

Prognostički model vremena putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu

Šojat, Dino

Doctoral thesis / Disertacija

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:160218>

Rights / Prava: [In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-18**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)





Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

Dino Šojat

PROGNOSTIČKI MODEL VREMENA PUTOVANJA U MASOVNOM JAVNOM GRADSKOM PRIJEVOZU

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2021.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

Dino Šojat

PROGNOSTIČKI MODEL VREMENA PUTOVANJA U MASOVNOM JAVNOM GRADSKOM PRIJEVOZU

DOKTORSKI RAD

Mentor:

doc. dr. sc. Marko Slavulj

Zagreb, 2021.



University of Zagreb

Faculty of Transport and Traffic Sciences

Dino Šojat

TRAVEL TIME PREDICTION MODEL IN URBAN MASS TRANSIT

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:

Asst. Prof. Marko Slavulj, Ph. D.

Zagreb, 2021.

Doktorand

ime i prezime	Dino Šojat
datum rođenja	01.03.1985.
mjesto rođenja	Zagreb, Hrvatska
obrazovanje	magistar inženjer prometa
institucija	Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti
godina stjecanja zvanja	2012.

Mentor

ime i prezime	Marko Slavulj
obrazovanje	docent
institucija	Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti
godina stjecanja zvanja	2017.

Doktorski rad

naziv doktorskog studija	Tehnološki sustavi u prometu i transportu
hrvatski naslov doktorskog rada	Prognostički model vremena putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu
engleski naslov doktorskog rada	Travel Time Prediction Model in Urban Mass Transit
institucija obrane doktorskog rada	Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti
datum prijave teme doktorskog rada	27.11.2020.
lektor	Gordana Glibo, dipl. novinar
datum obrane doktorskog rada	28.09.2021.

Povjerenstvo za obranu doktorskog rada

predsjednik	prof. dr. sc. Ljupko Šimunović
mentor	doc. dr. sc. Marko Slavulj
član	izv. prof. dr. sc. Borna Abramović
član	prof. dr. sc. Jasna Blašković-Zavada
vanjski član	doc. dr. sc. Slaven Gašparović, Sveučilište u Zagrebu Prirodoslovno-matematički fakultet
zamjena	izv. prof. dr. sc. Dubravka Hozjan

Informacije o mentoru

Marko Slavulj rođen je 15.01.1980. u Novoj Gradišci. Osnovnu školu i srednju elektrotehničku školu, I. tehničku školu Tesla, završio je u Zagrebu. Diplomirao je 2005. na Fakultetu prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu na temi „Prilog analizi načina provođenja očevida i vještačenja cestovnih prometnih nesreća“. Tijekom 2007. završio je pedagoško-psihološku naobrazbu na Učiteljskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Doktorsku disertaciju „Planiranje urbane mobilnosti mjerama upravljanja prijevoznom potražnjom“ obranio je 2013.

Izabran je u znanstveno zvanje višeg znanstvenog suradnika te u znanstveno-nastavno zvanje docenta. Na Fakultetu prometnih znanosti u Zagrebu obnaša funkciju voditelja Katedre za tehnologiju gradskog prometa. Voditelj je poslijediplomskog specijalističkog studija Gradski promet i voditelj je stručne prakse za smjer Gradski promet. Sudjeluje u radu CIVINET mreže Hrvatska – Slovenija – Jugoistočna Europa koja se bavi održivim planiranjem i upravljanjem mobilnošću u gradovima kao član upravnog odbora.

Nositelj je sljedećih kolegija na Fakultetu prometnih znanosti: *Tehnologija gradskog prometa I, Tehnologija gradskog prometa II, Urbana mobilnost, Upravljanje prijevoznom potražnjom u gradovima* i *Tehnološki modeli prijevoza putnika u gradovima*. Na specijalističkom poslijediplomskom studiju Gradski promet sudjeluje kao nositelj predmeta *Sustavi prijevoza putnika u gradovima*. Na doktorskom studiju nositelj je kolegija *Urbani transport* i *Istraživački seminar iz planiranja mobilnosti u gradovima*.

Područja interesa u znanosti su mu planiranje održive mobilnosti u gradovima, upravljanje prijevoznom potražnjom, javni gradski i prigradski prijevoz putnika, nemotorizirani promet, prometna sigurnost i internalizacija eksternih prometnih troškova.

Aktivni je istraživač te je sudjelovao u velikom broju znanstvenih projekata na razini Europske unije i Hrvatske i velikom broju prometnih studija i elaborata.

Ukupno je objavio dva poglavlja u knjizi, jedan sveučilišni priručnik, četiri znanstvena rada u međunarodnim časopisima, dva pozvana predavanja na znanstvenim međunarodnim skupovima i 41 rad u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom.

Sažetak

Kvaliteta usluge u javnom prijevozu putnika utječe na održivost gradske mobilnosti. U masovnom javnom gradskom prijevozu vrijeme putovanja jedan je od najznačajnijih indikatora

pouzdanosti usluge kao kategorije kvalitete usluge. No za prijevoz tramvajem, trolejbusom i autobusom karakteristične su neravnomjerna prijevozna ponuda i potražnja, uzrokujući varijabilnost vremena putovanja i slabu pouzdanost usluge za putnike. Varijabilnost je posljedica unutarnjih faktora smetnji kao što je nagomilavanje vozila, i vanjskih faktora smetnji kao što su prometni tokovi, semaforizirana raskrižja i prijevozna potražnja. Istraživanje se provelo na jednoj tramvajskoj liniji u Zagrebu, tako da se linija podijelila na segmente, za koje se utvrdilo idealno vrijeme putovanja. U istraživanju su se utvrdili odnosi između vremena putovanja i faktora smetnji, te su se kao značajni faktori smetnji pokazali semaforizirana raskrižja, idealno vrijeme putovanja i utjecaj tokova ostalih vozila, dok su se kao pogodne veličine za modeliranje pokazali medijalno vrijeme putovanja, deseti percentil i devedeseti percentil. Rezultati istraživanja pokazuju da je moguće izraditi prognostički model vremena putovanja pomoću faktora smetnji, no ne i pomoću neravnomjernosti prijevozne ponude. Na temelju validacije modela, određeno je minimalno i maksimalno vrijeme putovanja te je pokazana prihvatljivost modela prema udjelu ekstremnih vrijednosti vremena putovanja. Model se testirao za dobivanje vremena putovanja na dugačkim segmentima, te je na temelju usporedbe sa stvarnim vrijednostima utvrđena ograničenost modela za opisivanje rubnih vrijednosti vremena putovanja, no model se pokazao prihvatljivim za opisivanje srednje vrijednosti vremena putovanja. Ovo je jedno od rijetkih istraživanja koje se bavi tramvajskim prometom, s korištenjem idealnog vremena putovanja kao veličine kapaciteta i korištenjem detaljnih prometnih parametara. Na temelju rezultata istraživanja, predlažu se poboljšanja modela u smislu dobivanja detaljnijih prometnih parametara, te proširenja modeliranja na dugačke segmente, ostala razdoblja tijekom dana te manje i veće vremenske raspone promatranja.

Ključne riječi

faktor smetnji, masovni javni gradski prijevoz, pouzdanost usluge, prognostički model, vrijeme putovanja

Extended abstract

Mass public transport is the backbone of sustainable urban mobility, and it is the only transport mode with high capacity to meet transport demand in cities. Traffic system of today is characterized by an increasing private car usage because of economic prosperity for citizens and unattractive transport alternatives. In the current modal split of city trips, the increasing

private car usage is putting pressure on the existing urban traffic system, and by space consumption, traffic congestion, noise pollution, air pollution and poor road safety, unnecessary external costs are generated. Public transport systems in cities worldwide experience traffic congestion and overcrowded public transport vehicles.

In timetable design, there are three traditional principles: meeting transport demand, reducing stop waiting time, and avoiding vehicle crowding. Quality of service is the successfulness of public transport operations considering passengers, operator, and the local community. In the literature, service reliability is one of categories belonging to quality of service, and service reliability is defined by comparing real service to the timetables. Service reliability is traditionally demonstrated by punctuality (for each measuring point in the network, difference between the observed arrival time and timetable arrival time) and regularity (for each measuring point in the network, difference between the observed interval and timetable interval). Both punctuality and regularity are crucial for service reliability, quality of service, attractiveness of mass transit and modal split of city trips.

Service reliability in mass transit can be observed in a single or multiple parts of passenger trips, and each uses time to complete – these times are walking time (from source to network, for transfers, from network to destination), stop waiting time, and time spent in vehicle (consisting of running time between stops and stop dwell time on passenger routes). Due to technical capabilities in the past, service reliability research was primarily focused on stop waiting time. But with the development of automatic vehicle location and automated passenger counting technologies, a more detailed insight was provided into time spent in vehicles. Most in-vehicle time research of today is focused on predicting stop arrival time, to provide reliable vehicle arrival times for passengers on timetables, stop information displays or smart devices.

Mass public transport is characterized by high transport supply and demand, and passengers arrive to stops randomly, without considering timetables. However, in public transport conducted by trams, trolleybuses and buses, vehicle performance is limited by the infrastructure. Completely segregated corridors are less common, and transport is often limited by the external disturbance factors (not manageable by the operator) and internal disturbance factors (manageable by the operator). The external ones are transport demand, signalized intersections, other vehicles, pedestrians, passenger behaviour and weather conditions, and the internal ones are vehicle bunching, driver behaviour, timetable quality, vehicle availability and driver availability. Because of these factors, travel time (between any two points on the line or

between the terminals at maximum) is characterized by variability. Travel time variability reduces service reliability for passengers, such that their waiting time at stops and time spent in vehicles becomes more unpredictable, and they must include additional time in their trips to prevent late arrivals to their destinations.

The research on travel time perception by passengers revealed that the reduction of travel time variability decreases uncertainties when estimating destination arrival time and decreases uncertainties in trip planning. Passengers also prefer reduction of variability over the reduction of average travel time itself because they can estimate arrival to the destination more precisely. Reducing travel time variability also makes transport supply more evenly distributed, reducing the number of uncomfortable rides. For the operator, less travel time variability means fewer operating costs.

Travel time variability can be described by a distribution or descriptive statistics. Research has shown that distributions such as gamma, normal, log-normal, and log-logistic are most common. Normal distribution is better in commuter periods, and log-normal in non-commuter periods. The most common descriptive measures are two absolute ones (in minutes) – difference between 90th and 10th percentiles and standard deviation, and two relative ones (in percent) – ratio of 90th minus 10th percentile and median, and the coefficient of variation. Absolute measures are better for estimating time losses for passengers, and relative ones are better for estimating network performance. Research has shown that median is a better measure than the average, and that both measures increase linearly with the average travel time.

