje reda vožnje istovremeno i ključni faktori koji utiču, s jedne strane, na kvalitet funkcionisanja i usluge, a sa druge strane, na proizvodnu i ekonomsku efektivnost i efikasnost, kao i na iskorišćenje resursa (vozila, zaposleni, finansije, energija i sl.) i uticaja na okolinu.

Vreme obrta na liniji predstavlja vremenski period između dva uzastopna polaska istog vozila sa određene karakteristične presečne tačke na liniji, obično sa stajališta ili terminusa linije. Obuhvata vreme potrebno da vozilo napravi jedan obrt na liniji, odnosno vreme koje se sastoji od vremena provedenog u vožnji, vremena zadržavanja vozila na stajalištima i vremena zadržavanja vozila na terminusima.

Vreme vožnje, koje je sastavni i najznačajniji činilac vremena obrta, predstavlja vremenski period u toku koga se vozilo kretalo između posmatranih stajališta na liniji, uključujući sve vremenske gubitke usled uslova saobraćajnog toka (vreme stajanja na semaforima, vremenski gubici usled zagušenja saobraćajnog toka i sl.).

Varijacija vremena obrta je osnovni uzrok poremećaja u funkcionisanju tj. odstupanja realizovanih od planiranih vrednosti dinamičkih elemenata linije javnog gradskog transporta putnika, što direktno implicira nepouzdanost rada sistema. Varijacija vremena obrta je samim tim i uzrok varijacije ukupnog vremena putovanja korisnika, kao jednog od osnovnih parametara kvaliteta transportne usluge.

Može se eksplicitno zaključiti da je optimizacija veličine vremena obrta jedan od ključnih faktora koji utiču na kvalitet usluge, kao i na proizvodnu i ekonomsku efektivnost linije, a samim tim i na celinu sistema.

Činjenica da su kod ovog podsistema elementi strukture i funkcionisanja unapred definisani i poznati, proces planiranja čini jednim od polaznih i najznačajnijih u nameri da se kreira usluga po meri korisnika koja istovremeno ispunjava zahteve za ekonomskom efikasnošću i efektivnošću, tj. u ostvarenju funkcije cilja sistema. Planiranje i projektovanje transportnog procesa u ovom slučaju podrazumeva tzv. operativno planiranje i projektovanje izvršenja transportnog procesa, odnosno funkcionisanja sistema.

Poznavanje varijacije vremena putovanja je veoma značajno i u procesu kreiranja redova vožnje za linije javnog gradskog transporta putnika, posebno zbog suprotstavljenih ciljeva, jer planeri pokušavaju da kroz kreiranje reda vožnje u isto vreme smanje operativne troškove, ali i povećaju tačnost i ravnomernost rada.

Imajući u vidu izuzetan značaj vremena obrta i njegove varijacije na funkcionisanje transportnog procesa i nameru da se istraže elementi koji utiču na njihove vrednosti, osnovna polazna hipoteza u doktorskoj disertaciji je da karakteristike trase linije i ostali statički elementi linije utiču na varijaciju i na ukupno vreme obrta na liniji. Takođe, s obzirom na osnovnu polaznu hipotezu, definisane su i dodatne hipoteze, koje pretpostavljaju da je navedene uticaje moguće identifikovati i kvantifikovati, te da je moguće definisati model za optimizaciju vremena obrta kao osnovne ulazne veličine za izradu reda vožnje.

Poseban akcenat u doktorskoj disertaciji biće stavljen na analizu elemenata trase i ostalih statičkih elemenata linije koji utiču na vreme vožnje na liniji javnog gradskog transporta putnika, kao i na kvantifikaciju uticaja svakog od tih elemenata posebno. Jedan od ciljeva doktorske disertacije je da se kroz detaljnu analizu uticaja elemenata trase i ostalih statičkih elemenata linije identifikuju elementi koji imaju najveći uticaj na

varijaciju i na ukupno vreme vožnje na liniji, kao i da se eksplicitno utvrdi nivo identifikovanog uticaja.

Drugi cilj doktorske je da se kroz definisanje novog modela za optimizaciju vremena obrta, u skladu sa prethodno argumentovanim uticajima, unapredi proces planiranja i na taj način deluje na kreiranje transportne usluge po meri korisnika. Podešavanje reda vožnje je jedna od najvažnijih preventivnih strategija u cilju obezbeđivanja pouzdanosti funkcionisanja linije, stoga kvalitetno planiranje veličine vremena obrta vozila, odnosno jasno utvrđivanje njene optimalne vrednosti nije samo pitanje pouzdanosti, već i efikasnosti funkcionisanja linije.

Dokazivanjem polaznih hipoteza i dostizanjem postavljenih ciljeva ove doktorske disertacije ostvario bi se određeni doprinos sa aspekta nauke i teorije, odnosno postigao bi se razvoj savremenih metoda i modela koji se bave optimizacijom veličine vremena obrta, jednog od ključnih dinamičkih elemenata koji utiču na proizvodnu i ekonomsku efikasnost i kvalitet funkcionisanja linije, a samim tim i celine sistema javnog gradskog transporta putnika.

Kako bi se ostvarili definisani ciljevi, doktorska disertacije je organizovana u tri celine. Prva celina daje opis sistema javnog gradskog transporta putnika i pregled dostupne relevantne literature koja obrađuje probleme povezane sa definisanim ciljevima. U okviru druge celine definisana je metodologija za utvrđivanje i kvantifikaciju faktora koji utiču na vreme vožnje, dok je treća celina posvećena definisanju modela za optimizaciju vremena obrta vozila na liniji javnog gradskog transporta.

Definisanje mesta sistema javnog gradskog transporta putnika kao jednog od najznačajnijih podsistema u gradovima prezentovano je u drugom poglavlju disertacije. Takođe, u okviru poglavlja je izvršena dekompozicija sistema i analiza mesta i funkcije linije kao osnovnog elementa sistema javnog gradskog transporta putnika.

U trećem poglavlju prezentuje se pre svega značaj pouzdanosti funkcionisanja sistema javnog masovnog transporta putnika sa aspekta ključnih aktera u sistemu – korisnika, organizatora transportne usluge (organa lokalne uprave) i prevoznika. Takođe, detaljno je analizirana literatura vezana za utvrđivanje faktora koji utiču na vreme vožnje. Pored pregleda utvrđenih faktora, u okviru poglavlja je dat i opis metoda korišćenih za utvrđivanje nivoa uticaja. Na kraju, najčešće korišćeni modeli u rešavanju

problema planiranja vremena obrta, odnosno usvajanja njegove optimalne vrednosti kao osnovne ulazne veličine u procesu planiranja funkcionisanja linije tj. definisanja reda vožnje na liniji, takođe su opisani u ovom poglavlju. Pored pregleda i opisa rezultata rada drugih autora, u ovom poglavlju dat je i kratak kritički osvrt na korišćene metode i prezentovane rezultate. Na taj način je izvršena opsežna analiza čiji je rezultat izdvajanje uočenih nedostataka i potencijalnih mogućnosti unapređenja postojećih modela i trenutne prakse, što predstavlja svojevrsan uvod za ostala poglavlja disertacije, shodno polaznim hipotezama.

U četvrtom poglavlju, koje predstavlja i posebnu celinu disertacije, kreiran je novi originalni model za utvrđivanje i kvantifikaciju faktora koji utiču na vreme vožnje. U okviru poglavlja prezentovana je metodologija korišćena za prikupljanje svih neophodnih podataka kako bi se mogla obaviti planirana analiza. Analiza je sprovedena na osnovu podataka prikupljenih iz sistema javnog masovnog transporta putnika u Beogradu i izlazni rezultati predstavljaju realnu sliku stanja u preseku vremena. Na kraju poglavlja prezentovani su rezultati sprovedene odabrane multivarijacione statističke analize izvršene korišćenjem specijalizovanog SPSS softvera, pomoću koje je razvijen model za identifikaciju statistički značajnih faktora koji utiču na odabrane karakteristike vremena vožnje kao zavisne promenljive.

Peto poglavlje posvećeno je prezentovanju modela za optimizaciju vremena obrta vozila na liniji javnog gradskog transporta putnika baziranog na operativnim troškovima, troškovima korisnika (putnika) i troškovima kvaliteta transportne usluge, a koji kao izlazni rezultat ima vrednost vremena obrta za koje se realizuju minimalni ukupni troškovi. U okviru poglavlja se uvodi i razmatra matematički model u formi mešovitog celobrojnog programiranja sa ciljnom funkcijom minimizacije ukupnih troškova linije. Pored toga, definiše se i algoritam procesa primene definisanog optimizacionog modela. U poslednjem delu poglavlja izvršena je primena i testiranje celokupnog procesa primene definisanog optimizacionog modela na odabranoj reprezentativnoj liniji sistema javnog masovnog transporta u Beogradu. U skladu sa matematičkim formulacijama modela, problem se rešava u okviru specijalizovanog softvera, a utvrđivanje optimalnih vrednosti funkcije cilja realizovano je korišćenjem specijalizovanog softvera za matematičko programiranje CPLEX/AMPL.

Zaključna razmatranja i mogućnosti za dalja istraživanja u cilju unapređenja su navedena u poglavlju šest. U okviru disertacije dat je i spisak referentne korišćene literature, kao i odgovarajući prilozi koji prate određene delove disertacije.

2. SISTEM JAVNOG GRADSKOG TRANSPORTA PUTNIKA

Sistem javnog gradskog transporta putnika (JGTP) predstavlja otvoren složen organizaciono-tehnološki transportni sistem, sa stohastičkom promenom stanja sa ciljem zadovoljenja transportnih potreba i transportnih zahteva njegovih korisnika, koji kao proizvod ima transportnu uslugu (Tica, 2016).

Svojim performansama, tehnologijom, kvalitetom, efektivnošću, efikasnošću i uticajem na okruženje predstavlja jedan od bitnih faktora koji utiču na lokaciju, razvoj, veličinu, strukturu i funkcionisanje savremenih gradova, njihovu ekonomiju i održivi razvoj (Tica i dr., 2016b).

Na složenost sistem javnog gradskog transporta putnika, koji je predmet izučavanja ove disertacije, i njegovu kompleksnu strukturu ukazuju njegove osnovne odrednice. Odrednica „sistem“ ukazuje na to da je reč o složenoj celini, sastavljenoj od delova, koja u rezultatu ima poseban kvalitet u odnosu na onaj koji imaju njegovi pojedinačni delovi. Sistem JGTP je „javni“, jer je dostupan za korišćenje svim stanovnicima grada pod jednakim uslovima. Sistem JGTP je „gradski“ jer obuhvata grad i šire gravitaciono područje grada (prigrad), na kome se javljaju stalni transportni zahtevi vezani za dnevni ciklus života i rada. Odrednica „transport“ definiše proces usmeren na aktivnosti obavljanja – „premeštanja/prenosa“ predmeta transporta sa svim pomoćnim potprocesima i vezama između njih, koji doprinose da se taj proces realizuje. I na kraju, predmet transporta u ovom sistemu su živa bića – ljudi, odnosno putnici.

Ovakav sistem je jedan od najznačajnijih i najsloženijih podsistema grada i zbog svoje strukture i karaktera promena zahteva primenu i strogo poštovanje metoda i procedura sistemskih nauka i teorije upravljanja.

2.1. Definisane mesta sistema

Razvoj sistema JGTP putnika kroz istoriju je u tesnoj vezi sa razvojem gradova. Kako kroz istoriju, tako i danas opšti porast standarda, izgradnja modernih puteva i razvoj tehnologije (posebno u pogledu razvoja transportnih sredstava i savremenih vidova transporta) konstantno utiču na izmenu strukture gradova, posebno u smislu njihovog prostornog širenja. S druge strane, razvoj gradova utiče na sistem javnog gradskog transporta kroz ispostavljanje novih zahteva koje sistem treba da ispuni. Jaka

međusobna veza između grada i sistema javnog gradskog transporta putnika ukazuje na potrebu prilagođavanja ovog sistema funkcijama savremenog grada kao višeg sistema.

Sistem javnog gradskog transporta predstavlja osnovni logistički podsistem grada koji obezbeđuje prisustvo njegovih korisnika, kao elemenata proizvodnih i drugih procesa, na mestu gde je to potrebno onda kada je to potrebno. Istovremeno predstavlja i privrednu delatnost koja angažuje velika sredstva uložena u resurse: vozila, zaposlene, objekte i opremu, energiju, finansije itd. (Tica, 2016).

Jedna od glavnih strategija razvoja savremenih gradova je koncept održivog razvoja (eng. *sustainable development, sustainability*). Prema opšte prihvaćenoj definiciji, održivi razvoj je razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjice ne dovodeći u pitanje sposobnost budućih generacija da zadovolje vlastite potrebe (*World Commission on Environment and Development, 1987*). Održivi razvoj predstavlja balans između potrošnje raspoloživih resursa i sposobnosti obnavljanja istih.

U skladu sa prethodnom definicijom, Black (2010) i Tica i dr. (2011) smatraju da je održivi sistem gradskog transporta sistem koji zadovoljava trenutne potrebe za transportom i mobilnošću ne utičući na sposobnost budućih generacija da zadovolje vlastite potrebe.

Vuchic (1999) smatra da sistem javnog gradskog transporta ima ključnu ulogu u procesu ostvarivanja koncepta održivog razvoja grada kroz značajan uticaj koji ima na sistem gradskog transporta. Još pre više od tri decenije je Banković (1984) istakao da posebna društvena briga za razvoj sistema mora biti izražena u dva pravca. Pored pitanja finansiranja budućeg razvoja, autor je istakao da sistem mora da zauzme daleko značajnije mesto u planiranju budućeg razvoja urbanih područja, kao jedna od egzistencijalnih funkcija, i to ne kao funkcija koja se posledično realizuje, već kao funkcija koja bitno utiče na osnovnu koncepciju budućeg razvoja urbanog područja.

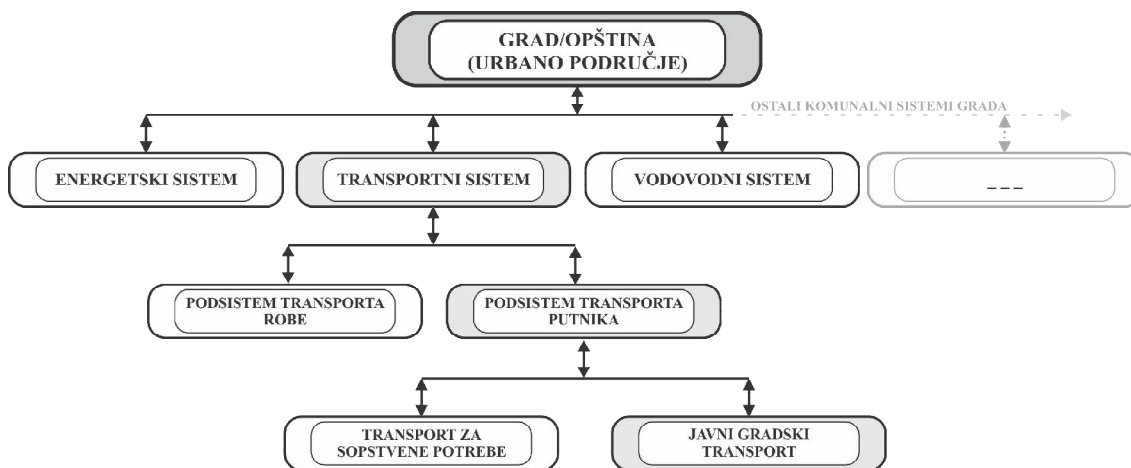
Da Silva i dr. (2008), koji su u cilju identifikacije ključnih faktora za razvoj koncepta održive mobilnosti u gradovima razvili i primenili model višekriterijumske analize, takođe smatraju da je unapređenje sistema javnog gradskog transporta putnika jedan od ključnih koraka u procesu ostvarivanja koncepta održivog razvoja mobilnosti u gradovima. Sa ovim su u potpunosti saglasni i stavovi Schiller i dr. (2010), koji smatraju da je sistem javnog transporta ključni pružalac usluge održive mobilnosti u gradovima.

Vreeker i Nijkamp (2005) izdvajaju set opštih ciljeva koje bi sistem javnog transporta trebalo da ostvari, istovremeno naglašavajući da su ciljevi suprotstavljeni i da se teško mogu usaglasiti:

- Ekonomska efikasnost – pre svega se ogleda u povećanju konkurentnosti regiona kroz poboljšanje povezanosti;
- Društvena jednakost – ogleda se u jednakim mogućnostima za bolji pristup sistemu (objektima transporta), za različite društveno-ekonomske grupe, kao i za ruralne oblasti;
- Ekološka održivost – ogleda se u većem naglasku na suočavanju sa negativnim eksternalnostima transportnog sektora, kao što su zagađenje, buka, degradacija pejzaža, zagušenje, smanjenje nivoa bezbednosti.

Na osnovu postavljenih ciljeva, Kennedy i dr. (2005) smatraju da se postizanje održivog sistema javnog gradskog transporta, što naravno utiče na unapređenje održivog razvoja i samog grada, ostvaruje kroz balans između ekonomije, društva i ekologije.

Na Slici 2.1 prezentovana je pozicija sistema javnog gradskog transporta u odnosu na više sisteme – grad i gradski transportni sistem. Slika je prilagođena na osnovu pristupa klasifikaciji koje u svojim knjigama daju Vuchic (1999) i Tica (2016).



Slika 2.1. Pozicija sistema javnog gradskog transporta putnika

Podsystem transporta putnika je deo transportnog sistema grada koji čine dva hijerarhijski posmatrano niža podsistema:

- Transport za sopstvene potrebe, koji se naziva i privatni transport, čine individualni korisnici bicikala, motocikala i automobila, kao i pešaci, koji svoje potrebe za kretanjem realizuju potpuno nezavisno, tj. samostalno planiraju,

organizuju i realizuju svoje putovanje (polaznu tačku, trasu, ciljnu tačku, vreme polaska...). Poseban deo transporta za sopstvene potrebe predstavlja zajednički transport, koji se prema svojim karakteristikama može svrstati i u privatni i u javni, a može se posmatrati i potpuno nezavisno od dva navedena podsistema. U okviru ilustrovane klasifikacije, zajednički transport je svrstan u transport za sopstvene potrebe. Najzastupljeniji vidovi transporta u okviru ovog dela su zajednički privatni automobil (eng. *carpool*) i zajednički privatni kombi (eng. *vanpool*). Osnovna osobina ovog vida transporta je udruživanje dve ili više osoba u cilju zajedničkog korišćenja jednog transportnog sredstva za realizaciju potreba za mobilnošću. Procesi planiranja i organizacije transporta kod ovog podsistema su posledica zajedničkog dogovora osoba koje se udružuju.

- Javni gradski transport je sistem transporta putnika koji svojim korisnicima pruža transportnu uslugu prema unapred definisanim i korisnicima poznatim uslovima. Unapred definisani uslovi podrazumevaju postojanje organa koji se bavi planiranjem, organizacijom i upravljanjem kvalitetom funkcionisanja sistema. Samim tim, ovaj podsistem gradskog transporta putnika je najsloženiji i podrazumeva aktivno učešće organa lokalne uprave (grada/opštine) na strateškim, a delom i na taktičkim nivoima planiranja, organizacije i upravljanja.

Iz svega iznesenog može se uvideti pozicija sistema javnog gradskog transporta u odnosu na okruženje i u odnosu na viši sistem u okviru kog funkcioniše (urbano područje). Jasno je da je sistem javnog gradskog transporta jedan od najznačajnijih i najsloženijih podsistema grada, podsistem koji predstavlja najvažniji servis mobilnosti građana urbanog područja i čijim se unapređenjem i razvojem postiže održivi razvoj grada i poboljšava nivo kvaliteta života njegovih građana (Tica, 2016).

U tom smislu podsistem javnog gradskog transporta putnika mora da uskladi svoje ciljeve sa ciljevima grada kao hijerarhijski višeg sistema. U većini slučajeva, sistem javnog gradskog transporta putnika mora zadovoljavati širi spektar opštih ciljeva i zahteva hijerarhijski viših sistema i zahteva ključnih aktera, od kojih su najznačajniji (adaptirano prema Tica i dr. 2013a):

- da sistem u posmatranom periodu vremena obezbedi proizvodnju i realizaciju zahtevanog obima i kvaliteta transportne usluge, a posebno u područjima gde je koncentracija aktivnosti najveća;

- da bude integrisan u gradski transportni sistem koji je projektovan i funkcioniše tako da svaki od podsistema u sinergiji sa ostalim daje doprinos maksimalnoj efikasnosti i kvalitetu celine sistema;
- da sistem bude komforan i pristupačan u prostoru i vremenu, odnosno da obezbeđuje uslugu svim područjima u kojima postoji potreba za transportom;
- da sistem pouzdano, kvalitetno i efikasno funkcioniše u prostoru i vremenu;
- da sistem bude dostupan za korišćenje svim građanima;
- da sistem bude vidovno izbalansiran u cilju racionalnog korišćenja resursa i postizanja maksimalne efikasnosti i efektivnosti;
- da sistem obezbedi objekte i usluge koji su efikasno ugrađeni u urbanu sredinu;
- da sistem stimuliše željeni urbani razvoj i formu grada;
- da sistem ima male negativne ekološke prpratne efekte;
- da sistem bude bezbedan i siguran za korišćenje;
- da sistem bude adaptivan u smislu stalnog prilagođavanja zahtevima i ciljevima viših sistema i ključnih aktera u sistemu.

Sistem javnog gradskog transporta putnika sastoji se od više međusobno povezanih delova (podsistema i elemenata) sa složenim vezama između njih, a koji zajedno u interakciji ispunjavaju ispostavljene zahteve. Delovi sistema mogu istovremeno biti i podsistemi i elementi, što ukazuje na njihovu dvojnu prirodu – oni se mogu posmatrati kao samostalni sistem, ali istovremeno i kao podsistemi višeg sistema. Ovo važi do nivoa elemenata sistema koji su najniži podsistemi u sistemu, na kojima se mogu meriti efekti celine sistema.

Pored ciljeva i strukture, jedna od osnovnih karakteristika organizaciono-tehnoloških sistema, pa i sistema javnog gradskog transporta putnika, jeste funkcionisanje (jer sistem koji ne funkcioniše nije sistem), koje predstavlja realizaciju svih procesa, odnosno aktivnosti koje su uslov za ostvarivanje definisane funkcije cilja.

Pored karakteristika da ima funkciju cilja, strukturu i funkcionisanje, značajna su i ostala svojstva sistema javnog gradskog transporta putnika, kao što su (Tica, 2011):

- Sinergetsko svojstvo sistema, koje znači da su efekti na nivou sistema javnog gradskog transporta putnika (obim i kvalitet usluge, utrošak resursa, troškovi) veći od prostog zbira efekata njenih podsistema;

- Svojstvo integralnosti sistema, koje podrazumeva da se svaki deo sistema javnog gradskog transporta putnika mora uklopiti u celinu sistema, što znači da ciljevi podsistema moraju biti uklopljeni u ciljeve višeg sistema. Prema tome, svoje ciljne funkcije kao sistemi za sebe podsistemi u sistemu javnog gradskog transporta putnika moraju formulisati uzimajući u obzir ciljeve celine. Na taj način ciljevi i ciljna funkcija celine sistema ulaze kao zadatak (zahtev višeg sistema) u formulisanje cilja nižih sistema.
- Svojstvo dinamičnosti, koje podrazumeva da sistem i njegovi delovi moraju biti tako projektovani da omogućavaju promene.
- Svojstvo otvorenosti prema okruženju, ali i unutar sistema.

Složenost jednog sistema se ogleda pre svega u broju elemenata (podsistema) koji ga čine i njihovih međusobnih odnosa. Kako je predmet istraživanja u okviru disertacije upravo sistem javnog gradskog transporta putnika, dekompozicija sistema i opis osnovnih elemenata prezentovani su posebno u narednom odeljku.

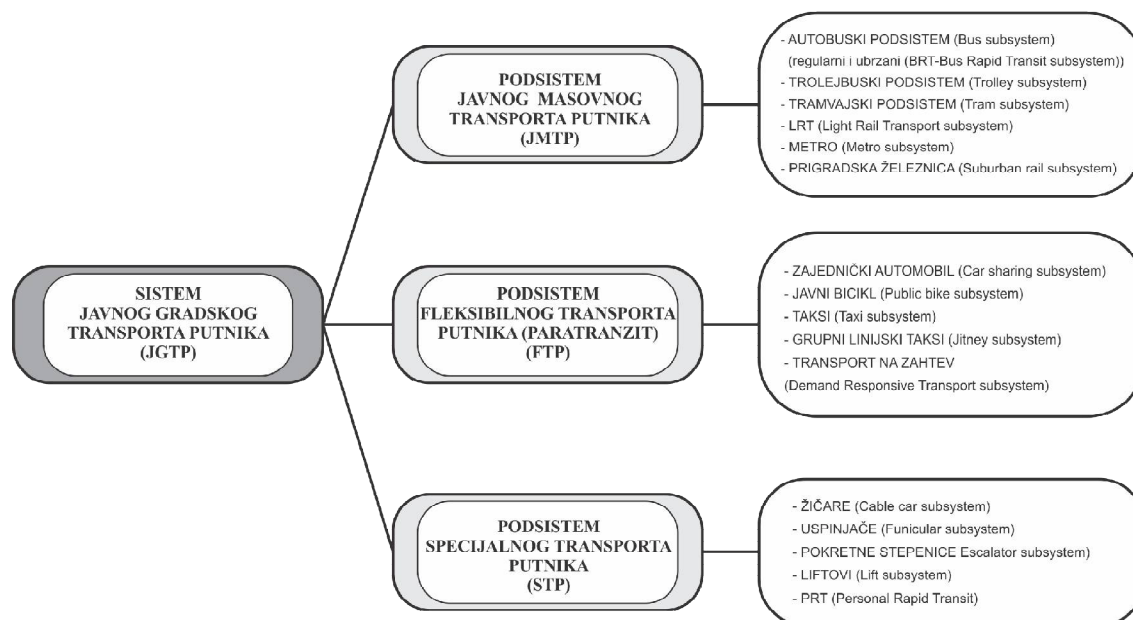
2.2. Dekompozicija sistema i uloga podsistema javnog masovnog transporta

Sistem javnog gradskog transporta putnika, kao što pokazuju njegove osnovne odrednice, predstavlja veoma složen sistem sa složenom strukturom više tehnoloških, organizacionih i svojinskih podsistema. Dekompoziciju, odnosno klasifikaciju elemenata (podsistema) koji čine ovako složen sistem moguće je izvršiti po više osnova:

- prema *tehničkim karakteristikama* – ovde se pre svega misli na mehaničke karakteristike vozila i trase (oslanjanje, pogon, vođenje i kontrola);
- prema *tehnologiji pružanja usluge* – što podrazumeva da se elementi klasifikuju prema režimu stajanja na stajalištima, prema intenzitetu transportnih zahteva, vremenu rada i sl.;
- prema *stepenu nezavisnosti trase i nivou prioriteta* – u ovom slučaju se klasifikacija podsistema javnog gradskog transporta vrši prema karakteristikama strukture u pogledu tipa trase koju koristi i prema prioritetima koje vozila imaju na ukrštanjima sa ostalim vidovima transporta;
- prema *sistemskim karakteristikama* – klasifikacija delimično objedinjuje prethodno navedena tri osnova za klasifikaciju i reprezentuje osnovne attribute i karakteristike podsistema;

- prema *području opsluge* – ovde se pre svega misli na karakteristike urbanog područja koje sistem javnog transporta opslužuje (najčešća podela je na gradski i prigradski podsistem).

U nastavku poglavlja prezentovana je klasifikacija sistema javnog gradskog transporta putnika prema sistemskim karakteristikama. Prezentovana slika dekompozicije sistema i opis podsistema je delimično prilagođena u odnosu na klasifikaciju prezentovanu u Tica (2016). Sistem javnog gradskog transporta u odnosu na osnovne sistemske karakteristike može se podeliti, kao što je prikazano na Slici 2.2, na: podsisteme javnog masovnog transporta putnika (JMTP), podsisteme fleksibilnog transporta putnika – paratranzit (FTP) i specijalne vidove transporta putnika (STP).



Slika 2.2. Klasifikacija sistema javnog gradskog transporta u odnosu na osnovne sistemske karakteristike (adaptirano na osnovu Tica, 2016)

Javni masovni transport putnika (JMTP) predstavlja podsistem javnog gradskog transporta putnika dostupan u prostoru i vremenu kao javna usluga, u kome se transport putnika obavlja po unapred definisanim i poznatim elementima strukture i funkcionisanja (fiksni trasama kretanja vozila – linijama, redovima vožnje i unapred definisanim cenama transportne usluge).

Fleksibilni transport putnika ili paratranzit (FTP) predstavlja podsistem javnog transporta putnika dostupan u prostoru i vremenu kao javna ili polujavna usluga za sve korisnike (ili grupe korisnika) koji prihvataju uslove iz međusobnog ugovora, koju obezbeđuje operator (prevoznik) u cilju zadovoljenja različitog stepena individualnih

transportnih potreba korisnika. Podsystem fleksibilnog transporta putnika najčešće nema fiksne trase linija i redove vožnje. Ovaj podsystem se po svom konceptu funkcionisanja nalazi negde između putničkog automobila i konvencionalnog linijskog autobusnog podsystema. Korisnicima sistema pruža najfleksibilniju uslugu u smislu trasa kretanja vozila, vremena obavljanja usluge, izbora vozila, izbora operatora, tarife, načina korišćenja itd.

Specijalni transport putnika (STP) predstavlja podsystem transporta putnika dostupan korisnicima u prostoru i vremenu kao javna usluga, u kome se transport putnika realizuje na fiksnim trasama po kojima se kreću vozila, kabine ili beskonačne trake po unapred definisanim i korisnicima poznatim uslovima. Funkcionisanje ovog podsystema se najčešće obavlja potpuno automatski, što podrazumeva automatizaciju procesa kretanja vozila/kabine/trake, zaustavljanja, otvaranja i zatvaranja vrata, naplate, informisanja, kontrole skretnica, signalizacije. Ove vidove transporta uglavnom prate savremene tehničke i tehnološke inovacije, a posledica toga je velika popularnost kod korisnika, posebno izražena prilikom njihove implementacije (Živanović i dr., 2017).

Izbalansiran gradski transportni sistem je integrisan i projektovan tako da svaki od navedenih podsystema u sinergiji sa ostalim daje doprinos maksimalnoj efikasnosti i kvalitetu celine sistema. Različiti podsystemi su koordinirani tako da korisnici lako mogu obavljati putovanja kombinujući više vidova transporta, ali pri tom svaki od vidova obavlja ulogu koja mu fizički i operativno najviše odgovara (Tica i dr., 2012b).

Predmet proučavanja i dalje analize u okviru disertacije je sistem javnog masovnog transporta putnika (JMTP). Na linijama javnog masovnog transporta putnika većinu korisnika predstavljaju dnevni migranti, tako da je ovaj sistem masovan pre svega zbog intenziteta transportnih zahteva (broja putnika) koje opslužuje, što ga samim tim čini i najznačajnijim podsystemom gradskog transportnog sistema. U literaturi se ovaj sistem često koristi kao sinonim za transport putnika vozilima velikog kapaciteta.

Može se reći da transportnu uslugu koju pruža sistem javnog masovnog transporta u jednom gradu koristi najveći broj njegovih stanovnika. U poslednjoj deceniji procesi planiranja i upravljanja ovim složenim podsystemom transporta putnika se menjaju, i od cilja da se postigne maksimalna proizvodna i ekonomska efikasnost sistema, težište ovih proseca se usmerava na korisnike i na kvalitet pružene usluge.

U tom smislu, zadovoljenje stvarnih potreba i zahteva korisnika je, s jedne strane, sredstvo da se postigne zadovoljstvo korisnika i upravlja transportnim zahtevima u smislu povećanja obima, a sa druge strane, dovodi do kontinuiranog reinženjeringa strukture i funkcionisanja, što ima za posledicu poboljšanje efikasnosti i efektivnosti sistema javnog masovnog transporta putnika.

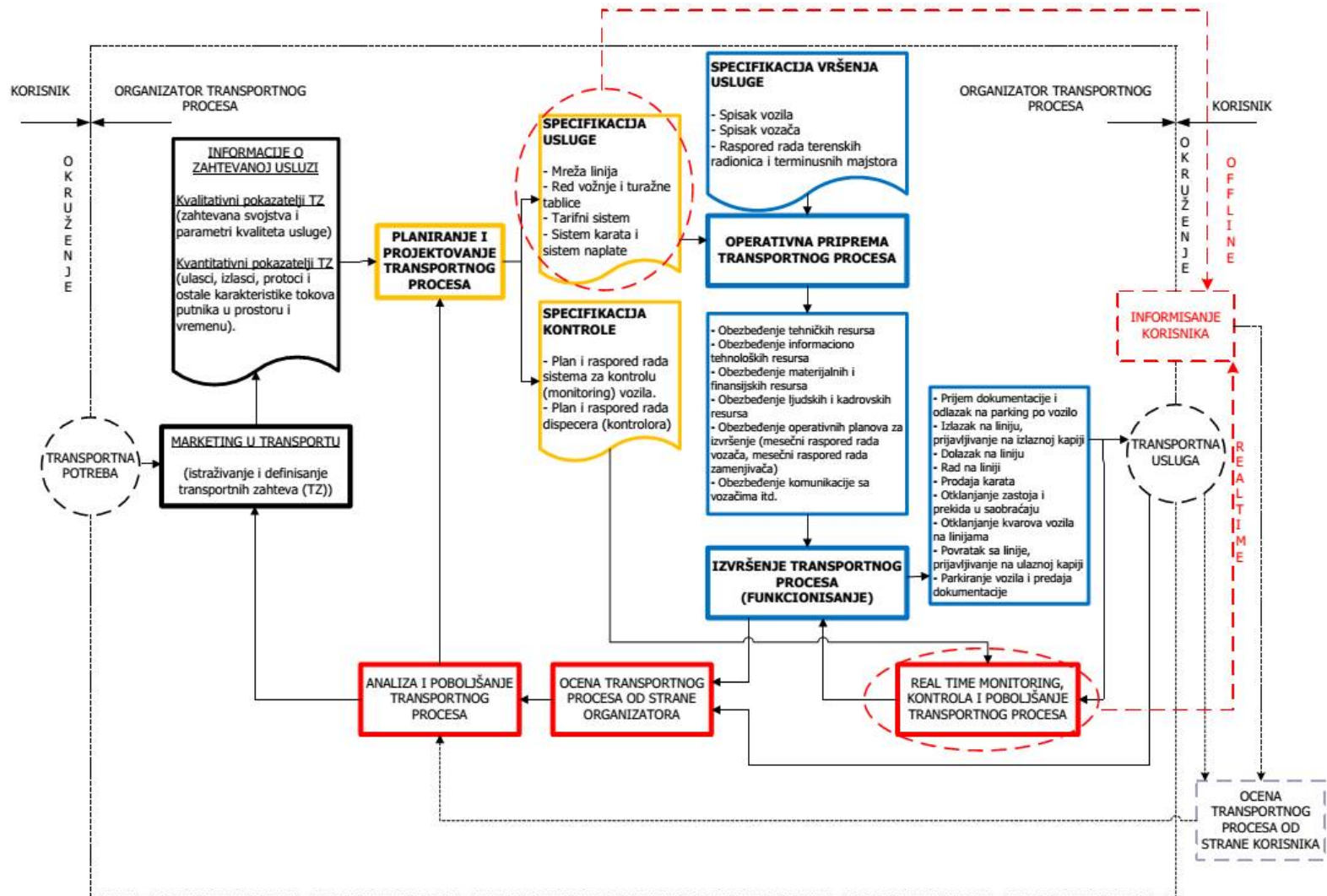
Imajući u vidu prethodno, funkciju cilja sistema možemo opisati kao nameru da se obezbedi maksimalna proizvodna i ekonomska efikasnost i efektivnost sistema, usklađenost obima transportnih kapaciteta sa transportnim zahtevima uz povećanje nivoa kvaliteta pružene usluge. Ovako opisana funkcija cilja u sebi sadrži delimično suprotstavljene zahteve koje je neophodno uskladiti odnosno izbalansirati.

Činjenica da su kod ovog podsistema elementi strukture i funkcionisanja unapred definisani i poznati, proces planiranja čini jednim od polaznih i najznačajnijih u nameri da se kreira usluga po meri korisnika koja istovremeno ispunjava zahteve za ekonomskom efikasnošću i efektivnošću, tj. u ostvarenju funkcije cilja sistema.

Planiranje i projektovanje transportnog procesa u ovom slučaju podrazumeva tzv. operativno planiranje i projektovanje izvršenja transportnog procesa, odnosno funkcionisanja sistema. Pretpostavlja se da je unapred izvršena optimizacija na strateškom nivou (definisani ciljevi i zahtevi metasistema prema podsistemu JMTP, definisan pravni okvir, politika, organizacija sistema, definisano područje opsluge, korisnici itd.), kao i da je izvršeno poslovno planiranje i projektovanje strukture i funkcionisanja transportno-poslovnog sistema.

Posledica izvršavanja svih aktivnosti u okviru transportnog procesa, kao i interakcije između njih, jeste proizvodnja transportne usluge određenog nivoa kvaliteta, odnosno osnovni cilj funkcionisanja transportnog procesa predstavlja kvalitetno isporučivanje transportne usluge. Da bi se ostvario jedan od navedenih strateških ciljeva, neophodno je razviti model koji će omogućiti da se organizacija i upravljanje osnovnim transportnim procesom sprovede na optimalan način.

Na dijagramu transportnog procesa (Slika 2.3) prezentovani su osnovni potproces i aktivnosti koje kao rezultat daju transportnu uslugu, odnosno potproces i aktivnosti koji su delom predmet izučavanja u okviru disertacije. Na slici je, kao primer, prikazan transportni proces sistema javnog masovnog transporta u Beogradu.



Slika 2.3. Transportni proces u sistemu javnog masovnog transporta putnika u Beogradu

Sa slike se vidi da su osnovni potprocesi u okviru transportnog procesa u sistemu javnog masovnog transporta putnika veoma složeni u strukturi i da svaki od njih, uslovno rečeno, predstavlja složen proces sam za sebe. Funkcija i aktivnosti koje se realizuju u svakom od potprocesa su: marketing u transportu, planiranje i projektovanje transportnog procesa, operativna priprema transportnog procesa, izvršenje transportnog procesa (funkcionisanje) i ocena i analiza transportnog procesa.

Marketing u transportu – jedan od najznačajnijih zadataka marketinga u transportnom procesu predstavlja upotreba savremenih metoda transportnog inženjeringa u cilju utvrđivanje potreba i zahteva za uslugom, kao i karakteristika konkurenata na tržištu. Izlaz iz potprocesa marketinga je sažeta informacija o zahtevanoj usluzi, koja treba da obuhvati rezultate i analizu istraživanja potreba i zahteva korisnika i potencijalnih korisnika za uslugom, odnosno sažeta informacija o kvantitativnim i kvalitativnim pokazateljima transportnih zahteva. Kvantitativni pokazatelji transportnih zahteva su merodavne vrednosti ulazaka, izlazaka i protoka putnika, kao i ostale karakteristike tokova putnika u prostoru i vremenu. Za utvrđivanje kvalitativnih pokazatelja transportnih zahteva neophodno je izvršiti istraživanje zahtevanih svojstava i parametara kvaliteta usluge, kao i njihovo rangiranje po značajnosti sa aspekta različitih kategorija korisnika. Najznačajniji rezultat procesa marketinga su definisani transportni zahtevi po obimu i kvalitetu, parametri kvaliteta usluge, po kategorijama korisnika i potencijalnih korisnika, merodavni za proračun potrebnih kapaciteta za neposredno izvršenje transportnog procesa.

U svom radu Živanović i dr. (2017) istraživali su stavove potencijalnih korisnika specijalnih vidova transporta u okviru sistema javnog transporta. Definisano metodologijom istraživanja potencijalni korisnici su podeljeni u tri karakteristične grupe: stanovnici grada, domaći turisti i inostrani turisti. Rezultati sprovedenih istraživanja pokazali su da su potencijalni korisnici veoma afirmativni u pogledu implementacije i razvoja sistema žičara u okviru sistema javnog gradskog transporta u Beogradu. Glavni razlozi koje su potencijalni korisnici naveli za korišćenje sistema žičara su kraće veze između delova grada i jedinstveno iskustvo vožnje. Takođe, na osnovu istraživanja se može zaključiti da je broj potencijalnih korisnika žičara generalno irelevantan u odnosu na cenu jedne vožnje, odnosno autori su zaključili da su

svi korisnici spremni da uslugu ovog vida transporta plate dva ili čak tri puta više nego za jednu vožnju drugim vidovima javnog transporta.

U okviru rada (Živanović i dr., 2017) izvršena je dodatna analiza rezultata sprovedenih istraživanja kroz poređenje grupa korisnika u cilju utvrđivanja statističke značajnosti pomoću hi-kvadrat testa nezavisnosti. Nultom hipotezom autori pretpostavljaju da su rezultati istraživanja nezavisni u odnosu na definisane grupe korisnika. Za sve testirane hipoteze usvojen je nivo značajnosti $\alpha = 0,01$. Rezultati izvršene analize statističke značajnosti prezentovani su u narednoj tabeli.

Tabela 2.1. Rezultati utvrđivanja statističke značajnosti pomoći hi-kvadrat testa nezavisnosti

Karakteristike	χ^2	Stepeni slobode	Rezultat
Struktura ispitanika prema godinama starosti	150,40	10	Nulta hipoteza se odbacuje
Struktura ispitanika prema zanimanju	288,68	10	Nulta hipoteza se odbacuje
Struktura ispitanika prema dužini posete Beogradu	330,28	4	Nulta hipoteza se odbacuje
Struktura prema spremnosti ispitanika da koriste žičare kao vid transporta	40,21	2	Nulta hipoteza se odbacuje
Struktura prema motivu ispitanika da koriste žičare kao vid transporta	78,34	6	Nulta hipoteza se odbacuje
Struktura ispitanika prema ceni koju su spremni da plate za jednu vožnju	4,18	2	Nulta hipoteza se prihvata
Struktura ispitanika prema mišljenju o uticaju razvoja žičara na turističku ponudu grada	2,62	2	Nulta hipoteza se prihvata

Sprovedeni hi-kvadrat test pokazao je da su strukture ispitanika prema godinama starosti i zanimanju značajno drugačije kod svake od definisanih grupa. Iz tog razloga se hipoteza nezavisnosti, za ove karakteristike ispitanika, odbacuje.

Pored toga što se kod svake grupe potencijalnih korisnika veoma veliki broj ispitanika izjasnio o spremnost da koriste žičare kao vid transporta, ne može se zaključiti da je postojanje spremnosti nezavisno u odnosu na grupe korisnika. U ovom slučaju postavljena nulta hipoteza se takođe odbacuje, identično kao i kod strukture korisnika prema motivu da koriste žičare kao vid transporta. Navedeni rezultati sprovedenog hi-kvadrat testa otvaraju pitanje mogućnosti predviđanja karakteristika transportnih zahteva buduće mreže samo na osnovu sprovedenih istraživanja.

Struktura ispitanika prema ceni koju su spremni da plate za jednu vožnju je nezavisna u odnosu na grupe korisnika, odnosno nulta hipoteza se za ovu karakteristiku usvaja. Većina ispitanika bi prihvatila istu ili čak i veću cenu u odnosu na cenu javnog

masovnog transporta putnika. Ova informacija je veoma značajna za proces definisanja tarifne politike i utvrđivanje visine cena transportne usluge ovog vida transporta. Takođe, struktura ispitanika prema mišljenju o uticaju razvoja sistema žičara na unapređenje turističke ponude grada je konzistentna i nezavisna, odnosno postavljena nulta hipoteza se može prihvatiti.

Rezultati sprovedenih analiza su značajne kao izlaz iz potprocesa marketinga u transportu i predstavljaju jedan od ulaza za potproces planiranja i projektovanja transportnog procesa.

Planiranje i projektovanje transportnog procesa – Potproces planiranja i projektovanja usluge obuhvata aktivnosti usmerene na pretvaranje sažetih informacija o zahtevanoj usluzi u projektovanu uslugu. Informacije o usluzi moraju da budu kompletne, nedvosmislene, definisane i evidentirane tako da moraju da obuhvate identifikovane zahteve korisnika i sve druge zahteve koji su od suštinskog značaja za planiranje i projektovanje transportnog procesa. Cilj ovog potprocesa je usaglašavanje zahtevane i projektovane usluge. Izlaz iz potprocesa planiranja i projektovanja su: specifikacija usluge i specifikacija kontrole.

Specifikacija izvršenja usluge je takođe izlaz iz potprocesa planiranja, ali na nivou operatora. Svaki operator planira način izvršenja postavljenih zahteva na osnovu definisane specifikacije usluge koja je treba da se pruži.

U sistemu javnog masovnog transporta putnika sadržaj pojedinih specifikacija je:

- specifikacija usluge: mreža linija, redovi vožnje, tarifni sistem, sistem naplate i sistem karata, plan potrebnog broja vozila i saobraćajnog osoblja, plan mesta za prodaju karata itd.;
- specifikacija kontrole: plan i raspored rada sistema za monitoring i kontrolu kretanja vozila, plan i raspored rada dispečera (kontrolora);
- specifikacija vršenja usluge: spisak vozila, spisak vozača, raspored rada smena saobraćajnog osoblja, raspored rada tehničkog opsluživanja vozila itd.

Operativna priprema transportnog procesa – U operativnu pripremu transportnog procesa spadaju svi potproces i aktivnosti čiji je cilj obezbeđenje uslova da se obavi konkretan transportni zadatak, odnosno da se obezbedi vozilo spremno za rad (sa aspekta tehničkog stanja (ispravnosti) i administrativnih uslova (registracija, osiguranje itd.) sa spremnom posadom vozila (vozač) i odgovarajućim materijalnim i finansijskim

resursima. Izlazni rezultat svih potprocesa i aktivnosti operativne pripreme transportnog procesa je vozilo sa odgovarajućom posadom i organizovanom logističkom podrškom spremno da izvrši konkretan transportni zadatak.

Izvršenje transportnog procesa (funkcionisanje) – Proces vršenja usluge podrazumeva realizaciju transportnog procesa saglasno planiranoj, projektovanoj i pripremljenoj usluzi. Obuhvata operacije prijema dokumentacije neophodne za funkcionisanje, izlaska vozila na liniju, izmene putnika na stajalištima, prevoza putnika između stajališta, prodaje karata i naplate transportne usluge, kontrole, povratka sa linije u autobazu.

Paralelno sa potprocesom funkcionisanja obavlja se još jedan potproces, koji je od ključnog značaja za konačni izlazni rezultat (pruženu transportnu uslugu), potproces upravljanja, kontrole i poboljšanja transportnog procesa u realnom vremenu. Nadležnosti u ovom potprocesu su podeljene između organa lokalne uprave i operatora (prevoznika). Ovaj potproces obuhvata upravljanje i regulisanje kretanja vozila na mreži linija, kao i saobraćajnog osoblja, otklanjanje zastoja, prekida u funkcionisanju i slično. Izlazni rezultat potprocesa funkcionisanja predstavlja istovremeno i izlaz iz transportnog procesa, odnosno izlaz je transportna usluga određenog obima i kvaliteta. Proizvedena transportna usluga može se opisati i tzv. transportnim učincima (transportovani putnici, izvršen transportni rad, iskorišćenje resursa), realizovanim kvalitetom usluge, troškovima i prihodom.

Ocena i analiza transportnog procesa – Ocena transportnog procesa od strane organizatora transportnog procesa i korisnika usluge, kao i analiza i poboljšanje transportnog procesa predstavlja procedure sistemski zasnovanog i sistematski vođenog postupka prikupljanja, obrade, izdvajanja, prikazivanja i analize izdvojenih podataka i oblikovanje podloga za utvrđivanje uzroka odstupanja od zahtevanih parametara kvaliteta usluge. U ukupnu transportnu ponudu koju sistem pruža korisnicima spada i informisanje korisnika. Informacije koje se pružaju korisnicima mogu se podeliti u dve grupe: *off line* i *real time* informacije.

Opisani procesi složenog sistema, kao što je sistem javnog masovnog transporta putnika, realizuju se i na njegovom najnižem upravljačkom hijerarhijskom nivou, odnosno osnovnom elementu sistema – jednoj liniji javnog masovnog transporta. Upoznavanje za procesima na nivou jedne linije, kao sistema za sebe i istovremeno

osnovnog elementa celine sistema, značajno je lakši zadatak od analize složenog sistema u celini. Dva su osnovna procesa u sistemu javnog masovnog transporta predmet interesovanja u ovoj doktorskoj disertaciji. Jedan od akcenata disertacije je definisanje i analiza faktora koji delom utiču na proces funkcionisanja, a samim tim i na izlazni rezultat procesa odnosno kvalitet pružene transportne usluge. Drugi deo se odnosi na proces planiranja i projektovanja transportne usluge sa posebnim akcentom na optimizaciju veličine planiranog vremena obrta vozila, kao jednog od najvažnijih ulaznih elemenata za kreiranje redova vožnje linija javnog masovnog transporta putnika. Redovi vožnje su izlaz iz potprocesa planiranja i projektovanja i najznačajniji su deo specifikacije usluge.

Imajući u vidu da se navedeni procesi analiziraju na nivou linije javnog masovnog transporta, u sledećem odeljku izvršena je analiza linije kao osnovnog dela celine sistema, ali i kao sistema za sebe, i definisane su njene potpune i detaljne karakteristike.

2.3. Analiza linije kao osnovnog elementa sistema javnog masovnog transporta

Osnovni element strukture i funkcionisanja sistema javnog masovnog transporta putnika i njegov najniži hijerarhijski nivo u upravljanju predstavlja linija (Slika 2.4).



Slika 2.4. Mesto linije u sistemu javnog masovnog transporta putnika i hijerarhija upravljanja

Linija predstavlja deo transportne mreže sistema na kojoj se proces transporta putnika obavlja po unapred određenim i korisnicima poznatim uslovima. Kako je

integralnost jedna od osnovnih karakteristika sistema, sledi da je linija javnog masovnog transporta integrisana u celinu sistema i da su njeni ciljevi uklopljeni u ciljeve višeg sistema. Prema tome, ciljna funkcija linije kao sistema za sebe formulisana je uzimajući u obzir ciljeve celine sistema javnog masovnog transporta putnika.

Ako liniju posmatramo kao sistem, sa aspekta funkcionisanja i upravljanja postoje dve grupe elemenata kojima se linija javnog masovnog transporta putnika može kvantitativno definisati u prostoru i vremenu:

- **Statički elementi linije ili elementi strukture linije** predstavljaju elemente koji se ne menjaju u određenom dužem vremenskom periodu u regularnom režimu rada linije.
- **Dinamički elementi linije ili elementi funkcionisanja linije** predstavljaju one elemente linije čijom se promenom u skladu sa transportnim zahtevima i projektovanim kvalitetom usluge vrši optimizacija funkcionisanja linije.

U cilju utvrđivanja potpunih i detaljnih karakteristika linije javnog masovnog transporta putnika, pored poznavanja elemenata strukture i funkcionisanja, odnosno karakteristika linije u prostoru i vremenu, neophodno je utvrditi i karakteristike tokova putnika na liniji, odnosno karakteristike transportnih zahteva.

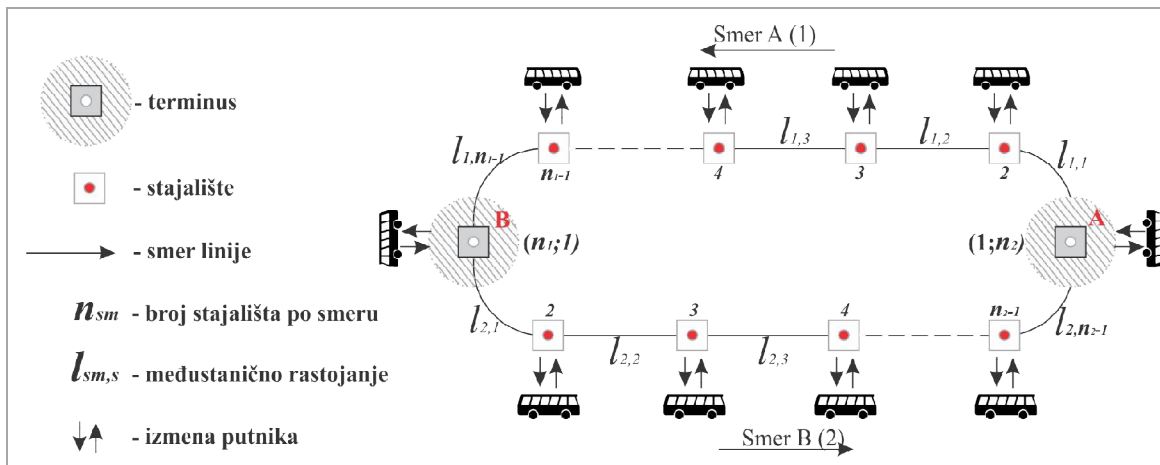
Poznavanje međusobne korelacije elemenata strukture i elemenata funkcionisanja linije, zajedno sa analizom karakteristika transportnih zahteva, polazni je korak u procesu unapređenja strukture i funkcionisanja sistema kao celine, a sve u cilju postizanja željenog nivo kvaliteta transportne usluge koju sistem pruža korisnicima.

U nastavku poglavlja izvršena je sistematizacija elemenata strukture, elemenata funkcionisanja linije i osnovnih karakteristike transportnih zahteva na liniji i prezentovani su modeli za njihovo izračunavanje.

2.3.1. Statički elementi linije

Kao što je već navedeno, statički elementi predstavljaju elemente strukture koji liniju javnog masovnog transporta definišu u prostoru. Jednom definisani elementi strukture se ne menjaju u jednom određenom, dužem vremenskom periodu u regularnom režimu rada, a utvrđuju se prilikom izrade tehnološkog projekta linije. Daljinar linije je dokument kojim se, na jednom mestu, definišu svi elementi strukture linije. Osnovne elemente strukture linije čine: broj i naziv linije, trasa, terminusi, smer i stajališta. Ostali

elementi se mogu smatrati izvedenim elementima strukture: međustanična rastojanja i dužina linije. Jednom definisani statički elementi linije kreiraju identitet linije i obezbeđuju vizuelno povezivanje korisnika sa linijom JMTP. Na šematskom prikazu linije (Slika 2.5) prezentovani su osnovni statički elementi linije.



Slika 2.5. Šematski prikaz linije JMTP

Trasa linije

Trasa linije se može opisati kao unapred definisana putanja kretanja vozila između dva terminusa. Sastoji se od određenih gradskih ulica, prigradskih saobraćajnica, podzemnih deonica (tuneli) ili nadzemnih deonica (vijadukti). Svi navedeni delovi gradske transportne mreže u slučaju javnog masovnog transporta putnika, koji je često sinonim za transport putnika vozilima velikog kapaciteta, moraju u pogledu konstrukcije i tehničkih elemenata (usponi, radijusi krivina, profili i dr.) da zadovolje uslove kretanja planiranih tipova vozila. Trasa linije javnog masovnog transporta putnika treba da je projektovana tako da bude u direktnoj funkciji osnovnih tokova kretanja putnika između dva terminusa i to je osnovni preduslov koji trasa mora da ispuni.

Karakteristike dela gradske transportne mreže (vrsta saobraćajnice, broj traka, posebna/izdvojena traka za vozila JMTP-a, broj i tipovi ukrštanja, postojanje ili nepostojanje prioriteta za vozila JMTP-a i sl.) koji trasa linije koristi ujedno čine i karakter same trase linije.

Na osnovu navedenih karakteristika može se izvršiti klasifikacija trase linije prema stepenu izdvojenosti sistema javnog masovnog transporta putnika od ostalog dinamičkog saobraćaja. U narednoj klasifikaciji (Transportation Research Board, 1996) postoje tri osnovna tipa trasa i osam podtipova:

- **Tip trase A** – podrazumeva potpuno kontrolisanu trasu bez ukrštanja u nivou ili bilo kakvog dozvoljenog korišćenja od ostalih vidova saobraćaja. Ovaj tip trase se često naziva „potpuno izdvojena“ ili „zasebna“ trasa, a može biti:

- površinska,
- podzemna ili
- nadzemna.

Ovaj tip trase najčešće je zastupljen kod metro podsistema, prigradske železnice, automatski vođenih podsistema transporta putnika i sl.;

- **Tip trase B** – podrazumeva trase koje su fizički podužno izdvojene od ostalog saobraćaja (ivičnjacima, ogradama, denivelacijom), ali sa ukrštanjima u nivou sa ostalim dinamičkim saobraćajem (vozila, motocikli, pešaci i sl.), uključujući i postojeće ulične raskrsnice. Ovaj tip trase najčešće je zastupljen kod podsistema lakog šinskog transporta (LRT), BRT (ubrzani autobuski) podsistema i tramvajskog podsistema transporta putnika. Tip trase se može detaljnije klasifikovati u pet podtipova u zavisnosti od primenjene tehnologije fizičkog podužnog izdvajanja od ostalog dinamičkog saobraćaja:

- Tip trase B1 – u posebnim ulicama namenjenim isključivo vozilima JMTP-a, sa ukrštanjima u nivou sa motornim, biciklističkim i pešačkim saobraćajem od kojih je odvojena zaštitnom ogradom. Motorna vozila, bicikli i pešaci prelaze preko ovog tipa trase samo na određenim predefinisanim i obeleženim mestima.
- Tip trase B2 – trasa namenjena vozilima JMTP-a se nalazi u posebnoj saobraćajnoj traci u okviru istog uličnog fronta kojim se kreću i ostala vozila. Trasa je izdvojena ivičnjacima i/ili zaštitnom ogradom. Ukrštanja vozila JMTP-a sa ostalim saobraćajem dozvoljena su samo na raskrsnicama i posebno su regulisana horizontalnom i vertikalnom signalizacijom. Motornim vozilima, biciklima i pešacima prelaz preko ove vrste trase je dozvoljen samo na određenim predefinisanim i obeleženim mestima.
- Tip trase B3 – traka namenjena vozilima JMTP-a unutar ulice, zaštićena ivičnjacima od traka za motorna vozila. Ograda može biti postavljena između trake JMTP-a i ostalih traka, ali to nije uvek slučaj (nije

obavezno). Kao i kod prethodna dva podtipa, motornim vozilima, biciklima i pešacima prelaz je dozvoljen samo na određenim predefinisanim i obeleženim mestima.

- Tip trase B4 – traka namenjena vozilima JMTP-a se nalazi unutar ulice, ali izdvojena „ugradivim ivičnjacima“ ili horizontalnom signalizacijom.
 - Tip trase B5 – traka za vozila JMTP-a nalazi se između pešačke staze i saobraćajnih traka koje koriste ostala motorna vozila, od kojih je odvojena ivičnjacima. Od pešačkih staza trasa JMTP je obično izdvojena uočljivom horizontalnom signalizacijom, ali je pešacima dozvoljen prelazak. Kod ovog podtipa ukrštanja sa ostalim motornim saobraćajem dozvoljena su samo na raskrsnicama.
- **Tip trase C** – podrazumeva trasu koja se nalazi na delovima transportne mreže grada (gradskim ulicama, prigradskim saobraćajnicama, podzemnim deonicama – tunelima ili nadzemnim deonicama – vijaduktima), kod koje vozila JMTP-a dele sudbinu ostalog dinamičkog saobraćaja. Na ovom tipu trase vozila JMTP-a mogu imati određene prioritete (žute trake, posebne svetlosne signale). U zavisnosti od postojanja određenih prioriteta i vida dinamičkog saobraćaja sa kojim se trasa deli, ovaj tip trase se može detaljnije klasifikovati u tri podtipa:
- Tip trase C1 – podrazumeva trasu kojom se kreću vozila JMTP-a u zajedničkim saobraćajnim trakama sa ostalim motornim vozilima, kao i ostalim vidovima transporta (biciklima i sl.) ukoliko postoje. Kod ovog tipa trase ukrštanja sa pešačkim tokovima regulisana su obeleženim pešačkim prelazima.
 - Tip trase C2 – podrazumeva trasu kod koje je traka namenjena za kretanje vozila JMTP-a izdvojena horizontalnom signalizacijom (žuta traka) i koja nije fizički izdvojena od ostalog dinamičkog saobraćaja. Ostalim motornim vozilima i biciklima zabranjeno je kretanje trakama namenjenim vozilima JMTP-a, osim na raskrsnicama, kada se ostavlja mogućnost otvaranja trake za skretanje ostalih vozila prekidanjem žutih traka. U određenim slučajevima pristup ovoj saobraćajnoj traci može biti omogućen dostavnim vozilima i vozilima sa posebnim dozvolama, uglavnom u posebno definisanim vremenskim periodima u toku dana.

- Tip trase C3 – ovaj tip trase podrazumeva da pešaci i vozila JMTP-a dele istu saobraćajnu traku. Motornim vozilima (a ponekad i biciklima) je zabranjeno kretanje ovim trakama, a neretko im je potpuno zabranjen saobraćaj saobraćajnim površinama po kojima se kreću pešaci i vozila JMTP-a. Motorna vozila i bicikli prelaze ovu trasu samo na raskrsnicama. Traka ili deo saobraćajne površine (trg, ulica, pešačka zona) koju koriste vozila JMTP-a je obeležen uočljivom horizontalnom signalizacijom. U ovom slučaju svrha horizontalne signalizacije nije izdvajanje trase, već samo vizuelno markiranje profila (dela) saobraćajne površine koju koriste vozila JMTP.

Terminusi

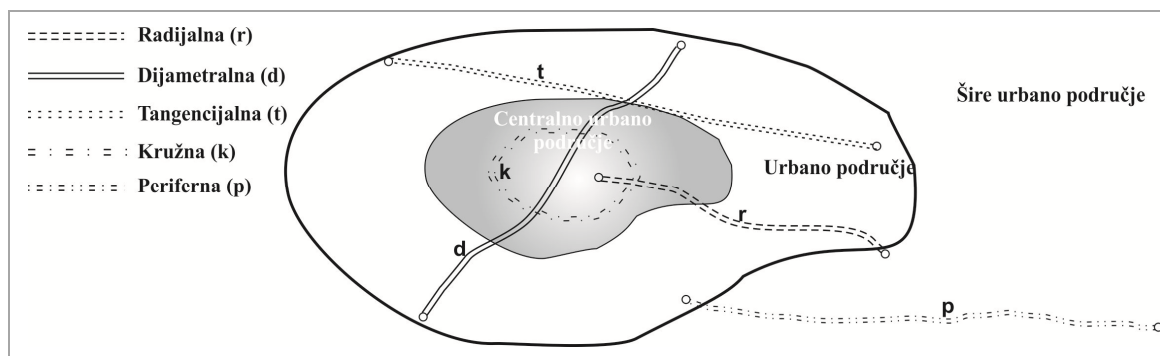
Terminusi predstavljaju početne ili završne tačke/stajališta na definisanoj trasi linije, na kojima vozila menjaju smer kretanja, odnosno predstavljaju početne i završne tačke kretanja vozila duž linije. Najčešće su izgrađeni kao posebni objekti (okretnice), posebno ako mreža okolnih ulica ne omogućava promenu smera (okretanje vozila). Mogu opsluživati jednu ili više linija, kao i jedan ili više različitih vidova transporta.

U funkcionalnom smislu, jedan terminus treba da omogući promenu smera kretanja, zadržavanje i parkiranje jednog ili više vozila. Potrebno je da omogući odmor vozača, zamenu vozača prilikom smene i da posluži kao kontrolna tačka za praćenje i korigovanje redova vožnje ukoliko je to potrebno (optimizacija vremena zadržavanja vozila na terminusima). Pored navedenih, osnovne funkcije terminusa se ogledaju i u omogućavanju brze i kvalitetne izmene (ulazak u vozilo ili izlazak iz njega) većem broju direktnih putnika ili putnika koji presedaju. Takođe, potrebno je da dodatnim sadržajima omoguće visok stepen informisanja putnika (o mreži linija, redovima vožnje, tarifnom sistemu, sistemu karata i sistemu naplate i dr.) i zaštitu od vremenskih uslova putnika koji čekaju.

Za naziv terminusa se najčešće uzima naziv šireg područja (dela urbane sredine) koje gravitira terminusu ili naziv nekog značajnog objekta u blizini (bolnica, škola, autobuska/železnička stanica itd.). Terminusi na liniji se često označavaju brojevima 1 i 2 ili slovima A i B (Slika 2.5).

Pored uticaja na naziv, na osnovu pozicija dva terminusa u urbanom području i položaju trase između dva terminusa u odnosu na centralni deo urbanog područja vrši se jedna od osnovnih klasifikacija linija JMTP-a.

Šematski prikaz klasifikacije linija prema položaju terminusa i trase linije u odnosu na centralno gradsko područje dat je na Slici 2.6.



Slika 2.6. Klasifikacija linija prema položaju trase i terminusa u odnosu na urbano područje

Glavna svrha radijalnih i dijametralnih linija je opsluživanje najintenzivnijih tokova putnika. Radijalne linije najkraćim putem povezuju centralnu zonu sa perifernim delovima urbanog područja, dok dijametralne linije povezuju dva periferna dela urbanog područja prolazeći kroz centralnu zonu. Kod linija dijametralnog tipa, za razliku od radijalnih, centralna zona urbanog područja je oslobođena terminusa i korisnicima je omogućena realizacija putovanja u centralnoj zoni bez presedanja. Radijalne i dijametralne linije su u principu najzastupljeniji tip linija jer je centralna zona urbanog područja po pravilu zona sa najvećom atrakcijom i produkcijom putovanja.

Tangencijalne linije, slično kao dijametralne, povezuju periferne delove urbanog područja ali kod ovog tipa trasa tangira centralnu zonu, čime se postiže izbegavanje zagušenja i skraćenje vremena putovanja za putnike kojima ni izvorna niti ciljna tačka putovanja nisu u centralnoj zoni.

Trasa kod kružnih linija omogućava unutarzonska kretanja u centralnoj zoni urbanog područja, čime se rasterećuju ostale linije. Osnovna svrha ovih linija je omogućavanje lakog transfera na mreži linija za korisnike koji svoja putovanja realizuju uz presedanje sa linije na liniju.

Kod perifernih linija trase povezuju periferne delove grada sa satelitskim naseljima između kojih postoje transportni zahtevi, ali su manjeg intenziteta.

Smer

Na prezentovanom šematskom prikazu linije smerovi kretanja vozila označeni su kao smer 1 i smer 2. Jedna od osnovnih funkcija terminusa je promena smera kretanja vozila, a označavanje smera je direktna posledica numeracije terminusa linije. Uobičajeno je da se za smer 1 usvaja smer kretanja vozila od terminusa 1 (A) ka terminusu 2 (B). Smer kretanja vozila se ujedno smatra i smerom linije za koji se koristi oznaka (*sm*). Najčešći slučaj u sistemu javnog masovnog transporta je da linija ima dva smera ($sm = 1,2$) mada postoje i odstupanja od ovog pravila (npr. kružne linije koje nemaju drugi smer).

Broj i naziv linije

Naziv terminusa se najčešće koristi i za naziv same linije koji se sastoji od naziva dva terminusa koja definisana trasa linije spaja. Naziv linije ne mora uvek sadržati isključivo nazive terminusa, već može sadržati i neku bližu odrednicu, kao što su prolazna stajališta – naselja, posebno ukoliko postoji više linija koje imaju isto početno i završno stajalište. Svaka linija u sistemu javnog masovnog transporta putnika pored jedinstvenog naziva ima i svoj jedinstveni broj čime se, zajedno sa nazivom, upotpunjuje identitet linije.

Stajališta

Stajališta na liniji za korisnike predstavljaju pristupne tačke sistemu javnog masovnog transporta putnika. To su unapred definisane lokacije na trasi, odnosno karakteristične presečne tačke na liniji opremljene odgovarajućim objektima i opremom na kojima se vozila planski zaustavljaju u toku perioda funkcionisanja linije. Jedna od osnovnih funkcija jednog stajališta, kao pristupne tačke sistemu, jeste da omogući pristajanje vozila i ulaz odnosno izlaz putnika u vozilo i iz njega (izmenu putnika).

Prilikom planiranja i projektovanja stajališta duž trase linija analiziraju se tri glavna aspekta, a to su: mikrolokacija stajališta, ekonomska opravdanost uvođenja stajališta i tip i kapacitet stajališta.

Mikrolokacija stajališta se određuje na osnovu analize linija želja korisnika, kao i prostorne raspodele centara atrakcije i produkcije i treba da ispunjava sve elemente bezbednosti i sigurnosti putnika, komfora, da omogući lak transfer na drugu liniju itd.

Ekonomska opravdanost se najčešće izražava u odnosu prihoda koje ostvari jedno stajalište (broj putnika koji ga koristi) i sume troškova direktnih putnika (zbog dodatnog zadržavanja) i troškova prevoznika prouzrokovanih zadržavanjem vozila.

Glavni ulazni parametri za određivanje tipa i kapaciteta jednog stajališta su broj putnika, vidovi javnog masovnog transporta koji koriste stajalište, broj vozila koja u periodu vremena opslužuju stajalište, karakteristike saobraćajne površine na kojoj se stajalište nalazi i uslovi ostalog dinamičkog saobraćaja.

Broj stajališta na liniji (n) predstavlja ukupan zbir svih stajališta u oba smera, umanjen za broj terminusa:

$$n = \sum_{sm=1}^2 n_{sm} - 2 = n_1 + n_2 - 2 \quad [\text{stajališta}] \quad (2.1)$$

Međustanična rastojanja

Međustanična rastojanja su izvedeni statički elementi linije. Predstavljaju posledicu definisanja trase i mikrolokacije stajališta na trasi. Međustanična rastojanja su dužine između uzastopnih stajališta ili stajališta i terminusa mereno po trasi linije. Na prezentovanom šematskom prikazu linije za dužinu međustaničnog rastojanja u posmatranom smeru sm između stajališta s i $s + 1$, korišćena je oznaka $l_{sm,s}$.

Ako se analizira prosečan broj stajališta (samim tim i međustaničnih rastojanja) na standardnim linijama javnog masovnog transporta, može se zaključiti da dužina svakog od međustaničnih rastojanja na liniji ne može jednostavno i jednoznačno opisati strukturni karakter linije. U tu svrhu se koristi vrednost prosečnog međustaničnog rastojanja. Ova vrednost predstavlja odnos sume svih međustaničnih rastojanja ($l_{sm,s}$) i ukupnog broja međustaničnih rastojanja koji je jednak broju stajališta (n) na liniji, a najčešće se izražava u kilometrima:

$$l_{sr} = \frac{\sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}}{n} \quad [km] \quad (2.2)$$

Dužina linije

Utvrđivanjem pozicije terminusa i trase koja ih povezuje definiše se vrednost dužine linije. Dužina linije je izvedeni element strukture koji predstavlja rastojanje između

početnog i završnog stajališta (terminusa) linije mereno po trasi linije. Dobija se na osnovu rastojanja između terminusa u jednom smeru i drugom smeru linije, odnosno dužina linije (L) se izračunava kao aritmetička sredina dužine trase u jednom i u drugom smeru (L_{sm}):

$$L = \frac{1}{2} \sum_{sm=1}^2 L_{sm} = \frac{1}{2} \sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s} \quad [km] \quad (2.3)$$

Iz prezentovane formule (2.3) jasno je da dužina trase u određenom smeru linije predstavlja sumu svih međustaničnih rastojanja od stajališta $s = 1$ do stajališta n_{sm} .

2.3.2. Dinamički elementi linije

Dinamički elementi linije (elementi funkcionisanja) predstavljaju elemente čijom se promenom u skladu sa spoljnim kriterijumima (pre svega transportnim zahtevima i definisanim/očekivanim kvalitetom usluge) postiže optimalno funkcionisanje linije. Osnovni dinamički elementi su ulazni elementi za kreiranje reda vožnje, kojim se propisuje režim funkcionisanja vozila na liniji u toku dana. Za razliku od elemenata strukture, elementi funkcionisanja se mogu menjati u skladu sa promenama spoljnih uticaja. Promene spoljnih uticaja se pre svega ogledaju u promeni intenziteta transportnih zahteva na liniji, promeni elemenata strukture trase, promeni u intenzitetu ostalog dinamičkog saobraćaja i u očekivanom kvalitetu usluge od strane korisnika (posebno u pogledu nivoa komfora). Oni predstavljaju i parametre kvantifikacije linije i mreže linija sistema JMTP. Za potrebe ovog rada klasifikacija dinamičkih elemenata je izvršena na osnovne i izvedene dinamičke elemente linije.

Osnovni dinamički elementi linije su:

- vreme obrta u karakterističnom periodu vremena (To),
- broj vozila na liniji u karakterističnom periodu vremena (N_r),
- kapacitet transportne jedinice (m).

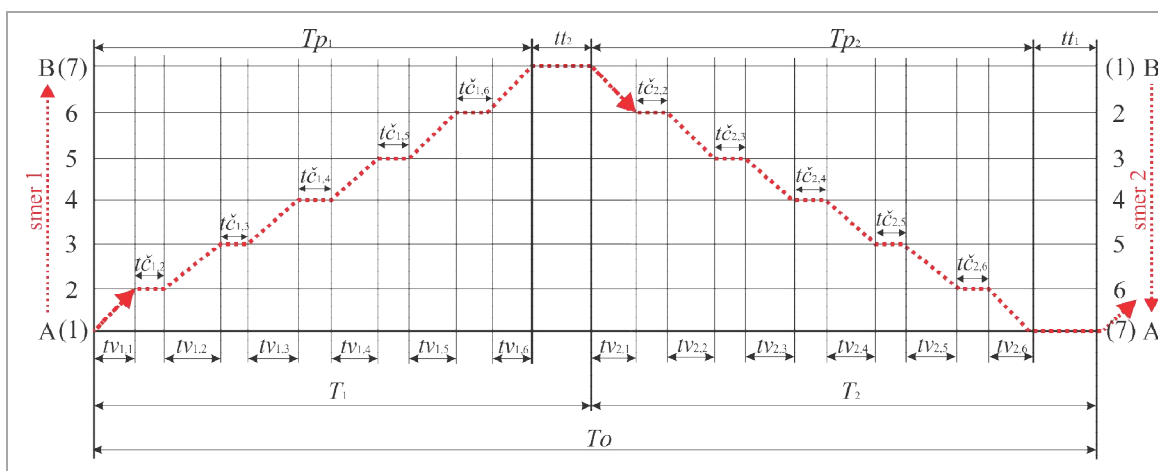
Dinamički elementi izvedeni iz osnovnih dinamičkih elemenata ili iz relacije između dinamičkih elemenata i elemenata strukture su:

- brzine (obrta, prevoza i saobraćajna),
- interval i frekvencija vozila na liniji u karakterističnim periodima vremena,
- transportna sposobnost linije u karakterističnom periodu vremena.

Vreme obrta

Vreme obrta predstavlja vremenski period između dva uzastopna polaska istog vozila sa karakteristične (presečne) tačke na liniji u posmatranom smeru. Za karakterističnu tačku linije se, posmatrano u ovom kontekstu, najčešće uzima terminus ili stajalište na liniji. To je vreme koje je potrebno vozilu na liniji da napravi jedan obrt (ciklus), odnosno da jednom opsluži sva stajališta na trasi linije posmatrano u oba smera.

Kretanje jednog vozila na liniji šematski se može prikazati put–vreme dijagramom na Slici 2.7.



Slika 2.7. Šematski prikaz kretanja vozila na liniji – put–vreme dijagram

Na apscisi koja predstavlja vremensku osu označena su sva vremena koja realizuje vozilo u toku jednog obrta, dok su na ordinatama predstavljeni osnovni statički elementi linije (smer, stajališta, međustanična rastojanja). Ukupno vreme obrta vozila sastoji se od vremena vožnje na međustaničnim rastojanjima (uključuje i vremenske gubitke kao posledicu uslova saobraćajnog toka), vremena zadržavanja (čekanja) na stajalištima duž linije i vreme zadržavanja na terminusima. Sva navedena vremena, koja su sastavni deo vremena obrta, svojim vrednostima odslikavaju karakteristike kretanja vozila na liniji.

Ukupno vreme vožnje vozila u toku jednog obrta predstavlja vremenski period u toku koga se vozilo kretalo između pojedinih stajališta na liniji uključujući i sve vremenske gubitke koji su posledica saobraćajnog toka (na signalisanim i nesignalisanim raskrsnicama, (ne)postojanje prvenstva prolaza ili zbog saobraćajnih uslova (zasićenja saobraćajnog toka)).

Vreme vožnje između dva terminusa u posmatranom smeru sm linije jednako je sumi vremena vožnje na svim međustaničnim rastojanjima i obično se izražava u minutima:

$$Tv_{sm} = \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} tv_{sm,s} \quad [min] \quad (2.4)$$

gde je:

$tv_{sm,s}$ – vreme vožnje od stajališta s do stajališta $s + 1$ u posmatranom smeru sm ;

Tv_{sm} – ukupno vreme vožnje u posmatranom smeru sm .

Ukupno vreme vožnje vozila na liniji u toku jednog obrta predstavlja sumu vremena vožnje po smerovima i na osnovu formule (2.4) iznosi:

$$Tv = \sum_{sm=1}^2 Tv_{sm} = \sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} tv_{sm,s} \quad [min] \quad (2.5)$$

Vreme čekanja (zadržavanja) vozila na stajalištima predstavlja period koji je neophodan da se obavi ulaz i izlaz (izmena) putnika na stajalištima u toku jednog obrta. Ukupno vreme čekanja na stajalištima duž linije predstavlja sumu vremena čekanja po smerovima:

$$T\check{c} = \sum_{sm=1}^2 T\check{c}_{sm} = \sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} t\check{c}_{sm,s} \quad [min] \quad (2.6)$$

gde je:

$t\check{c}_{sm,s}$ – vreme čekanja vozila na stajalištu s u posmatranom smeru sm ;

$T\check{c}_{sm}$ – ukupno vreme čekanja u posmatranom smeru sm ;

$T\check{c}$ – ukupno vreme čekanja vozila na liniji.

Vreme koje vozila javnog masovnog transporta putnika provedu na liniji prevozeći putnike naziva se vreme prevoza. Vreme prevoza vozila u toku jednog obrta u stvari predstavlja vremenski period u kome se vozilo kretalo između dva terminusa, odnosno početnog i krajnjeg stajališta na liniji. Može se predstaviti posebno za svaki smer ili ukupno za liniju, a računa se kao zbir vremena vožnje na međustaničnim rastojanjima i vremena zadržavanja vozila na stajalištima.

Vreme prevoza (Tp_{sm}) u smeru (sm) linije je:

$$Tp_{sm} = Tv_{sm} + T\check{c}_{sm} = \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} tv_{sm,s} + \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} t\check{c}_{sm,s} \quad [min] \quad (2.7)$$

a ukupno vreme prevoza (Tp) vozila u toku jednog obrta je:

$$Tp = Tv + T\check{c} = \sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} tv_{sm,s} + \sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} t\check{c}_{sm,s} \quad [min] \quad (2.8)$$

Period u kome vozila na liniji ne vrše proces prevoza putnika je vreme koje provedu zadržavajući se na terminusima. Ukupno vreme zadržavanja na terminusima (Tt) predstavlja sumu vremena zadržavanja na oba terminusa:

$$Tt = \sum_{sm=1}^2 tt_{sm} \quad [min] \quad (2.9)$$

Ukupno vreme obrta (To) vozila na liniji je period neophodan da se napravi jedan ceo ciklus, koji čine vremena vožnje na međustaničnim rastojanjima, vremena zadržavanja (čekanja) na stajalištima duž linije i vreme zadržavanja na terminusima. Na osnovu formula (2.5), (2.6) i (2.9) sledi:

$$To = Tv + T\check{c} + Tt = \sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} tv_{sm,s} + \sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} t\check{c}_{sm,s} + \sum_{sm=1}^2 tt_{sm} \quad [min] \quad (2.10)$$

Ako se uzmu u obzir odnosi dati u formuli (2.8), vreme obrta vozila se može izraziti kao suma vremena koju vozilo provede sa putnicima i bez putnika:

$$To = Tp + Tt \quad [min] \quad (2.11)$$

Vreme obrta vozila se, na osnovu prezentovane slike i svega izloženog, može predstaviti i zbirom vremena poluobrtu T_{sm} po smerovima:

$$To = \sum_{sm=1}^2 T_{sm} = T_1 + T_2 \quad [min] \quad (2.12)$$

Posebno iskazivanje vremena poluobrta po smerovima je značajno zbog različite opterećenosti linije po smerovima i različitog uticaja ostalog dinamičkog saobraćaja, što je posebno izraženo kod linija radijalnog tipa u periodima vršnih opterećenja u toku funkcionisanja linije. Na osnovu formula (2.5), (2.6) i (2.9) sledi da je vreme poluobrta vozila u posmatranom smeru sm :

$$T_{sm} = Tv_{sm} + T\check{c}_{sm} + tt_{sm} = \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} tv_{sm,s} + \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} t\check{c}_{sm,s} + tt_{sm} \quad [min] \quad (2.13)$$

Vreme obrta i vremena poluobrta se najčešće izražavaju u minutima, a dobijeni iznos se zaokružuje na ceo broj, po mogućnosti ceo paran broj, kako bi se olakšala praktična procedura izrade redova vožnje.

Broj vozila na liniji

Broj vozila na radu na liniji je direktno srazmeran utvrđenom intenzitetu transportnih zahteva i usvojenom vremenu obrta na liniji u karakterističnom periodu vremena, a obrnuto srazmeran željenom komforu putnika, optimalnom kapacitetu vozila i broju minuta u času. Potreban broj vozila na radu na liniji može se izračunati iz sledeće relacije:

$$N_r = \frac{Z_{mer} \cdot T_o}{m \cdot k_{ik} \cdot 60} \quad [voz] \quad (2.14)$$

gde je:

N_r – potreban broj vozila na radu na liniji u karakterističnom periodu;

Z_{mer} – merodavna vrednost protoka putnika (put/h) u karakterističnom periodu;

m – kapacitet vozila koja rade na liniji (mesta/vozila);

T_o – usvojeno vreme obrta vozila na liniji (min);

k_{ik} – koeficijent iskorišćenja mesta na karakterističnoj deonici, čijom se vrednošću izražava željeni nivo komfora putnika.

Detaljnija analiza uzajamnih odnosa elemenata koji utiču na broj vozila na radu na liniji i sam proračun neophodnog broja vozila prezentovani su u uvodnom delu poglavlja 5, koje se odnosi na novi model za optimizaciju vremena obrta vozila na liniji javnog gradskog transporta.

Kapacitet transportne jedinice

U okviru sistema javnog masovnog transporta putnika funkcioniše veliki broj podistema (vidova) transporta, koji angažuju vozila različitih konstrukcijskih i eksploatacionih karakteristika. Informacija o broju vozila angažovanih na jednoj liniji ne kvantifikuje u potpunosti uslugu koju linija pruža zbog mogućnosti angažovanja vozila različitog kapaciteta. Kapacitet vozila (transportne jedinice) angažovanog na liniji koji se označava sa m predstavlja ukupan broj mesta u vozilu računajući i mesta za sedenje i mesta za stajanje:

$$m = m' + m'' \quad [mesta/vozilu] \quad (2.15)$$

gde je:

m' – broj mesta za stajanje;

m'' – broj mesta za sedenje.

Kapacitet transportnog sastava

U slučaju kada je vozilo u sistemu javnog masovnog transporta formirano integrisanjem više transportnih jedinica (multiplicirani tramvaj, tramvaj sa prikolicom, voz prigradske železnice sa više vagona i sl.), kapacitet vozila se izražava kapacitetom transportnog sastava C_{ts} :

$$C_{ts} = \sum_{j=1}^n N_j \cdot m_j \quad (2.16)$$

gde je:

C_{ts} – kapacitet transportnog sastava;

j – tip transportne jedinice u okviru transportnog sastava ($j = 1, 2, \dots, n$);

N_j – broj transportnih jedinica tipa j u okviru transportnog sastava;

m_j – kapacitet transportne jedinice j u okviru transportnog sastava.

Brzine

Saobraćajna brzina ili brzina vožnje (V_s) vozila na liniji JMTP-a predstavlja prosečnu brzinu koju vozilo ostvari u kretanju u toku jednog obrta, a dobija se kao odnos pređenog puta (dvostruke dužine linije) i ukupnog vremena kretanja vozila između pojedinih stajališta na liniji, uključujući i sve vremenske gubitke koji su posledica

saobraćajnog toka. Kako bi jedinice kojima se izražava brzina odgovarale najčešće u praksi korišćenim, navedeni odnos se množi konstantom koja predstavlja broj minuta u času:

$$V_s = \frac{2L}{Tv} \cdot 60 = \frac{\sum_{sm=1}^2 L_{sm,s}}{\sum_{sm=1}^2 Tv_{sm}} \cdot 60 = \frac{\sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}}{\sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} tv_{sm,s}} \cdot 60 \quad \left[\frac{km}{h} \right] \quad (2.17)$$

Brzina prevoza (V_p) predstavlja prosečnu brzinu koju vozilo ostvaruje prilikom kretanja između dva terminusa na liniji. Njena vrednost se dobija kao odnos između pređenog puta (dvostruke dužine linije) i ukupnog vremena prevoza (Tp), računavajući i vreme usputnih zadržavanja zbog ukrcavanja i iskrcavanja (izmene) putnika:

$$V_p = \frac{2L}{Tp} \cdot 60 = \frac{\sum_{sm=1}^2 L_{sm}}{\sum_{sm=1}^2 Tp_{sm}} \cdot 60 = \frac{\sum_{sm=1}^2 L_{sm}}{\sum_{sm=1}^2 Tv_{sm} + \sum_{sm=1}^2 T\check{c}_{sm}} \cdot 60 \quad \left[\frac{km}{h} \right] \quad (2.18)$$

Brzina obrta (V_o) je srednja brzina koju vozilo ostvari u toku jednog obrta na liniji, uzimajući u obzir vreme vožnje, zadržavanja na stajalištima i terminusima:

$$V_o = \frac{2L}{To} \cdot 60 = \frac{\sum_{sm=1}^2 L_{sm}}{\sum_{sm=1}^2 T_{sm}} \cdot 60 = \frac{\sum_{sm=1}^2 L_{sm}}{\sum_{sm=1}^2 Tv_{sm} + \sum_{sm=1}^2 T\check{c}_{sm} + \sum_{sm=1}^2 tt_{sm}} \cdot 60 \quad \left[\frac{km}{h} \right] \quad (2.19)$$

Eksploataciona brzina (V_e) je srednja brzina koju vozilo ostvari u toku radnog vremena, a predstavlja odnos između ukupnih pređenih kilometara i ukupnog vremena koje je vozilo provelo na radu:

$$V_e = \frac{K}{H_r} = \frac{K_p + K_{pr} + K_n}{H_r} \quad \left[\frac{km}{h} \right] \quad (2.20)$$

gde je:

K – ukupan broj pređenih kilometara vozila u toku radnog vremena, a sastoji se od pređenih kilometara sa putnicima (K_p), bez putnika (K_{pr}) i nultih vožnji (K_n);

H_r – ukupni časovi rada, odnosno ukupno radno vreme vozila.

Interval

Vremenski period između prolaska dva uzastopna vozila kroz istu presečnu tačku ili polaska dva uzastopna vozila sa iste presečne tačke u posmatranom smeru linije naziva

se interval vozila. Interval je izvedeni element funkcionisanja linije i dobija se kao odnos vremena obrta T_o i broja vozila na liniji na radu N_r , a izražava se u minutima:

$$i = \frac{T_o}{N_r} \quad [min] \quad (2.21)$$

S obzirom na model (2.19), interval se može izraziti i kao:

$$i = \frac{2L}{N_r \cdot V_o} \cdot 60 \quad [min] \quad (2.22)$$

Takođe, ako se prilikom izračunavanja veličine intervala u obzir uzmu odnosi definisani u (2.14), uočava se da vrednost intervala na liniji JMTP-a zavisi od kapaciteta vozila, usvojenog koeficijenta komfora i intenziteta transportnih zahteva:

$$i = \frac{m \cdot k_{ik} \cdot 60}{Z_{mer}} \quad [min] \quad (2.23)$$

Vrednost intervala se posebno izračunava za svaki karakteristični period u toku funkcionisanja linije.