Travel time is predicted by three types of models: primitive, based on data and based on traffic flow theory. The existence of many prognostic models indicates that each has advantages and disadvantages in terms of complexity, amount of input data, traffic theory, and applicability.

Primitive models, consisting of instant, historical and hybrid, are easy to implement, but their disadvantage is the assumption that variables affecting travel time are constant in time. In models based on data, relationships between the dependent and the independent variables is established, so these models do not require extensive traffic theory knowledge, but they require a large amount of input data. They consist of parametric and non-parametric models. In parametric modes, two techniques are used – in time series techniques, which cannot show variations in real time, autoregressive methods are used, and in regression techniques, which may have problems with interdependence of independent variables, ridge regression, regression tree, bagging regression, random forest regression and support vector regression is

often used. In non-parametric models, the relationships between variables are obtained directly from the data using machine learning – artificial neural network or support vector machine are most common. In models based on traffic flow theory, travel time is predicted using theoretical models. Unlike data-based models, these models do not require a large amount of data, but they may be inaccurate due to network specifications. They consist of macroscopic (by particle filters and Kalman filters) and microscopic (by source-destination matrices).

The goal of this research is to develop a travel time prediction model for mass transit by establishing relationships between travel time and disturbance factors. The purpose of research is to improve travel time prediction in mass transit, ensuring a sustainable transport system with less external costs by shifting passengers from private cars to public transport, and reducing impact on the environment, energy consumption and space consumption. There are two research hypotheses:

- hypothesis 1 – “It is possible to develop a travel time prediction model in urban mass transit based on disturbance factors”
- hypothesis 2 – “It is possible to establish relationships between travel time and transport supply irregularity”.

The research was conducted in five phases:

- in phase 1, travel time data were collected by observing tram traffic in the city of Zagreb, by observing vehicles in specific locations on tram line 4; besides travel time data, all other data regarding distances, stops, intersections, pedestrian crossings, lane type and traffic volume were also collected
- in phase 2, the collected data were processed, and the relevant measures of travel time and disturbance factors were calculated; based on the geometry, legislation and vehicle characteristics, ideal travel time was calculated
- in phase 3, relationships between travel time and disturbance factors were established by correlation matrices; and insignificant variables were eliminated
- in phase 4, based on correlation results, travel time prediction models using multiple linear regression were developed
- in phase 5, the models were validated on a different dataset using scientific methods
- in phase 6, the models were tested between the terminals, to check applicability for long segments.

There were three models established by calculating three dependent variables, because all of them are important for service reliability:

- deviation of median from ideal travel time – to predict travel time for average vehicle
- deviation of median from the 10th percentile – to predict travel time for early vehicles
- deviation of 90th percentile from ideal travel time – to predict travel time for late vehicles.

After the correlation and model development, only three independent variables (predictors) remained:

- traffic lights – total time lost at intersections divided by ideal travel time; total time lost at intersections is the sum of proportions of red-light times squared divided by double intersection cycle time for every intersection on the observed segment
- ideal travel time – the reciprocal of ideal travel time on the observed segment was used
- traffic volume – the ratio of total ideal time on sections with intense other traffic and segment ideal travel time.

The model passed linear regression tests. The model was also validated by using different sample of travel time data, and the validation showed an average 9% error for 10th and 90th percentile of travel time, which was then used to estimate minimum and maximum to be used in timetables. The results showed that, by applying minimum and maximum from the validation, 10% of total vehicles will have travel time less than minimum and 14% of total vehicles will have greater travel time than maximum, which was acceptable. Therefore, the hypothesis 1 of the research was approved.

Relationships between travel time and transport supply irregularity was subjected to correlation analysis as well, and several measures of supply irregularity based on vehicle interval and frequency were chosen as predictors. There were some minor correlations; however, in the multiple linear regression, all variables describing transport supply irregularity did not improve previously constructed models, and therefore the hypothesis 2 of the research was rejected.

Scientific contribution of the research is achieved through:

- determining disturbance factors affecting travel time in mass transit, such that the factors are richer in traffic context than in previous research
- determining impact of each disturbance factor on travel time in mass transit, by introducing ideal travel time used for comparison

- developing a new travel time prediction model in mass transit based on tram traffic rarely conducted in the past.

The limitations of this research were manual data collection, and the assumption that timetable frequency has significant influence on travel time, resulting in analysing travel time for short segments. Therefore, future research should predict travel time on longer segments. Additional limitation of the research is the assumption of ideal travel time based on observations. Therefore, driver behaviour, and vehicle characteristics may be considered to improve the accuracy of the model. Since the data collection could not provide stop time data, future research should include stop time data, for modelling riding time and stop time separately.

Keywords

disturbance factor, prediction model, service reliability, travel time, urban mass transit

Zahvale

U izradi ovog doktorskog rada, iza mene je stajao velik broj ljudi iz poslovne i privatne sfere. Podršku sam dobio na mjestima na kojima sam ju najmanje očekivao, stoga rado navodim sve osobe koje su odigrale ulogu u ovome, i kojima sam neizmjereno zahvalan na pruženoj pomoći.

Kvaliteta doktorskog rada ovisi i o doktorandu i o mentoru, a kako su pod mojom kontrolom jedino moji postupci, za dio koji nije pod mojom kontrolom zahvaljujem se mentoru, **doc. dr. sc. Marku Slavulju**, koji je utrošio mnogo sati truda u razmatranju kako bismo mogli riješiti razne vrste problema.

Za izgradnju modela bila su potrebna specifična znanja iz područja modeliranja i primijenjene statistike, stoga se zahvaljujem **izv. prof. dr. sc. Borni Abramoviću**, koji je točno znao kako me usmjeriti na pravi put, te ga zbog toga smatram drugim mentorom na doktorskom radu. Također, zahvaljujem se i **dr. sc. Marijanu Jakovljeviću** koji mi je pružio u pojedinim trenucima, kada sam mislio da nema izlaza, ključne informacije za nastavak istraživanja.

Doktorski studij zahtijeva mnogo vremena i odricanja. Stoga se zahvaljujem ostalim članovima Zavoda za gradski promet – **prof. dr. sc. Ljupku Šimunoviću**, **doc. dr. sc. Mariju Čosiću**, **Julijanu Juraku**, **mag. ing. traff.**, **Boži Raduloviću**, **mag. ing. traff.** i **Matiji Sikiriću**, **mag. ing. traff.**, koji su mi izlazili u susret s obavezama i koji su vjerovali u mene više nego ja. Posebno se zahvaljujem studijskom savjetniku kroz doktorski studij **prof. dr. sc. Davoru Brčiću**, koji je prepoznao moj potencijal za rad na Fakultetu i pohađanje doktorskog studija.

Bez njega, danas ne bih bio ovdje gdje jesam.

Zahvaljujem se ostalim članovima povjerenstva za obranu doktorskog rada, **prof. dr. sc. Jasni Blašković-Zavadi** i **doc. dr. sc. Slavenu Gašparoviću**, koji su rado prihvatili angažman oko doktorskog rada i pružili kvalitetne sugestije od prijave teme do obrane doktorskog rada.

Podrška institucije je temelj kvalitetnog doktorskog studija. Stoga se zahvaljujem na podršci Fakulteta prometnih znanosti na osiguravanju sredstava, nastavnom osoblju u raznim fazama doktorskog studija, te administrativnom osoblju na pravovremenim informacijama u vezi bilo kakvih poteškoća.

Izrada modela ne bi bila moguća bez kvalitetnih podataka o mreži tramvajskih linija grada Zagreba, te se ovim putem zahvaljujem Zagrebačkom električnom tramvaju na dugogodišnjoj suradnji s Fakultetom. Posebno se zahvaljujem **Danieli Bolčević-Turčić, mag. ing. traff.**, kojoj nikad nije bio problem odgovoriti u bilo koje doba dana na bilo koje pitanje o tramvajskom prometu.

Prikupljanje podataka o vremenima putovanja za vrijeme pandemije SARS-CoV-2 ne bi bilo moguće bez studenata Fakulteta prometnih znanosti preddiplomskog i diplomskog studija smjera gradski promet, koji su se izlagali kiši, vjetru i niskim temperaturama zraka da bi prikupili precizne podatke o vremenima putovanja na terenu. Ti studenti su **Ivan Dukanović, Ivan Dumančić, Ivan Miličević, Šime Nekić, Filip Popović, Luka Vidan, Dejan Aleksić, Luka Blažević, Filip Foder, Krešimir Franc, Dijana Klarić, Nikolina Lovrić, Borna Bogović, Luka Božić, Luka Holjevac, Kruno Jagić, Jan Jurak i Domagoj Marić**. Hvala vam što ste moju priču o javnom gradskom prijevozu prihvatili kao vlastitu.

Zahvaljujem se članovima obitelji koji su bili spremni tumačiti me s mnogo velikodušnosti i milosrđa u mojim nastojanjima. Posebno bih se zahvalio majci, **Andi Šojat**, koja mi je sa svakim ustupkom osigurala potrebno vrijeme. Također, zahvaljujem se rodbini i prijateljima na ohrabrenjima, podršci i razumijevanju.

Doktorski rad posvećujem Filipu Sirovici, mag. ing. traff., sa željom njegovog daljnjeg usavršavanja u području masovnoga javnoga gradskoga prijevoza. Nadam se da će doktorski rad poslužiti istraživačima kao inspiracija za vlastita istraživanja, prijevoznicima koji se ohrabre koristiti model za procjenu vremena putovanja i studentima, barem za popunjavanje popisa literature tijekom studiranja.