Frekvencija

Frekvencija (učestalost) ili protok vozila predstavlja broj vozila (voznih jedinica) koja prođu kroz presečnu tačku na liniji u posmatranom smeru u jedinici vremena. Izračunava se odnosom između broja vozila na radu (N_r) i vremena trajanja obrta (T_o), a izražava se u broju vozila na čas:

$$f = \frac{N_r}{T_o} \cdot 60 \quad \left[\frac{voz}{h} \right] \quad (2.24)$$

Planiranom vrednošću frekvencije vozila se kvantifikuje planirani kvalitet usluge, odnosno njom se reprezentuje planirani intenzitet kretanja vozila na liniji tj. intenzitet protoka vozila. Vrednost frekvencije vozila se definiše za svaki karakteristični period u toku funkcionisanja linije. S druge strane, vrednost realizovane frekvencije na liniji u realnim uslovima funkcionisanja je stohastična veličina koja se menja kako u prostoru, tako i u vremenu. To znači da na različitim presecima linije frekvencija vozila može u

istom periodu vremena biti različita, a takođe na istom preseku u različitim delovima karakterističnog perioda realizuju se različiti intenziteti protoka vozila.

Frekvencija vozila na liniji se, na osnovu odnosa definisanih u formuli (2.21) i (2.24), može iskazati kao recipročna vrednost intervalu:

$$f = \frac{60}{i} \left[\frac{voz}{h} \right] \quad (2.25)$$

Takođe, na osnovu formula (2.19) i (2.24), frekvencija vozila je direktno srazmerna broju vozila na radu i brzini obrta koju ostvaruju, a obrnuto srazmerna dužini linije:

$$f = \frac{N_r \cdot V_o}{2L} \cdot 60 \left[\frac{voz}{h} \right] \quad (2.26)$$

Na mreži linija javnog masovnog transporta, posebno u centralnim delovima grada, postoji veliki broj međustaničnih rastojanja i deonica koje opslužuje više od jedne linije. Delovi mreže gde se preklapa dve ili više linija nazivaju se zajedničke deonice (zajednička međustanična rastojanja), a intenzitet protoka vozila na tim deonicama zajednička frekvencija. Zajednička frekvencija vozila se izračunava kao suma frekvencija svih linija koje funkcionišu na delu mreže (zajednička deonica) za koji se frekvencija računa:

$$f_{z_k} = \sum_{j=1}^b f_{j_k} \left[\frac{voz}{h} \right] \quad (2.27)$$

gde je:

b – ukupan broj linija čije se trase preklapaju na deonici k ;

j – brojač koji uzima vrednosti od 1 do b ($j = 1, 2, \dots, b$), za svaku od linija;

f_{j_k} – frekvencija linije j na deonici k ;

f_{z_k} – frekvencija vozila na zajedničkoj deonici linija k .

Interval sleđenja vozila na zajedničkim deonicama dveju ili više linija naziva se zajednički interval i_z i predstavlja interval za korisnike kojima odgovara svaka od linija na zajedničkom delu. U skladu sa relacijama definisanim u (2.25), vrednost zajedničkog intervala se iskazuje kao recipročna vrednost zajedničke frekvencije f_z :

$$i_{z_k} = \frac{60}{f_{z_k}} \quad [min] \quad (2.28)$$

gde je:

i_{z_k} – interval sleđenja vozila na zajedničkoj deonici linija k .

Transportna sposobnost linije

Transportna sposobnost linije u potpunosti kvantifikuje definisani nivo usluge jedne linije. Transportna sposobnost linije, koja se naziva i kapacitet linije, jeste veličina kojom se definiše maksimalni (granični) broj putnika koji je linija sposobna da opsluži u jedinici vremena. U stvari, vrednost kapaciteta linije je ukupan broj mesta koji se nudi putnicima u posmatranom periodu vremena, a izražava se kao proizvod učestalosti f i broja mesta m angažovanog vozila:

$$C = f \cdot m \quad \left[\frac{mesta}{h} \right] \quad (2.29)$$

Imajući u vidu prethodni izraz i odnose definisane u relaciji (2.26), dobijamo sledeću formulu za kapacitet linije:

$$C = \frac{N_r \cdot m \cdot 60}{T^o} \quad \left[\frac{mesta}{h} \right] \quad (2.30)$$

Vrednost kapaciteta linije je konstantna duž cele trase u jednom karakterističnom periodu vremena za koji se definiše. Prezentovani odnos pokazuje direktnu zavisnost kapaciteta linije od broja vozila, sa jedne strane, i broja mesta po angažovanom vozilu na liniji i određenog vremena obrta, sa druge strane.

Bruto transportni rad

Realizacija konstantne vrednosti prevozne sposobnosti duž cele linije iziskuje značajan transportni rad, koji obave vozila javnog masovnog transporta. Planirani transportni rad na liniji predstavlja proizvod kapaciteta (prevozne sposobnosti linije) i dužine na kojoj se željeni kapacitet realizuje. Može se izračunati na dva načina, a jedina razlika je u jedinicama u kojima se izražava:

$$BTR = \frac{2L \cdot N_r}{T^o} \cdot 60 \quad \left[\frac{\text{vozilokm}}{h} \right] \quad (2.31)$$

ili:

$$BTR = 2LC = \frac{2L \cdot N_r \cdot m}{T^o} \cdot 60 \quad \left[\frac{\text{mestakm}}{h} \right] \quad (2.32)$$

Iz prezentovanih modela se jasno uočava značajan nivo uticaja vremena obrta i njegovih sastavnih delova na ostale elemente funkcionisanja linije. Planska vrednost vremena obrta kao osnovnog elementa funkcionisanja direktno utiče na vrednosti ostalih elemenata, a samim tim i na specifikaciju usluge kao izlaznog dokumenta iz procesa planiranja. U realnim uslovima funkcionisanja, posebno kod linija sa malim stepenom nezavisnosti trase, dolazi do odstupanja realizovanih vrednosti od onih planiranih. Zbog različitih faktora, kako internih, tako i eksternih, dolazi do varijacija svih vremena (vreme vožnje, vreme čekanja, vreme terminiranja), što za posledicu ima i odstupanje svih ostalih elemenata funkcionisanja od njihovih planiranih vrednosti. Naravno, konačni rezultat takvog procesa funkcionisanja je nivo kvaliteta pružene usluge koji značajno odstupa od planiranog i za posledicu ima neefikasan sistem i nezadovoljstvo korisnika.

2.3.3. Karakteristike transportnih zahteva na liniji

Poznavanje karakteristika transportnih zahteva na liniji, zajedno sa poznavanjem međusobnih odnosa elemenata strukture i elemenata funkcionisanja linije kao sistema, predstavlja preduslov za proces optimizacije nivoa kvaliteta usluge koju linija pruža korisnicima.

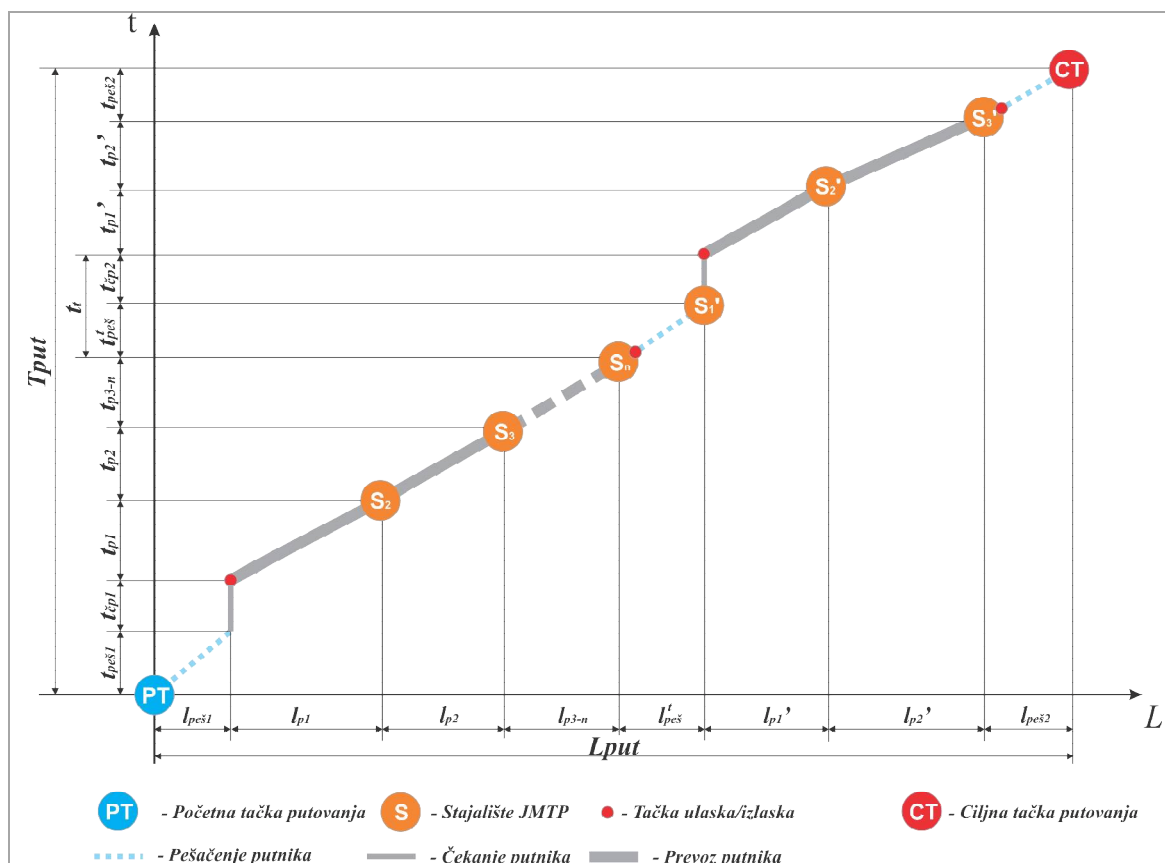
Na osnovu odnosa prezentovanih u prethodnom odeljku uočava se da intenzitet transportnih zahteva na liniji Z_{mer} direktno utiče na vrednosti gotovo svih elemenata funkcionisanja linije, a postizanje optimalnog funkcionisanja linije se upravo postiže podešavanjem elemenata funkcionisanja u zavisnosti, između ostalog, i od promene vrednosti intenziteta transportnih zahteva.

U ovom odeljku opisan je proces nastanka transportnih zahteva sa analizom osnovnih osobina transportnih zahteva u sistemu i karakteristika transportnih zahteva na liniji.

Velikom broju autora su transportni zahtevi u sistemu javnog masovnog transporta bili predmet izučavanja (Gentile–Noekel (2016), Ефремов i dr. (1980), Ben-Akiva i dr. (1985), Ji i dr. (2011)). Transportni zahtevi se takođe dugi niz godina proučavaju u

okviru naučno-istraživačkog rada na Katedri za drumski i gradski transport putnika Saobraćajnog fakulteta u Beogradu (Filipović (1989), Banković (1994), Filipović (1995)). Opisi i modeli prezentovani u ovom odeljku preuzeti su i prilagođeni za potrebe ove disertacije, dok prezentovani primeri predstavljaju rezultate sprovedenih istraživanja u okviru studijsko-istraživačkih projekata izrađenih na Katedri.¹

Svako kretanje objekata transporta, odnosno njihova dislokacija od mesta nastanka potrebe do mesta gde ona prestaje, naziva se transportna potreba. Veličina koja opisuje potrebe stanovnika za kretanjem naziva se putovanje, odnosno putovanje predstavlja kretanje od „od vrata do vrata”, tj. od mesta gde kretanje započinje do mesta gde se završava. Putovanja mogu biti prosta i složena, a u prostoru su određena početnom tačkom PT i ciljnom tačkom CT , dok su u vremenu određena vremenskim trenutkom početka (t_p) i završetka (t_c) putovanja. Na Slici 2.8. ilustrovan je šematski prikaz složenog putovanja.



Slika 2.8. Šematski prikaz složenog putovanja

¹ Tica, S., Bajčetić, S. i dr. (2016). Mreža linija i definisanje potrebnih kapaciteta za prigradski i lokalni prevoz u Beogradu – SuTraN.
Tica, S., Bajčetić, S. i dr. (2015). Mreža linija javnog gradskog transporta putnika i definisanje potrebnih kapaciteta u Beogradu (ITS-1).

Transportna potreba se izborom vida transporta (načinom kretanja) transformiše u transportni zahtev, što je ilustrovano na narednoj slici.



Slika 2.9. Proces transformacije transportnih potreba

Osnovne veličine kojima se opisuju transportni zahtevi u sistemu javnog masovnog transporta putnika u prostoru i vremenu su:

- ulazna tačka u sistem (stajalište) – US ;
- izlazna tačka iz sistema (stajalište) – IS ;
- vremenski trenutak ulaska u sistem (vozilo) – t_u ;
- vremenski trenutak izlaska iz sistema (vozila) – t_i .

U sistemu javnog masovnog transporta putnika broj pojedinačnih zahteva za transportom je veliki. Svi pojedinačni transportni zahtevi u sistemu se kumuliraju i formiraju potok transportnih zahteva.

Kako bi se definisale karakteristike transportnih zahteva u vremenu, neophodno je opisati proces njihovog nastanka u vremenu. Proces nastanka transportnih zahteva na liniji u toku dana, je veoma složen proces sa određenim karakteristikama koje je moguće opisati slučajnom funkcijom. Veličine transportnih zahteva u prostoru i vremenu zavise od osobine potoka zahteva. Najvažnije osobine potoka transportnih zahteva su:

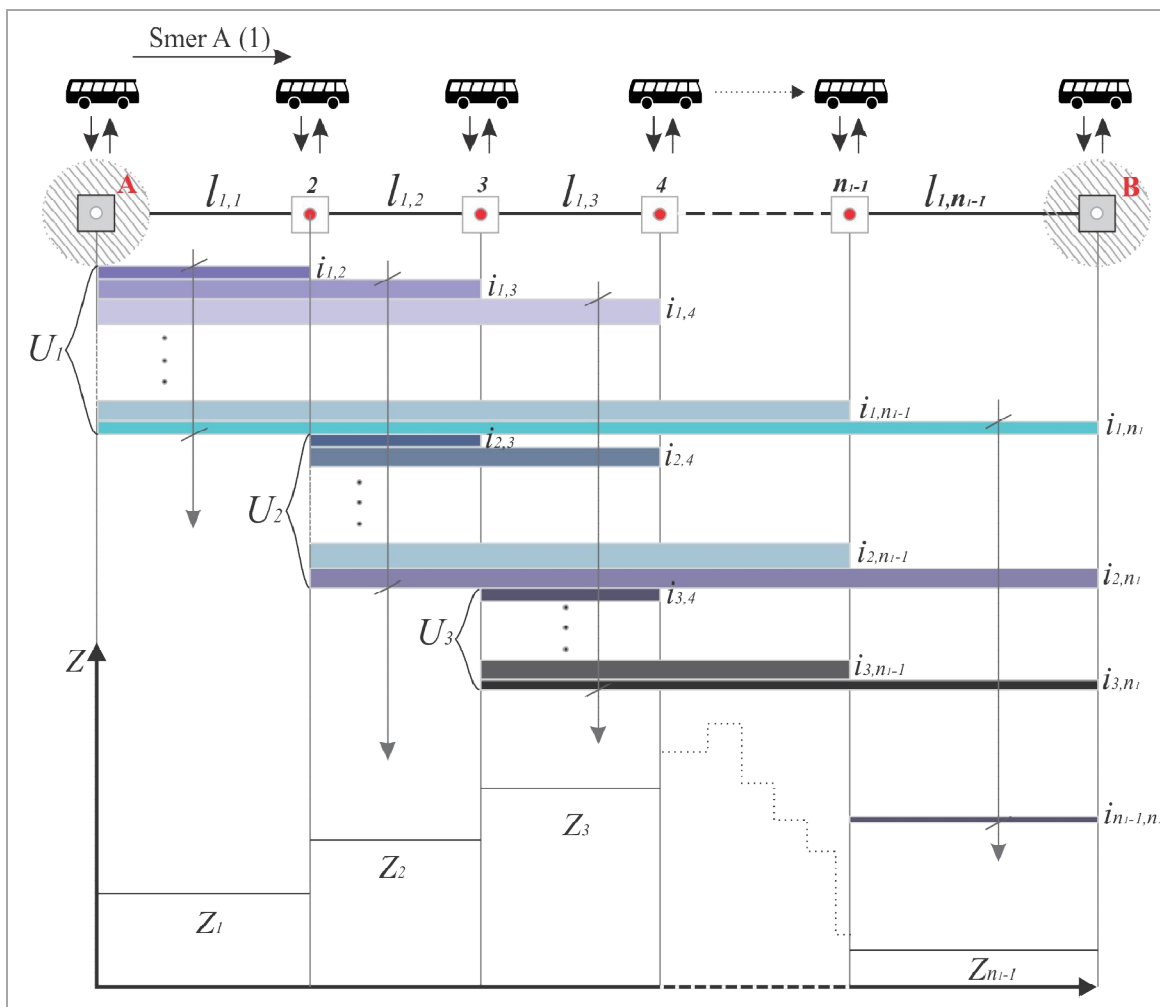
- Kontinualnost, jer se transportni zahtevi na liniji u posmatranom periodu vremena ispostavljaju u svakom trenutku vremena, odnosno njihov proces se može opisati kontinualnom funkcijom zavisnom od skupa određenih parametara.
- Stohastičnost, jer je pojava transportnih zahteva u vremenu slučajna i broj zahteva (veličina zahteva) je slučajna veličina.

- Nehomogenost, jer se na svakom stajalištu linije u jednom karakterističnom periodu vremena pojavljuje različit intenzitet zahteva, a na istom stajalištu transportni zahtevi pokazuju izraženu promenu u različitim periodima vremena.
- Nestacionarnost, jer u toku perioda funkcionisanja linije intenzitet potoka transportnih zahteva zavisi od mesta na vremenskoj osi kada je zahtev ispostavljen.
- Neordinarnost, jer se na stajalištima linije u malim periodima vremena (Δt) može pojaviti jedan ili više zahteva za transportom.
- Odsustvo posledica, jer broj zahteva koji se pojavi na jednom stajalištu s u periodu TS_p ne zavisi od broja zahteva koji se pojavio na istom stajalištu u prethodnom periodu TS_{p-1} .

Kako bi se opis procesa nastanka transportnih zahteva pojednostavio, u nastavku je dat opis baziran na pet definisanih preduslova:

- linija JMTP je linija sa potpuno nezavisnom trasom (Tip trase A),
- transportni zahtevi se realizuju samo u jednom smeru linije,
- transportni zahtevi se realizuju samo u jednom karakterističnom periodu u toku dana, koji je kraći od perioda funkcionisanja,
- transportni zahtevi se realizuju samo u toku jednog poluobrta vozila,
- svi ispostavljeni zahtevi su realizovani (nema otkaza sistema).

Šematski prikaz procesa nastanka transportnih zahteva prezentovan je na Slici 2.10.



Slika 2.10. Proces nastanka transportnih zahteva na liniji javnog masovnog transporta putnika

Na osnovu šematskog prikaza, broj zahteva za transportom (Z) na određenom stajalištu se može izraziti preko modela prezentovanih u nastavku. Ulasci (U), izlasci (I) i broj zahteva (Z) u prezentovanim modelima bi trebalo da sadrže indekse za smer (sm) i za vozilo (v), ali s obzirom na definisane preduslove, korišćena je oznaka samo za redosled stajališta na liniji, kako bi se prezentovani modeli pojednostavili. Broj zahteva za transportom po stajalištima na liniji može se izračunati na sledeći način:

- na stajalištu 1:

$$Z_1 = U_1 - I_1 = U_1 \quad [\text{put/polasku}] \quad (2.33)$$

- na stajalištu 2:

$$Z_2 = U_1 + U_2 - i_{12} = \sum_{s=1}^2 U_s - \sum_{s=1}^2 I_s \quad [\text{put/polasku}] \quad (2.34)$$

- na stajalištu k :

$$\begin{aligned} Z_k &= U_1 + U_2 + \dots + U_k - i_{12} - i_{13} - \dots - i_{1k} - i_{23} - \dots - i_{2k} - \dots - i_{k-1,k} \\ &= \sum_{s=1}^k U_s - \sum_{s=1}^k I_s \quad [\text{put/polasku}] \end{aligned} \quad (2.35)$$

- i na stajalištu n :

$$Z_n = \sum_{s=1}^n U_s - \sum_{s=1}^n I_s \quad [\text{put/polasku}] \quad (2.36)$$

Ako bi se izvršila smena $I_2 = i_{12}$, pri čemu je I_2 ukupan broj putnika koji izlazi na stajalištu 2, i dalje na ostalim stajalištima:

- na stajalištu 3:

$$I_3 = i_{13} + i_{23} \quad [\text{put/polasku}] \quad (2.37)$$

- na stajalištu k :

$$I_k = i_{1k} + i_{2k} + i_{3k} + \dots + i_{k-1,k} = \sum_{s=1}^{k-1} i_{s,k} \quad [\text{put/polasku}] \quad (2.38)$$

- na stajalištu n :

$$I_n = i_{1n} + i_{2n} + i_{3n} + \dots + i_{n-1,n} = \sum_{s=1}^{n-1} i_{s,n} \quad [\text{put/polasku}] \quad (2.39)$$

Na osnovu prethodnih smena izrazi (2.33), (2.34), (2.35) i (2.36) dobijaju sledeću formu:

- na stajalištu 1:

$$Z_1 = U_1 - I_1 = U_1 \quad [\text{put/polasku}] \quad (2.40)$$

- na stajalištu 2:

$$Z_2 = U_1 + U_2 - I_2 = Z_1 + (U_2 - I_2) \quad [\text{put/polasku}] \quad (2.41)$$

- na stajalištu k :

$$\begin{aligned} Z_k &= U_1 + U_2 + \dots + U_k - I_2 - I_3 - \dots - I_k \\ &= Z_{k-1} + (U_k - I_k) \quad [\text{put/polasku}] \end{aligned} \quad (2.42)$$

- na stajalištu n :

$$\begin{aligned} Z_n &= U_1 + U_2 + \dots + U_k + \dots + U_n - I_2 - I_3 - \dots - I_k - \dots - I_n \\ &= Z_{n-1} + (U_n - I_n) \quad [\text{put/polasku}] \end{aligned} \quad (2.43)$$

Jasno je da transportni zahtevi na liniji zavise od veličina $U_1, U_2 \dots U_n$, koje predstavljaju broj putnika koji žele da uđu u vozila na stajalištu s , odnosno: broj ulazaka na stajalištu s : U_s , i veličina $I_1, I_2 \dots I_n$, koje predstavljaju broj putnika koji želi da izađe na stajalištu s , ili jednostavno rečeno: broj izlazaka na stajalištu s : I_s .

Pojedinačni zahtevi za transportom se duž linije akumuliraju, a broj zahteva za transportom na stajalištu k , kako se iz prethodno navedenih modela vidi, zavisi od kumulanti (sume) ulazaka i izlazaka putnika po stajalištima duž linije odnosno:

$$Z_k = \sum_{s=1}^k U_s - \sum_{s=1}^k I_s \quad [\text{put/polasku}] \quad (2.44)$$

Karakteristike zahteva u pogledu dužine vožnje (transporta) u odnosu na liniju, kako se vidi, transformišu se u broj zahteva za transportom od stajališta s do $s + 1$, odnosno na međustaničnom rastojanju između dva stajališta. S druge strane, tehnologija transporta na liniji je takva da se duž linije realizuje, uslovno rečeno, isti kapacitet, a kako su svi zahtevi po stajalištima (Z_s) na liniji sa aspekta njihovog zadovoljenja isto značajni, proizilazi da sa aspekta optimizacije kapaciteta linije nije bitno stajalište na kojem se zahtevi ispostavljaju, već broj (veličina) transportnih zahteva.

Ako se problem dalje uopšti i za drugi smer ($sm = 1,2$) linije, onda se u periodu vremena stacionarnosti (TS) u jednom obrtu vozila transportni zahtevi mogu definisati skupom realizacije promenljive:

$$Z_{sm,s} = \{Z_{1,1}, Z_{1,2}, \dots, Z_{1,k}, \dots, Z_{1,n_1-1}, Z_{1,n_1}, Z_{2,1}, Z_{2,2}, \dots, Z_{2,k}, \dots, Z_{2,n_2-1}, Z_{2,n_2}\}$$

gde prezentovane vrednosti predstavljaju broj zahteva u smeru linije ($sm = 1,2$) na stajalištu s .

Pod pojmom **transportni zahtevi na stajalištu – međustaničnom rastojanju k** linije podrazumeva se broj putnika koji se transportuje od stajališta k do stajališta $k + 1$ u posmatranom vremenskom periodu kada vlada stacionarno stanje i izračunava se prema formuli:

$$Z_{sm,k} = \sum_{s=1}^k U_{sm,s} - \sum_{s=1}^k I_{sm,s} = Z_{sm,k-1} + (U_{sm,k} - I_{sm,k}) \quad \left[\frac{\text{put}}{\text{h}} \right] \quad (2.45)$$

Veličina $Z_{sm,k}$ predstavlja intenzitet potoka zahteva na stajalištu k , odnosno na međustaničnom rastojanju $l_{sm,k}$, i naziva se protok putnika.

Proces nastanka transportnih zahteva na liniji u jednom karakterističnom periodu funkcionisanja (periodu stacionarnosti) je kontinualan proces u vremenu i definisan je realizacijama jediničnih zahteva na stanicama (deonicama) linije, odnosno definisan je: raspodelom vremena između dva zahteva, raspodelom broja zahteva i raspodelom dužina vožnji. Određivanje realnih karakteristika transportnih zahteva na liniji nezavisno od karakteristika funkcionisanja linije je složeno zato što linija najčešće nema nezavisnu trasu, odnosno stajališta jedne linije često su elementi strukture i više drugih linija, takođe nije redak slučaj da postoji bitna razlika između ispostavljenih i realizovanih zahteva, tj. da određeni broj zahteva ostane nerealizovan, a pored toga, karakteristike izlaznog potoka putnika (dužina vožnji) se veoma teško utvrđuju.

Iz navedenih razloga neophodno je kontinualni proces formiranja transportnih zahteva diskretizovati. Za osnovnu jedinicu posmatranja takvog diskretizovanog procesa uzima se interval vozila na posmatranom stajalištu linije. Posledica diskretizacije je da realizacije transportnih zahteva u posmatranom smeru sm postaju kumulante jediničnih zahteva po vozilu v i stajalištima s za vrednost intervala: $U_{sm,s,v}$, $I_{sm,s,v}$ i $Z_{sm,s,v}$.

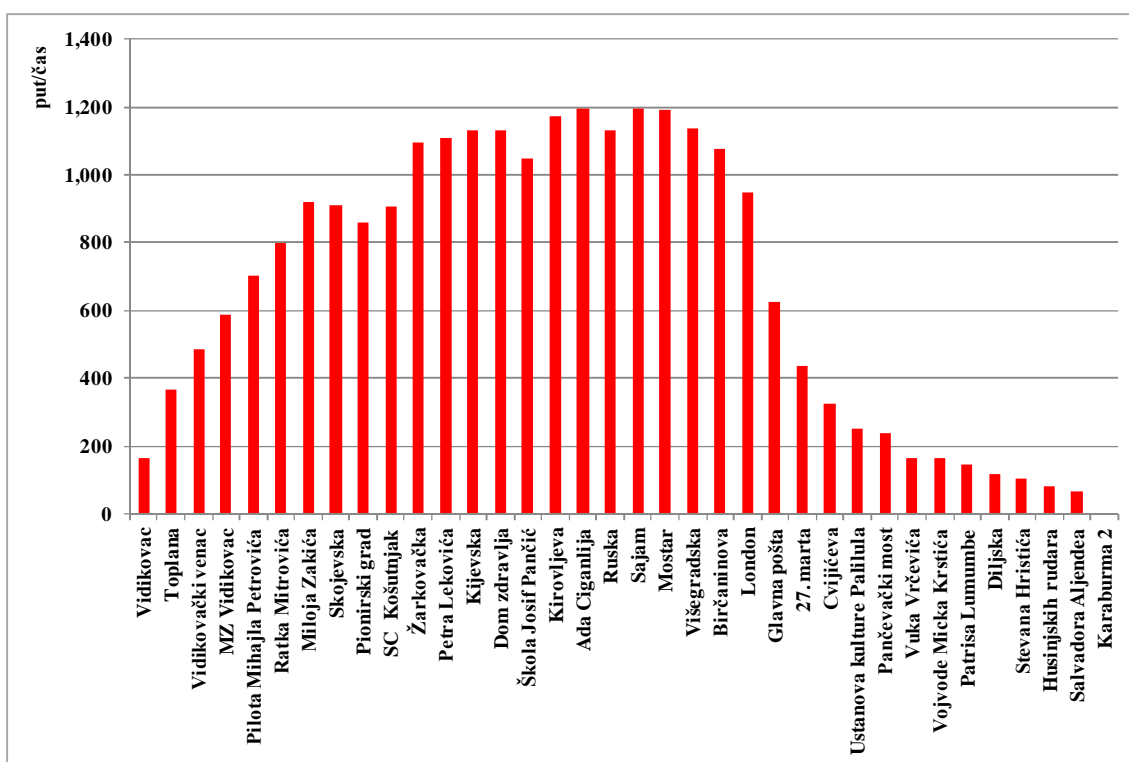
Navedeni skup se ne može smatrati homogenim u periodu stacionarnosti, pošto ovako formirani zahtevi, pored uticaja stohastičnosti samog procesa nastanka zahteva, sadrže u sebi i uticaj stohastičnosti realizacije intervala i njihov uticaj na veličinu tih zahteva. Homogenizaciju skupa realizacija ($U_{sm,s,v}$, $I_{sm,s,v}$ i $Z_{sm,s,v}$) moguće je izvršiti na više načina, a za potrebe analize transportnih zahteva u okviru disertacije korišćena je deterministička metoda, koja predviđa svođenje skupa realizacija na kumulativne časovne vrednosti:

$$U_{sm,s} = \sum_{v=1}^f U_{sm,s,v} \quad \left[\frac{put}{h} \right] \quad (2.46)$$

gde je f frekvencija vozila na posmatranom stajalištu s u analiziranom času.

Prezentovani model za proračun časovnih vrednost ulazaka može se primeniti i prilikom utvrđivanja časovnih vrednosti izlazaka putnika i protoka.

Utvrđene vrednosti osnovnih karakteristika transportnih zahteva po stajalištima na liniji (bez obzira na to da li je reč o jednom obrtu vozila ili o jednom času) omogućavaju sagledavanje promene njihovih vrednosti u prostoru, odnosno duž stajališta na liniji. Na Slici 2.11, kao primer, prezentovane su časovne vrednosti protoka putnika na liniji 23 (Karaburma 2 – Vidikovac), realizovanih u smeru B (od Vidikovca) u periodu od 07:00 do 08:00 časova.



Slika 2.11. Promena transportnih zahteva u prostoru²

Poznavanje osnovnih karakteristika transportnih zahteva na liniji (ulazaka, izlazaka i protoka) pruža mogućnost utvrđivanja većeg broja izvedenih karakteristika koje dodatno opisuju karakter transportnih zahteva (tokova kretanja putnika) na jednoj liniji. U nastavku se prezentuju modeli za utvrđivanje nekoliko karakteristika tokova putnika koje su najznačajnije za razvoj modela u okviru disertacije.

²Tica, S., Bajčetić, S. i dr. (2015). Studija brojanja putnika u javnom prevozu i anketa korisnika javnog prevoza, Centar za planiranje urbanog razvoja – CEP, Beograd.

Ukupan broj prevezenih putnika P predstavlja sumu svih putnika koji su ušli (izašli) na svim stanicama u toku jednog obrta (poluobrt) na liniji u posmatranom periodu vremena. Za posmatrani smer sm model izgleda:

$$P_{sm} = \max \left\{ \sum_{s=1}^{n_{sm}} U_{sm,s} ; \sum_{s=1}^{n_{sm}} I_{sm,s} \right\} \quad (2.47)$$

dok ukupan broj prevezenih putnika na liniji predstavlja sumu prevezenih putnika po smerovima:

$$P = \sum_{sm=1}^2 P_{sm} = P_1 + P_2 \quad \left[\frac{put}{h} \right] \quad (2.48)$$

Karakteristike intenziteta transportnih zahteva u prostoru na liniji mogu se iskazati i srednjom vrednošću protoka putnika koja se za jedan smer linije utvrđuje relacijama definisanim u modelu:

$$\bar{Z}_{sm} = \frac{NTR_{sm}}{L_{sm}} = \frac{\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} Z_{sm,s} \cdot l_{sm,s}}{L_{sm}} \quad \left[\frac{put}{h} \right] \quad (2.49)$$

Iz formule (2.49) se vidi da je srednja vrednost protoka duž smera linije jednaka količniku sume proizvoda protoka po međustaničnim rastojanjima i dužine međustaničnih rastojanja na kome se protok realizuje i dužine linije u posmatranom smeru. Opisana suma proizvoda se naziva i neto transportni rad (NTR_{sm}) koji vozila realizuju na posmatranom smeru linije.

Odnos između maksimalne vrednosti protoka duž linije $\max Z_{sm,s}$ i srednje vrednosti naziva se neravnomernost protoka putnika u prostoru. Vrednost ovog pokazatelja je veća od 1 i pokazuje nivo ujednačenosti intenziteta transportnih zahteva po stajalištima duž linije. Modeli za izračunavanje su za određeni smer:

$$n_{P_{sm}} = \frac{\max\{Z_{sm,s}\}}{\bar{Z}_{sm}} \quad (2.50)$$

i na liniji:

$$n_P = \frac{\sum_{sm=1}^2 \max\{Z_{sm,s}\}}{\sum_{sm=1}^2 \bar{Z}_{sm}} \quad (2.51)$$

Koeficijent iskorišćenja kapaciteta na najopterećenijoj deonici prikazuje planirani nivo komfora (ako se radi o planskoj vrednosti datoj u modelu (2.14)) ili doživljeni nivo komfora korisnika (ako se radi o realizovanoj vrednosti), a računa se kao odnos ponuđenog kapaciteta na liniji i maksimalnog protoka:

$$k_{ik} = \frac{\max\{Z_{sm,s}\}}{C} ; 0 \leq k_{ik} \leq 1 \quad (2.52)$$

Jedan od značajnih pokazatelja karakteristika tokova putnika na liniji je i vrednost srednje dužine vožnje. Izračunava se na osnovu modela za smer:

$$\bar{l}_{sm} = \frac{\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} Z_{sm,s} \cdot l_{sm,s}}{P_{sm}} \quad [km] \quad (2.53)$$

i za liniju:

$$\bar{l} = \frac{\sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} Z_{sm,s} \cdot l_{sm,s}}{\sum_{sm=1}^2 P_{sm}} \quad [km] \quad (2.54)$$

Sama vrednost srednje dužine vožnje na jednoj liniji (ili smeru) kao podatak nema veliki značaj bez uporedne analize sa dužinom linije. Što je vrednost srednje dužine vožnje putnika na liniji bliža vrednosti dužine linije, to je karakter transportnih zahteva na liniji sličan transportnim zahtevima koji se realizuju na međumjesnim ili ekspres linijama (svi putnici ulaze na početnim stajalištima i izlaze na par poslednjih).

Ukoliko je vrednost srednje dužine vožnje mala, odnosno teži vrednosti prosečnog međustaničnog rastojanja (l_{sr} – formula (2.2)) na liniji, onda sledi da se najverovatnije radi o kružnoj liniji koja opslužuje centralnu zonu urbanog područja i čija je osnovna funkcija opsluživanje unutarzonskih kretanja (koja su po definiciji kratka), kao i obezbeđivanje transfera putnika na ostale (radijalne i dijametralne) linije u sistemu.

3. KRITIČKI PREGLED REFERENTNE LITERATURE I RELEVANTNIH ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju disertacije dat je pregled dostupne relevantne literature, koji prezentuje pre svega značaj pouzdanosti funkcionisanja sistema javnog masovnog transporta putnika sa aspekta ključnih aktera u sistemu (korisnika, organizatora transportne usluge / organa lokalne uprave i prevoznika). Pored analize značaja pouzdanosti kvaliteta usluge koju sistem javnog masovnog transporta pruža korisnicima, u prvom delu pregleda literature opisani su i indikatori pouzdanosti i tehnologije merenja nivoa pouzdanosti. Detaljno je analizirana i literatura vezana za utvrđivanje faktora koji utiču na vreme vožnje, odnosno vreme prevoza vozila na liniji javnog masovnog transporta putnika. Pored pregleda utvrđenih faktora, dat je i opis metoda korišćenih za utvrđivanje nivoa uticaja. Na kraju, u ovom poglavlju su opisani i najčešće korišćeni modeli u rešavanju problema utvrđivanja vremena obrta, kao osnovnog ulaznog elementa u procesu planiranja funkcionisanja linije odnosno definisanja reda vožnje na liniji javnog masovnog transporta putnika.

Pored pregleda i opisa rezultata rada drugih autora, u ovom poglavlju dat je i kratak kritički osvrt na korišćene metode i prezentovane rezultate. Na taj način je izvršena opsežna analiza čiji je rezultat izdvajanje uočenih nedostataka i potencijalnih mogućnosti unapređenja postojećih modela i trenutne prakse, što predstavlja koherentan uvod za ostala poglavlja disertacije shodno polaznim hipotezama.

3.1. Pouzdanost funkcionisanja sistema javnog masovnog transporta putnika

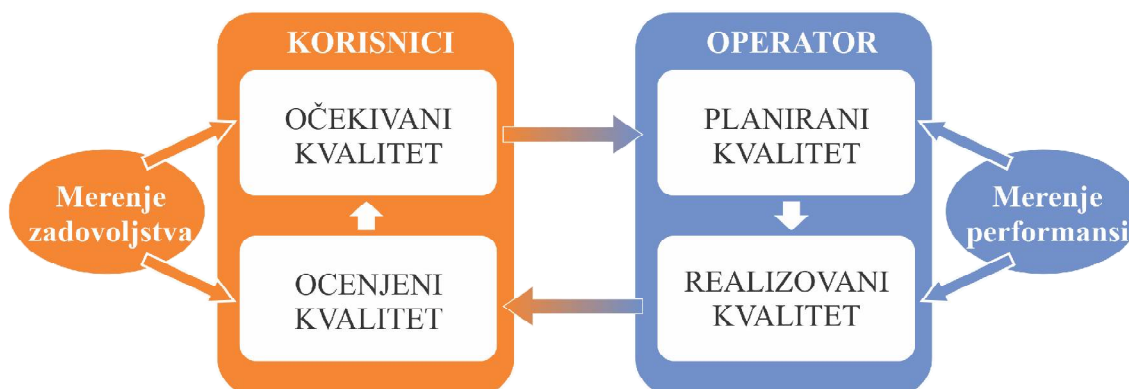
Usluga koju sistem javnog gradskog transporta pruža korisnicima je sistemski organizovan proces čiji su rezultati proizašli iz niza međusobno povezanih aktivnosti prevoznika (operatora) i poslovnog okruženja u cilju zadovoljenja zahteva korisnika usluge (putnika).

Prema standardima IEC (*International Electrotechnical Commission* – Međunarodni elektrotehnički komitet) 50–191, pojam kvaliteta usluge definiše se kao „opšti efekat svojstava usluge, koji određuje stepen zadovoljenja potreba korisnika“. Osnovne odrednice koje karakterišu pojam kvaliteta imaju zajednički imenitelj, koji se odnosi na sposobnost nekog entiteta da zadovolji određene potrebe i zahteve, mogućnost da se

izraze skupom svojstava odnosno karakteristika koje pored opisne imaju i komparativnu dimenziju.

Savremeni pristup upravljanju sistemom javnog transporta putnika danas zahteva da se težište sa ciljeva baziranih na maksimalnoj proizvodnoj i ekonomskoj efikasnosti usmeri na kvalitet rada sistema i usluge uz visoku ekološku podobnost (Tica, 2011). U tom smislu, zadovoljenje stvarnih potreba i zahteva korisnika je, s jedne strane, sredstvo da se postigne zadovoljstvo korisnika i upravlja transportnim zahtevima u smislu povećanja obima, a sa druge strane, dovodi do kontinuiranih unapređenja strukture i funkcionisanja sistema, što ima kao posledicu poboljšanje efikasnosti i efektivnosti.

U sistemu javnog masovnog transporta putnika moguće je identifikovati takozvana četiri oblika posmatranja kvaliteta sistema i usluge, koji su prezentovani na Slici 3.1. (na osnovu Quattro (1998) i EN 13816 (2000)):



Slika 3.1. Petlja kvaliteta usluge

Traženi (zahtevani ili očekivani) kvalitet predstavlja nivo kvaliteta koji eksplicitno ili implicitno zahtevaju korisnici od sistema javnog transporta putnika. Taj nivo kvaliteta može se smatrati skupom izvesnog broja kriterijuma kvaliteta koji reprezentuju određena svojstva kvaliteta usluge.

Projektovani (planirani ili ciljani) kvalitet predstavlja nivo kvaliteta koji isporučilac usluge namerava da pruži korisnicima. Na njega uticaja ima nivo kvaliteta koji traže korisnici, spoljni i unutrašnji pritisci, budžetska i tehnička ograničenja i performanse konkurenata.

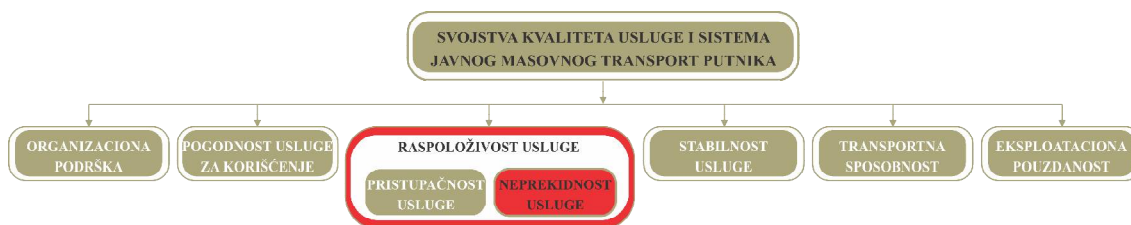
Realizovani (objektivni ili isporučeni) kvalitet predstavlja nivo kvaliteta koji se ostvaruje permanentno u realnom vremenu. Realizovani (objektivni) kvalitet je stvarno isporučeni nivo kvaliteta transportne usluge nastao kao posledica funkcionisanja sistema

u realnom vremenu, što ga čini jednim od najznačajnijih elemenata za analizu i unapređenje kvaliteta transportnog sistema i usluge koju pruža.

Ocenjeni (subjektivni – doživljeni) kvalitet predstavlja nivo kvaliteta kakvim ga korisnici doživljavaju. Percepcija korisnika u vezi sa kvalitetom isporučene usluge zavisi od njihovog ličnog iskustva sa transportnom uslugom i od informacija koje dobijaju o usluzi – od isporučilaca ili iz drugih izvora – ili od sopstvene okoline.

Pošto je jedan od postavljenih ciljeva disertacije da se kroz razvoj modela u okviru disertacije pruži doprinos unapređenju kvaliteta sistema javnog masovnog transporta putnika i usluge koju sistem pruža, akcenat pregleda literature u nastavku biće na realizovanom kvalitetu usluge, odnosno na percepciji kvaliteta usluge od strane operatora kao pružaoca transportne usluge i putnika kao korisnika usluge.

Na Slici 3.2. prezentovana su osnovna svojstva kvaliteta transportne usluge i sistema javnog masovnog transporta (Filipović, S. i Stanković, R. 1996), bazirana na svetskim standardima, koja se mogu opisati kao kompleks kvantitativnih i opisno uporedivih karakteristika sistema koje su okrenute korisniku ili kao kompleks karakteristika pouzdanosti tehničkih sistema i organizaciono-tehnoških sistema (*International Electrotechnical Commission*, 1999).



Slika 3.2. Svojstva kvaliteta usluge i sistema javnog masovnog transporta

Na prezentovanoj slici istaknuto je svojstvo raspoloživosti usluge, koje se sastoji od dva podsvojstva: pristupačnosti i neprekidnosti. Pristupačnost usluge se može definisati kao spremnost sistema da uslugu pruži na mestu (raspoloživost u prostoru) i u trenutku (raspoloživost u vremenu) zahtevanom od strane korisnika. Sposobnost da se jednom pružena usluga nastavi pružati u datom vremenskom periodu u okviru zadatih uslova naziva se neprekidnost. Ovo podsvojstvo praktično karakteriše pouzdanost funkcionisanja sistema javnog masovnog transporta putnika, odnosno pouzdanost realizacije svih planiranih parametara kvaliteta i obima transportne usluge.

Mnoge međunarodne studije, kao i studije rađene u našoj zemlji, pokazuju da su najznačajnija svojstva kvaliteta usluge koja utiču na modalnu raspodelu putovanja, upravo ona vezana za pouzdanost funkcionisanja sistema (Bates i dr., 2001; Rietveld i dr., 2001; Filipović i dr., 2009).

Konstantan ekonomski razvoj i povećanje kvaliteta života uopšte dovode do povećanja vrednosti vremena i vrednosti pouzdanosti usluge koju pruža sistem (Tahmasseby, 2009). Istraživanje urađeno tokom poslednjih decenija pokazuje da je pouzdanost usluge koju pruža transportni sistem odlučujući faktor u izboru ponašanja ljudi (König–Axhausen, 2002).

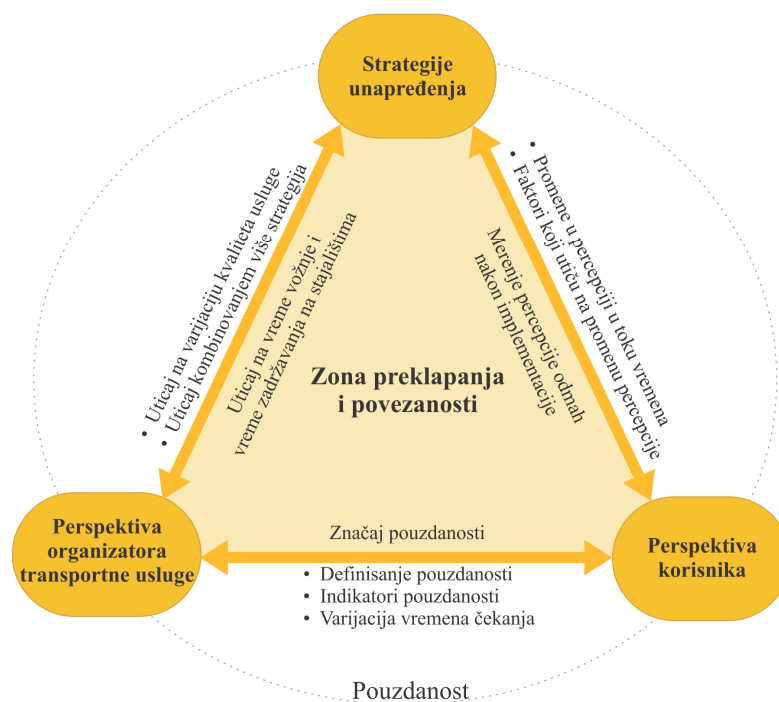
Pouzdanost funkcionisanja može biti presudni faktor prilikom izbora kako vida transporta stanovnika grada (Turnquist–Bowman, 1980), tako i izbora određene linije u okviru sistema javnog masovnog transporta putnika (Schmöcker–Bell, 2002; Liu–Sinha, 2007). Pouzdanost usluge javnog masovnog transporta smatra se kritično važnom za većinu korisnika, jer na njih negativno utiču posledice povezane sa nepouzdanošću, kao što su dodatno vreme čekanja na stajalištima, kašnjenje ili čak i prevremen dolazak na destinaciju i propuštene veze (presedanja), što povećava njihovu anksioznost i neugodnost (Bates i dr., 2001; Rietveld i dr., 2001). Mnogi istraživači su u svojim analizama došli do zaključka da je, nakon bezbednog stizanja na planirano odredište, pouzdanost funkcionisanja najvažnije svojstvo kvaliteta usluge koju sistem pruža (Taylor i dr., 2007; Iseki–Taylor, 2010).

Na osnovu ovoga može se reći da nepouzdanost funkcionisanja sistema prouzrokuje smanjenje postojećeg broja korisnika sistema i odbijanje potencijalnih korisnika. Nepouzdanost funkcionisanja konačno dovodi do izgubljenog prihoda sistema i javne podrške, kada putnici odustaju od sistema javnog masovnog transporta u potrazi za alternativnim vidovima transporta (Abkowitz–Tozzi, 1987; Clotfelter, 1993).

Postoji širok spektar definicija koncepta pouzdanosti funkcionisanja sistema javnog transporta putnika. Pouzdanost usluge se može definisati i kao varijacija svojstava usluge i efekata te varijacije na ponašanje korisnika (putnika), ali i na performanse operatora (Abkowitz i dr. 1978). Pružanje pouzdane usluge za Levinsona (1991) znači održavanje planiranog rasporeda rada (reda vožnje), održavanje konstantnog intervala i minimizacije varijacije maksimalnog protoka putnika. Merenje performansi usluge i efekata poboljšanja pouzdanosti dodatno složenim čine razlike u percepciji pouzdanosti

između korisnika usluge (putnika) i pružaoca usluge (operatora) (Cham, 2006). Navedena složenost je u skladu i sa prezentovanim oblicima kvaliteta usluge, pošto je veoma redak slučaj da se dva vida kvaliteta usluge, u ovom slučaju subjektivni i objektivni, u potpunosti poklapaju.

Diab i dr. (2015) u svom radu daju sveobuhvatnu analizu pouzdanosti javnog transporta putnika iz različitih perspektiva. Preciznije rečeno, pokušavaju da identifikuju perspektive korisnika i operatora, istovremeno povezujući obe perspektive sa empirijskim studijama koje istražuju uticaj različitih strategija na unapređenje pouzdanosti. Na Slici 3.3. su prezentovani glavni rezultati do kojih su autori došli. Kako su autori naveli, osenčena površina unutar strelica pokazuje oblasti preklapanja i razumevanja između dve perspektive. Područje izvan strelica pokazuje nepovezane oblasti, što u stvari označava važne praznine i neusaglašenosti u razumevanju pouzdanosti. Faktori u ovoj oblasti moraju biti integrisani i detaljno analizirani kako bi se pružaocu usluge (operatoru) omogućilo dostizanje višeg nivoa kvaliteta usluge, a koju bi korisnik percipirao na pozitivan način.



Slika 3.3. Struktura istraživanja i glavni rezultati (izvor: Diab i dr., 2015)

Vreme vožnje iz perspektive korisnika i operatora predstavlja zajednički pokazatelj pouzdanosti funkcionisanja. Pored vrednosti vremena vožnje, značajan uticaj na

pouzdanosti ima i varijacija vremena (odstupanje od prosečnih realizovanih ili odstupanje od planiranih vrednosti).

Svakodnevna varijacija vremena putovanja pogoršava pouzdanost sistema kroz povećanje vremena vožnje i vremena čekanja korisnika na stajalištima. Smanjenje varijacije vremena putovanja je veoma cenjeno od strane korisnika (Bates i dr. 2001; Lam–Small 2001). Pored toga što smanjuje anksioznost i stres izazvan neizvesnošću, smanjenje varijacije vremena putovanja utiče i na izbor vremena početka putovanja, kao i na izbor trase odnosno u slučaju sistema javnog transporta putnika linije koja će biti korišćena za realizaciju putovanja (Sun i dr. 2003). Bates i dr. (2001) su u svom radu naveli da je redukcija varijacije vremena putovanja ima isti ili veći značaj od redukcije prosečnog vremena putovanja. Kod određenih autora je varijacija vremena putovanja usvojena i kao mera performansi, pošto utiče na pouzdanost sistema javnog transporta putnika. Poznavanje varijacije vremena putovanja je veoma značajno i u procesu kreiranja redova vožnje za linije javnog masovnog transporta putnika, posebno zbog suprotstavljenih ciljeva, gde planeri pokušavaju da kroz kreiranje reda vožnje u isto vreme smanje operativne troškove, ali i povećaju tačnost i ravnomernost u radu. Poznavanje varijacije je posebno značajno u pogledu definisanje dodatnog vremena na terminusima (vremena terminiranja) ili na određenim sektorima koji su planirani za „peglanje“ reda vožnje (Kimpel i dr. 2004).

Značaj pouzdanosti funkcionisanja i vremena putovanja za korisnike javnog masovnog transporta putnika dokazan je i kroz niz istraživanja sprovedenih u okviru izrade studijsko-istraživačkih projekata³ na Katedri za drumski i gradski transport putnika Saobraćajnog fakulteta u Beogradu. Na Slici 3.4. dati su dijagrami rangiranja značaja pojedinih svojstava kvaliteta transportne usluge, koji su rezultati sprovedenih istraživanja u više različitih gradova u Srbiji. Za svako svojstvo na dijagramima je data vrednost prosečnog ranga značajnosti, koja pokazuje koliko je određeno svojstvo

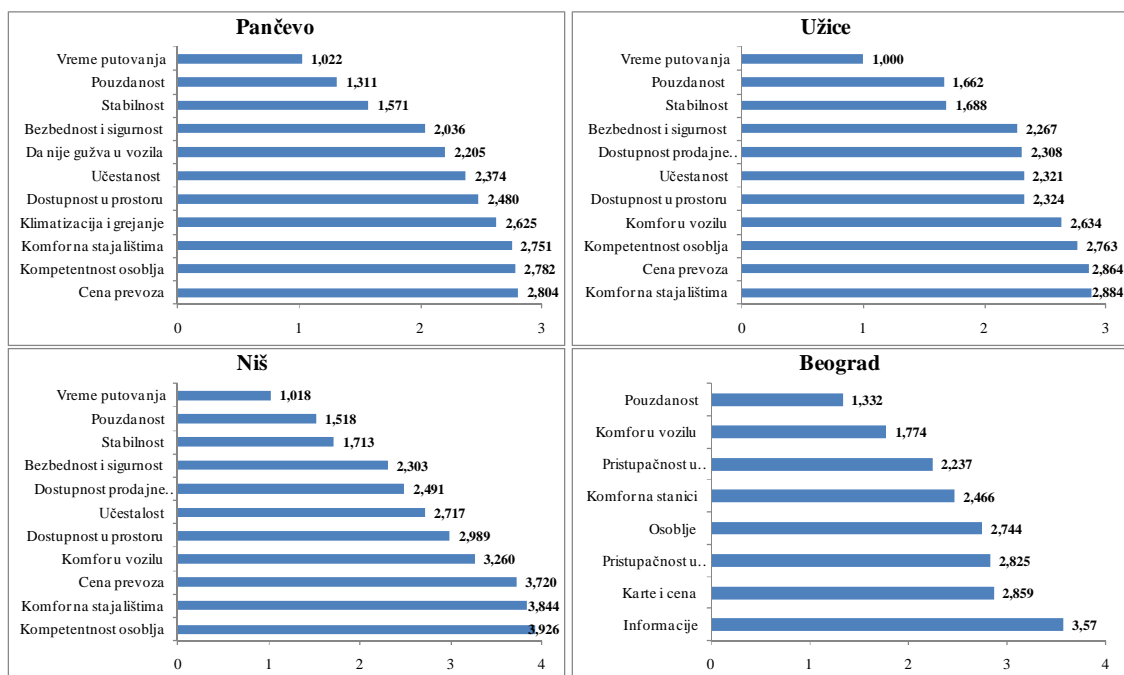
³ Tica, S., Bajčetić, S. i dr. (2011). Istraživanje parametara kvaliteta prevozne usluge za 2010. godinu.

Tica, S., Bajčetić, S. i dr. (2012). Istraživanje stavova korisnika i eksperata, transportnih potreba i zahteva u sistemu javnog masovnog transporta putnika u Pančevu.

Tica, S., Bajčetić, S. i dr. (2013). Istraživanja u cilju unapređenja javnog gradskog i prigradskog prevoza putnika na teritoriji grada Niša.

Tica, S., Bajčetić, S. i dr. (2013). Studija opravdanosti organizovanja lokalnog javnog prevoza na teritoriji grada Užica: Analiza postojećeg stanja sistema javnog masovnog transporta putnika u gradu Užicu.

transportne usluge značajno korisnicima (1 – na prvom mestu prema značaju, najznačajnije).



Slika 3.4. Prosečan rang značaja pojedinih svojstava transportne usluge

Prezentovani rezultati sprovedenih istraživanja pokazuju da su u svim navedenim sistemima, bez obzira na njihovu veličinu i broj korisnika koji opslužuju, vreme putovanja i pouzdanost funkcionisanja daleko najznačajnija dva svojstva kvaliteta transportne usluge.

Primarni značaj pouzdanosti funkcionisanja za korisnike sistema javnog masovnog transporta u Beogradu pokazali su u svom radu Bajčetić i dr. (2017). U radu su autori prezentovali upotrebu inženjerske metode *Quality Function Deployment* (QFD) u sistemu javnog masovnog transporta putnika sa ciljem definisanja zahteva korisnika i osnovnih svojstava usluge kojima se može postići najveće unapređenje u kvalitetu usluge. QFD predstavlja sistemski proces planiranja usluga koji počinje Fazom I, u kojoj se definišu želje, potrebe i očekivanja korisnika na osnovu rezultata istraživanja. Nakon toga, u okviru Faze II se utvrđuju kritične komponente usluga koje zahtevaju detaljniju analizu. U Fazi III se utvrđuju kritični parametri procesa proizvodnje odnosno pružanja usluga i, na kraju, kroz Fazu IV se utvrđuju postupci kontrole kvaliteta usluga odnosno navode se uputstva i mere koje treba preduzeti za realizaciju samog procesa sa sigurnošću.

QFD metoda je primenjena u procesu definisanja usluga u sistemu JMTP, kroz osluškivanje „glasova korisnika“ transportne usluge, identifikaciju njihovih potreba i želja, a sve sa ciljem njihovog objedinjavanja u zahteve prema sistemu JMTP koji bi se uvrstili u sam proces kreiranja transportne usluge. Subjektivni stavovi korisnika osnova su za definisanje najznačajnijih svojstava usluge, onih koja imaju najveći uticaj na nivo kvaliteta usluge koja se pruža korisnicima. Iz tog razloga, autori (Bajčetić i dr., 2017) su za dalju analizu istraživanja odabrali Fazu I, čiji rezultati predstavljaju ključne zahteve korisnika. Utvrđivanje ključnih zahteva i njihovih pojedinačnih značaja, kao i ključnih svojstva usluge, neophodno je za proizvodnju transportne usluge zahtevanog kvaliteta koja dovodi do zadovoljstva korisnika i ostvarenja prednosti na tržištu.

Sam proces definisanja usluge u sistemu JMTP obuhvatio je devet međusobno povezanih koraka kroz koje se od zahteva korisnika došlo do konačnih rešenja vezanih za strukturu i kvalitet transportne usluge.

Korak 1 – Identifikacija zahteva korisnika. Zahtevi korisnika predstavljaju osnovne ulazne podatke procesa primene QFD metode, odnosno osnovu za formiranje matrice kvaliteta. Definisanje zahteva prema sistemu (osnovnih svojstava i podsojstava transportne usluge) osnovni je cilj istraživanja očekivanog kvaliteta usluge.

Korak 2 – Određivanje značajnosti zahteva korisnika. U cilju određivanja značajnosti zahteva korisnika, u okviru ovog koraka izvršeno je rangiranje značaja pojedinih svojstava (podsojstava) kvaliteta transportne usluge. Za svako odabrano svojstvo (podsojstvo) korisnici su se izjašnjavali o nivou značaja. Rezultati istraživanja su pokazali da najveći značaj za korisnike imaju: tačnost i redovnost (podsojstva pouzdanosti funkcionisanja) i učestalost (pristupačnost u vremenu).

Korak 3 – Poređenje sa konkurencijom. U okviru ovog koraka je cilj obezbediti bolju uslugu u odnosu na konkurenciju sa kojom je izvršeno poređenje. Za uporednu analizu odabran je individualni prevoz (putničkim automobilima), prvenstveno zbog značaja porasta stepena motorizacije i svih negativnih posledica izazvanih prekomernim korišćenjem putničkih vozila.

Korak 4 – Definisanje karakteristika usluga. Karakteristike transportne usluge koje imaju uticaja na zadovoljenje svakog od ispostavljenih zahteva definišu se u okviru ovog koraka. Svaka karakteristika odgovara jasno definisanom funkcionalnom zahtevu, koji je formiran na osnovu zahteva korisnika, a poboljšanjem karakteristika postiže se

viši kvalitet transportne usluge, bolje performanse, ali se i zadovoljavaju postavljeni funkcionalni zahtevi, čime se posledično utiče na zadovoljenje očekivanog kvaliteta usluge.

Korak 5 – Korelacije zahteva korisnika i karakteristika usluga. Kroz glavnu matricu kuće kvaliteta uspostavljena je korelacija između zahteva korisnika i aktivnosti koje učestvuju u formiranju usluge. Intenzitet odnosa je prikazan različitim simbolima valentnosti 1–3–9 (ocena 1 označava slabu povezanost, ocena 3 srednju, a ocena 9 jaku povezanost). U Tabeli 3.1. data je kompletna matrica međuzavisnosti zahteva korisnika i karakteristika usluge.

Tabela 3.1. Matrica međuzavisnosti korisničkih zahteva i karakteristika usluge

Zahtevi korisnika	Karakteristike usluge koji opisuju zahteve kupaca
Vreme putovanja	- interval - brzina obrta - stajalište
Pouzdanost (da nema otkaza rada sistema)	- tehnički ispravno vozilo - osoblje (nedolazak vozača)
Stabilnost (da nema ekscenih pogoršanja)	- interval - frekvencija
Tačnost i redovnost (da vozila dolaze i polaze na vreme)	- interval - frekvencija
Bezbednost i sigurnost	- vozilo (oprema i enterijer) - okruženje na stajalištima - osoblje (vozač)
Komfor u vozilu 1 (da nije gužva u vozilu)	- kapacitet vozila - interval
Učestalost (da ima puno polazaka)	- frekvencija
Dostupnost u prostoru (da je kratko pešačenje do i od stanice)	- međustanično rastojanje - gustina transportne mreže - koeficijent pešačke dostupnosti
Komfor u vozilu 2 (klimatizacija i grejanje)	- vozilo (oprema i enterijer)
Cena prevoza (da cena odgovara kvalitetu usluge)	- cena karata - asortiman karata - tarifna politika (povlašćene kategorije)
Komfor na stajalištima (čistoća, zaštita od atmosferskih uticaja)	- oprema na stajalištima - informisanost korisnika
Kompetentnost osoblja (stručno i ljubazno osoblje)	- edukacija osoblja

Korak 6. Korelacije između karakteristika usluga. U okviru krova kuće kvaliteta je matrica koja ukazuje na eventualne konfliktne ciljeve između dve karakteristike.

Međuzavisnost je prikazana odgovarajućim simbolima, a sama korelacija može biti izrazito pozitivna, pozitivna, negativna i izrazito negativna.

Korak 7 – Plan kvaliteta. U ovom koraku se definiše plan kvaliteta, u koji je uključen kriterijum značaja korisnika, koji se koristi u strateškom delu upravljanja sistemom JMTP na tržištu. Plan se sastoji iz: kriterijuma značaja korisnika (Z_k); ciljne vrednosti (C_v) kojoj se teži za unapređenje imidža sistema JMTP na tržištu – ocenjuje se na skali od 1 do 5, pri čemu 1 označava promene, 3 unapređenje, 5 usluga bolja od konkurentske; faktora prodaje (F_p), – dodeljuje se 1 ukoliko usluga ima negativan efekat prodaje i 2 ukoliko usluga ima pozitivan efekat prodaje. U konkretnom slučaju sistema javnog transporta putnika u Beogradu vrednosti ovih parametara su sledeće:

- Ciljna vrednost (C_v) je za većinu kriterijuma 1, odnosno teži se promenama, dok se tri svojstva (bezbednost i sigurnost, komfor na stajalištima i kompetentnost osoblja) treba unaprediti (ciljna vrednost 3). Samo je izdvojeno svojstvo cena i usluga, za koje je ciljna vrednost usluga bolja od konkurentnih vidova transporta, a pre svega u odnosu na individualni transport.
- Negativan efekat prodaje (faktor prodaje – F_p sa vrednošću 1) imaju svojstva komfora u vozilu i na stajalištima, kao i karakteristike osoblja, dok je ostalim elementima usluge dodeljena pozitivna vrednost ovog efekta, odnosno faktor prodaje ima vrednost 2.

Apsolutna vrednost značaja (A_v) za svaki kriterijum usluge značajan za korisnike (svojstvo kvaliteta) se dobija preko modela:

$$A_v = Z_k \cdot K_r \cdot F_p \quad (3.1)$$

Posmatrano po apsolutnoj vrednosti značaja, najvažniji kriterijumi usluge su ubedljivo cena prevoza (50), bezbednost i sigurnost (48), kao i tačnost i ravnomernost (20).

Korak 8 – Analiza karakteristika usluga. U pretposlednjem koraku, na osnovu analize rezultata prikupljenih anketa određen je apsolutni značaj pojedinih karakteristika A_z , dobijen kao aritmetički zbir svih proizvoda značaja zahteva korisnika Z_k i stepena korelacije svake karakteristike usluge K_r , a prema sledećem modelu:

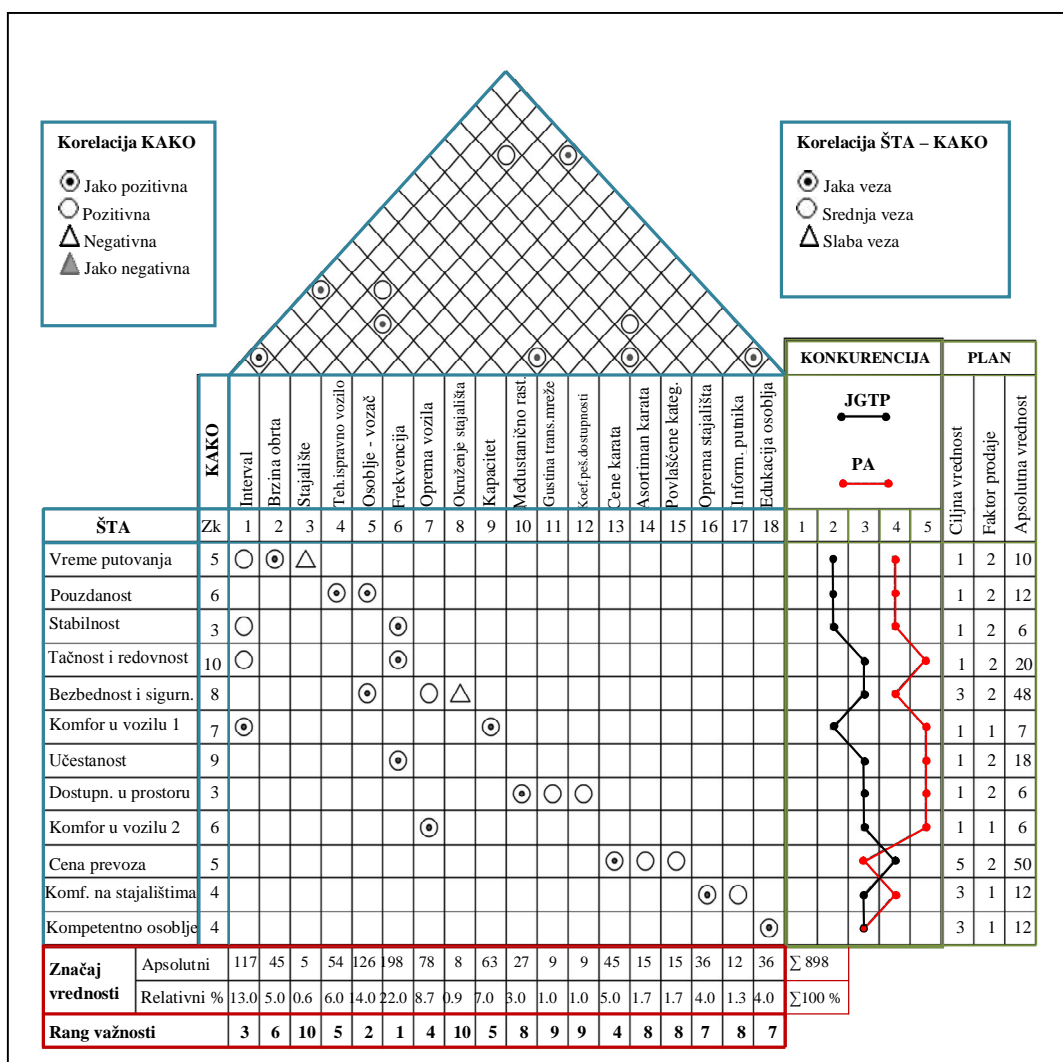
$$A_{z,j} = \sum_{i=1}^d Z_{k,i} \cdot K_{r,i} \quad (3.2)$$

gde je $i = 1, \dots, d$; d – broj izabranih zahteva korisnika; $j = 1, \dots, u$; u – broj karakteristika usluga.

Zatim su izračunate relativne vrednosti (Rz), odnosno procentualno učešće, korišćenjem modela:

$$R_{z,j} = \frac{A_{z,j}}{\sum_{j=1}^u A_{z,j}} \cdot 100 [\%] \quad (3.3)$$

Analizom je ustanovljeno da za kvalitetan transport putnika najveći uticaj imaju parametri funkcionisanja sistema (pouzdanosti): frekvencija, sa relativnim značajem 22,0%; osoblje (vozači), sa relativnim značajem 14,0%; interval, sa relativnim značajem 13,0%. Zatim slede karakteristike vozila: oprema vozila, sa relativnim značajem 8,7%, kapacitet vozila, sa 7,0%; i pouzdanosti vozila (tehnička ispravnosti), sa 6,0%. Rezultati primene kuće kvaliteta prezentovani su na narednoj slici (3.5).



Slika 3.5. Primena kuće kvaliteta u unapređenju kvaliteta transportne usluga u sistemu JMTP

Korak 9 – Rang važnosti karakteristika usluge. Na osnovu apsolutnog i relativnog značaja svakoj od karakteristika usluge dodeljen je rang značajnosti. U okviru ovog koraka rangirane su važnosti realizacije pojedinih karakteristika usluge dodeljivanjem vrednosti 1 najvažnijem rešenju i 10 najmanje važnom rešenju. Redosled karakteristika usluge prema značajnosti prati njihov apsolutni i relativni značaj, tako da najveću važnost treba dati frekvenciji vozila – rang 1, osoblju (vozačima) – rang 2; intervalu – rang 3. Zatim slede oprema vozila, optimalni kapaciteti vozila i pouzdanosti vozila (tehnička ispravnosti), koji su rangirani na 4, 5. i 6. mestu, respektivno.

U okviru prethodno opisanog rada kao studija slučaja iskorišćen je sistem javnog masovnog transporta u Beogradu, koji je, kao što će biti prezentovano u narednim poglavljima, korišćen kao studija slučaja i za implementaciju i testiranje modela definisanih u okviru disertacije. Istraživanjem stavova više od 15.000 korisnika i primenom prve faze (prvog koraka) QFD metode dokazano je da u cilju unapređenja sveukupnog kvaliteta usluge i stepena zadovoljstva korisnika organizatori transportne usluge (stručno telo gradske uprave i operatori) treba pre svega da se fokusiraju na unapređenje pouzdanosti funkcionisanja sistema i kvaliteta angažovanog voznog parka (vozila). Sveobuhvatna istraživanja sprovedena za potrebe rada Bajčetić i dr. (2017) i njihovi rezultati su autoru disertacije poslužili kao motiv za utvrđivanje osnovnih smernica razvoja modela predviđenih u okviru disertacije, odnosno ukazali su na potrebu za razvoj takvih modela kojima je osnovni imperativ uticaj na povećanje nivoa kvaliteta isporučene transportne usluge, a koji se prevashodno ogleda u povećanju pouzdanosti funkcionisanja sistema.

Iako je neosporan značaj istraživanja i analize varijacije vremena putovanja, do sada je njima u stručnim i naučnim krugovima malo pažnje bilo posvećeno posebno zbog komplikovane i skupe procedure praćenja i skupljanja neophodnih podataka kroz vreme. Ovaj problem je prevaziđen razvojem savremenih sistema za praćenje vozila baziranih na GPS tehnologiji, sistema za automatsko brojanje putnika i sl. Nakon pojave ovih sistema, koji obezbeđuju sveobuhvatne baze podataka o funkcionisanju sistema javnog masovnog transporta putnika, došlo je do razvoja raznih pristupa i modela obrade i analize prikupljenih podataka. Značajnom delu istraživanja i razvijenih modela

cilj je bio utvrđivanje faktora koji utiču kako na vrednost vremena vožnje, tako i na njegovu varijaciju.

U okviru ove doktorske disertacije prezentovan je jedan od načina analize i obrade podataka o funkcionisanju realnog sistema javnog masovnog transporta putnika u Beogradu.

3.2. Faktori od uticaja na vreme prevoza u javnom masovnom transportu putnika

Abkowitz i Engelstein (1983) su bili među prvim autorima koji su analizirali dužinu i varijaciju srednjeg vremena vožnje vozila na linijama javnog gradskog transporta putnika na osnovu empirijskih podataka.

Autori koji su se bavili analizom faktora koji utiču na vreme vožnje i vreme prevoza i pronalaženjem odgovarajućih korektivnih intervencija u cilju postizanja većeg nivoa pouzdanosti pre navedena dva autora bili su ograničeni na upotrebu simulacionih modela kojima su opisivali funkcionisanje realnog sistema (Turnquist–Bowman, 1980, Koffman, 1978). Simulacioni modeli su predstavljali iznuđenu posledicu, koja je pre svega bila prouzrokovana velikim troškovima neposrednih terenskih istraživanja karakteristika funkcionisanja sistema javnog transporta putnika u realnom okruženju.

U svom istraživanju su Abkowitz–Engelstein (1983), koristeći se višestrukom korelacijom, analizirali uticaj različitih faktora koji karakterišu jednu liniju u vremenu i prostoru na prosečnu vrednost i standardno odstupanje vremena prevoza na određenoj deonici. Glavna pretpostavka kojom su se vodili autori je da su evidentirane vrednosti vremena prevoza nezavisne između dve susedne deonice.

Kao faktore od uticaja, odnosno nezavisne promenljive koje su planirane da budu analizirane modelom, autori (Abkowitz–Engelstein, 1983) su izdvojili sledeće karakteristike deonica u prostoru i vremenu:

- Dužina deonice – logično je bilo očekivati da dužina deonice ima uticaj na prosečnu vrednost i standardno odstupanje vremena prevoza i da će njen uticaj biti pozitivan,
- Broj signalisanih raskrsnica – u ovom slučaju postoji dilema da li bi u model trebalo uključiti i broj nesignalisanih raskrsnica ali je, zbog nedostatka podataka

i složenog procesa njihovog prikupljanja, odlučeno da se u obzir uzme samo broj signalisanih raskrsnica,

- Broj stajališta na deonici – ovaj faktor predstavlja aproksimaciju vremena potrošenog na usporavanje i ubrzavanje vozila,
- Parkiranje vozila – u radu se ovaj faktor prezentuje kroz procenat ukupne dužine deonice na kojoj je dozvoljeno parkiranje vozila, a u suprotnom faktoru se dodeljuje vrednost 0,
- Ukupan broj ulazaka i izlazaka putnika na opsluženim stajalištima – aproksimira vreme zadržavanja vozila na stajalištima,
- Period funkcionisanja – u radu je celokupan period rada linije podeljen na četiri karakteristična perioda kojima se reprezentuju sveukupni uslovi u ostalom dinamičkom saobraćaju,
- Smer kretanja – na osnovu prethodnih istraživanja, smerovi kretanja definišu se kao smer ka gradu (centru grada) i smer iz grada, i očekuje se pozitivan uticaj ovog faktora na zavisnu promenljivu,
- Odstupanje vremena prevoza na prethodnoj deonici – ovaj faktor je uključen u model samo kod analize uticaja na standardno odstupanje vremena prevoza.

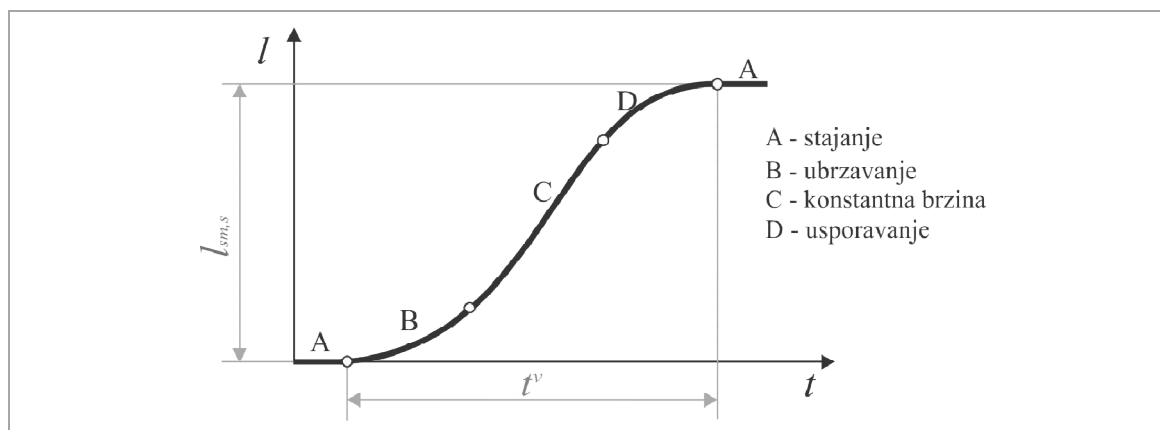
Faktori koje su autori naveli kao potencijalno značajne, ali koji nisu bili obuhvaćeni opisanim modelom zbog nedostatka podataka, jesu osobine vozača i karakteristike vremenskih uslova.

U zaključnim razmatranjima izdvaja se nekoliko rezultata sprovedene analize. Model je pokazao da je prosečno vreme prevoza na određenoj deonici pod značajnim uticajem dužine deonice, ukupnog broja ulazaka i izlazaka putnika, kao i broja signalisanih raskrsnica, dok je u manjoj meri pod uticajem parkiranja, perioda u toku dana i smera kretanja. Što se tiče standardnog odstupanja, autori ističu da su jedini faktori koji značajno utiču na ovu veličinu dužina deonice koja se analizira i varijacija vremena na prethodnoj deonici.

Levinson (1983) smatra da varijacije vremena vožnje i vremenskih gubitaka zajedno utiču na varijaciju vremena prevoza. Generalno, varijacija vremena vožnje je proporcijalna samom vremenu vožnje, kao i dužini linije.

U radu je data detaljna analiza saobraćajne brzine, brzine prevoza i vremena zadržavanja na stajalištima na bazi podataka prikupljenih iz nekoliko različitih sistema

transporta putnika koji funkcionišu u gradovima u Sjedinjenim Američkim Državama. Autor je vreme prevoza između stajališta podelio, u zavisnosti od modusa vožnje, na periode ubrzavanja, konstantne vožnje, usporavanja i vreme zadržavanja na stajalištu, a za svaki od navedenih delova su kroz analizu prikupljenih podataka utvrđene karakteristične veličine i opsezi, kao i parametri od uticaja (Slika 3.6).



Slika 3.6. Komponente vremena prevoza vozila na međustaničnom rastojanju

Jedan od glavnih zaključaka sprovedene analize je da na vreme prevoza, a samim tim i na brzinu vozila javnog masovnog transporta putnika, najveći uticaj imaju frekvencija vozila na stajalištima, zadržavanje na stajalištima, kao i vreme ubrzavanja i usporavanja. Autor je do navedenih zaključaka došao analizirajući prikupljene podatke i utvrđujući zavisnosti između analiziranih veličina. Takođe, autor smatra da bi smanjenje broja stajališta sa osam na šest po milji i smanjenje zadržavanja vozila na stajalištima sa 20 na 15 sekundi po stajalištu smanjilo ukupno vreme prevoza na deonici od 4,3 do 6 minuta za svaku milju.

Naravno, mora se napomenuti da je u realnosti zaista mala verovatnoća da se istovremeno može realizovati slučaj u kome bi se broj stajališta na određenoj deonici smanjio, a pri tome da se u isto vreme očekuje smanjenje zadržavanja vozila na stajalištima. Putnici kojima je na određenoj liniji ukinuto stajalište mogu odustati od korišćenja navedene linije (manji procenat) ili mogu početi sa korišćenjem drugih stajališta (veći procenat). Prelazak određenog broja putnika bi prouzrokovao povećanje broja korisnika koji ulaze u vozilo ili izlaze iz njega na preostalim stajalištima, a samim tim i povećanje vremena zadržavanja vozila na stajalištu koje je namenjeno izmeni putnika.

U svom radu Strathman i Hopper (1993) dele uzroke loše tačnosti u sistemu na dve grupe: interne i eksterne uzroke. U interne uzroke autori svrstavaju ponašanje/iskustvo vozača, osetljivost projektovanog reda vožnje (u pogledu definisanog intervala, vremena prevoza i vremena terminiranja) i strukture linije (u pogledu njene dužine, broja stajališta, rasporeda ulazaka i izlazaka putnika duž linije). U eksterne faktore autori svrstavaju gustinu dinamičkog saobraćaja, saobraćajne nezgode, signalne planove na signalisanim raskrsnicama, vremenske uslove i uzdužno parkiranje na trasi linije.

Strathman i Hopper (1993) u daljem razmatranju faktora od uticaja ističu zapažanje da određeni autori smatraju da se faktori koji utiču na tačnost u sistemu mogu svrstati u one koje je moguće kontrolisati i one koje nije. Ovakvu tvrdnju, međutim, opovrgavaju, pozivajući se na stavove drugih istraživača koji tvrde da je sistem javnog masovnog transporta putnika sam po sebi stohastičan i da ga je kao takvog nemoguće u potpunosti kontrolisati. Za analizu uticaja navedenih faktora na tačnost vozila autori koriste multinominalni logaritamski model za izračunavanje verovatnoće pojave jednog od tri scenarija koji predstavljaju parove tri alternative (vozilo stiže ranije, na vreme ili kasni).

Sa druge strane, Shalaby i dr. (2001) u svom radu prezentuju model za predviđanje vremena prevoza vozila u sistemu javnog masovnog transporta putnika koji kao osnovu koristi korelacioni model kojim su definisani uticaji elemenata trase linija na ukupno vreme prevoza. Autori u razmatranjima problema polaze od konstatacije da je vreme prevoza kompleksna veličina u funkciji od dužine deonice, nivoa saobraćajnog zagušenja, vremenskih uslova, kontrole svetlosnih signala i mnogih drugih faktora, od kojih se mnogi ne mogu kvantitativno meriti. Takođe, autori u svom radu podsećaju na činjenicu da su mnogi faktori koji utiču na vreme prevoza, kao što je i gustina saobraćaja, stohastični u vremenu i prostoru, što posledično čini da su potencijalni modeli za predviđanje vremena prevoza izuzetno kompleksni i sa velikom verovatnoćom pogrešnih predviđanja.

Kako primećuju Shalaby i dr. (2001), veoma mali broj istraživača se u svojim radovima i istraživanjima bavio modelovanjem vremena prevoza vozila u sistemu javnog masovnog transporta, dok je, za razliku od njih, veliki broj onih koji su se u svojim radovima fokusirali na modelovanje uslova u saobraćaju i vremena vožnje privatnih vozila. Ovu pojavu autori obrazlažu tvrdnjom da je vreme prevoza vozila javnog masovnog transporta suštinski kompleksnije od onog kod privatnih vozila

(putničkih automobila) i samim tim značajno komplikovanije za modelovanje. Kao razlozi kompleksnosti navode se broj stajališta, broj putnika koji ulaz u vozilo ili izlazi iz njega i postojeće strategije kontrole realizacije reda vožnje, koji predstavljaju dodatne faktore (koji nisu prisutni kod putničkih automobila) i koji utiču na vreme prevoza kod vozila u sistemu JMTP.

Koristeći višestruku regresiju, Shalaby i dr. (2001) su kreirali model za proračun ukupnog vremena prevoza vozila na posmatranoj deonici. Modelom se definiše zavisnost ukupnog vremena prevoza na deonici od dužine deonice, gustine saobraćajnog toka, broja stajališta i broja signalisanih raskrsnica na deonici.

Faktori koji su kao nezavisne promenljive takođe bili uključeni u sprovedenu višestruku regresionu analizu, ali se zbog zanemarljivog uticaja na izlazni rezultat ne nalaze u konačnom modelu, jesu broj putnika koji ulazi u vozilo ili izlazi iz njega, postojanje traka za skretanje na raskrsnicama i dužina zelenog signala u ciklusu na signalisanim raskrsnicama. U prezentaciji modela autori ne ulaze u detaljan opis načina prikupljanja, obrade i konačnog oblika podataka korišćenih u testiranju modela. Postavlja se pitanje na koji način je iskazana gustina saobraćajnog toka na deonici i broj stajališta. Gustina saobraćajnog toka je veličina koja se na određenoj deonici menja od raskrsnice do raskrsnice, tako da nije jasno na koji način je autor kvantifikovao gustinu saobraćajnog toka na celokupnoj deonici. Broj stajališta je najčešće linearno srazmeran dužini deonice, pa se kao merodavna veličina ovog faktora najčešće uzima jedinični broj stajališta (stajališta/km), a da li se istim pristupom služio i autor navedenog rada se iz opisa korišćenih nezavisnih promenljivih ne može zaključiti.

Noland i Polak (2002) smatraju da se varijacija vremena prevoza može posmatrati iz tri različite perspektive: (1) varijacija vremena prevoza između dva vozila koja obavljaju transport putnika u isto vreme na istoj trasi linije, koja je najčešće prouzrokovana različitim vremenom čekanja na signalisanim raskrsnicama i pešačkim prelazima, različitim stilom vožnje i sl.; (2) varijacija vremena prevoza koja se realizuje u različitim periodima u toku dana, koja je prouzrokovana različitim uticajem ostalog dinamičkog saobraćaja, kao i različitim intenzitetima transportnih zahteva po periodima u toku dana na liniji; (3) varijacija vremena prevoza koja se realizuje u različitim danima i reprezentuje se kroz razliku vremena prevoza istih polazaka (isto vreme polaska) koji su realizovani u različitim danima u toku nedelje. Autori smatraju da na

varijaciju po danima utiču svi faktori navedeni u prethodne dve perspektive posmatranja.

U svom radu Mazlouni i dr. (2010) ispituju varijaciju vremena prevoza u sistemu javnog masovnog transporta putnika po danima u toku nedelje, fokusirajući se pre svega na dve dimenzije varijacije. Prvo, obim varijacije i njen oblik su ispitani kroz analizu distribucije vremena prevoza na odabranoj liniji, a nakon toga su pomoću višestruke regresione analize utvrđeni faktori koji utiču na dve mere varijacije vremena prevoza (standardno odstupanje i razliku između definisanih procenata merodavne raspodele).

Pored dužine deonice, za koju je od strane drugih autora već dokazano da značajno utiče na varijaciju vremena prevoza, broj stajališta i broj signalisanih raskrsnica, kao mesta na kojima vozila provode različito vreme u toku vožnje, takođe se smatraju faktorima koji značajno utiču na varijaciju ukupnog vremena prevoza. U svom radu su za potrebe analize definisali dva faktora – broj stajališta i broj signalisanih raskrsnica po jedinici dužine deonice koja se analizira. Za oba faktora su očekivane pozitivne vrednosti koeficijenata u okviru regresione analize.

Prema Mazlouni i dr. (2010), vozači koji krenu ranije sa polazne tačke, na kojoj je redom vožnje definisano vreme polaska, imaju duže vreme prevoza od vozača koji krenu na vreme ili kasnije od vremena definisanog redom vožnje. Prosečno vreme i standardno odstupanje razlike vremena polaska definisanog redom vožnje i realizovanog vremena polaska su dve mere koje su uvrštene u analizu potencijalnih faktora od uticaja. U svoju analizu faktora koji utiču na varijaciju vremena prevoza autori su uvrstili i namenu površina grada koje opslužuje deonica (deo linije) koji se analizira. Namena površina je grubo podeljena na dve grupe: naseljeni delovi grada i nenaseljeni (odnosno industrijski) delovi grada. Takođe, u analizu su kao faktor od uticaja uvršteni i vremenski uslovi. Vremenski uslovi su reprezentovani kroz prosečnu količinu padavina i standardno odstupanje količine padavina u posmatranom periodu vremena. Autori su prepostavili negativan koeficijent ovog faktora, podstaknuti mišljenjem da padavine mogu prouzrokovati smanjenje varijacije vremena prevoza, pošto su u ovim slučajevima najčešće zasićeni saobraćajni tokovi koji utiču na smanjenje varijacije vremena prevoza.