SADRŽAJ

1 UVOD.....	1
1.1 Problematika istraživanja	2
1.2 Pregled prethodnih istraživanja	3
1.3 Cilj, svrha, hipoteze i znanstveni doprinos istraživanja	7
1.4 Metode i faze istraživanja.....	8
1.5 Ograničenja istraživanja	10
1.6 Struktura doktorskog rada	11
2 ZNAČAJ VREMENA PUTOVANJA U MASOVNOM JAVNOM GRADSKOM PRIJEVOZU	13
2.1 Obilježja javnoga gradskoga prijevoza u istraživanju.....	20
2.2 Parametri vremena putovanja	21
2.3 Odudaranje i varijabilnost vremena putovanja.....	24
2.4 Statističko opisivanje vremena putovanja	26
2.5 Utjecaj vremena putovanja na putnike	29
2.5.1 Utjecaj vremena čekanja na dolazak vozila	32
2.5.2 Utjecaj vremena provedenog u vozilu	33
2.5.3 Utjecaj zauzetosti vozila	34
2.6 Utjecajni faktori smetnji na vrijeme putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu	36
2.6.1 Faktori smetnji prema odnosu prijevozne ponude i potražnje	37
2.6.2 Faktori smetnji prema upravljivosti	38
2.6.3 Faktori smetnji prema pružanju u prostoru	40
2.6.4 Faktori smetnji prema izravnosti	41
2.6.5 Faktori smetnji prema zakonskoj regulativi	42
2.7 Mjere za smanjenje odudaranja i varijabilnosti vremena putovanja na operativnoj razini.....	42
2.7.1 Prioritet javnoga gradskoga prijevoza.....	46
2.7.2 Zadržavanje vozila	52
3 PRIKUPLJANJE I OBRADA PODATAKA	55
3.1 Karakteristike tramvajske linije 4.....	63
3.2 Dobivanje opisnih veličina vremena putovanja	70
3.3 Određivanje idealnog vremena putovanja	75
3.3.1 Mjerodavne brzine prema stilu vožnje.....	76
3.3.2 Zadržavanja na stajalištima	78
3.3.3 Ubrzanja i usporenja prema karakteristikama vozila	81
3.3.4 Tip cestovnih trakova.....	83
3.3.5 Određivanje odsječaka iz načina vožnje i tipa trakova	85
3.4 Dobivanje parametara faktora smetnji	87

4	UTVRĐIVANJE RELEVANTNIH VELIČINA ZA MODELIRANJE VREMENA PUTOVANJA.....	89
4.1	Utvrdjivanje zavisnih varijabli vremena putovanja.....	92
4.2	Razdioba vremena putovanja prema segmentima	98
4.3	Utvrdjivanje nezavisnih varijabli faktora smetnji	100
4.3.1	Ukupan broj poprečnih faktora smetnji	102
4.3.2	Udio zbroja trajanja crvenih faza na poprečnim faktorima smetnji	103
4.3.3	Udio zbroja omjera dvostruke crvene faze i ciklusa na poprečnim faktorima smetnji	104
4.3.4	Udio zbroja omjera trajanja crvene i zelene faze na poprečnim faktorima smetnji	106
4.3.5	Udio ukupnog izgubljenog vremena na poprečnim faktorima smetnji	107
4.3.6	Idealno vrijeme putovanja.....	109
4.3.7	Frekvencija voznog reda	110
4.3.8	Vremenski udio tipova trakova	111
4.3.9	Utjecaj ostalih vozila	112
4.4	Korelacijska analiza	115
4.4.1	Korelacija vremena putovanja i faktora smetnji	115
4.4.2	Korelacija vremena putovanja i neravnomjernosti prijevozne ponude	119
5	KONSTRUKCIJA PROGNOŠTIČKOG MODELA VREMENA PUTOVANJA.....	122
5.1	Dobivanje modela višestrukom linearnom regresijom.....	123
5.2	Provjera opravdanosti primjene višestruke linearne regresije.....	127
5.3	Modeliranje vremena putovanja na temelju neravnomjernosti prijevozne ponude	129
5.4	Vrijednosti nezavisnih varijabli.....	133
5.5	Vrijednosti zavisnih varijabli	136
6	VALIDACIJA MODELA	139
6.1	Metodologija validacije	139
6.2	Određivanje minimalnog i maksimalnog vremena putovanja na temelju validacije modela.....	141
6.3	Provjera ponašanja ekstremnih vrijednosti vremena putovanja	142
7	TESTIRANJE MODELA IZMEĐU TERMINALA.....	146
8	ZAKLJUČAK	151
	LITERATURA.....	156
	POPIS SLIKA, TABLICA I PRILOGA.....	162
	POJMOVNIK.....	227
	TUMAČ KRATICA.....	229
	TUMAČ MJERNIH JEDINICA	230
	ŽIVOTOPIS AUTORA I POPIS OBJAVLJENIH DJELA	231

1 UVOD

Gradovi su mjesta velike gustoće naseljenosti gdje je uvjet održivosti efikasan prometni sustav primjeren potrebama svih stanovnika. No s ekonomskim prosperitetom, koji podrazumijeva veću kupovnu moć stanovništva, raste i upotreba osobnog automobila te se posljedično javlja problem zagušenja prometne infrastrukture. Rekonstrukcija postojećih prometnih trakova, izgradnja novih prometnica ili bolji način upravljanja semaforiziranim raskrižjima ne mogu poboljšati propusnu moć cestovne infrastrukture u potpunosti. Razlog tome je malen kapacitet osobnog prijevoza u gradovima, gdje je prijevozna potražnja velika. Prema tome, upotreba osobnog automobila, posebice u vršnim periodima dana, predstavlja neracionalnost s više dominantnih aspekata – prostornog, ekonomskog, energetskeg i ekološkog.

Jedna od alternativa prekomjernom korištenju osobnog automobila je javni masovni prijevoz putnika, imajući na umu stanovnike koji nemaju mogućnost korištenja osobnog vozila. Oni se svrstavaju u dobne skupine (učenici i umirovljenici) i socijalne skupine (ovisno o kupovnoj moći). Kako bi javni prijevoz bio alternativa korištenju osobnog vozila, nužno ga je učiniti atraktivnim.

Dio sustava javnog prijevoza putnika u gradovima predstavlja ulični javni prijevoz, koji opslužuje grad u mješovitom prometnom toku, kao što su tramvaj, trolejbus i autobus. Podsustavi koji su smješteni na izdvojenim trasama, kao što su laka gradska željeznica (LRT), brzi autobusni podsustavi (BRT) ili metro, manje su izloženi poremećajima u odnosu na podsustave koji se kreću po uličnoj mreži u mješovitom ili djelomično mješovitom prometnom toku. Stoga podsustavi uličnog javnog prijevoza putnika imaju problem u operativnoj efikasnosti – neravnomjernost vremena putovanja.

Prema [1], u analizi modalne razdiobe gradskih putovanja postoji pojam socijalnog optimuma. Ako se promotre troškovi putovanja osobnim automobilom i javnim prijevozom iz perspektive lokalne zajednice, razumljivo je da će troškovi putovanja osobnim automobilom kao individualnim načinom prijevoza rasti kako raste prijevozna potražnja, zbog pojave zagušenja na prometnicama. S druge strane, troškovi putovanja javnim gradskim prijevozom će opadati jer će se za iste operativne troškove prevesti veći broj putnika kako raste prijevozna potražnja. Stoga mora postojati točka u kojoj se krivulje troškova u ovisnosti o prijevoznoj potražnji presijecaju, a ta ekvilibrirana vrijednost naziva se socijalnim optimumom. No problem socijalnog optimuma je u tome što je različit od individualnog optimuma (koji analogno

socijalnom optimumu promatra troškove, no iz individualne perspektive), te se u težnji za postizanjem socijalnog optimuma, koji je najbolji za zajednicu, nastoje uvoditi mjere za smanjenje korištenja osobnog automobila te povećanje korištenja masovnoga javnoga prijevoza putnika.

1.1 Problematika istraživanja

Učinkovit javni gradski prijevoz je onaj prijevoz koji maksimizira učinkovitost na svakoj etapi putovanja putnika: pješačenjima (od izvorišta do mreže, radi transfera, od mreže do odredišta), čekanjima na dolazak vozila (pri dolasku na mrežu ili radi presjedanja) i putovanju u vozilu javnog prijevoza (koje sadrži vožnje između stajališta i zadržavanja na stajalištima).

U odnosu na metro, LRT ili BRT, prijevoz koji se obavlja tramvajem, trolejbusom i autobusom, često je ograničen kapacitetom infrastrukture po kojoj se odvija. Zbog toga, potpuno izdvojeni koridori na mreži su rijetki [2], pa je prijevozni proces izložen vanjskim faktorima smetnji (koji nisu pod utjecajem prijevoznika) i unutarnjim faktorima smetnji (koji jesu pod utjecajem prijevoznika). Vanjski faktori smetnji su prijevozna potražnja, semaforizirana raskrižja, prometni tokovi, pješački tokovi, ponašanje putnika i meteorološki uvjeti, a unutarnji faktori smetnji su nagomilavanje vozila, ponašanje vozača vozila javnog prijevoza, kvaliteta voznog reda, dostupnost vozila i vozača [3]. Zbog navedenih faktora smetnji, za vrijeme putovanja, između bilo koje dvije točke na ruti linije, a najdalje između izvorišnog i odredišnog terminala, karakteristično je odudaranje (odstupanje središnje vrijednosti vremena putovanja od idealne), i varijabilnost (odstupanje rubnih vrijednosti vremena putovanja od srednje).

Zbog varijabilnosti vremena putovanja, putnicima se smanjuje pouzdanost usluge, jer im se povećava varijabilnost vremena čekanja na dolazak vozila i varijabilnost vremena provedenog u vozilu, pa oni moraju za svoja putovanja rezervirati dodatno vrijeme kako bi stigli na odredište na vrijeme.

Za prijevoznika, varijabilnost vremena putovanja stvara dodatne troškove, jer za isti transportni rad mora se uvesti veći broj vozila, pa tako i vozača. Nadalje, veći broj vozila na mreži dodatno narušava učinkovitost i stabilnost prijevoznog procesa jer je veći raspon vremena putovanja, pa je neučinkovito i vrijeme odmora vozača na terminalima.

Za lokalnu zajednicu, zbog varijabilnosti vremena putovanja i neučinkovitosti prijevoznog procesa, imidž javnoga gradskoga prijevoza je narušen, pa se putnici češće oslanjaju na osobni automobil prilikom planiranja svojih putovanja, što stvara preopterećenje sustava gradskih

ulica i slabo opterećenje sustava javnog prijevoza putnika. U svrhu postizanja modalne preraspodjele na javni gradski prijevoz, lokalna zajednica morat će uložiti dodatne napore u poboljšanje atraktivnosti javnoga gradskoga prijevoza.

Kako su odudaranje i varijabilnost vremena putovanja ključni za prijevozni proces, poznavanje njihovog ponašanja je ključno za sve dionike prijevoznog procesa, stoga je nužno modelirati ih kako bi se dobio uvid u sve faktore koji utječu na učinkovitost prijevoznog procesa.

1.2 Pregled prethodnih istraživanja

Većina istraživanja do danas koja se bave modeliranjem vremena putovanja fokusirana su na vrijeme putovanja osobnih automobila, s manjim udjelom istraživanja u javnom prijevozu. Većina istraživanja koja se odnose na javni prijevoz, orijentirana su na vrijeme putovanja u autobusnom prometu, jer je autobusni sustav najčešće integriran u uličnu mrežu u kojoj postoje različiti poremećaji. Stoga u odnosu na autobusni sustav, puno je manje istraživanja koja se bave trolejbusnim ili tramvajskim prometom. Kod tračničkih sustava su češća istraživanja sustava metroa, lake gradske željeznice ili prigradske željeznice, no ona imaju veći fokus na istraživanju vremena čekanja na dolazak vozila, budući da je znatno manja količina poremećaja u tim sustavima.

Pod vremenom putovanja u javnom prijevozu u literaturi podrazumijeva se u najvećem broju istraživanja vrijeme koje je potrebno vozilima za dolazak na promatrano mjesto na mreži (obično odredišno stajalište) s proizvoljnog izvorišnog mjesta na mreži, tako da je poznata udaljenost između navedenih mjesta i prepreke na tom putu. Takvo vrijeme putovanja se promatra radi pronalaska prognostičkog modela primjenjivog, primjerice, u zaslonima na stajalištima radi što preciznije informacije za putnike. U najužem smislu, vrijeme putovanja može biti vrijeme potrebno vozilima za prelazak kratkog odsjeka koji sadrži jednu prepreku, a u širem smislu vrijeme od polaska od izvorišnog terminala do dolaska na odredišni terminal. Prognostički modeli vremena putovanja dijele se u tri kategorije [4]:

- primitivni modeli
- modeli zasnovani na podacima
- modeli zasnovani na prometnoj teoriji.

Primitivni modeli su jednostavni, brzi po pitanju brzine računanja i jednostavni za primjenu. Dijele se na instant-modele, povijesne modele i hibridne modele. Kod instant-modela [5] pretpostavlja se kako nema promjene varijabli u budućnosti, a kod povijesnih [6] koriste se

povijesni podatci za procjenu vrijednosti varijabli u sličnim razdobljima u budućnosti. Hibridni modeli su kombinirani trenutačni i povijesni modeli. Pretpostavljanje konstantne prijevozne potražnje je nedostatak primitivnih modela, jer je njihova primjenjivost u nekom razdoblju u budućnosti ili na drugoj mreži linija upitna.

Kod modela zasnovanim na podacima nastoji se uspostaviti korelacija između zavisnih i nezavisnih varijabli. Glavna prednost ovakvih modela jest što ne zahtijevaju veliko znanje iz područja prometne teorije, no s druge strane zahtijevaju veliku količinu podataka, koji nerijetko u slučaju javnog prijevoza nisu dostupni. Dije se na parametarske i neparametarske modele.

Kod parametarskih modela definira se skup nezavisnih varijabli za uspostavu korelacije, a vrijednosti varijabli se dobivaju iz podataka. To se može napraviti tehnikama analize vremenskih serija podataka [7] ili regresijskim tehnikama [8].

Kod tehnike analize vremenskih serija podataka se pretpostavlja da su sadašnji i budući obrasci putovanja ovisni o povijesnim podacima, stoga preciznost ovisi o usklađenosti između prethodnih i sadašnjih obrazaca ponašanja. Najčešće tehnike koje spadaju u kategoriju vremenskih serija su kretajući prosjek (eng. *moving average* – MA), autoregresivna tehnika (eng. *autoregressive* – AR), autoregresivni kretajući prosjek (eng. *autoregressive moving average* – ARMA) i autoregresivni integrirani kretajući prosjek (eng. *autoregressive integrated moving average* – ARIMA). Iako je prednost ovih tehnika velika brzina računanja, one ne mogu prikazati varijacije u realnom vremenu [9].

Regresijske tehnike predviđaju zavisnu varijablu pomoću jednadžbe koja sadrži nezavisne varijable (prediktore). Glavna pretpostavka kod regresijskih tehnika je međusobna nezavisnost svih nezavisnih varijabli, te izrazita povezanost nezavisnih varijabli sa zavisnom. No nezavisne varijable također mogu biti međusobno zavisne [10]. Efekt međusobne zavisnosti varijabli se može reducirati računanjem faktora napuhavanja varijance ili primjenom robusnih regresijskih analiza (umjesto regresije najmanjih kvadrata) kao što su hrbat-regresija (eng. *ridge regression*) [11] i lasso-regresija (eng. *lasso regression*) [12]. Također, popularne su i statističke regresijske metode učenja kao što je regresijsko stablo (eng. *regression tree*) [13], združivanje prosjeka (eng. *bagging regression*) [14], regresija slučajne šume (eng. *random forest regression*) [15] i regresija potpornih vektora (eng. *support vector regression*) [16]. Preciznost tih tehnika ovisi znatno o odabiru i primjeni odgovarajućih nezavisnih varijabli. Regresijske tehnike podrazumijevaju prikupljanje podataka o raznim faktorima koji utječu na vrijeme putovanja, kao što su sastav voznog parka, širina trakova, semaforski uređaji i

ponašanje vozača, što je zahtjevan posao.

Kod neparametarskih modela se ne definira unaprijed ovisnost zavisnih o nezavisnim varijablama, već se odnosi dobiju izravno od podataka, kao i odgovarajući parametri. U literaturi se ti modeli najčešće zasnivaju na strojnom učenju, koje je dio područja umjetne inteligencije. Najčešće se koriste modeli umjetne neuronske mreže (eng. *artificial neural network* – ANN) [17] i stroja s potpornim vektorima (eng. *support vector machine* – SVM) [18]. Modeli ANN koriste procesorsku moć razdijeljenu u male procesorske jedinice za pohranu eksperimentalnih znanja. Problem su poteškoće u poopćavanju rezultata, pa je za dobivanje uzoraka ponašanja varijabli potrebna velika količina podataka, te stručno znanje za odabir ulaznih obrazaca ponašanja. Modeli SVM zasnivaju se na sustavima učenja koji koriste hipotetski prostor linearnih funkcija koje trenira algoritam učenja s mogućnošću prepoznavanja uzoraka ponašanja u povijesnim podacima. Modeli SVM stoga imaju mogućnost rješavanja nelinearnih regresijskih problema s velikom količinom varijabli, no velika količina varijabli ujedno je i najveći problem pri rješavanju. Istraživanje [16] pokazalo je usporedbom srednjeg kvadratnog korijena pogreške (eng. *root mean square error* – RMSE) kako je model SVM bolji za prognozu vremena putovanja od ANN na istom uzorku podataka. Također, pokazalo se kako rješenja modela SVM imaju tendenciju biti i globalni optimum, dok je kod modela ANN tendencija na lokalnom optimumu.

Kod modela zasnovanih na teoriji prometnog toka vrijeme putovanja se predviđa iz drugih prometnih varijabli zasnovanih na teoretskim modelima. Modeli se mogu podijeliti u dvije glavne kategorije: makroskopske i mikroskopske. Najveća prednost modela zasnovanih na teoriji prometnog toka je dobivanje potpunog uvida u stanje prometa u mreži uzimajući u obzir i prostor i vrijeme, čak i s ograničavajućom količinom ulaznih podataka.

Kod mikroskopskih modela koriste se izvorišno-odredišne matrice kao ulazni parametri za prikaz ruta putovanja u budućim razdobljima, uzimajući u obzir interakcije između vozila, ponašanje vozača, promjene trakova i drugo. No dobivanje izvorišno-odredišnih matrica je često zahtjevan posao. Za razliku od njih, makroskopski modeli se koriste jednadžbama koje prikazuju odnose između parametara kao što su gustoća, protok i brzina za buduća razdoblja. Najveći broj istraživanja putem makroskopskih metoda su se provodila u uvjetima homogenog prometnog toka sa zanemarivanjem promjene trakova. Također, znatan broj istraživanja se koristi tehnikama čestičnog filtra i Kalmanovog filtra za predviđanje vremena putovanja u autobusnom prometu [19].

U istraživanju [20] analiziralo se vrijeme putovanja između stajališta na koridorima te se pokazalo da su precizniji modeli koji promatraju koridore u većini slučajeva u odnosu na modele koji promatraju pojedinačno odsječke između stajališta, te da su modeli koji promatraju dugačke dionice bolji za predviđanja vremena putovanja na većim udaljenostima.

U istraživanju [21] koristio se prostorno-vremenski autoregresivni integrirani pomični prosjek (eng. *space-time autoregressive integrated moving average* – STARIMA) za prikaz obrazaca prometnog toka. Nekoliko istraživanja koristilo se jednadžbom očuvanja prometnog toka koristeći eksplicitne prikaze Godunove sheme i algoritma Kalmanovog filtra za predviđanje gustoće toka [22]. U istraživanju [23] razvila se prostorno-vremenska neuronska mreža (eng. *space-time-delay neural network* – STDNN) uz pomoć integracije prostorno-vremenskih autokorelacija prometnog toka za predviđanje vremena putovanja. Istraživanje je pokazalo da metoda STDNN ima bolju preciznost od metode STARIMA.

Postoje istraživanja koja su koristila funkcije vremena putovanja zasnovana na makroskopskom modelu prometnih tokova [24], jednadžbe stanja na temelju prostorno-vremenskog ponašanja toka [25] i jednadžbe očuvanja vozila analizirajući brzine [26]. Sva navedena istraživanja analiziraju općenito vrijeme putovanja te su ograničena ako se razmatraju i prostorne i vremenske varijable.

Poznato je do sada samo jedno istraživanje vremena putovanja u javnom gradskom prijevozu koje obuhvaća i prostorne i vremenske varijable, a koristi se prostorno-vremenskom diskretizacijom [4]. Korištenjem GPS-a (eng. *global positioning system*) i jednadžbe očuvanja prometnog toka s aspekta brzine je pokazano da tehnika Kalmanovog filtra može poboljšati preciznost modela u usporedbi s numeričkim shemama, a usporedbom podataka se pokazalo da je prostorno-vremenska diskretizacija preciznija od ANN-a, povijesnih modela i regresijskih modela.

Prema prikazanom, pristup modeliranju vremena putovanja je raznolik, a glavni razlozi koji ograničavaju pojedine modele, i koji čine druge modele prihvatljivijima za specifične situacije su:

- kompleksnost: kompleksna prometna teorija može dati rješenja koja su slična ili ista jednostavnom i ustaljenom pristupu prijevoznika
- količina ulaznih podataka: malen broj podataka ili loša kvaliteta podataka rezultirat će manje preciznim modelom; s druge strane, jako precizni podatci se često mogu pokazati neupotrebljivima

- praktična primjenjivost: metoda učinkovita na jednoj mreži iz stvarnog okruženja može se pokazati slabo primjenjivom ili neprimjenjivom na drugoj mreži iz stvarnog okruženja s vlastitim specifičnostima.