Posebne vrednosti analiziranih zavisnih i nezavisnih promenljivih date su za različite periode u toku dana (perioda funkcionisanja) kako bi se na taj način reprezentovali

sveukupni uslovi saobraćaja na deonicama koje se analiziraju. Izdvojena su četiri karakteristična perioda u toku dana: dva vršna (jutarnji i popodnevni) i dva vanvršna. Za vršne periode autor je pretpostavio pozitivan uticaj, dok je za vanvršne periode smatrao da ne utiču na analizirane zavisne promenljive.

U okviru ove analize, kao faktori koji su potencijalno mogli biti analizirani a nisu uvršteni u analizu su: karakteristike vozača, transportni zahtevi, varijacije saobraćajnog toka i saobraćajne nezgode.

Autori su koristili metodu postepene eliminacije kako bi se utvrdili odnosi između definisanih zavisnih i uvrštenih nezavisnih promenljivih. Rezultati sprovedene analize pokazali su da dužina linije, kao što je i očekivano, ima najveći pozitivan efekat na varijaciju vremena prevoza. Prema rezultatima do kojih su došli autori, za svaki kilometar povećanja deonice varijacija vremena prevoza će se povećati za 50% u slučaju da druge nezavisne promenljive ostanu nepromenjene. Broj signalisanih raskrsnica ima veći uticaj od broja stajališta na posmatranoj deonici, 22% i 13% respektivno.

Prosečno vreme i standardno odstupanje razlike vremena polaska definisanog redom vožnje i realizovanog vremena polaska su dva pokazatelja koji takođe, prema rezultatima do kojih su autori došli, imaju pozitivan uticaj na varijaciju vremena prevoza, što potvrđuje pretpostavku da vozila koja su krenula pre vremena ili na vreme imaju manju varijaciju vremena prevoza od vozila koja su krenula sa određenim kašnjenjem.

Namena površina, koju su autori uvrstili u analizu kao aproksimator transportnih zahteva i gustine ostalog dinamičkog saobraćaja, ima značajan uticaj na varijaciju vremena prevoza. Ovaj uticaj je posebno istaknut u periodima vršnih opterećenja. Namena površina je parametar koji utiče i uopšte na mobilnost stanovnika urbanog područja.

Kako su analizirane deonice velikih dužina, koje sadrže značajan broj stajališta, logično je bilo očekivati da će dužina deonice imati značajan uticaj na varijaciju vremena prevoza. Procentualni uticaj bi možda bio manji da su u radu analizirane manje deonice ili možda svako međustanično rastojanje na liniji, što bi omogućilo detaljnu analizu karakteristika vremena vožnje i čime bi se eliminisao uticaj vremena zadržavanja vozila na stajalištima. Takođe, namena površina, kao faktor od uticaja,

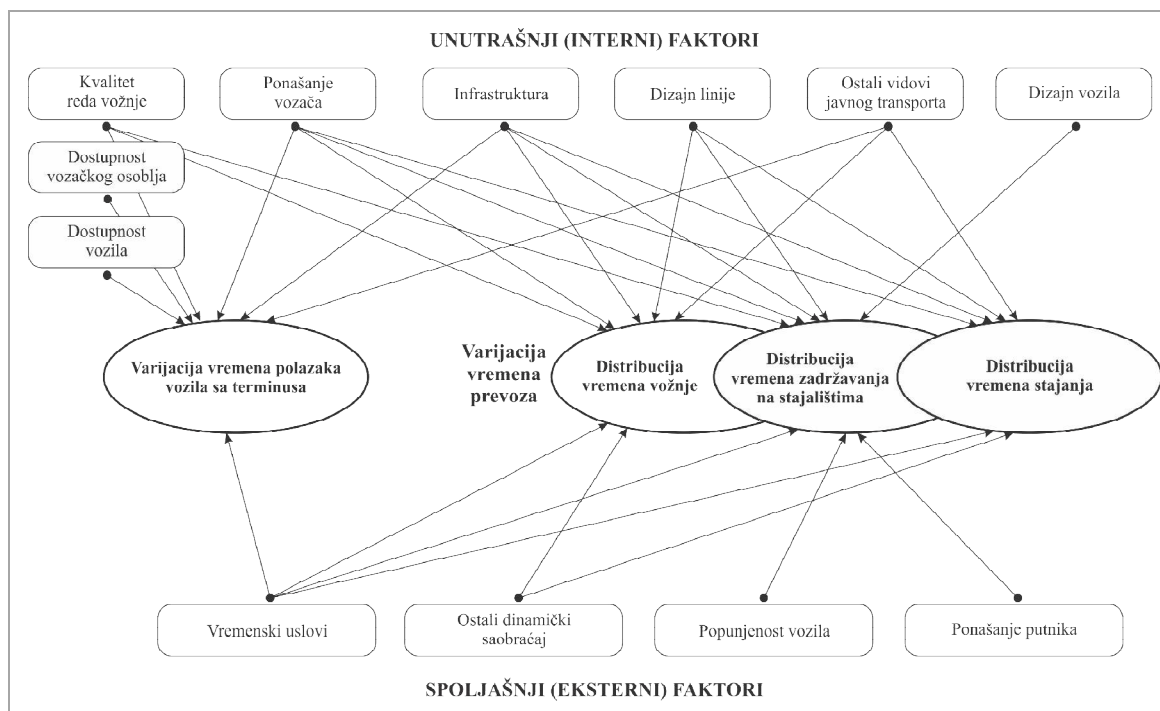
grubo je podeljena na industrijski i stambeni deo grada, što ne može kvalitetno da reprezentuje (aproksimira) transportne zahteve i uticaj ostalog dinamičkog saobraćaja.

Razlika vremena polaska definisanog redom vožnje i realizovanog vremena polaska je pokazatelj koji je, prema mišljenju autorâ, od značajnog uticaja na varijaciju vremena prevoza, ali isto tako sama varijacija vremena prevoza u povratnoj vezi utiče na razliku dva navedena vremena polaska. Postavlja se pitanje na koji način su autori prikupljali i analizirali navedene podatke, pošto kašnjenje vremena polaska na jednoj deonici može biti prouzrokovano varijacijom vremena prevoza na prethodnoj deonici, koja je prouzrokovana nekim drugim faktorom. Ovde se javlja značajna međuzavisnost između analiziranih nezavisnih i zavisnih promenljivih u vezanim deonicama, koja u radu nije uzeta u obzir niti je analizirana. Takođe, autori rada nisu posebnu pažnju posvetili karakteristikama trase linije.

Za razliku od njih, Chen i dr. (2009) su u svom radu poredili pouzdanost funkcionisanja na deonicama sa ekskluzivnim trakama za vozila JMTP-a i deonicama bez njih. Izvršene analize pokazale su da je na deonicama sa ekskluzivnim trakama za vozila JMTP-a viši nivo pouzdanosti funkcionisanja, koji se izražen u procentima kreće od 6 do 18% poboljšanja. Veće vrednosti procenata se odnose na periode vršnih opterećenja u toku dana. Isti autori prezentuju tri nova parametra performansi u pogledu pouzdanosti funkcionisanja vozila na liniji javnog gradskog transporta putnika i testiraju veze između dužine linije i planiranog intervala na veličine definisanih parametara pouzdanosti. U svojoj analizi autori dolaze do zaključka da dužina linije ima značajan uticaj na sva tri parametra pouzdanosti, dok definisani interval nema uticaj na parametar pouzdanosti koji reprezentuje vreme prevoza, odnosno zaključuju da veličina intervala ne utiče na varijaciju vremena prevoza vozila na liniji javnog gradskog transporta putnika.

Van Oort (2011) je na osnovu analiziranih radova više autora sublimirao faktore koji utiču na vreme prevoza vozila u javnom masovnom transportu. Na osnovu prezentovane Slike 3.7, može se zaključiti da i ovaj autor faktore od uticaja deli na dve osnovne grupe: unutrašnje (interne) i spoljašnje (eksterne). Na slici su prezentovani faktori i njihove veze, odnosno deo vremena prevoza na koji utiču. Kako bi detaljnije opisao faktore od uticaja i posebno naglasio na koji deo ukupnog vremena prevoza vozila na liniji utiču, autor je podelio vreme prevoza na tri dela: vreme vožnje, vreme zadržavanja

na stajalištima i vreme stajanja (zadržavanje vozila u toku poluobrta koje se ne realizuje na stajalištima i nije prouzrokovano izmenom putnika). Pored toga, autor posebno izdvaja varijaciju vremena polaska vozila sa terminusa.



Slika 3.7. Unutrašnji i spoljašnji faktori (izvor: Van Oort, 2011)

Glavni uzroci varijacije vremena polaska vozila sa terminusa su:

- dostupnost vozačkog osoblja,
- dostupnost vozila,
- dizajn i infrastruktura terminusa, što je posebno izraženo kod šinskih podsistema i kod terminusa koji koristi više različitih linija ili više različitih podsistema,
- kvalitet definisanog reda vožnje, pre svega u pogledu dodatnog vremena koje je redom vožnje planirano i namenjeno za „peglanje“ razlike između realizovanog i planiranog vremena prevoza,
- ponašanje vozača i
- vremenski uslovi, kao jedini spoljašnji faktor.

Kao glavne unutrašnje i spoljašnje uzroke varijacije vremena vožnje i vremena stajanja autor izdvaja:

- ponašanje vozača (stil vožnje),
- frekvenciju vozila javnog gradskog transporta putnika,

- konfiguraciju saobraćajne infrastrukture koju koriste trase linije,
- definisanje izgleda same linije, pre svega u pogledu dužine linije, broja stajališta, broja linija sa kojima se definisana trasa preklapa i sl.
- kvalitet definisanog reda vožnje – autor smatra da se kroz definisanje reda vožnje utiče na ponašanje vozača, a samim tim posredno i na vreme vožnje na liniji,
- ostali dinamički saobraćaj,
- vremenske uslove.

Faktori koji utiču na vreme zadržavanja vozila na stajalištima, prema izvršenoj analizi autora, su:

- ponašanje vozača,
- dizajn vozila – posebno u pogledu broja vrata i visine poda na vratima,
- dizajn platforme stajališta, koji utiče na ponašanje i poziciju (grupisanje) putnika, a samim tim i na vreme zadržavanja vozila u cilju izmene putnika,
- ponašanje putnika, posebno u pogledu rasporeda po vratima koja koriste za ulazak i izlazak, kao i u pogledu brzine ulazaka i izlazaka,
- popunjenost vozila – u vozilima koja su popunjena do granica kapaciteta može doći do otežane izmene putnika, a samim tim i do dužeg vremena neophodnog za završetak ove operacije.

3.3. Utvrđivanje vremena obrta kao ulaznog elementa za izradu redova vožnje

Strategije koje se koriste u cilju unapređenja pouzdanosti funkcionisanja linije javnog masovnog transporta mogu biti podeljene u dve grupe: preventivne i korektivne. Cilj preventivnih strategija je sprečavanje pojave nepouzdanosti funkcionisanja, dok se korektivne primenjuju kada je nepouzdanost funkcionisanja već prisutna. Svaka od strategija se primenjuje kako bi unapredila određeni aspekt pouzdanosti funkcionisanja, a sama primena određene strategije značajno zavisi od dostupnih podataka o funkcionisanju linije. Milkovits (2008) je u svom radu pružio sublimaciju svih preventivnih i korektivnih strategija. Navedene strategije prezentovane su u Tabelama 3.2. i 3.3.

Tabela 3.2. Preventivne strategije unapređenja pouzdanosti funkcionisanja linije (Izvor: Milkovits, 2008)

Strategija	Opis
Dizajn linije	Menjanje statičkih karakteristika linije posebno u pogledu njene dužine, broja stajališta i stepena nezavisnosti trase.
Prioritet na signalisanim raskrsnicama	Obezbeđivanje komunikacije između vozila i signalnih instalacija duž trase kako bi se obezbedio prioritetni prolaz kroz raskrsnice ili pristup stajalištu. Davanje prioriteta može biti uslovno u zavisnosti od funkcionisanja u odnosu na planirani red vožnje.
Rezervna vozila i vozači	Obezbeđivanje dovoljnog broja rezervnih vozila i vozača kako bi se nadomestili kvarovi vozila ili jednostavno nepojavljivanje na liniji. Takođe mogu biti značajni u slučaju neophodnosti angažovanja dodatnih kapaciteta na liniji.
Obuka vozača i disciplina	Minimiziranje uticaja ponašanja vozača na varijaciju vremena prevoza i vremena polaska sa terminusa. Disciplinske mere utiču na smanjenje odsustva sa posla.
Podršavanje reda vožnje	Povećanje vremena prevoza i vremena terminiranja u planiranom redu vožnje kako bi se najveći broj vožnji završio u planiranim okvirima i time se omogućilo da se naredni polazak održi na vreme.
Smanjenje vremena zadržavanja na stajalištima	Smanjenje vremena zadržavanja vozila na stajalištima kroz implementaciju inovativnih sistema naplate, promenu tehnologije izmene putnika, unapređenje tehnoloških karakteristika vozila.
Monitoring funkcionisanja	Monitoring funkcionisanja linije u realnom vremenu i aktivno upravljanje realizacijom planiranog reda vožnje. Ukoliko je došlo do narušavanja plana, dispečer može aktivirati neku od korektivnih strategija kako bi se unapredila pouzdanost funkcionisanja linije.

Tabela 3.3. Korektivne strategije unapređenja pouzdanosti funkcionisanja linije (Izvor: Milkovits, 2008)

Strategija	Opis
Zadržavanje vozila	Vozačima se nalaže da se zadrže određeni period vremena kako bi se postiglo ili željeno vreme polaska ili željeni interval sledenja između vozila.
Ubrzavanje vozila	Vozačima se nalaže da ubrzaju duž trase linije, tj. da voze brže nego u normalnim uslovima funkcionisanja. Ovo se postiže ili preskakanjem svih stajališta na liniji osim terminusa (ekspres linija), preskakanjem samo nekih stajališta duž linije (poluekspres linija) ili dozvoljavanjem samo izlazaka putnika (bez ulazaka na stajalištima duž linije).
Skraćivanje poluobrta	Skraćivanje poluobrta se najčešće vrši na dva načina. Vozila završavaju poluoobrta (polazak) pre poslednjeg stajališta (terminusa) i nastavljaju novi polazak u suprotnom smeru od tačke na kojoj se nalaze, ili vozila preskaču određeni broj stajališta na početku trase i počinju sa radom od određenog stajališta na trasi. Ove korekcije se vrše ili da bi se vozilo „vratilo“ u red vožnje ako od njega odstupa, ili da bi se eliminisao veliki interval koji je nastao između dva vozila na liniji.

Kao što se iz prezentovanih strategija može videti, korektivne strategije se aktiviraju samo u slučaju kada preventivne strategije nisu adekvatno sprovedene i ne daju željene rezultate. Podešavanje reda vožnje je jedna od najvažnijih preventivnih strategija u cilju obezbeđivanja pouzdanosti funkcionisanja linije, mada bi se moglo reći da kvalitetno planiranje veličina vremena prevoza i vremena terminiranja vozila nije samo pitanje pouzdanosti, već i efikasnosti funkcionisanja linije.

Za određivanje vremena prevoza i vremena terminiranja, prilikom procesa planiranja funkcionisanja linije javnog masovnog transporta putnika, mnogi planeri su prinuđeni da rade bez ikakvih podataka ili sa veoma ograničenim podacima o istoriji funkcionisanja. Oni se najčešće oslanjaju na podatke prikupljene u jednom danu funkcionisanja linije ili na osnovu žalbi korisnika usluge.

U analizi postojeće prakse kreiranja redova vožnje u slučaju kada nije dostupna detaljna i sveobuhvatna baza o funkcionisanju sistema, koju su izvršili Furth i dr. (2006), navodi se da je najčešći slučaj da planeri za vreme prevoza usvajaju prosečno realizovano vreme prevoza, a da je u tom slučaju vreme terminiranja funkcija usvojenog vremena prevoza (usvojeni procenat koji je pre svega zasnovan na iskustvu planera i na ličnoj filozofiji kreiranja reda vožnje).

Kada su podaci o funkcionisanju sistema dostupni, planeri najčešće primenjuju iskustvene metode (*rules of thumb*) kako bi našli balans između planirane brzine i pouzdanosti funkcionisanja. Jedan od iskustvenih načina da se definiše vreme prevoza između dve tačke na liniji je da se planirano vreme prevoza definiše tako da je jednako prosečnom snimljenom (realizovanom) vremenu prevoza. Nešto drugačiji pristup primenjuje Muller (2000), koji vreme prevoza na liniji definiše kao veličinu koja je 85% raspodele snimljenog nekontrolisanog vremena prevoza.

Za utvrđivanje vremena terminiranja, koje po definiciji u sebi sadrži vreme neophodno za odmor vozača, kao i vreme za „peglanje“ reda vožnje, jedno od pravila koje se primenjuje je da se ovo vreme definiše kao fiksni procenat (15% ili 20%) od planiranog vremena prevoza. Naravno, kako ova veličina pre svega zavisi od varijacije realizovanog vremena prevoza, postavlja se pitanje neophodnosti zasebnog definisanja vremena prevoza i vremena terminiranja, tako da određeni autori (Abkowitz–

Engelstein, 1984) definišu planirano vreme poluobrtka kao veličinu koja treba da ima vrednost 95% od raspodele snimljenog vremena prevoza.

U studiji koju su sprovedeli Strathman i dr. (2001) izvršena je uporedna analiza realizovanih vrednosti vremena prevoza i vremena terminiranja sa planiranim vrednostima. U sprovedenoj analizi korišćena je bogata baza podataka o funkcionisanju jedne linije koju obezbeđuje savremeni sistem za praćenje i monitoring rada vozila u sistemu javnog masovnog transporta putnika.

Optimalno planirano vreme prevoza i vreme terminiranja autori su u studiji definisali pozivajući se na opis koji je u svom radu pružio Levinson (1991). On je utvrdio da optimalno vreme prevoza za liniju treba planirati tako da bude neznatno niže od medijane ili mode realizovanog vremena prevoza, a da vreme terminiranja treba da predstavlja razliku između usvojenog vremena prevoza i vremena prevoza koje je jednako 95% od raspodele snimljenog vremena prevoza. Planirana vremena prevoza i terminiranja utvrđena na ovaj način (optimalna, prema Levinsonu (1991)) upoređena su sa realnim planiranim vremenima prevoza u pet karakterističnih perioda u toku funkcionisanja linije (početak rada linije, jutarnji vršni čas, jutarnji vanvršni čas, popodnevni vršni čas i popodnevni vanvršni čas). Rezultati sprovedene analize su pokazali da je, za posmatranu liniju, suma planiranih vremena prevoza i vremena terminiranja (vreme poluobrtka) veća nego utvrđena optimalna.

Autori su u svojoj studiji izvršili i dodatnu analizu kojom su obuhvatili sve polaske na svim linijama u posmatranom sistemu. Analiza je bazirana na tri različita načina za utvrđivanje vremena terminiranja. Prvi način je već opisan i baziran je na optimalnim vremenima prevoza i terminiranja definisanim od strane Levinsona. Drugi način proizlazi iz ugovora koji operator ima sa gradom, a kojim je definisano da je vreme terminiranja jednako 10% od medijane realizovanog vremena prevoza. Vreme terminiranja koje je utvrđeno na treći način je bazirano na iskustvenoj metodi i iznosi 18% od medijane realizovanog vremena prevoza.

Značajan broj autora je u nastojanju da izbegnu iskustvene metode pokušao da kreira modele kojima bi se jasno kvantifikovali pozitivni i negativni efekti usvojenog vremena prevoza. Povećanje planiranog vremena prevoza i vremena terminiranja (predviđeno preventivnom strategijom) prouzrokuje angažovanje većih resursa (najčešće vozila i

vozača), a samim tim i veće operativne troškove, dok sa druge strane značajno povećava pouzdanost funkcionisanja, pošto verovatnoća da sva vozila ispoštuju plan bez obzira na varijacije teži 100%. Glavna težnja istraživača je odgovor na pitanje kako naći balans između pouzdanosti funkcionisanja i troškova proizvodnje transportne usluge.

Filipović (1983) je među prvima kreirala optimizacioni model baziran na troškovima funkcionisanja linije. U svom radu autorka je optimizovala srednju brzinu autobusa na liniji javnog masovnog transporta putnika tako da ukupna ulaganja (troškovi) u vozila i pogonsku energiju budu minimalna. Optimizacioni model je baziran na stanovištu da povećanje srednje brzine vožnje autobusa na liniji preko određene granice dovodi do povećanja potrošnje pogonske energije i većeg trošenja vozila, što za posledicu ima povećanje troškova pogonske energije, kao i troškova održavanja zadatog nivoa pouzdanosti voznog parka. S druge strane, veća srednja brzina omogućava da se određeni transportni rad obavi sa manje angažovanih vozila, što onda smanjuje sredstva uložena u nabavku vozila i plate vozača. Kroz optimizaciju brzine vožnje na liniji, a imajući u vidu da je dužina linije fiksna veličina, autorka ujedno određuje i veličinu optimalnog vremena vožnje. Kao i u analiziranim radovima drugih autora, Filipović (1983) prezentuje i model za optimizaciju vremena terminiranja vozila. Za razliku od ostalih autora, koji smatraju da je vreme terminiranja pre svega funkcija srednjeg vremena prevoza ili eventualno njegove raspodele, autorka u svom radu prezentuje model kojim se vreme terminiranja vozila optimizuje na osnovu odnosa standardnog odstupanja realizovanog vremena prevoza i vrednosti planiranog intervala na liniji. Filipović (1983) smatra da su veličine planiranog intervala, kao i usvojene strategije o dozvoljenim granicama varijacije intervala u toku funkcionisanja linije i standardnog odstupanja (rasipanja realizovanog vremena prevoza), dva ključna elementa za utvrđivanje optimalnog vremena terminiranja, a sve u cilju minimizacije troškova funkcionisanja linije.

Wirasinghe i Liu (1995) su kreirali optimizacioni model baziran na ukupnim troškovima. Oni su, primenjujući strategiju zadržavanja vozila na kontrolnim tačkama, kreirali red vožnje za liniju sa malom frekvencijom vozila, a sve u cilju minimizacije ukupnih troškova. Ukupni troškovi su u radu predstavljeni kao suma troškova čekanja

korisnika, troškova kašnjenja putnika prouzrokovano zadržavanjem vozila na kontrolnim tačkama, troškovi kazni za vozila koja na kontrolne tačke ili terminuse stižu ranije/kasnije i operativnih troškova (troškovi angažovanih resursa: vozila, vozača). Rezultati njihovih istraživanja su pokazali da je optimalni red vožnje veoma osetljiv na karakteristike transportnih zahteva u prostoru, odnosno duž trase linije. Takođe, autori su zaključili da potreba za kontrolnom tačkom, odnosno za zadržavanjem vozila, postoji samo na onim stajalištima gde je broj ulazaka putnika veći od broja putnika u vozilu (protoka).

U okviru razvijenog modela autori su pretpostavili da je proces dolaska putnika na stajalište koordinisan sa trenutkom dolaska vozila i da su dva uzastopna polaska vozila (dva poluobrta) međusobno nezavisna. Takođe, autori su troškove čekanja korisnika definisali u funkciji planiranog vremena polaska vozila, pošto se primenjuju strategije zadržavanja. Navedene pretpostavke i model troškova čekanja korisnika primenjive su na linijama sa malom frekvencijom vozila, dok za linije za većom frekvencijom njihova upotreba nije moguća iz dva razloga. Kao prvo, na linijama sa velikom frekvencijom proces dolaska (nakupljanja) korisnika na stajalištu nije koordinisan sa vremenom polaska vozila, a samim tim, kao drugo, ni troškovi čekanja korisnika ne mogu biti vezani za planirano vreme polaska, već za realizovani interval.

U svom istraživanju Furth i Muller (2007) analiziraju primenu strategije zadržavanja vozila na kontrolnim tačkama duž linije na troškove korisnika. Analizirajući više različitih scenarija koji podrazumevaju različit broj kontrolnih tačaka duž linije, kao i različite planirane vrednosti vremena prevoza, autori utvrđuju optimalnu vrednost vremena prevoza. Na osnovu rezultata sprovedenih analiza, autori smatraju da je optimalna veličina vremena poluobrta jednaka sumi srednje vrednosti realizovanog vremena prevoza i dva do tri njegova standardna odstupanja.

Sprovedene analize su se odnosile pre svega na linije sa većim planiranim intervalom, kod kojih putnici ne dolaze ravnomerno na stajališta, već planiraju svoj dolazak na stajalište u zavisnosti od planiranog vremena polaska. Poseban značaj njihovog istraživanja je konstatacija da dodatno vreme zadržavanja na kontrolnim tačkama duž linije ne utiče značajno na ukupno vreme poluobrta, a samim tim ni na

troškove funkcionisanja. Zadržavanje vozila na kontrolnim tačkama povećava pouzdanost funkcionisanja linije, što za posledicu ima manju varijaciju realizovanog vremena prevoza pa onda i potrebu za manjim vremenom terminiranja vozila, čime se kompenzuju zadržavanja na kontrolnim tačkama i na taj način se zadržava približno isto vreme poluobrta kao u slučaju bez zadržavanja.

Novi pristup u generisanju vrednosti vremena prevoza u svom radu predstavili su i Salicrú i dr. (2011). Pristup je baziran na složenoj analizi istorijskih podataka o funkcionisanju sistema i mikrosimulacijama. Predložena metoda se sastoji iz pet koraka: 1. prepoznavanje i eliminisanje atipičnih vožnji, a na bazi razmatranja definisanog intervala poverenja; 2. segmentiranje perioda funkcionisanja linije na karakteristične periode uvođenjem novog algoritma hijerarhijske klasifikacije; 3. kreiranje inicijalnih vrednosti vremena prevoza na osnovu kriterijuma izvedenih iz statističke analize; 4. podešavanje i potvrđivanje inicijalnih vrednosti pomoću mikrosimulacija; 5. procenjivanje vremena terminiranja, kako bi se garantovala tačnost polaska naredne vožnje i raspored rada vozila.

Kako bi utvrdili da li prevoznik ispunjava obaveze preuzete ugovorom o nivou usluge i kako bi povećali pouzdanost funkcionisanja linije u pogledu tačnosti, Vissat i dr. (2015) u svom radu predstavljaju novu primenu stohastičke simulacije i metoda za testiranje modela (*model-checking methods*). Prvi korak njihovog pristupa je korišćenje otvorene (javno dostupne) baze podataka o predviđenom vremenu dolaska vozila na određeno stajalište za definisanje parametara stohastičkog modela odabrane linije. Nakon toga, proveravaju i analiziraju definisan stohastički model koristeći metode simulacije i metode za testiranje modela. Na kraju, pomoću optimizacionog modela kojim se minimizira finansijski rizik od kazni za nepoštovanje definisanog reda vožnje, predlaže se novi red vožnje.

Hong (2002) smatra da se optimizacija vremena prevoza i vremena terminiranja ne može vršiti a da se ostali planirani elementi funkcionisanja linije ne uzmu u razmatranje. Prema mišljenju navedenog autora, mnogi istraživači ostale elemente funkcionisanja linije, kao što su broj vozila i frekvencija, u svojim modelima smatraju fiksnim

veličinama i ne razmatraju njihove međusobne veze, odnosno korelaciju. Autor smatra da je poznavanje međusobnih veza između elemenata funkcionisanja linije značajno za razvoj kvalitetnog proseca planiranja funkcionisanja linije javnog masovnog transporta putnika. Takođe, u radu autor utvrđuje i veze između elemenata funkcionisanja, operativnih troškova i kvaliteta transportne usluge. Na osnovu utvrđenih međusobnih korelacija autor definiše proces planiranja reda vožnje u kome su elementi funkcionisanja u međusobnoj interakciji i koji planerima transportnih agencija omogućava da izaberu kombinaciju koja najviše odgovara postavljenoj ciljnoj funkciji.

Model koji je u svom radu razvio Fattouche (2007), za razliku od Honga (2002), ne pomaže u identifikaciji optimalnog intervala niti optimalnih kontrolnih tačaka na liniji, već pokušava da utvrdi optimalno vreme prevoza za svaku definisanu deonicu na liniji (između dve kontrolne tačke) u cilju unapređenja pouzdanosti funkcionisanja. Predloženi model simulira vremena dolazaka i polazaka svih vozila na svim kontrolnim tačkama na liniji, a na osnovu prethodno definisanih promena u redu vožnje. Na osnovu snimljenih podataka o funkcionisanju linije autor kreira raspodele realizovanih vremena prevoza za svaku deonicu na liniji. Vreme prevoza na deonici autor usvaja kao funkciju usvojenog procenta (65%, 75%, 85%, 95% i sl.) realizovanog vremena prevoza. Promena usvojenog reda vožnje se ogleda u promeni usvojenog procenta. Za svaki usvojeni procenat simulacija se ponavlja i utvrđuju se nove vrednosti vremena dolazaka i polazaka vozila sa kontrolnih tačaka. Na osnovu ovih vrednosti, za svaki od simulacionih slučajeva, procenjuju se troškovi čekanja korisnika, troškovi vožnje korisnika i operativni troškovi predloženog reda vožnje, a samim tim i optimalna vrednost planiranih vremena prevoza po deonicama.

U svom radu Ceder (2011) modele za utvrđivanje vremena poluobrti i kreiranje reda vožnje grubo deli na četiri grupe: 1. modele za idealizovane sisteme transporta putnika, 2. simulacione modele, 3. modele matematičkog programiranja i 4. modele zasnovane na podacima o funkcionisanju.

Ono što je prethodna analiza pokazala je da se veoma mali broj analiziranih modela može jasno svrstati u jednu od grupa koje je Ceder (2011) definisao, već oni uglavnom predstavljaju kombinaciju dva ili čak i tri modela.

U prethodnom odeljku analizirani su različiti pristupi bazirani na subjektivnom shvatanju reda vožnje planera, iskustvenoj metodi zasnovanoj na skromnijoj ili detaljnoj bazi podataka o istoriji funkcionisanja, simulacionom modelu ili troškovnim modelima kojima se preračunavaju određeni troškovi kao posledica usvojenog vremena poluobrta. Osnovna karakteristika pobrojanih i analiziranih modela i pristupa je da svi oni podrazumevaju da usvojena vremena prevoza i terminiranja (u sumi vreme poluobrta) predstavljaju ulazne veličine modela. Za svaki od opisanih modela, bez obzira na to da li je cilj da se poveća pouzdanost funkcionisanja ili minimiziraju operativni ili ukupni troškovi funkcionisanja, vreme poluobrta je unapred definisan, poznati element kreirane jednačine čijom se promenom kroz više iteracija dobija željena (optimalna) vrednost (rezultat).

4. NOVA METODOLOGIJA ZA UTVRĐIVANJE I KVANTIFIKACIJU FAKTORA OD UTICAJA NA VREME VOŽNJE

Prvi deo ovog poglavlja disertacije posvećen je definisanju i opisu izabranih faktora (nezavisnih promenljivih) koji mogu imati uticaj na veličinu i varijaciju vremena vožnje i koji bi trebalo da budu obuhvaćeni analizom u ovoj disertaciji. Prilikom selekcije faktora uzeta je u obzir i dostupnost podataka o strukturi i funkcionisanju realnih sistema javnog masovnog transporta. U drugom delu je prezentovana metodologija korišćena za prikupljanje svih neophodnih podataka kako bi planirana analiza mogla da se izvrši, a u nastavku je dat i opis korišćene statističke analize, kao i softvera za obradu prikupljenih podataka. Analiza je sprovedena na osnovu podataka prikupljenih iz sistema javnog masovnog transporta putnika u Beogradu i izlazni rezultati predstavljaju realnu sliku stanja u preseku vremena.

Na kraju poglavlja prezentovani su rezultati sprovedene multivarijacione statističke analize pomoću koje je razvijen model za identifikaciju statistički značajnih faktora koji utiču na odabrane karakteristike vremena vožnje kao zavisne promenljive. U okviru opisa rezultata prezentovana je i analiza uticaja, odnosno kvantifikacija uticaja identifikovanih faktora.

4.1. Potencijalni faktori

U zavisnosti od karakteristika linije (odnosno međustaničnog rastojanja) koju reprezentuju, faktori su podeljeni su dve grupe. Prvu grupu predstavljaju faktori koji svojim vrednostima daju sliku karakteristika strukture, dok se vrednostima druge grupe faktora opisuje funkcionisanje sistema javnog masovnog transporta putnika na posmatranoj liniji i razmatranom međustaničnom rastojanju.

4.1.1. Karakteristike strukture

Dužina međustaničnog rastojanja

Značajan broj faktora koji utiču na vreme prevoza na liniji javnog gradskog transporta putnika je analiziran od strane brojnih autora (opisano u odeljku 3.2). Na

osnovu analizirane dostupne literature i sprovedenih istraživanja može se zaključiti da dužina deonice ima najveći uticaj i na ukupno vreme prevoza i na njegovu varijaciju.

S obzirom na polaznu hipotezu da karakteristike trase linije i ostali elementi strukture utiču na karakteristike vremena vožnje, dužina linije je podeljena na najmanje činioce, odnosno na međustanična rastojanja, u nameri da se potencijalno smanji njen nivo uticaja i da se u analizu uvedu i drugi elementi strukture linije odnosno karakteristike trase. Samim tim se planirana analiza i identifikacija potencijalnih faktora svodi na analizu faktora koji utiču na vreme vožnje na svakom međustaničnom rastojanju na liniji. Na ovaj način pružena je mogućnost da svako međustanično rastojanje bude analizirano zasebno i da se proširi skup faktora planiranih za analizu. Analiziranjem svakog međustaničnog rastojanja zasebno moguće je isključiti vreme zadržavanja vozila na stajalištima i posvetiti se isključivo vremenu vožnje na određenom međustaničnom rastojanju.

Dužina međustaničnog rastojanja je sigurno i dalje najznačajniji faktor koji utiče na karakteristike vremena vožnje, bez obzira na predviđeni nivo detaljnosti posmatranja.

Trasa

Jedino je Chen (2009) poredio deonice sa ekskluzivnim trakama za vozila javnog gradskog transporta putnika i one bez njih u pogledu pouzdanosti funkcionisanja, a niko od analiziranih autora nije u svojim istraživanjima razmatrao druge karakteristike strukture linije osim dužine.

Kako je već naglašeno, jedan od značajnih elemenata strukture linije je trasa linije sa svojim karakteristikama. Dve karakteristike trase potencijalno mogu imati uticaj na vreme vožnje između dva stajališta na liniji: stepen nezavisnosti i širine profila ulice koju trasa koristi.

Veoma je redak slučaj da se karakteristike trase u pogledu stepena nezavisnosti menjaju između dva uzastopna stajališta na liniji, tako da je moguće navedenu karakteristiku izraziti za celu dužinu posmatranog međustaničnog rastojanja pomoću jedne vrednosti. Za svako međustanično rastojanje na liniji dodeljuje se opisna karakteristika stepena nezavisnosti koja je pojednostavljena u odnosu na onu teorijsku prezentovanu u odeljku 2.3.1. Karakteristika trase u pogledu stepena nezavisnosti, za

potrebe multivarijacione analize, opisana je sa četiri nivoa prema stepenu nezavisnosti (prezentovano u Tabeli 4.1). Manji broj nivoa u odnosu na teorijsku klasifikaciju posledica je kontrolisanja broja uticajnih faktora (nezavisnih promenljivih) koji će biti obuhvaćen analizom.

Tabela 4.1. *Stepen nezavisnosti trase linije*

NIVO	OPIS
A	Trasa u potpunosti fizički izdvojena od ostalog dinamičkog saobraćaja.
B	Trasa podužno fizički izdvojena od ostalog dinamičkog saobraćaja, dok se ukrštanja obavljaju u nivou.
C2	Izdvojena trasa za vozila javnog gradskog transporta putnika – žuta traka.
C1	Vozila javnog gradskog transporta putnika koriste iste saobraćajnice kao i sva ostala motorna vozila.

Za ovu karakteristiku trase se očekuje da ima negativan uticaj na karakteristike vremena vožnje, tj. da na međustaničnim rastojanjima sa većim stepenom nezavisnosti ukupno vreme vožnje i njegova varijacija budu manji.

Širina profila ulice (saobraćajnice) koju trasa koristi je takođe potencijalno značajan uticajni faktor, posebno na međustaničnim rastojanjima gde je zastupljen nivo nezavisnosti C1 ili C2. Karakteristiku trase u pogledu širine profila je najjednostavnije prezentovati pomoću broja saobraćajnih traka (u posmatranom smeru) koji je na raspolaganju vozilima javnog masovnog transporta putnika, ali i ostalim vozilima gradskog transportnog sistema (pre svega privatnim automobilima). Rezultati do kojih su došli Sorratini i dr. (2008) koristeći mikrosimulacije u svojoj analizi pokazuju da dodatne saobraćajne trake za vozila javnog gradskog transporta utiču na povećanje pouzdanosti funkcionisanja, a kao indikator pouzdanosti koristili su varijaciju vremena vožnje. Za ovu karakteristiku trase, kao i za prethodnu, realno je očekivati da ima negativan uticaj na ukupno vreme vožnje i na njegovu varijaciju, odnosno kako broj saobraćajnih traka raste, ukupno vreme vožnje i njegova varijacija bi trebalo da opadaju.

Ukrštanja sa drugim vidovima transporta

Broj signalisanih raskrsnica je faktor čiji su uticaj istraživali gotovo svi analizirani autori. Pored broja signalisanih raskrsnica, planirano je da i broj nesignalisanih raskrsnica bude obuhvaćen predviđenom analizom. Nesignalisane raskrsnice su, zbog potencijalno različitog nivoa uticaja, podeljene u dve grupe: nesignalisane raskrsnice sa prvenstvom prolaza i nesignalisane raskrsnice bez prvenstva prolaza.

U toku prikupljanja podataka o strukturi linije u pogledu broja i tipa ukrštanja uočeno je da su nesignalisani pešački prelazi ukrštanja koja bi trebalo izdvojiti i posmatrati kao poseban faktor od uticaja, dok bi signalisane pešačke prelaze trebalo posmatrati zajedno sa signalisanim raskrsnicama. Postoje dva razloga zašto su nesignalisani pešački prelazi izdvojeni. Prvi razlog je to što postojanje pešačkog prelaza nije uslovljeno postojanjem raskrsnice, a drugi što na svakoj nesignalisanoj raskrsnici ne postoji identičan broj pešačkih prelaza u posmatranom smeru kretanja vozila.

Uticaj istog broja signalisanih ili nesignalisanih raskrsnica može biti različit. Kako bi se informacije o ukrštanjima upotpunile, posebno se evidentiraju raskrsnice na kojima vozila skreću ulevo ili udesno. Skretanja vozila utiču na vreme zadržavanja vozila u zoni raskrsnice, pa samim tim i na vreme vožnje na posmatranom međustaničnom rastojanju. To se posebno odnosi na vozila kojima je definisanom trasom kretanja predviđeno da na određenoj raskrsnici imaju skretanje ulevo. Kao potencijalni faktori od uticaja analizom su obuhvaćeni broj skretanja ulevo i udesno na posmatranom međustaničnom rastojanju i očekivan je njihov pozitivan uticaj na ukupno vreme vožnje i njegovu varijaciju. Raskrsnice na kojima je definisanom trasom predviđeno da vozila nakon napuštanja zone raskrsnice svoje kretanje nastavljaju pravo nisu obuhvaćene uključivanjem dodatnog faktora, pošto je očekivani uticaj minimalan i smatra se da je taj uticaj obuhvaćen već opisanim faktorima (broj signalisanih i broj nesignalisanih raskrsnica).

Parkiranje

Postojanje parkiranja duž trase linije je još jedna od karakteristika koja može imati uticaj na karakteristike vremena vožnje. U ovim slučajevima vozila koja izvide

manevar parkiranja, bilo da ulaze ili izlaze sa parking mesta, stvaraju kritičnu tačku i na taj način utiču na funkcionisanje ostalog dinamičkog saobraćaja pa posledično i na vozila javnog masovnog transporta putnika. Može se očekivati da je ovaj uticaj posebno značajan kod trasa sa stepenom nezavisnosti C2 ili C1, a posebno u slučajevima kada su karakteristike uličnog profila koji trasa koristi minimalne (broj saobraćajnih traka ima vrednost 1 ili, eventualno, 2).

Informacija kojom se opisuje ovaj faktor je samo postojanje ili nepostojanje parkiranja na posmatranom međustaničnom rastojanju, bez detaljnih karakteristika o broju i tipu parking mesta ili zastupljenom načinu parkiranja (hodom unapred ili hodom unazad), a očekivano je da pozitivno utiče na zavisnu promenljivu u statističkoj analizi.

Smer

Međustanično rastojanje javnog masovnog transporta određeno je parom uzastopnih stajališta, trasom linije između njih i smerom kretanja vozila. Svako međustanično rastojanje na jednoj liniji je jedinstveno, odnosno ne postoje dva identična međustanična rastojanja, pošto se sva tri elementa kojima se ono definiše ne mogu podudarati. Smer međustaničnog rastojanja se najčešće određuje smerom linije (*sm*) ili redosledom stajališta kojima je posmatrano međustanično rastojanje definisano, ali za svrhu analize koja se sprovodi u okviru ove disertacije smer međustaničnog rastojanja će biti predstavljen opisno sa dve vrednosti: ka centralnoj gradskoj zoni i od nje. Na ovaj način je omogućena unifikacija smeru svih analiziranih međustaničnih rastojanja kao potencijalnih faktora koji utiču na karakteristike vremena vožnje.

Pretpostavka je da smer međustaničnog rastojanja može biti značajan podatak koji u kombinaciji sa periodom posmatranja reprezentuje opterećenje transportne mreže. Na primer, velika je verovatnoća da će vreme vožnje na određenom međustaničnom rastojanju u jutarnjim časovima u smeru ka gradu biti veće nego u popodnevnim časovima. Takođe, za dva međustanična rastojanja kojima se samo smerovi razlikuju se mogu očekivati različite vrednosti vremena vožnje i varijacije vremena vožnje ako se analiziraju u jednom (istom) karakterističnom periodu u toku dana (karakteristični periodi su detaljnije objašnjeni u narednom odeljku).

4.1.2. Karakteristike funkcionisanja

I pored detaljne razrade elemenata strukture ne može se očekivati kvalitetan rezultat multivarijacione analize bez uključivanja i određenih karakteristika funkcionisanja kao uticajnih faktora. Dva su osnovna razloga za proširenje pristupa.

Kao prvo, vreme vožnje je dinamički element i samim tim ne treba očekivati da njegova vrednost ili vrednost njegove varijacije uopšte ne zavise od drugih dinamičkih karakteristika (karakteristika funkcionisanja). Kao drugo, mnoge karakteristike strukture samo zajedno za karakteristikama funkcionisanja mogu u potpunosti reprezentovati analizirano međustanično rastojanje.

Karakteristični periodi

Iz celokupnog perioda funkcionisanja vozila na liniji javnog masovnog transporta putnika za potrebe statističke analize izdvojena su četiri karakteristična perioda:

- jutarnji vršni period,
- jutarnji vanvršni period,
- popodnevni vršni period i
- popodnevni vanvršni period.

Određeni autori su za potrebe svojih analiza period funkcionisanja linije delili na manje periode, od kojih su dva susedna imala istu granicu, tj. kraj jednog perioda predstavljao bi početak narednog. To kod prezentovane podele nije slučaj, već su sa namerom izdvojeni karakteristični periodi, čime su izbegnuti prelazni periodi između dva susedna karakteristična perioda. U toku prelaznih perioda dolazi do postepenih promena elemenata funkcionisanja linije (veliĉine intervala, frekvencije vozila, broja angažovanih vozila itd.), kao i karakteristika saobraćajnog toka ostalog dinamiĉkog saobraćaja (okruženja u kome linija funkcioniše).

Pošto se postepene promene teško mogu iskazati jedinstvenom vrednošću elementa funkcionisanja linije, kao i da su u toku prelaznog perioda posebno izražene karakteristike stohastiĉnosti i nehomogenosti okruženja, prelazni periodi u toku funkcionisanja linije su izuzeti iz analize.

Interval

Interval sleđenja vozila je karakteristika funkcionisanja linije koja je obuhvaćena analizom pre svega zbog delimično suprotstavljenih stavova analiziranih autora. Dok sa jedne strane Strathman i Hopper (1993) smatraju da osetljivost projektovanog reda vožnje (u pogledu definisanog intervala, vremena prevoza i vremena terminiranja) ima uticaj na realizovano vreme prevoza, pa samim tim i na pouzdanost funkcionisanja, Chen (2009) u svojoj analizi zaključuje da veličina intervala ne utiče na varijaciju vremena prevoza vozila na liniji javnog masovnog transporta putnika, pa posledično tome ni na pouzdanost funkcionisanja linije.

Vrednosti veličine intervala, koje se kao potencijalni faktor od uticaja utvrđuju i kvantifikuju, predstavljene su planiranim vrednostima i izražene su u minutima za svaku liniju i svaki opisan karakteristični period. Pretpostavlja se da vrednost intervala nema značajan uticaj na karakteristike vremena vožnje na liniji, odnosno da promena vrednosti intervala nema uticaj na promenu vrednosti vremena vožnje niti na vrednost varijacije.

Frekvencija

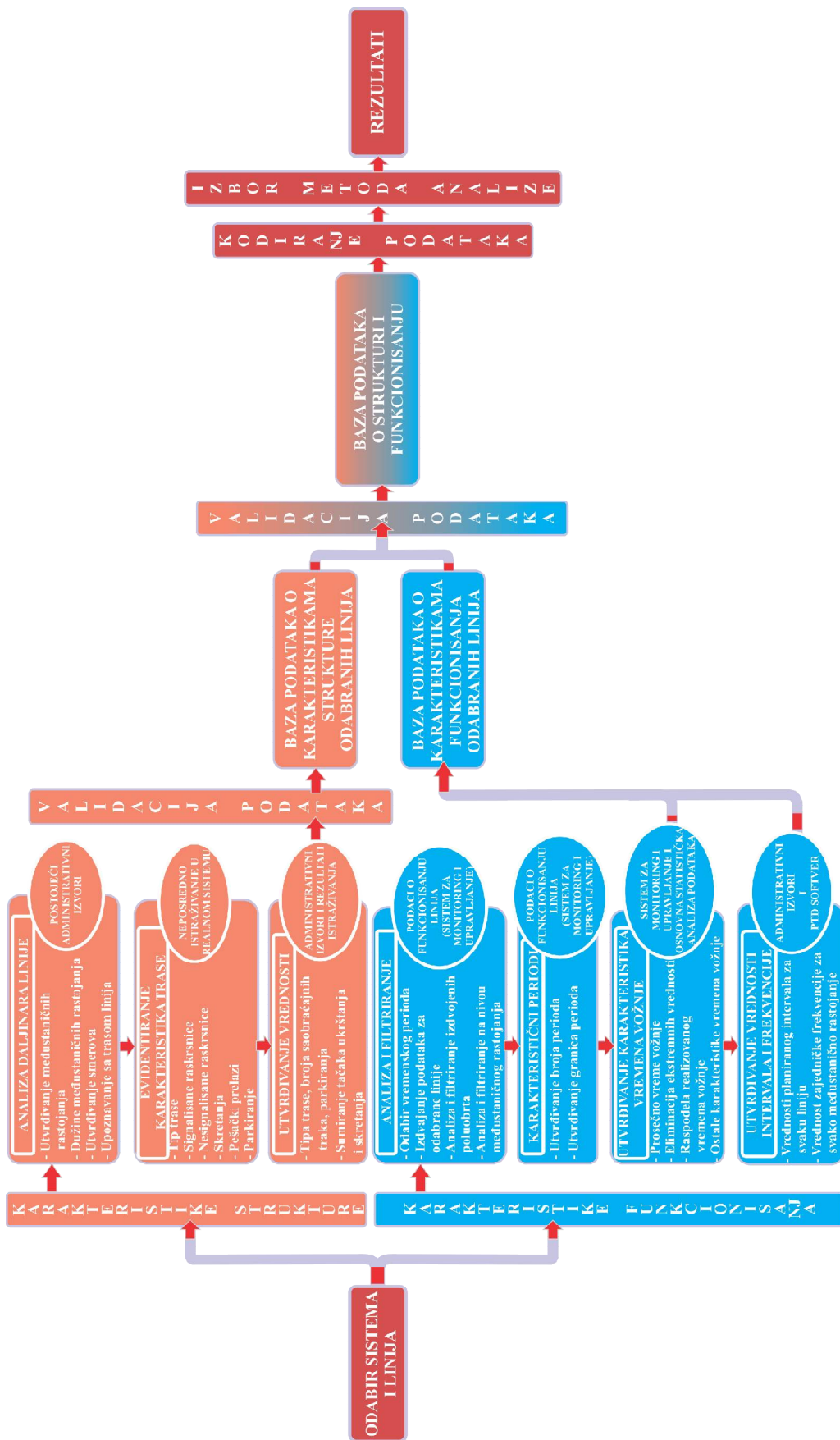
Uvođenje frekvencije vozila kao karakteristike funkcionisanja ima za cilj da reprezentuje opterećenje posmatranog međustaničnog rastojanja i da diferencira međustanična rastojanja sa sličnim ili istim karakteristikama strukture uzimajući kao kriterijum opterećenje. Na mreži linija sistema javnog masovnog transporta putnika postoji značajan broj međustaničnih rastojanja koje koristi više od jedne linije, mada je daleko značajniji podatak o broju vozila angažovanih na tim linijama. Opterećenje određenog međustaničnog rastojanja izražava se brojem vozila koja ga opsluže u posmatranom času bez obzira na to na kojoj liniji su angažovana. Pretpostavka je da će opterećenje međustaničnog rastojanja, u kreiranom modelu, imati pozitivan uticaj na karakteristike vremena vožnje, odnosno da će povećanje frekvencije vozila uticati na povećanje vremena vožnje i na njegovu varijaciju.

4.2. Metodologija prikupljanja neophodnih podataka

Jedan od postavljenih ciljeva disertacije je utvrđivanje faktora koji utiču na vreme vožnje na liniji i na njegovu varijaciju. Odabir i opis potencijalnih faktora od uticaja, koji ujedno reprezentuju karakteristike strukture i funkcionisanja linije, izvršeni su u prethodnom odeljku. Odabir je izvršen na osnovu analiza literature (radova drugih istraživača), ali i prema dostupnosti podataka o karakteristikama strukture i funkcionisanja iz realnog sistema javnog masovnog transporta putnika. U skladu sa postavljenim ciljevima i zadacima razvijena je specifična metodologija (Slika 4.1), koja kao osnov uzima sistemski pristup i bazira se na podacima iz realnog sistema. Prikupljeni podaci, posebno o karakteristikama funkcionisanja, značajni su i za ostvarivanje drugog cilja disertacija, a to je razvoj modela za optimizaciju vremena obrta.

U prvom koraku definisanog metodološkog postupka neophodno je izvršiti odabir sistema javnog masovnog transporta putnika koji će biti analiziran, kao i odabir konkretnih reprezentativnih linija.

Pretkorak, odnosno ulaz za kompletan metodološki postupak predstavlja definisanje potencijalnih faktora od uticaja. Odabrani potencijalni faktori imaju direktan uticaj na dalje korake predviđene metodološkim postupkom, što se posebno ogleda u koracima koji se odnose na neposredno istraživanje karakteristika strukture i karakteristika funkcionisanja, koji su zasebno opisani u naredna dva odeljka rada.



Slika 4.1. Metodologija za utvrđivanje i kvantifikaciju faktora koji utiču na vreme vožnje

4.2.1. Istraživanje karakteristika strukture

U cilju utvrđivanja vrednosti elemenata strukture linije, a u zavisnosti od elementa čija se vrednost utvrđuje, korišćena su tri metoda istraživanja izvršena u isto toliko koraka.

Prvi korak se odnosio na utvrđivanje međustaničnih rastojanja na odabranim linijama, vrednosti njihovih dužina, kao i smera kretanja, a na osnovu postojećih administrativnih izvora.

Kako bi se utvrdile vrednosti ostalih karakteristika strukture odabranih linija, neophodno je prethodno sprovesti evidentiranje odabranih karakteristika ukoliko takva baza ne postoji, što predstavlja drugi korak u metodologiji utvrđivanja karakteristika strukture. Za evidentiranje vrednosti primenjen je metod neposrednog istraživanja u realnom sistemu. Neposredno istraživanje u realnom sistemu podrazumeva obilaženje trase i evidentiranje prethodno utvrđenih elemenata strukture na osnovu unapred pripremljenog snimačkog obrasca (dato u Prilogu A).

Nakon sprovedenog istraživanja u realnom sistemu, naredni (treći) korak podrazumeva utvrđivanje vrednosti svakog od elementa za svako od međustaničnih rastojanja obrađenih u prethodnom koraku. Utvrđivanje vrednosti vrši se logičkom analizom popunjenih snimačkih obrazaca, izdvajanjem podataka o trasama, parkiranju i broju traka, kao i sumiranjem evidentiranih tačaka ukrštanja za svako međustanično rastojanje posebno.

U sledećem koraku vrši se validacija prikupljenih podataka i formiranje baze podataka o karakteristikama strukture odabranih linija. U toku procesa validacije iz dalje analize se izdvajaju sledeće grupe međustaničnih rastojanja:

- prva i poslednja međustanična rastojanja na liniji – izuzeta su iz analize pošto na njihova realizovana vremena vožnje značajno utiču i faktori koji nisu obuhvaćeni analizom (planirano vreme polaska, broj vozila na terminusu, geometrijske karakteristike terminusa, predefinisane GPS koordinate terminusa i sl.),
- međustanična rastojanja kod kojih su karakteristike strukture promenljive u vremenu (npr. promenljiv broj traka po periodima u toku dana, ili ekskluzivna traka za vozila javnog masovnog transporta samo u određenim periodima),

- međustanična rastojanja čija dužina značajno odstupa od prosečnih i karakterističnih vrednosti za gradske linije javnog transporta.

Nakon završenog procesa validacije podataka o karakteristikama strukture formira se baza ovih podataka, koja se u narednim koracima integriše sa bazom o karakteristikama funkcionisanja.

4.2.2. Istraživanje karakteristika funkcionisanja

Za aktuelizaciju teme koju obrađuje doktorska disertacija i za rast interesovanja istraživača koji se bave sistemima transporta putnika za nju, najzaslužniji je razvoj i primena informacionih tehnologija u sektoru transporta putnika. Savremene informacione tehnologije doprinele su razvoju sistema za monitoring i upravljanje vozilima u javnom transportu, koji kroz evidentiranje istorije kretanja vozila obezbeđuju sveobuhvatne i detaljne baze podataka o funkcionisanju sistema javnog transporta putnika, što je posledično prouzrokovalo i razvoj raznih pristupa i modela obrade i analize prikupljenih podataka.

Definisanim metodologijom istraživanja predviđeno je da se utvrđivanje karakteristika funkcionisanja izvrši u četiri koraka. U prvom koraku se vrši izdvajanje podataka iz baze sistema za monitoring za prethodno definisan period posmatranja i odabrane linije. U cilju dobijanja preciznih vrednosti koje će realno reprezentovati funkcionisanje vozila u sistemu javnog masovnog transporta vrši se analiza, logička provera i filtriranje izdvojenih podataka. Analiza i filtriranje izdvojenih podataka se najpre vrši na nivou jednog polaska (poluobrt), a kriterijumi za „filtriranje“ prikupljenih podataka su:

- svaki poluobrt koji ne počinje i ne završava se u „tipičnim“ granicama vremena između prvog i poslednjeg stajališta,
- svaki poluobrt kod koga se vozila ne kreću progresivno duž posmatranog smera linije,
- svaki poluobrt koji sadrži velika odstupanja u prostoru ili vremenu; pod odstupanjem u prostoru podrazumevaju se poluobrta u toku kojih su vozila odstupala sa definisane trase, a pod odstupanjem u vremenu podrazumevaju se poluobrta kod kojih je vozilo u toku poluobrta prekidalo rad (uzrok može biti kvar vozila, učestvovanje u saobraćajnoj nezgodi i sl.).

Sledeći korak, nakon eliminacije neadekvatnih poluobrti, jeste logička provera i „filtriranje“ preostalih podataka na nivou međustaničnih rastojanja. Kriterijumi za „filtriranje“ ovih vrednosti su:

- svako vreme vožnje koje za posmatrano međustanično rastojanje nije u tipičnim granicama (minimalne i maksimalne vrednosti),
- svako vreme vožnje za koje se ne može jasno utvrditi čas u toku dana u kome je realizovano (najčešće zavisi od tehnologije evidentiranja kretanja vozila na trasi, odnosno od sistema za monitoring i upravljanje vozilima koji funkcioniše u sistemu javnog masovnog transporta koji je predmet analize).

Drugi korak je utvrđivanje karakterističnih perioda u toku rada linija javnog masovnog transporta putnika. U okviru ovog koraka utvrđuje se broj karakterističnih perioda i njihove granice na osnovu prikupljenih podataka o istoriji funkcionisanja linije. Iz grupe podataka formirane u prvom koraku izdvajaju se vremena vožnje koja su realizovana u prethodno definisanim karakterističnim periodima. Izdvajanje se u trećem koraku vrši na osnovu časa kada je vreme vožnje realizovano, odnosno na osnovu vremena dolaska vozila na stajalište (vremenski trenutak završetka vožnje na posmatranom međustaničnom rastojanju). Na osnovu preostalih vrednosti vremena vožnje po međustaničnim rastojanjima formira se baza karakteristika vremena vožnje. Karakteristike vremena vožnje se, primenom osnovnih statističkih analiza, posebno izračunavaju za svako međustanično rastojanje, za svaku od odabranih linija i za svaki karakteristični period (koji su definisani u prethodnom koraku metodologije). Veličine kojima se opisuju karakteristike vremena vožnje na jednom međustaničnom rastojanju su:

- prosečno vreme vožnje na međustaničnom rastojanju,
- merodavna raspodela realizovanih vremena vožnje,
- standardno odstupanje vremena vožnje,
- minimalna vrednost vremena vožnje i
- maksimalna vrednost vremena vožnje.

U okviru ovog koraka, u kome se utvrđuju odabrane karakteristike vremena vožnje, još jednom se proveraju i „filtriraju“ podaci (vremena vožnje). Iz skupa se uklanjaju ekstremne vrednosti vremena vožnje za svaku liniju, međustanično rastojanje i svaki

karakteristični period posmatranja posebno. Kriterijumi za utvrđivanje ekstremnih vrednosti vremena vožnje su:

$$tv_{sm,s,j,p,i} < \bar{t}v_{sm,s,j,p} - 3\sigma v_{sm,s,j,p} \quad i \quad tv_{sm,s,j,p,i} > \bar{t}v_{sm,s,j,p} + 3\sigma v_{sm,s,j,p} \quad (4.1)$$

gde je:

sm – smer linije ($sm = 1, 2$),

s – redni broj stajališta na liniji ($s = 1, 2, \dots, n_{sm} - 1$),

j – redni broj odabrane linije ($j = 1, 2, \dots, broj odabranih linija$),

p – redni broj karakterističnog perioda ($p = 1, 2, \dots, broj karakterističnih perioda$),

i – element uzorka vremena vožnje ($i = 1, 2, \dots, N_{sm,s,j,p}$),

$N_{sm,s,j,p}$ – broj elemenata u uzorku na liniji j za međustanično rastojanje $l_{sm,s}$ u karakterističnom periodu p ,

$tv_{sm,s,j,p,i}$ – vrednost vremena vožnje i -tog elementa u karakterističnom periodu p na liniji j za međustanično rastojanje $l_{sm,s}$,

$\bar{t}v_{sm,s,j,p}$ – srednja vrednost vremena vožnje u karakterističnom periodu p na liniji j za međustanično rastojanje $l_{sm,s}$,

$\sigma v_{sm,s,j,p}$ – vrednost standardnog odstupanja vremena vožnje u karakterističnom periodu p na liniji j za međustanično rastojanje $l_{sm,s}$.

Prema definisanom modelu, iz dalje analize se isključuju sve realizacije vremena vožnje na određenom međustaničnom rastojanju odabrane linije čije vrednosti su u toku jednog karakterističnog perioda izvan definisanog opsega. Kada se ima u vidu da je raspodela vremena vožnje na međustaničnim rastojanjima pozitivno asimetrična, odnosno da ima izražen desni krak, realno je očekivati da će definisani opseg imati veći uticaj na ekstremne vrednosti koje su značajno veće od izračunate srednje vrednosti vremena vožnje. Nakon eliminacije ekstremnih vrednosti ponavlja se proračun definisanih karakteristika vremena vožnje i dobijaju se njihove konačne vrednosti neophodne za dalju analizu.

U narednom, četvrtom koraku, utvrđuju se vrednosti veličine intervala za svaku od odabranih linija i za svaki opisan karakteristični period. Analiza planiranih vrednosti intervala vrši se na osnovu definisanog reda vožnje. Planirane vrednosti intervala utvrđuju se izdvajanjem planiranih vremena polazaka vozila sa terminusa (ili karakteristične tačke) u okviru karakterističnog perioda i izračunavanjem razlike vremena polazaka dva uzastopna vozila. Kako bi se vrednost intervala za međustanično

rastojanje na posmatranoj liniji u karakterističnom periodu iskazala jednom vrednošću, vrši se proračun srednje vrednosti planiranog intervala. Utvrđivanje vrednosti frekvencije vozila, kao i intervala, za jednu liniju vrši se na osnovu definisanog reda vožnje. Frekvencija jedne linije predstavlja recipročnu vrednost utvrđenog intervala. Frekvencija vozila koja se realizuje na posmatranom međustaničnom rastojanju izražava se brojem vozila koja na njemu funkcionišu (koja ga opslužuju) u posmatranom času, bez obzira na linije na kojima su angažovana, što znači da je ova vrednost zajednička frekvencija svih linija. Zajednička frekvencija je suma frekvencija svih linija koje opslužuju određeno međustanično rastojanje.

Skup izlaznih rezultata trećeg i četvrtog koraka istraživanja kreira bazu podataka o karakteristikama funkcionisanja odabranih linija.

Naredni korak predstavlja sublimaciju sprovedenih istraživanja karakteristika strukture i karakteristika funkcionisanja, odnosno spajanje dve kreirane baze. Njemu prethodi još jedna validacija podataka u okviru koje se iz dalje analize isključuju:

- sve vrednosti karakteristika funkcionisanja za prva i poslednja međustanična rastojanja na odabranim linijama,
- sve vrednosti karakteristika funkcionisanja za međustanična rastojanja kod kojih su karakteristike strukture promenljive u vremenu.

Na ovaj način kreirana konačna baza podataka o karakteristikama strukture i funkcionisanja odabranih linija javnog masovnog transporta putnika najčešće se ne može direktno koristiti u nekom od modela multivarijacione analize. Određene podatke u bazi je neophodno prilagoditi za dalju upotrebu u statističkoj analizi. Prilagođavanje podataka se vrši kodiranjem (šifriranjem), koje podrazumeva broičano ili slovno obeležavanje podataka o definisanim faktorima.

4.3. Kodiranje podataka

U cilju dobijanja odgovora na pitanje da li nezavisne promenljive objašnjavaju značajan deo varijabiliteta zavisnih promenljivih i određivanja jačine utvrđenih veza, prvi korak u sprovođenju multivarijacione analize je definisanje broja i oblika nezavisnih i zavisnih promenljivih. U narednoj tabeli prezentovane su planirane zavisne i nezavisne promenljive, njihov oblik i obrazloženje, kao i tip podatka i jedinica mere kojim se iskazuju.

Tabela 4.2. Kodiranje podataka o strukturi i funkcionisanju

Nezavisne promenljive			
Oznaka	Oblik i obrazloženje	Tip podatka	Jedinica
DUŽINA	= $l_{sm,s}$, dužina međustaničnog rastojanja	ceo broj	[m]
KA	= 1, za međustanična rastojanja na kojima je smer kretanja vozila ka gradu 0, za međustanična rastojanja na kojima je smer kretanja vozila od grada	binarna	/
B	= 1, za međustanična rastojanja na kojima je tip trase B 0, za međustanična rastojanja na kojima su drugi tipovi trasa	binarna	/
C2	= 1, za međustanična rastojanja na kojima je tip trase C2 0, za međustanična rastojanja na kojima su drugi tipovi trasa	binarna	/
C1	= 1, za međustanična rastojanja na kojima je tip trase C1 0, za međustanična rastojanja na kojima su drugi tipovi trasa	binarna	/
ST	≥ 0 , broj saobraćajnih traka na međustaničnom rastojanju	ceo broj	/
SIG	≥ 0 , broj signalisanih raskrsnica na međustaničnom rastojanju	ceo broj	/
NSIGS	≥ 0 , broj nesignalisanih raskrsnica sa prvenstvom prolaza na međustaničnom rastojanju	ceo broj	/
NSIGB	≥ 0 , broj nesignalisanih raskrsnica bez prvenstva prolaza na međustaničnom rastojanju	ceo broj	/
PEŠ	≥ 0 , broj pešačkih prelaza na međustaničnom rastojanju	ceo broj	/
PARK	= 1, za međustanična rastojanja na kojima je zastupljeno parkiranje 0, za međustanična rastojanja na kojima nije zastupljeno parkiranje	binarna	/
DESNO	≥ 0 , broj desnih skretanja na međustaničnom rastojanju	ceo broj	/
LEVO	≥ 0 , broj levih skretanja na međustaničnom rastojanju	ceo broj	/
INT	> 0 , planirani interval na analiziranoj liniji	realan broj	[min]
FRE	> 0 , planirana zajednička frekvencija na međustaničnom rastojanju	realan broj	[voz/h]
Zavisne promenljive			
AVERAGE	> 0 , prosečno vreme vožnje na međustaničnom rastojanju	realan broj	[sekundi]
MIN	> 0 , minimalno vreme vožnje na međustaničnom rastojanju	realan broj	[sekundi]
MAX	> 0 , maksimalno vreme vožnje na međustaničnom rastojanju	realan broj	[sekundi]
SD	≥ 0 , standardno odstupanje vreme vožnje na međustaničnom rastojanju	realan broj	[sekundi]
SDLOG	≥ 0 , transformisana vrednost standardnog odstupanja vremena vožnje na međustaničnom rastojanju	realan broj	/

U odeljku 4.2.2. opisani su karakteristični periodi u toku funkcionisanja linija javnog masovnog transporta putnika kao potencijalni faktori koji utiču na vreme vožnje i njegovu varijaciju. Pored toga što karakteristični periodi utiču na karakteristike vremena vožnje, može se pretpostaviti da imaju značajan uticaj kako na postojanje tako i na nivo uticaja ostalih nezavisnih promenljivih na vrednost zavisnih promenljivih.

Pretpostavka je da postojanje uticaja i njegov nivo zavise od perioda posmatranja. Zbog toga korišćenje multivarijacione analize treba da podrazumeva detaljnu analizu uticaja nezavisnih promenljivih na svaku od definisanih zavisnih promenljivih zasebno u okviru svakog od karakterističnih perioda. U cilju dobijanja rezultata na ovaj način predviđene detaljne analize, neophodno je izvršiti dvadeset nezavisnih proračuna, odnosno za svaki od četiri karakteristična perioda se izvršava analiza uticaja nezavisnih promenljivih zasebno za pet definisanih zavisnih promenljivih.

Pored zavisnih promenljivih čije se vrednosti razlikuju za svaki od karakterističnih perioda funkcionisanja, jedino se vrednosti dve nezavisne promenljive (intervala linije i frekvencije) takođe menjaju, dok ostale nezavisne promenljive, koje predstavljaju karakteristike strukture međustaničnih rastojanja, imaju fiksne vrednosti, tj. njihove vrednosti ne zavise od vremenskog perioda koji je predmet analize.

Neophodno je napomenuti da je u toku preliminarnih vrednovanja modela konstatovano da odabrana multivarijaciona analiza nije primenljiva za objašnjavanje standardnog odstupanja kao karakteristike vremena vožnje, zbog čega se u analizu uvodi i peta zavisna promenljiva, koja predstavlja transformisanu vrednost standardnog odstupanja (SDLOG). Identičan pristup imali su Mazloumi i dr. (2010) u okviru svog istraživanja. Naime, za slučajeve kada je distribucija raspodele pozitivno asimetrična, odnosno kada ima izražen desni krak (što je slučaj kod vremena vožnje), preporučuje se primena logaritamske transformacije utvrđenih vrednosti standardnih odstupanja. Transformisana vrednost standardnog odstupanja kao peta (dodatna) zavisna promenljiva je takođe obuhvaćena prethodno opisanom tabelom, u kojoj je prezentovano kodiranje podataka.

4.4. Izbor metode multivarijacione analize

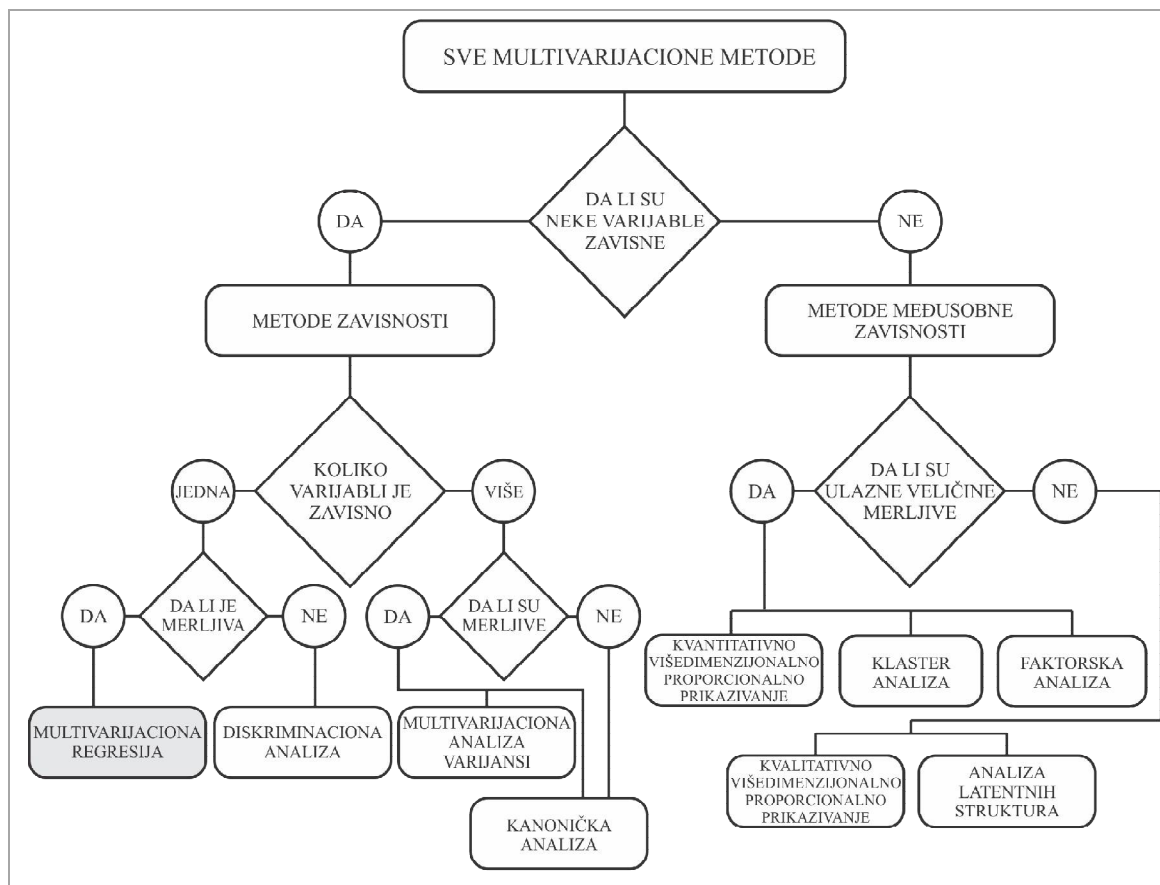
Mnoge pojave ili obeležja elemenata statističkog skupa variraju ne pod uticajem jednog faktora, već pod istovremenim uticajem dvaju ili više faktora. Tako broj saobraćajnih nezgoda zavisi od brzine vožnje, od gustine saobraćaja, meteoroloških uslova, kvaliteta puta, doba dana, kao i niza drugih faktora (Popović, 2010).

Jedna od mogućih podela statistike je na osnovu uloge verovatnoće, uzorka i osnovnog skupa u prikupljanju i analizi podataka (Kovačić, 1994), odnosno:

- deskriptivna statistika (bavi se sređivanjem, klasifikacijom statističkih podataka, tabeliranjem, grafičkim prikazivanjem; zove se i statistika u užem smislu),
- induktivna statistika (ili matematička statistika; bavi se zaključivanjem o zakonitostima i međusobnim odnosima u skupu na osnovu numeričkih podataka dobijenih posmatranjem i merenjem na uzorku),
- multivarijaciona statistika (analizira odnose najmanje tri slučajne promenljive uz primenu linearne algebre; ne sadrži pojmove verovatnoća, uzorak i skup; obuhvata: faktorsku analizu, taksonomijsku analizu, regresionu analizu, multivarijacionu analizu varijanse, diskriminacionu analizu, multivarijacionu analizu, kovarijanse itd.).

Mada ne postoji opšte prihvaćena definicija multivarijacione analize, s obzirom na to da su njene glavne karakteristike veći broj obeležja i posmatranje simultanih međuzavisnosti među promenljivama, moglo bi se reći da multivarijaciona analiza predstavlja skup statističkih metoda koje simultano analiziraju višedimenziona merenja dobijena za svaku jedinicu posmatranja iz skupa objekata koji se ispituje.

Na Slici 4.2. prezentovan je algoritam izbora multivarijacione metode u zavisnosti od karakteristika varijabli. Sa prezentovanog algoritma se vidi da se u slučaju kada se želi utvrditi uticaj više nezavisnih promenljivih na jednu zavisnu čiju vrednost možemo kvantifikovati (izmeriti) primenjuje metoda višestruke regresije (multivarijacione regresije).



Slika 4.2. Algoritam izbora multivarijacione metode⁴

S obzirom na polazne hipoteze, da karakteristike trase linije i ostali elementi strukture linije (u ovom slučaju nezavisne promenljive) utiču na vrednosti vremena vožnje (u ovom slučaju zavisna promenljiva), a samim tim i na vreme obrta na liniji javnog masovnog transporta i da je te uticaje moguće kvantifikovati, za potrebe ovog rada odabrana je metoda višestruke regresije.

Kod regresione analize nužno je unapred identifikovati koja pojava će imati ulogu zavisne promenljive, a koja nezavisne promenljive. U statistici se kod regresije najčešće, pored termina „nezavisna promenljiva“, koristi i termin „objašnjavajuća promenljiva“ ili „regresor“.

Svrha regresije jeste da se utvrdi oblik veze odnosno zavisnosti između posmatranih pojava. To se postiže pomoću odgovarajućeg regresionog modela. Lovrić (2008) definiše regresioni model kao „takav stohastički model koji kroz matematičku formulu i niz odgovarajućih pretpostavki najbolje opisuje kvantitativnu zavisnost između

⁴ Izvor: <https://www.wisdomjobs.com/e-university/research-methodology-tutorial-355/classification-of-multivariate-techniques-11574.html>, pristupljeno 20. septembra 2017. godine.

varijacija posmatranih pojava u realnosti. Regresioni model nije sam po sebi cilj regresije, već sredstvo koje služi za ocenjivanje i predviđanje vrednosti zavisne promenljive za odabrane vrednosti nezavisnih promenljivih“.

Višestruka regresija nije samo jedna tehnika, već porodica tehnika pomoću kojih se može istražiti veza jedne neprekidne zavisne promenljive i više nezavisnih promenljivih ili prediktora (obično neprekidnih). Višestruka regresija se zasniva na korelaciji, ali omogućava sofisticiranije istraživanje međusobnih veza skupa promenljivih. Zato je idealna za istraživanje složenijih pitanja iz stvarnog života, pre nego onih laboratorijskih (Pallant, 2007). Ovo je još jedan od razloga zašto je ova metoda pogodna za primenu u složenim organizaciono-tehnološkim sistemima kao što je sistem javnog masovnog transporta putnika.

4.4.1. Osnovno o modelu višestruke regresije

Ima četiri razloga zbog kojih se koristi višestruki regresioni model, a to su:

- 1) da se istraži da li nezavisna promenljiva, odnosno nezavisne promenljive objašnjavaju značajan deo varijabiliteta zavisne promenljive, tj. da se istraži da li postoji veza između zavisne i nezavisnih promenljivih,
- 2) da se odredi jačina veze, odnosno koji deo varijabiliteta zavisne promenljive može biti objašnjen sa jednom ili više nezavisnih promenljivih,
- 3) da se istraži struktura i dobije matematička forma veze između zavisne i nezavisnih promenljivih,
- 4) da se predvidi vrednost zavisne promenljive.

Postoje četiri tipa višestruke linearne regresije (prema Mann (2006)):

- Standardna ili direktna (simultana) – kod ovog tipa višestruke linearne regresije sve nezavisne promenljive se unose zajedno, ona dozvoljava ocenu relacije (uticaja) između svih nezavisnih promenljivih i zavisne promenljive, ako postoji dobra teorijska osnova za to;
- *Forward* višestruka linearna regresija – kod ovog tipa višestruke linearne regresije promenljive se unose jedna po jedna i zadržavaju ako zadovolje uslov da je $p < 0,05$; ovaj tip višestruke linearne regresije ima najbolji prediktor;

- *Backward* višestruka linearna regresija – kod ovog tipa višestruke linearne regresije sve nezavisne se unesu odjednom i eliminišu se jedna po jedna, ako zadovolje uslov da je $p > 0,05$;
- *Stepwise* višestruka linearna regresija – ovaj tip višestruke linearne regresije je kombinacija *Forward* i *Backward* tipova višestruke linearne regresije; u svakom koraku promenljive mogu da uđu ili izađu iz modela ako zadovolje zadate kriterijume; ovaj tip višestruke linearne regresije je koristan za dobijanje najbolje jednačine za predviđanje iz najmanjeg broja promenljivih.

Kako bi se analizirao uticaj svih nezavisnih promenljivih na zavisnu po karakterističnim periodima, neophodno je primeniti metod standardne ili direktne višestruke regresije.

Nastavak odeljka, koji predstavlja sažetak glavnih pretpostavki pri korišćenju višestrukog linearnog regresionog modela, preuzet je iz 5. poglavlja knjige koju su napisale Tabachnick i Fidell (2007).

Veličina uzorka – Ovde se radi o sposobnosti uopštavanja, tj. rezultat dobijen na malom uzorku ne može se uopštiti (ponovo dobiti) na drugim uzorcima. Koliko vredi rezultat koji važi za samo jedan uzorak? Stoga treba znati koliko slučajeva ili subjekata je potrebno da bi statistički pokazatelji izračunati za uzorak važili za celu populaciju iz koje je uzorak uzet. Razni autori daju različite smernice za broj slučajeva (opservacija) potrebnih za višestruku regresiju. Stevens (1996) preporučuje da je za istraživanja u društvenim naukama potrebno oko 15 subjekata po prediktoru za pouzdanu jednačinu. Tabachnick i Fidell (2007) smatraju da veličina uzorka zavisi od broja nezavisnih promenljivih, tj. $N > 50 + 8m$ (gde je m = broj nezavisnih promenljivih). Popović (2010) prezentuje dodatna dva modela za veličinu uzorka tj. $N \geq 100 + m$ i $N \geq 40m$.

Multikolinearnost i singularnost – Ovde je reč o odnosima između nezavisnih promenljivih. Multikolinearnost postoji kada su nezavisne promenljive jako korelirane ($r = 0,9$ i više). Singularnost nastaje kada je jedna nezavisna promenljiva zapravo kombinacija drugih nezavisnih promenljivih, tj. kada uopšte nije nezavisna. To bi se desilo npr. kada bi model sadržao i vrednosti na podskalama i ukupnu vrednost na skali. Svojstva multikolinearnost i singularnost nisu poželjna u okviru modela višestruke regresije, odnosno navedena svojstva sigurno ne poboljšavaju regresioni model.

Netipične tačke – Višestruka regresija je veoma osetljiva na netipične tačke (veoma velike ili veoma male vrednosti rezultata). Pronalaženje i obrada netipičnih tačaka trebalo bi da budu deo početnog procesa čišćenja podataka. To treba uraditi za sve promenljive, i zavisne i nezavisne, koje će se upotrebljavati u regresionoj analizi. Netipične tačke treba ukloniti iz skupa podataka ili im dodeliti vrednost koja jeste velika, ali se ne razlikuje previše od ostalih rezultata. Program za višestruku regresiju ima i posebne procedure za otkrivanje netipičnih tačaka. Netipične tačke zavisne promenljive mogu se prepoznati na standardizovanom dijagramu reziduala koji SPSS ume da nacrtati. Tabachnick i Fidell (2007) definišu netipične tačke kao one čije su standardizovane rezidualne vrednosti iznad približno 3,3 (odnosno manje od -3,3).

Normalnost, linearnost, homogenost varijanse, nezavisnost reziduala – Svi ovi pojmovi se odnose na razne aspekte raspodele rezultata i prirodu pripadne veze između promenljivih. Te pretpostavke se mogu proveriti na dijagramu rasturanja reziduala, koji softver SPSS generiše u sklopu procedure višestruke regresije. Reziduali su razlike između dobijene i predviđene vrednosti zavisne promenljive. Na dijagramu rasturanja reziduala može se proveriti:

- normalnost: reziduali treba da su normalno raspoređeni oko predviđenih vrednosti zavisne promenljive;
- linearnost: reziduali treba da imaju linearnu vezu s predviđenim vrednostima zavisne promenljive, tj. njihov dijagram bi trebalo da je približno prava linija;
- homogenost varijanse: varijansa reziduala oko predviđenih vrednosti zavisne promenljive treba da je približno jednaka za sve predviđene vrednosti.

4.4.2. Definisanje regresionog modela primenom SPSS softvera

Višestruka regresiona analiza se najčešće sprovodi primenom nekog statističkog softvera (MINITAB, JMP, SAS, S-Plus ili SPSS). Čak i kod višestruke regresije sa dve nezavisne promenljive, formule su složene i ručno izračunavanje zahteva mnogo vremena. Za potrebe sprovođenja višestruke regresione analize u okviru ove disertacije korišćen je softver SPSS.

SPSS predstavlja skraćenicu za *Statistical Package for the Social Sciences* (statistički program za društvene nauke). Prva verzija programa kreirali su još 1968. godine Norman H. Nie, Dale H. Bent i C. Hadlai Hull, a sam naziv proistekao je iz prvobitne

namene. Primena programa je danas toliko univerzalna da se koristi u gotovo svim oblastima gde je statistika potrebna, što ga čini veoma pogodnim za primenu i u analizi savremenih sistema javnog masovnog transporta putnika, čije detaljne i sveobuhvatne baze podataka nije moguće uspešno, brzo i kvalitetno analizirati bez primene savremenih softverskih alata za statističke analize.

U cilju opisa i pojašnjena višestrukog regresionog modela, značajni delovi rada Mann (2006) preuzeti su i prezentovani u nastavku poglavlja.

Višestruki regresioni model sa zavisnom promenljivom Y i nezavisnim promenljivim $X_1, X_2, X_3 \dots, X_k$ dat je u sledećem obliku:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (4.2)$$

gde β_0 predstavlja odsečak ili konstantu, $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k$ su koeficijenti nagiba ili regresioni parametri uz nezavisne promenljive $X_1, X_2, X_3 \dots, X_k$, a ε slučajna greška višestrukog regresionog modela. Model opisuje linearnu zavisnost između zavisne promenljive i k nezavisnih promenljivih. Osim toga, model pretpostavlja da nema interakcije nezavisnih promenljivih, što u stvarnosti nije uvek slučaj. Kada X_i ne obuhvata interakciju faktora, već prikazuje uticaj samo jedne nezavisne promenljive kao u prezentovanom modelu, takav model se naziva višestruki regresioni model prvog reda.

U modelu regresije, konstanta β_0 predstavlja vrednost Y u slučaju kada su vrednosti svih nezavisnih promenljivih jednake nuli.

Koeficijenti $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k$ se nazivaju parcijalni regresioni koeficijenti. Tako je, na primer, β_1 parcijalni regresioni koeficijent uz promenljivu X_1 . Ovaj koeficijent pokazuje prosečnu promenu promenljive Y nastalu usled jedinične promene X_1 pod uslovom da sve ostale nezavisne promenljive ostanu nepromenjene. Drugim rečima, ako se promenljiva X_1 poveća za jednu svoju jedinicu, a $X_2, X_3 \dots, X_k$ ostanu nepromenjene, tada će se Y u proseku promeniti za β_1 svojih jedinica. Slično, β_2 pokazuje prosečnu promenu Y kada se X_2 poveća za jednu svoju jedinicu, a sve ostale nezavisne promenljive ostanu nepromenjene. Koeficijenti $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k$ nazivaju se i stvarni regresioni koeficijenti ili parametri regresionog modela osnovnog skupa.

Pozitivna vrednost koeficijenta β_i ukazuje na pozitivnu zavisnost promenljive Y od promenljive X_i i obratno, negativna vrednost koeficijenta β_i ukazuje na negativnu zavisnost Y od X_i .

U prezentovanom modelu veza između svake promenljive X_i i Y je pravolinijska. Deo $\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$ je deterministički, a ε je stohastički deo.

U postupku zaključivanja o regresionim parametrima višestrukog regresionog modela koristi se t raspodela, a broj stepeni slobode iznosi:

$$df = n - k - 1 \quad (4.3)$$

gde n predstavlja veličinu uzorka, a k broj objašnjavajućih promenljivih u modelu.

Regresioni model se ocenjuje na osnovu podataka iz uzorka, a uzoračka regresiona jednačina data je u sledećem obliku:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k \quad (4.4)$$

U jednačini (4.4) vrednosti $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ su statistike uzorka koje predstavljaju odgovarajuće tačkaste ocene regresionih parametara osnovnog skupa $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k$.

Za razliku od modela (5.50), gde Y predstavlja stvarnu vrednost zavisne promenljive, u regresionom modelu uzorka (4.4) \hat{Y} označava ocenjenu (prilagođenu) vrednost zavisne promenljive. Razlika između Y i \hat{Y} predstavlja rezidual. U slučaju višestrukog regresionog modela suma kvadrata reziduala (SKR) ili suma kvadrata neobjašnjenog varijabiliteta (SKN) je:

$$SKR = SKN = \sum e^2 = \sum (Y - \hat{Y})^2 \quad (4.5)$$

Ocenjivanje regresione jednačine (4.4) se sprovodi minimiziranjem sume kvadrata reziduala, odnosno:

$$\min \sum (Y - \hat{Y})^2 \quad (4.6)$$

Drugim rečima, jednačina (4.4) se ocenjuje primenom metode najmanjih kvadrata, a dobijene vrednosti nazivaju se ocenjene vrednosti regresionih parametara po metodu najmanjih kvadrata.

Osnovne mere valjanosti višestrukog regresionog modela su:

- standardna greška regresije,
- koeficijent determinacije,
- korigovani koeficijent determinacije,
- testovi značajnosti (ANOVA tabela, t-test).

Standardna devijacija slučajne greške, σ_ϵ u modelu višestruke regresije (5.50) predstavlja meru disperzije slučajne greške. Pošto se navedeni regresioni model ocenjuje na osnovu podataka iz uzorka, standardna devijacija slučajne greške, koja nije poznata, ocenjuje se na osnovu standardne greške regresije, S :

$$S = \sqrt{\frac{SKR}{n - k - 1}} \quad (4.7)$$

gde je:

$$SKR = \sum (Y - \hat{Y})^2 \quad (4.8)$$

Koeficijent determinacije višestrukog regresionog modela se naziva koeficijent višestruke determinacije, označava se sa R^2 i pokazuje koliko je učešće objašnjenog varijabiliteta u ukupnom skupu, odnosno koliki je deo zavisne promenljive objašnjen višestrukim regresionim modelom. Koeficijent predstavlja meru validnosti višestrukog regresionog modela. Drugim rečima, ovaj koeficijent pokazuje da li izabrane nezavisne promenljive dobro objašnjavaju varijacije zavisne promenljive.

Koeficijent višestruke determinacija R^2 može imati vrednost u intervalu od 0 do 1, odnosno:

$$0 \leq R^2 \leq 1 \quad (4.9)$$

Ukupna suma kvadrata ili ukupni varijabilitet (SKU) jednak je zbiru sume kvadrata objašnjenog varijabiliteta (SKO) i sume kvadrata reziduala (neobjašnjenog varijabiliteta) (SKR). Navedene sume se izračunavaju pomoću sledećih modela:

$$SKR = \sum e^2 = \sum (Y - \hat{Y})^2 \quad (4.10)$$

$$SKO = \sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2 \quad (4.11)$$

$$SKU = SK_{yy} = \sum (Y - \bar{Y})^2 \quad (4.12)$$

Koeficijent višestruke determinacije predstavlja udeo SKO u SKU:

$$R^2 = \frac{SKO}{SKU} \quad (4.13)$$

Nedostatak ovog koeficijenta je u tome što se njegova vrednost povećava sa dodavanjem novih promenljivih bez obzira na to da li one stvarno značajno objašnjavaju varijacije zavisne promenljive, što znači da model sa većom vrednošću R^2 ne mora nužno dati bolji rezultat predviđanja te zavisne promenljive.

Kako bi se eliminisao pomenuti nedostatak, koristi se korigovani koeficijent višestruke determinacije \bar{R}^2 , koji je u stvari koeficijent višestruke determinacije (R^2) korigovan brojem stepeni slobode. Vrednost \bar{R}^2 se, dodavanjem novih promenljivih u regresionom modelu, može povećati, smanjiti ili ostati ista. Ako nova promenljiva značajno doprinosi objašnjenju varijacije Y , tada se \bar{R}^2 povećava; u suprotnom se smanjuje. Vrednost \bar{R}^2 se može izračunati na dva načina:

$$R^2 = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n-1}{n-k-1} \right) \quad (4.14)$$

ili:

$$R^2 = 1 - \frac{SKR / (n - k - 1)}{SKU / (n - 1)} \quad (4.15)$$

Opšte pravilo je da veće vrednosti \bar{R}^2 podrazumevaju bolje ocenjivanje i predviđanje vrednosti date zavisne promenljive za izabrane objašnjavajuće promenljive. Međutim, neke zavisne promenljive mnogo više variraju od ostalih. Tako, na primer, $\bar{R}^2 = 0,30$ znači da regresioni model slabije objašnjava varijaciju Y , ali taj model istovremeno može biti i jedini model koji u datim uslovima najbolje reprezentuje podatke. Na primer, mnogi dobri finansijski modeli imaju vrednost \bar{R}^2 manju od 0,50.

U parametarskim testovima (npr. t-testovi, analiza varijanse), pretpostavljaju se neka svojstva populacije iz koje je uzorak uzet. To su najčešće pretpostavke o obliku raspodele populacije (npr. da je normalno raspodeljena). S druge strane, zahtevi za neparametarske tehnike nisu tako strogi i ništa se ne pretpostavlja o pripadnoj raspodeli populacije (zato se katkada nazivaju testovima bez raspodele, engl. *distribution-free tests*) (Pallant, 2007).

SPSS softverski paket ima više vrsta t-testova od kojih su najznačajnija dva testa:

- t-test nezavisnih uzoraka, koji se upotrebljava za poređenje srednje vrednosti obeležja merenog u dve različite grupe ljudi ili u različitim okolnostima; i
- t-test uparenih uzoraka, koji se upotrebljava za poređenje srednje vrednosti obeležja iste grupe ljudi merenog u dva navrata ili kada su subjekti upareni.

U oba slučaja porede se vrednosti određene neprekidne promenljive merene u dve grupe ili u dva navrata. Kada grupa odnosno okolnosti ima više od dve, umesto t-testa upotrebljava se analiza varijanse.

Većina tehnika za obradu podataka koje koriste psiholozi se odnosi na analizu direktnih veza između dve promenljive, poput t-testa, ANOVA analize ili analize različitih koeficijenata linearne korelacije. Čak se i primena višestruke regresione analize najčešće konceptualno zasniva na eksploraciji povezanosti između dve promenljive (prediktora i kriterijuma), s tim što se jedan određeni set promenljivih za koje se pretpostavlja da koreliraju sa prediktorom statistički kontroliše (Cohen i dr. 2003).

Ako su dve promenljive čija se interakcija ispituje kategoričke prirode, a promenljive na koju utiču kontinualne, u većini statističkih paketa postoji razvijen metod procene ovakvih međuodnosa, pre svega u sklopu generalnog linearnog modela, odnosno interakcija između faktora u ANOVA analizi (Rydén–Alm, 2010)

Pomoću t-testova poredi se rezultati ispitivanja dobijeni u dve različite grupe, odnosno u istoj grupi ali pod različitim uslovima. Međutim, u mnogim istraživanjima zanima nas poređenje prosečnih rezultata u više od dve grupe. Tada se upotrebljava analiza varijanse (ANOVA).

Polazne hipoteze analize varijansi su:

$$H_0: R^2 = 0$$

$$H_1: R^2 \neq 0$$

što je ekvivalentno:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1: \text{nisu svi } \beta_i \text{ jednaki } 0.$$

Kroz niz relativno jednostavnih izračunavanja potrebno je dobiti vrednost Fišerovog varijansnog količnika (F). Sinonim za izračunavanje F vrednosti je F -test ili grupni test za ispitivanje postavljenih hipoteza. F -testom se ispituje postavljena nulta hipoteza da su aritmetičke sredine k osnovnih skupova ili tretmana međusobno jednake, odnosno, da u celini nema statistički značajne razlike.

Rezultati jednofaktorske analize varijanse uobičajeno se prikazuju u tabeli sledećeg izgleda:

Tabela 4.3. Analiza varijansi za model višestruke regresije

Izvor varijabiliteta	Stepeni slobode	Suma kvadrata	Srednja suma kvadrata	F količnik
Regresija	k	SKO	SKO / k	SKO / k
Greška	$n - k - 1$	SKR	$SKR / (n - k - 1)$	$SKR / (n - k - 1)$
Ukupno	$n - 1$	SKU		

Za tumačenje dobijene vrednosti za F koriste se tablice graničnih vrednosti F raspodele. Navedene tablice sadrže izabrani nivo značajnosti ρ i dva stepena slobode, a u tablici je data i maksimalna vrednost do koje je značajna H_0 .

Da li se postavljena nulta hipoteza prihvata ili ne zavisi od Fišerovog varijansnog količnika – ukoliko je njegova vrednost manja od 0,05, nulta hipoteza se odbija, a ukoliko je njegova vrednost veća od 0,05, nulta hipoteza se prihvata.

Ukoliko se nulta hipoteza odbije, znači da je najmanje jedna nezavisna promenljiva u linearnom odnosu sa Y .

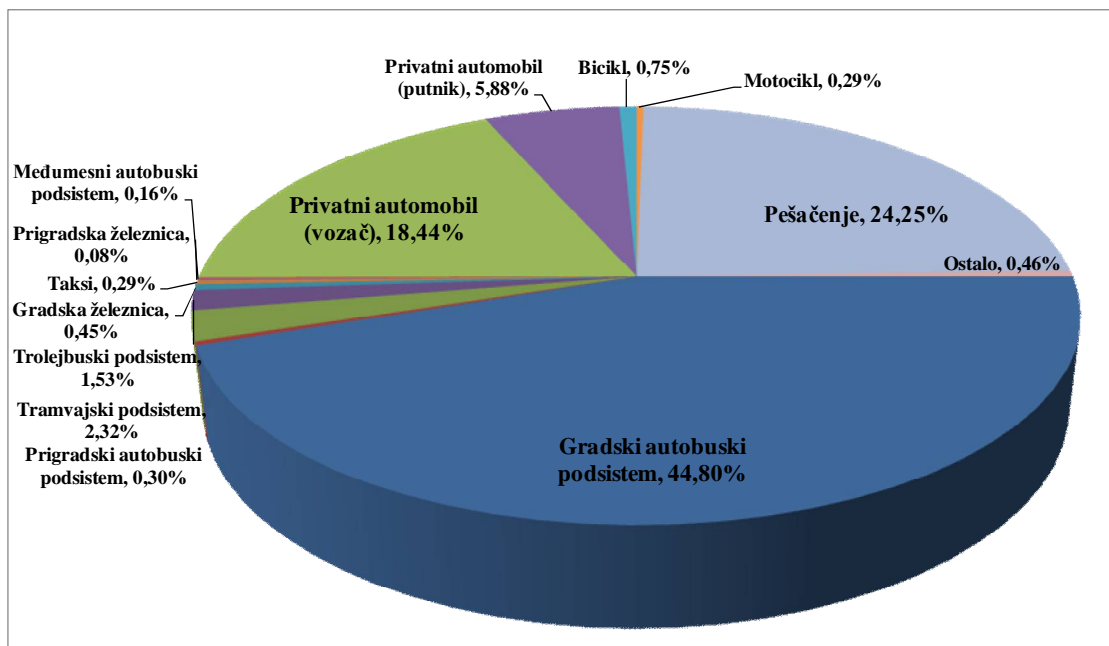
4.5. Primena definisane metodologije na odabranim linijama

Nakon definisanja metodološkog postupka i izbora adekvatne metode multivarijacione analize, u okviru ovog odeljka opisana je njihova primena u realnom sistemu javnog masovnog transporta putnika na odabranom skupu linija. U prvom delu odeljka izvršen je izbor sistema i reprezentativnih linija javnog masovnog transporta putnika na kojima će se definisani metodološki postupak primeniti. U nastavku su prezentovani rezultati utvrđivanja karakteristika strukture i karakteristika funkcionisanja odabranih linija, dok je poslednji deo odeljka posvećen opisu formirane baze podataka, koja predstavlja ulaz u odabranu metodu multivarijacione analize.

4.5.1. Izbor sistema i linija javnog masovnog transporta putnika

Analizom sistema javnog masovnog transporta putnika u okruženju, beogradski sistem se svakako izdvaja kao dominantan. Sistem javnog masovnog transporta putnika u Beogradu je veoma složen – na tržištu postoji više operatora različitih vlasničkih statusa (javni i privatni) i više vidovnih podsistema (autobusi, trolejbusi, tramvaji, sistem gradske železnice), sa značajnim angažovanim resursima (vozila, zaposleni, energija, finansije). Sistem nije u potpunosti integrisan, što se ogleda u delimično integrisanoj mreži linija, neoptimizovanim redovima vožnje, delimično integrisanom tarifnom sistemu, sistemu karata i naplate u gradsko–prigradskom području, dezintegrisanom operativnom upravljanju itd.

Značaj sistema javnog masovnog transporta putnika za funkcionisanje celokupnog urbanog područja Beograda reprezentuje i njegovo učešće u vidovnoj raspodeli kretanja stanovnika (Slika 4.3). Sistem u Beogradu nije izabran samo zbog njegove veličine, već i zbog njegove važnosti kao primarnog servisa mobilnosti svih građana urbanog područja. Da je ovaj sistem u Beogradu najznačajniji servis mobilnosti njegovih građana, potvrđuje i prezentovana vidovna raspodela, na osnovu koje se vidi da se podsistemima javnog masovnog transporta putnika u Beogradu realizuje 49,48% svih kretanja.



Slika 4.3. Vidovna raspodela kretanja za grad Beograd – Modal Split⁵

Kako bi se ukratko opisao sistem, čime bi se stekla slika o njegovoj veličini i osnovnim karakteristikama, u Tabeli 4.4. date su osnovne statičke i dinamičke karakteristike mreže linija po podsistemima i za sistem ukupno.

Tabela 4.4. Statičke i dinamičke karakteristike mreže gradskog i prigradskog transporta putnika po podsistemima

Podsistem	Broj linija	L_{sm}	n	N_{max}	f	BTR
		[m]	[stajališta]	[voz]	[pol/dan]	[vozilokm/dan]
Autobuski	134	3.728.357	6.219	1.032	20.594	299.863,06
Tramvajski	8	181.513	379	109	1.929	23.715,56
Trolejbuski	7	111.678	242	95	2.006	16.708,62
Gradska železnica	1	47.200	18	6	105	2.478,18
UKUPNO	150	4.068.748	6.858	1.242	24.634	342.765,42

Legenda: L_{sm} [m] – eksploataciona dužina linija u oba smera sa okretnicama
 n [stajališta] – ukupan broj stajališta na linijama posmatrano u oba smera
 N_{max} [voz] – maksimalni broj vozila angažovan na linijama
 f [pol/dan] – broj polazaka planiran definisanim redom vožnje
 BTR [vozilokm/dan] – bruto transportni rad planiran definisanim redom vožnje

⁵ Izvor: SMARTPLAN Beograda (2017), WSP Parsons Brinckerhoff.

Mrežu sistema javnog masovnog (gradskog i prigradskog) transporta putnika u Beogradu, koji u toku jednog radnog dana opsluži preko 2,5 miliona putnika, čini ukupno 150 linija, od kojih je najviše autobuskih – 134. Autobuski podsistem je daleko najzastupljeniji, što se može uočiti i uvidom u ostale karakteristike prezentovane u tabeli. Redom vožnje, koji predstavlja plan funkcionisanja sistema u Beogradu, predviđeno je da maksimalni broj vozila koji se angažuje u najopterećenijem periodu u toku dana iznosi 1.242, a da sva angažovana vozila, u toku jednog radnog dana, ostvare 24.634 polaska.

Navedeni broj linija (veličina mreže), planirani obim transportnog rada od 342.765,42 vozilo kilometara, broj angažovanih vozila i ukupan broj planiranih polazaka ukazuju na obim razvoja sistema i na njegovo značajno učešće u održivoj mobilnosti grada. Takođe, imajući u vidu da je u sistemu transporta putnika u Beogradu najzastupljeniji autobuski podsistem, kod kog je stepen nezavisnosti trase nizak, a da je jedna od tema disertacije analiza uticaja elemenata strukture i karakteristika trase na karakteristike vremena vožnje, ovaj sistem je postao logičan izbor kao studija slučaja za implementaciju prezentovane metodologije.

Dodatna motivacija za ovakav izbor je i činjenica da je Sekretarijat za javni prevoz grada Beograda 2012. godine implementirao savremen sistem za monitoring vozila angažovanih u sistemu javnog gradskog i prigradskog transporta. Pored podataka o funkcionisanju u realnom vremenu koje sistem pruža i koji se koriste za unapređenje upravljanja transportnim procesom u realnom vremenu (korektivne strategije), sistem prikupljene podatke memoriše u bazu i kreira niz izveštaja o istoriji funkcionisanja javnog transporta za određeni vremenski period koji pružaju mogućnost dalje analize i obrade, a sve u cilju sprovođenja preventivnih strategija za unapređenje transportnog procesa, a samim tim i kvaliteta transportne usluge, posebno u pogledu pouzdanosti funkcionisanja. Opis sistema sa osnovnim karakteristikama prezentovan je u odeljku 4.5.3.

Potvrda definisane metodologije i razvijenog modela izvršena je na odabranim linijama, koje kvalitetno reprezentuju sistem u celini. Za potrebe analize iz sistema je izdvojeno 10 gradskih linija, od kojih je 8 autobuskih (kao najzastupljenijeg podsistema), a po jedna linija su tramvajaska i trolejbuska, dok prigradske linije i linija sistema gradske železnice nisu obuhvaćene analizom. Odabrane linije su radijalnog (6) i

dijametralnog (4) karaktera, dok tangencijalne, kružne i periferne linije nisu uključene u analizu. Osnovni razlog za izostavljanje navedenih linija je nemogućnost jasnog i preciznog određivanja smera kao jednog od predviđenih potencijalnih faktora od uticaja. Pored podsistema u kome funkcioniše i karaktera trase u odnosu na teritoriju grada, prilikom izbora linija jedan od bitnih faktora je bila i raznolikost karakteristika strukture i funkcionisanja. Spisak reprezentativnih linija sa izabranim karakteristikama strukture i funkcionisanja prezentovan je u narednoj tabeli.

Tabela 4.5. Izabrane karakteristike strukture i funkcionisanja reprezentativnih linija

Broj linije	Naziv linije	L_{sr}	l_{sr}	N_{max}	f	BTR
		[m]	[m]	[vozila]	[polazaka/dan]	[voziokm/dan]
6	Tašmajdan /park/ – Ustanička	5.193	430	6	215	1.187,03
16	Karaburma 2 – Novi Beograd /Pohorska/	11.315	525	22	402	4.548,63
18	Medaković 3 – Zemun /Bačka/	18.860	543	22	294	6.023,80
23	Karaburma 2 – Vidikovac	18.283	522	26	378	7.094,74
29	Studentski trg – Medaković 3	8.032	477	24	455	3.654,56
31	Studentski trg – Konjarnik	7.360	490	15	363	2.671,68
43	Trg Republike – Kotež	8.414	701	9	287	2.444,19
51	Glavna železnička stanica – Bele vode	9.702	555	7	198	1.921,00
53	Zeleni venac – Vidikovac	12.988	563	13	240	3.220,63
85	Banovo brdo – Borča 3	26.742	732	11	141	3.827,95
Ukupno					2.973	36.594,21

Legenda: L_{sr} [m] – srednja eksploataciona dužina linija sa okretnicama
 l_{sr} [m] – srednja dužina međustaničnog rastojanja na liniji
 N_{max} [vozila] – maksimalni broj vozila angažovan na liniji
 f [polazaka/dan] – broj polazaka planiran definisanim redom vožnje
 BTR [voziokm/dan] – bruto transportni rad planiran definisanim redom vožnje

Reprezentativnost odabranih linija ogleda se pre svega u njihovom učešću u sistemu gradskog transporta u Beogradu. Prema definisanom redu vožnje za radni dan, za deset odabranih linija predviđeno je da ostvare više od 16% polazaka od svih gradskih linija u sistemu i da ostvare više od 15% ukupnog transportnog rada.

Detaljne statičke i dinamičke karakteristike odabranih linija prezentovane su u okviru priloga B. Za svaku odabranu liniju u okviru priloga dat je daljinar linije, trasa linije ilustrovana na odgovarajućoj mapi i osnovni dinamički elementi.

4.5.2. Utvrđivanje karakteristika strukture odabranih linija

U definisanom metodološkom postupku prvi korak je utvrđivanje međustaničnih rastojanja na odabranim linijama, vrednosti njihovih dužina, kao i smera kretanja, koje se vrši analizom zvaničnih dokumenata Sekretarijata za javni prevoza grada Beograda – daljinarâ linija.

Daljinar linije je dokument linije kojim su definisani osnovni statički elementi linije. Sadrži broj i naziv linije (sastoji se od naziva početnog i krajnjeg stajališta), trasu linije (spisak ulica kojima definisana trasa prolazi), redni broj i spisak stajališta u oba smera linije sa jedinstvenom šifrom (kodom) stajališta, kao i vrednosti dužina svakog međustaničnog rastojanja posebno i kumulativne vrednosti u posmatranom smeru.

U drugom koraku sprovedeno je neposredno istraživanje u realnom sistemu u cilju evidentiranja potencijalnih faktora koji dodatno opisuju karakteristike trase. Metod podrazumeva obilaženje trase (definisane daljinarom) i evidentiranje prethodno utvrđenih elemenata strukture pomoću pripremljenog snimačkog obrasca. Istraživanje je izvršeno na 10 odabranih linija, a nakon obrade snimačkih obrazaca i utvrđivanja vrednosti istraživanih elemenata, prikupljeni podaci su povezani sa podacima utvrđenim u prvom koraku.

Primenom definisanog procesa validacije iz dalje analize isključeno je 57 međustaničnih rastojanja (od ukupno 439 na odabranim linijama), od kojih 40 pripada prvoj definisanoj grupi (prva i poslednja međustanična rastojanja) a 17 drugoj (međustanična rastojanja sa promenljivim elementima trase u vremenu). Izlaz iz primenjene metodologije istraživanja karakteristika strukture je formirana baza o karakteristikama strukture 10 odabranih linija koja sadrži podatke za 382 međustanična rastojanja, koji predstavljaju osnovu za sledeći korak u primeni definisanog metodološkog postupka.

4.5.3. Utvrđivanje karakteristika funkcionisanja odabranih linija

Opisana metodologija za istraživanje karakteristika funkcionisanja linija u sistemu javnog masovnog transporta putnika se u značajnoj meri (gotovo u svakom definisanom koraku) oslanja na postojanje savremenog sistema za monitoring i upravljanje angažovanim vozilima. Jedan od savremenih sistema za monitoring i upravljanje vozilima u javnom masovnom transportu putnika funkcioniše i u Beogradu, tako da je

baza o funkcionisanju vozila na odabranim linijama korišćenja u okviru ove disertacije upravo baza koju obezbeđuje ovaj sistem.

U nastavku poglavlja, pre opisa rezultata obrade i analize prikupljenih podataka, prezentovane su osnovne karakteristike savremenog sistema za monitoring i upravljanje vozilima u javnom masovnom transportu putnika u Beogradu. Pored osnovne arhitekture sistema, opisan je način prikupljanja i transfera podataka, kao i sama vrsta podataka (informacije koje sadrže o funkcionisanju sistema transporta putnika).

Sistem za praćenje i upravljanje vozilima u javnom masovnom transportu u Beogradu

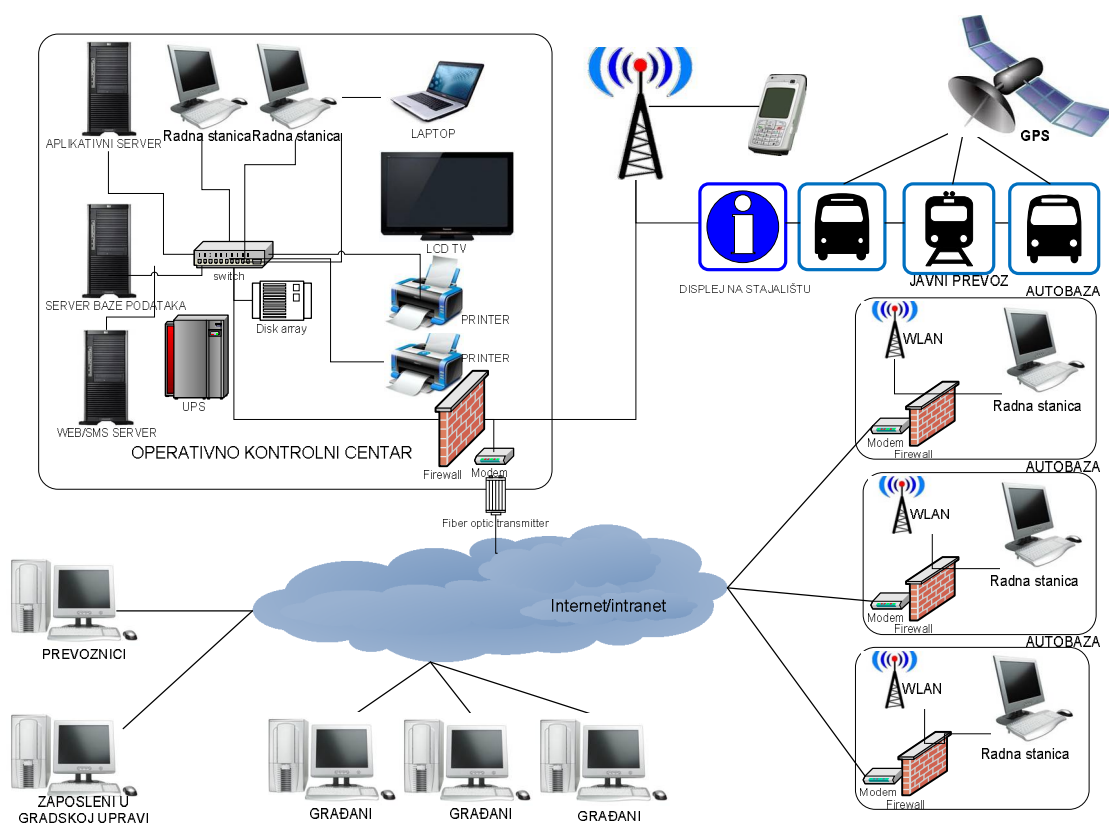
Efikasno upravljanje složenim sistemom danas nije moguće bez kompjuterizacije svih procesa u sistemu i prikupljanja podataka u cilju kreiranja bogate i pouzdane baze o karakteristikama funkcionisanja. Pitanje integrisanog tarifnog sistema i tarifne politike, sistema karata i naplate usluga, kao i jedinstveno i integrisano upravljanje i kontrola transportnog procesa, predstavlja jedan od osnovnih i najsloženijih preduslova za efikasan i efektivan sistem javnog transporta (Tica i dr., 2012a).

Ova pitanja su značajna za organe gradske uprave kao jedan od mogućih instrumenata u ostvarivanju politike održivog razvoja kroz kontrolisano korišćenje putničkih automobila, socijalne politike prema određenim grupama stanovnika, ostvarenja planiranog nivoa subvencija, zadovoljstva korisnika pružanjem jedne od najznačajnijih javnih usluga u gradu.

Imajući ovo u vidu, Sekretarijat za javni prevoz, kao ekspertska deo organa lokalne uprave, implementirao je novi sistem za upravljanje, baziran na GPS i GPRS tehnologiji, koji predstavlja veoma moćan alat pomoću koga se može obezbediti ostvarivanje svih navedenih ciljeva i benefita za sve interesne grupe. Implementirani sistem se sastoji iz tri dela koji čine deo za monitoring i upravljanje vozilima na mreži linija, deo namenjen naplati usluge (savremeni sistem karata i naplate) i deo za informisanje korisnika. U okviru ovog odeljka prezentovana je osnovna struktura celokupnog sistema i dat je sažet opis dela koji se odnosi na monitoring i upravljanje vozilima.

U tehničkom pogledu, osnovni elementi sistema za upravljanje (Slika 4.4) su: kontrolni centar (KC – glavni dispečerski centar), *data center (main i support)*, ostali

korisnici (operatori, klijenti), satelitski sistem za pozicioniranje, komunikaciona infrastruktura i oprema u vozilu (Petrović i dr., 2010).



Slika 4.4. Arhitektura sistema za upravljanje javni masovnim transportom u Beogradu

U kontrolnom centru instalirana je mreža računara povezana sa internetom, koja omogućava operativno upravljanje i kontrolisanje osnovnog transportnog procesa – funkcionisanja.

Ostali korisnici u sistemu su prevoznici i putnici, kojima se, u skladu sa njihovim potrebama i zahtevima, omogućava pristup informacijama (u skladu sa definisanim korisničkim pravima) koje sistem pruža.

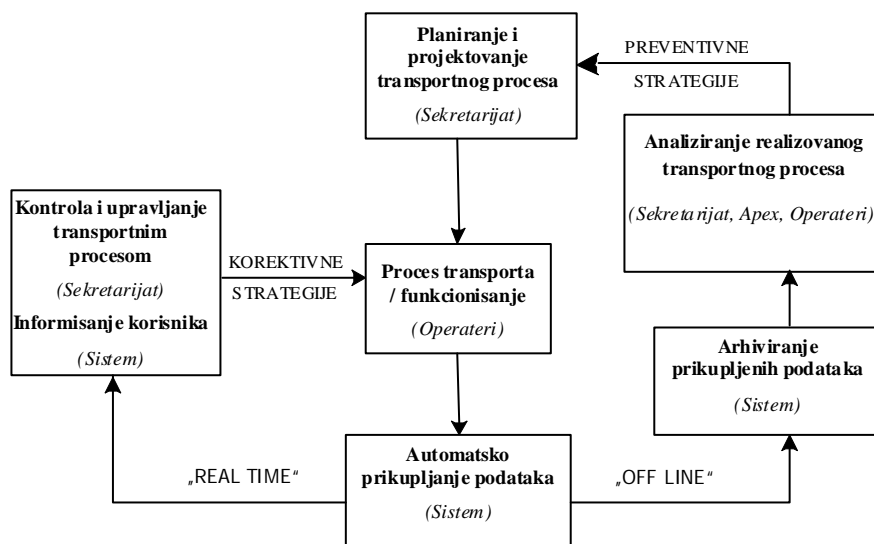
Komunikaciona infrastruktura obezbeđuje sve potrebne funkcionalnosti transfera podataka između vozila i KC, vozila i autobaze, KC i stajališta i KC i operatora. Tip mreže koja se koristi za prenos podataka u podsystemu za upravljanje vozilima je GSM mreža mobilne telefonije, odnosno GPRS i SMS komunikacija i komunikacija putem interneta.

Opremu ugrađenu u vozila javnog transporta čine uređaj za komunikaciju (kompleksan uređaj sastavljen od GPS/GPRS modula sa pripadajućom opremom,

mikroprocesora, memorija i napajanja) i komandna tabla vozača (osnovne funkcije su komunikacija sa dispečerskim centrom preko odgovarajućeg GSM/GPRS modula i identifikacija vozača preko integrisanog čitača beskontaktnih kartica (RFID)).

Polazna tačka u sistemu za upravljanje je planiranje i projektovanje transportnog procesa i u njoj se definišu očekivani parametri funkcionisanja. Savremeni sistem upravljanja javnim transportom u Beogradu vrši praćenje funkcionisanja transportnog procesa u prostoru (trase linija, stajališta, terminusi...) i vremenu (redovi vožnje, brzina vozila, vreme obrta, radno vreme vozača, smene vozača itd.) (Tica i dr., 2016a).

Razlikujemo dve grupe prikupljenih podataka: u realnom vremenu (*real time*) i nakon određenog perioda (*off line*) (Slika 4.5).

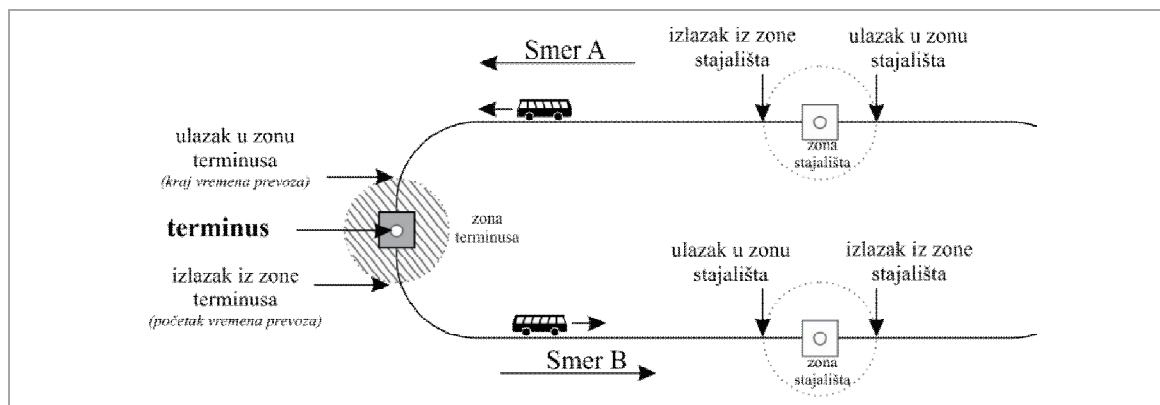


Slika 4.5. Dijagram procesa upravljanja sistemom transporta putnika u Beogradu

Off line data se koriste za detaljnu i dugoročnu analizu transportnog procesa. *Real time data* su podaci koje vozila u dvosmernoj komunikaciji sa sistemom šalju u toku funkcionisanja transportnog procesa. Sistem podatke sa vozila arhivira i analizira i na taj način omogućava kvalitetan monitoring i kontrolu. Glavni cilj i izlazni rezultat automatskog lociranja i praćenja vozila je i utvrđivanje nivoa poštovanja planiranih i ugovorenih obaveza. Pored analize arhiviranih podataka, savremeni sistem putem modula za praćenje performansi (*Real time vehicle performance module – RTVPM*) analizira pristigle podatke i na osnovu predefinisanih kriterijuma alarmira dispečere o nastalim poremećajima u realnom vremenu u cilju aktiviranja određenih korektivnih strategija (Bajčetić, 2013).

Pomoću GPS uređaja i uređaja za komunikaciju svako vozilo u KC šalje dve vrste paketa UDP (*user datagram protocol*) podataka – standardni paket podataka, koji se šalje na svakih 30 sekundi i na svaka 2 sata, i forsirani paketi podataka, koji se šalju u predefinisanim događajima. U slučaju nemogućnosti komunikacije, podaci se čuvaju u memoriji kompjutera u vozilu i odmah nakon uspostavljanja veze šalju se u KC.

Kako bi se bolje opisalo mesto i vreme nastanka predefinisanih događaja, na Slici 4.6. prezentirana je šema trase sa terminusom i stajalištima. Većina događaja vezana je za zone stajališta i terminusa koje su kružnog oblika, a definisane su usvojenim prečnikom od 40 metara. Predefinisani događaji koji forsiraju slanje podataka (pored redovnog na 30 sekundi i na dva sata) su: prijava vozača u sistem i odjava iz sistema, početak poluobrta, trenutak ulaska u zonu terminusa i izlaska iz nje, trenutak ulaska u zonu stajališta i izlaska iz nje.



Slika 4.6. Predefinisani događaji na trasi u sistemu za upravljanje u Beogradu

Količina i vrsta informacija koje paketi sadrže zavise od učestalosti slanja određenog paketa, ali i od samog događaja (kada su u pitanju forsirani podaci). Informacije koje uređaji u vozilima snimaju i šalju putem UDP paketa su:

- identifikacioni kod vozila (jedinstveni broj za svako vozilo u sistemu),
- kod linije (jedinstveni broj svake linije u sistemu),
- smer kretanja (smer A / smer B),
- broj poluobrta (svaki poluoobrta planiran redom vožnje ima jedinstveni broj),
- identifikacioni kod terminusa (jedinstveni broj svakog terminusa u sistemu),
- vreme dolaska/polaska sa terminusa,
- identifikacioni kod stajališta (jedinstveni broj svakog stajališta u sistemu),
- vreme dolaska na stajalište i polaska sa stajališta,

- broj opsluženih stajališta (broj opsluženih stajališta u posmatranom smeru odabrane linije),
- GPS pozicija vozila (geografska širina i dužina),
- redni broj vozila na liniji (definisano redom vožnje),
- identifikacioni broj vozača (jedinstveni broj vozača u sistemu),
- vreme prijavljivanja/odjavljivanja vozača.

Na osnovu vremenskog trenutka ulazaka vozila u zone stajališta i terminusa i izlazaka iz njih, o čemu postoje podaci u sistemu, mogu se izvesti dinamičke karakteristike, odnosno realizovane karakteristike funkcionisanja vozila na linijama javnog masovnog transporta putnika. Glavne karakteristike neophodne za sprovođenje analize jesu vremena vožnje po međustaničnim rastojanjima, čije karakteristike predstavljaju zavisne promenljive. Osim za vreme vožnje, i za sve ostale elemente kojima se opisuje kretanje vozila na liniji (definisano u odeljku 2.3.2) mogu se utvrditi realizovane vrednosti.

Utvrđivanje karakterističnih perioda

Prilikom određivanja karakterističnih perioda u sistemu javnog masovnog transporta putnika u praksi se najčešće povezuju karakteristike realizovanih dinamičkih elemenata sa karakteristikama transportnih zahteva. Proces nastanka transportnih zahteva, a samim tim i njihove vrednosti, kao i vrednosti dinamičkih elemenata, veoma je složen i ima karakteristike nehomogenosti i nestacionarnosti – nehomogenost, jer se na svakom stajalištu linije u jednom karakterističnom periodu vremena pojavljuju različite veličine zahteva i vremena vožnje, a na istom stajalištu transportni zahtevi i vremena vožnje pokazuju izraženu promenu u različitim periodima vremena; nestacionarnost, jer u toku perioda funkcionisanja linije veličina transportnih zahteva i vremena vožnje zavisi od mesta na vremenskoj osi kada su ispostavljeni odnosno realizovani.

Filipović (1989) smatra da je proces nastanka moguće opisati slučajnom funkcijom. Da bi se od slučajne funkcije dobila slučajna promenljiva, autorka deli period funkcionisanja na manje periode vremena koje naziva periodima stacionarnosti. U tim periodima transportni zahtevi postaju slučajna promenljiva (sa osobinama homogenosti i stacionarnosti). Za definisanje granica perioda stacionarnosti koriste se metode

verifikacije hipoteze (Filipović, 1989). Za dokazivanje postojanja homogenosti transportnih zahteva u vremenu autorka ispituje mogućnost primene više neparametarskih i parametarskih testova, kao i testova odsustva tendencije. Kao najpogodniji testovi izdvojeni su test Smirnov–Kolmogorova i test odsustva trenda.

Za određivanje karakterističnih perioda, u okviru kojih bi se vreme vožnje za određeno međustanično rastojanje prezentovalo jednom vrednošću, korišćen je empirijski ekspertski metod pomoću dijagrama maksimalnih vrednosti vremena vožnje po časovima u toku dana (Banković, 1982).

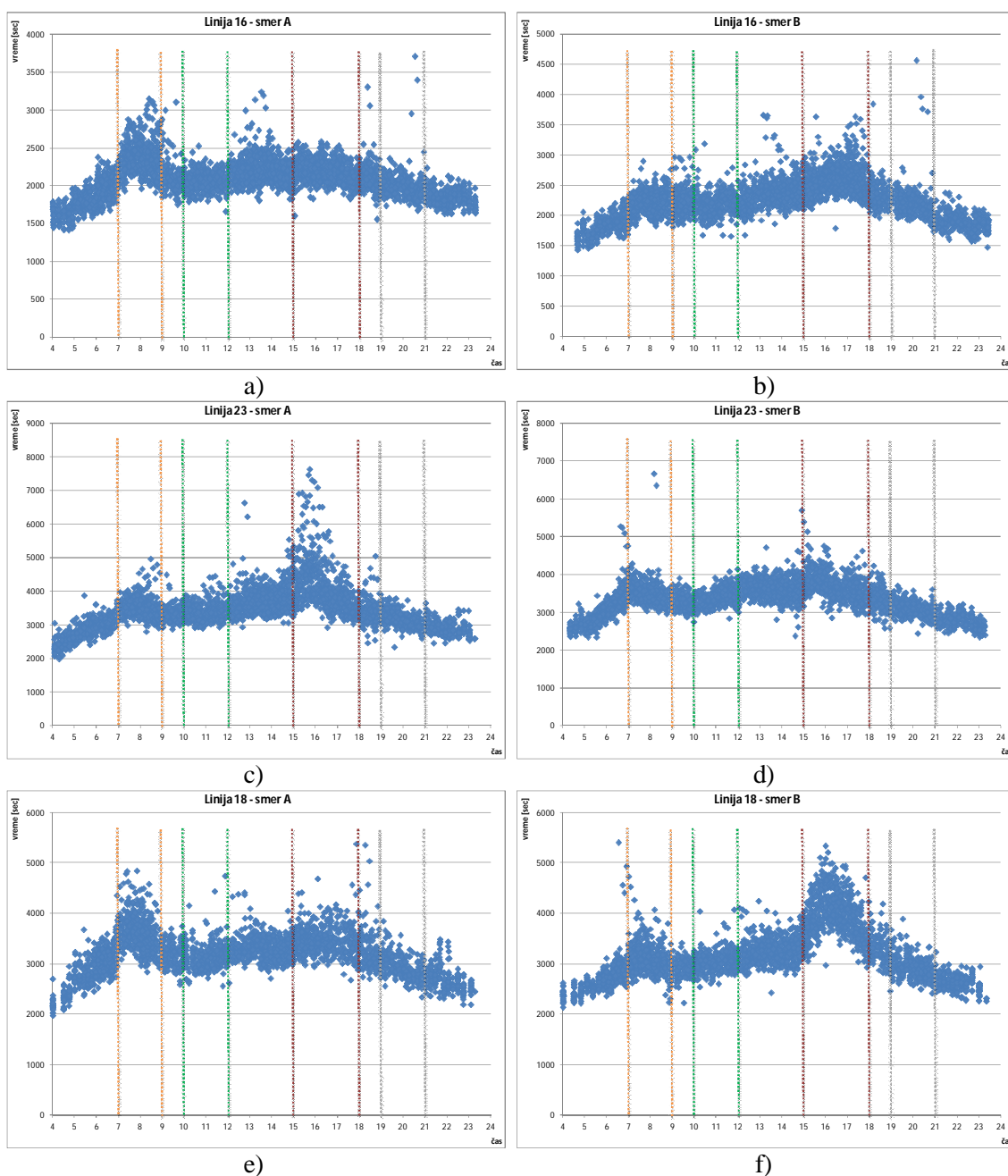
Drugi autori su za potrebe sličnih analiza period funkcionisanja linije delili na periode od kojih su dva susedna imala istu granicu, tj. kraj jednog perioda predstavljao bi početak narednog. Kao što je već rečeno, to predviđenom metodologijom nije slučaj, već se izdvajaju karakteristični periodi, čime se izbegavaju prelazni periodi.

Za prethodno definisana četiri karakteristična perioda primenom opisane metode utvrđene su granice:

- za jutarnji vršni (JV) period od 07:00 do 09:00,
- za jutarnji vanvršni (JVV) period od 10:00 do 12:00,
- za popodnevni vršni (PV) period od 15:00 do 18:00 i
- za popodnevni vanvršni (PVV) period od 19:00 do 21:00.

Potvrda definisanih granica karakterističnih perioda su i prezentovane slike 4.7. na kojima su ilustrovane vrednosti realizovanih vremena prevoza u toku perioda funkcionisanja odabranih linija. Odabrane linije su date kao primer, a vrednosti realizovanih vremena prevoza su izlazni rezultat sprovedene metodologije za utvrđivanje karakteristika funkcionisanja. Na prezentovanim slikama istaknute su i definisane granice karakterističnih perioda, kako bi se jasno moglo izvršiti vizuelno poređenje.

Uporednom analizom se jasno i nedvosmisleno uočava da definisane granice karakterističnih perioda kvalitetno reprezentuju promene vrednosti realizovanih vremena prevoza u toku funkcionisanja linije. Na slikama se posebno izdvajaju vršni časovi, što je posebno istaknuto na linijama 16 i 18 u smeru A za jutarnji vršni period (Slika 4.7.a i 4.7.e). Vrednosti vremena prevoza u popodnevnom vršnom periodu se posebno ističu na liniji 23 u smeru A i kod linije 18 u smeru B (Slika 4.7.c i Slika 4.7.f, respektivno).



Slika 4.7. Realizovana vremena prevoza na odabranim linijama u toku perioda funkcionisanja

Utvrđivanje karakteristika vremena vožnje

Na osnovu niza prezentovanih podataka o radu vozila koje sistem za praćenje prikuplja formira se baza podataka koje aplikacije u okviru sistema obrađuju i koriste u kreiranju različitih izveštaja. U procesu obrade i prezentovanja ne vrši se logička provera valjanosti prikupljenih podataka i njihovo filtriranje, a ove dve operacije su

ključne u cilju dobijanja preciznih vrednosti koje će realno reprezentovati funkcionisanje vozila u sistemu javnog masovnog transporta.

Za potrebe analize u okviru disertacije korišćena je baza koju je sistem za monitoring i upravljanje vozilima u javnom masovnom transportu u Beogradu formirao u periodu od 3. 10. 2016. do 4. 11. 2016. godine. U obradu su uzeti podaci o funkcionisanju vozila na liniji u toku radnih dana za navedeni period. Podaci o funkcionisanju sistema u toku subote i nedelje nisu uzeti u razmatranje pre svega što se tim danim karakteristike dinamičkog saobraćaja značajno razlikuju od ostalih dana u nedelji, a takođe se i plan funkcionisanja linija javnog masovnog transporta (red vožnje) razlikuje radnim danim u odnosu na dane vikenda. Baza koju je sistem formirao je primenom triju metodologijom definisanih koraka korigovana i daljom analizom su obuhvaćene 670.673 realizovane vrednosti vremena vožnje (evidentiranih vremena vožnje vozila na odabranim međustaničnim rastojanjima).

Utvrđivanje intervala

Redom vožnje u sistemu javnog masovnog transporta u Beogradu, koji definiše Sekretarijat za javni prevoz, planirana su vremena polazaka vozila sa terminusa, tj. postojećim načinom rada nije predviđeno definisanje vremena polazaka za svako stajalište na gradskim linijama. Dakle, planirana vrednost intervala na terminusu reprezentuje njegovu vrednost i na svim stajalištima duž linije, a samim tim i na svim međustaničnim rastojanjima. Planirane vrednosti intervala utvrđene su izdvajanjem planiranih vremena polazaka vozila sa terminusa u okviru karakterističnog perioda i izračunavanjem razlike vremena polazaka dva uzastopna vozila.

U narednoj tabeli prezentovane su utvrđene prosečne vrednosti planiranog intervala vozila na odabranim linijama u okviru svakog od definisanih karakterističnih perioda. Prezentovane vrednosti intervala izražene su u minutima.

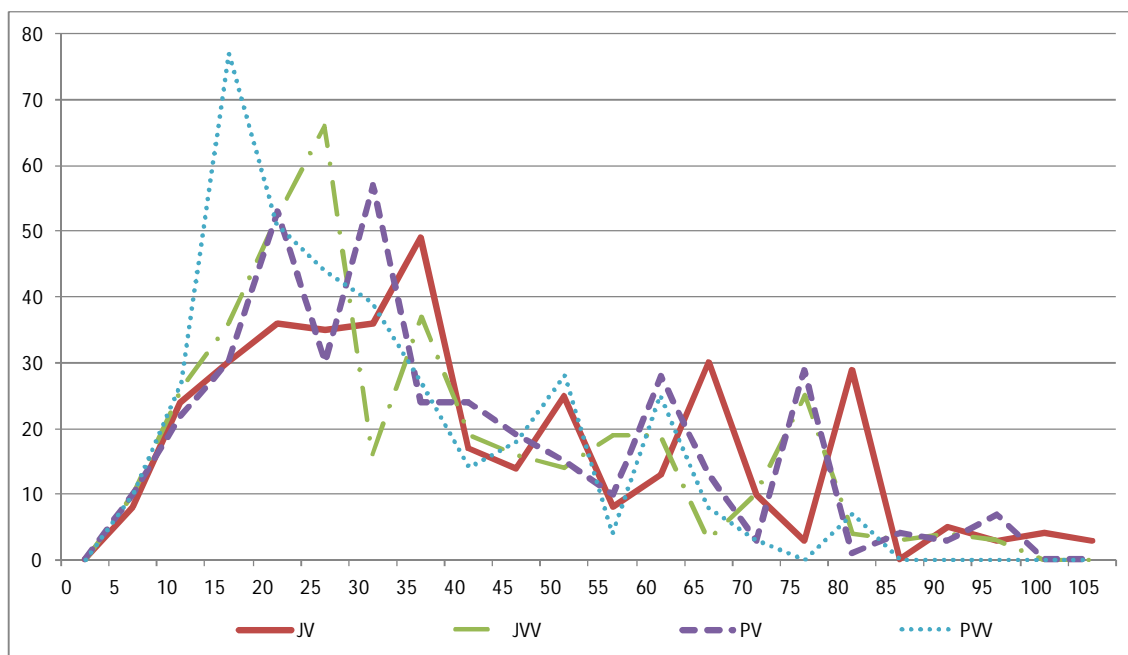
Tabela 4.6. Prosečne vrednosti planiranih intervala po karakterističnim periodima

Broj linije	Naziv linije	interval [min]			
		JV	JVV	PV	PVV
6	Tašmajdan /park/ – Ustanička	19,67	28,00	24,86	28,00
16	Karaburma 2 – Novi Beograd /Pohorska/	4,10	6,42	4,86	7,63
18	Medaković 3 – Zemun /Bačka/	6,00	8,43	6,44	9,75
23	Karaburma 2 – Vidikovac	5,36	5,76	5,48	6,71
29	Studentski trg – Medaković 3	3,84	5,64	4,62	6,83
31	Studentski trg – Konjarnik	4,21	6,37	5,21	7,00
43	Trg Republike – Kotež	7,87	8,47	7,78	10,08
51	Glavna železnička stanica – Bele vode	9,75	9,5	9,53	10,08
53	Zeleni venac – Vidikovac	7,25	8,71	8,36	12,00
85	Banovo brdo – Borča 3	14,5	16,00	16,00	18,00

Utvrđivanje frekvencije

Utvrđivanje vrednosti frekvencije vozila za jednu liniju se, kao i za interval, vrši na osnovu definisanog reda vožnje. Takođe, za frekvenciju vozila, kao i za interval, važi da planirana vrednost na terminusu reprezentuje vrednost i na svim stajalištima duž linije, a samim tim i na svim međustaničnim rastojanjima. Za evidentiranje svih linija čija trasa prolazi određenim međustaničnim rastojanjem korišćen je softver PTD (*Public Transport Demand Analysis Toll*), razvijen na Katedri za drumski i gradski transport Saobraćajnog fakulteta. Jedna od funkcionalnosti softvera omogućava izlistavanje spiska svih linija u sistemu javnog masovnog transporta u Beogradu koje opslužuju određeno stajalište. U sledećem koraku je, za sve evidentirane linije, pomoću definisanog reda vožnje utvrđena recipročna vrednost intervala, odnosno frekvencija vozila, a sumiranjem frekvencija svih evidentiranih linija koje opslužuju određeno međustanično rastojanje dobijena je vrednost zajedničke frekvencije kojom se reprezentuje njegovo opterećenje.

Raspodela vrednosti zajedničkih frekvencija na odabranim međustaničnim rastojanjima po karakterističnim periodima u toku dana prezentovana je na narednoj slici.



Slika 4.8. Raspodela zajedničkih frekvencija po karakterističnim periodima

Vrednosti zajedničke frekvencije su minimalne na samostalnim delovima trase analiziranih linija, a najmanja je jednaka recipročnoj vrednosti intervala na samostalnom delu trase linije 85 – Banovo brdo – Borča 3 i iznosi oko 4 vozila na čas, u zavisnosti od perioda posmatranja. S druge strane, maksimalne zajedničke frekvencije dostižu vrednost oko 100 vozila na čas na najopterećenijim međustaničnim rastojanjima na koridoru od Ade Ciganlije do Sajma, koji opslužuje čak 14 linija sistema javnog masovnog transporta u Beogradu.

Broj linija koji opslužuje određeno međustanično rastojanje se u toku perioda funkcionisanja sistema ne menja, pošto sve linije u sistemu imaju celodnevni režim rada, ali vrednosti zajedničkih frekvencija, kao posledica definisanog reda vožnje, imaju različite vrednosti u zavisnosti od perioda posmatranja. Sa prezentovane slike 4.8. se može uočiti kako se raspodela vrednosti frekvencija menja po definisanim karakterističnim periodima. Zajedničke frekvencije imaju veće vrednosti u vršnim periodima, pri čemu je posebno izražen jutarnji vršni period, dok su najmanje u popodnevnom vanvršnom času.

4.5.4. Baza o karakteristikama strukture i funkcionisanja odabranih linija

Primenom još jednog koraka validacije, predviđenog definisanom metodologijom, i integrisanjem dve baze kreira se konačna baza o strukturi i funkcionisanju odabranih linija. Svako od 382 međustanična rastojanja na 10 linija sadrži sledeća 42 podatka, od kojih njih 15 predstavlja nezavisne promenljive, a njih 20 predstavlja različite vrednosti 5 zavisnih promenljivih po karakterističnim periodima:

- broj linije,
- šifru međustaničnog rastojanja,
- naziv međustaničnog rastojanja,
- dužinu,
- smer,
- tip trase,
- broj saobraćajnih traka,
- broj signalisanih raskrsnica,
- broj nesignalisanih raskrsnica sa prvenstvom prolaza,
- broj nesignalisanih raskrsnica bez prvenstva prolaza,
- broj pešačkih prelaza,
- informaciju o postojanju parkiranja,
- broj skretanja udesno,
- broj skretanja ulevo,
- vrednost intervala linije za sva četiri definisana karakteristična perioda,
- vrednost zajedničke frekvencije na međustaničnom rastojanju, posebno za svaki od četiri definisana karakteristična perioda,
- prosečno vreme vožnje na međustaničnom rastojanju, posebno za svaki od četiri definisana karakteristična perioda,
- minimalno vreme vožnje na međustaničnom rastojanju, posebno za svaki od četiri definisana karakteristična perioda,
- maksimalno vreme vožnje na međustaničnom rastojanju, posebno za svaki od četiri definisana karakteristična perioda,
- standardno odstupanje vremena vožnje na međustaničnom rastojanju, posebno za svaki od četiri definisana karakteristična perioda,

- transformisanu vrednost standardnog odstupanja posebno za svaki od četiri definisana karakteristična perioda.

Na prezentovanom skupu podataka primenjeno je prilagođavanje podataka, tehnologijom opisanom u odeljku 4.3, koja podrazumeva njihovo kodiranje (brojčano ili slovno obeležavanje) kako bi odgovarajuća definisana metoda multivarijacione analize mogla da se izvrši. U narednom odeljku prezentovani su glavni rezultati sprovedene multivarijacione analize primenom metode višestruke regresije na definisanom skupu podataka.

4.6. Rezultati primene multivarijacione analize

Prezentovanje rezultata izvršeno je u više zasebnih celina u nastavku ovog rada. U prvom delu odeljka izvršena je provera važenja osnovnih pretpostavki metode višestruke regresije, a na osnovu izlaznih rezultata i naknadna korekcija skupa nezavisnih i zavisnih promenljivih. U narednom delu prezentovani su rezultati vrednovanja definisanog regresionog modela, koji pokazuju koliki deo varijanse zavisne promenljive objašnjava model, odnosno koliko odabrane nezavisne promenljive dobro objašnjavaju karakteristike vremena vožnje. Na kraju je izvršeno vrednovanje nezavisnih promenljivih kojim se utvrđuje značaj svake od nezavisnih promenljivih u definisanom regresionom modelu. Rezultati vrednovanja regresionog modela i nezavisnih promenljivih prezentovani su posebno za svaku od pet usvojenih karakteristika vremena vožnje (zavisnih promenljivih).

4.6.1. Provera važenja pretpostavki

Kao deo procedure višestruke regresije softver SPSS obavlja dijagnostiku kolinearnosti nezavisnih promenljivih. Ona često ukazuje na probleme s multikolinearnošću koji se možda ne vide u matrici korelacija. Rezultati te dijagnostike dati su u Tabeli 4.7. *Coefficients* vrednostima za *Tolerance* i VIF. *Tolerance* pokazuje koliki deo varijanse date nezavisne promenljive nije objašnjen varijansama drugih nezavisnih promenljivih u modelu i računa se po formuli $1-R^2$ za svaku promenljivu. Kada je ta vrednost jako mala (manja od 0,10), to ukazuje na visok nivo korelacije s drugim promenljivama, dakle na multikolinearnost. Druga vrednost, VIF (*variance inflation factor*, faktor povećanja varijanse), predstavlja recipročnu vrednost veličine

Tolerance, a u skladu s tim su problematične vrednosti VIF, koje ukazuju na multikolinearnost, one iznad 10. U narednoj tabeli prezentovane su vrednosti koeficijena VIF i *Tolerance* za definisane nezavisne promenljive.

Tabela 4.7. Dijagnostika kolinearnosti nezavisnih promenljivih

Nezavisne promenljive	Oznaka	Collinearity Statistics	
		Tolerance	VIF
Konstanta	(Constant)		
Dužina međustaničnog rastojanja	DUŽINA	0.761	1.314
Smer međustaničnog rastojanja	KA	0.988	1.012
Nivo nezavisnosti trase (tip trase) B	B	0.064	15.728
Nivo nezavisnosti trase (tip trase) C2	C2	0.015	67.374
Nivo nezavisnosti trase (tip trase) C1	C1	0.013	75.982
Broj saobraćajnih traka	ST	0.399	2.506
Broj signalisanih raskrsnica	SIG	0.725	1.379
Broj nesignalisanih raskrsnica sa prvenstvom prolaza	NSIGS	0.617	1.621
Broj nesignalisanih raskrsnica bez prvenstva prolaza	NSIGB	0.856	1.169
Broj pešačkih prelaza	PEŠ	0.475	2.105
Postojanje parkiranja duž trase	PARK	0.697	1.435
Broj desnih skretanja na raskrsnicama	DESNO	0.810	1.235
Broj levih skretanja na raskrsnicama	LEVO	0.914	1.094
Vrednost planiranog intervala vozila na liniji	INT	0.660	1.515
Zajednička frekvencija na međustaničnom rastojanju	FRE	0.441	2.268

Očigledno je da vrednosti koeficijena ukazuju na multikolinearnost tipova trasa i da je neophodno jedan od tipova izuzeti iz analize, tj. isključiti ga iz skupa nezavisnih promenljivih koje su obuhvaćene modelom višestruke regresije. Kako tip trase C1 nema nezavisnost trase (podrazumeva trasu kojom se kreću vozila JMTP-a u zajedničkim saobraćajnim trakama sa ostalim motornim vozilima) i kako je najzastupljeniji na mreži linija beogradskog sistema JMTP, ovaj tip trase kao nezavisna promenljiva se isključuje iz dalje analize. Pretpostavka je da je navedeni tip trase nešto što se podrazumeva i u tom pogledu je značajnije analizirati tipove trasa sa određenim stepenom nezavisnosti za koje se može očekivati da pored ostalih nezavisnih promenljivih utiču na karakteristike vremena vožnje. Sprovedena dijagnostika kolinearnosti preostalih nezavisnih promenljivih, nakon isključivanja nezavisne promenljive C1 iz analize, daje vrednosti koeficijena VIF i *Tolerance* koje se nalaze u prihvatljivim granicama (Tabela 4.8), što ukazuje na to da problem multikolinearnosti više nije prisutan.

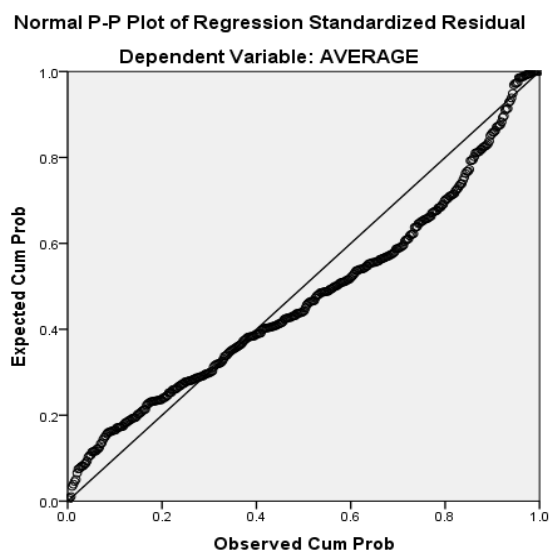
Tabela 4.8. Dijagnostika kolinearnosti nezavisnih promenljivih bez C1

Nezavisne promenljive	Oznaka	Collinearity Statistics	
		Tolerance	VIF
Konstanta	(Constant)		
Dužina međustaničnog rastojanja	DUŽINA	0.769	1.300
Smer međustaničnog rastojanja	KA	0.991	1.009
Nivo nezavisnosti trase (tip trase) B	B	0.528	1.894
Nivo nezavisnosti trase (tip trase) C2	C2	0.496	2.017
Broj saobraćajnih traka	ST	0.399	2.506
Broj signalisanih raskrsnica	SIG	0.724	1.381
Broj nesignalisanih raskrsnica sa prvenstvom prolaza	NSIGS	0.616	1.624
Broj nesignalisanih raskrsnica bez prvenstva prolaza	NSIGB	0.856	1.168
Broj pešačkih prelaza	PEŠ	0.473	2.112
Postojanje parkiranja duž trase	PARK	0.697	1.435
Broj desnih skretanja na raskrsnicama	DESNO	0.810	1.235
Broj levih skretanja na raskrsnicama	LEVO	0.914	1.094
Vrednost planiranog intervala vozila na liniji	INT	0.571	1.751
Zajednička frekvencija na međustaničnom rastojanju	FRE	0.488	2.048

Međutim, pri prezentovanim vrednostima su još uvek moguće veoma velike korelacije između nezavisnih promenljivih (iznad 0,9), pa se u narednom koraku analizira matrica korelacija. Analizom vrednosti korelacija u tabeli *Correlations*, u okviru izveštaja SPSS-a, nisu identifikovane kritične vrednosti korelacije između preostalih nezavisnih promenljivih, što znači da je, isključivanjem trase tipa C1 kao nezavisne promenljive, problem rešen.

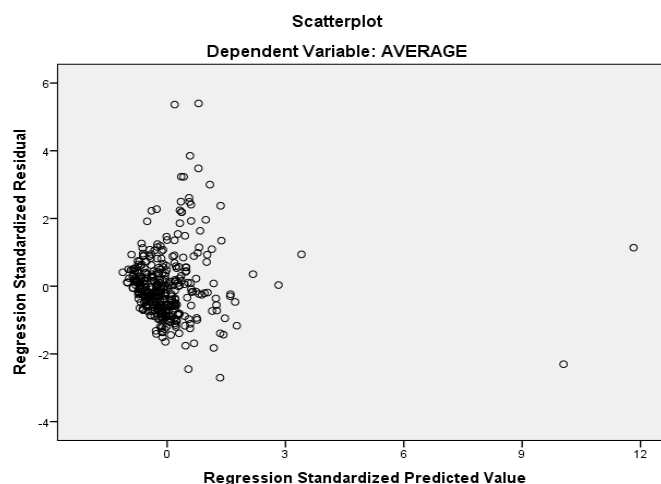
Jedan od načina da se provere pretpostavke (normalnost, linearnost, homogenost varijanse, nezavisnost reziduala) i da se utvrde netipične tačke jeste pregled *Normal Probability Plot* (P-P) i *Scatterplot* dijagrama rasturanja standardizovanog reziduala, čije crtanje se zahteva kao deo analize.

Na *Normal P-P* dijagramu rasturanja standardizovanog reziduala očekuje se da tačke leže u približno pravougaonoj dijagonalnoj liniji od donjeg levog do gornjeg desnog ugla dijagrama. Slika 4.9, na kojoj je prezentovan *Normal P-P* dijagram za srednju vrednost vremena vožnje za jutarnji vršni čas, ukazuje na to da nema velikih odstupanja od normalnosti. Svi *Normal P-P* dijagrami koji su jedan od rezultata dvadeset regresionih analiza su prezentovani u prilogu C.



Slika 4.9. Normal P-P dijagram rasturanja standardizovanog reziduala

Na dijagramu rasturanja standardizovanih reziduala *Scatterplot* (Slika 4.10) uočava se da je većina rezultata nagomilana u centru (oko tačke 0). Sistematski ili geometrijski oblik raspodele reziduala (npr. da reziduali čine neku jasnu krivu liniju ili da su viši na jednoj strani nego na drugoj) ne bi bio odgovarajući. Presentovani dijagram je izlazni rezultat multivarijacione analize uticaja nezavisnih promenljivih na srednju vrednost vremena vožnje u jutarnjem vršnom času kao zavisnu promenljivu.



Slika 4.10. Scatterplot dijagram rasturanja standardizovanog reziduala

Na dijagramu rasturanja standardizovanih reziduala *Scatterplot* može se utvrditi i ima li netipičnih tačaka. Tabachnick i Fidell (2007) definišu netipične tačke kao slučajeve koji imaju standardizovan rezidual (prikazan na dijagramu rasturanja) veći od 3,3 ili

manji od -3,3. U velikim uzorcima, kao što je ovaj, često se nađe mnogo netipičnih reziduala. Kada se nađe tek nekoliko njih, kao što je kod slučaja prezentovanog na slici, najčešća praksa je da se ne preduzimaju nikakve korektivne mere. Svi dijagrami rasturanja standardizovanih reziduala prezentovani su u prilogu D ovog rada.

4.6.2. Vrednovanje regresionog modela

U tabeli za vrednovanje regresionog modela – *Model Summary*, „R Square“ je koeficijent determinacije koji pokazuje koliki deo varijanse zavisne promenljive objašnjava model. Pokazatelj „Adjusted R Square“ je korigovana vrednost koeficijenta determinacije u zavisnosti od broja nezavisnih promenljivih i veličine uzorka, i njegova vrednost daje bolju procenu stvarne vrednosti koeficijenta determinacije u populaciji.

Tabela 4.9. Vrednovanje regresionog modela

		Model Summary ^b				
		Model Period	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
AVERAGE	JV	0.933 ^a	0.871	0.866	23.6088726	
	JVV	0.950 ^a	0.902	0.899	17.9763093	
	PV	0.884 ^a	0.781	0.772	31.2193774	
	PVV	0.956 ^a	0.914	0.911	16.5834337	
MIN	JV	0.985 ^a	0.970	0.969	7.8565038	
	JVV	0.985 ^a	0.970	0.969	7.8838053	
	PV	0.982 ^a	0.965	0.963	8.4935951	
	PVV	0.987 ^a	0.975	0.974	7.1342509	
MAX	JV	0.819 ^a	0.671	0.658	64.4032902	
	JVV	0.857 ^a	0.734	0.724	43.6425621	
	PV	0.642 ^a	0.412	0.389	105.4137579	
	PVV	0.874 ^a	0.765	0.756	38.8008137	
SD	JV	0.663 ^a	0.440	0.419	13.2193513	
	JVV	0.703 ^a	0.494	0.475	8.2889976	
	PV	0.461 ^a	0.212	0.182	22.1616306	
	PVV	0.723 ^a	0.522	0.504	7.2970116	
SDLOG	JV	0.727 ^a	0.528	0.510	0.26003	
	JVV	0.733 ^a	0.538	0.520	0.23288	
	PV	0.625 ^a	0.390	0.367	0.27536	
	PVV	0.733 ^a	0.537	0.519	0.22741	

Analizom vrednosti korigovanog koeficijenta determinacije može se uvideti jaka i veoma jaka veza između definisanih nezavisnih promenljivih i zavisne promenljive. Odabrane nezavisne promenljive odlično objašnjavaju karakteristike vremena vožnje na međustaničnim rastojanjima iskazane kroz srednju vrednost i minimum.

Kreirani regresioni model u svim karakterističnim periodima u toku dana objašnjava više od 96% varijanse minimalne vrednosti vremena vožnje. Navedene vrednosti su značajne, ali i očekivane kada se ima u vidu da vozila u sistemu JMTP imaju ograničenu brzinu, koja zajedno sa elementima strukture jasno definiše minimalno vreme vožnje na određenom međustaničnom rastojanju.

Rezultati regresionog modela u slučaju kada je zavisna promenljiva srednje vreme vožnje značajniji su u njegovom vrednovanju. Vrednosti korigovanog koeficijenta determinacije potvrđuju kvalitet kreiranog modela i u ovom slučaju. Najmanja, ali istovremeno za potvrdu vrednosti modela visoka vrednost koeficijenta je u popodnevnom vršnom času i iznosi 0,77, dok u popodnevnom vanvršnom času definisani regresioni model objašnjava više od 90% vrednosti srednjeg vremena vožnje.

Kreirani regresioni model daje veoma dobre rezultate kada je u pitanju i treća karakteristika vremena vožnje, odnosno njena maksimalna vrednost na određenom međustaničnom rastojanju. Maksimalne vrednosti vremena vožnje, za razliku od minimalnih, nisu ograničene i to ih čini težim za predviđanje i objašnjavanje. I pored toga, regresioni model uspeva da objasni više od 39% zavisne promenljive u popodnevnom vršnom periodu, za koji se može reći da je najkompleksniji i samim tim najteži za modelovanje. U ostalim karakterističnim periodima koeficijent determinacije regresionog modela, kada je zavisna promenljiva maksimalno vreme vožnje, ima vrednosti 0,658 (65,8%), 0,724 (72,4%) i 0,756 (75,6%) za jutarnji vršni, jutarnji vanvršni i popodnevni vanvršni period respektivno.

Kompleksnost popodnevnog vršnog časa se najbolje ogleda u vrednosti koeficijenta determinacije kada je zavisna promenljiva standardno odstupanje. Definisani regresioni model nije primenljiv za objašnjavanje ove karakteristike vremena vožnje u popodnevnom vršnom periodu pošto je vrednost korigovanog koeficijenta determinacije 0,182, što znači da model objašnjava samo 18,2% zavisne promenljive. Za ostale periode u toku dana regresioni model uspeva da objasni od 41,9% (jutarnji vršni period)

do 50,4% (popodnevni vanvršni period) vrednosti standardnog odstupanja vremena vožnje.

U cilju unapređenja nivoa objašnjenja koje daje regresioni model, za vrednosti standardnog odstupanja izvršena je njihova transformacija primenom logaritamske transformacije sa osnovom 10. Na taj način su vrednosti zavisne promenljive (SD) korigovane (transformisane) kako bi bolje odgovarale regresionom modelu i kreirana je nova zavisna promenljiva SDLOG.

Izlazni rezultati vrednovanja regresionog modela u slučaju kada je zavisna promenljiva SDLOG, kao što je i očekivano, imaju više vrednosti, što znači da se model može primeniti i za objašnjavanje vrednosti standardnog odstupanja, samo je neophodno prethodno navedene vrednosti transformisati. Kreirani regresioni model dvostruko bolje objašnjava zavisnu promenljivu SDLOG u popodnevnom vršnom času od promenljive SD (36,7%), dok je u ostalim karakterističnim periodima regresioni model u stanju da objasni više od 51% zavisne promenljive.

Ocena statističke značajnosti koeficijenata izvršava se na osnovu izlaznih podataka koje pruža SPSS softver u vidu ANOVA tabela. Tu su rezultati testova nulte hipoteze da je r^2 u populaciji jednako 0. Izlazni rezultati za ANOVA test značajnosti za sve zavisne promenljive dostupni su u prilogu E. Model u svim prezentovanim primerima dostiže statističku značajnost (sig. = 0,000, što zapravo znači da je $p < 0,0005$).

Izlazni rezultati vrednovanja definisanog regresionog modela jasno potvrđuju polaznu hipotezu da trasa i ostali elementi strukture linije utiču na karakteristike vremena vožnje. Sledeći korak u analizi regresionog modela je identifikacija nezavisnih promenljivih koje imaju značajan uticaj i utvrđivanje nivoa uticaja, odnosno njegova kvantifikacija.

4.6.3. Vrednovanje nezavisnih promenljivih

Pošto je dokazano da je regresioni model značajan, u narednom koraku se utvrđuje značaj svakog od koeficijenata β_i , na osnovu čega se dobija podatak o tome koliko je koja nezavisna promenljiva u modelu doprinela predikciji zavisne promenljive. Kako bi mogle da se porede promenljive, posmatraju se standardizovani koeficijenti, dati u tabeli *Coefficients* u okviru SPSS softvera, čije su vrednosti konvertovane na istu skalu kako bi bile uporedive. U cilju utvrđivanja značaja primenjuje se t-test, u okviru kog se

izračunata vrednost t-statistike (količnik nestandardizovanog koeficijenta i njegove standardne greške) poredi sa tabličnom t-vrednošću za (n-k-1) stepeni slobode i nivo značajnosti $\alpha = 0,05$. Ako je $p \leq 0,05$, zaključuje se da je koeficijent statistički značajno različit od 0, odnosno da odgovarajuća nezavisna promenljiva ima značajan uticaj na zavisnu i da je njeno postojanje u regresionom modelu potpuno opravdano. Vrednosti statistike i odgovarajućih p-vrednosti se nalaze u kolonama „t“ i „Sig.“. Pored ovih vrednosti, u tabeli su prezentovane standardizovane (Beta) i nestandardizovane (B) vrednosti koeficijenata svake od nezavisnih promenljivih. U nastavku su dati rezultati vrednovanja nezavisnih promenljivih po karakterističnim periodima, prezentovani pomoću pet tabela za svaku od definisanih zavisnih promenljivih koje opisuju karakteristike vremena vožnje.

Vrednovanje nezavisnih promenljivih kada je zavisna promenljiva srednje vreme vožnje

U Tabeli 4.10. prezentovani su rezultati vrednovanja nezavisnih promenljivih u okviru kreiranog regresionog modela kada je zavisna promenljiva srednje vreme vožnje. Kao što je očekivano, i u skladu sa rezultatima do kojih su došli drugi autori u svojim istraživanjima, najznačajniji uticaj na srednju vrednost vremena vožnje ima dužina međustaničnog rastojanja. Ono što je doprinos konkretno ovog regresionog modela je potvrda uticaja tipa trase na srednje vreme vožnje. Iz prezentovanih rezultata se vidi da koeficijent tip trase C2 ima negativan predznak, što potvrđuje polaznu pretpostavku da sa porastom stepena nezavisnosti trase opada srednje vreme trajanja vožnje. Sličan nivo uticaja očekivan je i za tip trase B, ali podaci korišćeni u ovom modelu polaznu pretpostavku nisu potvrdili, bar u pogledu srednjeg vremena vožnje. Uzrok se može tražiti u tome što, od svih linija obuhvaćenih analizom, jedino tramvajska linija 6 ima navedeni tip trase, čije su prednosti očigledno nedovoljno iskorišćene usled velikog broja signalisanih raskrsnica, značajnog preklapanja trase sa drugim tramvajskim linijama i levih skretanja vozila sa drugih tramvajskih linija (nemogućnost obilaženja). Pored dužine međustaničnog rastojanja i tipa trase C2, na vreme vožnje utiču i svi tipovi raskrsnica, dok broj saobraćajnih traka ima statistički značajan uticaj samo u dva jutarnja perioda, pri čemu je uticaj u vanvršnom periodu neznatno iznad granice značajnosti.

Specifičnost prezentovanih rezultata ogleda se i u uticaju smera na srednje vreme vožnje. Pored specifičnosti, prezentovani rezultati su svojevrsna potvrda ideje da se multivarijaciona analiza uticaja nezavisnih promenljivih vrši za svaki od karakterističnih perioda. Naime, smer ima značajan uticaj samo u jutarnjem vršnom periodu, pri čemu beta koeficijent ima pozitivan predznak, što znači da smer „ka gradu“ povećava srednju vrednost vremena vožnje u jutarnjem vršnom času. Takođe, iako smer nema statistički značaj u ostalim periodima, treba istaći da kreirani regresioni model adekvatno reprezentuje realno funkcionisanje linije, što se ogleda u predznaku beta koeficijenata, koji su u dva jutarnja perioda pozitivni, dok u dva popodnevna imaju negativne vrednosti. Pozitivan predznak ima i beta koeficijent nezavisne promenljive koja označava broj levih skretanja. Uticaj levih skretanja na srednje vreme vožnje je značajan i pozitivan u svim karakterističnim periodima.

Od potencijalnih faktora koji reprezentuju karakteristike funkcionisanja linija, a koji su obuhvaćeni regresionim modelom, samo karakterističan period ima uticaj na srednje vreme vožnje. Uticaj perioda se, kao što je već objašnjeno, ogleda u različitom značaju ostalih nezavisnih promenljivih (pre svega karakteristika struktura) na karakteristike zavisne promenljive po periodima. Izvršeno vrednovanje nezavisnih promenljivih pokazalo je da planirani interval linije i planirana zajednička frekvencija vozila na međustaničnom rastojanju nemaju značajan uticaj na zavisnu promenljivu. Na osnovu sprovedenog t-testa, pored navedenih elemenata funkcionisanja, statistički značaj nemaju ni elementi strukture: broj pešačkih prelaza i desno skretanje; postojanje podužnog parkiranja na trasi linije je statistički značajno samo u jutarnjem vanvršnom času kada, kao što je i predviđeno, ima pozitivan koeficijent, što znači da postojanje parkiranja utiče na povećanje srednjeg vremena vožnje.

Tabela 4.10. Vrednovanje nezavisnih promenljivih za zavisnu promenljivu AVERAGE

AVERAGE	JV				JVJ				PV				PVV			
	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.
Constanta	-19.725		-3.004	.003	-14.693		-2.968	.003	-8.270		-.965	.335	-7.550		-1.602	.110
DUŽINA	.073	.793	36.798	.000	.067	.821	43.981	.000	.066	.705	25.162	.000	.068	.845	48.351	.000
KA	9.933	.077	4.080	.000	.712	.006	.384	.701	-2.699	-.021	-.839	.402	-.730	-.007	-.427	.669
B	-1.349	-.004	-.161	.872	4.908	.016	.697	.486	2.562	.007	.221	.825	12.356	.042	1.983	.048
C2	-13.533	-.087	-3.237	.001	-10.796	-.080	-3.472	.001	-16.341	-.104	-2.984	.003	-7.990	-.060	-2.751	.006
ST	5.872	.071	2.384	.018	3.666	.051	1.928	.055	5.272	.063	1.619	.106	1.582	.022	.914	.361
SIG	18.528	.304	13.779	.000	17.108	.321	16.732	.000	20.081	.325	11.337	.000	15.298	.292	16.184	.000
NSIGS	4.314	.087	3.613	.000	4.651	.107	5.105	.000	8.738	.173	5.529	.000	3.852	.090	4.587	.000
NSIGB	7.824	.039	1.922	.055	8.770	.050	2.829	.005	19.563	.096	3.634	.000	6.490	.038	2.270	.024
PEŠ	.575	.012	.451	.653	.809	.020	.831	.406	-1.017	-.021	-.602	.548	.865	.021	.963	.336
PARK	4.592	.036	1.577	.116	4.745	.042	2.131	.034	2.255	.017	.585	.559	1.779	.016	.870	.385
DESNO	8.999	.035	1.688	.092	4.548	.020	1.121	.263	5.240	.020	.743	.458	5.841	.027	1.560	.120
LEVO	32.163	.124	6.293	.000	25.277	.111	6.496	.000	31.620	.120	4.678	.000	25.480	.114	7.098	.000
INT	-.341	-.024	-1.016	.310	-.068	-.007	-.287	.775	-.388	-.032	-.991	.322	-.118	-.012	-.573	.567
FRE	.007	.003	.091	.927	.053	.020	.861	.390	.015	.005	.145	.885	.075	.024	1.081	.280

Vrednovanje nezavisnih promenljivih kada je zavisna promenljiva minimalno vreme vožnje

U rezultatima vrednovanja regresionog modela, prezentovanim u prethodnom odeljku, regresioni koeficijent ima najveće vrednosti u slučaju kada je zavisna promenljiva minimalno vreme vožnje. Ovaj podatak bi trebalo posmatrati uslovno, pošto je dužina međustaničnog rastojanja značajno najuticajnija nezavisna promenljiva i ima ključnu ulogu u veličini minimalnog vremena vožnje.

Bez obzira na to što je uticaj ostalih nezavisnih promenljivih mali, u nastavku je bitno analizirati njihovu statističku značajnost i identifikovati elemente koji, pored dužine, imaju uticaj na ovu karakteristiku vremena vožnje. Rezultati vrednovanja nezavisnih promenljivih prezentovani su u Tabeli 4.11.

Kao i u prethodnoj analizi, smer ima statistički značaj samo u jutarnjem vršnom času, kada utiče na povećanje minimalnog vremena vožnje. Razlika u odnosu na prethodnu analizu je postojanje uticaja tipa trase B, s tim što je taj uticaj neočekivano sa pozitivnim predznakom. Uzrok ovakvom uticaju tipa trase je već obrazložen, a dodatna potvrda je i statistička značajnost zajedničke frekvencije u jutarnjem vršnom času, koja takođe, kao i tip trase B, povećava minimalno vreme vožnje.

Dodatne razlike u odnosu na regresioni model kada je zavisna promenljiva srednje vreme vožnje jesu statistički značaj desnih skretanja sa pozitivnim predznakom (koji je i očekivan) i nepostojanje uticaja broja saobraćajnih traka na minimalno vreme vožnje. Značajan uticaj na zavisnu promenljivu, osim u jutarnjem vršnom periodu, ima i broj signalisanih raskrsnica bez prvenstva prolaza, koji ima pozitivan predznak.

Tabela 4.11. Vrednovanje nezavisnih promenljivih za zavisnu promenljivu MIN

MIN	JV				JVJ				PV				PVV			
	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.
Constanta	-8.895		-4.071	.000	-8.731		-4.022	.000	-8.989		-3.854	.000	-7.615		-3.756	.000
DUŽINA	.061	.960	92.168	.000	.061	.955	92.422	.000	.060	.936	83.154	.000	.061	.954	100.848	.000
KA	1.842	.021	2.274	.024	.979	.011	1.204	.229	-1.475	-.017	-1.684	.093	-.042	.000	-.057	.954
B	6.330	.027	2.266	.024	8.880	.037	2.877	.004	7.501	.032	2.382	.018	8.073	.034	3.012	.003
C2	-4.465	-.042	-3.209	.001	-3.487	-.032	-2.557	.011	-3.442	-.032	-2.310	.021	-2.962	-.028	-2.370	.018
ST	-.492	-.009	-.600	.549	-.851	-.015	-1.020	.308	-.048	-.001	-.055	.957	-1.017	-.018	-1.366	.173
SIG	3.189	.076	7.128	.000	3.410	.081	7.603	.000	4.353	.104	9.032	.000	3.789	.091	9.317	.000
NSIGS	1.437	.042	3.618	.000	1.997	.058	4.999	.000	2.436	.071	5.664	.000	1.912	.056	5.292	.000
NSIGB	1.182	.009	.872	.384	4.982	.036	3.665	.000	6.060	.044	4.138	.000	4.396	.032	3.575	.000
PEŠ	.021	.001	.049	.961	-.125	-.004	-.293	.770	.121	.004	.263	.792	.222	.007	.575	.566
PARK	1.180	.013	1.217	.224	1.880	.021	1.925	.055	1.684	.019	1.606	.109	1.361	.015	1.547	.123
DESNO	5.409	.031	3.049	.002	5.905	.033	3.318	.001	7.221	.041	3.765	.000	7.706	.044	4.784	.000
LEVO	6.327	.035	3.720	.000	4.981	.028	2.919	.004	8.783	.049	4.776	.000	5.409	.030	3.503	.001
INT	.143	.014	1.278	.202	.113	.014	1.086	.278	.012	.001	.108	.914	.050	.006	.568	.571
FRE	.061	.032	2.388	.017	.041	.020	1.518	.130	.040	.020	1.377	.169	.042	.017	1.432	.153

Vrednovanje nezavisnih promenljivih kada je zavisna promenljiva maksimalno vreme vožnje

Imajući u vidu da je raspodela vremena vožnje na međustaničnim rastojanjima pozitivno asimetrična, odnosno da ima izražen desni krak, realno je očekivati da nezavisne promenljive koje utiču na srednje vreme vožnje istovremeno imaju značajan uticaj i na maksimalno vreme vožnje.

Rezultati vrednovanja nezavisnih promenljivih (Tabela 4.12) u slučaju kada je zavisna promenljiva maksimalno vreme vožnje potvrđuju izneto očekivanje. Nezavisne promenljive koje imaju prihvatljiv statistički značaj gotovo su identične u oba slučaja. Razlika se ogleda u kvantifikaciji značaja, odnosno u nivou uticaja koji svaka od nezavisnih promenljivih ima. Dužina međustaničnog rastojanja je i u ovom slučaju dominantna nezavisna promenljiva, ali sa značajno manjim uticajem nego u slučaju srednjeg vremena vožnje.

Vrednosti standardizovanih koeficijenata tipa trase C2 i svih definisanih raskrsnica ukazuju na značajniji uticaj ovih nezavisnih promenljivih na vrednost maksimalnog vremena vožnje nego na srednje vreme vožnje na određenom međustaničnom rastojanju. Najznačajniji uticaj na maksimalno realizovano vreme vožnje, pored dužine, ima postojeći broj signalisanih raskrsnica na međustaničnom rastojanju.

Poredeći značaj nezavisnih promenljivih u okviru različitih perioda uočavaju se dve razlike u odnosu na vrednovanje kada je zavisna promenljiva srednje vreme vožnje. Broj saobraćajnih traka, pored dva jutarnja perioda, ima statistički značajan uticaj i u popodnevnom vršnom času, dok prisustvo parkiranja duž trase linije utiče na povećanje maksimalnog vremena vožnje u oba jutarnja perioda (u slučaju kada je zavisna promenljiva bila srednje vreme vožnje parkiranje je imalo statistički značajan uticaj samo u jutarnjem vanvršnom periodu).

Tabela 4.12. Vrednovanje nezavisnih promenljivih za zavisnu promenljivu MAX

MAX	JV				JVJ				PV				PVV			
	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.
Constanta	-1.684		-.140	.889	82.738		1.798	.073	18.722		.647	.518	9.196		.834	.405
DUŽINA	.074	.619	20.097	.000	.074	.618	20.100	.000	.073	.378	8.234	.000	.073	.651	22.498	.000
KA	1.824	.011	.405	.685	2.284	.014	.509	.611	.041	.000	.004	.997	-.823	-.005	-.206	.837
B	6.045	.014	.354	.724	-78.346	-.178	-1.647	.100	-16.769	-.023	-.429	.668	13.403	.032	.919	.359
C2	-17.111	-.086	-2.266	.024	-99.510	-.499	-2.261	.024	-47.475	-.147	-2.567	.011	-13.089	-.069	-1.926	.055
ST	10.857	.102	2.352	.019	10.782	.101	2.344	.020	24.374	.141	2.217	.027	4.954	.049	1.224	.222
SIG	35.467	.452	14.287	.000	35.473	.453	14.340	.000	46.601	.366	7.792	.000	30.338	.409	13.717	.000
NSIGS	6.214	.097	2.809	.005	6.309	.098	2.862	.004	17.374	.167	3.256	.001	7.651	.126	3.894	.000
NSIGB	14.740	.057	1.959	.051	14.890	.058	1.986	.048	48.073	.115	2.645	.009	12.600	.052	1.884	.060
PEŠ	.921	.015	.390	.697	.851	.014	.362	.718	-5.347	-.055	-.937	.350	-.447	-.008	-.213	.832
PARK	13.824	.083	2.558	.011	13.754	.083	2.554	.011	10.540	.039	.810	.418	.393	.003	.082	.935
DESNO	10.142	.031	1.029	.304	10.327	.031	1.052	.294	-12.597	-.024	-.529	.597	10.070	.032	1.149	.251
LEVO	47.213	.141	4.998	.000	47.311	.141	5.026	.000	43.915	.081	1.924	.055	56.508	.179	6.728	.000
INT	-1.049	-.069	-1.827	.069	-1.029	-.068	-1.799	.073	-2.537	-.100	-1.920	.056	-.527	-.037	-1.094	.275
FRE	-.104	-.027	-.690	.490	-.140	-.036	-.931	.352	-.398	-.065	-1.113	.266	.054	.012	.334	.738

Vrednovanje nezavisnih promenljivih kada je zavisna promenljiva standardno odstupanje

U narednim tabelama prezentovani su rezultati vrednovanja uticaja nezavisnih promenljivih na vrednosti standardnog odstupanja (Tabela 4.13) i na transformisane vrednosti standardnih odstupanja (Tabela 4.14) vremena vožnje. Kako je u okviru analize vrednovanja modela konstatovano da definisani regresioni model nije primenljiv za objašnjavanje standardnog odstupanja kao karakteristike vremena vožnje, analize vrednovanja nezavisnih promenljivih u nastavku odnosiće se na slučaj kada je zavisna promenljiva transformisana vrednost standardnog odstupanja. Suštinski u statističkom značaju pojedinih nezavisnih promenljivih nema velikih razlika, ali se one ogledaju u različitim nivoima uticaja koji nezavisne promenljive imaju na zavisnu.

Devijacija je jedina karakteristika vremena vožnje na koju dužina međustaničnog rastojanja nema dominantan uticaj. Najznačajniji uticaj na vrednost devijacije vremena vožnje ima broj signalisanih raskrsnica. Kao što je i očekivano, navedeni uticaj je pozitivan, odnosno, što je veći broj signalisanih raskrsnica na određenom međustaničnom rastojanju, to je vrednost devijacije vremena vožnje veća. Za razliku od prethodne nezavisne promenljive, tip trase C2 negativno utiče na vrednost standardnog odstupanja, što znači da realizovano vreme vožnje na međustaničnim rastojanjima na kojima vozila imaju izdvojenu žutu traku ima značajno manju devijaciju nego tamo gde to nije slučaj. Ova činjenica je još jedna potvrda polazne pretpostavke da tip trase ima značajan uticaj na karakteristike vremena vožnje.