U skladu s navedenom klasifikacijom modela, model ovog istraživanja pripada:

- modelima zasnovanim na podacima
- parametarskim modelima
- regresijskim modelima.

1.3 Cilj, svrha, hipoteze i znanstveni doprinos istraživanja

Cilj istraživanja je, u masovnom javnom gradskom prijevozu koji se obavlja u uličnoj mreži, izraditi prognostički model vremena putovanja utvrđivanjem odnosa između vremena putovanja i faktora smetnji.

Svrha istraživanja je unaprjeđenje postojećih modela predviđanja vremena putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu koji se obavlja u uličnoj mreži, radi postizanja učinkovitijeg i atraktivnijeg javnog prijevoza i održivog prometnog sustava kroz:

- postizanje modalne preraspodjele gradskih putovanja s osobnog na javni prijevoz
- smanjenje utjecaja prometnog sustava na okoliš
- smanjenje potrošnje energije
- smanjenje eksternih troškova prometnog sustava
- smanjenje korištenja prometnih površina.

Doktorski rad provjerava sljedeće dvije istraživačke hipoteze:

- hipoteza 1 – „Moguće je izraditi prognostički model vremena putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu na temelju faktora smetnji“
- hipoteza 2 – „Moguće je utvrditi odnos između vremena putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu i neravnomjernosti prijevozne ponude“.

Očekivani znanstveni doprinosi provedenog istraživanja su:

- utvrđivanje faktora smetnji za određivanje varijabilnosti vremena putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu
- određivanje značajnosti faktora smetnji za vrijeme putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu

- razvoj novog prognostičkog modela vremena putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu.

Osim znanstvenog doprinosa, očekuje se i aplikativni doprinos istraživanja u smislu utvrđivanja kritičnih segmenata na mreži linija javnoga gradskoga prijevoza po pitanju vremena putovanja, mogućnosti usporedbe dinamičke učinkovitosti na segmentima mreže linija, te utvrđivanje potencijala za smanjenje vremena putovanja na mreži. Navedeni aplikativni doprinos istraživanja koristan je za putnike, prijevoznika i lokalnu zajednicu.

1.4 Metode i faze istraživanja

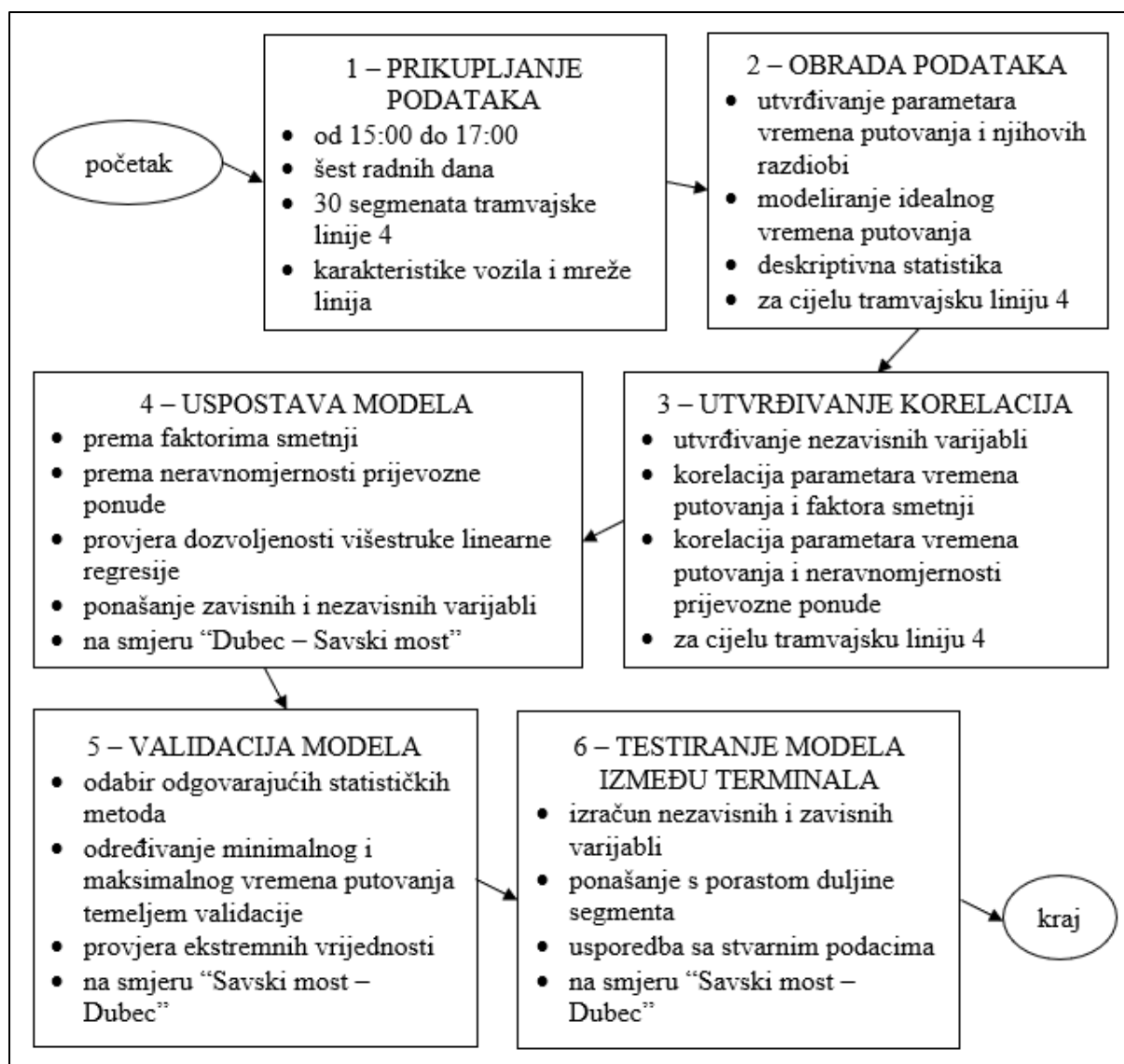
U skladu s ciljem i hipotezama istraživanja, istraživanje se provelo u šest faza, pri čemu je korišteno nekoliko znanstvenih metoda. Faze istraživanja prikazuje Slika 1.

U prvoj fazi, korištenjem metoda analize, sinteze i kompilacije, prikupljen je relevantan uzorak podataka vezan za tramvajski promet grada Zagreba. Kako je za potrebe izgradnje modela utvrđeno nepostojanje pouzdanog uzorka povijesnih podataka zadovoljavajuće rezolucije, provelo se izvorno prikupljanje dinamičkih podataka o tramvajskom prometu grada Zagreba na dnevnoj tramvajskoj liniji 4, uzimajući u obzir kontekst istraživanja i ograničenja prikupljanja podataka. Prikupljanje dinamičkih podataka provelo se u poslijepodnevnom vršnom periodu tijekom radnih dana. Osim dinamičkih podataka, za tramvajsku liniju prikupili su se i podatci vezani za udaljenosti, stajališta, semaforizirana raskrižja, tipove trakova po kojima prometuju vozila i zakonsku regulativu.

U drugoj fazi, korištenjem metoda analize, sinteze, dedukcije i indukcije, prikupljeni podatci su sistematizirani i interpretirani. Izračunali su se relevantni parametri za potrebe istraživanja koji uključuju idealno vrijeme putovanja, stvarno vrijeme putovanja te sljedove vozila. Izračunati parametri bili su podvrgnuti deskriptivnoj statističkoj analizi za razumijevanje ponašanja parametara radi uspostave korelacije s faktorima smetnji. Uvidom u karakteristike mreže linija, ponašanje vozača, karakteristike vozila i zakonsku regulativu, modelirano je idealno vrijeme putovanja na segmentima linije.

U trećoj fazi, definirale su se nezavisne varijable kao predstavnici faktora smetnji i neravnomjernosti prijevozne ponude. Korištenjem statističkih metoda, utvrdile su se korelacije između parametara za opisivanje vremena putovanja kao zavisnih varijabli, te faktora smetnji kao nezavisnih varijabli. Također se ispitala korelacija veličina vremena putovanja i varijabli koje opisuju neravnomjernost prijevozne ponude. Matričnom korelacijskom analizom ispitala

se značajnost nezavisnih varijabli te su se eliminirale varijable zanemarivog utjecaja. Korelacijska analiza se izvela na cijeloj tramvajskoj liniji 4, da bi se utvrdilo postojanje korelacija na maksimalnoj količini podataka.



Slika 1. Dijagram toka istraživanja

Izvor: autor

U četvrtoj fazi, korištenjem statističkih metoda i metode modeliranja, uspostavljen je prognostički model vremena putovanja na temelju korelacijske analize. Model se pokušao uspostaviti prema faktorima smetnji i prema neravnomjernosti prijevozne ponude. Modeliranje se izvršilo na smjeru Dubec – Savski most, jer je taj smjer reprezentativniji u razdoblju prikupljanja podataka i čini polovicu ukupno prikupljenih dinamičkih podataka. Pomoću regresijske analize, s nekoliko postupaka odabira varijabli, izvršila se daljnja eliminacija varijabli zanemarivog utjecaja. Za višestruku linearnu regresiju provjerila se dozvoljenost i prikazane su vrijednosti zavisnih i nezavisnih varijabli.

U petoj fazi izvršila se validacija modela korištenjem znanstvenih metoda na smjeru linije 4 Savski most – Dubec, koji čini drugu polovicu prikupljenih dinamičkih podataka. Rezultati validacije iskoristili su se za određivanje minimalnog i maksimalnog vremena putovanja na segmentu, te se provjerio udio vremena putovanja ispod minimalnog vremena putovanja i iznad maksimalnog vremena putovanja.

U šestoj fazi, model se testirao na uzorku za validaciju, smjer Savski most – Dubec, tako da su se odredile vrijednosti vremena putovanja od terminala do terminala, te su se usporedbom sa stvarnim vrijednostima donijeli zaključci o primjenjivosti modela na dugačkim segmentima.

1.5 Ograničenja istraživanja

Zbog pretpostavke utjecaja frekvencije na vrijeme putovanja, segmenti za koje se prikupljalo vrijeme putovanja su kratkih duljina (do 2 kilometra) u odnosu na uobičajene duljine linija od terminala do terminala, koje iznose oko deset kilometara. Budući da model predviđa vrijeme putovanja za bilo koju duljinu segmenta, modeliranje na kratkim segmentima može rezultirati odstupanjima stvarnog uzorka u odnosu na vrijednosti dobivene modeliranjem na dugačkim segmentima.