Takođe, kvalitet regresionog modela se ogleda i u rezultatima vrednovanja uticaja koji nezavisna promenljiva „KA“ (smer kretanja) ima na zavisnu promenljivu odnosno na vrednost standardnog odstupanja vremena vožnje. Navedena nezavisna promenljiva ima statistički značajan uticaj samo u vršnim periodima (jutarnjem i popodnevnom), pri čemu je u jutarnjem vršnom periodu beta koeficijent pozitivan (vozila koja se kreću u smeru ka gradu imaju veće standardno odstupanje vremena vožnje), dok je isti koeficijent u popodnevnom vršnom periodu negativan (vozila koja se kreću u smeru ka gradu imaju manje standardno odstupanje vremena vožnje).

Značajan uticaj na vrednost devijacije vremena vožnje ima i broj levih skretanja na međustaničnom rastojanju, koji je prisutan u svim karakterističnim periodima.

Tabela 4.13. Vrednovanje nezavisnih promenljivih za zavisnu promenljivu SD

SD	JV				JVJ				PV				PVV			
	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.
Constanta	-1.525		-.415	.679	.892		.391	.696	4.671		.768	.443	2.435		1.174	.241
DUŽINA	.005	.208	4.636	.000	.002	.133	3.121	.002	.002	.064	1.208	.228	.003	.179	4.340	.000
KA	6.979	.202	5.120	.000	.240	.010	.281	.779	.295	.006	.129	.897	-.039	-.002	-.052	.958
B	-4.739	-.051	-1.008	.314	-1.597	-.026	-.492	.623	-5.301	-.041	-.645	.519	1.072	.019	.391	.696
C2	-7.376	-.177	-3.151	.002	-4.310	-.157	-3.006	.003	-8.592	-.146	-2.210	.028	-3.426	-.138	-2.680	.008
ST	3.966	.178	2.875	.004	2.860	.195	3.262	.001	5.608	.178	2.426	.016	1.510	.114	1.983	.048
SIG	7.488	.457	9.946	.000	6.575	.609	13.945	.000	8.076	.349	6.423	.000	5.689	.582	13.678	.000
NSIGS	.665	.050	.995	.320	.501	.057	1.194	.233	3.038	.160	2.708	.007	.612	.076	1.656	.099
NSIGB	.997	.019	.437	.662	1.578	.044	1.104	.270	8.281	.109	2.167	.031	.866	.027	.689	.491
PEŠ	-.112	-.009	-.157	.876	.184	.022	.411	.681	-1.373	-.077	-1.144	.253	-.020	-.003	-.050	.960
PARK	1.166	.034	.715	.475	1.695	.074	1.652	.099	1.566	.032	.573	.567	-.145	-.007	-.161	.872
DESNO	3.953	.058	1.325	.186	-1.011	-.022	-.540	.589	-4.038	-.042	-.807	.420	.225	.005	.137	.891
LEVO	12.284	.176	4.293	.000	9.041	.196	5.039	.000	8.673	.088	1.808	.071	10.774	.258	6.821	.000
INT	-.354	-.091	-1.880	.061	-.152	-.073	-1.394	.164	-.417	-.091	-1.501	.134	-.053	-.028	-.585	.559
FRE	-.029	-.040	-.682	.496	-.021	-.040	-.748	.455	-.104	-.094	-1.389	.166	.013	.023	.440	.660

Tabela 4.14. Vrednovanje nezavisnih promenljivih za zavisnu promenljivu SDLOG

SDLOG	JV				JVJ				PV				PVV			
	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.	B	Beta	t	Sig.
Constanta	.558		7.722	.000	3.309		51.591	.000	3.703		48.971	.000	2.811		43.504	.000
DUŽINA	5.895E-05	.110	2.681	.008	4.746E-05	.098	2.419	.016	4.531E-05	.091	1.950	.052	5.282E-05	.112	2.759	.006
KA	.115	.155	4.302	.000	-.009	-.014	-3.91	.696	-.057	-.083	-2.018	.044	-.028	-.043	-1.198	.232
B	-.045	-.023	-.484	.629	-.038	-.021	-.411	.681	-.093	-.050	-.907	.365	-.016	-.009	-.191	.849
C2	-.179	-.201	-3.896	.000	-.146	-.180	-3.616	.000	-.184	-.222	-3.811	.000	-.141	-.179	-3.531	.000
ST	.117	.246	4.325	.000	.078	.180	3.154	.002	.109	.246	3.809	.000	.073	.173	3.061	.002
SIG	.194	.553	13.100	.000	.205	.645	15.459	.000	.158	.482	10.085	.000	.192	.619	14.797	.000
NSIGS	.024	.083	1.824	.069	.007	.029	.630	.529	.039	.146	2.810	.005	.020	.078	1.708	.088
NSIGB	-.022	-.019	-.484	.629	-.001	-.001	-.035	.972	.039	.036	.825	.410	-.020	-.019	-.501	.617
PEŠ	-.004	-.015	-.293	.770	.011	.043	.834	.405	-.010	-.041	-.696	.487	.003	.014	.273	.785
PARK	.022	.030	.690	.491	.037	.055	1.292	.197	-.014	-.020	-.413	.680	-.001	-.002	-.052	.959
DESNO	.068	.046	1.163	.246	.023	.017	.438	.661	.009	.006	.142	.887	.043	.033	.844	.399
LEVO	.284	.190	5.048	.000	.255	.188	5.063	.000	.221	.159	3.709	.000	.281	.212	5.699	.000
INT	-.008	-.100	-2.260	.024	-.002	-.029	-.591	.555	-.002	-.038	-.711	.478	3.898E-05	.001	.014	.989
FRE	.001	.087	1.624	.105	.002	.107	2.083	.038	.001	.082	1.383	.167	.002	.130	2.553	.011

4.7. Uporedna analiza vrednovanja i zaključna razmatranja

Polazeći od polaznih hipoteza da karakteristike trase i ostali elementi strukture linije utiču na karakteristike vremena vožnje i da se nivo uticaja može kvantifikovati, definisana je metodologija koja je primenjena na odabranim linijama sistema javnog masovnog transporta putnika u Beogradu.

Multivarijaciona statistička analiza uticaja, predviđena metodologijom, izvršena je primenom metode višestruke regresije, a izlazni rezultati prezentovani u prethodnim odeljcima jasno su potvrdili polazne hipoteze.

Rezultati vrednovanja definisanog regresionog modela pokazali su da odabrane nezavisne promenljive u značajnoj meri objašnjavaju zavisne promenljive (karakteristike vremena vožnje). Izvršena je i kvantifikacija uticaja (vrednovanje), kojom je utvrđen značaj svake od nezavisnih promenljivih u definisanom regresionom modelu za svaku od definisanih karakteristika vremena vožnje posebno. Prezentovani rezultati analiza koje su izvršene za svaki od karakterističnih perioda funkcionisanja dokazuju da, pored toga što karakteristični periodi utiču na karakteristike vremena vožnje, imaju značajan uticaj kako na postojanje, tako i na nivo uticaja definisanih nezavisnih promenljivih na vrednost zavisne promenljive.

U Tabeli 4.15. prezentovana je uporedna analiza značaja nezavisnih promenljivih na karakteristike vremena vožnje po definisanim karakterističnim periodima. Iz prezentovane uporedne analize vidi se koje od nezavisnih promenljivih imaju značajan uticaj na svaku od zavisnih promenljivih koje karakterišu vreme vožnje (ilustrovano simbolom ✓ u tabeli).

Najznačajnije nezavisne promenljive su:

- dužina međustaničnog rastojanja,
- tip trase C2,
- broj saobraćajnih traka,
- sve vrste ukrštanja (raskrsnica) i
- broj levih skretanja.

Tabela 4.15. Uporedna analiza vrednovanja nezavisnih promenljivih

	AVERAGE				MIN				MAX				SD				SDLOG			
	JV	JVV	PV	PVV	JV	JVV	PV	PVV	JV	JVV	PV	PVV	JV	JVV	PV	PVV	JV	JVV	PV	PVV
DUŽINA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
KA	✓				✓								✓				✓		✓	
B				✓	✓	✓	✓	✓												
C2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ST	✓	✓							✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SIG	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
NSIGS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓				✓	
NSIGB	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓					
PEŠ																				
PARK		✓				✓			✓	✓										
DESNO					✓	✓	✓	✓												
LEVO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
INT																	✓			
FRE																		✓		✓

Smer kretanja ima izražen uticaj na sve zavisne promenljive, ali samo u jutarnjem i popodnevnom vršnom periodu, dok tip trase B i broj desnih skretanja utiču na minimalno vreme vožnje.

Broj pešačkih prelaza je jedina nezavisna promenljiva koja opisuje karakteristike strukture linija a čiji značajan uticaj nije registrovan. Rezultati primenjenog regresionog modela pokazali su i da karakteristike funkcionisanja (interval linije i zajednička frekvencija na međustaničnom rastojanju) nemaju značajan uticaj na karakteristike vremena vožnje.

Prezentovana analiza rezultata pokazala je da se kreiranim regresionim modelom uspešno opisuju veze između definisanih nezavisnih promenljivih i zavisnih koje predstavljaju osnovne karakteristike vremena vožnje. Kako je u uvodnim delovima ovog poglavlja već navedeno, višestruki regresioni model ima četiri razloga zbog kojih se koristi, a jedan od njih je i da se predvidi vrednost zavisne promenljive.

Na osnovu navedenih činjenica može se zaključiti da je kreirani regresioni model pogodan i za predviđanje karakteristika vremena vožnje po periodima u toku funkcionisanja linije. Regresioni model se, s jedne strane, može primenjivati u okviru sistema javnog transporta i linija kod kojih ne postoje savremeni sistemi za praćenje i upravljanje vozilima, a s druge strane, može se primeniti i za unapređenje i podešavanje rada postojećih sistema za predviđanje vremena vožnje vozila, odnosno predviđanje vremenskog trenutka nailaska vozila na stajalište.

5. NOVI MODEL ZA OPTIMIZACIJU VREMENA OBRTA VOZILA NA LINIJI JAVNOG GRADSKOG TRANSPORTA

Kod gotovo svakog od modela opisanih u pregledu literature (odeljak 3.3), vremenima poluobrta po smerovima su unapred definisane i poznate vrednosti koje se koriste u kreiranim jednačinama, gde se kroz više iteracija dolazi do željenih (optimalnih) vrednosti (rezultata), bez obzira na to da li je cilj povećanje pouzdanosti funkcionisanja ili minimiziranje operativnih ili ukupnih troškova funkcionisanja linije.

U okviru ovog poglavlja biće prezentovan predlog modela za optimizaciju vremena obrta vozila na liniji javnog gradskog transporta putnika baziran na ukupnim operativnim troškovima, troškovima korisnika (putnika) i troškovima kvaliteta transportne usluge, koji će kao izlazni rezultat imati vremena poluobrta za koja se realizuju minimalni ukupni troškovi funkcionisanja celine sistema.

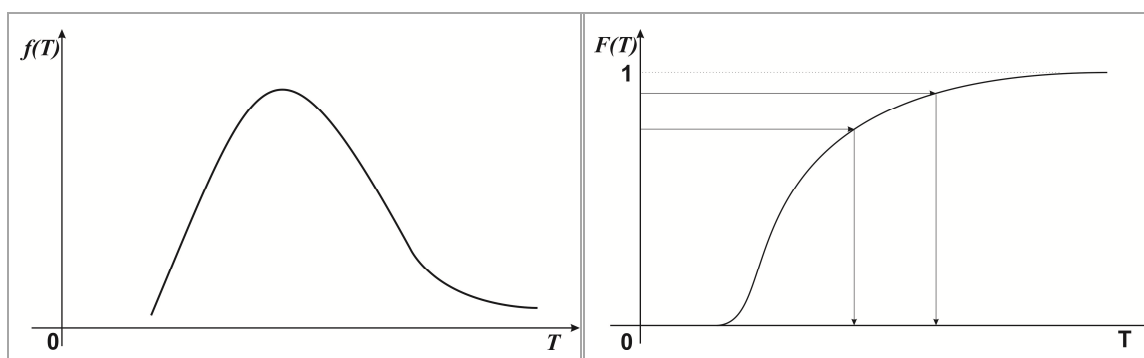
U prvom delu poglavlja formulisan je problem i pružen je opis međusobnih relacija ulaznih elemenata za izradu reda vožnje u sistemu javnog gradskog transporta putnika. U narednom delu prezentovani su rezultati sprovedene analize karakteristika realizovanog intervala duž linije javnog transporta putnika, na osnovu kojih su u nastavku kreirani regresioni modeli za predviđanje srednje vrednosti intervala i njegove varijacije u zavisnosti od vrednosti usvojenog planiranog intervala i redosleda stajališta duž posmatranog smera linije. U nastavku su opisani troškovi angažovanja osnovnih resursa (vozila) i troškovi korisnika i definisani su modeli za njihovo izračunavanje. Troškovi kvaliteta transportne usluge su razloženi na više posebnih činilaca, a modeli za njihov proračun opisani su i obrazloženi u posebnom delu poglavlja.

Na osnovu definisanih relacija, u nastavku je izvršeno matematičko modeliranje problema u formi mešovitog celobrojnog programiranja (eng. *Mixed integer programming model* – MIP model) sa ciljnom funkcijom minimizacije ukupnih troškova linije. Takođe, razvijen je i algoritam procesa primene definisanog optimizacionog modela. U poslednjem delu poglavlja izvršena je implementacija definisanog optimizacionog modela na odabranoj reprezentativnoj liniji sistema javnog masovnog transporta u Beogradu. U okviru ovog dela poglavlja prezentovani su korišćeni ulazni podaci, dat je opis izlaznih rezultata i izvršena je analiza osetljivosti definisanog optimizacionog modela.

5.1. Formulisanje problema

Vreme obrta i transportni zahtevi su bazne veličine koje predstavljaju ulaz za projektovanje reda vožnje. Vreme obrta je samim tim jedan od najvažnijih dinamičkih elementa rada linije javnog gradskog transporta putnika. Redom vožnje se usklađuju ponuđeni transportni kapaciteti sa ispostavljenim transportnim zahtevima, tako da su bazne veličine za projektovanje reda vožnje istovremeno i ključni faktori koji utiču, s jedne strane, na kvalitet funkcionisanja i usluge, a sa druge strane, na proizvodnu i ekonomsku efektivnost i efikasnost, kao i na iskorišćenje resursa (vozila, zaposleni finansije, energija i sl.) i uticaj na okolinu.

Jedna od najvažnijih preventivnih strategija koje se koriste u cilju unapređenja pouzdanosti funkcionisanja linije javnog gradskog transporta je podešavanje reda vožnje. Podešavanje reda vožnje se pre svega odnosi na kvalitetno planiranje veličina vremena prevoza i vremena terminiranja vozila kao ulaznih elemenata za njegovu izradu. Planirana vrednost se najčešće usvaja na osnovu realizovanih vrednosti vremena obrta na liniji. Na narednim slikama prezentovani su primeri merodavne funkcije gustine i raspodele realizovanog vremena obrta. Sa slike se vidi da je funkcija gustine realizovanog vremena obrta pozitivno asimetrična, odnosno da ima izražen desni krak, identično kao i funkcije gustine realizovanih vremena vožnje na međustaničnim rastojanjima. Na grafikonu funkcije raspodele vremena obrta ilustrovan je i način određivanja (usvajanja) planirane vrednosti vremena obrta za usvojenu verovatnoću realizacije (iskustvena metoda obrazložena u odeljku 3.3).



Slika 5.1. Funkcija gustine i raspodele realizovanog vremena obrta

Osnovni dinamički elementi su ulazni elementi za kreiranje reda vožnje kojima se propisuje režim funkcionisanja vozila na liniji u toku dana. Dinamički elementi linije, odnosno elementi funkcionisanja, predstavljaju elemente čijom se promenom, u skladu sa spoljnim kriterijumima (pre svega transportnim zahtevima i definisanim/očekivanim kvalitetom usluge), postiže optimalno funkcionisanje linije. U odeljku 2.3.2. kao osnovni elementi funkcionisanja klasifikovani su vreme obrta, broj vozila i kapacitet transportne jedinice.

Prilikom izrade tehnološkog projekta linije u praksi često se dešava da se željeni kvalitet usluge definiše očekivanom vrednošću intervala. Tom prilikom, broj vozila na radu postaje izvedeni element funkcionisanja i direktna je posledica usvojenog vremena obrta i očekivane vrednosti intervala.

Iz prezentovanih relacija (2.14) i (2.21) vidi se da veličina vremena obrta i angažovani broj vozila imaju pozitivnu linearnu zavisnost za fiksni interval. U slučaju povećanja vremena obrta na liniji neophodno je obezbediti dodatna vozila na radu kako bi se ispunio planirani interval, što direktno utiče na troškove funkcionisanja linije. Iz prethodne konstatacije sledi da svaka promena vrednosti vremena obrta utiče na troškove funkcionisanja linije, što znači da kvalitetno planirana vrednost vremena obrta prilikom kreiranja reda vožnje za liniju, pored pouzdanosti funkcionisanja, utiče i na troškove funkcionisanja linije, odnosno u krajnjem izlazu i na troškove funkcionisanja celine sistema javnog transporta.

Međusobne relacije definisane navedenim modelima ilustrovane su pomoću nomograma prezentovanog na Slici 5.2. Nomogram reprezentuje modele veza između merodavnog protoka (intenziteta transportnih zahteva na liniji), vremena obrta, koeficijenta iskorišćenja mesta na karakterističnoj deonici (koeficijenta komfora), intervala sleđenja vozila i kapaciteta vozila. Primena nomograma omogućava jednostavno vizuelno sagledavanje međusobnih odnosa, odnosno pruža informaciju o tome kako promene vrednosti definisanih ulaznih veličina utiču na vrednost odabrane izlazne.

Na nomogramu su ilustrovane krive kojima se reprezentuje odnos između broja vozila i kapaciteta vozila za usvojeno vreme obrta, kada koeficijenti komfora imaju vrednosti 0,6 i 0,9. Ove vrednosti koeficijenta rezultat su primene empirijskih i

iskustvenih metoda i predstavljaju dve najčešće u praksi korišćene vrednosti za vanvršne i vršne periode u toku dana.

Vrednosti koeficijenta komfora u značajnoj meri utiču na broj vozila koji će biti angažovan za rad na liniji. Kao primer, na nomogramu je prezentovano utvrđivanje neophodnog broja vozila na radu u slučaju kada ulazni parametri imaju sledeće vrednosti:

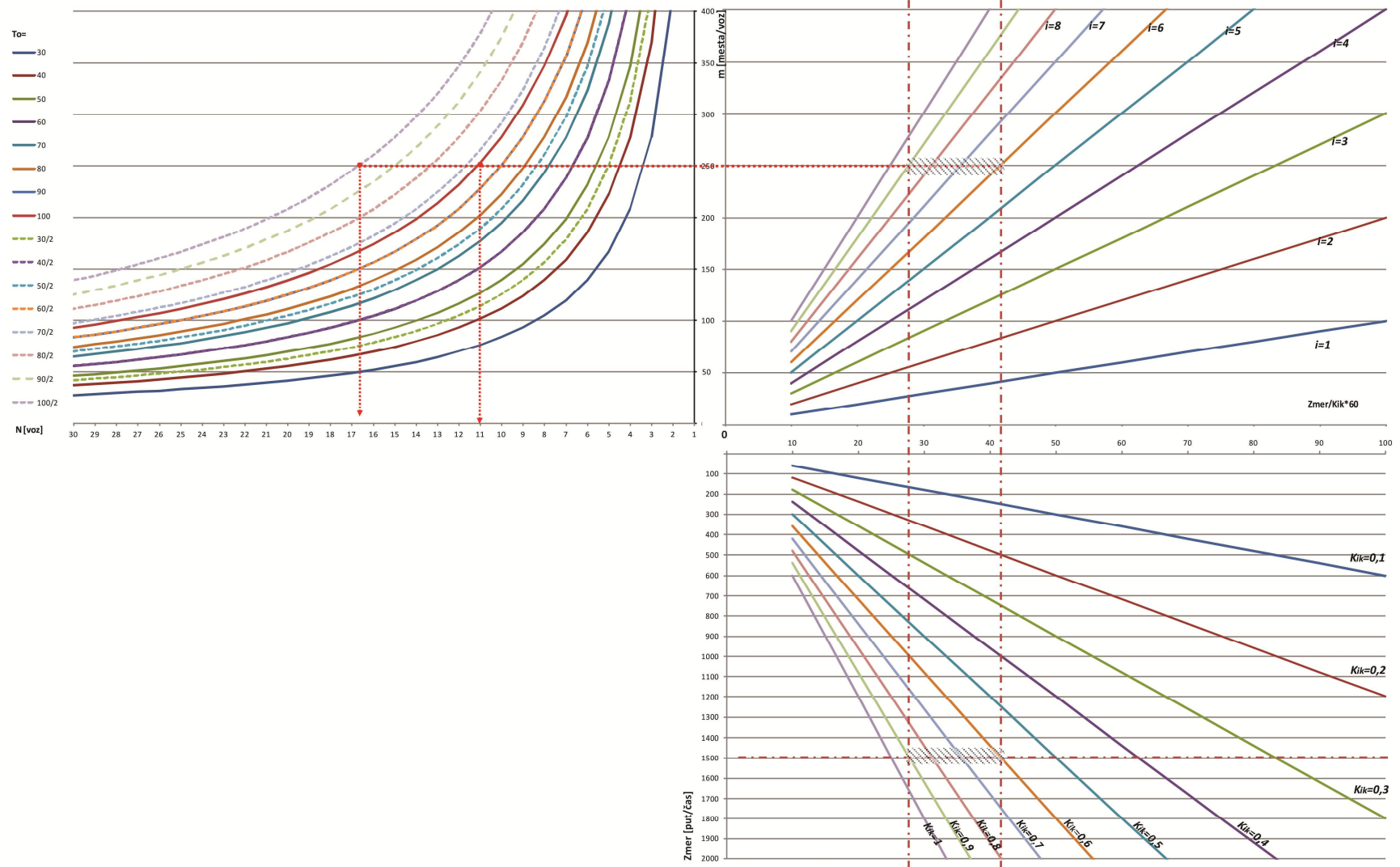
- merodavni protok $Z_{mer} = 1500$ put/h,
- usvojeno vreme obrta $T_o = 100$ minuta,
- interval sleđenja vozila $i = 6$ minuta,
- kapacitet vozila $m = 250$ mesta/voz.

Iz prezentovanog primera se uočava da je u slučaju kada je koeficijent komfora $k_{ik} = 0,6$, za rad na liniji potrebno angažovati skoro 17 vozila, a u suprotnom, kada je koeficijent komfora $k_{ik} = 0,9$, za rad je potrebno angažovati 6 vozila manje.

Takođe, iz prezentovanog primera se može jasno uočiti i značaj usvojene vrednosti vremena obrta u slučaju kada su ostale ulazne veličine fiksne.

U realnom sistemu javnog masovnog transporta putnika dve glavne karakteristike realizovanih dinamičkih elemenata i transportnih zahteva su nehomogenost i nestacionarnost. Premda se utvrđivanjem karakterističnih perioda u toku funkcionisanja linije teži eliminisanju ovih karakteristika, one su i dalje delimično prisutne i značajno utiču na kvalitet realizovane transportne usluge.

Kao posledica navedenog, otvara se dilema opravdanosti jasnog determinisanja ulaznih veličina prilikom određivanja broja vozila ili željenog intervala. Takođe, postavlja se pitanje da li je korisnik usluge zaista u stanju da registruje razliku između intervala od 5,5 ili 6 minuta, odnosno da percipira odstupanje u pruženom komforu u slučaju kada vrednosti koeficijenta komfora iznose $k_{ik} = 0,6$ ili $k_{ik} = 0,7$.



Slika 5.2. Primer nomograma kojim se ilustruju modeli veza ulaznih elemenata za definisanje reda vožnje

Takođe, posledica karaktera transportnih zahteva u sistemu javnog masovnog transporta putnika (opisano u odeljku 2.3.3) jeste neravnomeran intenzitet maksimalnih protoka po vozilima (z_{max}), čak i u okviru jednog karakterističnog perioda, što dalje za posledicu ima odstupanja realizovanih koeficijenata komfora (po svim poluobrtima na liniji) u odnosu na definisanu planiranu vrednost.

S druge strane, minimalna promena navedenih planskih veličina može značajno da doprinese poboljšanju kvaliteta ili smanjenju troškova funkcionisanja. Takođe, moguće je usvojiti minimalne i maksimalne vrednosti ulaznih veličina, što bi omogućilo kreiranje opsega mogućih rešenja koja zadovoljavaju određene predefinisane kriterijume, a sve u cilju pronalaženja optimalnih vrednosti dinamičkih elemenata kojima bi se postigao balans između kvaliteta funkcionisanja sistema (isporučene transportne usluge) i troškova funkcionisanja, koji se prevashodno ogledaju u troškovima angažovanih resursa (vozila, zaposleni, finansije, energija i sl.) i troškovima putovanja korisnika. Kvalitet, odnosno pouzdanost funkcionisanja linije javnog masovnog transporta putnika, moguće je izraziti i pomoću troškova koji se najčešće odnose na troškove nepouzdanosti, troškove kašnjenja vozila ili troškove prekovremenog rada vozača i sl.

U skladu sa svim prethodno iznetim konstatacijama, ciljna funkcija optimizacionog modela treba da bude minimizacija ukupnih troškova funkcionisanja linije sistema javnog masovnog transporta putnika, a izlazni rezultati optimizacionog modela predlog vrednosti vremena poluobrta (vremena obrta) vozila kojima se ostvaruje definisana funkcija cilja.

$$TR = TR_v + TR_p + TR_Q \quad [RSD] \quad (5.1)$$

gde je:

TR_v – troškovi angažovanih resursa (vozila),

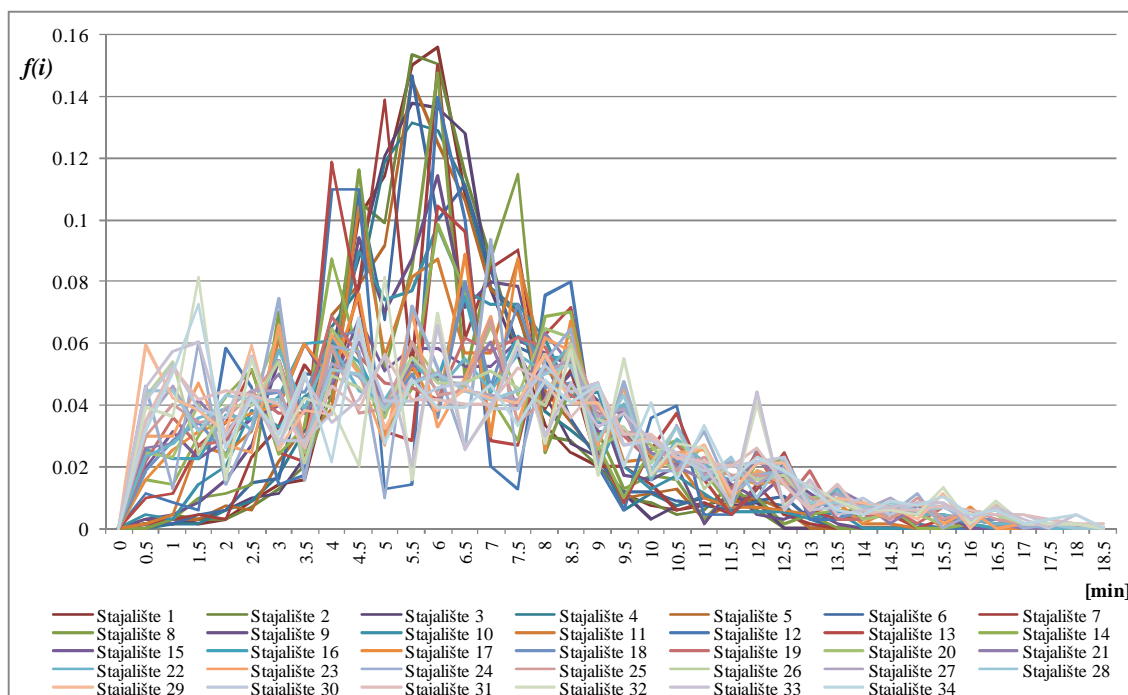
TR_p – troškovi korisnika (putnika),

TR_Q – troškovi kvaliteta transportne usluge.

5.2. Karakteristike realizovanog intervala po stajalištima duž linije

Jedan od najznačajnijih pokazatelja kvaliteta transportne usluge na liniji javnog transporta je frekvencija vozila, odnosno vrednost intervala sleđenja vozila. Pored već spomenutog odstupanja realizovanih koeficijenata komfora, u realnim uslovima funkcionisanja linije dolazi i do odstupanja realizovanih vrednosti intervala sleđenja vozila po stajalištima duž linije, što je posebno izraženo kod linija sa niskim stepenom nezavisnosti trase. Veličina realizovanog intervala zavisi, sa jedne strane, od njegove planirane (projektovane) vrednosti, a sa druge strane, od eksternih uslova, odnosno uslova u kojima linija funkcioniše i koji, pre svega, utiču na varijaciju vremena vožnje po međustaničnim rastojanjima i varijaciju vremena zadržavanja vozila na stajalištima.

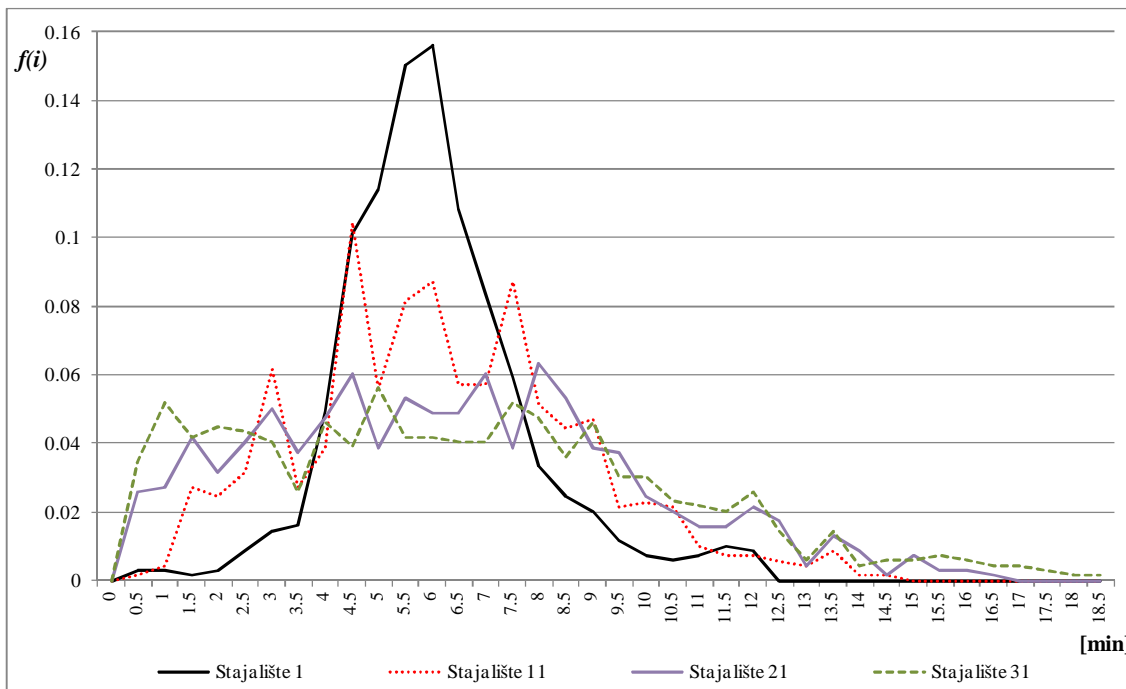
Kao primer vrednosti realizovanog intervala i njegove varijacije, na narednim slikama su prezentovane funkcije gustine empirijske raspodele realizovanih intervala za stajališta na liniji sistema javnog masovnog transporta putnika.



Slika 5.3. Funkcija gustine empirijske raspodele realizovanih intervala po stajalištima duž linije

Iz prezentovanih distribucija, što se posebno ističe na narednoj slici, uočava se da je na početnim stajalištima izraženo grupisanje rezultata oko aritmetičke sredine, odnosno povećana je homogenost distribucije rezultata. Kako se redni broj stajališta duž linije povećava, odnosno što je stajalište udaljenije od terminusa u posmatranom smeru, oblik

vrha krive distribucije ima veću spljoštenost, što ukazuje na povećanu disperziju realizovanih vrednosti intervala, odnosno na značajno smanjenu homogenost distribucije realizovanih intervala.



Slika 5.4. Funkcija gustine empirijske raspodele intervala za odabrana stajališta

Prethodni primeri i opisi navode na zaključak da se i u toku samog procesa planiranja dinamičkih elemenata, odnosno načina funkcionisanja linije, može utvrditi prosečna vrednost realizovanih intervala duž linije za određeni karakteristični vremenski period, odnosno da se može unapred planirati kako očekivana prosečna vrednost intervala, tako i vrednost njegove varijacije za svako stajalište duž linije. Postojanje detaljnih podataka o funkcionisanju vozila na liniji javnog transporta, koje obezbeđuju savremeni sistemi za monitoring i upravljanje (primer opisan u odeljku 4.5.3), omogućavaju formiranje sveobuhvatne baze podataka pogodne za detaljne analize. Kao što je već konstatovano i na grafičkim prikazima ilustrovano, vrednost realizovanog intervala zavisi od planirane vrednosti intervala i od rednog broja stajališta na liniji, a realno je pretpostaviti da je ta zavisnost linearna i pozitivna.

U cilju utvrđivanja zavisnosti, na skup prikupljenih podataka o istoriji funkcionisanja linije u karakterističnom periodu vremena primenjuje se višestruka regresiona analiza. Rezultat primene je formiran višestruki regresioni modela za predviđanje vrednosti zavisne promenljive (realizovanog intervala) na stajalištu k u smeru sm :

$$i_{O_{sm,k}} = \beta_{0_{sm}} + \beta_{1_{sm}} \cdot k + \beta_{2_{sm}} \cdot ip \quad [min] \quad (5.2)$$

gde je:

ip – nezavisna promenljiva koja predstavlja planiranu vrednost intervala;

k – indeks koji predstavlja redni broj stajališta na liniji ($k = 1, 2, 3, \dots, n_{sm-1}$), a u modelu reprezentuje nezavisnu promenljivu;

$\beta_{2_{sm}}$ – regresioni parametar za smer sm uz nezavisnu promenljivu ip ;

$\beta_{1_{sm}}$ – regresioni parametar za smer sm uz stajalište k ;

$\beta_{0_{sm}}$ – konstanta za utvrđivanje očekivane vrednosti intervala za smer sm ;

$i_{O_{sm,k}}$ – zavisna promenljiva, odnosno očekivana vrednost intervala na stajalištu k u smeru sm .

Pored očekivane srednje vrednosti intervala, potpune karakteristike očekivane vrednosti realizovanih intervala po stajalištima duž linije definišu se i koeficijentom varijacije intervala, kojim se reprezentuje disperzija realizacija oko srednje vrednosti. Koeficijent varijacije predstavlja odnos standardnog odstupanja (σ_i) i srednje vrednosti intervala (i_{sr}), odnosno pokazuje koliki procenat vrednosti aritmetičke sredine iznosi standardna devijacija:

$$KV = \frac{\sigma_i}{i_{sr}} \quad (5.3)$$

Kako je to pokazatelj koji reprezentuje odnos i pogodan je za poređenje u slučajevima kada su vrednosti intervala različite, njegova vrednost ne zavisi od veličine planiranog intervala, kao u slučaju određivanja očekivane srednje vrednosti, već samo od rednog broja stajališta na liniji, sa kojim je u pozitivnoj linearnoj vezi. Što je redni broj stajališta veći, odnosno što je stajalište udaljenije od terminusa u posmatranom smeru, koeficijent varijacije realizovanog intervala je veći, a može se izraziti pomoću modela:

$$KV_{sm,k} = \gamma_{0_{sm}} + \gamma_{1_{sm}} \cdot k \quad (5.4)$$

gde je:

$\gamma_{1_{sm}}$ – regresioni parametar za smer sm uz stajalište k ;

$\gamma_{0_{sm}}$ – konstanta za utvrđivanje očekivane vrednosti koeficijenta varijacije za smer sm ;

$KV_{sm,k}$ – očekivana vrednost koeficijenta varijacije intervala sleđenja vozila na stajalištu k u smeru sm .

Vrednosti konstanti (β_0 i γ_0) kao i vrednosti regresionih parametara (β_1 , β_2 i γ_1) uz nezavisne promenljive utvrđuju se za svaku liniju i svaki smer posebno, a na osnovu baze podataka o istoriji funkcionisanja linije.

5.3. Troškovi angažovanja resursa (vozila)

Krajem XX veka u Evropskoj uniji javio se trend poveravanja obavljanja javnih usluga privatnim operatorima u svim sektorima, pa tako i u javnom gradskom transportu putnika. Ključni element tih reformi sistema javnog transporta putnika u svetu bilo je uvođenje konkurencije, koja se javlja u dve osnovne forme (Finn, 2003):

- konkurencija na tržištu, odnosno direktna konkurencija između operatora na tržištu;
- konkurencija za tržište, kada se operatori međusobno takmiče za dobijanje prava na pružanja usluga, a prema unapred definisanom skupu kriterijuma koje definiše organ lokalne uprave (OLU).

Prve vrste ugovora bili su „trošak plus (dobit) ugovori“ (*cost-plus contracts*), prema kojima OLU nadoknađuje operatoru sve troškove i garantuje određenu stopu profita. Takvi ugovori su potom zamenjeni „ugovorima sa fiksnom cenom“ (*fixed price contracts*), prema kojima OLU plaća operatoru iznos koji ne zavisi od stvarnih troškova.

Tri osnovna tipa ugovora sa fiksnom cenom su:

- Ugovor o proizvodnji bruto transportne usluge (*Gross cost contract*);
- Ugovor o proizvodnji neto transportne usluge (*Net cost contract*);
- Ugovor o upravljanju (*Management contract*).

Teško je, međutim, naći ove vrste ugovora u potpuno „čistom“ obliku, jer su obično modifikovani kako bi se bolje prilagodili ciljevima i specifičnim karakteristikama svakog od sistema posebno.

U postojećoj praksi ugovor o proizvodnji bruto transportne usluge je najzastupljeniji i kao takav se dodatno analizira i koristi kao baza za utvrđivanje troškova angažovanih resursa.

Kod ugovora o proizvodnji bruto transportne usluge rizik proizvodnje (vozilokilometara ili mestakilometara – bruto transportni rad) preuzima operator, dok rizik prihoda (ukupnog prihoda po svim osnovama) preuzima OLU, koji dodeljuje pravo korišćenja tržišta transportnih usluga, definiše planirani nivo kvaliteta transportne usluge i definiše tarifnu politiku. Razlika između realizovanih i projektovanih troškova

proizvodnje ugovorenog obima transportne usluge ide na račun operatora, dok razlika između stvarnih i projektovanih (očekivanih) prihoda ide na račun OLU.

Kako se proces optimizacije vremena obrta (kroz smanjenje ukupnih troškova) obavlja na taktičkom nivou u toku procesa planiranja karakteristika transportne usluge i s obzirom na to da je reč o ugovoru sa fiksnom cenom, a da je predmet ugovora proizvodnja transportne usluge izražena kroz bruto transportni rad, jedinični trošak funkcionisanja sistema se može izraziti kao cena usluge po ostvarenom kilometru angažovanih vozila.

Trošak proizvodnje transportne usluge, odnosno trošak angažovanja resursa se u određenom vremenskom periodu TS izračunava na osnovu sledećeg modela:

$$TR_v = f \cdot C_{km} \cdot \sum_{sm=1}^2 L_{sm} \quad [RSD] \quad (5.5)$$

gde je:

f – ukupan broj polazaka vozila u posmatranom periodu vremena koji se izračunava kao količnik dužine vremenskog perioda i vrednosti planiranog intervala sleđenja vozila: $f = \frac{TS}{ip}$;

ip – planirana vrednost intervala sleđenja;

C_{km} – jedinična cena angažovanja resursa [RSD/km];

L_{sm} – dužina linije u smeru (sm).

U slučaju kada se definisani model primenjuje na jednu odabranu liniju javnog transporta, varijacija troškova proizvodnje transportne usluge je posledica planirane vrednosti intervala i vrednosti jedinične cene angažovanja resursa. Planirana vrednost intervala utiče na ukupan broj polazaka (ukupan broj kilometara) koje će angažovana vozila ostvariti na liniji u toku određenog perioda vremena, a u relaciji sa usvojenim vremenom obrta i na sam broj angažovanih vozila na liniji.

Kada je planirani interval fiksna veličina i ukupan broj kilometara je fiksna, dok je broj angažovanih vozila u tom slučaju direktna posledica planiranog vremena obrta vozila na liniji. U slučaju kada je ukupan broj kilometara koji angažovana vozila treba da realizuju nepromenljiva veličina, vrednost jedinične cene po kilometru direktno zavisi od (odnosno u funkciji je) broja angažovanih vozila.

Jedinična cena po kilometru ne može biti identična u slučajevima kada definisani ukupni transportni rad za liniju, izražen u vozilokilometrима, ostvari različit broj vozila, odnosno kada se razlikuje prosečan broj ostvarenih kilometara po angažovanom vozilu. To znači da je jedinična cena po kilometru u funkciji broja angažovanih vozila:

$$C_{km} = f(N_r) = f(T_o) \quad (5.6)$$

Jedinična cena po kilometru, koju organ lokalne uprave plaća prevozniku za realizovanu transportnu uslugu, najčešće se sastoji od projektovanih jediničnih troškova po pređenom kilometru prevoznika i zagarantovane dobiti. Imajući u vidu da je zagarantovana dobit ili fiksna veličina ili je u funkciji projektovanih jediničnih troškova (definisani procenat), možemo zaključiti da na jediničnu cenu po kilometru utiču isključivo projektovani jedinični troškovi proizvodnje ugovorenog obima transportne usluge.

U projektovani jedinični trošak po kilometru ugrađeni su svi tipovi troškova koji se javljaju na operativnom nivou, na nivou prevoznika u sistemu javnog transporta:

- fiksni troškovi (troškovi posedovanja vozila, amortizacija, osiguranje, administracija itd.),
- varijabilni troškovi (pogonska energija, ulje, pneumatici, održavanje itd.)

Fiksni troškovi nisu u direktnoj vezi sa obimom korišćenja vozila, odnosno oni nastaju bez obzira na transportni rad koja vozila ostvare, dok su varijabilni oni troškovi koji su direktna posledica angažovanja vozila, odnosno menjaju se sa intenzitetom eksploatacije voznog parka.

Promena broja angažovanih vozila na liniji javnog transporta, u slučaju kada je transportni rad fiksna veličina, utiče na promenu fiksnih troškova. Nivo promene jediničnog troška po kilometru vozila, usled promene fiksnih troškova prouzrokovane različitim brojem angažovanih vozila, nije univerzalna veličina. Promena jediničnog troška pre svega zavisi od procentualnog učešća fiksnih troškova u ukupnim troškovima. Učešće fiksnih troškova je specifična karakteristika koja zavisi kako od okruženja u kome sistem javnog transporta funkcioniše, tako i od karakteristika funkcionisanja same linije.

Da bi prezentovani model (5.5) za utvrđivanje troška proizvodnje transportne usluge za određeni vremenski period bio realno primenjiv u svakom sistemu i za svaku liniju javnog transporta, neophodno je jasno i nedvosmisleno utvrditi relacije između

jediničnog troška po kilometru (samim tim i jedinične cene) i broja angažovanih vozila. Značajan broj studija, radova i primera iz prakse navode na zaključak da je navedena relacija pozitivno linearna, iz čega dalje sledi da izlazni rezultat navedene analize treba da bude model za izračunavanje jedinične cena transportne usluge po ostvarenom kilometru, koji ima sledeći oblik:

$$C_{km} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot N_r \quad [RSD/km] \quad (5.7)$$

gde je:

α_0 – konstanta za utvrđivanje jedinične cene;

α_1 – regresioni parametar uz nezavisnu promenljivu;

N_r – planirani broj vozila na radu.

Važno je naglasiti da se utvrđivanje relacija između jedinične cene i broja angažovanih vozila vrši za svaku liniju u okviru sistema posebno.

5.4. Troškovi putnika

Troškovi putnika u sistemu javnog transporta se pre svega vezuju za utrošeno vreme neophodno za realizaciju svoje (sopstvene) transportne potrebe. U odeljku 2.3.3, na Slici 2.8, prezentovan je šematski prikaz složenog putovanja, na kome se jasno uočavaju sva vremena iz kojih se sastoji ukupno vreme putovanja. Od vremenskog trenutka dolaska korisnika na stajalište (tačka pristupa sistemu) počinje utrošeno vreme, koje je direktna posledica načina organizacije i funkcionisanja sistema javnog transporta. Ako se problem svede na jednu liniju javnog transporta, ukupno vreme koje korisnik utroši koristeći usluge sistema transporta putnika na realizaciju svog putovanja sastoji se od vremena vožnje i vremena čekanja na stajalištu. Zbog prethodno navedenog, ukupni troškovi putnika u sistemu javnog masovnog transporta se mogu podeliti na troškove vožnje i troškove čekanja na stajalištu:

$$TR_p = TR_{voz} + TR_{\check{c}} \quad [RSD] \quad (5.8)$$

Razdvajanje troškova vožnje od troškova čekanja je neophodno zbog toga što putnici vreme čekanja vrednuju značajno više nego vreme vožnje. Razlozi za putnike da percipiraju vreme čekanja drugačije od realnog vremena mogu biti vremenski uslovi, okruženje stajališta, neizvesnost čekanja, dužina putovanja, cilj putovanja, dostupnost informacija, aktivnost dok čekaju itd. Wardman (2004) je u svojoj metaanalizi veoma velikog skupa podataka predložio da je razumno vreme čekanja vrednovati 2,5 puta više

od vremena vožnje (vreme provedeno u vozilu). Prema mišljenju Iseki (2006), vreme čekanja može da dostigne čak i 12 puta veću vrednost od vremena koje korisnici provedu u vozilu.

5.4.1. Troškovi vožnje

Troškovi vožnje korisnika su u direktnoj linearnoj vezi sa ukupnim vremenom koje putnik provede u vozilu. Ukupno vreme koje jedan korisnik provede u vozilu predstavlja sumu vremena vožnje na međustaničnim rastojanjima ($tv_{sm,s}$) i vremena čekanja na usputnim stajalištima ($t\check{c}_{sm,s}$) od izvornog stajališta (stajalište pristupa u sistem) do ciljnog stajališta (stajališta izlaska iz sistema). Vreme koje jedan putnik na liniji javnog transporta putnika provede u vozilu u toku svog putovanja može se izraziti narednim modelom:

$$TvoZ_1 = \sum_{s=us}^{is-1} (tv_{sm,s} + t\check{c}_{sm,s}) \quad [min] \quad (5.9)$$

gde je:

$TvoZ_1$ – ukupno vreme vožnje jednog putnika na liniji,

us – ulazno stajalište putnika,

is – izlazno stajalište putnika,

$tv_{sm,s}$ – vreme vožnje od stajališta s do stajališta $s + 1$ u posmatranom smeru sm , odnosno na međustaničnom rastojanju $l_{sm,s}$;

$t\check{c}_{sm,s}$ – vreme čekanja vozila na stajalištu s u posmatranom smeru sm .

Na osnovu generalne postavke prethodnog modela, ukupni troškovi vremena koje svi prevezeni putnici provedu u vozilima na liniji javnog transporta u toku određenog vremenskog perioda iznose:

$$TR_{voz} = C_{voz} \cdot f \cdot \left(\sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} tv_{sm,s} \cdot \bar{z}_{sm,s} \cdot \frac{iO_{sm,s}}{ip} + \sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} t\check{c}_{sm,s} \cdot (\bar{z}_{sm,s} - \bar{u}_{sm,s}) \cdot \frac{iO_{sm,s}}{ip} \right) \quad [RSD] \quad (5.10)$$

gde je:

TR_{voz} – ukupni troškovi vremena koje putnici provedu u vozilima u toku određenog vremenskog perioda TS ;

$iO_{sm,s}$ – očekivana vrednost intervala sleđenja na stajalištu s u posmatranom smeru sm ;

$\bar{z}_{sm,s}$ – prosečan protok putnika po polasku vozila v koji se realizuje na međustaničnom rastojanju $l_{sm,s}$: $\bar{z}_{sm,s} = \frac{Z_{sm,s}}{f}$;

$\bar{u}_{sm,s}$ – prosečan broj ulazaka putnika u polasku vozila v koji se realizuje na stajalištu s u posmatranom smeru sm : $\bar{u}_{sm,s} = \frac{U_{sm,s}}{f}$;

C_{voz} – jedinična vrednost vremena vožnje putnika [RSD/min].

Ostali činiooci u modelu, pored navedenih, definisani su i opisani u prethodnom odeljku (5.3).

Definisani model baziran je na sledećim pretpostavkama:

- na svim stajalištima duž linije realizuje se identičan broj polazaka vozila f , koji je srazmeran definisanoj dužini perioda i usvojenoj vrednosti planiranog intervala,
- na svim međustaničnim rastojanjima duž linije poznate su vrednosti protoka putnika u definisanom periodu vremena TS ($Z_{sm,s}$),
- prosečan protok putnika po polasku na međustaničnom rastojanju $l_{sm,s}$ jednak je za sva vozila (polaske) i izračunava se kao količnik protoka u posmatranom smeru sm i na stajalištu s ($Z_{sm,s}$) i broja polazaka f ,
- na svim stajalištima duž linije ($s = 1, 2, \dots, n_{sm}$) i u smerovima ($sm = 1, 2$) poznate su ukupne vrednosti ulazaka putnika ($U_{sm,s}$) u definisanom periodu vremena TS ,
- prosečan broj ulazaka putnika po polasku vozila za stajalište s jednak je za sva vozila (polaske) i izračunava se kao količnik ukupnog broja ulazaka na stajalištu s ($U_{sm,s}$) i broja polazaka f ,
- protok putnika i ulasci putnika duž linije srazmerni su vrednosti očekivanog intervala, tako da se utvrđene prosečne vrednosti protoka i ulazaka koriguju za odnos očekivanog i planiranog intervala.

5.4.2. Troškovi čekanja

Pored troškova vožnje, korisnici linije sistema javnog transporta putnika u toku svog putovanja imaju i troškove čekanja na stajalištima. Identično kao i kod troškova vožnje, i ovi troškovi su u direktnoj linearnoj vezi sa ukupnim vremenom čekanja korisnika na stajalištima duž linije.

Stvarna veličina vremena čekanja putnika u sistemu javnog transporta je vezana za obrasce nakupljanja (dolaska) putnika na stajalište. Različite istraživačke studije istakle su interval sleđenja vozila kao jedan od najvažnijih faktora koji utiču na proces nakupljanja putnika.

Luethi (2007) je u svom radu predstavio pregled postojećih studija o relaciji između procesa nakupljanja putnika i intervala sleđenja. Pored rezimea svih predloženih modela koji se bave ovom relacijom (linearni, kvadratni, linearni po odsečcima), autor daje i sopstveni model za opisivanje varijacije i raspodele procesa nakupljanja putnika na stajalištu između dva uzastopna polaska vozila koristeći uniformnu i pomešanu *Johnson SB* raspodelu. U modelu koji su razvili Bowman i Turnquist (1981) proces nakupljanja putnika na stajalištu opisan je kontinuiranom logaritamskom funkcijom, a Fonzone i dr. (2015) unapređuju ovaj pristup kako bi omogućili prestizanje između vozila na liniji.

Pošto su predmet optimizacije vremena obrta linije sistema javnog masovnog transporta sa velikim frekvencijama vozila, odnosno malim vrednostima planiranog intervala, za potrebe utvrđivanja prosečnog vremena čekanja jednog korisnika na stajalištu, u ovom radu je korišćen pristup koji je definisan u nekim od prvih istraživanja (Welding, 1957; Holroyd–Scraggs, 1966; Osuna–Newell, 1972). Na osnovu ovog pristupa, jedinično vreme čekanja korisnika se izračunava uz pretpostavku da se u veoma malim odsečcima vremena korisnici ravnomerno nakupljaju na stajalište. Rezultat ovakvog uniformnog modela dolaska putnika je da vreme čekanja putnika raste linearno sa intervalom (Vuchic, 2005). Prema navedenim autorima, očekivano vreme čekanja putnika (prosečno vreme čekanja jednog putnika, izraženo u minutu po putniku) između dva uzastopna polaska (u intervalu sleđenja) može se izračunati kao:

$$t_{\check{e}} = \frac{1}{2} \cdot ip \left[\frac{\min}{\text{put}} \right] \quad (5.11)$$

i realizovano jedinično vreme čekanja:

$$t\check{c}_r = \frac{1}{2} \cdot (ir + KV^2) \left[\frac{min}{put} \right] \quad (5.12)$$

gde su: ip = planirani interval; ir = realizovani interval; KV = koeficijent varijacije intervala.

S obzirom na prethodno opisane modele, kao i karakteristike intervala opisane u odeljku 5.2, u okviru optimizacionog modela prosečno vreme čekanja jednog korisnika na stajalištu (k) u smeru (sm) izražava se pomoću modela:

$$T\check{c}_{k1} = \frac{iO_{sm,k}}{2} \cdot (1 + KV_{sm,k}^2) \left[\frac{min}{put} \right] \quad (5.13)$$

gde je:

$T\check{c}_{k1}$ – očekivano vreme čekanja jednog putnika na stajalištu k ;

$iO_{sm,k}$ – očekivana vrednost intervala sleđenja na stajalištu k u posmatranom smeru sm ;

$KV_{sm,k}$ – očekivana vrednost koeficijenta varijacije intervala sleđenja na stajalištu k u posmatranom smeru sm .

Kada se u prezentovani model očekivanog vremena čekanja jednog putnika uključe jedinični troškovi vremena čekanja i predviđeni broj ulazaka po stajalištima duž linije, on se transformiše u model za utvrđivanje ukupnih troškova vremena čekanja svih putnika na jednoj liniji javnog transporta putnika u toku određenog vremenskog perioda:

$$TR_{\check{c}} = C_{\check{c}} \cdot f \cdot \left(\sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} \frac{iO_{sm,s}}{2} \cdot (1 + KV_{sm,s}^2) \cdot \bar{u}_{sm,s} \cdot \frac{iO_{sm,s}}{ip} \right) [RSD] \quad (5.14)$$

gde je:

$TR_{\check{c}}$ – ukupni troškovi čekanja korisnika na liniji javnog transporta u određenom vremenskom periodu TS ;

$KV_{sm,s}$ – očekivana vrednost koeficijenta varijacije intervala sleđenja na stajalištu s u posmatranom smeru sm ;

$C_{\check{c}}$ – jedinična vrednost cene čekanja korisnika [RSD/min];

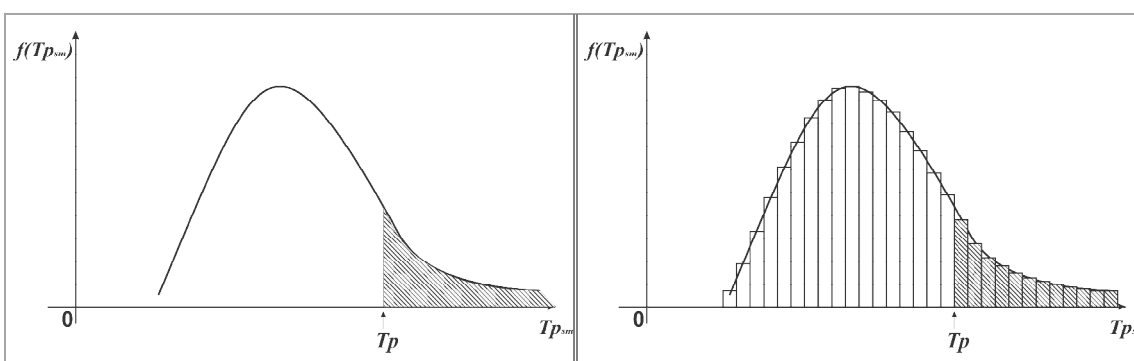
Pored navedenih, ostali činioци u modelu ukupnih troškova čekanja korisnika definisani su i opisani u prethodno prezentovanim modelima i relacijama.

5.5. Trošak kvaliteta usluge

Izlazni rezultat optimizacionog modela je planirana vrednost vremena obrta vozila kojim se ostvaruje definisani cilj, odnosno kojim se minimiziraju ukupni troškovi funkcionisanja linije u sistemu javnog transporta putnika. Ako se u obzir uzme da su vremena terminiranja vozila najčešće fiksne veličine, propisane ili zakonom ili uredbom (pravilnikom) od strane organizatora transportne usluge odnosno ekspertske tela organa lokalne uprave, definisani problem se u suštini svodi na adekvatno projektovanje vremena prevoza.

Vreme kašnjenja, odnosno pozitivna razlika između realizovanih i projektovanih vrednosti vremena prevoza po smerovima na liniji, negativno utiče na kvalitet transportne usluge, čime se produkuju dodatni troškovi rada linije. Pad kvaliteta transportne usluge, odnosno pouzdanosti funkcionisanja linije javnog masovnog transporta putnika, moguće je izraziti pomoću troškova koji se najčešće odnose na troškove prekovremenog rada vozača, troškove kašnjenja vozila ili troškove nepouzdanosti i sl.

Na Slici 5.5. prezentovan je primer funkcija gustine realizovanih vrednosti vremena prevoza u jednom smeru linije u karakterističnom periodu vremena. Na slici je označena verovatnoća da realizovana vremena prevoza budu veća od projektovanog.



Slika 5.5. Funkcija gustine realizovanih vremena prevoza

Za numeričke kontinuirane podatke, kao što su realizacije vremena prevoza, empirijska raspodela učestalosti (gustine) može se prikazati i po klasama intervala. Na slici su označene klase u okviru kojih su vrednosti realizovanih vremena prevoza veće od projektovane, odnosno klase za koje je razlika vrednosti realizacija i projektovane vrednosti pozitivna. Ako se sve realizacije vremena prevoza grupišu po klasama

određene širine, svaka klasa je, osim granicama klase, definisana i vrednostima apsolutne učestalosti i relativne učestalosti (verovatnoćom) pojavljivanja slučajne promenljive u okviru klase.

Primer navedene empirijske raspodele može se prezentovati i u obliku matrice, što je prikazano u narednoj tabeli.

Tabela 5.1. Tabelarni prikaz empirijske raspodele realizovanih vremena prevoza

Klasa (j)	Leva granica klase (T_j)	Apsolutna frekvencija (fr_j)	Relativna frekvencija (p_j)	
1	T_1	fr_1	$p_1 = \frac{fr_1}{\sum_{j=1}^n fr_j}$	
2	T_2	fr_2	p_2	
3	T_3	fr_3	p_3	
...				
j_{Tp-1}				← Tp
j_{Tp}				
...				
$n-1$	T_{n-1}	fr_{n-1}	p_{n-1}	
n	T_n	fr_n	p_n	
		$\sum_{j=1}^n fr_j$		

Očekivano vreme kašnjenja, odnosno očekivana ukupna razlika realizovanih vrednosti vremena prevoza T_j i projektovane vrednosti Tp , čija vrednost se nalazi u okviru klase čije su granice $T_{j_{Tp}}$ i $T_{j_{Tp-1}}$, za posmatrani smer 1 linije i definisani karakteristični period vremena TS , izražava se modelom:

$$T_{k_1} = f \cdot \sum_{j=j_{Tp}}^n (T_j - Tp) \cdot p_j \quad [min] \quad (5.15)$$

a za celu liniju:

$$T_k = \sum_{sm=1}^2 T_{k_{sm}} = f \cdot \sum_{sm=1}^2 \sum_{j=j_{Tp_{sm}}}^n (T_j - Tp_{sm}) \cdot p_{sm,j} \quad [min] \quad (5.16)$$

gde je:

T_k – ukupno vreme kašnjenja na liniji izraženo u minutima;

$T_{k_{sm}}$ – ukupno vreme kašnjenja u smeru sm ;

T_j – vreme prevoza koje predstavlja desnu granicu klase j ;

Tp_{sm} – projektovana vrednost vremena prevoza u posmatranom smeru sm ;

j – redni broj klase ($j = 1, 2, 3, \dots, n$);

$j_{Tp_{sm}}$ – redni broj klase za koju je $T_j \geq Tp_{sm}$;

$p_{sm,j}$ – relativna frekvencija (verovatnoća) da slučajna promenljiva za posmatrani smer sm ima vrednost u intervalu $[T_{j-1}, T_j]$;

f – ukupan broj polazaka vozila u posmatranom periodu vremena koji se izračunava kao količnik dužine vremenskog perioda i vrednosti planiranog intervala sleđenja vozila: $f = \frac{TS}{ip}$.

Očekivano vreme kašnjenja u periodu vremena TS srazmerno je ukupnom broju polazaka f koji je planiran da se ostvari u okviru perioda i sumi proizvoda procenjenih vremena kašnjenja i verovatnoće nastanka kašnjenja za svaku definisanu klasu.

Troškovi koji se produkuju kao posledica razlike između projektovane i realizovane vrednosti vremena prevoza su, između ostalog, i troškovi prekovremenog rada vozača. Smena vozača se u sistemu najčešće definiše i u vremenu i u prostoru, što znači da se prilikom planiranja transportnog procesa određuju vreme i lokacija, kojima se propisuje kada i gde se smena izvršava. Za lokaciju se u realnim uslovima funkcionisanja najčešće definiše jedan od terminusa pošto na ovim lokacijama ima dovoljno vremena (propisano vreme terminiranja) da se izvrši vizuelni pregled i primopredaja vozila. Maksimalno vreme rada je najčešće utvrđeno zakonski propisanim maksimumom ili drugim internim aktima u okviru sistema. S druge strane, planirano vreme rada, tj. dužina trajanja smene, utvrđuje se na osnovu projektovanih vremena poluobrti i broja polazaka za svaki od smerova na liniji, odnosno planirana dužina trajanja smene jednaka je sumi proizvoda (po smerovima) projektovanog vremena poluobrti i broja polazaka, uz uslov da ta vrednost ne može biti veća od maksimalno dozvoljene.

Iz prethodno definisanih odnosa i činjenice da su vrednosti vremena terminiranja najčešće determinisane veličine sledi da svaka vrednost realizovanog vremena prevoza (za svaki polazak obuhvaćen smenom) koja je veće od projektovane prouzrokuje

prekoračenje planiranog trajanja smene, odnosno prouzrokuje prekovremeni rad voznog osoblja.

Trošak prekovremenog rada koji se ostvari u okviru vremenskog perioda TS na liniji javnog transporta putnika srazmeran je očekivanom vremenu kašnjenja (T_k) i jediničnoj ceni prekovremenog rada voznog osoblja:

$$TR_{pr} = C_{pr} \cdot T_k = C_{pr} \cdot f \cdot \sum_{sm=1}^2 \sum_{j=j_{Tp_{sm}}}^n (T_j - Tp_{sm}) \cdot p_{sm,j} \quad [\text{RSD}] \quad (5.17)$$

gde je:

C_{pr} – jedinična cena prekovremenog rada voznog osoblja [RSD/min];

TR_{pr} – troškovi prekovremenog rada.

Vreme kašnjenja, pored uticaja na vozno osoblje, ima značajan uticaj i na korisnike transportne usluge. U odeljku 3.1. istaknuto je da kašnjenje povećava neugodnost i anksioznost putnika. Takođe, u skladu sa pristupom koji u svom radu ima Huisman (2004) za određivanje funkcije troškova prouzrokovanih kašnjenjem, korisnicima manje smeta više manjih nego jedno dugo kašnjenje. Ova činjenica delimično koriguje model za proračun troškova kašnjenja koje trpe putnici, uvodeći u proračun kvadratnu funkciju vremena kašnjenja čime se dodatno kažnjavaju velike razlike između realizovanih i projektovanih vrednosti vremena prevoza. Model za utvrđivanje troškova korisnika prouzrokovanih kašnjenjem ima sledeći oblik:

$$TR_{kp} = C_k \cdot f \cdot \sum_{sm=1}^2 \sum_{j=j_{Tp_{sm}}}^n (T_j - Tp_{sm})^2 \cdot p_{sm,j} \quad [\text{RSD}] \quad (5.18)$$

gde je:

C_k – jedinična cena kašnjenja, koja je najčešće u funkciji jedinične cene vremena vožnje

– $C_k = f(C_{voz})$;

TR_{kp} – troškovi prouzrokovani kašnjenjem.

Prethodna dva definisana troška, koji su posledica ukupnog vremena kašnjenja na liniji u toku određenog perioda vremena, posledica su razlike realizovanih vremena prevoza od projektovane, dok vrednosti vremena vožnje po međustaničnim rastojanjima i vremena čekanja na stajalištima ovime nisu u potpunosti obuhvaćena.

Pošto ukupno vreme prevoza u posmatranom smeru predstavlja sumu svih vremena vožnje po međustaničnim rastojanjima i vremena čekanja na stajalištima (model (2.7)),

sa izvesnošću se može očekivati slučaj da vrednost vremena prevoza ne produkuje kašnjenje, ali da postoji značajan broj ekstremnih vrednosti sabiraka ($tv_{sm,s}$ i $t\check{c}_{sm,s}$). Ekstremne vrednosti sabiraka nemaju značajan uticaj na optimizacioni model, ali s obzirom na to da se na liniji javnog gradskog transporta vrši konstantna izmena putnika, može se konstatovati da putnici „trpe“ varijacije koje se javljaju na određenim međustaničnim rastojanjima odnosno stajalištima koja su obuhvaćena njihovom vožnjom. Kao što je već istaknuto u pregledu literature, povećanje pouzdanosti transportne usluge kroz redukciju varijacije vremena prevoza korisnika ima isti ili čak i veći značaj od redukcije prosečnog vremena putovanja.

Sa ciljem da se u ukupnom vremenu prevoza (Tp) maksimalno spreči postojanje ekstremnih vrednosti vremena vožnje po međustaničnim rastojanjima i vremena čekanja na stajalištima, u optimizacioni model se uvodi dodatni trošak koji se naziva trošak pouzdanosti, a koji je posledica varijacije vremena vožnje po međustaničnim rastojanjima i vremena čekanja na stajalištima. Osnovna ideja uvođenja ovog troška je da se postigne homogenost distribucije navedenih vremena oko aritmetičke sredine (srednje vrednosti), odnosno da se spreči njihova disperzija. Varijacija, odnosno disperzija rezultata, izražena je sumom kvadrata odstupanja usvojenog vremena vožnje i vremena čekanja, koji predstavljaju sabirke ukupnog vremena prevoza, od srednjih vrednosti snimljenih realizacija:

$$TR_{var} = C_{var} \cdot \sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} \left((tv_{sm,s} - \bar{t}v_{sm,s})^2 + (t\check{c}_{sm,s} - \bar{t}\check{c}_{sm,s})^2 \right) \quad [RSD] \quad (5.19)$$

gde je:

$tv_{sm,s}$ – vreme vožnje od stajališta s do stajališta $s + 1$ u posmatranom smeru sm , odnosno na međustaničnom rastojanju $l_{sm,s}$;

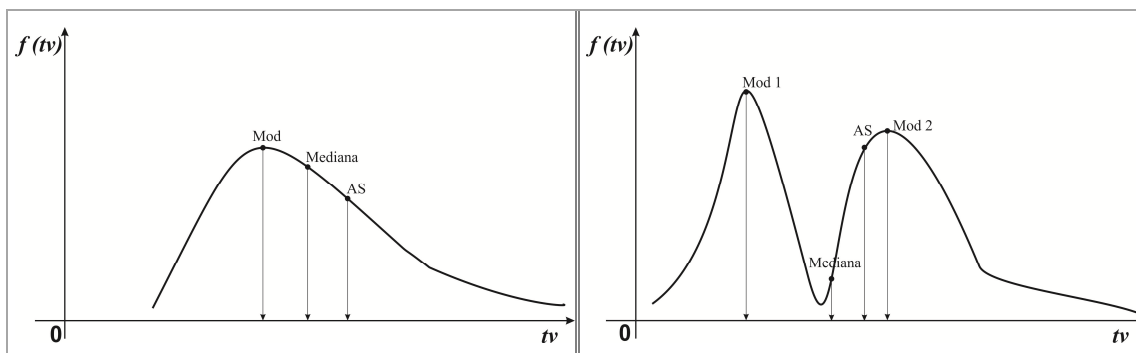
$\bar{t}v_{sm,s}$ – srednje vreme vožnje od stajališta s do stajališta $s + 1$ u posmatranom smeru sm , odnosno na međustaničnom rastojanju $l_{sm,s}$;

$t\check{c}_{sm,s}$ – vreme čekanja vozila na stajalištu s u posmatranom smeru sm ;

$\bar{t}\check{c}_{sm,s}$ – srednje vreme čekanja vozila na stajalištu s u posmatranom smeru sm ;

C_{var} – jedinična cena varijacije [RSD/min²].

Od tri najvažnija numerička reprezentacija distribucije (mere centralne tendencije distribucije varijabli) u slučaju vremena vožnje na međustaničnim rastojanjima, najznačajniji je aritmetička sredina. S obzirom na činjenicu da su distribucije realizovanih vremena vožnje po međustaničnim rastojanjima asimetrične sa izraženim desnim krakom, aritmetička sredina je najadekvatniji numerički pokazatelj kojim se reprezentuje distribucija i kao takva je korišćena za proračun sume kvadrata odstupanja. Vrednost aritmetičke sredine, za razliku od ostalih, svojom vrednošću „pokriva“ i desnu iskošenost distribucije. Na Slici 5.6. su prezentovani primeri unimodalne i bimodalne distribucije realizacija vremena vožnje na kojima su naznačene modalna vrednost, medijana i aritmetička sredina. Bimodalna distribucija nije redak slučaj i može se javiti na međustaničnim rastojanjima sa dve signalisane raskrsnice.



Slika 5.6. Primeri unimodalne i bimodalne distribucije realizacija vremena vožnje

Bez obzira na tip distribucije, ilustrovanim raspodelama se potvrđuje prethodna tvrdnja da je aritmetička sredina adekvatan reprezent distribucije i da je podesna za proračun sume kvadrata odstupanja.

Iz prethodno izloženog sledi da ukupni troškovi kvaliteta usluge na liniji javnog transporta predstavljaju sumu troškova prekovremenog rada, kašnjenja i pouzdanosti:

$$TR_Q = TR_{pr} + TR_{kp} + TR_{var} \quad [\text{RSD}] \quad (5.20)$$

odnosno:

$$\begin{aligned}
TR_Q = & C_{pr} \cdot f \cdot \sum_{sm=1}^2 \sum_{j=J_{Tpsm}}^n (T_j - T_{psm}) \cdot p_{sm,j} + C_k \cdot f \\
& \cdot \sum_{sm=1}^2 \sum_{j=J_{Tpsm}}^n (T_j - T_{psm})^2 \cdot p_{sm,j} + C_{var} \\
& \cdot \sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} \left((tv_{sm,s} - \bar{t}v_{sm,s})^2 \right. \\
& \left. + (t\check{c}_{sm,s} - \bar{t}\check{c}_{sm,s})^2 \right) \quad [\text{RSD}]
\end{aligned} \tag{5.21}$$

5.6. Matematički model i algoritam optimizacije

Optimalno projektovano vreme obrta vozila na liniji javnog transporta putnika je vreme koje obezbeđuje balans između kvaliteta pružene transportne usluge i troškova funkcionisanja linije, a pod uslovom da su ispunjeni svi ostali elementi, koji se pre svega odnose na bezbednost. Ako se kvalitet pružene transportne usluge, odnosno negativne posledice nižeg nivoa kvaliteta, izrazi u vidu troškova sledi da je optimalno vreme obrta ono vreme koje obezbeđuje ostvarenje funkcije cilja, odnosno minimalne ukupne troškove funkcionisanja, koja se može izraziti u sledećem obliku:

$$Y = TR_v + TR_p + TR_Q \quad [\text{RSD}] \tag{5.22}$$

odnosno:

$$Y = TR_v + TR_{voz} + TR_{\check{c}} + TR_{pr} + TR_{kp} + TR_{var} \quad [\text{RSD}] \tag{5.23}$$

dalje sledi da je:

$$\begin{aligned}
Y = & f \cdot C_{km} \cdot \sum_{sm=1}^2 L_{sm} + C_{voz} \cdot f \\
& \cdot \left(\sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} tv_{sm,s} \cdot \bar{z}_{sm,s} \cdot \frac{iO_{sm,s}}{ip} \right. \\
& + \left. \sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} t\check{c}_{sm,s} \cdot (\bar{z}_{sm,s} - \bar{u}_{sm,s}) \cdot \frac{iO_{sm,s}}{ip} \right) + C_{\check{c}} \cdot f \\
& \cdot \left(\sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} \frac{iO_{sm,s}}{2} \cdot (1 + KV_{sm,s}^2) \cdot \bar{u}_{sm,s} \cdot \frac{iO_{sm,s}}{ip} \right) + C_{pr} \quad (5.24) \\
& \cdot f \cdot \sum_{sm=1}^2 \sum_{j=J_{Tp_{sm}}}^n (T_j - Tp_{sm}) \cdot p_{sm,j} + C_k \cdot f \\
& \cdot \sum_{sm=1}^2 \sum_{j=J_{Tp_{sm}}}^n (T_j - Tp_{sm})^2 \cdot p_{sm,j} + C_{var} \\
& \cdot \sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} \left((tv_{sm,s} - \bar{t}v_{sm,s})^2 \right. \\
& \left. + (t\check{c}_{sm,s} - \bar{t}\check{c}_{sm,s})^2 \right) \quad [\text{RSD}]
\end{aligned}$$

S obzirom na sve prethodno navedeno, u daljem pristupu se uvodi i razmatra matematički model mešovitog celobrojnog programiranja, pomoću kojeg se detaljno opisuju svi elementi izraza (5.47), a samim tim i procedura izračunavanja ukupnih troškova i vremena obrta na liniji kojom se obezbeđuje njihova minimalna vrednost.

Drugim rečima, ovaj model se može koristiti u toku planiranja transportnog procesa kada se vrši specifikacija transportne usluge, kao i u sprovođenju preventivnih strategija kroz podešavanje reda vožnje na liniji javnog transporta. Razvijeni model predstavlja novi istraživački i metodološki postupak rešavanja problema optimizacije vremena obrta vozila na liniji javnog transporta putnika.

Način formulacije samog modela je detaljno opisan u pojedinačnoj analizi svih izraza sadržanih u modelu. Ulazni podaci, neophodni za definisanje modela, su sledeći:

skupovi

ST: skup svih stajališta ($s = 1, \dots, n_{sm}$);

SM: broj smerova ($sm = 1, 2$);

STpoSM{SM}: skupovi stajališta po smerovima;

TP: klase realizovanih vremena prevoza ($j = 1, \dots, vp$);

Kn: klase za jediničnu vrednost cene angažovanja resursa ($i = 1, \dots, nI$);

N: skup broja vozila po klasama iz Kn ($i = 1, \dots, nI$);

C: skup jediničnih vrednosti cene angažovanja resursa iz Kn ($i = 1, \dots, nI$);

parametri

$L\{SM\}$: dužine linije po smerovima [km];

n_1 : broj stajališta u smeru 1;

n_2 : broj stajališta u smeru 2;

s : redni broj stajališta na liniji ($s = 1, 2, 3, \dots, n_{sm-1}$);

TS : dužina vremenskog perioda za koji se vrši optimizacija [min];

ip : planirani interval sleđenja vozila na liniji [min];

f : ceo broj polazaka koji se ostvari u definisanom vremenskom periodu TS [pol/periodu];

$io_{sm,s}$: očekivana vrednost intervala sleđenja na stajalištu s u posmatranom smeru sm ;

$\beta 0_{sm}$: konstanta za utvrđivanje očekivane vrednosti intervala po smeru sm ;

$\beta 1_{sm}$: regresioni parametar po smeru sm uz nezavisnu promenljivu s ;

$\beta 2_{sm}$: regresioni parametar po smeru sm uz nezavisnu promenljivu ip ;

$KV_{sm,s}$: očekivana vrednost koeficijenta varijacije intervala sleđenja vozila na stajalištu s u smeru sm ;

$\gamma 0_{sm}$: konstanta za utvrđivanje očekivane vrednosti koeficijenta varijacije po smeru sm ;

$\gamma 1_{sm}$: regresioni parametar po smeru sm uz nezavisnu promenljivu s ;

$mintv_{sm,s}$: minimalno vreme vožnje u smeru sm od stajališta s do stajališta $s+1$ [min];

$maxtv_{sm,s}$: maksimalno vreme vožnje u smeru sm od stajališta s do stajališta $s+1$ [min];

- $astv_{sm,s}$: prosečno vreme vožnje u smeru sm od stajališta s do stajališta $s+1$ [min];
- $mintč_{sm,s}$: minimalno vreme zadržavanja na stajalištu s u smeru sm [min];
- $maxtč_{sm,s}$: maksimalno vreme zadržavanja na stajalištu s u smeru sm [min];
- $astč_{sm,s}$: prosečno vreme zadržavanja na stajalištu s u smeru sm [min];
- T_j : vreme prevoza koje predstavlja desnu granicu klase j [min];
- $p_{sm,j}$: relativna frekvencija (verovatnoća) da slučajna promenljiva za posmatrani smer sm ima vrednost u intervalu $[T_{j-1}, T_j]$;
- vp : ukupan broj klasa realizovanih vremena prevoza;
- $tt\{SM\}$: dužina vremena terminiranja [min];
- $Z_{sm,s}$: protok putnika u smeru sm od stajališta s do stajališta $s+1$ u toku perioda vremena TS [put/periodu];
- $\bar{z}_{sm,s}$: prosečan protok putnika po polasku u smeru sm od stajališta s do stajališta $s+1$ u toku perioda vremena TS [put/polasku];
- $U_{sm,s}$: broj ulazaka putnika u smeru sm na stajalištu s u toku perioda vremena TS [put/periodu];
- $\bar{u}_{sm,s}$: prosečan broj ulazaka putnika po polasku u smeru sm na stajalištu s u toku perioda vremena TS [put/polasku];
- $n1$: ukupan broj klasa za jediničnu vrednost cene angažovanja resursa;
- N_i : ceo broj vozila na liniji za svaku klasu Kn ;
- C_{kmi} : jedinična vrednost cene angažovanja resursa za svaku klasu Kn [RSD/km];
- C_{voz} : jedinična vrednost cene vremena vožnje [RSD/min];
- C_{ξ} : jedinična vrednost cene vremena čekanja korisnika [RSD/min];
- C_{pr} : jedinična vrednost cene prekovremenog rada voznog osoblja [RSD/min];
- C_k : jedinična vrednost cene kašnjenja [RSD/min²];
- C_{var} : jedinična cena pouzdanosti [RSD/min²];
- M : dovoljno velika konstanta.

Promenljive čije se vrednosti izračunavaju definisanim modelom i opisanim parametrima su:

- $tv_{sm,s}$: vreme vožnje u smeru sm od stajališta s do stajališta $s+1$ [min];

- $t_{\check{c}_{sm,s}}$: maksimalno vreme zadržavanja na stajalištu s u smeru sm [min];
 $Tv1_{sm}$: suma kvadrata odstupanja vremena vožnje po smeru sm [min^2];
 $T\check{c}1_{sm}$: suma kvadrata odstupanja vremena čekanja po smeru sm [min^2];
 Tv : ukupna suma kvadrata odstupanja vremena vožnje po smeru [min^2];
 $T\check{c}$: ukupna suma kvadrata odstupanja vremena čekanja po smeru [min^2];
 Tp_{sm} : vreme prevoza po smeru sm [min];
 $T1_{sm}$: vreme poluobrtu po smeru sm [min];
 $T_{k_{sm}}$: ukupno vreme kašnjenja po smeru sm [min];
 T_k : ukupno vreme kašnjenja [min];
 $T_{kv_{sm}}$: ukupno kvadratno vreme kašnjenja po smeru sm [min^2];
 T_{kv} : ukupno kvadratno vreme kašnjenja [min^2];
 nN : potreban broj vozila iz N [voz];
 vC_{km} : jedinična vrednost cene angažovanja resursa iz C [RSD/km];
 $p1_i$: binarna pomoćna promenljiva vezana za vrednost cene angažovanja resursa;
 $y_{sm,j}$: binarna pomoćna promenljiva vezana za klase realizovanih vremena prevoza;
 $cc_{sm,j}$: pomoćna promenljiva vezana za klase realizovanih vremena prevoza;
 To : vreme obrta vozila na liniji [min];
 Y : ukupni troškovi funkcionisanja linije [RSD];

Na osnovu prethodno navedenog, razmatrani MIP model može se zadati u sledećem obliku:

$$\min Y \quad (5.25)$$

uz sledeća ograničenja:

$$\min tv_{sm,s} \leq tv_{sm,s} \leq \max tv_{sm,s}, \quad sm = 1,2; s = 1, 2, \dots, n_{sm} - 1 \quad (5.26)$$

$$\min t\check{c}_{sm,s} \leq t\check{c}_{sm,s} \leq \max t\check{c}_{sm,s}, \quad sm = 1,2; s = 1, 2, \dots, n_{sm} - 1 \quad (5.27)$$

$$T1_{sm} = \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} (tv_{sm,s} + t\check{c}_{sm,s}) + tt_{sm}, \quad sm = 1,2; s = 1, 2, \dots, n_{sm} - 1 \quad (5.28)$$

$$Tp_{sm} = \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} (tv_{sm,s} + t\check{c}_{sm,s}), \quad sm = 1,2; s = 1, 2, \dots, n_{sm} - 1 \quad (5.29)$$

Skupovi ograničenja (5.26) ÷ (5.29) predstavljaju okvire u kojima se pojedinačna vremena vožnje i vremena čekanja na stajalištu mogu realizovati, uz već ranije definisane modele za izračunavanje vremena poluobrta i vremena prevoza po smerovima (odjeljak 2.3.2).

$$T[1] \leq T p_{sm} \leq T[vp], \quad sm = 1,2 \quad (5.30)$$

$$cc_{sm,j} \geq 0, \quad sm = 1,2; j = 1,2,\dots, vp \quad (5.31)$$

$$T_j - T p_{sm} \leq cc_{sm,j}, \quad sm = 1,2; j = 1,2,\dots, vp \quad (5.32)$$

$$T_j - T p_{sm} + y_{sm,j} \cdot M \geq cc_{sm,j}, \quad sm = 1,2; j = 1,2,\dots, vp \quad (5.33)$$

$$(1 - y_{sm,j}) \cdot M \geq cc_{sm,j}, \quad sm = 1,2; j = 1,2,\dots, vp \quad (5.34)$$

$$T_{k_{sm}} = \sum_{j=1}^{vp} cc_{sm,j} \cdot f \cdot p_{sm,j}, \quad sm = 1,2; j = 1,2,\dots, vp \quad (5.35)$$

$$T_k = \sum_{sm=1}^2 T_{k_{sm}}, \quad sm = 1,2 \quad (5.36)$$

$$T_{kv_{sm}} \geq \sum_{j=1}^{vp} cc_{sm,j} \cdot cc_{sm,j} \cdot f \cdot p_{sm,j}, \quad sm = 1,2; j = 1,2,\dots, vp \quad (5.37)$$

$$T_{kv} = \sum_{sm=1}^2 T_{kv_{sm}}, \quad sm = 1,2 \quad (5.38)$$

Vreme prevoza se nalazi u okviru definisanih klasa realizovanih vremena prevoza (5.30), a skupovi ograničenja (5.31) ÷ (5.38) vezani su za proces izračunavanja vremena kašnjenja i kvadratnog vremena kašnjenja po smerovima i ukupno na liniji.

$$\sum_{i=1}^{n1} N_i \cdot p1_i \cdot hp = \sum_{sm=1}^2 T1_{sm}, \quad sm = 1,2; i = 1,2,\dots, n1 \quad (5.39)$$

$$\sum_{i=1}^{n1} p1_i = 1, \quad i = 1,2,\dots, n1 \quad (5.40)$$

$$\sum_{i=1}^{n1} N_i \cdot p1_i = nN, \quad i = 1,2,\dots, n1 \quad (5.41)$$

$$\sum_{i=1}^{n1} Ckm_i \cdot p1_i = vCkm, \quad i = 1,2,\dots, n1 \quad (5.42)$$

Ograničenjima od (5.39) do (5.42) se modelira izbor potrebnog broja vozila i jedinične vrednosti cene angažovanja resursa iz prethodno definisanih klasa.

$$Tv_{sm} \geq \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} (tv_{sm,s} - \bar{t}v_{sm,s})^2, \quad sm = 1,2; s = 1,2, \dots, n_{sm} - 1 \quad (5.43)$$

$$Tv = \sum_{sm=1}^2 Tv_{sm}, \quad sm = 1,2 \quad (5.44)$$

$$T\check{c}_{sm} \geq \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} (t\check{c}_{sm,s} - \bar{t}\check{c}_{sm,s})^2, \quad sm = 1,2; s = 1,2, \dots, n_{sm} - 1 \quad (5.45)$$

$$T\check{c} = \sum_{sm=1}^2 T\check{c}_{sm}, \quad sm = 1,2 \quad (5.46)$$

Skupovi ograničenja od (5.43) do (5.46) vezani su za utvrđivanje disperzije vrednosti vremena vožnje i vremena zadržavanja vozila na stajalištima.

Funkcija cilja

U skladu sa jednačinom (5.24), navedenim parametrima, promenljivim i ograničenjima, funkcija cilja Y se izražava korišćenjem sledećeg izraza:

$$\begin{aligned} Y = & f \cdot vC_{km} \cdot \sum_{sm=1}^2 L_{sm} + C_{voz} \cdot f \\ & \cdot \left(\sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} tv_{sm,s} \cdot \bar{z}_{sm,s} \cdot \frac{io_{sm,s}}{ip} \right. \\ & \left. + \sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} t\check{c}_{sm,s} \cdot (\bar{z}_{sm,s} - \bar{u}_{sm,s}) \cdot \frac{io_{sm,s}}{ip} \right) + C_{\check{c}} \cdot f \quad (5.47) \\ & \cdot \left(\sum_{sm=1}^2 \sum_{s=1}^{n_{sm}-1} \frac{io_{sm,s}}{2} \cdot (1 + KV_{sm,s}^2) \cdot \bar{u}_{sm,s} \cdot \frac{io_{sm,s}}{ip} \right) + C_{pr} \\ & \cdot f \cdot T_{k_{sm}} + C_k \cdot f \cdot T_{kv_{sm}} + C_{var} \cdot (T_v + T_{\check{c}}) \quad [RSD] \end{aligned}$$

Algoritam optimizacije

Proces optimizacije započinje određivanjem sistema javnog transporta i linije na kojoj će model biti primenjen (Slika 5.7). Karakteristika okruženja u kome sistem javnog transporta funkcioniše, kao i karakteristike samog sistema, imaju najveći uticaj na utvrđivanje vrednosti jediničnih cena vremena vožnje, vremena čekanja, prekovremenog rada, kašnjenja i varijacije. Kada se sa navedenim karakteristikama integrišu i karakteristike odabrane linije, utvrđuju se vrednosti jediničnih troškova angažovanja resursa.

Sve navedene vrednosti predstavljaju jedan deo ulaznih veličina (parametara) neophodnih za proračun ukupnih troškova funkcionisanja linije u toku jednog odabranog karakterističnog perioda. Izborom perioda utvrđuju se i ostali ulazni parametri, kao što su dužina trajanja perioda, karakteristike transportnih zahteva i granične vrednosti koeficijenta komfora koje će biti korišćene.

U narednom koraku se, na osnovu utvrđenih karakteristika odabranog perioda, formira skup karakteristika funkcionisanja i skup potencijalnih intervala sleđenja vozila na liniji. Skup intervala sleđenja vozila na liniji zavisi i od formiranog skupa vozila koji će biti angažovan za rad na liniji (relacije opisane u odeljku 5.1). Formiranje skupa karakteristika funkcionisanja linije se može vršiti na dva načina, u zavisnosti od toga da li postoje podaci o istoriji funkcionisanja linije ili ne. Ukoliko podaci postoje, primenom procedura opisanih u odeljku 4.2 vrši se njihova obrada i prilagođavanje za dalju upotrebu. U suprotnom, neophodno je izvršiti detaljnu obradu podataka o karakteristikama trase i ostalim karakteristikama strukture odabrane linije i na osnovu rezultata i zaključaka opisanih u odeljku 4.6. formirati regresioni model pomoću koga se inicijalno predviđaju osnovne karakteristike funkcionisanja linije.