Zbog nedostupnosti povijesnih podataka dovoljne rezolucije za istraživanje i ograničenja prikupljanja podataka u vremenu i ljudstvu, vremena putovanja dobivala su se putem razlike opaženih vremena prolazaka vozila raskrižjima s tramvajskim prometom, na kojima dolazi do promjene frekvencije vozila. Tako prikupljanje podataka nije moglo obuhvatiti vrijeme zadržavanja na stajalištima, pa ne postoji razdioba na vremena vožnje i vremena zadržavanja na stajalištima, već se oba vremena podrazumijevaju pod vremenom putovanja. Za vrijeme zadržavanja na stajalištu se podrazumijeva da prijevozna potražnja utječe na vrijeme zadržavanja na stajalištima pa su se klasifikacijom stajališta na stajališta s velikom i stajališta s malom prijevoznom potražnjom odredila jedinstvena vremena zadržavanja na stajalištima u ovisnosti o tipu stajališta.

Modeliranje idealnog vremena putovanja podrazumijeva da postoje jedinstveni obrasci vožnje koji rezultiraju karakterističnim brzinama prometovanja u idealnom slučaju, neovisno o ponašanju vozača. Također, podrazumijeva se postojanje jedinstvenih obrazaca ubrzanja i usporjenja vozila bez obzira na karakteristike voznog parka, koji je u slučaju promatranog područja istraživanja heterogen.

1.6 Struktura doktorskog rada

Doktorski rad sastoji se od osam poglavlja, popisa literature, popisa slika, popisa tablica i priloga. Glavna poglavlja rada su:

- poglavlje 1 – „Uvod“
- poglavlje 2 – „Značaj vremena putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu“
- poglavlje 3 – „Prikupljanje i obrada podataka“
- poglavlje 4 – „Utvrđivanje relevantnih veličina za modeliranje vremena putovanja“
- poglavlje 5 – „Konstrukcija prognostičkog modela vremena putovanja“
- poglavlje 6 – „Validacija modela“
- poglavlje 7 – „Testiranje modela između terminala“
- poglavlje 8 – „Zaključak“.

Prvo poglavlje je uvodni dio rada u kojem je opisana problematika istraživanja, cilj i svrha doktorskog rada, hipoteze i znanstveni doprinos rada. Poznavanje istraživačke materije potkrijepljeno je pregledom prethodnih istraživanja. Na kraju poglavlja su navedene i objašnjene, kroz pregled faza istraživanja, istraživačke metode koje su se koristile u radu.

Drugo poglavlje je pregled relevantnih značajki vremena putovanja u javnom gradskom prijevozu u kontekstu istraživanja. Na početku poglavlja su predloženi elementi prijevoznog procesa u javnom gradskom prijevozu vezani uz vrijeme putovanja. Potom je obrazloženo odudaranje i varijabilnost vremena putovanja, uz statističko opisivanje, utjecaj na putnike, faktore smetnji koji ih stvaraju, te mjere koje ih smanjuju.

Treće poglavlje detaljno opisuje prikupljanje i obradu podataka. Na početku poglavlja se opisuje šire i užje područje obuhvata istraživanja, nakon čega slijedi način dobivanja parametara prijevoznog procesa i određivanja idealnog vremena putovanja.

U četvrtom poglavlju utvrđuju se zavisne varijable za opisivanje vremena putovanja, a potom nezavisne varijable za opisivanje faktora smetnji i neravnomjernosti prijevozne ponude. Pojašnjena je razdioba zavisnih i nezavisnih varijabli prema segmentima. Na kraju poglavlja prikazana je korelacijska analiza između veličina koje opisuju zavisne i nezavisne varijable, kako bi se utvrdila značajnost nezavisnih varijabli.

Peto poglavlje, konstrukcija prognostičkog modela vremena putovanja prikazuje način uspostave modela višestrukom linearnom regresijom te se provjerava opravdanost njezine

primjene za modeliranje. Vrijeme putovanja modelirano je faktorima smetnji i neravnomjernošću prijevozne ponude. Za dobivene modele, prikazani su rasponi vrijednosti zavisnih i nezavisnih varijabli.

Šesto poglavlje predstavlja validaciju modela s prikazom metodologije i rezultata. Validacija modela se koristi za određivanje graničnih vrijednosti vremena putovanja u prijevoznom procesu.

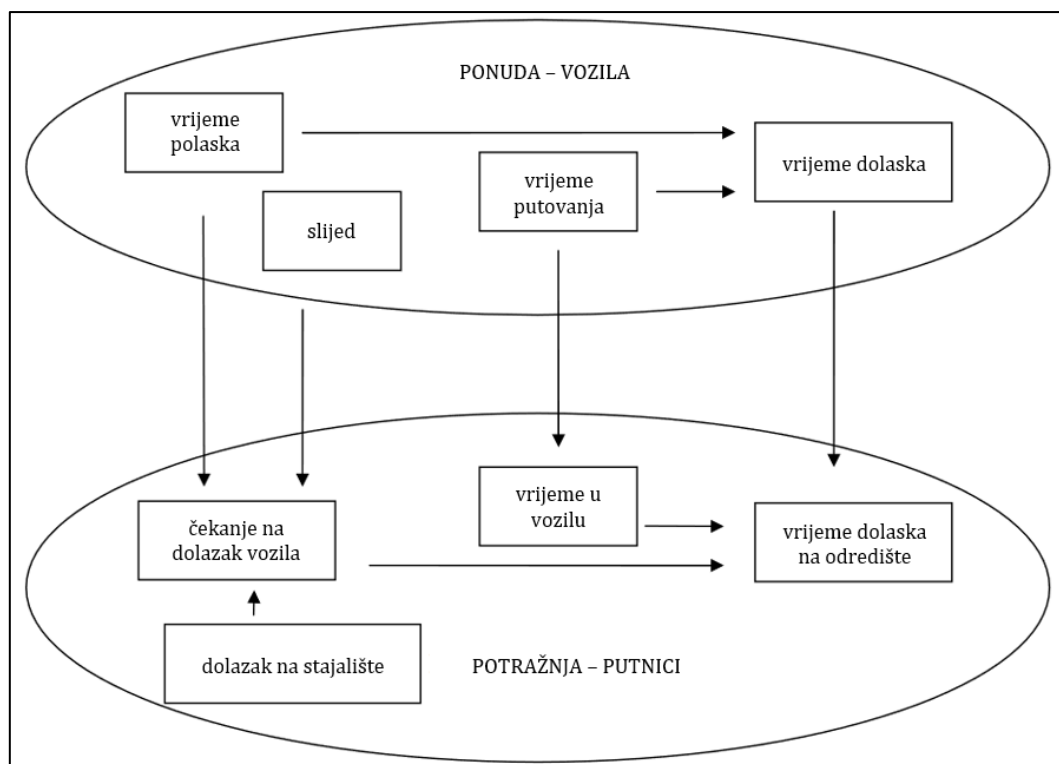
U sedmom poglavlju, korištenjem rezultata dobivenih modeliranjem i validacijom, model se testira između terminala tako da se modelirane vrijednosti uspoređuju s poznatim vrijednostima u praksi kako bi se donijeli zaključci o prednostima i nedostacima modela na dugačkim segmentima.

Osmo poglavlje donosi zaključna razmatranja, u kojima se prikazuje pregled provedenog istraživanja, opis dobivenih rezultata i karakteristike uspostavljenog modela, uz prikaz znanstvenog i aplikativnog doprinosa rada. Također su prikazane mogućnosti primjene modela, prednosti i nedostaci te smjernice za daljnja istraživanja.

2 ZNAČAJ VREMENA PUTOVANJA U MASOVNOM JAVNOM GRADSKOM PRIJEVOZU

Prijevozni je proces u javnom prijevozu, kao i općeniti prometni proces, proizvodni proces u kojemu postoje ulazni parametri, izlazni parametri, zahtjevi i poremećaji. U javnom gradskom prijevozu prijevozni proces je skup operacija koji omogućuje korisnicima putovati od izvorišta do odredišta u određenom vremenskom okviru te su njegovi elementi sljedeći:

- ulazni parametri su mreža linija koja sadrži infrastrukturu, linije, vozni red, vozila i vozače
- izlazni parametri su putovanja vozila od stajališta do stajališta te vremena polazaka i dolazaka
- poremećaji su ljudski faktor (ponašanje vozača i putnika), meteorološki uvjeti i ostali sudionici u prometu (javni prijevoz ili ostali promet).



Slika 2. Interakcije između elemenata prijevozne ponude i potražnje u javnom gradskom prijevozu
Izvor: prilagodio autor prema [27]

U idealnom okruženju ne postoje poremećaji ili ljudski faktor, no u praksi oni su čest slučaj, posebice jer mreža linija uličnog javnoga gradskoga prijevoza putnika predstavlja jedan od najsloženijih prometnih sustava. Zbog poremećaja, stvarni izlazni parametri nisu uvijek jednaki planiranim, te nastaju varijabilnosti, koje se definiraju kao razdiobe izlaznih parametara i čine

prijevozni proces nepravilnim. Ako su varijabilnosti u prihvatljivim granicama, prijevozni proces je pouzdan, no nakon određene granice, proces se mijenja iz pouzdanog u nepouzdan s negativnim posljedicama.

Varijabilnosti u prijevoznom procesu posljedica su međusobnih interakcija prijevozne ponude i potražnje, kao što prikazuje Slika 2. Primjerice, vrijeme čekanja na dolazak vozila je određeno slijedom i stvarnim polaskom vozila s izvorišnog terminala. Također, vrijeme provedeno u vozilu je određeno vremenom putovanja vozila i vremenom polaska s izvorišnog terminala, te navedeno u konačnici određuje trenutak dolaska na odredište.

Prijevozni proces se može promotriti s tri razine – to su [28]:

- strateška razina, na kojoj se vrši izgradnja mreže, te se procjenjuje potražnja, budžet i linije s pripadajućim frekvencijama
- taktička razina, na kojoj se određuje vozni red, dodjela vozila i raspored vozača
- operativna razina, na kojoj se nastoje ukloniti poremećaji prijevoznog procesa.

Strateška i taktička razina predstavljaju planerski dio prijevoznog procesa, odnosno gdje su poduzete radnje preventivnog karaktera, dok je operativna razina korektivnog karaktera. Karakteristike svih razina prikazuje Tablica 1.

Tablica 1. Karakteristike triju razina upravljanja u javnom gradskom prijevozu

razina	vremenski okvir	ulazni parametri	izlazni parametri	dionici
strateška	više od dvije godine	prometna politika, povijesni trendovi, postojeća mreža, socio-ekonomski trendovi	infrastrukturna mreža, mreža linija, kapaciteti	prijevoznik, lokalna uprava
taktička	manje od dvije godine	mreža linija, ograničenja voznog osoblja i voznog parka	raspored vozača, raspored vozila, vozni red	prijevoznik, sindikati
operativna	u realnom vremenu	mreža, vozni red, vozno osoblje, vozni park	putovanja u prostoru i vremenu	putnici, vozači, dispečeri

Izvor: prilagodio autor prema [27]

Uvidjevši zadnjih nekoliko desetljeća da postojeći prometni sustav nije dugoročno održiv, Europska komisija donijela je nekoliko strateških dokumenata u kojima ističe smjer razvoja prometnog sustava u vremenskim okvirima do 2030. i 2050. Za prometni sustav u gradovima te javni gradski prijevoz najvažniji su:

- Bijela knjiga o prometnoj politici iz 2001. [29]
- Zelena knjiga: Ususret novoj mobilnosti u gradovima iz 2007. [30]
- Akcijski plan urbane mobilnosti iz 2009. [31]

- Bijela Knjiga: Put prema zajedničkom europskom prometnom području iz 2011. [32]
- Paket mjera urbane mobilnosti iz 2013. [33].

Tijekom izrade voznog reda teži se pružanju usluge javnog prijevoza orijentirane prema korisnicima, stoga postoje tri glavna principa izrade voznog reda: zadovoljenje prijevozne potražnje, smanjenje vremena čekanja na dolazak vozila i izbjegavanje visoke zauzetosti vozila [34]. Nakon što se vozni red definira za svaku liniju na mreži, te vozila krenu prometovati na linijama, stvarna usluga javnoga gradskoga prijevoza može biti više ili manje uspješna, ovisno o usklađenosti prijevozne ponude i potražnje. Uspješnost sustava javnoga gradskoga prijevoza naziva se kvalitetom usluge, koja se može mjeriti s aspekata korisnika, prijevoznika ili lokalne zajednice. Primjerice, za dobivanje pokazatelja kvalitete usluge u javnom gradskom prijevozu, od interesa može biti sljedeće:

- usklađenost vremena putovanja s planiranim polascima prema voznom redu
- granice u kojima se kreće zauzetost vozila, odnosno raspodjela zauzetosti po prijednim kolnim kilometrima
- udio putovanja u kojima je udobnost vožnje s aspekta zauzetosti vozila nedovoljna za putnike
- granice u kojima se kreće očekivano vrijeme čekanja na dolazak vozila na stajalištima
- prilagođenost mreže linija željama putnika uz broj izravnih putovanja, odnosno vrijednosti vremena pješaćenja putnika do stajališta
- dostupnost putovanja svim korisnicima s obzirom na položaj mreže i mogućnosti za osobe s invaliditetom
- optimalnost brzine putovanja, kako bi javni gradski prijevoz privukao što više korisnika.

Literatura koja se bavi kvalitetom usluge u javnom gradskom prijevozu dolazi većinom iz Europske unije i Sjedinjenih Američkih Država – primjerice, *Transit Capacity and Quality of Service Manual* [35], *Handbook for Measuring Customer Satisfaction and Service Quality* [36] ili *Transportation – Logistics and services – Public passenger transport – Service quality definition, targeting and measurement* [37].

Prema priručniku *Handbook for Measuring Customer Satisfaction and Service Quality* [36], postoji nekoliko kategorija za mjerenje kvalitete usluge:

- općenite karakteristike: frekvencija, prilagođenost voznom redu, vrijeme rada, pokrivenost područja mrežom linija, dostupnost informacija, vrste karata, cijene karata, mreža za

prodaju karata, ponašanje voznog osoblja, postojanje trakova za javni prijevoz, briga za okoliš

- stajališta i terminali: duljina pješačenja, dostupnost informacija na stajalištima i terminalima, opremljenost, sigurnost
- vozila: uvjeti u vozilima, čistoća vozila, ponašanje vozača, dostupnost informacija unutar vozila, dostupnost za osobe s poteškoćama u kretanju
- presjedanja: udaljenost između mjesta presjedanja, čekanje na dolazak vozila, dostupnost informacija u točkama presjedanja.

Prema priručniku *Transit Capacity and Quality of Service Manual, 3rd Edition* [35], postoje tri odrednice kvalitete usluge javnog prijevoza:

- kapacitet, kojim se opisuje koliko ljudi i vozila može proći kroz određenu točku mreže unutar određenog vremenskog perioda pod određenim uvjetima (izuzimajući neočekivane zastoje, rizične situacije ili ograničenja odvijanja prometa)
- brzina, kojom se opisuje koliko se brzo ljudi ili vozila mogu kretati s jednog mjesta na drugo
- pouzdanost, kojom se opisuje koliko dobro se može u stvarnim uvjetima održavati vozni red.

Pouzdanost usluge javnoga gradskoga prijevoza je razina uspješnosti koju stvarna usluga javnog prijevoza pokazuje kada ju se usporedi s planiranim voznim redom iz perspektive korisnika usluge [27]. Tradicionalno, pouzdanost usluge se promatra kroz dvije glavne kategorije:

- točnost – koliko vremena dolaska na određenu točku linije odgovaraju voznom redu
- redovitost – koliko sljedovi pri dolasku na određenu točku linije odgovaraju voznom redu [35].

I točnost i redovitost značajni su za pouzdanost usluge, kvalitetu usluge, atraktivnost masovnoga javnoga gradskoga prijevoza i modalnu raspodjelu gradskih putovanja. Pouzdanost usluge može se promatrati u funkciji jedne, više ili svih komponenti vremena putovanja putnika:

- vremena pješačenja od izvorišta do mreže linija, od mreže linija do odredišta ili radi presjedanja
- vremena čekanja na dolazak vozila na stajalištu

- vremena provedenog u vozilu, koje obuhvaća vremena vožnje između stajališta i vremena zadržavanja na stajalištima na ruti putnika.

Vrijeme pješaćenja u mreži ovisi o udaljenosti pješaćenja. U istraživanju [38], pregledom 41 relevantnog istraživanja na zadanu temu, ustanovljeno je da se u autobusnom i željezničkom prometu definicija graničnih vrijednosti od 400 m ili 800 m [39] može pokazati nepouzdanom, jer u različitim područjima na svijetu će radijus obuhvata (eng. *catchment area*) rezultirati različitim pješačkim udaljenostima zbog različitih karakteristika infrastrukture. Faktori koji utječu na pješačku udaljenost se mogu razvrstati u faktore prijevozne ponude (razmatraju potrebu za pješaćenjem), faktore prijevozne potražnje (razmatraju želju putnika za pješaćenjem) i faktore koji su pod utjecajem lokalne zajednice ili prijevoznika. Ti faktori su način korištenja zemljišta, rute linija javnog prijevoza, udaljenost između stajališta, kvaliteta infrastrukture, sigurnost, frekvencija vozila javnog prijevoza, udio presjedanja, udaljenost putovanja, tip javnog prijevoza, alternativne mogućnosti putovanja, mentalitet, svrha putovanja, fizičke sposobnosti putnika i meteorološki uvjeti. U istraživanju [40] pokazano je da su za pješačku udaljenost dominantni faktori prijevozne ponude, te da najveći utjecaj na pješačku udaljenost ima tip javnog prijevoza, tako da će putnici pristati pješaćiti na većim udaljenostima radi korištenja željeznice nego autobusa, što je povezano s prosječnom udaljenošću između stajališta, koja je uobičajeno u željezničkom prometu veća. Također, željeznička stajališta su uobičajeno bolje opremljena od autobusnih, što je značajno putnicima.

Vrijeme čekanja na dolazak vozila ovisi o slijedu vozila na liniji ili zajedničkom slijedu vozila na linijama koje putnik čeka i neravnomjernosti vremena putovanja ili slijeda vozila. Neravnomjeran slijed vozila često rezultira nagomilavanjem vozila i neravnomjernom zauzetošću vozila.

Vrijeme vožnje između stajališta ovisi o tipu izdvojenosti sustava javnoga gradskoga prijevoza, postojanju prioriteta prolaska vozila kroz raskrižja te neravnomjernosti vremena putovanja zbog nagomilavanja vozila. Također, vrijeme vožnje je pod utjecajem karakteristika vozila vezanih za ubrzanje, brzinu te ponašanje vozača.

Budući da svaka etapa putovanja sadrži vlastitu problematiku, kvaliteta usluge u javnom gradskom prijevozu putnika je kompleksna. Stoga, ovisno o tipu mreže linija javnoga gradskoga prijevoza, odgovarajući pristup može se fokusirati na istraživanje samo jednog indikatora, više njih ili se koristiti generaliziranim troškom ili vremenom putovanja. Razlog uzimanja u obzir samo jednog indikatora može biti činjenica kako se u stvarnoj mreži linija na

taj indikator jedino može znatno utjecati, ili su za taj indikator dostupni podatci, ili je taj indikator najbolji za opisivanje kvalitete usluge za promatranu mrežu linija.

U većem broju istraživanja u literaturi, pouzdanost usluge javnog prijevoza se promatra iz perspektive vremena čekanja na dolazak vozila na stajalištima, tako da se istražuje broj vozila koja su stigla na stajalište na vrijeme ili ravnomjernost slijeda vozila, gdje su zaključci usmjereni na povećanje prosječnog vremena čekanja na dolazak vozila kako raste neravnomjernost sljedova vozila i neravnomjernost dolazaka putnika na stajališta [41]. Predviđanje vremena dolaska vozila na stajališta je bitno, jer se putnicima na taj način smanjuje nesigurnost oko procjene vremena dolaska na odredište i smanjuju im se nesigurnosti prilikom odabira odgovarajuće linije [42].

Kako su vremena putovanja neizbježno podložna varijacijama, implementacija sustava za informiranje putnika u realnom vremenu je poželjna jer se poboljšava dojam javnoga gradskoga prijevoza putnicima [43]. U pravilu, i literatura i prijevoznici smatraju da je pružanje informacija o javnom prijevozu u realnom vremenu korisno, pogotovo kada se informacije o dolasku vozila ažuriraju svakih nekoliko minuta na temelju lokacije vozila dobivene putem sustava za određivanje geografske lokacije vozila [44]. Također, pokazalo se da su putnici anksiozniji kada je informacija o dolasku vozila na stajalište neprecizna, nego kada uopće nemaju informaciju o dolasku vozila [43]. Rezultati istraživanja na istu temu potvrdili su kako, primjerice, putnici čekaju do dvije minute manje zbog odluka na temelju informacija na stajalištu [45], ili postoji povećanje broja vožnji do 2 % zbog uvođenja sustava [46]. U istraživanju [47] pokazalo se da putnici imaju tendenciju smanjenja dojma vremena čekanja na dolazak vozila zbog postojanja zaslona na stajalištu za 20 %, jer putnici negativno percipiraju to vrijeme.