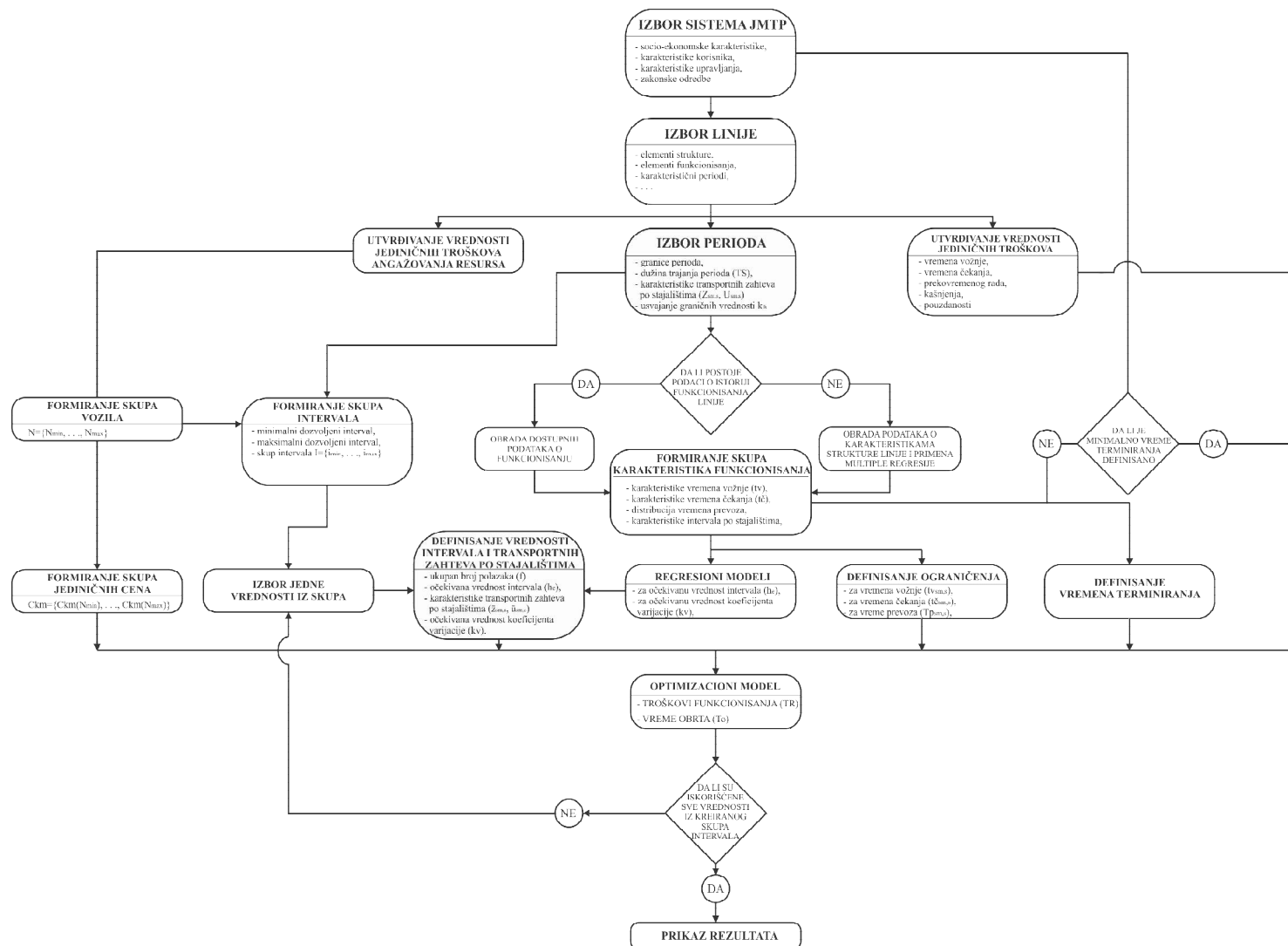
Osnovni značaj formiranog skupa karakteristika funkcionisanja linije, u daljim koracima procesa optimizacije, ogleda se pre svega u definisanju neophodnih ograničenja optimizacionog modela i definisanju relacija neophodnih za utvrđivanje očekivanih vrednosti intervala i koeficijenta varijacije intervala po stajalištima duž

linije. Pored navedenih, značaj se ogleda i u određivanju vremena terminiranja (naravno, ukoliko to vreme nije zakonskim odredbama ili internim pravilnicima već unapred definisano).

Iz formiranog skupa potencijalnih intervala bira se jedna vrednost (u daljim koracima ta vrednost predstavlja planiranu vrednost intervala sleđenja vozila) na osnovu koje se pomoću kreiranih regresionih modela (na osnovu već utvrđenih relacija) i karakteristika izabranog perioda (dužine trajanja perioda i transportnih zahteva po stajalištima) formira grupa najznačajnijih ulaznih elemenata optimizacionog modela: ukupan broj polazaka, očekivana vrednost intervala po stajalištima, očekivane vrednosti transportnih zahteva po polasku i stajalištima i očekivane vrednosti koeficijenta varijacije intervala po stajalištima.

Pored navedenih ulaznih podataka, u kreirani optimizacioni model, ulazi i skup vrednosti jediničnih cena angažovanja resursa koji je u funkciji broja vozila na radu, kao i definisana ograničenja i vreme terminiranja.

Osnovna dva izlazna rezultata primenjenog optimizacionog modela su ukupni troškovi i predloženo vreme obrta vozila na liniji. Proces primene optimizacionog modela se ponavlja za sve vrednosti intervala iz formiranog skupa mogućih vrednosti intervala, a za svaku od njih model formira izlazne rezultate, koji se na kraju sumarno prikazuju i analiziraju. Prilikom svake iteracije, odnosno za svaku vrednost intervala iz definisanog skupa, primenom definisanog matematičkog modela računa se minimalna vrednost funkcije cilja i optimalno vreme obrta, tako da formirani izlazni rezultati predstavljaju skup minimalnih vrednosti ukupnih troškova funkcionisanja i njima odgovarajuća optimalna vremena obrta.



Slika 5.7. Algoritam procesa optimizacije

5.7. Primena i testiranje modela u realnom sistemu

Prateći definisane korake prethodno opisanog algoritma, uočava se da prva dva podrazumevaju izbor sistema i linije javnog masovnog transporta. Kako su u okviru opisane metodologije za utvrđivanje i kvantifikaciju faktora koji utiču na vreme vožnje (odjeljak 4.2) predviđeni isti koraci, u ovom delu se postupci i pristup odabiru sistema neće ponovo opisivati, a izbor linije je sveden na odabir jedne od deset linija koje su bile obuhvaćene prethodnom analizom. U nastavku poglavlja glavni akcenat je stavljen na opis tehnologije utvrđivanja ulaznih podataka (parametara i ograničenja) neophodnih za implementaciju definisanog modela na gradskoj liniji 23 (Karaburma 2 – Vidikovac) u sistemu javnog transporta putnika u Beogradu.

5.7.1. Utvrđivanje vrednosti jediničnih troškova angažovanja resursa

Postojećim redom vožnje za radni dan definisano je da se u toku jutarnjeg vršnog perioda, koji će biti predmet optimizacije, na liniji angažuje 26 zglobnih autobusa.

Operator definisanim ugovorom sa gradom nema zagarantovanu cenu po kilometru, već se njegov prihod obračunava kao deo (procenat) ukupnog prihoda celokupnog sistema javnog gradskog transporta, a na osnovu realizovanog bruto transportnog rada. Zbog toga je neophodno usvojiti cenu usluge koja reprezentuje vrednost jediničnih troškova angažovanja resursa u postojećem stanju.

Za utvrđivanje jedinične cene korišćen je model definisan u Živanović i dr. (u štampi) i Tica i dr. (2013b). Prezentovani model predviđa definisanje matrice jediničnih troškova angažovanja resursa, odnosno proizvodnje transportnog rada C_{km} , za određenu kategoriju linije k i određeni tip vozila v , kako bi se objektivno definisale vrednosti jedinične cene transportnog rada u sistemu javnog masovnog transporta putnika. Primer matrice jediničnih troškova transportnog rada dat je u Tabeli 5.2.

Kapacitet transportne jedinice, odnosno vozila m , direktno utiče na veličinu ostvarenog bruto transportnog rada. Sa druge strane, kapacitet vozila je direktno povezan sa tipom vozila, pa samim tim direktno utiče i na troškove koji se realizuju u toku funkcionisanja sistema.

Tabela 5.2. Matrica jediničnih troškova transportnog rada po kategoriji linije k i tipu vozila v
 – $C_{km_{k,v}}$ [RSD/km]

Kategorija linije	Tip vozila					
	Tip A	Tip B	.....	Tip n	.....	Tip m
Linija kategorije A	$C_{km_{A,1}}$	$C_{km_{A,2}}$	.....	$C_{km_{A,n}}$	.....	$C_{km_{A,m}}$
Linija kategorije B	$C_{km_{B,1}}$	$C_{km_{B,2}}$	.....	$C_{km_{B,n}}$	.....	$C_{km_{B,m}}$
.....
Linija kategorije k	$C_{km_{K,1}}$	$C_{km_{K,2}}$	.....	$C_{km_{K,n}}$	.....	$C_{km_{K,m}}$
.....
Linija kategorije n	$C_{km_{n,1}}$	$C_{km_{n,2}}$	.....	$C_{km_{n,n}}$	.....	$C_{km_{n,m}}$

Na osnovu iskustva iz ranije urađenih projekata, autori su kategorizaciju linija sa aspekta uslova eksploatacije u sistemu javnog masovnog transporta putnika bazirali na kombinaciji širokog spektra karakteristika, kao što su: frekvencija vozila na liniji, tehnologija rada linije (gradska ili prigradska), ukupan broj kilometara na liniji, prosečno međustanično rastojanje itd.

S obzirom na prethodno, ali i na činjenicu da na liniji koja je predmet testiranja optimizacionog modela ukupna planirana godišnja kilometraža iznosi više od 2 miliona kilometara, kao i na već spomenuti maksimalni broj angažovanih zglobnih vozila i cenu koju grad plaća drugim operaterima, za vrednost jediničnog troška angažovanja resursa usvaja se iznos od 150 RSD/km.

Ono što je daleko značajnije za optimizacioni model jeste utvrđivanje nivoa promene jediničnog troška po kilometru usled promene fiksnih troškova prouzrokovane različitim brojem angažovanih vozila. Analizom učešća fiksnih troškova na odabranoj liniji utvrđena je relacija između jediničnog troška i broja angažovanih vozila, koja se izražava modelom za izračunavanje jedinične cena transportne usluge na liniji 23:

$$C_{km} = 59 + 3,5 \cdot N_r \quad [RSD/km] \quad (5.48)$$

Na osnovu definisanog modela moguće je formirati skup jediničnih cena koje će biti korišćene u okviru optimizacionog modela. U narednoj tabeli prezentovan je skup jediničnih cena po kilometru u zavisnosti od broja angažovanih vozila za odabranu liniju.

Tabela 5.3. Jedinične cene angažovanja resursa

N_r [vozila]	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
C_{km} [RSD/km]	129	132,5	136	139,5	143	146,5	150	153,5	157	160,5	164	167,5	171

Detaljno strukturirani operativni troškovi i poznavanje procentualnog učešća pojedinih kategorija troškova, kao i činjenica da svaka kategorija nema jednak uticaj na cenu transportnog rada, predstavljaju osnovu za praćenje promena najznačajnijih elemenata operativnih rashoda. Neophodno je da organ lokalne uprave vrši kontinualni nadzor i praćenje navedenih promena i u skladu sa njima vrši korekciju cene transportnog rada.

U okviru radova Živanović i dr. (u štampi) i Tica i dr. (2013b), autori izdvajaju i definišu eksterne faktore koji imaju najveći uticaj na veličinu operativnih rashoda, a samim tim i na jediničnu cenu angažovanja resursa po kategoriji linije i tipu vozila u sistemu javnog masovnog transporta putnika.

Ključni eksterni faktori koji utiču na većinu pozicija u strukturi operativnih rashoda su promena cena pogonske energije, promena vrednosti kursa EUR (ima uticaj na sve eksploatacione troškove, a naročito na nabavnu vrednost novog vozila i troškove rezervnih delova itd.), zatim vrednost prosečnog bruto ličnog dohotka (LD) u sektoru transporta i promena cena na malo u Republici Srbiji.

Na osnovu navedenog, u narednoj tabeli prikazani su ključni faktori koji utiču na veličinu operativnih rashoda u sistemu, a samim tim i na jediničnu cenu proizvodnje transportne usluge, odnosno angažovanja resursa.

Tabela 5.4. Struktura ključnih faktora koji utiču na veličinu troškova angažovanja resursa

Redni broj	Ključni elementi koji utiču na promenu operativnih rashoda i cenu proizvodnje transportnog rada	Uticaj na vrednost ukupnih operativnih rashoda [%]	Način praćenja promena
1	Promena srednje vrednosti EUR (α)	p_α	Zvanični periodični izveštaji Narodne banke Srbije
2	Promena potrošačkih cena (β)	p_β	Zvanični statistički izveštaji nadležnih republičkih institucija
3	Promena bruto LD (ε)	p_ε	Zvanični statistički izveštaji nadležnih gradskih institucija
4	Promene veleprodajne cena pogonskog goriva i energije (λ)	p_λ	Zvanični cenovnik NIS-a ili Udruženja naftnih kompanija

Autori Živanović i dr. (u štampi) i Tica i dr. (2013b) smatraju da ugovorena, unapred poznata vrednost jediničnih troškova datih u matrici jediničnih troškova proizvodnje transportnog rada mora da se menja u trenutku kada promena ključnih eksternih faktora datih u prethodnoj tabeli izaziva promenu cene koja je ugovorena pre nastanka poremećaja. To znači da ukoliko je vrednost promene jediničnih troškova proizvodnje transportnog rada C_{km} veća ili jednaka graničnom ugovorenom procentu promene jediničnih troškova proizvodnje transportnog rada x , neophodno je izvršiti korekciju jediničnih troškova proizvodnje transportnog rada po kategoriji linije. Opšti model za promenu jediničnih troškova proizvodnje transportnog rada glasi:

$$\Delta C_{km} = \left| \frac{C_{km_{s+1}} - C_{km_s}}{C_{km_s}} \right| \cdot 100 \geq x \quad (5.49)$$

gde je:

ΔC_{km} – vrednost promene jediničnih troškova proizvodnje transportnog rada,

$C_{km_{s+1}}$ – vrednost jediničnih troškova proizvodnje transportnog rada u stanju posle nastalog poremećaja ključnih elemenata,

C_{km_s} – vrednost jediničnih troškova proizvodnje transportnog rada u stanju pre nastalog poremećaja ključnih elemenata koji utiču na jediničnu cenu koštanja transportnog rada,

x – granični ugovoreni procenat promene jediničnih troškova proizvodnje transportnog rada.

Model za proračun vrednosti jediničnih troškova proizvodnje transportnog rada u stanju posle nastalog poremećaja ključnih elemenata koji utiču na jediničnu cenu koštanja transportnog rada glasi:

$$C_{km_{s+1}} = C_{km_s} \cdot [100\% + (p_\alpha \cdot \Delta\alpha + p_\beta \cdot \Delta\beta + p_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon + p_\lambda \cdot \Delta\lambda)] \quad (5.50)$$

gde je:

p_α – procenat uticaja srednje vrednosti EUR na vrednost jediničnih troškova proizvodnje transportnog rada,

$\Delta\alpha$ – promena kursa EUR na dan kontrole u odnosu na prethodnu poznatu vrednost,

p_β – procenat uticaja porasta cena na malo na vrednost jediničnih troškova proizvodnje transportnog rada,

$\Delta\beta$ – promena cena na malo na dan kontrole u odnosu na prethodnu poznatu vrednost,

p_ε – procenat uticaja LD na vrednost jediničnih troškova proizvodnje transportnog rada,

$\Delta\varepsilon$ – promena LD na dan kontrole u odnosu na prethodnu poznatu vrednost,

p_λ – procenat uticaja cena pogonskog goriva i energije na jedinične troškove proizvodnje transportnog rada,

$\Delta\lambda$ – promena cena pogonskog goriva i energije na dan kontrole u odnosu na prethodnu poznatu vrednost.

Svaka promena vrednosti navedenih veličina, mora da se potvrdi i overi aneksom osnovnog ugovora između operatora i organa lokalne uprave i od momenta usvajanja predstavlja osnovnu – baznu vrednost na osnovu koje se vrši proračun troškova u sistemu javnog masovnog transporta putnika.

Promena troška angažovanja resursa utiče i na definisani optimizacioni model, tako da je nakon svake evidentirane promene njegove vrednosti neophodno ponoviti algoritam procesa primene definisanog optimizacionog modela.

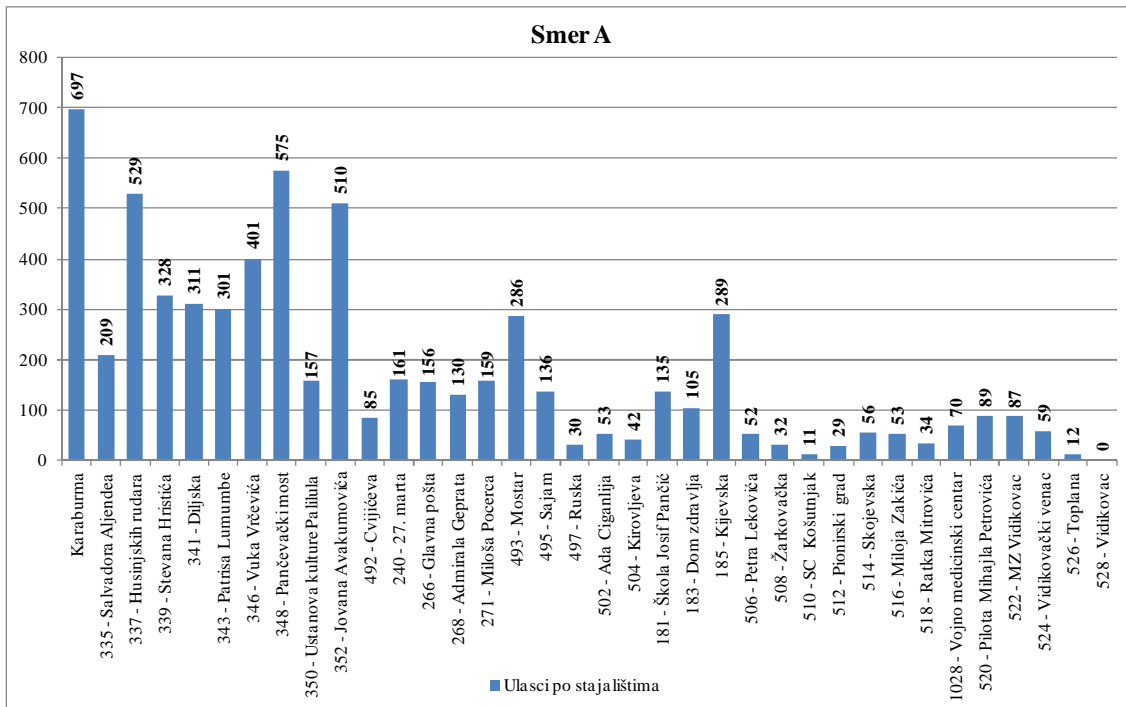
5.7.2. Utvrđivanje karakteristika transportnih zahteva i skupa potencijalnih intervala

Karakteristike ulazaka i protoka putnika po stajalištima duž linije u toku trajanja perioda koji je predmet optimizacije ključne su za određivanje troškova korisnika na liniji. Njihove vrednosti su utvrđene na osnovu sistematskog brojanja putnika na uzorku vozila za koje je metodologiju⁶ i operativne planove izradila Katedra za drumski i gradski transport putnika za potrebe izrade studije *Brojanje putnika u javnom prevozu i anketa korisnika javnog prevoza*⁷.

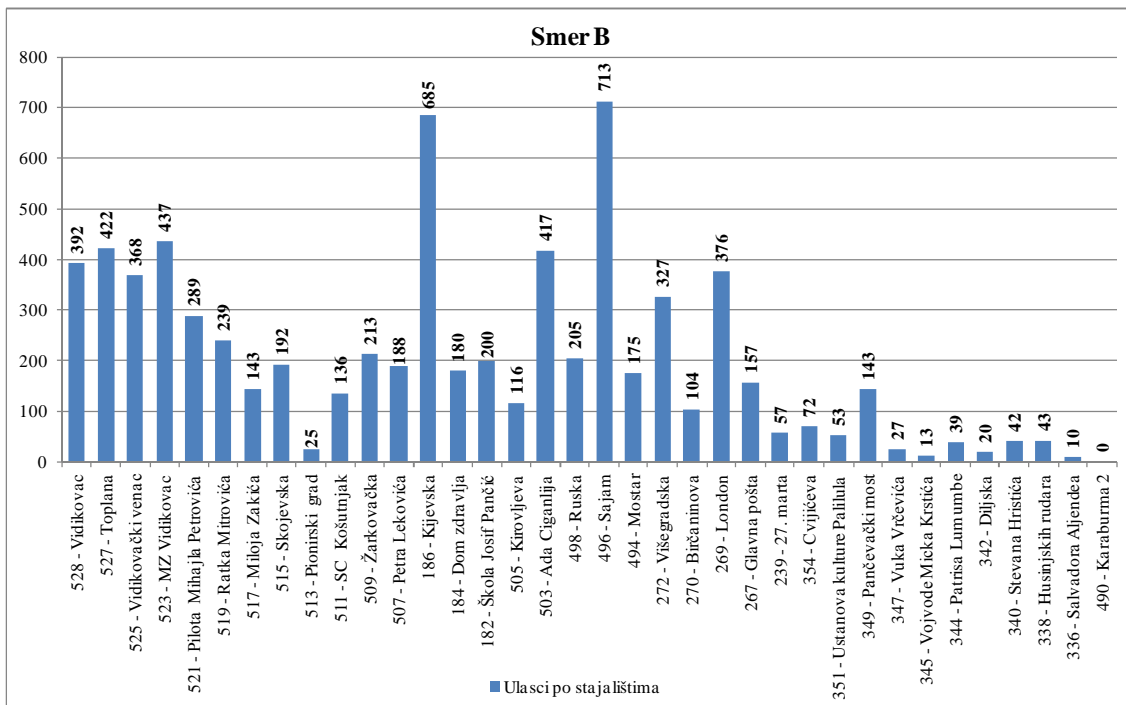
Prema postojećem planu funkcionisanja linije, maksimalni broj vozila se uključuje u rad u 06:00 i do 09:00 časova se ne smanjuje. Navedena vremena predstavljaju granice perioda TS , a samim tim i određuju dužinu njegovog trajanja. Na narednim slikama prezentovane su vrednosti ulazaka i protoka po stajalištima duž linije u toku tri sata funkcionisanja koja su obuhvaćena definisanim periodom.

⁶ Tica, S., Bajčetić, S. i dr. (2014). Izrada metodološkog postupka istraživanja transportne ponude i transportnih zahteva u sistemu javnog gradskog transporta putnika u Beogradu – ITS1.

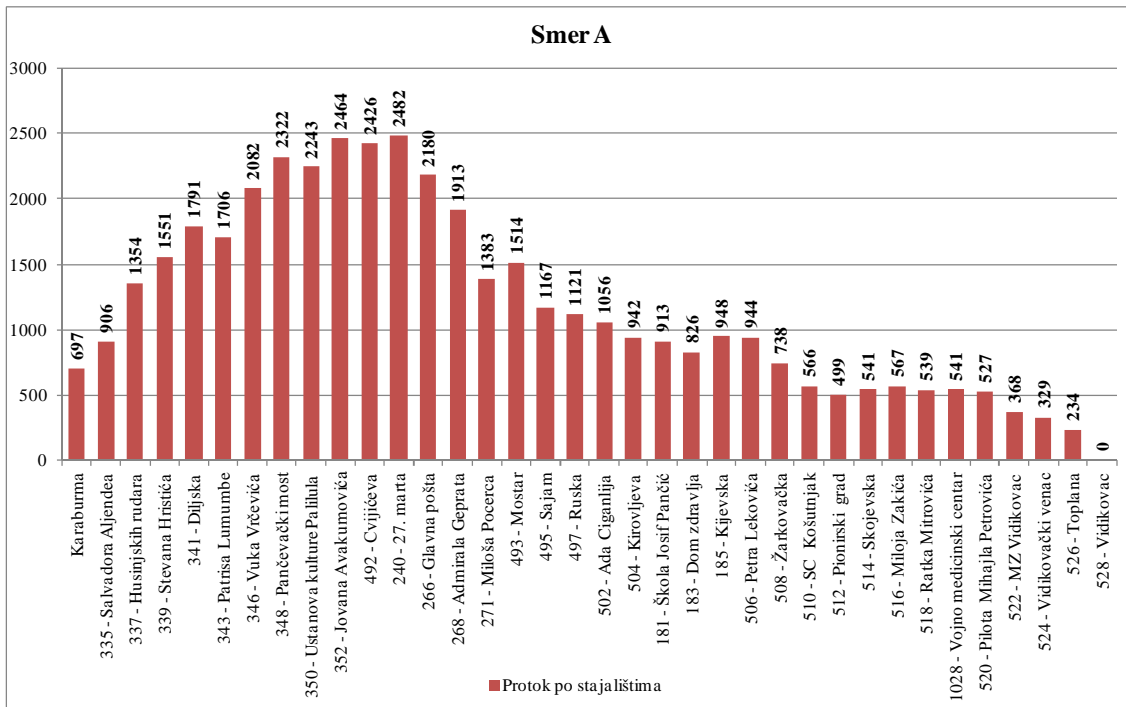
⁷ Tica, S., Bajčetić, S. i dr. (2015). Studija brojanja putnika u javnom prevozu i anketa korisnika javnog prevoza, Centar za planiranje urbanog razvoja – CEP, Beograd.



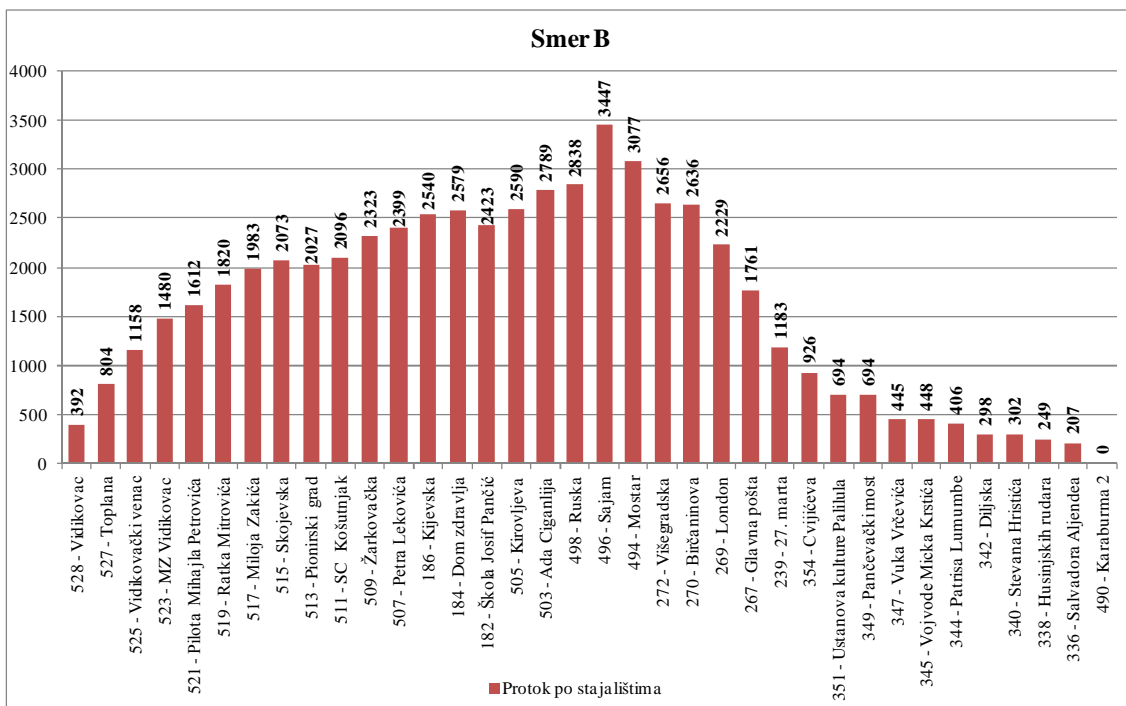
Slika 5.8. Broj ulazaka putnika po stajalištima duž linije u toku definisanog perioda – Smer A



Slika 5.9. Broj ulazaka putnika po stajalištima duž linije u toku definisanog perioda – Smer B



Slika 5.10. Intenzitet protoka putnika po stajalištima duž linije u toku definisanog perioda – Smer A



Slika 5.11. Intenzitet protoka putnika po stajalištima duž linije u toku definisanog perioda – Smer B

Prezentovane vrednosti predstavljaju ukupne transportne zahteve u toku odabranog perioda i značajne su za određivanje prosečnih vrednosti ulazaka i protoka po svakom planiranom polasku. Broj polazaka u toku perioda zavisi od dužine trajanja perioda i usvojene vrednosti planiranog intervala. Naredni korak je utvrđivanje skupa potencijalnih intervala. Za utvrđivanje ovog skupa koristi se model (2.23), koji kao ulazne veličine koristi kapacitet planiranog vozila (za kapacitet zglobnog autobusa usvaja se $m = 160$ mesta/voz), usvojene vrednosti koeficijenta komfora (granične vrednosti $k_{ik} = 0,6$ i $k_{ik} = 0,9$) i merodavnu vrednost protoka putnika. Merodavna vrednost protoka predstavlja proizvod maksimalnog protoka (Z_{max}) u toku časa i koeficijenta neravnomernosti protoka u času (V_n). Na osnovu rezultata sprovedenog brojanja putnika, uočava se da se maksimalni protok realizuje u smeru B, u periodu između 07:00 i 08:00 časova, na stajalištu Sajam, i iznosi $Z_{max} = 1.197$ put/h, a koeficijent neravnomernosti protoka u vršnom času iznosi $V_n = 1,2$.

Korišćenjem navedenih vrednosti kao ulaznih veličina za proračun definisan modelom (2.23), dobijaju se granične vrednosti intervala sledenja vozila na liniji koje iznose: $ip_{min} = 4$ minuta i $ip_{max} = 6$ minuta. Pomoću utvrđenih graničnih vrednosti formira se skup potencijalnih intervala (Tabela 5.5) na kome će biti primenjen optimizacioni model. Vrednosti intervala prezentovane u tabeli date su u minutima i formirane su sa korakom 0,1 od minimalne granične do maksimalne.

Tabela 5.5. Skup potencijalnih intervala

$ip_{min} (1)$	ip_2	ip_3	ip_4	ip_5	ip_6	ip_7	ip_8	ip_9	ip_{10}	ip_{11}
4	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5
ip_{12}	ip_{13}	ip_{14}	ip_{15}	ip_{16}	ip_{17}	ip_{18}	ip_{19}	ip_{20}	$ip_{max} (21)$	
5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6	

5.7.3. Karakteristike funkcionisanja linije

Za odabranu liniju 23 (Karaburma 2 – Vidikovac) postoji baza o istoriji funkcionisanja, koju obezbeđuje savremeni sistem za monitoring i upravljanje. Primenom koraka i procedura definisanih u okviru odeljka 4.2.2. obezbeđeni su podaci o karakteristikama funkcionisanja linije neophodni za implementaciju optimizacionog modela. Obradom je obuhvaćena baza o funkcionisanju vozila na liniji koju je sistem za monitoring i upravljanje formirao u toku radnih dana u periodu od 3. 10. 2016. godine do 4. 11. 2016. godine.

Rezultati obrade prezentovani su u narednim tabelama. U Tabelama 5.6. i 5.7. prezentovane su pre svega karakteristične vrednosti vremena vožnje i vremena zadržavanja (čekanja) na stajalištima, koje se koriste kao ograničenja u okviru optimizacionog modela i za proračun pouzdanosti funkcionisanja. Distribucija raspodele realizovanih vremena prevoza po smerovima na liniji prezentovana je u Tabeli 5.8. Pored definisanja opsega u kojima vreme prevoza, kao izlazna veličina modela, može da se kreće, navedena tabela služi i za proračun vremena kašnjenja i kvadrata vremena kašnjenja, koji su glavni činioci troškova prekovremenog rada i vremena kašnjenja.

Za potrebe utvrđivanja očekivane vrednosti intervala po stajalištima analizom su obuhvaćeni i drugi periodi u toku funkcionisanja linije, periodi u kojima se vrednosti planiranih intervala razlikuju. Analiza je predviđala utvrđivanje srednjih vrednosti realizovanih intervala po stajalištima i smerovima duž linije. Primenom višestruke regresije sa dve nezavisne promenljive (planiranim intervalom i rednim brojem stajališta) definiše se regresioni model za utvrđivanje očekivanih vrednosti intervala po stajalištima duž linije. U Tabeli 5.9. prezentovani su rezultati vrednovanja regresionog modela, a u Tabeli 5.10. vrednosti nestandardizovanih koeficijenata, t-statistike i nivo značaja nezavisnih promenljivih. Izlazni rezultat sprovedene višestruke regresije su dva regresiona modela za utvrđivanje očekivane vrednosti intervala po stajalištima i po smerovima na liniji:

$$io_{1,s} = 19,423 + 1,392 \cdot s + 1,010 \cdot ip \quad [min] \quad (5.51)$$

$$io_{2,s} = -74,242 + 1,661 \cdot s + 1,221 \cdot ip \quad [min] \quad (5.52)$$

Prezentovani regresioni modeli se u okviru optimizacionog modela koriste prilikom svakog novog izbora planirane vrednosti intervala iz kreiranog skupa.

Disperzija realizacija intervala oko srednje vrednosti reprezentuje se koeficijentom varijacije intervala. Njegova vrednost ne zavisi od planirane vrednosti intervala, kao što je to slučaj u određivanju očekivane srednje vrednosti, već samo od rednog broja stajališta na liniji sa kojim je u pozitivnoj linearnoj vezi (Slike 5.12. i 5.13). Koeficijent varijacije realizovanog intervala na liniji 23 (Karaburma 2 – Vidikovac) izražava se pomoću sledećih linearnih modela:

$$KV_{1,s} = 0,2999 + 0,0117 \cdot s \quad (5.53)$$

$$KV_{2,s} = 0,1826 + 0,0141 \cdot s \quad (5.54)$$

Tabela 5.6. Karakteristike funkcionisanja linije – Smer A

SMER A																		
R.B.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<i>mintv</i>	14	31	17	17	27	73	53	14	25	33	35	26	43	35	42	41	27	87
<i>maxtv</i>	48	75	88	209	112	354	248	72	115	283	622	153	388	363	166	114	71	127
<i>astv</i>	21,663	41,292	43,339	30,119	47,288	144,761	106,977	33,204	53,663	94,077	175,320	54,434	124,171	113,978	75,162	62,812	37,012	102,547
<i>mintč</i>	/	9	11	8	8	5	6	5	6	5	9	11	5	12	9	8	6	5
<i>maxtč</i>	/	84	83	59	114	72	76	112	90	109	249	208	177	125	247	96	96	57
<i>astč</i>	/	30,179	44,201	29,581	31,834	37,182	37,431	39,589	37,782	39,643	46,462	94,123	43,031	42,480	52,837	40,326	31,591	23,863
<i>asi_r</i>	348,60	348,20	349,11	352,74	353,02	354,22	353,65	353,66	353,40	353,59	356,17	359,56	359,43	361,68	364,11	363,89	366,70	367,66
<i>Kv</i>	0,299	0,299	0,300	0,314	0,325	0,338	0,352	0,368	0,386	0,402	0,437	0,481	0,500	0,517	0,532	0,540	0,540	0,546
R.B.	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
<i>mintv</i>	46	15	21	13	42	28	44	54	57	6	17	13	28	20	15	25	17	/
<i>maxtv</i>	115	123	81	56	194	180	88	120	90	49	59	78	184	77	76	70	544	/
<i>astv</i>	67,388	26,892	37,864	24,630	88,564	33,422	54,490	67,835	69,191	16,679	24,560	26,132	54,488	32,012	30,655	33,585	38,004	/
<i>mintč</i>	5	6	10	10	23	9	13	7	8	11	8	8	6	11	13	6	5	/
<i>maxtč</i>	74	65	93	78	90	64	89	50	78	48	53	72	54	72	75	60	47	/
<i>astč</i>	26,493	31,241	40,518	39,164	47,690	32,239	39,851	30,129	30,782	30,198	27,896	33,314	30,995	30,845	37,660	29,672	26,845	/
<i>asi_r</i>	368,83	369,39	367,55	370,05	367,92	369,00	369,14	365,17	370,98	368,64	364,86	369,78	373,01	370,26	366,45	372,77	/	/
<i>Kv</i>	0,552	0,556	0,562	0,563	0,574	0,590	0,594	0,615	0,606	0,619	0,641	0,632	0,631	0,637	0,657	0,645	/	/

Legenda:

- mintv* [s] – minimalno realizovano vreme vožnje do narednog stajališta
- maxtv* [s] – maksimalno realizovano vreme vožnje do narednog stajališta
- astv* [s] – aritmetička sredina realizovanih vremena vožnje do narednog stajališta
- mintč* [s] – minimalno realizovano vreme čekanja na stajalištu
- maxtč* [s] – minimalno realizovano vreme čekanja na stajalištu
- astč* [s] – aritmetička sredina realizovanih vremena čekanja
- asi_r* [s] – aritmetička sredina realizovanih intervala sleđenja vozila na stajalištu
- Kv* – koeficijent varijacije intervaal na stajalištu

Tabela 5.7. Karakteristike funkcionisanja linije – Smer B

SMER B																		
R.B.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<i>mintv</i>	6	30	16	29	34	20	12	63	36	41	30	41	21	14	20	48	97	19
<i>maxtv</i>	25	86	33	104	101	37	28	89	56	65	61	174	92	115	51	352	191	94
<i>astv</i>	9,610	49,122	21,438	55,333	58,203	25,832	16,080	73,837	45,243	52,150	39,758	95,528	40,923	46,371	30,443	125,249	126,802	34,168
<i>mintč</i>	/	18	19	27	8	26	17	21	15	11	4	3	8	3	3	4	24	9
<i>maxtč</i>	/	70	86	67	77	63	85	68	68	73	92	68	102	91	113	104	107	106
<i>astč</i>	/	33,579	33,606	41,632	36,738	37,353	41,557	36,851	31,337	33,694	42,170	33,740	46,601	39,303	58,940	37,111	40,547	35,635
<i>ash_r</i>	342,63	341,67	341,22	341,55	342,69	343,63	344,30	344,30	343,79	344,31	344,46	344,79	346,40	346,68	345,12	348,22	345,95	346,75
<i>Kv</i>	0,217	0,216	0,223	0,233	0,246	0,263	0,277	0,284	0,295	0,307	0,323	0,331	0,366	0,369	0,379	0,389	0,415	0,428
R.B.	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
<i>mintv</i>	37	87	25	25	40	26	48	24	25	33	25	37	32	8	27	21	31	/
<i>maxtv</i>	129	403	105	134	231	133	246	88	133	124	79	95	111	21	91	37	102	/
<i>astv</i>	59,161	190,398	49,787	62,421	115,822	77,713	123,171	40,642	71,091	67,205	48,798	56,493	59,744	11,697	53,164	27,978	48,873	/
<i>mintč</i>	7	4	4	3	12	11	4	7	14	5	8	5	7	6	7	7	9	/
<i>maxtč</i>	150	113	103	117	151	87	88	64	110	74	75	70	54	72	54	61	56	/
<i>astč</i>	54,233	49,136	50,176	44,849	69,192	39,175	40,218	31,163	40,734	16,512	30,780	22,569	31,452	27,209	21,297	28,738	/	/
<i>ash_r</i>	344,88	344,76	347,02	345,44	348,55	347,69	345,59	345,17	346,28	344,73	343,60	346,41	344,30	346,51	342,67	344,68	/	/
<i>Kv</i>	0,489	0,519	0,540	0,546	0,564	0,576	0,580	0,578	0,592	0,592	0,599	0,610	0,619	0,626	0,623	0,635	/	/

Legenda:

- mintv* [s] – minimalno realizovano vreme vožnje do narednog stajališta
- maxtv* [s] – maksimalno realizovano vreme vožnje do narednog stajališta
- astv* [s] – aritmetička sredina realizovanih vremena vožnje do narednog stajališta
- mintč* [s] – minimalno realizovano vreme čekanja na stajalištu
- maxtč* [s] – minimalno realizovano vreme čekanja na stajalištu
- astč* [s] – aritmetička sredina realizovanih vremena čekanja
- ash_r* [s] – aritmetička sredina realizovanih intervala sleđenja vozila na stajalištu
- Kv* – koeficijent varijacije intervala na stajalištu

Tabela 5.8. Distribucija raspodele realizovanih vremena prevoza po smerovima

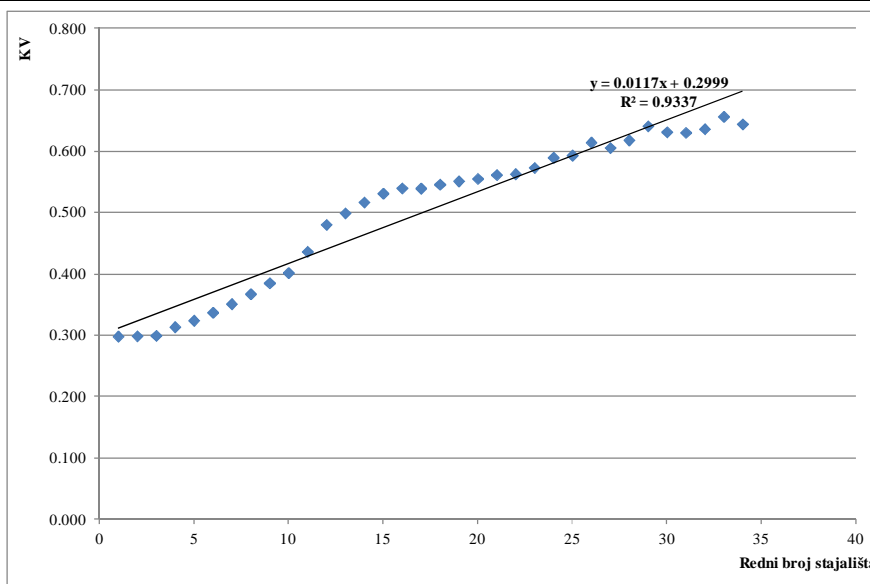
Klasa (j)	T_j [min]	smer A		smer B	
		$fr_{1,j}$	$p_{1,j}$	$fr_{2,j}$	$p_{2,j}$
1	40	0	0,000	0	0,000
2	41	0	0,000	0	0,000
3	42	0	0,000	0	0,000
4	43	0	0,000	0	0,000
5	44	0	0,000	0	0,000
6	45	2	0,003	0	0,000
7	46	3	0,004	1	0,001
8	47	9	0,013	1	0,001
9	48	13	0,018	2	0,003
10	49	22	0,031	3	0,004
11	50	40	0,056	8	0,011
12	51	43	0,060	22	0,030
13	52	36	0,050	42	0,057
14	53	40	0,056	35	0,048
15	54	43	0,060	44	0,060
16	55	47	0,065	66	0,090
17	56	63	0,088	68	0,092
18	57	51	0,071	75	0,102
19	58	48	0,067	65	0,088
20	59	60	0,084	71	0,096
21	60	37	0,052	53	0,072
22	61	53	0,074	51	0,069
23	62	27	0,038	36	0,049
24	63	23	0,032	22	0,030
25	64	13	0,018	25	0,034
26	65	11	0,015	11	0,015
27	66	9	0,013	9	0,012
28	67	4	0,006	6	0,008
29	68	3	0,004	5	0,007
30	69	3	0,004	5	0,007
31	70	3	0,004	3	0,004
32	71	1	0,001	1	0,001
33	72	1	0,001	1	0,001
34	73	1	0,001	0	0,000
35	74	1	0,001	0	0,000
36	75	2	0,003	0	0,000
37	76	2	0,003	0	0,000
38	77	0	0,000	0	0,000
39	78	1	0,001	0	0,000
40	79	1	0,001	0	0,000
41	80	1	0,001	2	0,003
42	81	0	0,000	0	0,000
43	82	0	0,000	0	0,000
44	83	1	0,001	0	0,000
45	84	0	0,000	0	0,000
46	85	0	0,000	1	0,001
47	86	0	0,000	0	0,000
48	87	0	0,000	0	0,000
49	88	0	0,000	2	0,003
50	89	0	0,000	0	0,000

Tabela 5.9. Vrednovanje regresionog modela za utvrđivanje očekivane vrednosti intervala

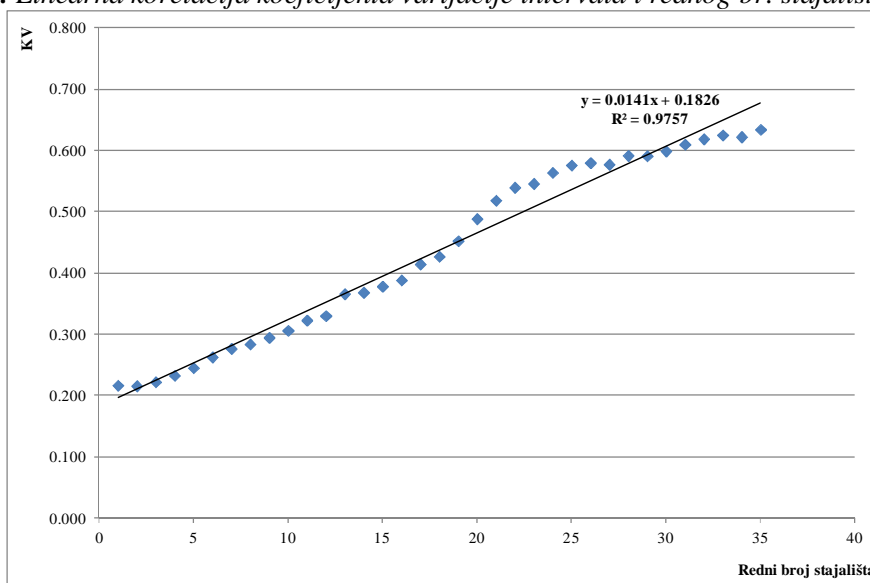
Smer	R	Koeficijent višestruke determinacije	Korigovani koeficijent višestruke determinacije	Standardna greška procene
A (1)	0,992 ^a	0,984	0,984	10,72996
B (2)	0,935 ^a	0,874	0,871	38,67944

Tabela 5.10. Vrednovanje regresionog modela za utvrđivanje očekivane vrednosti intervala

Smer	Nezavisna promenljiva	Nestandardizovani koeficijenti		t	Sig.
		Regresioni parametar	Greška		
A (1)	(Constant)	19,423	6,916	2,808	0,007
	Redni broj stajališta	1,392	0,133	10,498	0,000
	Vrednost planiranog intervala	1,010	0,016	63,082	0,000
B (2)	(Constant)	-74,242	24,773	-2,997	0,004
	Redni broj stajališta	1,661	0,458	3,630	0,001
	Vrednost planiranog intervala	1,221	0,057	21,296	0,000



Slika 5.12. Linearna korelacija koeficijenta varijacije intervala i rednog br. stajališta – Smer A



Slika 5.13. Linearna korelacija koeficijenta varijacije intervala i rednog br. stajališta – Smer B

5.7.4. Utvrđivanje vrednosti ostalih jediničnih troškova

Većina ostalih troškova koje je neophodno utvrditi vezana je za vreme putovanja korisnika javnog transporta (vreme vožnje, vreme čekanja, vreme kašnjenja, varijacija vremena). Troškovi vremena putovanja su proizvod vremena potrošenog na putovanje i jediničnih troškova. Vrednost jedinične cene (troškova) vremena putovanja zavisi od kategorije korisnika, svrhe putovanja, uslova putovanja, od subjektivnih prioriteta putnika i sl. Različite studije su kvantifikovale jedinične troškove vremena putovanja i vrednosti uštede vremena putovanja (*Victoria Transport Policy Institute, 2009*). Istovremeno su vršena istraživanja kategorija korisnika i stavova po pitanju pravljenja kompromisa između vremena i novca kada je, na primer, ponuđena opcija da se više plati za brže putovanje (Mackie i dr. 2003, Wardman i dr. 2004). Prema Litmanu (2008), jedinični troškovi putovanja se računaju u zavisnosti od prosečnih primanja korisnika javnog transporta putnika, uz određene faktore koji mogu uticati na varijaciju njihovih vrednosti:

- vrednost vremena vožnje korisnika se uobičajeno procenjuje od 25% do 50% od vrednosti vremena rada, odnosno od primanja korisnika;
- jedinični troškovi vremena vožnje rastu sa povećanjem primanja i niži su za decu i nezaposlene;
- jedinični troškovi vremena vožnje rastu sa nedostatkom komfora, nedostatkom sigurnosti i prilikom zasićenja saobraćajnog toka (neplaniranih zastoja);
- jedinični troškovi vremena vožnje rastu sa varijacijom vremena i nesigurnosti dolaska na odredište, a naročito su visoki za neočekivana odlaganja tokom aktivnosti sa striktnim rasporedom vremenskih trenutaka početka i kraja putovanja (Liu i dr., 2004, Hollander, 2006); ovo je najviše izraženo kod korisnika čija je svrhe odlazak na posao;
- jedinični troškovi vremena čekanja korisnika su od 2 do 5 puta veći od jediničnih troškova vremena vožnje;
- stepen razvoja sistema za informisanje, posebno na stajalištima, utiče na smanjenje jediničnih troškova vremena čekanja korisnika;
- jedinično vreme kašnjenja se vrednuje 3 do 5 puta više nego troškovi vremena vožnje.

Utvrđivanje vrednosti jedinične cene vremena vožnje korisnika

S obzirom na prethodno iznete konstatacije, prvi korak u utvrđivanju jediničnih troškova vožnje korisnika javnog transporta putnika je određivanje iznosa njihovih mesečnih primanja, odnosno utvrđivanje vrednosti vremena rada. Baza o istoriji funkcionisanja linije korišćena za potrebe izrade doktorske disertacije formirana je u toku radnih dana, uglavnom oktobra meseca 2016. godine, tako da su za potrebe određivanja mesečnih primanja uzeti podaci o prosečnim neto zaradama stanovnika grada Beograda za navedeni mesec i za još dva susedna meseca (septembar i novembar 2016. godine). U narednoj tabeli (5.11) prezentovane su prosečne neto zarade i broj časova rada po mesecima.

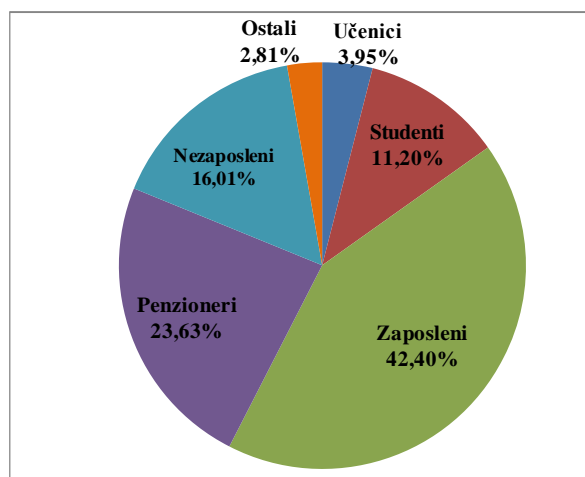
Tabela 5.11. Prosečne neto zarade i broj časova rada stanovnika grada Beograda⁸

Mesec	Prosečna neto zarada [RSD]	Časovi rada [časova]
Septembar	58.867,00	176
Oktobar	56.530,00	168
Novembar	57.191,00	176
Ukupno	172.588,00	520
Prosečna cena časa rada [RSD/čas]		331,900
Prosečna cena minuta rada [RSD/min]		5,532

Navedene prosečne zarade stanovnika grada služe za aproksimaciju prosečnih primanja koja se odnose na kategoriju zaposlenih korisnika sistema javnog transporta putnika u Beogradu. Iako navedena kategorija sigurno ima značajno učešće, ona nije jedini korisnik sistema. Struktura korisnika sistema javnog transporta u Beogradu prikazana je na Slici 5.14. Prezentovana struktura se odnosi na jutarnji vršni period, koji je i predmet implementacije kreiranog optimizacionog modela.

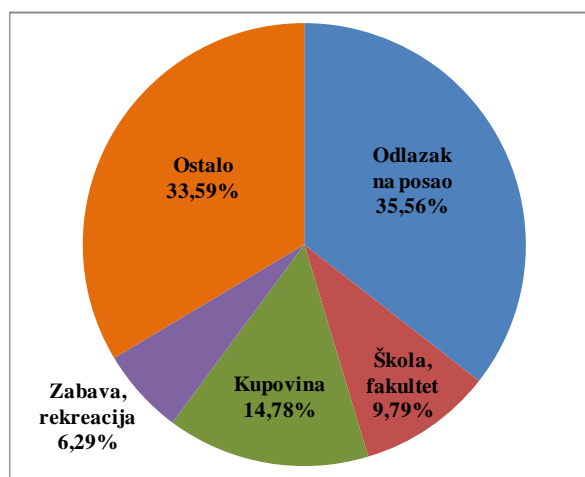
Kao što se i pretpostavljalo, najveće učešće u strukturi korisnika u jutarnjem vršnom času imaju zaposleni, koji u ukupnoj strukturi učestvuju sa 42,40%. Na drugom mestu su penzioneri sa 23,63% učešća, iz čega sledi da oko 66% korisnika sistema ima redovna mesečna primanja i samim tim značajno vrednuju vreme potrošeno na putovanje.

⁸ Izvor: Grad Beograd, Gradska uprava grada Beograda, Sekretarijat za upravu, Sektor za statistiku (<https://zis.beograd.gov.rs/index.php/2013-12-03-10-50-11/2013-11-04-10-15-34/summary/29-rhiv/169-pl-2016-arhiva.html>), pristupljeno 23. oktobra 2017. godine.



Slika 5.14. Struktura korisnika u jutarnjem vršnom periodu prema zanimanju⁹

Struktura korisnika prema svrsi putovanja u jutarnjem vršnom periodu prikazana je na narednoj slici (5.15). Različita vrednovanja vremena putovanja prisutna su i kod korisnika čije se svrhe putovanja razlikuju. Značajno veću vrednost jediničnim troškovima vremena putovanja daju korisnici kojima je definisano vreme dolaska na određište (odlazak na posao, u školu, na fakultet), koji u jutarnjem vršnom periodu čine oko 46% od ukupnog broja korisnika. Ono što iznenađuje kod prezentovane raspodele jeste izuzetno visoko učešće kategorije korisnika koji se nisu prepoznali niti u jednoj od ponuđenih svrha, što za posledicu ima nemogućnost preciznog utvrđivanja učešća korisnika sa definisanim vremenom dolaska na određište. Može se pretpostaviti da i u sklopu svrhe „Ostalo“ postoji značajan broj takvih korisnika.



Slika 5.15. Struktura korisnika prema svrhama putovanja u jutarnjem vršnom periodu¹⁰

⁹ Izvor: Tica, S., Bajčetić, S. i dr. (2015). Studija brojanja putnika u javnom prevozu i anketa korisnika javnog prevoza, Centar za planiranje urbanog razvoja – CEP, Beograd.

¹⁰ Ibid

Kada se uzmu u obzir prezentovane strukture kategorija korisnika i svrha putovanja, kao i prethodno iznete konstatacije da se vreme vožnje vrednuje između 25% i 50% vrednosti vremena rada korisnika, kao i činjenica da nivo komfora (koji je u jutarnjem vršnom periodu na niskom nivou) utiče na povećanje jediničnih troškova, za implementaciju optimizacionog modela usvaja se da jedinični troškovi vremena vožnje korisnika u sistemu javnog transporta u Beogradu iznose 35% od prosečne cene rada, odnosno jedinične plate korisnika.

Kao ulazni parametar kreiranog modela usvaja se jedinična vrednost cene vremena vožnje $C_{voz} = 1,93585$ [RSD/min] (dinara za svaki minut proveden u vožnji).

Utvrđivanje jedinične cene vremena čekanja korisnika

Za vrednost jedinične cene vremena čekanja korisnika na stajalištima usvaja se da je 2,5 puta veća od vrednosti cene vremena vožnje. I pored toga što korisnici vreme čekanja vrednuju od 2 pa čak do 5 puta više (a u pojedinim situacijama vrednovanje vremena čekanja može biti i 12 puta veće), u prilog usvojenom odnosu, koji je bliži minimalnom preporučenom, ide postojanje savremenog sistema za informisanje korisnika u javnom transportu u Beogradu. Savremeni sistem, na osnovu informacija koje prikuplja sistem za monitoring i upravljanje, u realnom vremenu obezbeđuje korisnicima informaciju o udaljenosti naredna dva vozila u dolasku, izraženu brojem stajališta. Informacije se mogu odnositi na udaljenost vozila od stajališta na kome se korisnici nalaze (informacija dostupna preko displeja na stajalištima) ili od stajališta za koje se vrši upit (informacija putem mobilnih telefona). Pravovremene informacije koje sistem pruža smanjuju anksioznost kod korisnika, kao i subjektivni osećaj o ukupnoj dužini vremena čekanja.

Stoga, kao ulazni parametar, usvaja se jedinična vrednost cene vremena čekanja na stajalištu $C_{\check{c}} = 4,839625$ [RSD/min] (dinara za svaki minut proveden na stajalištu).

Utvrđivanje jedinične cene kašnjenja

Prilikom utvrđivanja jedinične vrednosti vremena kašnjenja korisnika mora se imati u vidu da je, modelom za proračun troškova kašnjenja, predviđen proračun vremena

kašnjenja korišćenjem kvadratne funkcije, čime se dodatno kažnjavaju velike razlike između realizovanih i projektovanih vrednosti vremena prevoza. Razlike realizovanih i projektovanih vremena prevoza se koriste i zbog specifičnosti organizacije i funkcionisanja sistema javnog transporta putnika u Beogradu, pa samim tim i odabrane linije, kojom je predviđeno da se redom vožnje definišu isključivo vremena polazaka vozila sa terminusa. Kašnjenje vozila u dolasku na terminus prouzrokuje devijaciju vremena prevoza vozila u narednom poluovertu (Abkowitz–Engelstein, 1983), odnosno utiče na vreme vožnje u narednom polasku. Dakle, iako je ranije definisano da se vreme kašnjenja vrednuje 3 do 5 puta više nego vreme vožnje, za jediničnu vrednost cene kašnjenja inicijalno se može usvojiti ista vrednost kao i vrednost jedinične cene vremena vožnje (C_{voz}), odnosno $C_k = 1,93585$ [RSD/min²].

Utvrđivanje jedinične cene varijacije

Vrednost jedinične cene varijacije, kojom se izračunava ukupan trošak pouzdanosti, nema značajan uticaj na optimizacioni model niti na vrednost vremena obrta koja je izlazni rezultat primene modela. Određivanjem veličine njene vrednosti postiže se viši ili niži nivo homogenosti distribucije vremena vožnje i vremena zadržavanja na stajalištima oko aritmetičke sredine. Pretpostavlja se da se povećavanjem usvojene vrednosti utiče na dodatno usložnjavanje predviđenog proračuna i da kao posledica toga dolazi do povećanja vremena potrebnog za izvršenje optimizacionog proračuna. Kao inicijalna vrednost za jediničnu cenu varijacije usvaja se $C_{var} = 360$ [RSD/min²].

Utvrđivanje jedinične cene prekovremenog rada

Svaki polazak čija je vrednost realizovanog vremena prevoza veća od projektovane prouzrokuje prekoračenje planiranog vremena trajanja smene voznog osoblja, odnosno prouzrokuje njihov prekovremeni rad. Jedinična cena prekovremenog rada zavisi od jedinične cene rada voznog osoblja i procenta uvećanja koji se isplaćuje za prekovremeni rad. Za određivanje jedinične cene rada, kao i kod utvrđivanja jediničnih primanja korisnika, korišćeni su podaci za septembar, oktobar i novembar mesec 2016. godine. U narednoj tabeli prezentovane su vrednosti neto plata voznog osoblja u GSP

„Beograd“ za tri navedena meseca, na osnovu kojih je utvrđena jedinična cena rada. Procenat uvećanja jedinične cene rada za prekovremeni rad, propisan Zakonom o radu Republike Srbije¹¹ (član 108, stav 1, alineja 3), iznosi 26%, što znači da se za jediničnu cenu prekovremenog rada usvaja $C_{pr} = 4,928 \cdot 1,26 = 6,20928$ [RSD/min].

Tabela 5.12. Prosečne neto zarade i broj časova rada vozača GSP „Beograd“¹²

Mesec	Prosečna neto zarada [RSD]	Časovi rada [časova]
Septembar	51.267,43	176
Oktobar	50.563,76	168
Novembar	51.930,22	176
Ukupno	153.761,41	520
Prosečna cena časa rada [RSD/čas]		295,695
Prosečna cena minuta rada [RSD/min]		4,928

5.8. Rezultati primene optimizacionog modela

U ovom odeljku detaljno su prikazani rezultati primene definisanog optimizacionog modela za rešavanje problema usvajanja optimalne vrednosti vremena obrta vozila na liniji javnog gradskog transporta putnika. U skladu sa matematičkim formulacijama modela, problem se može prikazati kao MIP model koji se rešava u okviru specijalizovanog softvera. Dobijanje optimalnih vrednosti funkcije cilja realizovano je korišćenjem specijalizovanog softvera za matematičko programiranje CPLEX/AMPL (ILOG (2008a); AMPL (Fourer i dr. (1990); ILOG (2008b)). Za proračune je korišćena verzija softvera CPLEX 11.2, dok su sva izračunavanja izvršena na računaru sledeće konfiguracije: Intel Core 2 Duo CPU E6750 pri 2,66 GHz, RAM = 8 Gb, Linux Slackware 12, Kernel: 2.6.21.5. Matematičkim modelom koji softver obrađuje predviđeno je 475 promenljivih, dok je ukupan broj ograničenja 966.

Rezultati koji su dobijeni korišćenjem CPLEX MIP Solvera i AMPL-a, bez uvođenja bilo kakvog vremenskog ograničenja, za svaki od testiranih primera (definisanog skupa intervala) dati su u Tabeli 5.13. Pored definisanog skupa intervala, i vrednosti svih ostalih ulaznih parametara korišćenih u proračunu definisane su u prethodnim delovima poglavlja.

¹¹ Izvor: Ministarstvo državne uprave i lokalne samouprave (http://www.mduls.gov.rs/doc/drzavni-ispit/Zakon_o_radu_2014.pdf), pristupljeno 23. oktobra 2017. godine.

¹² Izvor: Izveštaj o poslovanju GSP „Beograd“ za 2016. godinu.

Prva kolona prezentovane tabele sadrži vrednosti svakog planiranog intervala iz razmatranog skupa. Minimalne vrednosti funkcije cilja date su u drugoj koloni, dok su odgovarajuća vremena rada CPLEX MIP Solvera do dobijanja veličina troškova, optimalnih vremena obrta i broja vozila data u trećoj koloni. U kolonama 4 i 5 date su optimalne vrednosti vremena poluobrti po smerovima, za odgovarajuću planiranu vrednosti intervala, dok je u koloni 6 data suma navedenih vrednosti, koja u stvari predstavlja optimalno vreme obrta vozila na liniji javnog transporta putnika. U poslednjoj koloni prezentovane su vrednosti neophodnog broja vozila koje je potrebno angažovati kako bi se ostvarila navedena funkcija cilja i ostali izlazni elementi optimizacionog modela.

Tabela 5.13. Vrednosti funkcije cilja, vremena obrta i vremena rada CPLEX/AMPL-a

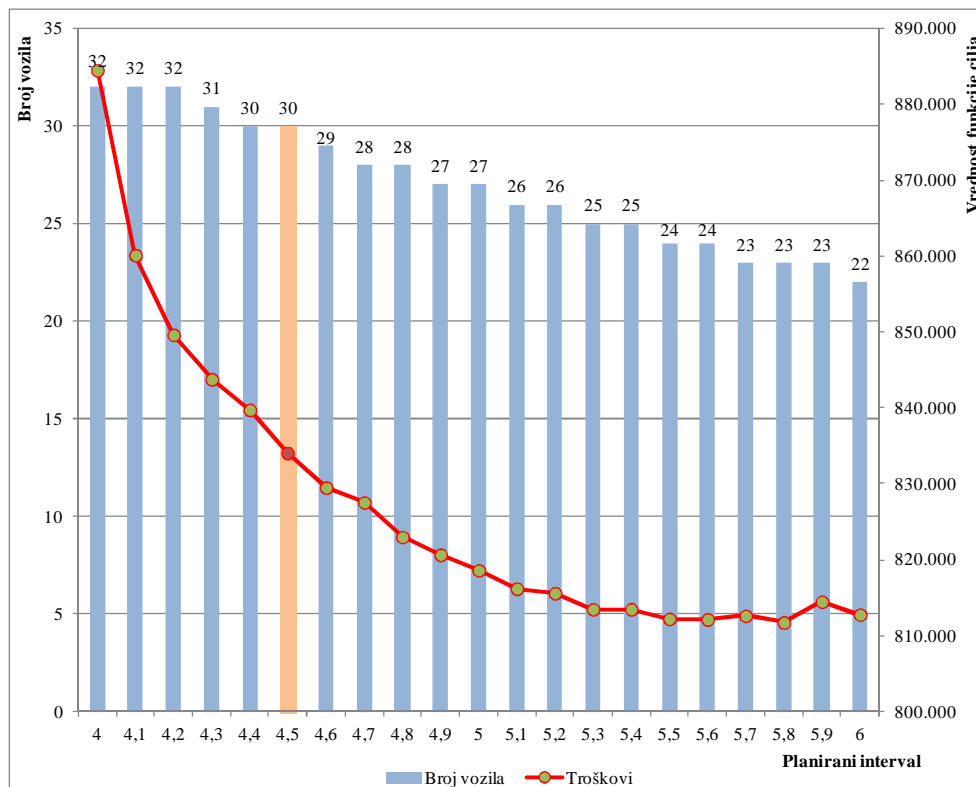
Planirani interval [min]	Najmanja vrednost funkcije cilja [RSD]	Vreme rada softvera [s]	Vreme poluobrti za smer 1 [min]	Vreme poluobrti za smer 2 [min]	Vreme obrta [min]	Broj vozila [vozila]
4	884.528	0,39694	63,91667	64,08333	128,0	32
4,1	860.149	0,46393	65,56667	65,63333	131,2	32
4,2	849.650	0,35395	67,30000	67,10000	134,4	32
4,3	843.795	0,36895	66,71667	66,58333	133,3	31
4,4	839.755	0,60491	66,01667	65,98333	132,0	30
4,5*	834.030*	15144,40000*	67,66667*	67,33333*	135,0*	30*
4,6	829.522	0,35895	66,78333	66,61667	133,4	29
4,7	827.557	150,79300	65,83333	65,76667	131,6	28
4,8	822.994	0,36495	67,40000	67,00000	134,4	28
4,9	820.664	0,39894	66,23333	66,06667	132,3	27
5	818.605	7376,06000	67,75000	67,25000	135,0	27
5,1	816.196	0,58391	66,43333	66,16667	132,6	26
5,2	815.589	1,65875	67,88333	67,31667	135,2	26
5,3	813.477	0,37494	66,38333	66,11667	132,5	25
5,4	813.484	1,93171	67,80000	67,20000	135,0	25
5,5	812.218	0,47093	66,11667	65,88333	132,0	24
5,6	812.148	0,74889	67,48333	66,91667	134,4	24
5,7	812.614	0,42594	65,66667	65,43333	131,1	23
5,8	811.736	0,37694	66,95000	66,45000	133,4	23
5,9	814.470	2356,03000	68,26667	67,43333	135,7	23
6	812.772	0,21097	66,30000	65,70000	132,0	22

U jednom slučaju, iz prethodno definisanog seta intervala, CPLEX MIP Solver nije uspeo je da dođe do optimalnog rešenja. Kada se za planirani interval na liniji, kao ulazni parametar u model, usvoji vrednost od 4,5 minuta, softver iskoristi svu raspoloživu memoriju, a da pri tome ne nađe optimalno rešenje za definisane ulazne parametre. Međutim, dobijeno je dopustivo rešenje koje samo 0,06% odstupa od

pronađene donje granice, što je indikacija da je to rešenje vrlo blisko optimumu, ako ne i samo optimalno rešenje. Iz tog razloga je navedeno rešenje i uvršteno u analizu, samo je na Slici 5.16. (i na svim ostalim slikama) taj slučaj predstavljen drugom bojom, a u Tabeli 5.13. su odgovarajuće vrednosti označene zvezdicama (*).

Vremena rada CPLEX MIP Solvera se razlikuju za svaki od intervala iz skupa, a minimalno vreme za pronalaženje optimalnog rešenja bilo je potrebno za interval od 6 minuta i iznosilo je svega 0,21097 sekundi, dok je maksimalno vreme rada zabeleženo prilikom proračuna za interval od 5 minuta (ako se ne uzme u obzir proračun za interval od 4,5 minuta), a tom prilikom softveru je bilo potrebno 7.376,06 sekundi (nešto više od dva sata) kako bi došao do optimalnog rešenja.

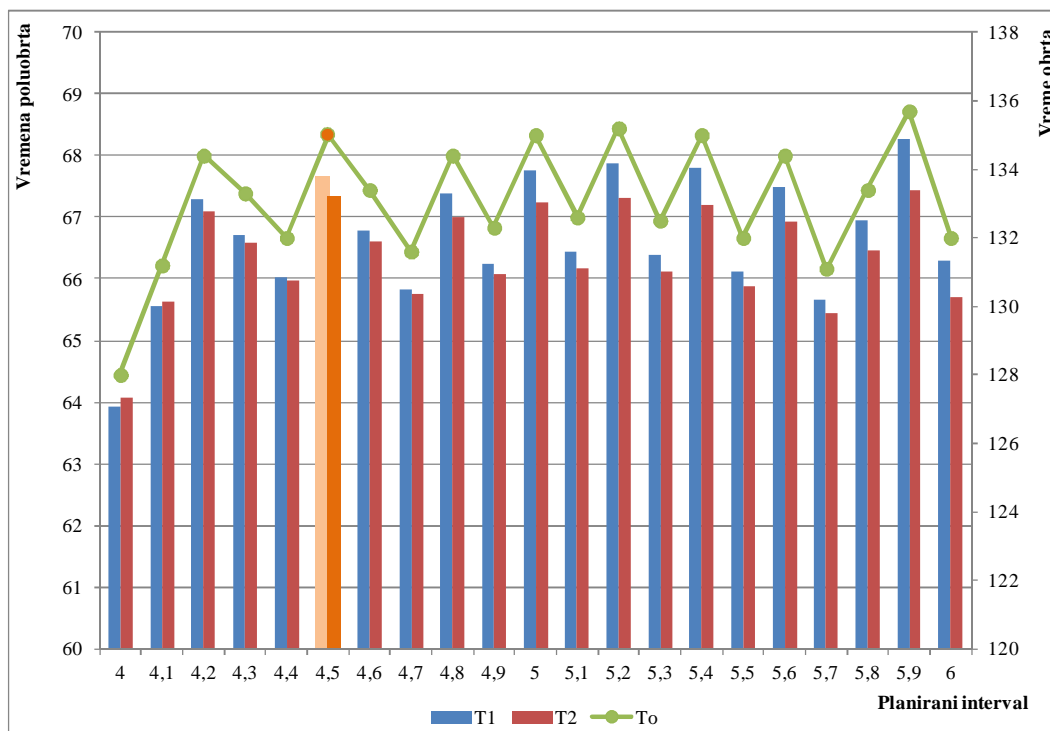
Na Slici 5.16. prezentovane su vrednosti funkcije cilja i potreban broj vozila za svaki od intervala iz definisanog skupa. Na apscisi prezentovanog dijagrama predstavljene su vrednosti planiranog intervala, dok su na primarnoj i sekundarnoj ordinati predstavljeni broj potrebnih vozila i vrednost funkcije cilja, respektivno.



Slika 5.16. Vrednost funkcije cilja i potreban broj vozila

Kriva funkcije cilja (ukupnih troškova) ima konveksan oblik i svoj minimum dostiže za interval od 5,8 minuta, mada se i za sve vrednosti intervala od 5,3 do 5,8 minuta može reći da su optimalna rešenja pošto su promene ukupnih troškova zanemarljivo male bez obzira na to što se broj angažovanih vozila menja, odnosno smanjuje. Za vrednosti intervala koje su manje od 5,3 minuta kriva troškova progresivno raste, a za prvi interval iz definisanog skupa (4 minuta) vrednost ukupnih troškova je 9% veća od minimalnih.

Vrednosti vremena poluobrta po smerovima, koje su, pored vrednosti ciljne funkcije, najznačajniji izlazni rezultati optimizacionog modela, za minimalnu vrednost ciljne funkcije iznose: $T1 = 66,95$ minuta, $T2 = 66,45$ minuta, iz čega sledi da optimalno ukupno vremena obrta za analiziranu liniju iznosi $To = 133,4$ minuta. Navedene vrednosti vremena obrta posledica su, pored vrednosti intervala (5,8 minuta), i insistiranja da broj vozila na radu bude ceo broj kako bi se izbegle naknadna nepotrebna zaokruživanja, kojima bi se obesmislila vrednost funkcije cilja tj. namera da se usvoji planirana vrednost vremena obrta koja obezbeđuje minimalne ukupne troškove jedne linije javnog masovnog transporta u analiziranom periodu vremena. Na narednoj slici prikazane su vrednosti vremena poluobrta po smerovima i vremena obrta koje je kao izlazni rezultat, za odgovarajući interval, definisao optimizacioni model.



Slika 5.17. Vrednosti vremena poluobrta i vremena obrta

Potvrda kvaliteta razvijenog optimizacionog modela jesu i realne vrednosti izlaznih rezultata. Kada se vrednosti izlaznih rezultata optimizacionog proračuna uporede sa postojećim vrednostima analizirane linije, uočava se da optimizacioni model uspešno oslikava realni sistem, tj. funkcionisanje linije u realnom sistemu javnog masovnog transporta.

U Tabeli 5.14. data je uporedna analiza vrednosti broja vozila, intervala i vremena obrta u postojećem planu funkcionisanja linije i vrednosti koje je kreirani optimizacioni model dao kao izlazne rezultate.

Izlazni rezultati optimizacionog modela korišćeni za poređenje sa vrednostima u postojećem stanju dati su za tri različita slučaja:

- kada funkcija cilja ima minimalnu vrednost,
- kada je broj vozila identičan kao u postojećem stanju i
- kada je planirani interval identičan kao u postojećem stanju.

Tabela 5.14. *Uporedna analiza izlaznih rezultata optimizacionog modela sa postojećim vrednostima*

	Postojeće stanje	Rezultati optimizacionog modela		
		Minimalna Y	Za isti broj vozila	Za istu vrednosti intervala
Broj vozila [vozila]	26	23	26	25
Planirani intervala [min]	5,3	5,8	5,2	5,3
Vreme obrta [min]	137,8	133,4	135,2	132,5
Vrednost funkcije cilja	/	811.736	815.589	813.477

U prvom slučaju, kada su ukupni troškovi minimalni, potreban broj vozila je manji za 3, dok je planirana vrednost intervala veća za 0,5 minuta. Optimizacioni proračun u slučaju kada je broj vozila identičan kao u postojećem stanju obezbeđuje interval od 5,2 minuta, što je za 0,1 minut manje od postojećeg, a vrednost funkcije cilja je samo 0,475% veća od minimalne, što je gotovo zanemarljivo. U trećem slučaju, kojim se korisnicima obezbeđuje identičan interval kao u postojećem stanju, optimizacioni model planira jedno vozilo manje, dok je vrednost funkcije cilja za 0,214% veća od minimalno zabeležene za celokupan set intervala.

Opisani rezultati izvršenog poređenja su samo još jedna potvrda prethodno iznete tvrdnje da se za sve rezultate optimizacionog modela, u slučajevima kada su vrednosti planiranih intervala u rasponu od 5,3 do 5,8 minuta, može reći da su optimalni u pogledu ukupnih troškova.

5.9. Analiza osetljivosti modela

U nastavku poglavlja izvršena je analiza osetljivosti kreiranog modela, odnosno opisana je promena izlaznih rezultata kao posledica promene vrednosti različitih ulaznih parametara. U prvom delu opisane su posledice promene inicijalne vrednosti jedinične cene varijacije, dok je u nastavku analiziran uticaj promene vrednosti jedinične cene vožnje korisnika i proširenja skupa intervala na vrednosti funkcije cilja, kao i ostalih izlaznih rezultata optimizacionog modela.

5.9.1. Promena inicijalne vrednosti jedinične cene varijacije

U prethodnom odeljku, prilikom usvajanja vrednosti jedinične cene varijacije (C_{var}) navedeno je da ona nema značajan uticaj na optimizacioni model niti na vrednost vremena obrta koja je izlazni rezultat primene modela. Kao inicijalna vrednost usvojena je $C_{var} = 360[\text{RSD}/\text{min}^2]$, a u nastavku odeljka prezentovani su i analizirani izlazni rezultati algoritma optimizacije i optimizacionog modela za vrednost jedinične cene varijacije koja je deset puta manja od inicijalne i iznosi $C_{var} = 36[\text{RSD}/\text{min}^2]$.

Tabela 5.15. Vrednosti funkcije cilja, vremena obrta i vremena rada CPLEX/AMPL-a sa izmenjenom vrednošću cene varijacije

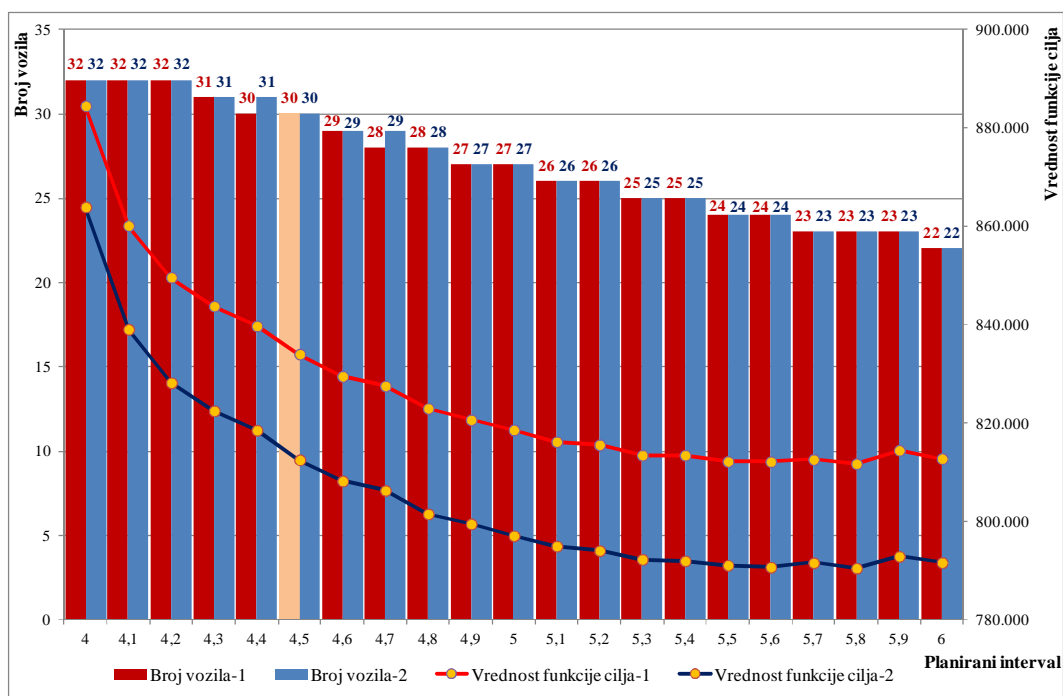
Planirani interval [min]	Najmanja vrednost funkcije cilja [RSD]	Vreme rada softvera [s]	Vreme poluobrta za smer 1 [min]	Vreme poluobrta za smer 2 [min]	Vreme obrta [min]	Broj vozila [vozila]
4	863.942	0,05599	63,86667	64,13333	128,0	32
4,1	839.068	0,05899	60,53333	60,66667	121,2	32
4,2	828.214	0,07299	67,35000	67,05000	134,4	32
4,3	822.499	0,11798	66,68333	66,61667	133,3	31
4,4	818.560	0,26896	68,38333	68,01667	136,4	31
4,5	812.516	0,26896	67,68333	67,31667	135,0	30
4,6	808.220	0,22897	66,76667	66,63333	133,4	29
4,7	806.308	0,33495	68,38333	67,91667	136,3	29
4,8	801.532	0,28396	67,40000	67,00000	134,4	28
4,9	799.499	0,07399	66,35000	65,95000	132,3	27
5	797.090	0,10398	67,75000	67,25000	135,0	27
5,1	794.994	0,07899	66,48333	66,11667	132,6	26
5,2	794.054	0,44593	67,80000	67,40000	135,2	26
5,3	792.297	0,09599	66,50000	66,00000	132,5	25
5,4	791.970	0,26396	67,71667	67,28333	135,0	25
5,5	791.091	0,13298	66,18333	65,81667	132,0	24
5,6	790.713	0,31495	67,45000	66,95000	134,4	24
5,7	791.590	0,11298	65,63333	65,46667	131,1	23
5,8	790.482	0,05999	67,11667	66,28333	133,4	23
5,9	792.908	0,36295	68,18333	67,51667	135,7	23
6	791.646	0,07299	66,01667	65,98333	132,0	22

Vrednosti funkcije cilja, vremena obrta i vremena rada CPLEX/AMPL-a sa izmenjenom vrednošću cene varijacije mogu se videti u prethodnoj tabeli (5.15).

Analizom podataka prezentovanih u tabeli uočava se da ne postoje ekstremne vrednosti vremena rada CPLEX MIP Solvera, kao u prethodnom slučaju, kao i da su proračuni uspešno završeni, odnosno softver je pronašao optimalna rešenja za svaku vrednost iz definisanog skupa intervala. Minimalni vreme rada CPLEX MIP Solvera je 0,05599 sekundi, dok je maksimalno vreme potrebno za pronalaženje optimalnog rešenja, u ovom slučaju, 0,44593 sekunde.

Opisani podaci potvrđuju prethodno iznesenu pretpostavku da se usvajanjem većih vrednosti jedinične cene varijacije utiče na uslozljavanje predviđenog proračuna i da se time utiče na povećanje vremena potrebnog za izvršenje optimizacionog proračuna.

Na Slici 5.18. ilustrovane su i uporedno prezentovane vrednosti funkcije cilja i potrebnog broja vozila za oba slučaja kada se vrednosti jedinične cene varijacije razlikuju.

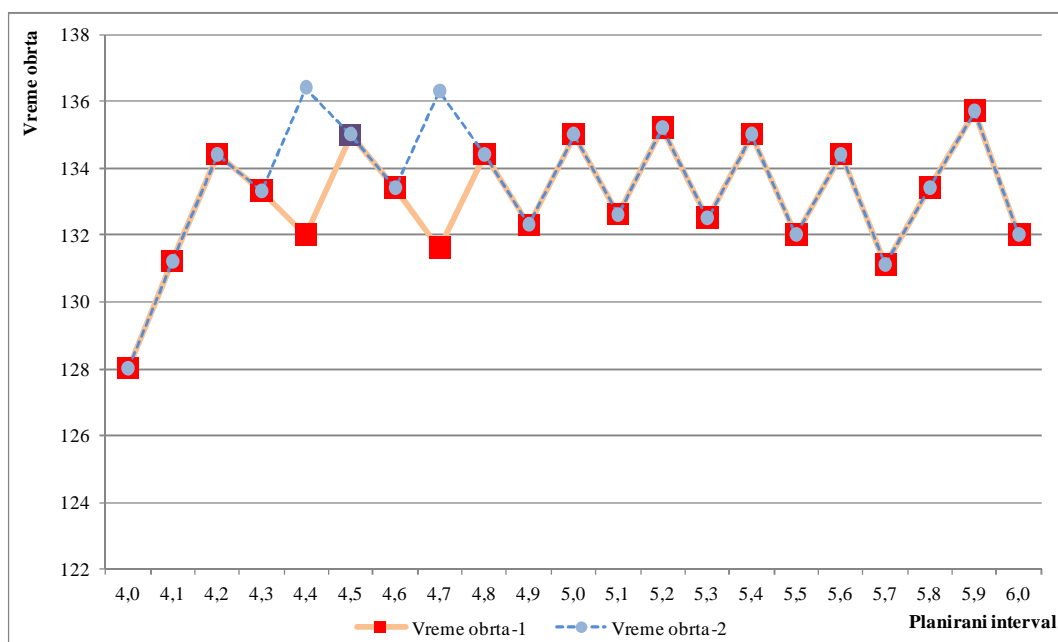


Slika 5.18. Uporedni prikaz vrednost funkcije cilja i potrebnog broja vozila za različite vrednosti jedinične cene varijacije

Rezultati prezentovani u prethodnoj tabeli i ilustrovani na prethodnoj slici nedvosmisleno potvrđuju prethodno iznete konstatacije. Naime, funkcije cilja, kao i u prethodnom slučaju, svoju minimalnu vrednost dostižu za interval od 5,8 minuta, pri

čemu optimalna vremena poluobrta iznose: $T_1 = 67,12$ minuta i $T_2 = 66,28$ minuta, što u sumi daje vreme obrta od $T_0 = 133,4$ minuta, što je identična vrednost kao u slučaju kada je jedinična cena varijacije imala desetostruko veću vrednost. Takođe, uočava se da se broj vozila razlikuje samo u dva slučaja, kada su vrednosti planiranog intervala 4,4 i 4,7 minuta, i da je navedena razlika minimalna (razlikuje se samo za jedno vozilo).

Posledica ove razlike je i razlika u vrednostima optimalnih vremena obrta koje za svaki interval definiše model, što je posebno prezentovano na Slici 5.19, na kojoj se mogu videti vrednosti vremena obrta za oba slučaja i za sve potencijalne intervale iz definisanog skupa.



Slika 5.19. Uporedni prikaz optimalnog vremena obrta za različite vrednosti jedinične cene varijacije.

I pored toga što nema značajan uticaj na utvrđivanje optimalne vrednosti vremena obrta, broja vozila i planiranog intervala, promena vrednosti jedinične cene varijacije utiče na nivo homogenosti distribucije vremena vožnje i vremena zadržavanja na stajalištima oko aritmetičke sredine. Adekvatan reprezent nivoa homogenosti je suma kvadrata odstupanja vremena vožnje po međustaničnim rastojanjima od srednje vrednosti, kao i suma kvadrata odstupanja vremena zadržavanja na stajalištima od srednje vrednosti, za svako međustanično rastojanje i stajalište posebno. U narednoj

tabeli (5.16) date su navedene sume, koje su izlazni rezultat optimizacionog proračuna za obe vrednosti jedinične cene varijacije.

Tabela 5.16. Uporedna analiza homogenosti distribucije vremena vožnje i vremena čekanja

Planirani interval [min]	$C_{var} = 360$ [RSD/min ²]		$C_{var} = 36$ [RSD/min ²]		Procentualna razlika sume kvadrata vremena vožnje [%]	Procentualna razlika sume kvadrata vremena čekanja [%]
	Suma kvadrata odstupanja vremena vožnje [min ²]	Suma kvadrata odstupanja vremena čekanja [min ²]	Suma kvadrata odstupanja vremena vožnje [min ²]	Suma kvadrata odstupanja vremena čekanja [min ²]		
4	42,69222	12,44925	54,44389	14,31514	27,53%	14,99%
4,1	43,42333	12,68797	54,78528	15,15494	26,17%	19,44%
4,2	44,36222	13,28331	55,37806	15,22892	24,83%	14,65%
4,3	44,02333	12,88831	54,85639	14,83453	24,61%	15,10%
4,4	43,68000	12,74722	55,82639	15,37319	27,81%	20,60%
4,5*	44,44167*	13,26556*	55,36944	15,39281	24,59%	16,04%
4,6	43,96667	12,96781	55,34806	14,83972	25,89%	14,44%
4,7	43,54111	12,67800	55,82639	15,33450	28,22%	20,95%
4,8	43,77694	13,44319	55,37750	15,17558	26,50%	12,89%
4,9	43,11000	12,74922	54,70806	15,01867	26,90%	17,80%
5	44,31500	13,25786	55,36750	15,42967	24,94%	16,38%
5,1	43,74417	12,86158	54,82222	14,91167	25,32%	15,94%
5,2	44,57611	13,36125	55,37194	15,34400	24,22%	14,84%
5,3	43,61083	12,80703	54,83889	14,98072	25,75%	16,97%
5,4	44,22444	13,19669	55,36833	15,26406	25,20%	15,67%
5,5	43,54528	12,90839	54,61528	15,14436	25,42%	17,32%
5,6	44,17083	13,07964	55,36944	14,99769	25,35%	14,66%
5,7	43,61472	12,64167	54,68139	14,74253	25,37%	16,62%
5,8	43,78250	13,13183	55,37778	14,75075	26,48%	12,33%
5,9	44,36639	13,25950	55,56500	15,34764	25,24%	15,75%
6	43,77389	12,90692	54,57861	14,99294	24,68%	16,16%

Iz predstavljenih rezultata se uočava da promena jedinične cene varijacije ima značajan uticaj na homogenost distribucije kako vremena vožnje, tako i vremena čekanja vozila na stajalištima. U slučaju kada se varijacija vrednuje manje nego za predloženu inicijalnu vrednost, disperzija vrednosti vremena vožnje i vremena zadržavanja je značajno veća. Disperzija vremena vožnje, reprezentovana sumom kvadrata odstupanja vremena vožnje, u zavisnosti od planirane vrednosti intervala veća je u rasponu od 24,22% do 28,22% u slučaju kada je vrednost jedinične cene varijacije smanjena. I disperzija vremena čekanja, reprezentovana sumom kvadrata odstupanja realizovanih vremena čekanja od srednje vrednosti, veća je u rasponu od 12,33% do 20,95%.

S obzirom na prethodnu analizu, ali i na želju da se spreči velika disperzija distribucije vremena vožnje i vremena zadržavanja na stajalištima, a samim tim i postojanje ekstremnih vrednosti, u daljim analizama osetljivosti modela korišćena je inicijalna vrednost jedinične cene varijacije.

5.9.2. Promena vrednosti jedinične cene vremena vožnje

Analiza osetljivosti modela, odnosno analiza promene vrednosti izlaznih rezultata, u slučaju kada se promeni ulazna vrednost jedinične cene vremena vožnje vrši se iz više razloga:

- u postavci modela definisano je da su vrednosti jediničnih cena vremena čekanja i vremena kašnjenja u funkciji jedinične cene vremena vožnje, tako da promena jedinične cene vremena vožnje direktno utiče i na promenu njihovih vrednosti – samim tim, ona je jedan od najznačajnijih ulaznih parametara;
- sistem javnog masovnog transporta funkcioniše u promenljivom okruženju, sa kojim je u snažnoj interakciji, tako da svaka promena standarda stanovnika, strukture korisnika ili svrhe putovanja korisnika utiče na usvojenu vrednost jedinične cene vožnje, odnosno na vrednovanje potrošenog vremena putnika;
- treba potvrditi univerzalnost definisanog optimizacionog modela, odnosno treba istražiti mogućnost primene i u drugim sistemima transporta putnika, pošto su inicijalne ulazne vrednosti svih parametara definisane na osnovu karakteristika sistema javnog masovnog transporta u Beogradu.

Analiza osetljivosti modela vrši se za dva slučaja: kada se jedinična cena vremena vožnje poveća za 25% i za 50%. U okviru sprovedene analize, paralelno je izvršena i analiza za proširen skup intervala kako bi se utvrdilo ponašanje krive vrednosti funkcije cilja u slučajevima kada su vrednosti planiranog intervala veće od graničnih, odnosno kako bi se ustanovio uticaj povećanog vremena čekanja korisnika na stajalištu na model u celini.

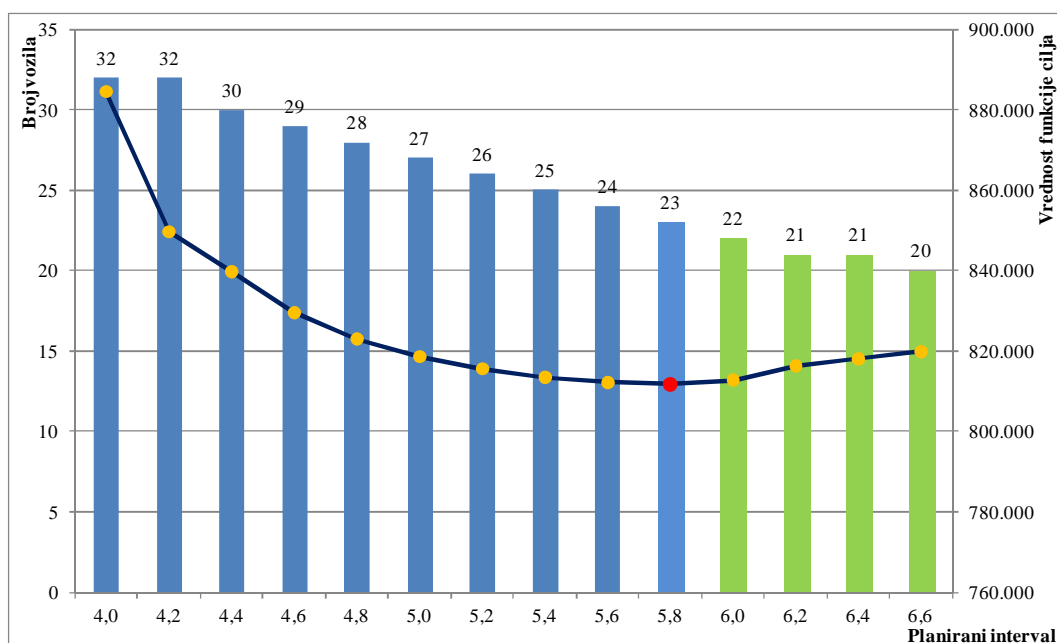
U cilju preglednije prezentacije rezultata sprovedenih analiza osetljivosti, u narednim tabelama i slikama mogu se videti vrednosti za polovinu intervala (svaku drugu vrednost) iz inicijalno definisanog skupa i za još tri dodate vrednosti planiranog intervala. Ovim je izbegnut suvišan nivo detaljnosti u prezentaciji, a istovremeno se nije uticalo na sagledavanje rezultata niti na jasno uočavanje prezentovanih trendova.

Tabela 5.17. Vrednosti funkcije cilja, vremena obrta i vremena rada CPLEX/AMPL-a za dodatne tri vrednosti intervala

Planirani interval [min]	Najmanja vrednost funkcije cilja [RSD]	Vreme rada [s]	Vreme poluobrta za smer 1 [s]	Vreme poluobrta za smer 2 [s]	Vreme obrta [s]	Broj vozila [vozila]
6,2	816.304	301,857000	65,23333	64,96667	130,2	21
6,4	817.998	0,965854	67,60000	66,80000	134,4	21
6,6	819.854	0,321952	66,21667	65,78333	132,0	20

U prethodnoj tabeli prezentovani su osnovni izlazni rezultati optimizacionog modela za tri dodatne vrednosti intervala sa inicijalnim vrednostima ulaznih parametara. Na Slici 5.20. objedinjeno su prikazane vrednosti funkcije cilja i broja vozila za intervale iz inicijalno definisanog skupa i za tri naknadno dodata intervala.

Trend rasta vrednosti funkcije cilja od njene minimalne vrednosti prisutan je i za tri dodatne vrednosti intervala, čime se nedvosmisleno potvrđuje da navedena rešenja ne mogu biti optimalna i da, bez obzira na to što se interval povećava i smanjuje planirani broj vozila, ukupni troškovi linije rastu, na šta glavni uticaj imaju troškovi čekanja korisnika na stajalištima. Histogrami koji reprezentuju potreban broj vozila na radu za intervale kod kojih raste kriva funkcije cilja ilustrovani su različitom bojom od ostalih, kako bi se pojačao vizuelni prikaz izlaznih rezultata kreiranog optimizacionog modela.



Slika 5.20. Vrednost funkcije cilja i potrebnog broja vozila za proširen skup intervala

Jedan od razloga zašto je promena vrednosti jedinične cene vremena vožnje značajna za analizu osetljivosti kreiranog modela je, između ostalih, i taj što postoji direktna zavisnost između njene vrednosti i vrednosti drugih jediničnih cena kao ulaznih parametara. U narednoj tabeli (5.18) mogu se videti inicijalne vrednosti jedinične cene vremena vožnje, čekanja i kašnjenja, čije su veličine i proces usvajanja detaljno opisani i obrazloženi u prethodnim odeljcima rada. Pored inicijalnih, u tabeli se mogu sagledati i vrednosti jediničnih cena nakon planiranih povećanja.

Tabela 5.18. Vrednosti jedinične cene vremena vožnje i vrednosti ostalih jediničnih cena (inicijalne i nakon povećanja)

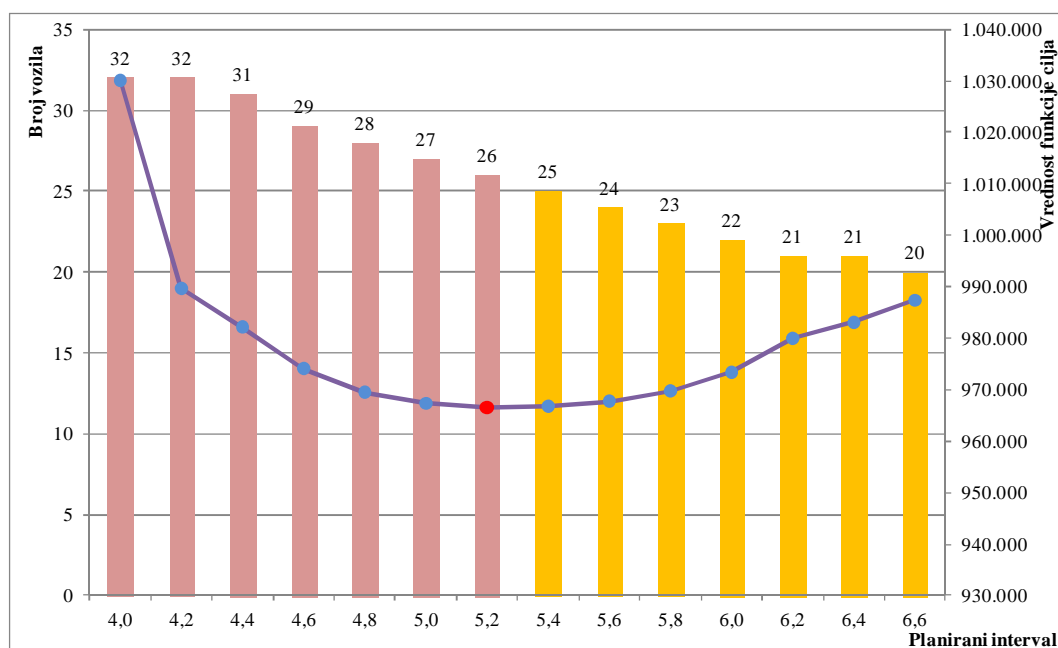
	C_{voz} [RSD/min]	$C_{\check{c}} = 2,5 \cdot C_{voz}$ [RSD/min]	$C_k = C_{voz}$ [RSD/min ²]
Inicijalna vrednost	1,935850	4,839625	1,935850
Uvećana za 25%	2,419812	6,049531	2,419812
Uvećana za 50%	2,903775	7,259438	2,903775

Osnovni izlazni rezultati optimizacionog modela vezani za vrednosti funkcije cilja, vremena obrta i vremena rada CPLEX/AMPL-a, za proširen skup intervala i uvećanu vrednost vremena vožnje za 25%, dati su u Tabeli 5.19. Za sve vrednosti intervala CPLEX MIP Solver je uspešno završio proračune i definisao optimalne vrednosti.

Tabela 5.19. Vrednosti funkcije cilja, vremena obrta i vremena rada CPLEX/AMPL-a za proširen skup intervala i uvećanu vrednost vremena vožnje za 25%

Planirani interval [min]	Najmanja vrednost funkcije cilja [RSD]	Vreme rada [s]	Vreme poluobrta za smer 1 [min]	Vreme poluobrta za smer 2 [min]	Vreme obrta [min]	Broj vozila [vozila]
4	1.030.060	0,220967	63,91667	64,08333	128,0	32
4,2	989.658	0,074989	67,28333	67,11667	134,4	32
4,4	982.152	0,353947	68,43333	67,96667	136,4	31
4,6	974.114	635,276000	66,80000	66,60000	133,4	29
4,8	969.490	5,142220	67,38333	67,01667	134,4	28
5	967.320	3,247510	67,71667	67,28333	135,0	27
5,2	966.596	0,896865	67,88333	67,31667	135,2	26
5,4	966.796	0,638903	67,80000	67,20000	135,0	25
5,6	967.794	0,616906	67,46667	66,93333	134,4	24
5,8	969.732	0,305954	66,91667	66,48333	133,4	23
6	973.342	0,179973	66,15000	65,85000	132,0	22
6,2	979.956	0,654900	65,20000	65,00000	130,2	21
6,4	983.045	0,535919	67,60000	66,80000	134,4	21
6,6	987.354	0,204969	66,21667	65,78333	132,0	20

Na Slici 5.21. ilustrovane su vrednosti funkcije cilja i broja vozila za novokreirani skup intervala. U ovom slučaju, u poređenju sa inicijalnim, vrednost funkcije cilja dostiže minimum mnogo ranije, ako se posmatra apscisa koja reprezentuje veličine planiranih intervala, odnosno za interval od 5,2 minuta, a u tom slučaju vrednost planiranog broja vozila na radu iznosi 26. Trend rasta vrednosti funkcije cilja od njene minimalne vrednosti prisutan je za sve vrednosti intervala iz inicijalnog skupa, ali i za tri dodatne vrednosti intervala, što je još jedna potvrda kvaliteta matematičkog modela.



Slika 5.21. Vrednost funkcije cilja i potrebnog broja vozila za proširen skup intervala i uvećanu vrednost vremena vožnje za 25%

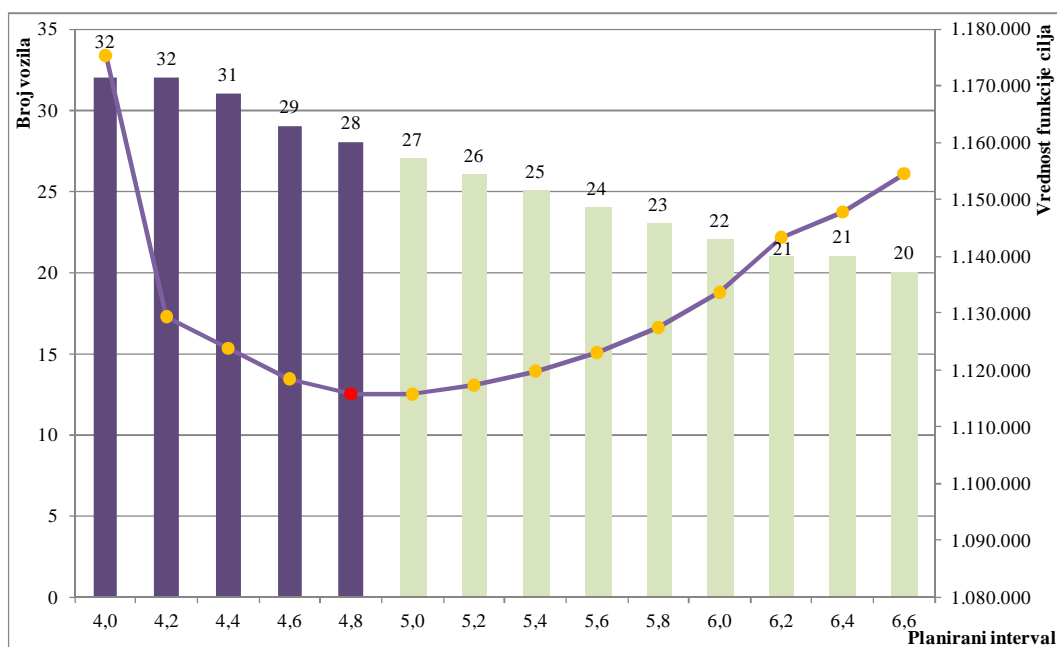
U drugom slučaju, kada se vrednost jedinične cene vremena vožnje uveća za 50%, a posledično tome i vrednosti vremena čekanja i vremena kašnjenja promene svoje veličine, nastavlja se prethodno uočeni trend, po kome se tačka koja označava minimum ciljane funkcije pomera ka manjim vrednostima intervala.

Rezultati koji su dobijeni korišćenjem CPLEX MIP Solvera i AMPL-a mogu se videti u narednoj tabeli (5.20), dok je vizuelni prikaz krive ciljane funkcije i broja vozila na radu dat na Slici 5.22.

Tabela 5.20. Vrednosti funkcije cilja, vremena obrta i vremena rada CPLEX/AMPL-a za proširen skup intervala i uvećanu vrednost vremena vožnje za 50%

Planirani interval [min]	Najmanja vrednost funkcije cilja [RSD]	Vreme rada [s]	Vreme poluobrta za smer 1 [min]	Vreme poluobrta za smer 2 [min]	Vreme obrta [min]	Broj vozila [vozila]
4	1.175.320	0,163976	63,90000	64,10000	128,0	32
4,2	1.129.400	0,090987	67,30000	67,10000	134,4	32
4,4	1.123.800	0,671899	68,40000	68,00000	136,4	31
4,6	1.118.410	0,297955	66,78333	66,61667	133,4	29
4,8	1.115.710	0,247963	67,35000	67,05000	134,4	28
5	1.115.750	0,427935	67,70000	67,30000	135,0	27
5,2	1.117.310	0,626905	67,83333	67,36667	135,2	26
5,4	1.119.810	0,594910	67,76667	67,23333	135,0	25
5,6	1.123.090	131,708000	67,46667	66,93333	134,4	24
5,8	1.127.480	0,085988	66,83333	66,56667	133,4	23
6	1.133.630	0,127981	66,15000	65,85000	132,0	22
6,2	1.143.310	0,271959	65,21667	64,98333	130,2	21
6,4	1.147.790	0,278958	67,53333	66,86667	134,4	21
6,6	1.154.560	0,095986	66,18333	65,81667	132,0	20

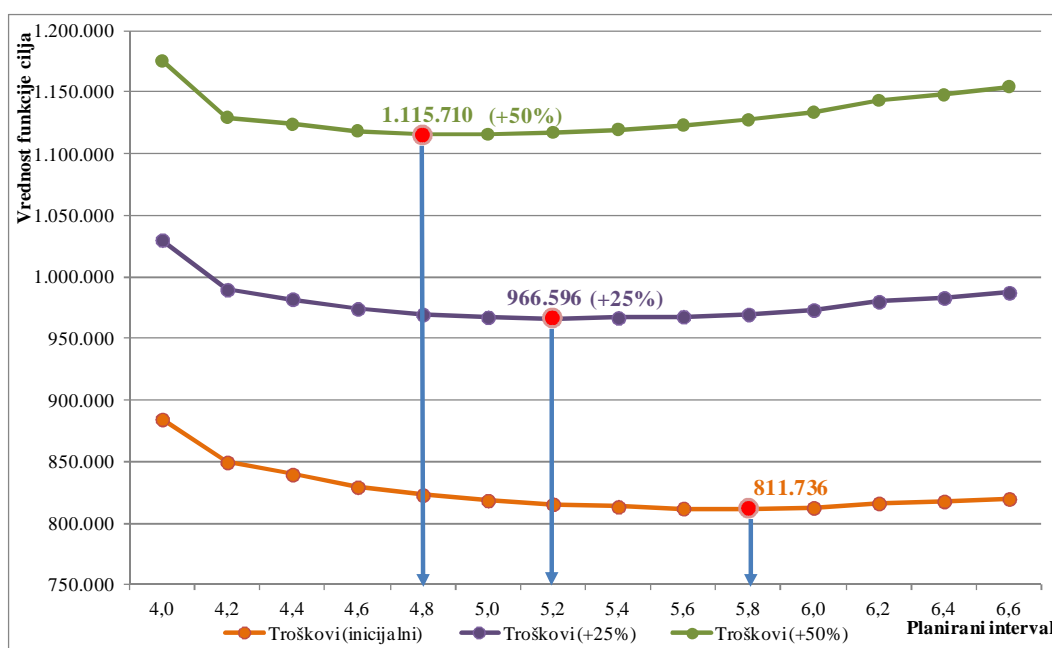
Analizom krive funkcije cilja, zbog dodatno izražene konveksnosti, jasno se može uočiti njen minimum, koji se u ovom slučaju realizuje za vrednost planiranog intervala od 4,8 minuta. U ovom slučaju neophodno je obezbediti 28 vozila na radu, što je za 2 više od prethodnog i za 5 više od inicijalnog slučaja.



Slika 5.22. Vrednost funkcije cilja i potrebnog broja vozila za proširen skup intervala i uvećanu vrednost vremena vožnje za 50%

Vrednosti funkcije cilja (ukupnih troškova) za sva tri analizirana slučaja uporedno su ilustrovane na Slici 5.23. Na slici su markirane tačke u kojima funkcije, za svaki od slučajeva posebno, dostižu svoj minimum, a istaknuta je i apsolutna vrednost troškova.

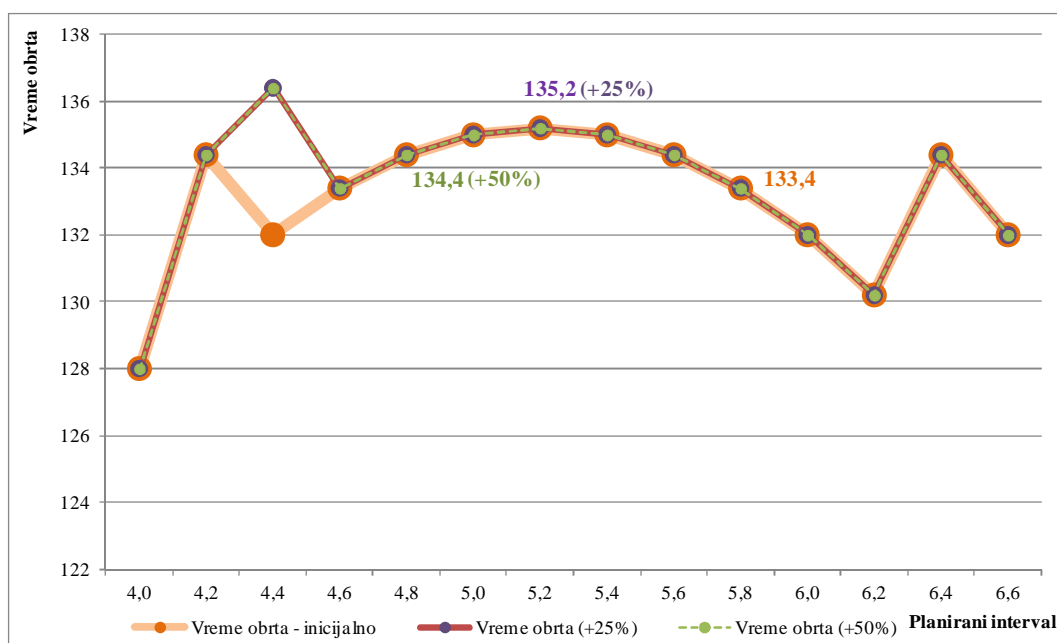
Sa slika se jasno uočava da kreirani model uspešno i očekivano reaguje na promenu ulaznih vrednosti, u ovom slučaju jediničnih cena vožnje, čekanja i kašnjenja. Naime, sa povećanjem vrednosti jediničnih cena, model smanjuje predloženu vrednost planiranog intervala, koji predstavlja optimalan način organizovanja funkcionisanja linije.



Slika 5.23. Uporedni prikaz krive funkcije cilja za različite vrednosti jedinične cene vremena vožnje

Za svaku minimalnu vrednost ciljne funkcije CPLEX MIP Solver kao izlazni rezultat daje i odgovarajuću vrednost optimalnog vremena obrta vozila koje se usvaja u procesu kreiranja reda vožnje. Na Slici 5.24. mogu se videti krive koje reprezentuju vrednosti optimalnih vremena obrta za sva tri slučaja koja su predmeti analize osetljivosti i za svaku od vrednosti planiranih intervala. Na prezentovanoj slici posebno su istaknute veličine optimalnih vremena obrta za planirane intervale u kojima funkcije cilja dostižu minimum. Optimalna vrednost vremena obrta za inicijalne vrednosti ulaznih parametara, koja je već opisana, iznosi 133,4 minuta, a u slučajevima kada je došlo do

korekcija vrednosti jediničnih cena iznose 135,2 minuta (za povećanje od 25%) i 134,4 minuta (za povećanje od 50%).



Slika 5.24. Uporedni prikaz krive optimalnih vremena obrta za različite vrednosti jedinične cene vremena vožnje

Sa slike se jasno uočava da su gotovo za sve vrednosti intervala predložena vremena obrta identična. Razlika je prisutna samo kada planirana vrednost intervala iznosi 4,4 minuta, i to za slučaj sa inicijalnim vrednostima ulaznih parametara kod koga je zabeležena niža vrednost optimalnog vremena obrta od vrednosti kod druga dva slučaja.

Veća odstupanja vrednosti optimalnih vremena obrta mogu se očekivati u slučajevima kada dolazi do korekcije vrednosti jediničnih cena vremena kašnjenja i vremena prekovremenog rada, a da cene vožnje i čekanja tom prilikom zadrže inicijalne vrednosti.

6. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

Ključne strategije razvoja savremenih gradova baziraju se na konceptu održivog razvoja i kvaliteta života, koji suštinski predstavljaju balans između potrošnje raspoloživih resursa i sposobnosti obnavljanja istih, uz prihvatljive standarde međusobnih uticaja koji se odražavaju na kvalitet života svih građana gradskih aglomeracija. Sistem javnog gradskog transporta jedan je od najznačajnijih i najsloženijih podсистema grada. Ovaj podsystem predstavlja najvažniji servis mobilnosti građana urbanog područja, čijim se unapređenjem i razvojem postiže održivi razvoj grada i poboljšava nivo kvaliteta života njegovih građana, kroz balans između ekonomije, društva i ekologije.

Složenost posmatranog sistema se ogleda pre svega u broju elemenata (podsystema) koji ga čine i njihovih međusobnih odnosa. Kako su predmet istraživanja upravo procesi i elementi sistema javnog gradskog transporta putnika, u drugom poglavlju disertacije definisano je mesto sistema javnog gradskog transporta putnika kao jednog od najznačajnijih gradskih podsystema, sa detaljnom analizom i dekompozicijom celine sistema. Na osnovu izvršene dekompozicije, za predmet proučavanja i analize izabran je sistem javnog masovnog transporta putnika, odnosno sistem koji opslužuje kontinualne transportne zahteve izraženog intenziteta u prostoru i vremenu. Takođe, u okviru drugog poglavlja disertacije izvršena je analiza mesta i funkcije linije kao osnovnog (najnižeg) hijerarhijskog nivoa u upravljanju sistemom javnog masovnog transporta putnika, kao i opis elemenata strukture i funkcionisanja kojima se linija definiše u prostoru i vremenu, a koji u međusobnoj interakciji kao proizvod imaju transportnu uslugu određenog kvaliteta.

Transportnu uslugu koju pruža sistem javnog masovnog transporta u jednom gradu koristi najveći broj njegovih stanovnika. U poslednjoj deceniji procesi planiranja i upravljanja ovim složenim podsystemom transporta putnika se menjaju i od cilja da se postigne maksimalna proizvodna i ekonomska efikasnost sistema, težište ovih procesa se usmerava na korisnike i na kvalitet pružene usluge.

U tom smislu, zadovoljenje konkretnih transportnih potreba i zahteva korisnika, s jedne strane, sredstvo je za postizanje odgovarajućeg nivoa zadovoljstva korisnika, a sa

druge strane, dovodi do kontinuiranog reinženjeringa strukture i funkcionisanja, čija je posledica poboljšanje efikasnosti i efektivnosti sistema javnog masovnog transporta putnika.

Činjenica da su u sistemu transporta putnika elementi strukture i funkcionisanja unapred definisani i poznati ističe proces planiranja kao ključni proces u sistemu kojim se kreira usluga po meri korisnika, a koji istovremeno ispunjava zahteve za ekonomskom efikasnošću i efektivnošću, tj. kojim se ostvaruje funkcija cilja sistema.

S obzirom na nameru da se kroz razvoj novog modela pruži naučni doprinos unapređenju kvaliteta sistema javnog masovnog transporta putnika i usluge koju sistem pruža, kroz kritički pregled literature, koji je predstavljen u trećem poglavlju, istaknut je značaj realizovanog kvaliteta transportne usluge, odnosno percepcije kvaliteta usluge od strane operatora, kao pružaoca transportne usluge, i putnika, kao korisnika te usluge.

Prezentovani rezultati sprovedenih istraživanja drugih autora, kroz obimnu analizu dostupne literature, pokazuju da su u većini navedenih sistema, bez obzira na njihovu veličinu i broj korisnika koji opslužuju, vreme putovanja i pouzdanost funkcionisanja dva najznačajnija svojstva kvaliteta transportne usluge.

Iako je značaj istraživanja i analize varijacije vremena putovanja neosporan, do sada im je u stručnim i naučnim krugovima malo pažnje bilo posvećeno, posebno zbog komplikovane i skupe procedure praćenja i skupljanja neophodnih podataka u prostoru i vremenu. Ovaj problem je delimično prevaziđen razvojem savremenih sistema za praćenje vozila baziranih na GPS tehnologiji, sistema za automatsko brojanje putnika i sl. Nakon pojave ovih sistema, koji obezbeđuju sveobuhvatne baze podataka o funkcionisanju sistema javnog masovnog transporta putnika, došlo je do razvoja raznih pristupa i modela obrade i analize prikupljenih podataka. U dostupnoj literaturi uglavnom je fokus u istraživanjima bio usmeren na utvrđivanje faktora koji utiču kako na vrednost vremena vožnje, tako i na njegovu varijaciju, uz pomoć različitih naučnih pristupa i metoda. S obzirom na aktuelnost teme, kao i na značajan broj istraživanja i pristupa, izvršen je komparativni pregled relevantne literature i opsežna kritička analiza dosadašnjih istraživanja. U okviru ovog poglavlja prezentovani su i najčešće korišćeni modeli u rešavanju problema planiranja vrednosti vremena obrta, kao osnovnog ulaznog

elementa u procesu planiranja funkcionisanja linije odnosno definisanja reda vožnje na liniji javnog masovnog transporta putnika.

Među uspostavljenim ciljevima disertacije, jedan od najvažnijih je bio utvrđivanje faktora koji utiču na vreme vožnje na liniji i na njegovu varijaciju. Izbor potencijalnih faktora koji utiču na vreme vožnje, koji integralno reprezentuju karakteristike strukture i funkcionisanja linije, kao i njihova analiza izvršena je u četvrtom poglavlju. Izbor je izvršen na osnovu opsežne analize literature i konkretnih radova drugih istraživača, ali i sopstvenih istraživanja, shodno dostupnosti podataka o karakteristikama strukture i funkcionisanja iz realnog sistema javnog masovnog transporta putnika. U skladu sa postavljenim ciljevima i zadacima, razvijena je specifična metodologija koja kao osnov uzima sistemski pristup i bazira se na podacima iz realnog sistema.

U okviru četvrtog poglavlja izvršen je izbor i opis multivarijacione statističke analize koja je primenjena na kreiranoj bazi podataka i pomoću koje je razvijen model za identifikaciju statistički značajnih faktora koji utiču na odabrane karakteristike vremena vožnje kao zavisne promenljive. S obzirom na polazne hipoteze da karakteristike trase linije i ostali elementi strukture linije (u ovom slučaju nezavisne promenljive) utiču na vrednosti vremena vožnje (u ovom slučaju zavisna promenljiva), a samim tim i na vreme obrta na liniji javnog masovnog transporta, i da je te uticaje moguće kvantifikovati, za potrebe ovog rada odabrana je i primenjena metoda višestruke regresije.

Korišćena multivarijaciona analiza omogućava detaljno ispitivanje uticaja nezavisnih promenljivih na svaku od definisanih zavisnih promenljivih zasebno, u okviru svakog od karakterističnih perioda funkcionisanja sistema.

Nakon definisanja metodološkog postupka i izbora metode multivarijacione analize, izvršena je primena u realnom sistemu javnog masovnog transporta putnika na odabranom reprezentativnom skupu linija. Analiza je sprovedena na osnovu podataka prikupljenih za skup reprezentativnih linija sistema javnog masovnog transporta putnika u Beogradu, a izlazni rezultati predstavljaju realnu sliku stanja u preseku vremena.

Rezultati vrednovanja regresionog modela i nezavisnih promenljivih, koji su izlazne vrednosti sprovedene višestruke regresije primenom specijalizovanog SPSS softvera, predstavljeni su posebno za svaku od pet usvojenih karakteristika vremena vožnje.

Vrednosti korigovanih koeficijenata determinacije jasno ukazuju na jaku i veoma jaku vezu između definisanih nezavisnih promenljivih i svake od zavisnih promenljivih posebno. Odabrane nezavisne promenljive, u kreiranom modelu, uspešno objašnjavaju karakteristike vremena vožnje na međustaničnim rastojanjima iskazane kroz srednju vrednost i minimum. Definisani regresioni model u svim karakterističnim periodima u toku dana objašnjava više od 96% varijanse minimalne vrednosti vremena vožnje. Vrednosti korigovanog koeficijenta determinacije potvrđuju kvalitet i primenljivost kreiranog modela i u slučaju kada se za zavisnu promenljivu izabere srednje vreme vožnje. Najmanja, ali istovremeno za potvrdu vrednosti modela visoka vrednost koeficijenta je u popodnevnom vršnom času i iznosi 0,77, dok u popodnevnom vanvršnom času definisani regresioni model objašnjava više od 90% vrednosti srednjeg vremena vožnje.

Model je pokazao veoma dobre rezultate kada je u pitanju i treća karakteristika vremena vožnje, odnosno njena maksimalna vrednost na određenom međustaničnom rastojanju. Maksimalne vrednosti vremena vožnje, za razliku od minimalnih, nisu ograničene, i to ih čini kompleksnijim za predviđanje i objašnjavanje. Ipak, regresioni model uspeva da u najsloženijem periodu (popodnevnom vršnom) objasni više od 39% maksimalne vrednosti vremena vožnje, dok u ostalim periodima koeficijent determinacije regresionog modela ima dvostruko veću vrednost.

Iz svega navedenog može se zaključiti da je u okviru četvrtog poglavlja definisan originalan model za utvrđivanje i kvantifikaciju faktora koji utiču na vreme vožnje i metodologija za prikupljanje svih neophodnih podataka iz realnog sistema. Model višestruke regresije, koji je razvijen kao rezultat sprovedene multivarijacione statističke analize pomoću specijalizovanog SPSS softvera, primenjen je i potvrđen na odabranim reprezentativnim linijama realnog sistema.

U okviru rada sprovedena je sveobuhvatna analiza dobijenih rezultata istraživanja, koja je pokazala da se kreiranim regresionim modelom uspešno opisuju veze između definisanih nezavisnih promenljivih i zavisnih koje predstavljaju osnovne karakteristike vremena vožnje. Navedena činjenica ga samim tim čini pogodnim i za predviđanje karakteristika vremena vožnje za sisteme i linije gde ne postoje savremeni sistemi za

praćenje i upravljanje vozilima, s jedne strane, a takođe i za unapređenje i mikropodešavanje funkcionisanja postojećih sistema za predviđanje vremena nailaska vozila na stajališta, s druge strane.

Jedna od najvažnijih preventivnih strategija koje se koriste u cilju unapređenja pouzdanosti funkcionisanja linije javnog gradskog transporta, koja je u direktnoj vezi sa varijacijom vremena vožnje, jeste podešavanje (prilagođavanje) reda vožnje karakteristikama funkcionisanja vozila u realnom sistemu. Podešavanje reda vožnje se pre svega odnosi na kvalitetno planiranje veličina vremena prevoza i vremena terminiranja vozila kao ulaznih elemenata za njegovu izradu. Planirana vrednost se najčešće usvaja na osnovu realizovanih vrednosti vremena obrta na liniji, koje su u direktnoj vezi (odnosno njihov su sastavni deo i posledica) sa prethodno analiziranim karakteristikama vremena vožnje.

Optimalno projektovano vreme obrta vozila na liniji javnog transporta putnika je vreme koje obezbeđuje balans između kvaliteta pružene transportne usluge i operativnih troškova linije, a kada se kvalitet pružene transportne usluge, odnosno negativne posledice nižeg nivoa kvaliteta izraze u vidu troškova, sledi da je optimalno vreme obrta ono vreme koje obezbeđuje minimizaciju funkcije cilja, odnosno minimalne ukupne troškove.

U okviru petog poglavlja predstavljen je novi model za optimizaciju vremena obrta vozila na liniji javnog gradskog transporta putnika baziran na ukupnim operativnim troškovima, troškovima korisnika (putnika) i troškovima kvaliteta transportne usluge, koji kao izlazni rezultat ima vremena poluobrtu za koja se realizuju minimalni ukupni troškovi funkcionisanja linije a samim tim i celine sistema.

U prvom delu poglavlja formulisani su problem i pružen je opis međusobnih relacija ulaznih elemenata za izradu reda vožnje u sistemu javnog gradskog transporta putnika.

U narednom delu su predstavljeni rezultati sprovedene analize karakteristika realizovanog intervala duž linije javnog transporta putnika, na osnovu kojih su kreirani regresioni modeli za predviđanje srednje vrednosti intervala i njegove varijacije. Takođe, opisani su troškovi angažovanja osnovnih resursa (vozila) i troškovi korisnika,

i definisani su modeli za njihovo izračunavanje. Troškovi kvaliteta transportne usluge su razloženi na više posebnih činilaca, a modeli za njihov proračun opisani su i obrazloženi u posebnom delu poglavlja.

Na osnovu opisanih relacija, u nastavku, definisan je matematički model u formi mešovitog celobrojnog programiranja sa ciljnom funkcijom minimizacije ukupnih troškova linije, kao i algoritam procesa primene definisanog optimizacionog modela. U poslednjem delu poglavlja implementiran je definisani optimizacioni model na odabranoj reprezentativnoj liniji sistema javnog masovnog transporta u Beogradu (studija slučaja).

Definisani model predstavlja novi istraživački i metodološki postupak rešavanja problema optimizacije vremena obrta vozila na liniji javnog transporta putnika, a za dobijanje optimalnih vrednosti funkcije cilja korišćen je specijalizovani softver za matematičko programiranje CPLEX/AMPL.

Potvrda kvaliteta definisanog optimizacionog modela jesu i dobijene realne vrednosti izlaznih rezultata. Uporednom analizom vrednosti izlaznih rezultata optimizacionog proračuna sa postojećim vrednostima analizirane linije dokazano je da optimizacioni model uspešno oslikava realni sistem, odnosno funkcionisanje linije u realnom vremenu.

Kvalitet i primenjivost modela dodatno je potvrđena i kroz izvršenu analizu osetljivosti, odnosno ispitivanje uticaja promene vrednosti različitih ulaznih parametara na promenu izlaznih rezultata. Analiza osetljivosti modela izvršena je u slučajevima promene inicijalne vrednosti jedinične cene varijacije i promene vrednosti jedinične cene vožnje korisnika, sa istovremenim proširenjem skupom intervala.

Iz prezentovanih rezultata se uočava da promena jedinične cene varijacije ima značajan uticaj na homogenost distribucije i vremena vožnje, i vremena čekanja vozila na stajalištima. U slučajevima kada se vrednost varijacije smanjuje u odnosu na predloženu inicijalnu vrednost, pokazano je da se povećava i disperzija vrednosti vremena vožnje i vremena zadržavanja.

Promena vrednosti jedinične cene vremena vožnje značajna je za analizu osetljivosti kreiranog modela zbog postojanja direktne zavisnosti između njene vrednosti i vrednosti drugih jediničnih cena kao ulaznih parametara koji se odnose na putnike i na kvalitet transportne usluge (vrednost jedinične cene vremena vožnje, čekanja i kašnjenja).

Analizom rezultata optimizacionog modela, nakon promene vrednosti ulaznih parametara, jasno se uočava da model uspešno i očekivano reaguje. Naime, sa povećanjem vrednosti jediničnih cena, model smanjuje predloženu vrednost planiranog intervala, koji predstavlja optimalan način funkcionisanja linije.

Paralelno, u okviru sprovedene analize, izvršena je i analiza vrednosti funkcije cilja za prošireni skup intervala, odnosno u slučajevima kada su vrednosti planiranog intervala veće od graničnih.

Već utvrđen trend rasta krive vrednosti funkcije cilja od njene minimalne vrednosti prisutan je i za prošireni skup intervala, čime je nedvosmisleno dokazano da navedena rešenja ne mogu biti optimalna i da, bez obzira na to što se interval povećava i samim tim smanjuje planirani broj vozila, ukupni troškovi funkcionisanja linije rastu, na šta glavni uticaj imaju troškovi čekanja korisnika na stajalištima.

Navedena činjenica je još jedna potvrda da definisani model uspešno oslikava realan sistem, što ga zajedno sa svim prethodno navedenim osobinama čini pogodnim za primenu u realnim sistemima javnog masovnog transporta putnika. Opisanim modelom se, kroz utvrđivanje optimalne vrednosti vremena obrta, intervala sleđenja vozila i broja vozila, utiče na unapređenje procesa planiranja, a to kao krajnji rezultat ima povećanje nivoa kvaliteta isporučene transportne usluge, što je i bio osnovni motiv i imperativ prilikom definisanja teme doktorske disertacije.

Na kraju, na osnovu navedenih činjenica može se zaključiti da je definisana metodologija značajna sa naučnog i teorijskog aspekta, jer njena primena omogućava optimizaciju veličine vremena obrta, jednog od ključnih dinamičkih elemenata koji utiču na proizvodnu i ekonomsku efikasnost i kvalitet funkcionisanja linije, a samim tim i celine sistema javnog gradskog transporta putnika.

Takođe, pored naučnog doprinosa, definisana metodologija ima i praktičnu vrednost u inženjerskoj praksi prilikom donošenja odluka o utvrđivanju vremena obrta kao ulazne veličine za izradu redova vožnje i optimizaciju transportnih kapaciteta na liniji i u sistemu javnog gradskog transporta putnika.

Kako se u definisanom modelu optimalno vreme obrta na liniji utvrđuje na osnovu minimalne vrednosti funkcije cilja, odnosno minimalnih troškova funkcionisanja linije, eventualne mogućnosti unapređenja mogu se odnositi na uključivanje ekoloških kriterijuma, odnosno određenih vrsta troškova negativnog uticaja na okolinu.

Slično prethodnom, postoje i mnogobrojni drugi činioci koji bi se mogli uključiti u istraživanje razmatranog problema planiranja optimalnog vremena obrta. To se, pre svega, odnosi na:

- stohastičko modeliranje pojedinih parametara, poput veličina vremena vožnje i vremena zadržavanja vozila na stajalištu, kako bi se obuhvatile funkcija promene i disperzija vrednosti ovih parametara za svako međustanično rastojanje i stajalište na liniji i na taj način eventualno dobili pouzdaniji rezultati;
- analizu veze između koeficijenta komfora putnika u vozilima i jedinične vrednosti cene vremena vožnje, čime bi se posledično utvrdila relacija između broja vozila na radu i jedinične cene vremena vožnje, a što bi direktno uticalo na složenost problema i na vrednost ciljne funkcije;
- analizu veze između komfora putnika na stajalištima i jedinične vrednosti cene vremena čekanja, čime bi se obezbedilo detaljnije vrednovanje vremena čekanja, koje bi se razlikovalo po kategorijama stajališta;
- modeliranje procesa nakupljanja putnika na stajalištima, u cilju sagledavanja uticaja mikro i makro lokacije stajališta, kao i strukture korisnika određenog stajališta (posebno u pogledu korišćenja informacionog sistema), u cilju dobijanja vrednosti jediničnog vremena čekanja putnika za svako stajalište posebno sa većim stepenom pouzdanosti.

Sve navedene mogućnosti za proširivanje definisanog modela za optimizaciju vremena obrta vozila na liniji javnog gradskog transporta putnika ujedno predstavljaju i pravce daljih istraživanja, u okviru kojih bi bilo neophodno realne situacije što detaljnije i verodostojnije obuhvati, opisati i modelirati.

Jasno je da bi uključivanje svih navedenih činilaca značajno povećalo složenost predloženog matematičkog modela, što znači da bi proces proširenja bilo neophodno uraditi veoma pažljivo. Sam proces bi trebalo da prate prethodno razvijene metode za proveru kvaliteta dobijenih rešenja, kako dodatna složenost ne bi uticala na praktičnu primenu i prihvatljivost optimizacionog modela i njegovih izlaznih rezultata u realnim sistemima javnog gradskog transporta putnika.

7. LITERATURA

1. Abkowitz, M., Engelstein, I. (1983). Factors Affecting Running Time on Transit Routes. *Transportation Research Part A*, Vol. 17, No. 2, 107–113.
2. Abkowitz, M., Engelstein, I. (1984). Methods for Maintaining Transit Service Regularity. *Transportation Research Record*, Vol. 961, 1–8.
3. Abkowitz, M., Slavin, H., Waksman, R., Englisher, L., Wilson, N. (1978). *Transit Service Reliability*. U: UMTA-MA-06-0049-78-1 (Ed.). USDOT Transportation Systems Center, Cambridge.
4. Abkowitz, M., Tozzi, J. (1987). Research Contributing to Managing Transit Service Reliability. *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 21 (spring), 47–65.
5. Bajčetić, S., Tica, S., Živanović, P., Milovanović, B., Nađ, A. (2017). Analysis of Public Transport Users' Satisfaction Using Quality Function Deployment: Belgrade Case Study. *Transport*, (ISSN 1648-4142 / eISSN 1648-3480) – prihvaćeno za štampu 08. oktobra 2017.
6. Bajčetić, S., Živanović, P., Tica, S., Petrović, M., Đorojević, A., Milovanović, B. (2013). Implementation of the New Public Transport Management System in Belgrade (Proceedings Paper). 11th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS), vol. 1 and 2, 643–646.
7. Banković, R. (1982). *Javni gradski putnički prevoz*. Naučna knjiga, Beograd.
8. Banković, R. (1984). *Planiranje javnog gradskog putničkog prevoza*. Građevinska knjiga, Beograd.
9. Banković, R. (1994). *Organizacija i tehnologija javnog gradskog putničkog prevoza*. Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.
10. Bates, J., Polak, J., Jones, P., Cook, A. (2001). The Valuation of Reliability for Personal Travel. *Transportation Research Part E*, Vol. 37, 191–229.
11. Ben-Akiva, M., Macke, P., Hsu, P. (1985). Alternative Methods to Estimate Route-Level Trip Tables and Expand On-Board Surveys. *Transportation Research Record*, Vol. 1037, 1–11.
12. Black, W. (2010). *Sustainable Transportation: Problems and Solutions*. Guildford, New York, NY.

13. Bowman, L. A., Turnquist, M. A. (1981). Service Frequency, Schedule Reliability and Passenger Wait Times at Transit Stops. *Transportation Research Part A*, Vol. 15, No. 6, 465–471.
14. Ceder, A. (2011). Optimal Multi-Vehicle Type Transit Timetabling and Vehicle Scheduling. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, Vol. 20, 19–30.
15. Cham, L. C. (2006). Understanding Bus Service Reliability: A Practical Framework Using AVL/APC Data. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
16. Chen, X., Yu, L., Zhang, Y., Guo, J. (2009). Analyzing Urban Bus Service Reliability at the Stop, Route, and Network Levels. *Transportation Research Part A*, Vol. 43, No. 8, 722–734.
17. Clotfelter, C. (1993). The Private Life of Public Economics. *Southern Economic Journal*, Vol. 59, No. 4, 579–596.
18. Cohen, J., Cohen, P., West, S. G., Aiken, L. S. (2003). *Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences* (3rd ed.). Erlbaum, Mahwah, NJ.
19. Da Silva, A. N. R., Da Silva, C. M., Macedo, M. H. (2008). Multiple Views of Sustainable Urban Mobility: The Case of Brazil. *Transport Policy*, Vol. 15, No. 6, 350–360.
20. Diab, E., Badami, M., El-Geneidy, A. (2015). Bus Transit Service Reliability and Improvement Strategies: Integrating the Perspectives of Passengers and Transit Agencies in North America. *Transport Reviews*, Vol. 23, No. 3, 292–328.
21. European Commission (1998). QUATTRO Final Report: Synthesis and Recommendations. Brussels, Belgium.
22. European Committee for Standardization (2000). European Standard EN 13816: Transportation – Logistics and Services – Public Passenger Transport – Service Quality Definition, Targeting and Measurement. Brussels, Belgium.
23. Fattouche, G. (2007). Improving High-Frequency Bus Service Reliability Through Better Scheduling. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

24. Filipović, S. (1983). Istraživanje uticaja vremena obrta na realizaciju zahteva višeg sistema i efikasnost linije. Magistarski rad. Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.
25. Filipović, S. (1995). Optimizacije u sistemu javnog gradskog putničkog prevoza. Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.
26. Filipović, S. (1989). Istraživanje karakteristika stohastičke funkcije prevoznih zahteva i definisanje parametara kvaliteta funkcionisanja linije javnog gradskog putničkog prevoza. Doktorska disertacija. Saobraćajni fakultet, Beograd.
27. Filipović, S., Stanković, R. (1996). Standardi i upravljanje kvalitetom usluge u transportu putnika u gradovima. Zbornik radova međunarodnog naučnostručnog skupa SIE. Beograd, Srbija, 196–198.
28. Filipović, S., Tica, S., Živanović, P., Milovanović, B. (2009). Comparative Analysis of the Basic Features of the Expected and Perceived Quality of Mass Passenger Public Transport Service in Belgrade, *Transport*, Vol. 24, No. 4, 265–273.
29. Finn, B. (2003). Advancing Urban Passenger Transport Reform in the Europe and Central Asia Region: Reform Options Report. CIE Consult.
30. Fonzone, A., Schmöcker, J. D., Liu, R. (2015). A Model of Bus Bunching Under Reliability-Based Passenger Arrival Patterns. *Transportation Research Part C*, Vol. 59, 164–182.
31. Fourer, R., Gay, D. M., Kernighan, B. W. (1990). A Modeling Language for Mathematical Programming. *Management Science*, Vol. 36, No. 5, 519–554.
32. Furth, P. G. (2006). TCRP Report 113: Using Archived AVL-APC Data to Improve Transit Performance and Management. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
33. Furth, P. G., Muller, T. H. J. (2007). Service Reliability and Optimal Running Time Schedules. *Transportation Research Record*, Vol. 2034, No. 1, 55–61.
34. Gentile, G., Noekel, K. (2016). Modelling Public Transport Passenger Flows in the Era of Intelligent Transport Systems. Springer Tracts on Transportation and Traffic Volume 10. Springer International Publishing, Switzerland.
35. Hollander, Y. (2006). Direct Versus Indirect Models for the Effects of Unreliability. *Transportation Research Part A*, Vol. 40, No. 9, 699–711.

36. Holroyd, E. M., Scraggs., D. A. (1966). Waiting Times for Buses in Central London. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 8, No. 3, 158–160.
37. Hong, Y. (2002). The Development of More Effective Operating Plans for Bus Service. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
38. Huisman, D., Freling, R., Albert, P., Wagelmans, M. (2004). A Robust Solution Approach to the Dynamic Vehicle Scheduling Problem. *Transportation Science*, Vol. 38, No. 4, 447–458.
39. ILOG (2008a). CPLEX 11.2, Reference Manual, ILOG.
40. ILOG (2008b). ILOG AMPL CPLEX System, Version 11.0, Users Guide. ILOG.
41. International Electrotechnical Commission (1999). IEC 60050-191:1990 International Electrotechnical Vocabulary Chapter 191: Dependability and Quality of Service.
42. Iseki, H., Taylor, B. (2010). Style Versus Service? An Analysis of User Perceptions of Transit Stops and Stations. *Journal of Public Transportation*, Vol. 13, No. 3, 38–63.
43. Iseki, H., Taylor, B., Miller, M. (2006). The Effects of Out-of-Vehicle Time on Travel Behavior: Implications for Transit Transfers Los Angeles. CA: California Department of Transportation.
44. Ji, Y., Mishalani, R. G., McCord, M. R., Goel, P. (2011). Identifying Homogeneous Periods for Bus Route Origin–Destination Passenger Flow Patterns Based on Automatic Passenger Count Data. *Transportation Research Record*, Vol. 2216, 42–50.
45. Kennedy, C., Miller, E., Shalaby, A., Maclean, H., Coleman, J. (2005). The Four Pillars of Sustainable Urban Transportation. *Transport Reviews*, Vol. 25, No. 4, 393–414.
46. Kimpel, T. J., Strathman, J. G., Callas, S. (2004). Improving Scheduling Through Monitoring Using AVL/APC data. Proceedings of 9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport, CASPT, San Diego.
47. Koffman D. (1978). A Simulation Study of Alternative Real Time Headway Control Strategies. *Transportation Research Record*, Vol. 663, 41–46.

48. König, A., Axhausen, K. W. (2002). The Reliability of the Transportation System and Its Influence on the Choice Behaviour. Proceedings of the 2nd Swiss Transportation Research Conference. Monte Verità.
49. Kovačić, Z. (1994). Multivarijaciona analiza. Ekonomski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.
50. Lam, T. C., Small, K. A. (2001). The Value of Time and Reliability: Measurement from a Value Pricing Experiment. *Transportation Research Part E*, Vol. 37, 231–251.
51. Levinson, H. S. (1983). Analyzing Transit Travel Time Performance. *Transportation Research Record*, Vol. 915, 1–6. Washington D.C.
52. Levinson, H. S. (1991). Supervision Strategies for Improved Reliability of Bus Routes. NCTRP Synthesis of Transit Practice 15. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.
53. Levinson, H. S. (1991). Synthesis of Transit Practice 15: Supervision Strategies for Improved Reliability of Bus Routes, National Cooperative Transit Research and Development Program. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.
54. Litman, A. T. (2008). Valuing Transit Service Quality Improvements. *Journal of Public Transportation*, Vol. 11, No. 2, 43–63.
55. Liu, H. X., Recker, W., Chen, A. (2004). Uncovering the Contribution of Travel Time Reliability to Dynamic Route Choice Using Real-Time Loop Data. *Transportation Research Part A*, Vol. 38, No. 6, 435–453.
56. Liu, R., Sinha S. (2007). Modelling Urban Bus Service and Passenger Reliability. Proceedings of Instr 2007 conference. The Hague.
57. Lovrić, M. (2008). Osnovi statistike. Ekonomski fakultet, Kragujevac.
58. Luethi, M., Weidmann, U., Nash, A. (2007). Passenger Arrival Rates at Public Transport Stations. Transportation Research Board 86th annual meeting, No. 07-0635. Washington, DC.
59. Mackie, P. J., Wardman, M., Fowkes, A. S., Whelan, G., Nellthorp J., Bates J. (2003). Values of Travel Time Savings in the UK–Summary Report. Institute for Transport Studies, University of Leeds.

(<http://www.its.leeds.ac.uk/downloads/VOTSummary.pdf>), pristupljeno 23. oktobra 2017. godine.

60. Manheim, M. L. (1979). *Fundamentals of Transportation Systems Analysis – Volume 1: Basic concepts*. MIT Press, Cambridge, MA.
61. Mann, P. S. (2006). *Introductory Statistics, Sixth Edition*. John Wiley & Sons, Incorporated.
62. Mazloumi, E., Currie, G., Rose, G. (2010). Using GPS Data to Gain Insight into Public Transport Travel Time Variability. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 136, No. 7, 623–631.
63. Milkovits, M. N. (2008). *Simulating Service Reliability of a High Frequency Bus Route Using Automatically Collected Data*. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
64. Muller, T. H. J., Furth, P.G. (2000). *Integrating Bus Service Planning with Analysis, Operational Control, and Performance Monitoring*. Proceedings, Intelligent Transportation Society of America Annual Meeting. Boston, USA.
65. Noland, R. B., Polak, J.W. (2002). Travel Time Variability: A Review of Theoretical and Empirical Issues. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, Vol. 22, No. 1, 39–54.
66. Osuna, E. E., Newell, G.F. (1972). Control Strategies for an Idealized Public Transportation System. *Transportation Science*, Vol. 6, No. 1, 52–72.
67. Pallant, J. (2007). *SPSS Survival Manual: A Step by Step Guide to Data Analysis Using SPSS for Windows (version 15)*. 3rd ed. Berkshire: Open University Press, McGraw Hill Education.
68. Petrović, M., Tica, S., Živanović, P., Bajčetić, S. (2010). *Fare Collection and Vehicle Management System in Public Transport in Belgrade – Main Project*. Consortium: Apex Solution Technology, Lanus and Kent Kart Global Elektronik Ltd.Sti, Belgrade, Serbia.
69. Popović, J. (2010). *Statistika i verovatnoća*. Saobraćajni fakultet, Beograd.
70. Rietveld, P., Bruinsma, F. R., van Vuuren, D.J. (2001). Coping with Unreliability in Public Transport Chains: A Case Study for Netherlands. *Transportation Research*, 35A, 539–559.

71. Rydén, J., Alm, S.E. (2010). The Effect of Interaction and Rounding Error in Twoway ANOVA: Example of Impact on Testing for Normality. *Journal of Applied Statistics*, Vol. 37, 1695–1701.
72. Salicrú, M., Fleurent, C., Armengol, J.M. (2011). Timetable-Based Operation in Urban Transport: Run-Time Optimisation and Improvements in the Operating Process. *Transportation Research Part A*, Vol. 45, 721–740.
73. Schiller, P.L., Bruun, E.C., Kenworthy, J. R. (2010). *An Introduction to Sustainable Transportation: Policy, planning, and implementation*. Earthscan, Washington DC.
74. Schmöcker, J.D., Bell, M.G.H. (2002). The PFE as a Tool for Robust Multi-modal Network Planning. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 44, No. 3, 108–114.
75. Shalaby, A., Lyon C., Sayed, T. (2001). Transferability of Travel Time Models and Provision of Real-Time Arrival Time Information, *Proceedings of Intelligent Transportation Systems Conference*. Oakland, USA.
76. Sorratini, J.A., Liu, R., Sinha, S. (2008). Assessing Bus Transport Reliability Using Micro-Simulation. *Transportation Planning and Technology*, Vol. 31, No. 3, 303–324.
77. Stevens, J. (1996). *Applied Multivariate Statistics for the Social Sciences* (3rd ed.). Lawrence Erlbaum, Mahwah, NJ.
78. Strathman, J. G., Hopper, J.R. (1993). Empirical Analysis of Bus Transit On-Time Performance. *Transportation Research Part A*, Vol. 27, No. 2, 93–100.
79. Strathman, J. G., Kimpel, T., Dueker, K.J., Gerhart, R., Callas, S. (2001). *Evaluation of Transit Operations: Data Applications of Tri-Met's Automated Bus Dispatch System*. Portland, OR.
80. Sun, C., Arr, G., Ramachandran, R. P. (2003). Vehicle Reidentification as Method for Deriving Travel Time and Travel Time Distribution. *Transportation Research Record*, Vol. 1826, 25–30.
81. Tabachnick, B. G., Fidell, L. S. (2007). *Using Multivariate Statistics* (5th ed.). Pearson Education, Boston.
82. Tahmasseby, S. (2009). *Reliability in Urban Public Transport Network Assessment and Design*. Doktorska disertacija. Department of Transport and Planning, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.

83. Taylor, B., Iseki, H., Miller, M., Smart, M. (2007). Thinking Outside the Bus: Understanding User Perceptions of Waiting and Transferring in Order to Increase Transit Use. UCLA Institute of Transportation Studies, Los Angeles.
84. Tica S. (2011). Prilog razvoju metoda za strateško upravljanje sistemom javnog gradskog transporta putnika. Doktorska disertacija. Saobraćajni fakultet, Beograd.
85. Tica S. (2016). Sistemi javnog transporta putnika – Elementi tehnologije, organizacije i upravljanja. Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, Beograd.
86. Tica, S., Bajčetić, S., Živanović, P., Nađ, A., Milovanović, B. (2016a). Real-Time Monitoring and Management in Public Transport System – Belgrade Case Study. International Scientific Journal *Horizons*, Vol. 3, No.10, 453–463, (DOI:10.20544/HORIZONS.B.03.1.16.P45) (ISSN 1857-9892).
87. Tica, S., Busarčević, D., Živanović, P., Bajčetić, S. (2013a). Systems Integration – The Basic Element for Development of Balanced Public Transport Systems. Trolleybus Conference – 19th Trolleybus Working Group meeting, 15th November 2013, Moscow, Russia, (on CD 8-13.pdf).
88. Tica, S., Filipović, S., Živanović, P., Bajčetić, S. (2011). Development of Trolleybus Passenger Transport Subsystems in Terms of Sustainable Development and Quality of Life in Cities. International Journal for Public Traffic and Transport Engineering – IJTTE, Vol. 1, No. 4, 196–205. (ISSN 2217-544X).
89. Tica, S., Živanović, P., Bajčetić, S., Đorojević, A., Milovanović, B. (2013b). Transport – Economic Model of Revenue Collection and Distribution in the System of Public Urban and Suburban Passenger Transport in Subotica. LTA–UITP Singapore International Transport Congress and Exhibition – SITCE – People-Centred Mobility for Liveable Cities, Singapore, 7th to 10th October 2013, Session 3 – Public Transport Management.
90. Tica, S., Živanović, P., Bajčetić, S., Gavrilović, S., Filipović, S. (2012a). Organization and Management of Complex Interoperable Tariff and Fare Collection Systems – Example of the City of Belgrade (Proceedings Paper). Proceedings of International Conference on Traffic and Transport Engineering (ICTTE), 259–269.
91. Tica, S., Živanović, P., Bajčetić, S., Milovanović, B., Đorojević, A. (2012b). Kombinovana mobilnost: Sinergija podsistema javnog masovnog i fleksibilnog

- gradskog transporta putnika. X međunarodno savetovanje o tehnikama regulisanja saobraćaja – TES 2012, Subotica, maj 2012, 149–152.
92. Tica, S., Živanović, P., Bajčetić, S., Milovanović, B., Nađ, A. (2016b). Network Design and Planning: Success Factors for High Quality Public Transport (Proceedings Paper). Proceedings of the Third International Conference on Traffic and Transport Engineering (ICTTE), 793–799.
 93. Transportation Research Board (1996). Integration of Light Rail Transit into City Streets, Report 17. Washington D.C.
 94. Turnquist, M. A., Bowman, L. A. (1980). The Effects of Network Structure on Reliability of Transit Service. Transportation Research Part B, Vol. 14, 79–86.
 95. Van Oort, N. (2011). Service Reliability and Urban Public Transport Design. Doktorska disertacija. Delft University of Technology.
 96. Victoria Transport Policy Institute (2009). Transportation Cost and Benefit Analysis Techniques, Estimates and Implications – Second Edition.
 97. Vissat, L. L., Clark, A., Gilmore, S. (2015). Finding Optimal Timetables for Edinburgh Bus Routes. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Vol. 310, 179–199.
 98. Vreeker, R., Nijkamp, P. (2005). Multicriteria Evaluation of Transport Policies. U: K. J. Button, D. A. Hensher (ur.). Handbook of Transport Strategy, Policy and Institutions, 507–526. Elsevier Oxford, UK.
 99. Vuchic, V. R. (1999). Transportation for Livable Cities. Centre for Urban Policy Research, New Brunswick – New Jersey:.
 100. Vuchic, V. R. (2005). Urban Transit, Operations, Planning and Economics. John Wiley and Sons, 30 Inc, New Jersey.
 101. Wardman, M. (2004). Public Transport Values of Time. Transport Policy, Vol. 11, No. 4, 363–377.
 102. Welding, P. I. (1957). The Instability of a Close-interval Service. Operational Research Quarterly, Vol. 8, No. 3, 133–142.
 103. Wirasinghe, S.C., Liu, G. (1995). Optimal Schedule Design for a Transit Route with One Intermediate Time Point. Transportation Planning and Technology, Vol. 19, 121–145.

104. World Commission on Environment and Development (1987). Our Common Future. Oxford University press, Oxford, UK.
105. Živanović, P., Tica, S., Milovanović, B., Bajčetić, S., Nađ, A. (2017). The Research on the Potential Aerial Tramway Users' Attitudes, Opinions and Requirements – Example: Belgrade, Serbia. Technical Gazette, Vol. 24, Suppl. 2, 477–484.
106. Živanović, P., Tica, S., Bajčetić, S., Milovanović, B., Nađ, A. (2017). Moving Revenue Risk to Operators in Gross Cost Contracts – Case Study: Niš, Serbia. International Journal of Transport Economics, (ISSN 0391-8440) – prihvaćeno za štampu 3. decembra 2017.
107. Ефремов, И. С., Кобозев, В. М., Юдин, В. А. (1980). Теория городских пассажирских перевозок, Высшая школа, Москва.

8. PRILOZI

PRILOG A

Istraživanje karakteristika strukture linija – SNIMAČKI OBRAZAC



Broj i naziv linije:

Smer:

Datum:

B R	Tip prolazne tačke		Naziv*	Skretanje**	Prvenstvo za JGTP		Broj saob. traka			Tip trase			Traka za JGTP		Ulično parkiranje		Tip i položaj stajališta			Broj mesta	Način ulaska/izlaska	Broj linija						
	Stajalište	Raskrsnica			Levo	Desno	Pravo	A	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci			Nezavisan	BUS	TROLEJBUS	TRAMVAJ			
1.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz***	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
2.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
3.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
4.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
5.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
6.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
7.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
8.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
9.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
10.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
11.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
12.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
13.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
14.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
15.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
16.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										
17.	Stajalište	Raskrsnica		Levo	Da	Ne							Da	Ne	Da	Ne	Iza R (PP)	Između R (PP)	U krajnjoj traci		Nezavisan	BUS						
	Pešački prelaz	Signalisana raskrsnica	Desno	B3													B4	B5	Ispred R (PP)					U niši	U središnjoj traci	Zavisan	TROLEJBUS	TRAMVAJ
			Pravo	C1													C2	C3										

* Za raskrsnice napisati nazive ulica koje se ukrštaju, za stajalište naziv stajališta iz Daljinara. ** Samo za raskrsnice. *** Pešački prelaz pisati samo u slučaju da nije na raskrsnici.

PRILOG B

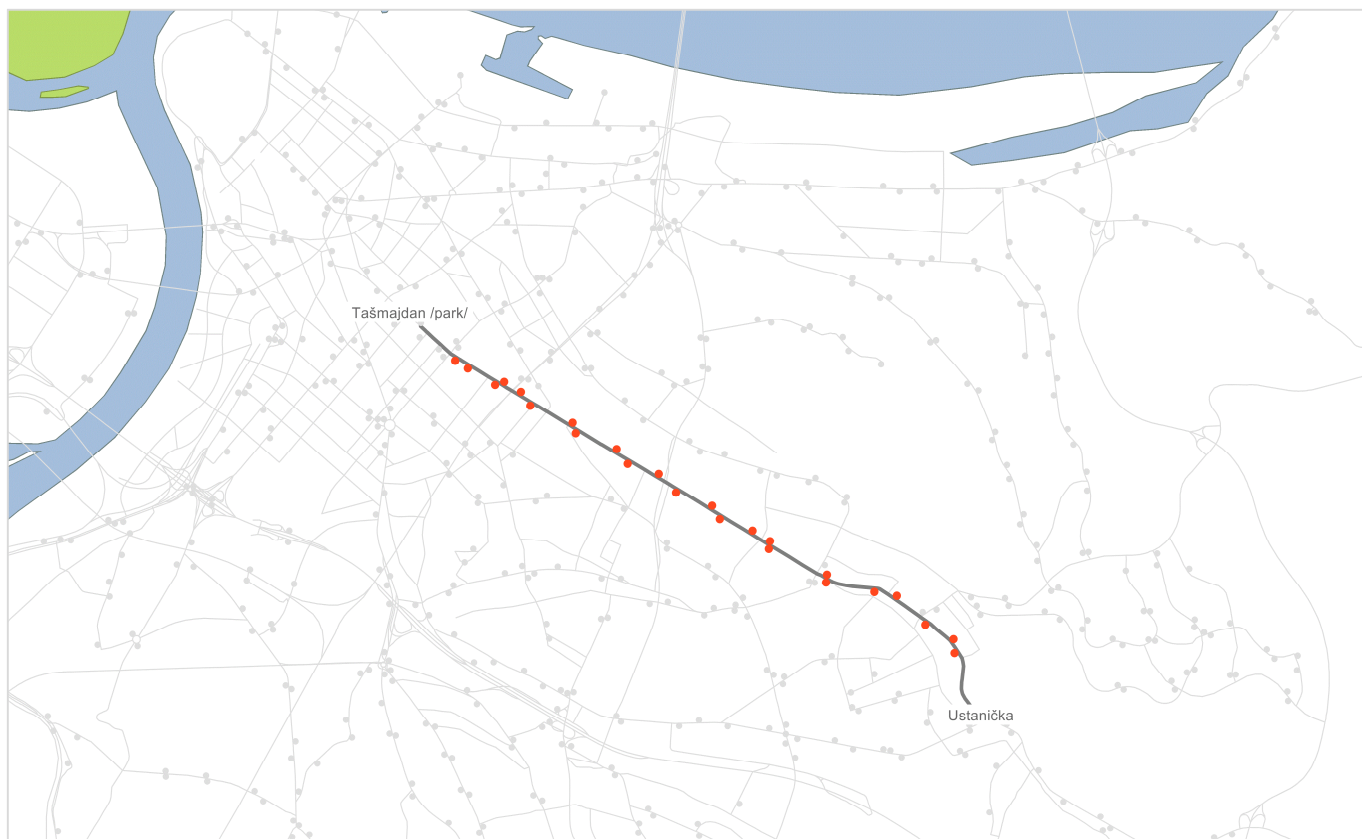
Statičke i dinamičke karakteristike (linijski pasoš) reprezentativnih linija

Tabela A. Osnovne statičke karakteristike linije – Daljinar linije 6

6		TAŠMAJDAN /PARK/ - USTANIČKA					
SMER A				SMER B			
TAŠMAJDAN - Bulevar kralja Aleksandra - USTANIČKA				USTANIČKA - Bulevar kralja Aleksandra - TAŠMAJDAN			
Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$	Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$
84	TAŠMAJDAN /PARK/	0	0	107	USTANIČKA	55	0
66	Pravni fakultet	577	577	105	Koste Trifkovića	677	677
86	Vukov spomenik /Bul.kralja Aleksa./	596	1.173	103	Mite Ružića	231	908
87	GO Zvezdara	375	1.548	101	dr Velizara Kosanovića	256	1.164
89	Pijaca "Đeram"	426	1.974	99	Pijaca "Zvezdara"	527	1.691
92	Pop Stojanova	400	2.374	97	Batutova	610	2.301
94	Lion	360	2.734	95	Lion	335	2.636
96	Batutova	406	3.140	93	Pop Stojanova	436	3.072
98	Pijaca "Zvezdara"	470	3.610	90	Pijaca "Đeram"	346	3.418
100	dr Velizara Kosanovića	330	3.940	88	GO Zvezdara	363	3.781
102	Mite Ružića	447	4.387	108	Vukov spomenik /Bul.kralja Aleksa./	423	4.204
104	Koste Trifkovića	293	4.680	109	Pravni fakultet	629	4.833
106	USTANIČKA	442	5.122	84	TAŠMAJDAN /PARK/	376	5.209
UKUPNO STAJALIŠTA		13		UKUPNO STAJALIŠTA		13	
PROSEČNO MEĐUSTANIČNO RASTOJANJE :		430 m					
DUŽINA OKRETNICE :		TAŠMAJDAN :		USTANIČKA :		0 m	
						55 m	
SREDNJA DUŽINA LINIJE SA OKRETNICAMA :		5.193 m					
NAPOMENA :							

Tabela B. Osnovne dinamičke karakteristike linije 6

OZNAKA	PERIODI STACIONARNOSTI			
	I	II	III	IV
	06:00	09:00	13:00	17:00	20:00
T₁ [min]	28	28	28	28
T₂ [min]	28	28	28	28
N [vozila]	3	2	3	2
Tip vozila	tramvaj/ multiplicirani tramvaj	tramvaj	tramvaj/ multiplicirani tramvaj	tramvaj
m [mesta/vozilu]	194/388	194	194/388	194/388
i [min]	18,7	28	18,7	28
f [vozila/čas]	3,21	2,14	3,21	2,14
C [mesta/čas]	830,32	415,16	830,32	415,16



Slika A. Trasa linije 6

Tabela A. Osnovne statičke karakteristike linije – Daljinar linije 16

16		KARABURMA 2 - NOVI BEOGRAD /POHORSKA/					
SMER A				SMER B			
KARABURMA 2 - Salvadora Aljendea - Marijane Gregoran - Vojvode Micka Krstića - Višnjička - Bulevar despota Stefana - Braće Jugovića - Dečanska - Terazijski tunel - Zeleni venac - Brankova - Brankov most - Bulevar Mihaila Pupina - Goce Delčeva - Luja Adamića - Sremskih odreda - NOVI BEOGRAD /POHORSKA/				NOVI BEOGRAD /POHORSKA/ - Goce Delčeva - Bulevar Mihaila Pupina - Brankov most - Brankova - Zeleni venac - Terazijski tunel - Dečanska - Braće Jugovića - Bulevar despota Stefana - Višnjička - Vojvode Micka Krstića - Marijane Gregoran - Salvadora Aljendea - KARABURMA 2			
Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$	Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$
334	KARABURMA 2	0	0	378	NOVI BEOGRAD /POHORSKA/	73	0
335	Salvadora Aljendea	414	414	374	Goce Delčeva	618	618
337	Husinjskih rudara	510	924	372	Arhiv	317	935
339	Stevana Hristića	317	1.241	370	GO Novi Beograd	417	1.352
341	Diljska	277	1.518	369	Blok 30	429	1.781
343	Patrisa Lumumbe	378	1.896	367	Španskih boraca	468	2.249
346	Vuka Vrčevića	920	2.816	365	Palata "SRBIJA"	493	2.742
348	Pančevački most	648	3.464	363	Šest kaplara	736	3.478
350	Ustanova kulture "Palilula"	294	3.758	298	Brankov most	1.212	4.690
352	Jovana Avakumovića	436	4.194	360	Zeleni venac	337	5.027
353	Cvijićeva	283	4.477	358	Dom omladine	567	5.594
355	Džordža Vašingtona	476	4.953	356	Džordža Vašingtona	733	6.327
357	Skadarska	534	5.487	354	Cvijićeva	635	6.962
359	Zeleni venac	736	6.223	351	Ustanova kulture "Palilula"	507	7.469
361	Brankov most	415	6.638	349	Pančevački most	430	7.899
362	Šest kaplara	1.492	8.130	347	Vuka Vrčevića	705	8.604
364	Palata "SRBIJA"	384	8.514	345	Vojvode Micka Krstića	511	9.115
366	Španskih boraca	617	9.131	344	Patrisa Lumumbe	350	9.465
368	Blok 30	620	9.751	342	Diljska	470	9.935
371	Arhiv	435	10.186	340	Stevana Hristića	200	10.135
373	Goce Delčeva	448	10.634	338	Husinjskih rudara	374	10.509
377	NOVI BEOGRAD /POHORSKA/	635	11.269	336	Salvadora Aljendea	409	10.918
				334	KARABURMA 2	370	11.288
UKUPNO STAJALIŠTA		22		UKUPNO STAJALIŠTA		23	
PROSEČNO MEĐUSTANIČNO RASTOJANJE :		525 m					
DUŽINA OKRETNICE :		KARABURMA 2:		BEOGRAD :		0 m	
		NOVI BEOGRAD /POHORSKA/ :				73 m	
SREDNJA DUŽINA OKRETNICAMA :		LINIJE SA		11.315 m			
NAPOMENA :							

Tabela B. Osnovne dinamičke karakteristike linije 16

OZNAKA	PERIODI STACIONARNOSTI			
	I	II	III	IV
	06:00	09:00	13:00	17:00
T_1 [min]	45	42	45	42
T_2 [min]	45	42	45	42
N [vozila]	22	13	22	13
Tip vozila	zglobni autobus	zglobni autobus	zglobni autobus	zglobni autobus
m [mesta/vozilu]	160	160	160	160
i [min]	4,1	6,5	4,1	6,5
f [vozila/čas]	14,63	9,23	14,63	9,23
C [mesta/čas]	2340,8	1476,8	2340,8	1476,8



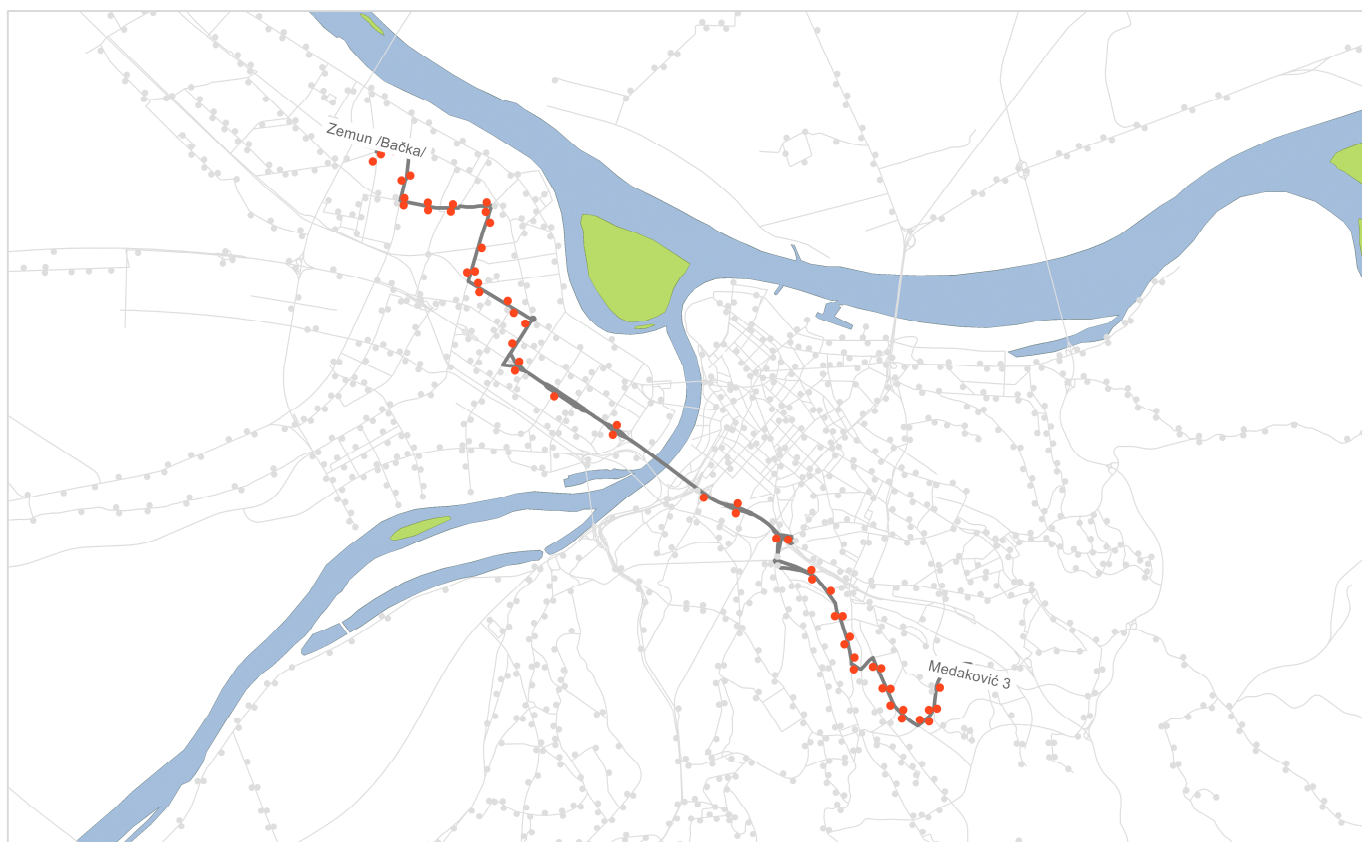
Slika A. Trasa linije 16

Tabela A. Osnovne statičke karakteristike linije – Daljinar linije 18

18		MEDAKOVIĆ 3 - ZEMUN /BAČKA/					
SMER A				SMER B			
MEDAKOVIĆ 3 - Svetozara Radojčića- Braće Jerkovića - Darwinova - Kumodraška - Tabanovačka - Trg oslobođenja - Bulevar oslobođenja - Bulevar Franše D'Eperea - Gazela - Bulevar Arsenija Čarnojevića - Omladinskih brigada - Pariske komune - Tošin bunar - Prilaz - Prvomajska - Rada Končara - Ugrinovačka - ZEMUN /BAČKA/				ZEMUN /BAČKA/ - Ugrinovačka - Rada Končara - Prvomajska - Prilaz - Tošin bunar - Pariske komune - Omladinskih brigada - Bulevar Arsenija Čarnojevića - Gazela - Bulevar Franše D' Eperea - Uzlazna rampa - Bulevar oslobođenja - Trg oslobođenja - Vojvode Stepe - Triše Kaclerovića - Kumodraška - Darwinova - Braće Jerkovića - Svetozara Radojčića - MEDAKOVIĆ 3			
Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$	Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$
265	MEDAKOVIĆ 3	97	0	1236	ZEMUN /BAČKA/	140	0
426	Vojislava Ilića	319	319	1223	Zadugarska	274	274
428	Zaplanjska	448	767	1964	Filipa Višnjića	232	506
430	Naselje Braće Jerković	434	1.201	813	Rada Končara /Dom zdravlja/	579	1.085
432	Braće Jerković /Mitrovo brdo/	371	1.572	322	Rada Končara	468	1.553
436	SC "Sport eko"	533	2.105	320	Bosanska	427	1.980
438	Jovana Bijelića	379	2.484	318	Zlatiborska	384	2.364
440	Meštovićeve	413	2.897	463	Prilaz	808	3.172
442	Darvinova	754	3.651	462	Paviljoni	615	3.787
444	Bjelovarska	365	4.016	460	Pariske komune	475	4.262
446	Vitanovačka	370	4.386	458	Goce Delčeva	402	4.664
448	Univerzitet Singidunum	479	4.865	456	Fontana	684	5.348
450	Prešernova	475	5.340	404	GO Novi Beograd	464	5.812
452	Trg oslobođenja	569	5.909	402	Bulevar Zorana Đinđića	372	6.184
391	Franše D'Eperea	790	6.699	400	Omladinskih brigada	610	6.794
393	Deligradska	1.034	7.733	331	Beogradska arena /španskih boraca/	757	7.551
395	Mostar	596	8.329	387	Beogradska arena /antifašističke borbe/	390	7.941
397	Sava centar	1.898	10.227	398	Sava centar	842	8.783
192	Beogradska arena /antifašističke borbe/	805	11.032	396	Mostar	1.897	10.680
237	Beogradska arena /španskih boraca/	391	11.423	394	Deligradska	598	11.278
399	Omladinskih brigada	814	12.237	392	Franše D'Eperea	862	12.140
401	Bulevar Zorana Đinđića	363	12.600	154	Trg oslobođenja	546	12.686
454	Ulaz u pariske komune	721	13.321	451	Prešernova	628	13.314
455	Fontana	407	13.728	449	Univerzitet Singidunum	389	13.703
457	Goce Delčeva	598	14.326	447	Vitanovačka	426	14.129
459	Pariske komune	344	14.670	445	Bjelovarska	505	14.634
461	Paviljoni	420	15.090	443	Darvinova	410	15.044
2262	Birotehnička škola	490	15.580	441	Meštovićeve	539	15.583
315	Prilaz	315	15.895	439	Jovana Bijelića	406	15.989
317	Zlatiborska	604	16.499	437	SC "Sport eko"	476	16.465
319	Bosanska	518	17.017	433	Braće Jerković /Mitrovo brdo/	560	17.025
814	OŠ "Petar Kočić"	458	17.475	431	Naselje Braće Jerković	314	17.339
812	Rada Končara /Dom zdravlja/	360	17.835	429	Zaplanjska	376	17.715
1963	Filipa Višnjića	516	18.351	427	Vojislava Ilića	493	18.208
1222	Zadugarska	297	18.648	264	MEDAKOVIĆ 3	302	18.510
1224	ZEMUN /BAČKA/	325	18.973				
UKUPNO STAJALIŠTA		36		UKUPNO STAJALIŠTA		35	
PROSEČNO RASTOJANJE :		MEDUSTANIČNO 543 m					
DUŽINA OKRETNICE :		MEDAKOVIĆ 3: 97 m					
		ZEMUN /BAČKA/ : 140 m					
SREDNJA DUŽINA LINIJE SA OKRETNICAMA :		18.860 m					
NAPOMENA :							

Tabela B. Osnovne dinamičke karakteristike linije 18

OZNAKA	PERIODI STACIONARNOSTI			
	I	II	III	IV
	06:00	09:00	13:00	17:00
T_1 [min]	61	62	61	62
T_2 [min]	57	57	61	62
N [vozila]	22	14	22	15
Tip vozila	zglobni autobus	zglobni autobus	zglobni autobus	zglobni autobus
m [mesta/vozilu]	160	160	160	160
i [min]	5,4	8,5	5,5	8,3
f [vozila/čas]	11,11	7,1	10,9	7,23
C [mesta/čas]	1777,6	1136	1744	1156,8



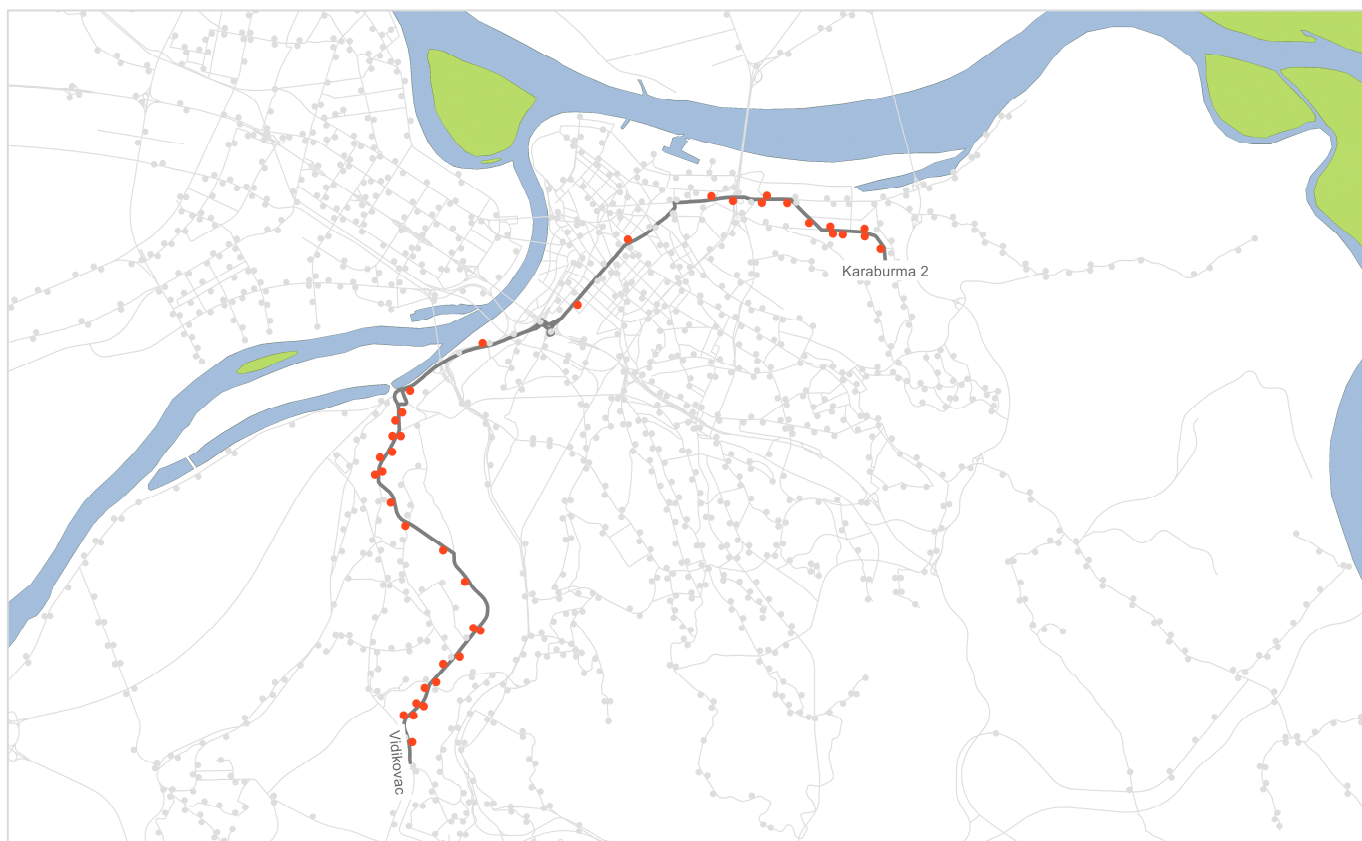
Slika A. Trasa linije 18

Tabela A. Osnovne statičke karakteristike linije – Daljinar linije 23

23		KARABURMA 2 - VIDIKOVAC					
SMER A				SMER B			
KARABURMA 2 - Salvadora Aljendea - Marijane Gregoran - Vojvode Micka Krstića - Višnjička - Bulevar despota Stefana - Cvijićeva - Takovska - Kneza Miloša - Mostar - Bulevar vojvode Mišića - Radnička - Vijadukt - Kirovljeva - Požeška - Blagoja Parovića - Kneza Višeslava - Patrijarha Joanikija - VIDIKOVAC				VIDIKOVAC - Patrijarha Joanikija - Kneza Višeslava - Blagoja Parovića - Požeška - Kirovljeva - Visoka - Paštrovićeva - Radnička - Bulevar vojvode Mišića - Mostar - Kneza Miloša - Takovska - Cvijićeva - Bulevar despota Stefana - Višnjička - Vojvode Micka Krstića - Marijane Gregoran - Salvadora Aljendea - KARABURMA 2			
Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm,s}} l_{sm,s}$	Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm,s}} l_{sm,s}$
490	KARABURMA 2	0	0	528	VIDIKOVAC	0	0
335	Salvadora Aljendea	344	344	527	Toplana	330	330
337	Husinjskih rudara	510	854	525	Vidikovački venac	564	894
339	Stevana Hristića	317	1.171	523	MZ "Vidikovac"	236	1.130
341	Diljska	277	1.448	521	Pilota Mihajla Petrovića	460	1.590
343	Patrisa Lumumbe	378	1.826	519	Ratka Mitrovića	598	2.188
346	Vuka Vrčevića	920	2.746	517	Miloja Zakića	304	2.492
348	Pančevački most	648	3.394	515	Skojevska	265	2.757
350	Ustanova kulture "Palilula"	294	3.688	513	Pionirski grad	1.050	3.807
352	Jovana Avakumovića	436	4.124	511	SC "Košutnjak"	613	4.420
492	Cvijićeva	424	4.548	509	Žarkovačka	780	5.200
240	"27. marta"	463	5.011	507	Petra Lekovića	547	5.747
266	Glavna pošta	377	5.388	186	Kijevska	573	6.320
268	Admirala Geprata	679	6.067	184	Dom zdravlja	374	6.694
271	Miloša Pocerca	635	6.702	182	Škola "Josif Pančić"	317	7.011
493	Mostar	765	7.467	505	Kirovljeva	400	7.411
495	Sajam	675	8.142	503	Ada Ciganlija	499	7.910
497	Ruska	473	8.615	498	Ruska	1.653	9.563
502	Ada Ciganlija	1.518	10.133	496	Sajam	338	9.901
504	Kirovljeva	697	10.830	494	Mostar	590	10.491
181	Škola "Josif Pančić"	275	11.105	272	Višegradska	982	11.473
183	Dom zdravlja	456	11.561	270	Birčaninova	516	11.989
185	Kijevska	266	11.827	269	London	419	12.408
506	Petra Lekovića	587	12.414	267	Glavna pošta	602	13.010
508	Žarkovačka	412	12.826	239	"27. marta"	431	13.441
510	SC "Košutnjak"	818	13.644	354	Cvijićeva	600	14.041
512	Pionirski grad	706	14.350	351	Ustanova kulture "Palilula"	507	14.548
514	Skojevska	1.044	15.394	349	Pančevački most	430	14.978
516	Miloja Zakića	205	15.599	347	Vuka Vrčevića	705	15.683
518	Ratka Mitrovića	293	15.892	345	Vojvode Micka Krstića	511	16.194
1028	Vojno medicinski centar	277	16.169	344	Patrisa Lumumbe	350	16.544
520	Pilota Mihajla Petrovića	513	16.682	342	Diljska	470	17.014
522	MZ "Vidikovac"	347	17.029	340	Stevana Hristića	200	17.214
524	Vidikovački venac	289	17.318	338	Husinjskih rudara	374	17.588
526	Toplana	526	17.844	336	Salvadora Aljendea	409	17.997
528	VIDIKOVAC	285	18.129	490	KARABURMA 2	440	18.437
UKUPNO STAJALIŠTA		36		UKUPNO STAJALIŠTA		36	
PROSEČNO MEĐUSTANIČNO RASTOJANJE :		522 m					
DUŽINA OKRETNICE :		KARABURMA 2:		VIDIKOVAC :		0 m	
						0 m	
SREDNJA DUŽINA LINIJE SA OKRETNICAMA :		18.283 m					
NAPOMENA :							

Tabela B. Osnovne dinamičke karakteristike linije 23

OZNAKA	PERIODI STACIONARNOSTI			
	I	II	III	IV
	06:00	09:00	13:00	17:00
T_1 [min]	69	67	70	68
T_2 [min]	69	65	70	68
N [vozila]	26	23	26	23
Tip vozila	zglobni autobus	zglobni autobus	zglobni autobus	zglobni autobus
m [mesta/vozilu]	160	160	160	160
i [min]	5,3	5,7	5,4	5,9
f [vozila/čas]	11,32	10,53	11,11	10,17
C [mesta/čas]	1811,2	1684,8	1777,6	1627,2



Slika A. Trasa linije 23

Tabela A. Osnovne statičke karakteristike linije – Daljinar linije 29

29		STUDENTSKI TRG - MEDAKOVIĆ 3					
SMER A				SMER B			
STUDENTSKI TRG - Vase Čarapića - Trg Republike - Kolarčeva - Terazije - Kralja Milana - Trg Slavija - Makenzijeva - Cara Nikolaja drugog - Mileševska - Žička - Vojislava Ilića - Svetozara Radojčića - MEDAKOVIĆ 3				MEDAKOVIĆ 3 - Svetozara Radojčića - Vojislava Ilića - Žička - Mileševska - Cara Nikolaja drugog - Makenzijeva - Trg Slavija - Kralja Milana - Terazije - Kolarčeva - Trg Republike - Vase Čarapića - STUDENTSKI TRG			
Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$	Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$
82	STUDENTSKI TRG	227	0	265	MEDAKOVIĆ 3	97	0
193	Trg Republike	182	182	263	Svetozara Radojčića	307	307
195	Terazije	587	769	261	Medaković 2	635	942
197	RK "Beogradanka"	642	1.411	259	Vladimira Tomanovića	720	1.662
199	Trg Slavija	564	1.975	218	Šumice	252	1.914
201	Katanićeva	670	2.645	216	Rimska	223	2.137
203	Mačvanska	266	2.911	214	Škola "Vojislav Ilić"	695	2.832
205	Vojvode Dragomira	407	3.318	212	Velimira Todorovića	318	3.150
207	Crveni krst	687	4.005	210	Bregalnička	330	3.480
209	Bregalnička	375	4.380	208	Crveni krst	501	3.981
211	Velimira Todorovića	391	4.771	206	Vojvode Dragomira	427	4.408
213	Škola "Vojislav Ilić"	303	5.074	202	Novopazarska	537	4.945
215	Rimska	540	5.614	204	Katanićeva	315	5.260
258	Šumice	456	6.070	200	Trg Slavija	584	5.844
260	Medaković 2	924	6.994	198	RK "Beogradanka"	458	6.302
262	Svetozara Radojčića	370	7.364	196	Terazije	708	7.010
264	MEDAKOVIĆ 3	559	7.923	194	Trg Republike	477	7.487
				650	STUDENTSKI TRG	329	7.816
UKUPNO STAJALIŠTA		17		UKUPNO STAJALIŠTA		18	
PROSEČNO RASTOJANJE :		MEĐUSTANIČNO		477 m			
DUŽINA OKRETNICE :		STUDENTSKI TRG:		227 m			
		MEDAKOVIĆ 3 :		97 m			
SREDNJA DUŽINA OKRETNICAMA :		LINIJE SA		8.032 m			
NAPOMENA :							

Tabela B. Osnovne dinamične karakteristike linije 29

OZNAKA	PERIODI STACIONARNOSTI			
	I	II	III	IV
	06:00	09:00	13:00	17:00
T_1 [min]	41	42	45	43
T_2 [min]	41	43	45	42
N [vozila]	24	15	24	15
Tip vozila	solo trolejbus/ zglobni trolejbus	solo trolejbus/ zglobni trolejbus	solo trolejbus/ zglobni trolejbus	solo trolejbus/ zglobni trolejbus
m [mesta/vozilu]	110/160	110/160	110/160	110/160
i [min]	3,4	5,7	3,75	5,7
f [vozila/čas]	17,65	10,53	16	10,53
C [mesta/čas]	2147	1194	1946	1194



Slika A. Trasa linije 29

Tabela A. Osnovne statičke karakteristike linije – Daljinar linije 31

31		STUDENTSKI TRG – KONJARNIK					
SMER A				SMER B			
STUDENTSKI TRG - Vase Čarapića - Trg Republike - Kolarčeva - Terazije - Kralja Milana - Trg Slavija - Bulevar oslobođenja - Ustanička - KONJARNIK				KONJARNIK - Ustanička - Bulevar oslobođenja - Trg Slavija - Kralja Milana - Terazije - Kolarčeva - Trg Republike - Vase Čarapića - STUDENTSKI TRG			
Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$	Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$
82	STUDENTSKI TRG	227	0	781	KONJARNIK	291	0
193	Trg Republike	182	182	220	Petrinjska	454	454
195	Terazije	587	769	380	Šumice	460	914
197	RK "Beogradanka"	642	1.411	381	Hotel "Srbija"	507	1.421
1691	Trg Slavija	555	1.966	383	Grčića Milenka	585	2.006
148	Karadordev park	640	2.606	643	Dušanovac /pošta/	439	2.445
390	Južni bulevar	814	3.420	642	GO Voždovac	292	2.737
389	Stratimirovićeva	512	3.932	641	Stratimirovićeva	556	3.293
386	Dušanovac /pošta/	545	4.477	640	Južni bulevar	272	3.565
384	Grčića Milenka	606	5.083	639	Franše D'Eperea	336	3.901
653	Dom zdravlja "Voždovac"	408	5.491	149	Karadordev park	657	4.558
382	Hotel "Srbija"	347	5.838	200	Trg Slavija	611	5.169
217	Šumice	480	6.318	198	RK "Beogradanka"	458	5.627
219	Petrinjska	374	6.692	196	Terazije	708	6.335
221	KONJARNIK	368	7.060	194	Trg Republike	477	6.812
				650	STUDENTSKI TRG	329	7.141
UKUPNO STAJALIŠTA		15		UKUPNO STAJALIŠTA		16	
PROSEČNO RASTOJANJE :		MEĐUSTANIČNO		490 m			
DUŽINA OKRETNICE :		STUDENTSKI TRG:		: 227 m			
		KONJARNIK:		: 291 m			
SREDNJA DUŽINA OKRETNICAMA :		LINIJE SA		7.360 m			
NAPOMENA :							

Tabela B. Osnovne dinamične karakteristike linije 31

OZNAKA	PERIODI STACIONARNOSTI			
	I	II	III	IV
	06:00	09:00	13:00	17:00
T_1 [min]	35	35	40	36
T_2 [min]	35	35	40	36
N [vozila]	17	11	17	11
Tip vozila	zglobni autobus	zglobni autobus	zglobni autobus	zglobni autobus
m [mesta/vozilu]	160	160	160	160
i [min]	4,1	6,4	4,7	6,5
f [vozila/čas]	14,63	9,38	12,77	9,23
C [mesta/čas]	2336	1500,8	2043,2	1476,8



Slika A. Trasa linije 31

Tabela A. Osnovne statičke karakteristike linije – Daljinar linije 43

43		TRG REPUBLIKE - KOTEŽ					
SMER A				SMER B			
TRG REPUBLIKE - Bulevar despota Stefana - Pančevački most - Zrenjaninski put - Put za Kotež - Jovana Isailovića - Hrvatska - Olge Jovičić - KOTEŽ				KOTEŽ - Olge Jovičić - Branka Miljkovića - dr Dragiše Mišovića - Jovana Isailovića - Put za Kotež - Zrenjaninski put - Pančevački most - Bulevar despota Stefana - Braće Jugovića - Makedonska - Trg Republike - Francuska - TRG REPUBLIKE			
Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$	Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$
546	TRG REPUBLIKE	0	0	1717	KOTEŽ	0	0
356	Džordža Vašingtona	641	641	1719	Milana Zečara	518	518
354	Cvijičeva	635	1.276	1720	Augusta Šenoe	480	998
351	Ustanova kulture "Palilula"	507	1.783	1722	Put za Kotež	577	1.575
349	Pančevački most	430	2.213	1906	Blok "Sutjeska"	731	2.306
769	MZ "Krnjača"	2.824	5.037	765	Partizanski blok	428	2.734
768	Blok "Branko Momirov"	377	5.414	767	Blok "Branko Momirov"	608	3.342
766	Partizanski blok	695	6.109	348	Pančevački most	2.480	5.822
764	Blok "Sutjeska"	497	6.606	350	Ustanova kulture "Palilula"	294	6.116
1723	Put za Kotež	610	7.216	352	Jovana Avakumovića	436	6.552
1721	Augusta Šenoe	708	7.924	353	Cvijičeva	283	6.835
1937	Slavka Kolara	300	8.224	355	Džordža Vašingtona	476	7.311
1717	KOTEŽ	261	8.485	546	TRG REPUBLIKE	1.032	8.343
UKUPNO STAJALIŠTA		13		UKUPNO STAJALIŠTA		13	
PROSEČNO RASTOJANJE :		MEĐUSTANIČNO		701 m			
DUŽINA OKRETNICE :		TRG REPUBLIKE:		0 m			
		KOTEŽ:		0 m			
SREDNJA DUŽINA OKRETNICAMA :		LINIJE SA		8.414 m			
NAPOMENA :							

Tabela B. Osnovne dinamične karakteristike linije 43

OZNAKA	PERIODI STACIONARNOSTI			
	I	II	III	IV
	06:00	09:00	13:00	17:00
T_1 [min]	30	30	30	30
T_2 [min]	30	30	30	30
N [vozila]	8	7	8	7
Tip vozila	solo autobus/ zglobni autobu	solo autobus/ zglobni autobu	solo autobus/ zglobni autobu	solo autobus/ zglobni autobu
m [mesta/vozilu]	110/160	110/160	110/160	110/160
i [min]	7,5	8,6	7,5	8,6
f [vozila/čas]	8	6,98	8	6,98
C [mesta/čas]	1080	967,4	1080	967,4



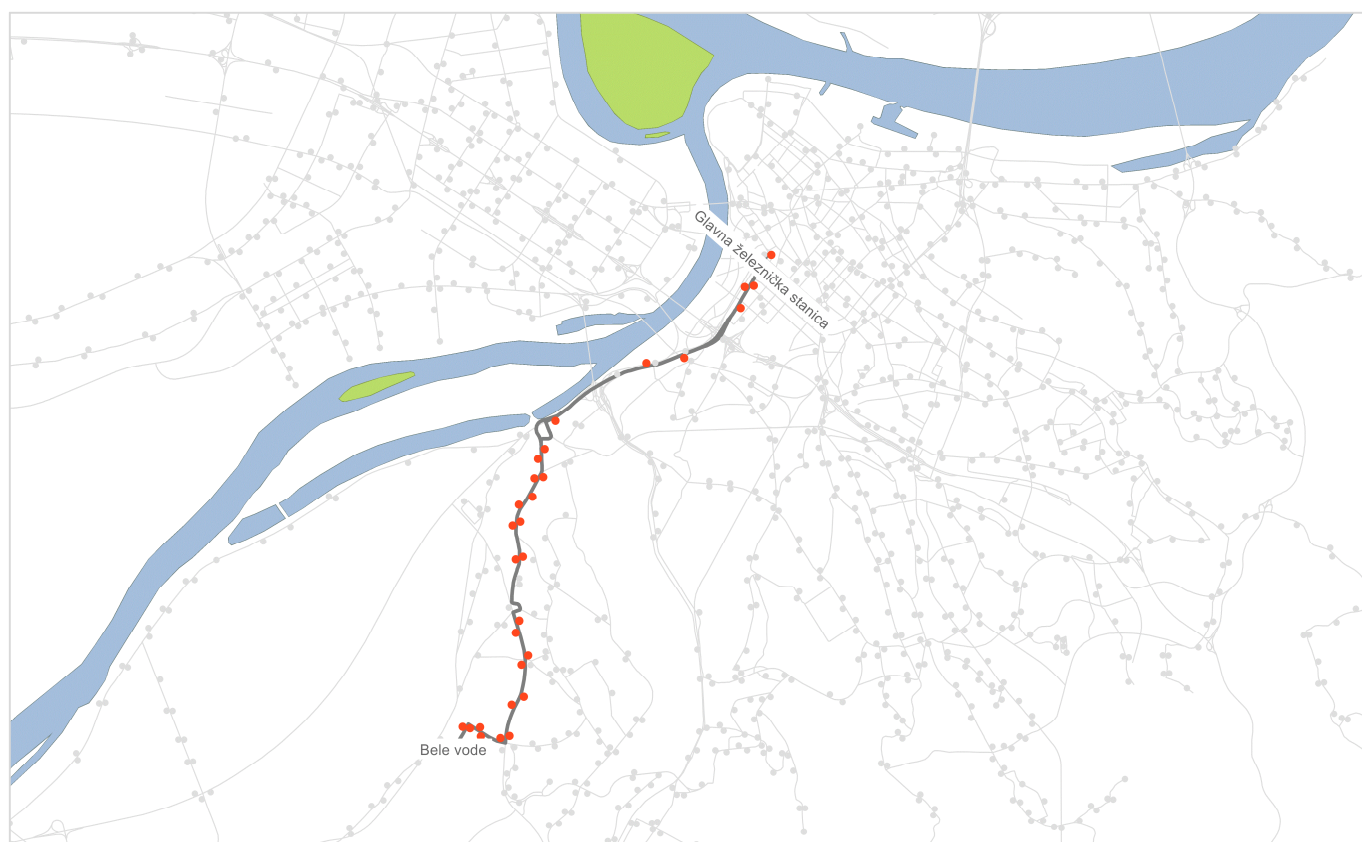
Slika A. Trasa linije 43

Tabela A. Osnovne statičke karakteristike linije – Daljinar linije 51

51 GLAVNA ŽELEZNIČKA STANICA - BELE VODE							
SMER A				SMER B			
GLAVNA ŽELEZNIČKA STANICA - Savska - Mostar - Bulevar vojvode Mišića - Radnička - Vijadukt - Kirovljeva - Požeška - Đorđa Ognjanovića - Trgovačka - Ibarska magistrala - Belo vrelo - Palisadska - BELE VODE				BELE VODE - Palisadska - Belo vrelo - Ibarska magistrala - Trgovačka - Đorđa Ognjanovića - Požeška - Kirovljeva - Visoka Paštrovićeva - Radnička - Bulevar Vojvode Mišića - Mostar - Savska - Savski trg - GLAVNA ŽELEZNIČKA STANICA			
Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$	Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$
1726	GLAVNA ŽELEZNIČKA STANICA	290	0	924	BELE VODE	232	0
706	Palata pravde	420	420	922	Belo vrelo	293	293
495	Sajam	1.429	1.849	920	Crveno barjače	259	552
497	Ruska	473	2.322	918	Zdravka Jovanovića	230	782
502	Ada Ciganlija	1.518	3.840	1010	Jablanička	205	987
504	Kirovljeva	697	4.537	916	Braće Vučković	408	1.395
181	Škola "Josif Pančić"	275	4.812	725	Žarkovo /spomenik/	770	2.165
183	Dom zdravlja	456	5.268	723	Julino brdo	431	2.596
185	Kijevska	266	5.534	188	Trebevička	912	3.508
187	Trebevička	456	5.990	186	Kijevska	503	4.011
722	Julino brdo	1.025	7.015	184	Dom zdravlja	374	4.385
914	Žarkovo /spomenik/	478	7.493	182	Škola "Josif Pančić"	317	4.702
915	Braće Vučković	586	8.079	505	Kirovljeva	400	5.102
917	Zdravka Jovanovića	587	8.666	503	Ada Ciganlija	499	5.601
919	Crveno barjače	330	8.996	498	Ruska	1.653	7.254
921	Belo vrelo	220	9.216	496	Sajam	338	7.592
923	BELE VODE	202	9.418	2498	Durmitorska	1.094	8.686
				2496	Palata pravde	305	8.991
				822	GLAVNA ŽELEZNIČKA STANICA	474	9.465
UKUPNO STAJALIŠTA		17		UKUPNO STAJALIŠTA		19	
PROSEČNO RASTOJANJE :		MEĐUSTANIČNO		555 m			
DUŽINA OKRETNICE :		GLAVNA ŽELEZNIČKA STANICA:		290 m			
		BELE VODE:		232 m			
SREDNJA DUŽINA OKRETNICAMA :		LINIJE SA		9.702 m			
NAPOMENA :							

Tabela B. Osnovne dinamičke karakteristike linije 51

OZNAKA	PERIODI STACIONARNOSTI			
	I	II	III	IV
	06:00	09:00	13:00	17:00
T_1 [min]	36	36	36	36
T_2 [min]	40	40	40	40
N [vozila]	8	8	8	8
Tip vozila	solo autobus	solo autobus	solo autobus	solo autobus
m [mesta/vozilu]	110	110	110	110
i [min]	9,5	9,5	9,5	9,5
f [vozila/čas]	6,32	6,32	6,32	6,32
C [mesta/čas]	695,2	695,2	695,2	695,2



Slika A. Trasa linije 51

Tabela A. Osnovne statičke karakteristike linije – Daljinar linije 53

53		ZELENI VENAC - VIDIKOVAC					
SMER A				SMER B			
ZELENI VENAC - Jug Bogdanova - Kraljice Natalije - Kneza Miloša - Mostar - Bulevar vojvode Mišića - Radnička - Vijadukt - Kirovljeva - Požeška - Blagoja Parovića - Kneza Višeslava - Patrijarha Joanikija - VIDIKOVAC				VIDIKOVAC - Patrijarha Joanikija - Kneza Višeslava - Blagoja Parovića - Požeška - Kirovljeva - Visoka - Paštrovićeva - Radnička - Bulevar vojvode Mišića - Mostar - Drinska - Sarajevska - Hajduk Veljkov venac - Balkanska - Gavriela Principa - Jug Bogdanova - ZELENI VENAC			
Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$	Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$
933	ZELENI VENAC	92	0	937	VIDIKOVAC	0	0
1730	Vaznesenjska crkva	789	789	527	Toplana	353	353
271	Miloša Pocerca	818	1.607	525	Vidikovački venac	564	917
493	Mostar	765	2.372	523	MZ "Vidikovac"	236	1.153
495	Sajam	675	3.047	521	Pilota Mihajla Petrovića	460	1.613
497	Ruska	473	3.520	519	Ratka Mitrovića	598	2.211
502	Ada Ciganlija	1.518	5.038	517	Miloja Zakića	304	2.515
504	Kirovljeva	697	5.735	515	Skojevska	265	2.780
181	Škola "Josif Pančić"	275	6.010	513	Pionirski grad	1.050	3.830
183	Dom zdravlja	456	6.466	511	SC "Košutnjak"	613	4.443
185	Kijevska	266	6.732	509	Žarkovačka	780	5.223
506	Petra Lekovića	587	7.319	507	Petra Lekovića	547	5.770
508	Žarkovačka	412	7.731	186	Kijevska	573	6.343
510	SC "Košutnjak"	818	8.549	184	Dom zdravlja	374	6.717
512	Pionirski grad	706	9.255	182	Škola "Josif Pančić"	317	7.034
514	Skojevska	1.044	10.299	505	Kirovljeva	400	7.434
516	Miloja Zakića	205	10.504	503	Ada Ciganlija	499	7.933
518	Ratka Mitrovića	293	10.797	498	Ruska	1.653	9.586
1028	Vojno medicinski centar	277	11.074	496	Sajam	338	9.924
520	Pilota Mihajla Petrovića	513	11.587	913	Drinska	911	10.835
522	MZ "Vidikovac"	347	11.934	936	Miloša Pocerca	434	11.269
524	Vidikovački venac	289	12.223	912	Nemanjina	569	11.838
526	Toplana	526	12.749	2248	Kamenička	493	12.331
937	VIDIKOVAC	262	13.011	934	ZELENI VENAC	542	12.873
UKUPNO STAJALIŠTA		24		UKUPNO STAJALIŠTA		24	
PROSEČNO MEĐUSTANIČNO RASTOJANJE :		551 m					
DUŽINA OKRETNICE :		ZELENI VENAC:		: 92 m			
		VIDIKOVAC:		: 0 m			
SREDNJA DUŽINA OKRETNICAMA :		LINIJE SA		12.988 m			
NAPOMENA :							

Tabela B. Osnovne dinamičke karakteristike linije 53

OZNAKA	PERIODI STACIONARNOSTI			
	I	II	III	IV
	06:00	09:00	13:00	17:00
T_1 [min]	42	42	50	50
T_2 [min]	50	45	50	50
N [vozila]	13	10	13	10
Tip vozila	solo autobus	solo autobus	solo autobus	solo autobus
m [mesta/vozilu]	110	110	110	110
i [min]	7,1	8,7	7,7	10
f [vozila/čas]	8,45	6,90	7,79	6
C [mesta/čas]	929,5	759	856,9	660



Slika A. Trasa linije 53

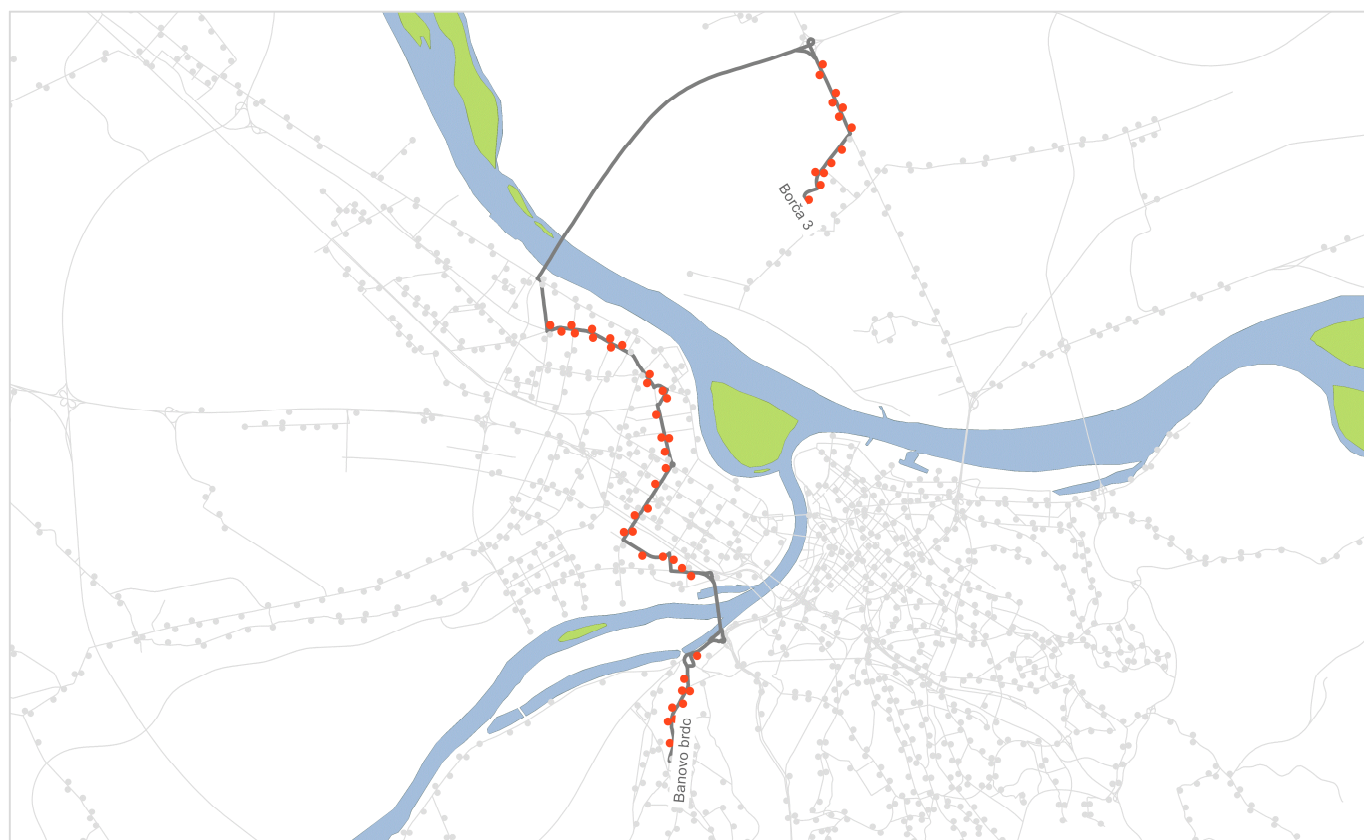
Tabela A. Osnovne statičke karakteristike linije – Daljinar linije 85

85		BANOVO BRDO – NOVI BEOGRAD /POHORSKA/					
SMER A				SMER B			
BANOVO BRDO - Požeška - Kirovljeva - Visoka - Paštovićeva - Radnička - Most na Adi – Antifašističke borbe - Bulevar Milutina Milankovića – Ušće – Bulevar Nikole Tesle - Bulevar Mihaila Pupina - Goce Delčeva - Luja Adamića - Sremskih odreda - NOVI BEOGRAD /POHORSKA/				NOVI BEOGRAD /POHORSKA/ - Goce Delčeva - Bulevar Mihaila Pupina - Bulevar Nikole Tesle - Ušće – Milentija Popovića - Bulevar Milutina Milankovića – Antifašističke borbe - Most na Adi - Radnička - Vijadukt - Kirovljeva - Požeška - BANOVO BRDO			
Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$	Šifra	Naziv stajališta	$l_{sm,s}$ [m]	$\sum_{s=1}^{n_{sm}-1} l_{sm,s}$
2129	Banovo brdo	0	0	2803	Borča 3	0	
188	Trebevička	327	327	1239	Bele Bartoka	617	617
186	Kijevska	503	830	1241	Kombinatova	363	980
184	Dom zdravlja	374	1.204	1278	Save Mrkalja	391	1.371
182	Škola Josif Pančić	317	1.521	1276	Drinske divizije	240	1.611
505	Kirovljeva	400	1.921	1280	Bratstva i jedinstva	476	2.087
503	Ada Ciganlija	499	2.420	2156	Pretok	450	2.537
1261	Blok 42	2.993	5.413	2210	Mali zbeg	340	2.877
2671	Bulevar Crvene Armije	444	5.857	2212	Groblje Zbeg	380	3.257
2202	Depo Sava	278	6.135	2523	Banatska	9.417	12.674
2204	Garaža Novi Beograd	454	6.589	2521	Bačka	948	13.622
798	Erport siti	706	7.295	1223	Zadruškarska	274	13.896
800	Milutina Milankovića	584	7.879	811	Filipa Višnjija	315	14.211
401	Bulevar Zorana Đinđića	522	8.401	809	Branka Pešića	403	14.614
403	GO Novi Beograd	442	8.843	807	Stadion Zemun	356	14.970
371	Arhiv	281	9.124	2507	Novogradska	423	15.393
373	Bulevar maršala Tolbuhina	448	9.572	314	KBC Zemun	734	16.127
405	Džona Kenedija	543	10.115	312	Aleksandra Dubčeka	288	16.415
407	Prve pruge - Retenzija	402	10.517	406	Džona Kenedija	760	17.175
1741	Aleksandra Dubčeka	273	10.790	374	Bulevar maršala Tolbuhina	493	17.668
313	KBC Zemun	446	11.236	372	Arhiv	317	17.985
2506	Novogradska	606	11.842	404	GO Novi Beograd	481	18.466
804	Ugrinovačka	243	12.085	402	Bulevar Zorana Đinđića	372	18.838
806	Stadion Zemun	296	12.381	801	Milutina Milankovića	551	19.389
808	Branka Pešića	422	12.803	799	Erport siti	651	20.040
810	Filipa Višnjija	322	13.125	1986	Garaža Novi Beograd	689	20.729
1222	Zadruškarska	427	13.552	2672	Bulevar Crvene Armije	772	21.501
2520	Bačka	313	13.865	1062	Blok 42	562	22.063
2522	Banatska	870	14.735	502	Ada Ciganlija	2.290	24.353
2213	Groblje Zbeg	8.490	23.225	504	Kirovljeva	697	25.050
2211	Mali zbeg	850	24.075	181	Škola Josif Pančić	275	25.325
2157	Pretok	350	24.425	183	Dom zdravlja	456	25.781
1203	Zrenjaninski put	673	25.098	185	Kijevska	266	26.047
1275	Drinske divizije	160	25.258	187	Trebevička	456	26.503
1277	Save Mrkalja	250	25.508	2129	Banovo brdo	460	26.963
1242	Kombinatova	294	25.802				
1240	Bele Bartoka	378	26.180				
2803	Borča 3	431	26.611				
UKUPNO STAJALIŠTA		38		UKUPNO STAJALIŠTA		35	
PROSEČNO RASTOJANJE :		MEĐUSTANIČNO		607 m			
DUŽINA OKRETNICE :		BANOVO BRDO:		0 m			
		NOVI BEOGRAD /POHORSKA/:		73 m			

SREDNJA DUŽINA LINIJE SA OKRETNICAMA :	11.268 m
NAPOMENA :	

Tabela B. Osnovne dinamičke karakteristike linije 85

OZNAKA	PERIODI STACIONARNOSTI			
	I	II	III	IV
	06:00	09:00	13:00	17:00
T_1 [min]	74	72	77	72
T_2 [min]	72	72	77	72
N [vozila]	11	9	11	8
Tip vozila	zglobni autobus	zglobni autobus	zglobni autobus	zglobni autobus
m [mesta/vozilu]	160	160	160	160
i [min]	13,3	16	14	18
f [vozila/čas]	4,5	3,75	4,29	3,33
C [mesta/čas]	720	600	686,4	532,8

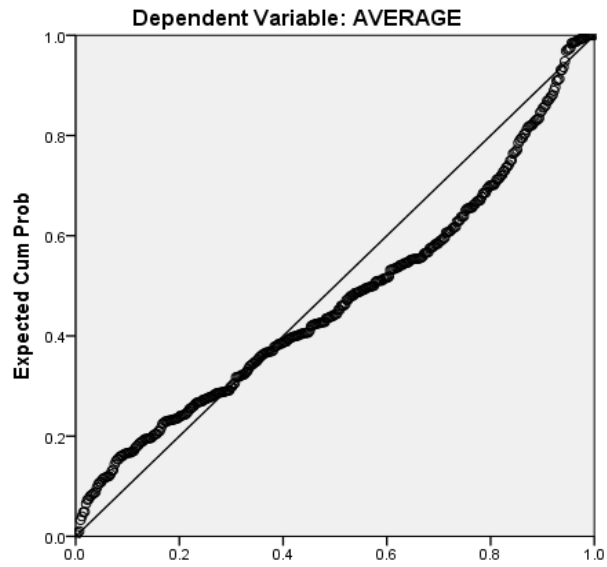


Slika A. Trasa linije 85

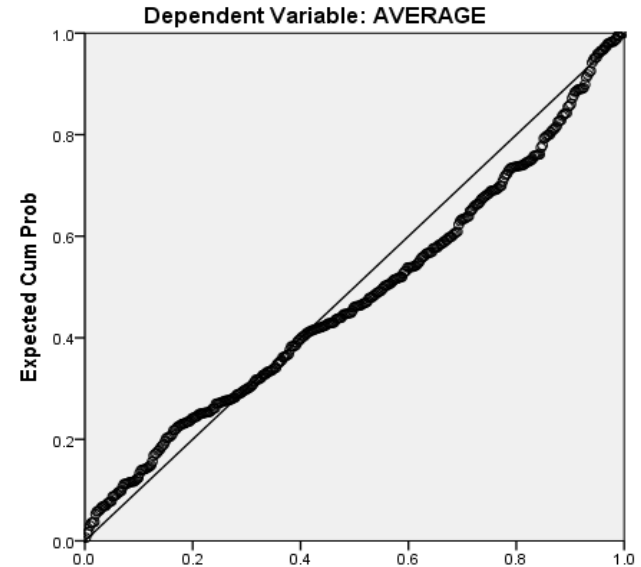
PRILOG C

Normal – P – P (Normal Probability Plot)
dijagrami rasturanja standardizovanog reziduala

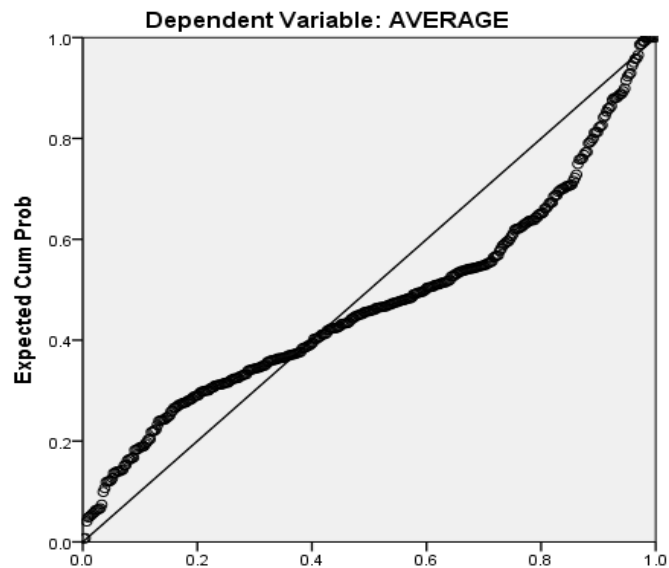
DIJAGRAMI RASTURANJA STANDARDIZOVANOG REZIDUALA ZA SREDNJU VREDNOST VREMENA VOŽNJE



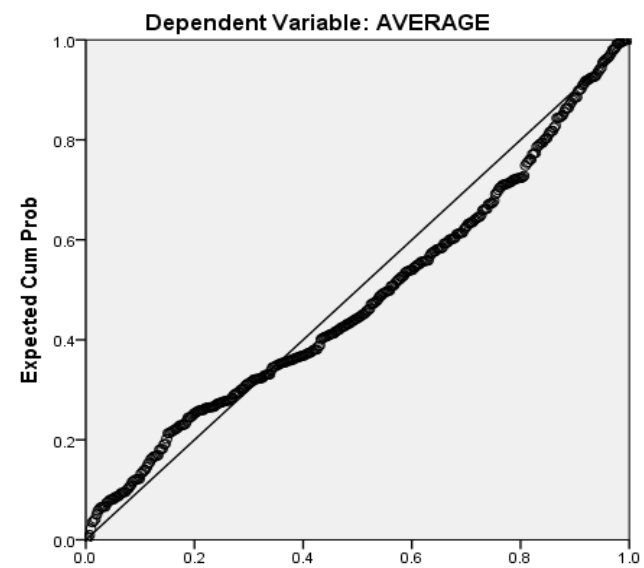
jutarnji vršni period - JV



jutarnji vanvršni period - JVV

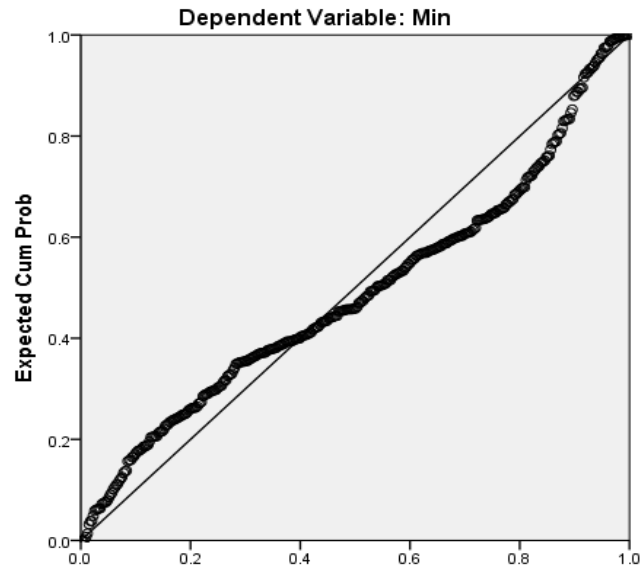


popodnevni vršni period - PV

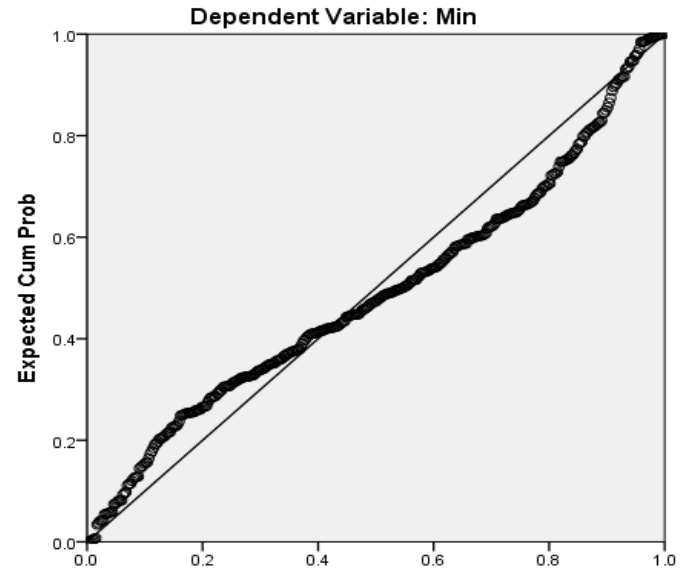


popodnevni vanvršni period - PVV

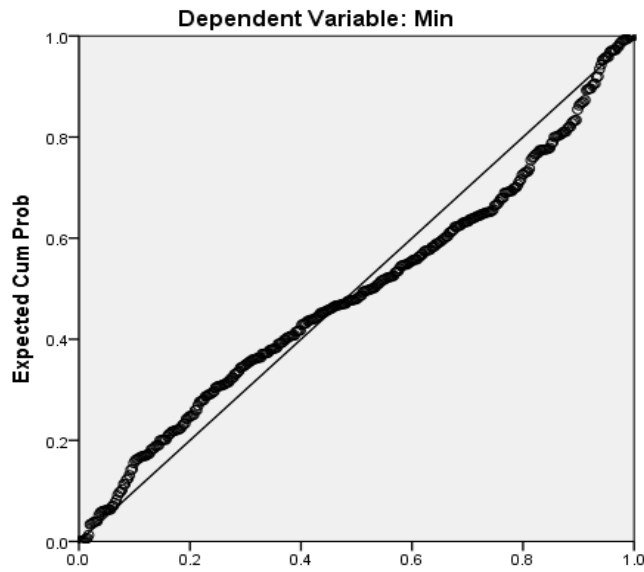
DIJAGRAMI RASTURANJA STANDARDIZOVANOG REZIDUALA ZA MINIMALNO VREME VOŽNJE



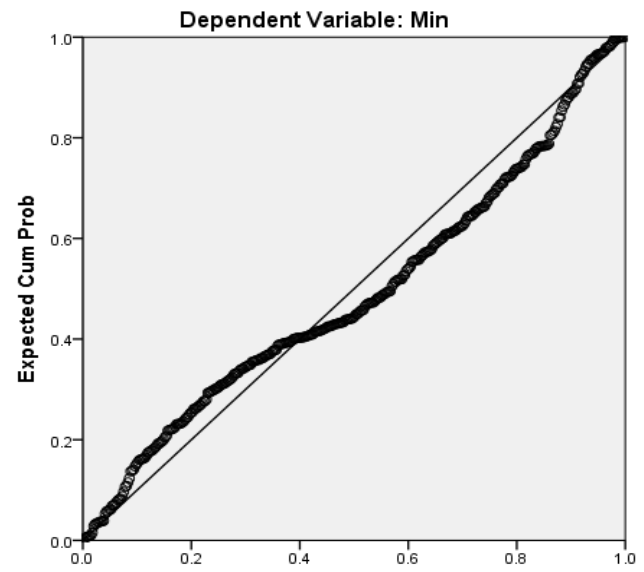
jutarnji vršni period - JV



jutarnji vanvršni period - JVV

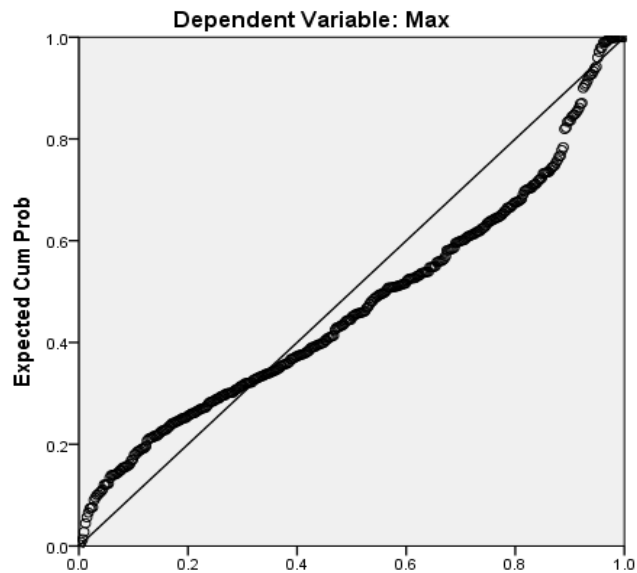


popodnevni vršni period - PV

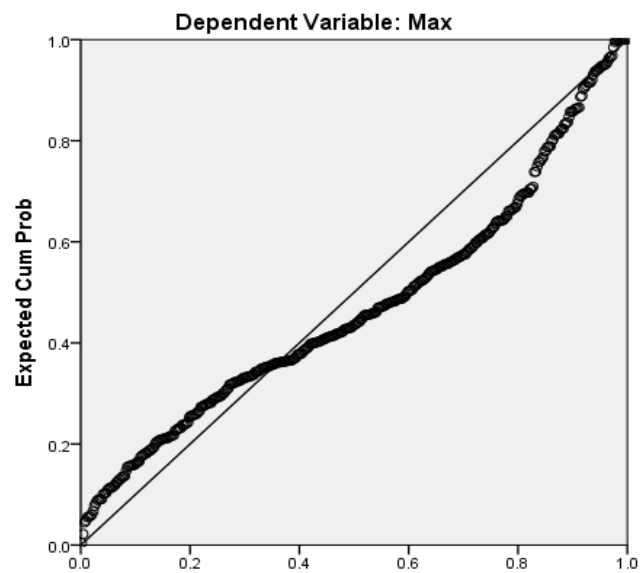


popodnevni vanvršni period - PVV

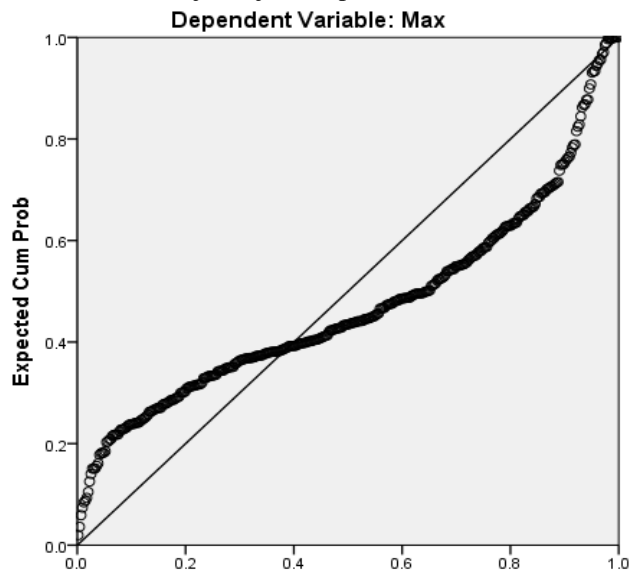
DIJAGRAMI RASTURANJA STANDARDIZOVANOG REZIDUALA ZA MAKSYMALNO VREME VOŽNJE



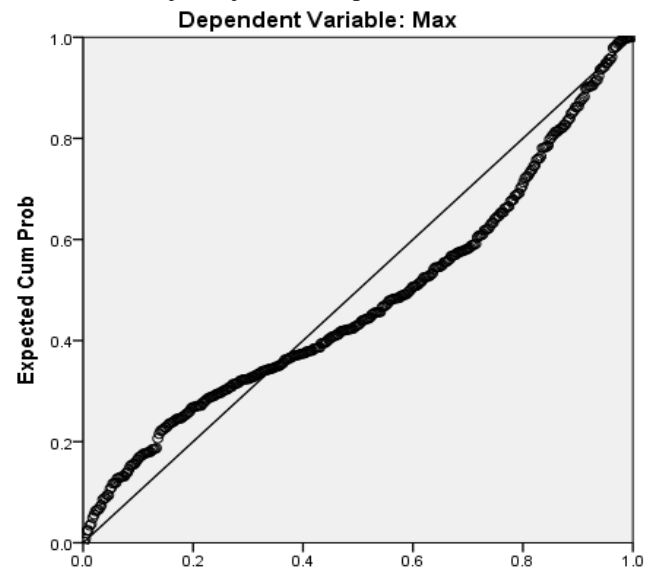
jutarnji vršni period - JV



jutarnji vanvršni period - JVV

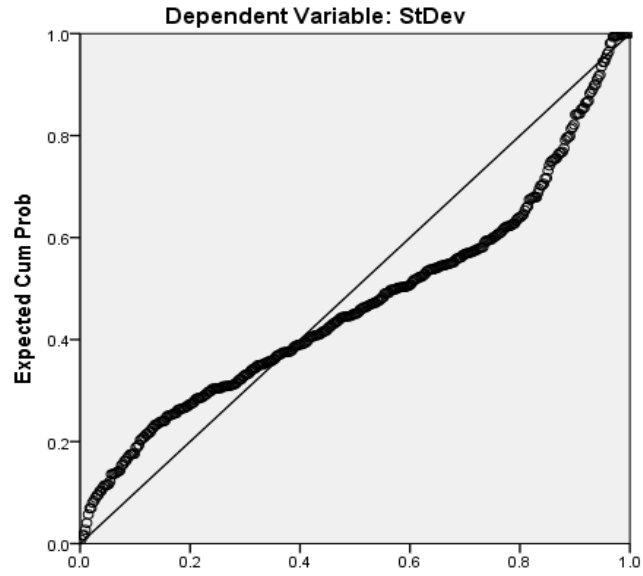


popodnevni vršni period - PV

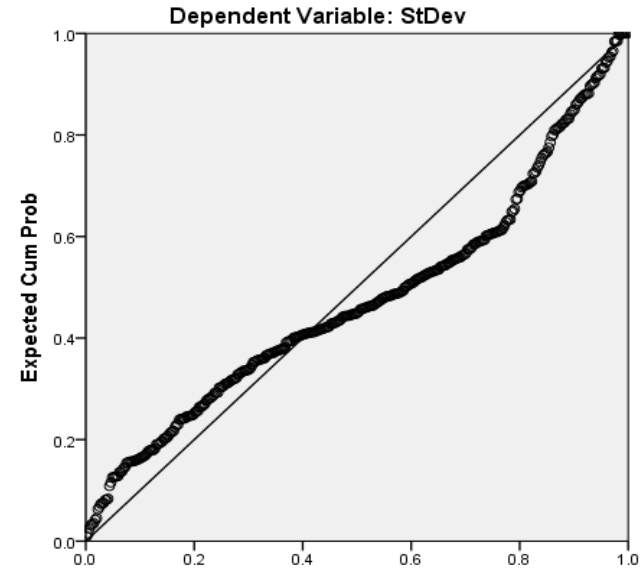


popodnevni vanvršni period - PVV

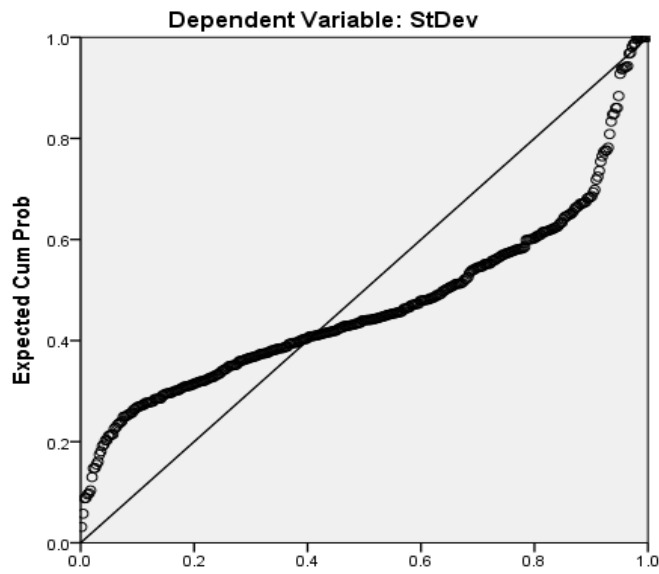
DIJAGRAMI RASTURANJA STANDARDIZOVANOG REZIDUALA ZA STANDARDNO ODSTUPANJE VREMENA VOŽNJE



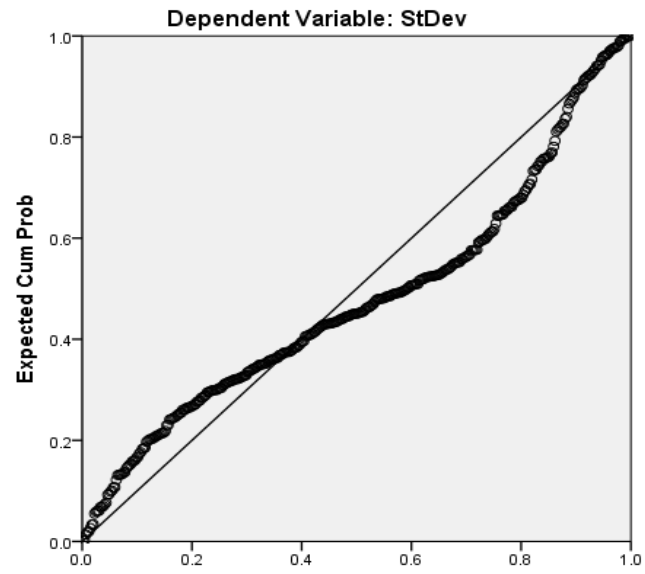
jutarnji vršni period - JV



jutarnji vanvršni period - JVV

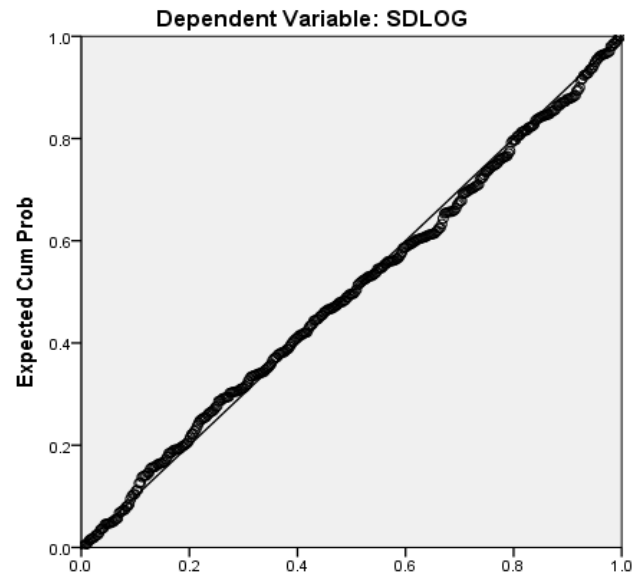


popodnevni vršni period - PV

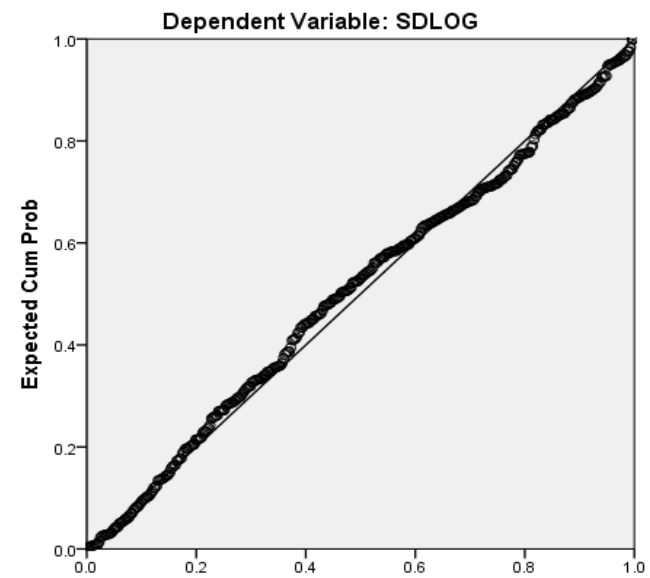


popodnevni vanvršni period - PVV

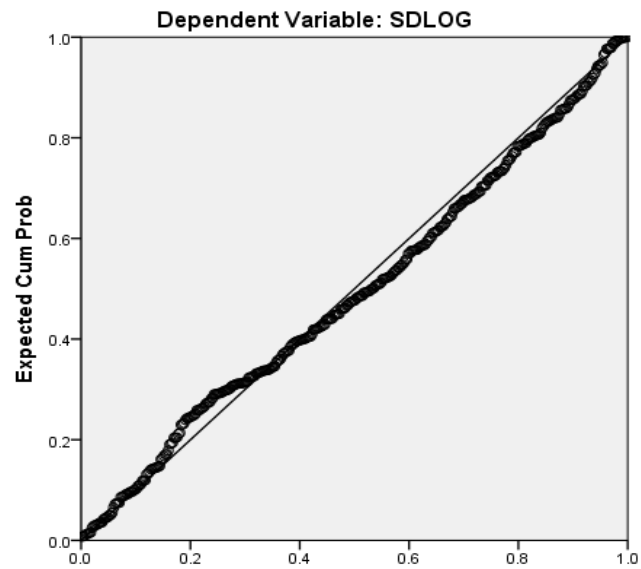
DIJAGRAMI RASTURANJA STANDARDIZOVANOG REZIDUALA ZA TRANSFORMISANO STANDARDNO ODSTUPANJE



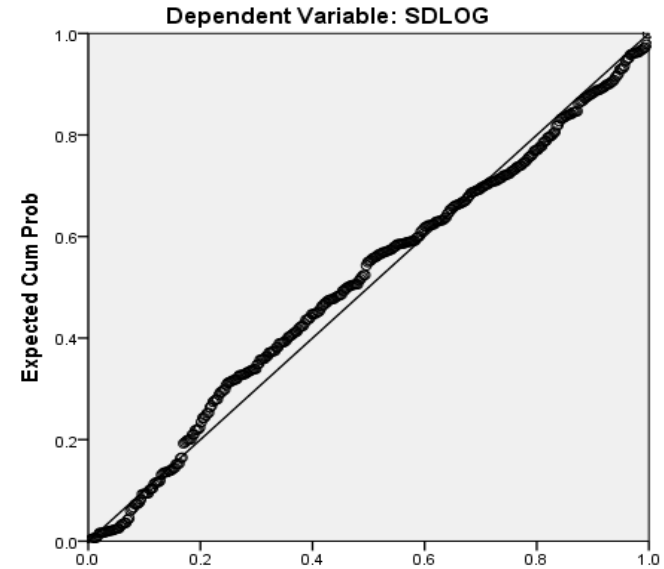
jutarnji vršni period - JV



jutarnji vanvršni period - JVV



popodnevni vršni period - PV

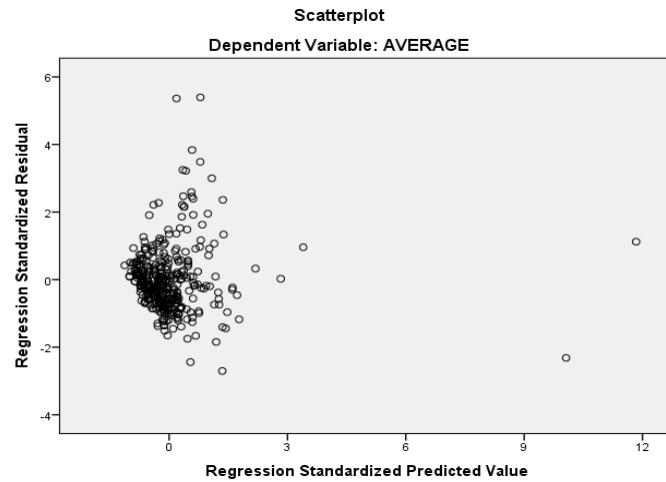


popodnevni vanvršni period - PVV

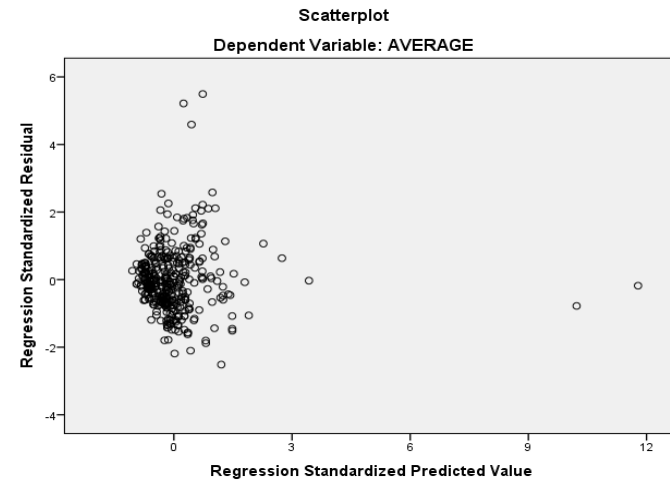
PRILOG D

Scatterplot dijagrami rasturanja standardizovanog reziduala

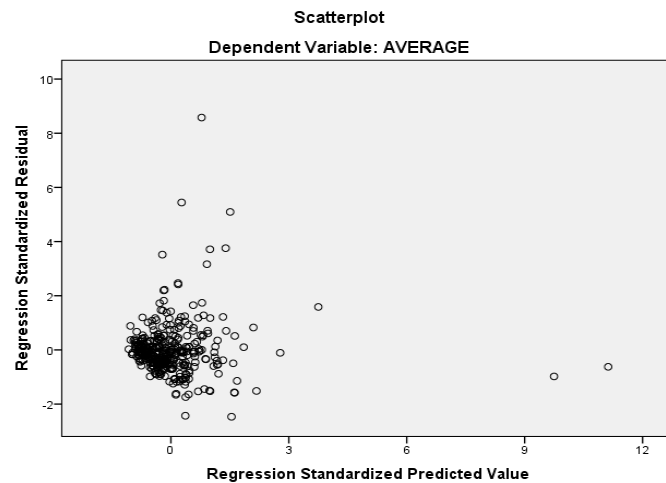
DIJAGRAMI RASTURANJA STANDARDIZOVANOG REZIDUALA ZA SREDNJU VREDNOST VREMENA VOŽNJE



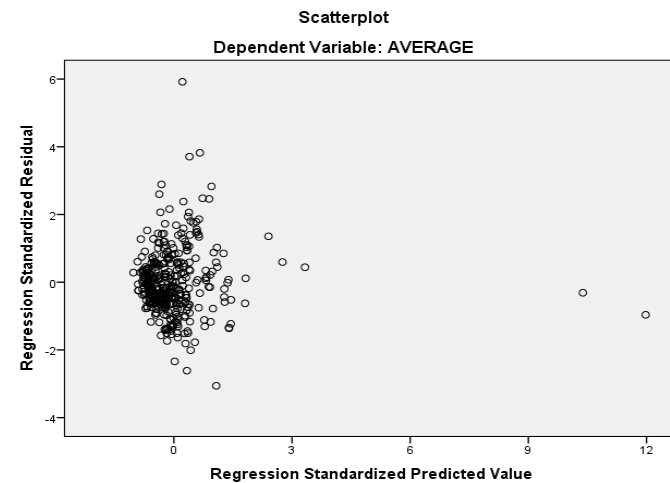
jutarnji vršni period - JV



jutarnji vanvršni period - JVV

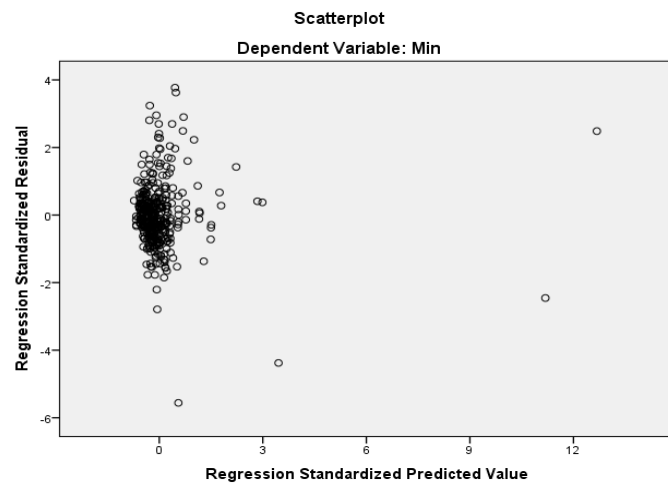


popodnevni vršni period - PV

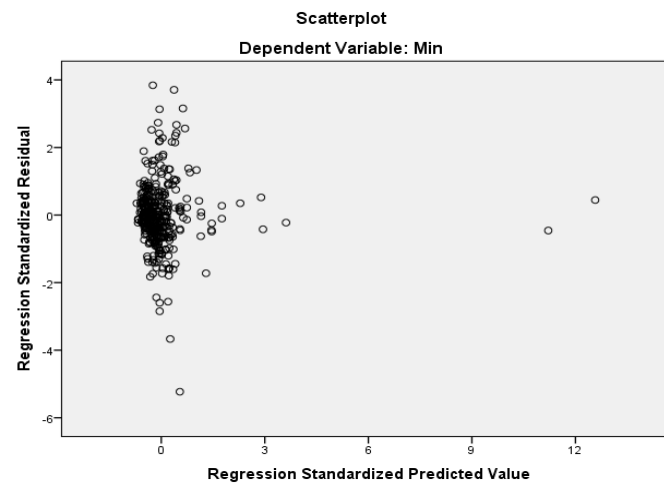


popodnevni vanvršni period - PVV

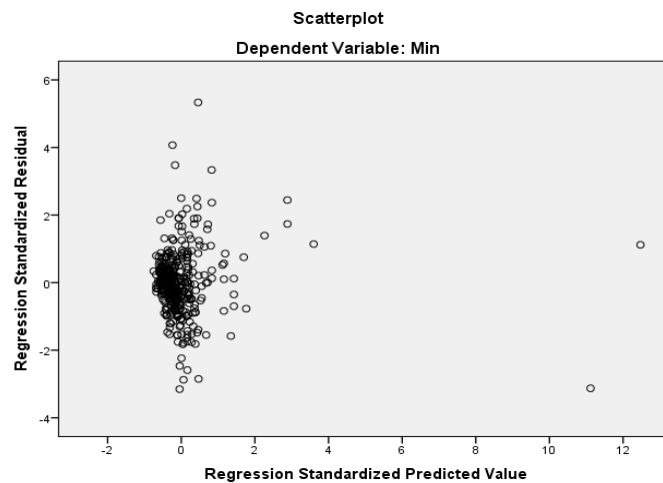
DIJAGRAMI RASTURANJA STANDARDIZOVANOG REZIDUALA ZA MINIMALNO VREME VOŽNJE



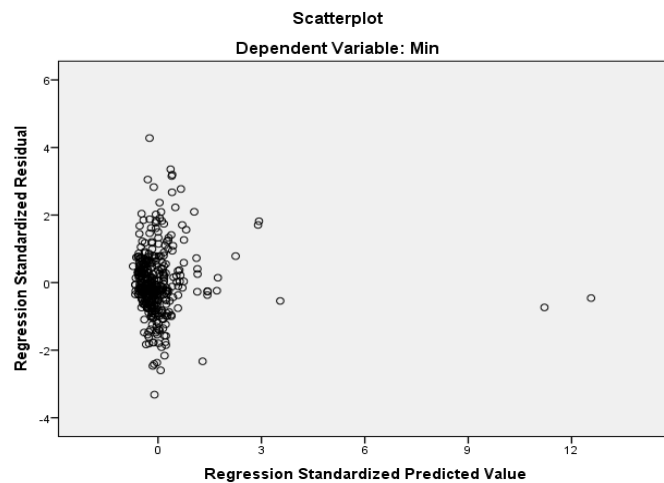
jutarnji vršni period - JV



jutarnji vanvršni period - JVV

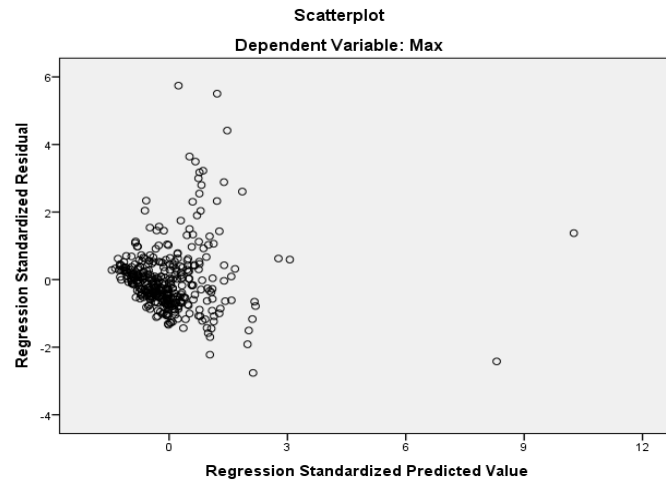


popodnevni vršni period - PV

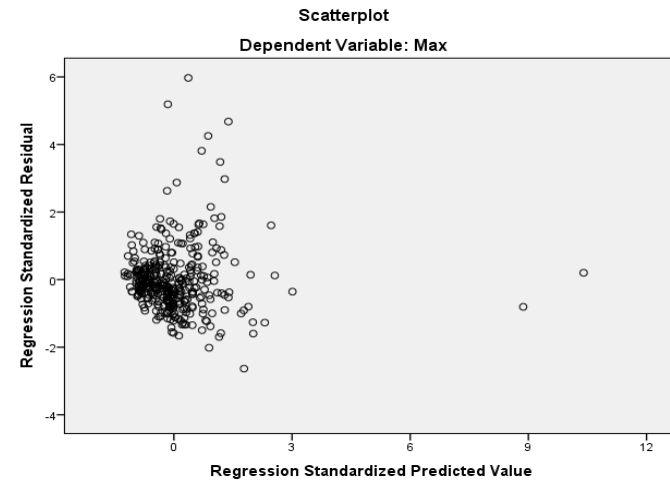


popodnevni vanvršni period - PVV

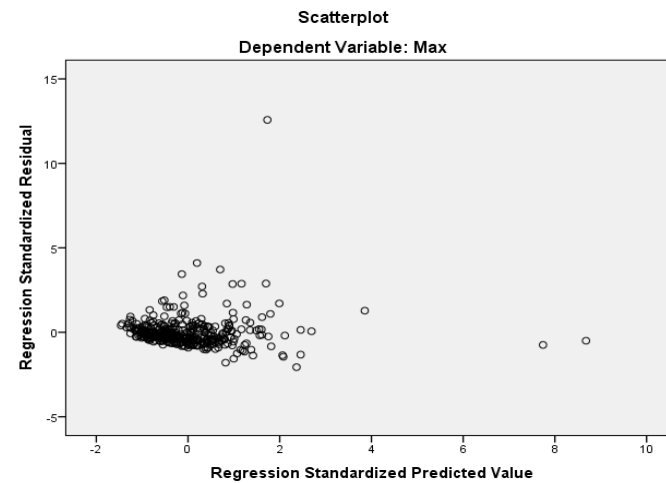
DIJAGRAMI RASTURANJA STANDARDIZOVANOG REZIDUALA ZA MAKSIMALNO VREME VOŽNJE



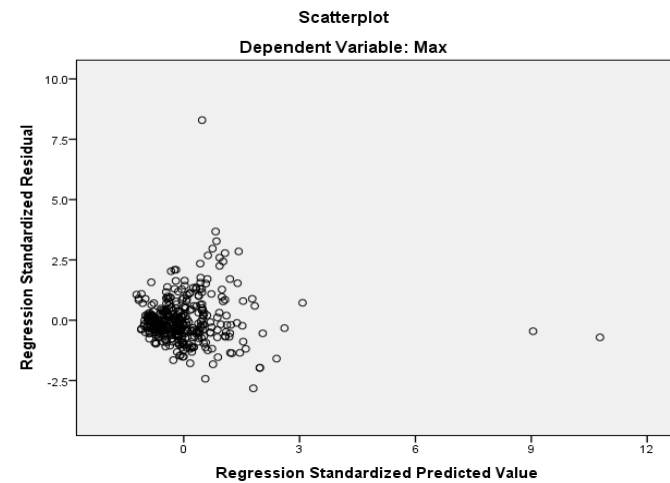
jutarnji vršni period - JV



jutarnji vanvršni period - JVV

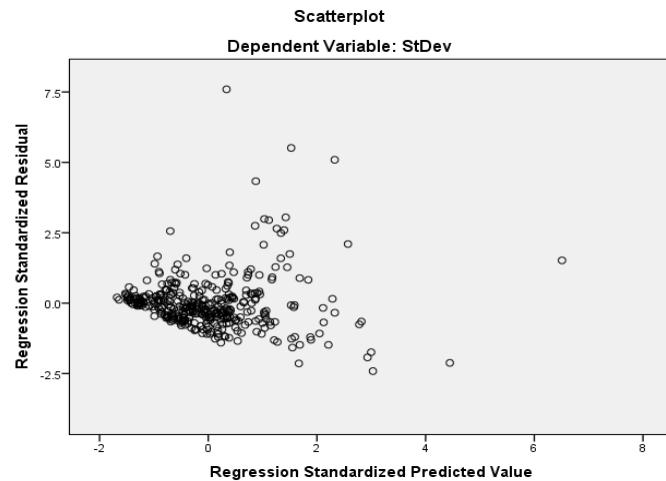


popodnevni vršni period - PV

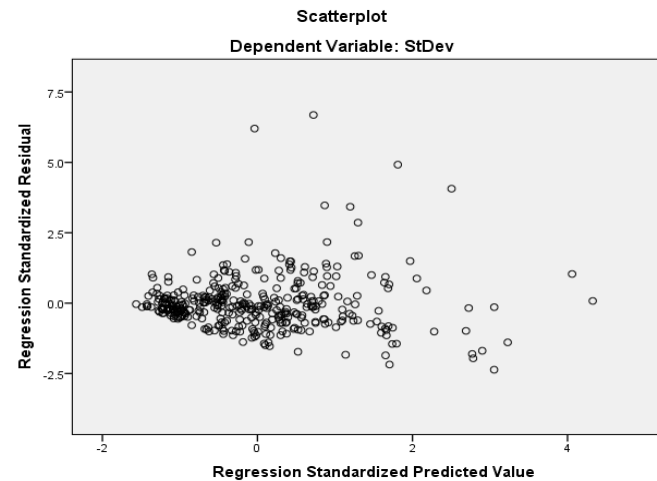


popodnevni vanvršni period - PVV

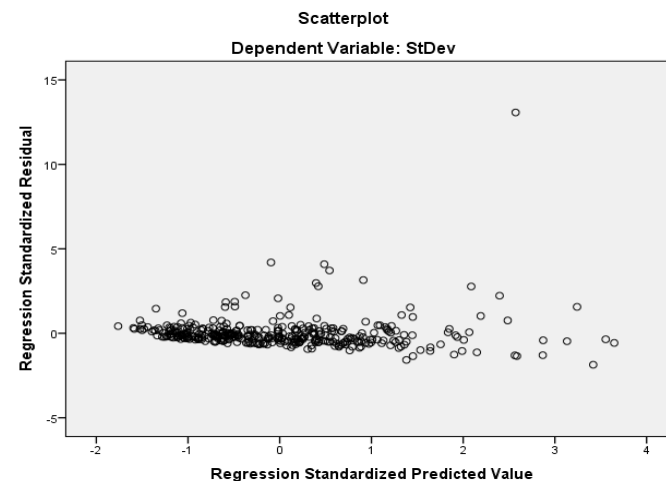
DIJAGRAMI RASTURANJA STANDARDIZOVANOG REZIDUALA ZA STANDARDNO ODSTUPANJE VREMENA VOŽNJE



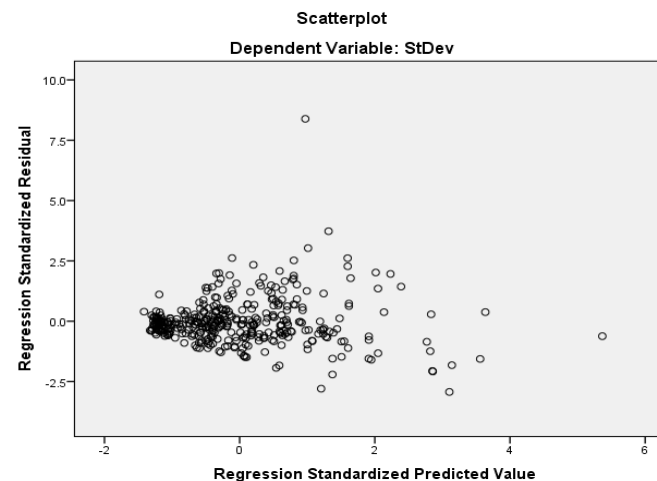
jutarnji vršni period - JV



jutarnji vanvršni period - JVV

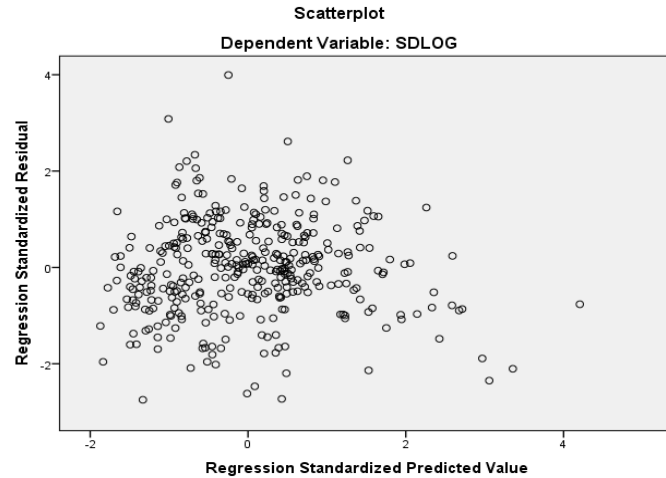


popodnevni vršni period - PV

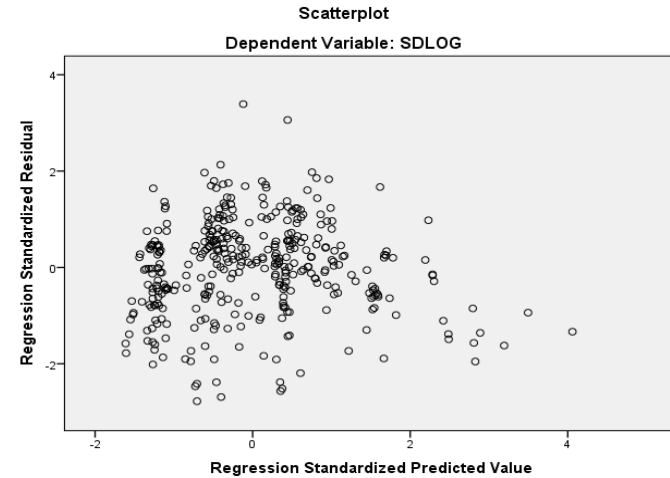


popodnevni vanvršni period - PVV

DIJAGRAMI RASTURANJA STANDARDIZOVANOG REZIDUALA ZA TRANSFORMISANO STANDARDNO ODSTUPANJE



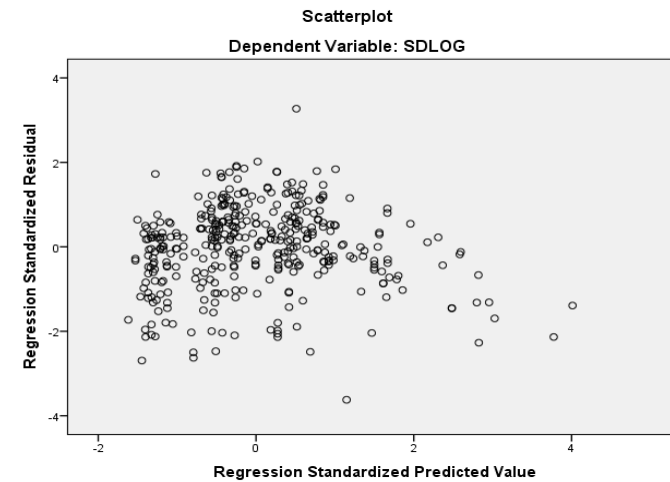
jutarnji vršni period - JV



jutarnji vanvršni period - JVV



popodnevni vršni period - PV



popodnevni vanvršni period - PVV

PRILOG E

Izlazni rezultati ANOVA testa značajnosti

REZULTATI ANOVA TESTA ZA SREDNJU VREDNOST VREMENA VOŽNJE

	Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
JV	Regression	1370691.847	14	97906.561	175.655	.000 ^b
	Residual	203443.285	365	557.379		
	Total	1574135.133	379			
JVV	Regression	1089970.921	14	77855.066	240.927	.000 ^b
	Residual	117948.909	365	323.148		
	Total	1207919.830	379			
PV	Regression	1265760.863	14	90411.490	92.763	.000 ^b
	Residual	355747.076	365	974.650		
	Total	1621507.939	379			
PVV	Regression	1070139.274	14	76438.520	277.948	.000 ^b
	Residual	100378.749	365	275.010		
	Total	1170518.023	379			

REZULTATI ANOVA TESTA ZA MINIMALNO VREME VOŽNJE

	Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
JV	Regression	723696.071	14	51692.576	837.471	.000 ^b
	Residual	22529.498	365	61.725		
	Total	746225.569	379			
JVV	Regression	735993.468	14	52570.962	845.813	.000 ^b
	Residual	22686.351	365	62.154		
	Total	758679.818	379			
PV	Regression	717753.978	14	51268.141	710.664	.000 ^b
	Residual	26331.522	365	72.141		
	Total	744085.501	379			
PVV	Regression	721138.414	14	51509.887	1012.031	.000 ^b
	Residual	18577.601	365	50.898		
	Total	739716.014	379			

REZULTATI ANOVA TESTA ZA MAKSIMALNO VREME VOŽNJE

	Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
JV	Regression	3084544.293	14	220324.592	53.119	.000 ^b
	Residual	1513941.084	365	4147.784		
	Total	4598485.377	379			
JVV	Regression	1916705.216	14	136907.515	71.880	.000 ^b
	Residual	695205.728	365	1904.673		
	Total	2611910.944	379			
PV	Regression	2838689.682	14	202763.549	18.247	.000 ^b
	Residual	4055902.026	365	11112.060		
	Total	6894591.708	379			
PVV	Regression	1786178.862	14	127584.204	84.745	.000 ^b
	Residual	549508.647	365	1505.503		
	Total	2335687.509	379			

REZULTATI ANOVA TESTA ZA STANDARDNO ODSUPANJE VREMENA VOŽNJE

	Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
JV	Regression	50115.575	14	3579.684	20.484	.000 ^b
	Residual	63784.206	365	174.751		
	Total	113899.780	379			
JVV	Regression	24530.169	14	1752.155	25.502	.000 ^b
	Residual	25078.231	365	68.707		
	Total	49608.400	379			
PV	Regression	48329.607	14	3452.115	7.029	.000 ^b
	Residual	179265.324	365	491.138		
	Total	227594.931	379			
PVV	Regression	21226.146	14	1516.153	28.474	.000 ^b
	Residual	19434.928	365	53.246		
	Total	40661.074	379			

**REZULTATI ANOVA TESTA ZA TRANSFORMISANO STANDARDNO ODSUPANJE
VREMENA VOŽNJE**

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
JV	Regression	27.633	14	1.974	29.191	.000 ^b
	Residual	24.680	365	.068		
	Total	52.312	379			
JVV	Regression	23.037	14	1.645	30.340	.000 ^b
	Residual	19.796	365	.054		
	Total	42.833	379			
PV	Regression	17.728	14	1.266	16.701	.000 ^b
	Residual	27.676	365	.076		
	Total	45.404	379			
PVV	Regression	21.897	14	1.564	30.244	.000 ^b
	Residual	18.876	365	.052		
	Total	40.772	379			

BIOGRAFIJA AUTORA

Stanko Bajčetić je rođen u Čačku 19. 3.1981. godine. Osnovnu školu završio je u Čačku 1996. godine, a gimnaziju prirodno-matematičkog smera takođe u Čačku, 2000. godine. Na Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu upisao se školske 2000/2001. godine. Diplomirao je 2007. godine na Odseku za drumski i gradski saobraćaj i transport, na Katedri za drumski i gradski transport, na predmetu Javni gradski putnički prevoz. Za diplomski rad na temu „Analiza i ocena stanja transportne mreže javnog masovnog transporta putnika u Nišu“, dobio je godišnju nagradu „14. oktobar“, koju dodeljuje Gradsko saobraćajno preduzeće „Beograd“ za najbolji diplomski rad iz oblasti saobraćaja i transporta. Diplomski rad odbranio je sa ocenom 10, a prosečna ocena tokom studiranja iznosila je 8,00.

U periodu od 2006. do 2007. godine, kao student talenat, angažovan je u svojstvu saradnika na Katedri za drumski i gradski transport putnika, a 2007. godine zasniva radni odnos na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na Katedri za drumski i gradski transport, kao saradnik na projektima. 2008. godine izabran je u zvanje saradnika u nastavi na Katedri za drumski i gradski transport, a 2009. godine u zvanje asistenta za užu naučnu oblast Drumski i gradski transport putnika. Na Katedri za drumski i gradski transport učestvuje u nastavi na predmetima osnovnih studija: *Tehnologija transporta putnika, Osnovi javnog gradskog transporta putnika i Javni gradski transport putnika*, kao i na predmetima master akademskih studija: *Informacione tehnologije u transportu putnika, Sistemi transporta putnika i Metode istraživanja i merenja u transportu*.

Doktorske studije je upisao u martu 2009. godine na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Ispite predviđene nastavnim planom i programom doktorskih studija položio je sa prosečnom ocenom 9,89. Posедуje licencu odgovornog projektanta saobraćaja i saobraćajne signalizacije od 2013. godine (broj licence: 370 L 985 13). Govori engleski jezik.

U toku dosadašnjeg rada je kao autor objavio tri rada u međunarodnim časopisima sa SCI liste iz kategorije M23, jedan rad u domaćem časopisu, kao i 13 radova i saopštenja na domaćim i međunarodnim naučnim skupovima i konferencijama. Kao član autorskog tima učestvovao je u izradi preko 50 studija i projekata.

Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora Stanko A. Bajčetić

Broj indeksa D – II – 18/08

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

**MODEL ZA OPTIMIZACIJU VREMENA OBRTA VOZILA NA LINIJI JAVNOG
GRADSKOG TRANSPORTA PUTNIKA**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis autora

U Beogradu, _____

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora	Stanko A. Bajčetić
Broj indeksa	D – II – 18/08
Studijski program	Saobraćaj
Naslov rada	MODEL ZA OPTIMIZACIJU VREMENA OBRTA VOZILA NA LINIJI JAVNOG GRADSKOG TRANSPORTA PUTNIKA
Mentor	Prof. dr Slaven M. Tica

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao radi pohranjena u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis autora

U Beogradu, _____

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

MODEL ZA OPTIMIZACIJU VREMENA OBRTA VOZILA NA LINIJI JAVNOG GRADSKOG TRANSPORTA PUTNIKA

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.
Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

Potpis autora

U Beogradu, _____

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.