Pouzdanost usluge, osim u tradicionalnom smislu, može se promatrati i u širem smislu od točnosti i redovitosti, odnosno u literaturi postoji nekoliko definicija pouzdanosti usluge, ovisno o tome koja se komponenta smatra prioritetnom s obzirom na mrežu linija. Tako primjerice, postoje istraživanja koja se bave povezanošću transfera, gdje se postavljaju pitanja vjerojatnosti postojanja veza na točkama na mreži, kao što je u istraživanju [48]. U istraživanju [49] obuhvatile su se tri kategorije: varijabilnost vremena putovanja, varijabilnost slijeda i varijabilnost vremena čekanja na dolazak vozila, što su uobičajeni parametri. No kod tih parametara, potrebno je naglasiti kako fokusiranje na njih može dovesti svejedno do nekvalitetne usluge javnog prijevoza, budući da operativna brzina može imati niske vrijednosti

unatoč kvalitetnom voznom redu.

Osim vremena čekanja na dolazak vozila, recentna istraživanja za kvalitetu usluge u javnom prijevozu često imaju fokus na subjektivnom doživljaju putnika. Promatranje se vrši putem sljedeća tri pristupa [50]:

- zadovoljstvo korisnika (eng. *customer satisfaction*) – proučava razinu do koje se usluga prilagodila očekivanjima korisnika
- atraktivnost za korisnike (eng. *customer loyalty*) – proučava razinu do koje se usluga prilagodila za dobar odnos prema korisnicima u budućnosti
- usporedba s osnovnim pokazateljem (eng. *benchmarking*) – uspoređuju se indikatori u različitim vremenskim okvirima, linijama ili prijevoznicima.

U takvim se istraživanjima autori koriste generaliziranim troškom putovanja ili generaliziranim vremenom putovanja kao indikatorima tako da se svakom dijelu putovanja u javnom prijevozu dodjeljuju koeficijenti prema prosječnom subjektivnom doživljaju raznih etapa putovanja od strane putnika. Tada se generaliziranim troškom nastoji opisati modalna raspodjela gradskih putovanja. Također se koristi pojam elasticiteta kojim se opisuje koliko je vjerojatna modalna preraspodjela gradskih putovanja ukoliko se promijeni neka od varijabli koje utječu na generalizirani trošak (primjerice, cijena goriva ili vozarine u javnom gradskom prijevozu).

Za preraspodjelu gradskih putovanja s osobnog automobila na javni gradski prijevoz, ključne su mjere upravljanja prijevoznom potražnjom koje su u manjoj ili većoj povezanosti sa subjektivnim doživljajem putnika. Pregled takvih strategija i mjera upravljanja prijevoznom potražnjom predložen je u [51], uz uspostavu modela održive mobilnosti grada srednje veličine, čija je funkcionalnost dokazana evaluacijom na primjeru grada iz stvarnog okruženja.

Problem izrade voznog reda u masovnom javnom gradskom prijevozu pripada kategoriji cjelobrojnih nelinearnih i linearnih optimizacijskih problema. Budući da se linearni problemi mogu riješiti u polinomijalnom vremenu neovisno o broju varijabli, oni su jednostavniji za rješavanje od nelinearnih problema, čiji je glavni problem nagli porast vremena rješavanja s porastom broja varijabli. Stoga se neki problemi mogu pretvoriti iz nelinearnih u linearne mijenjanjem funkcija, što može smanjiti vrijeme rješavanja, no i preciznost algoritma [52]. S cjelobrojnim varijablama kao što je broj vozila problemi postaju kompleksniji, jer se algoritam pronalaska rješenja više ne može osloniti na kontinuirane promjene vrijednosti funkcije cilja u potrazi za lokalnim optimumom.

2.1 Obilježja javnoga gradskoga prijevoza u istraživanju

Područje istraživanja je masovni javni gradski prijevoz putnika, koji se obavlja autobusima, trolejbusima i tramvajima, za kojeg je karakteristično sljedeće:

- izdvojenost mreže linija prema [2] pripada u najlošiju kategoriju, gdje odvijanje prometa može biti pod utjecajem semaforiziranih raskrižja i ostalih sudionika u prometu kao što su vozila i pješaci, pa je vrijeme vožnje (vrijeme kretanja između stajališta) podložno značajnim nepravilnostima
- postojeći vozni red, zbog najslabije kategorije izdvojenosti, pa time slabe pouzdanosti, zadan je samo putem vremena polaska s izvorišnog terminusa; vrijeme obrta na liniji, koje služi za izradu voznog reda, planira se na temelju ukupnog prosječnog vremena putovanja prema iskustvenoj formuli [53], u kojoj se podrazumijeva da će poremećaji vremena putovanja biti maksimalno deset posto prosječnog vremena putovanja, a nužno (minimalno) vrijeme odmora vozača na terminalima je dvije minute
- slijed vozila na linijama i na mreži pripada u kategoriju malih sljedova vozila (manji od 10 minuta po vozilu), odnosno frekvencija je dovoljno velika (veća od 6 vozila na sat), što podrazumijeva nasumičan dolazak putnika na stajališta; prema tome, putnici ne razmatraju vozni red tijekom planiranja svojih putovanja, već sami procjenjuju vlastito vrijeme putovanja; u takvim uvjetima vjerojatnost nagomilavanja vozila na liniji i na mreži je znatna, a vozila javnog prijevoza međusobno se ne mogu pretjecati
- promatraju se vršni periodi, za koje je karakteristična velika prijevozna potražnja, te se podrazumijeva da zauzetost vozila i dizajn unutarnjeg prostora vozila imaju znatan utjecaj na vrijeme zadržavanja vozila na stajalištu
- poznata je struktura raspoloživog voznog parka s brojem vozila svakog tipa vozila
- broj vozila na linijama je konstantan tijekom promatranog razdoblja, a vozni red se izrađuje za svako karakteristično razdoblje tijekom dana
- trase linija su unaprijed definirane, te ih nije moguće mijenjati
- iako postoje oznake za ulazna i izlazna vrata na vozilima, putnici koriste bilo koja vrata za ulazi i izlaz
- naplate karata se obavlja fizički ili elektronički na uređajima u vozilu
- stajališta se nalaze na pločniku te se vozila uvijek zaustavljaju na stajalištu.

2.2 Parametri vremena putovanja

Na taktičkoj razini, vozni red je u potpunosti definiran na mreži linija ukoliko su definirane sljedeće varijable:

- za svaki tip vozila t na svakoj liniji: broj vozila tog tipa (N_t) i sljed vozila tog tipa (i_t);
- za svaki smjer d na svakoj liniji: vrijeme poluobrta smjera (T_{Od}).

Vrijeme poluobrta je vrijeme koje započinje polaskom s izvorišnog terminusa (mjestu gdje se vozilo zadržava radi prilagodbe voznom redu koje može i ne mora biti stajalište), a završava polaskom s odredišnog terminusa. Linije javnog prijevoza imaju najčešće dva vremena poluobrta – po jedno za svaki smjer, a njihov zbroj daje vrijeme obrta na liniji. Broj vozila na liniji je ukupan broj vozila koji prometuje na liniji za svaki tip vozila, a sljed je vrijeme od polaska prethodnog vozila s terminusa do polaska promatranog tipa vozila također za svaki tip vozila. Navedeno se može prikazati jednačbom:

$$\sum_d T_{Od} = \sum_t N_t i_t \quad (1)$$

T_{Od}	vrijeme poluobrta smjera d na liniji
N_t	broj vozila tipa t na liniji
i_t	sljed vozila tipa t na liniji

Izvor: [53]

Iz jednačbe vidi se kako zbroj umnožaka broja vozila i sljeda za svaki tip vozila mora biti jednak zbroju svih vremena poluobrta na liniji za sve smjerove, odnosno i lijeva i desna strana jednačbe je vrijeme obrta na liniji. Određene varijable voznog reda moraju ili trebaju biti cjelobrojne, zbog pojednostavljenja polazaka za vozače ili uvođenja satnog voznog reda radi pojednostavljenja za putnike. Broj vozila je cjelobrojan.

Vrijeme poluobrta se sastoji od sljedećih vremena:

- vremena putovanja T_{Pd} , koje je definirano kao vrijeme od polaska vozila s izvorišnog terminusa do dolaska vozila na odredišni terminus – sastoji se od ukupnog vremena zadržavanja na stajalištima T_{Sd} (vremena koja su vozila provela u mirovanju na stajalištu radi izmjene putnika) i ukupnog vremena vožnje T_{Vd} (vremena koje preostane kada se oduzme ukupno vrijeme zadržavanja na stajalištima od vremena putovanja)
- vremena zadržavanja na odredišnom terminusu T_{Td} (vremena koje preostane kada se od vremena poluobrta oduzme vrijeme putovanja).

Prema tome, odnosi između navedenih vremena opisuju se jednačbom:

$$T_{Od} = T_{Pd} + T_{Td} = T_{Vd} + T_{Sd} + T_{Td} \quad (2)$$

T_{Od}	vrijeme poluobrta smjera d na liniji
T_{Pd}	vrijeme putovanja smjera d na liniji
T_{Td}	vrijeme zadržavanja na odredišnom terminusu smjera d na liniji
T_{Vd}	ukupno vrijeme smjera d na liniji izgubljeno na vožnjama
T_{Sd}	ukupno vrijeme smjera d na liniji izgubljeno na zadržavanjima na stajalištima

Izvor: [53]

Kada se mreža linija promatra iz planerske perspektive, procjenjuje se koliko će biti vrijeme putovanja, odnosno njegova kritična vrijednost (vrijednost ispod koje će biti većina uzoraka polazaka vozila na smjeru linije). Na tu vrijednost dodaje se minimalna vrijednost koja se daje vozačima za odmor te se tako dobiva vrijeme poluobrta na temelju kojeg će se izraditi vozni red. Jednadžba koja se često može pronaći u literaturi za planiranje vremena zadržavanja na odredišnom terminusu je:

$$\sum_d T_{Td} = 10\% \sum_d T_{Pd} + 2' \quad (3)$$

T_{Td}	vrijeme zadržavanja na odredišnom terminusu smjera d na liniji
T_{Pd}	vrijeme putovanja smjera d na liniji

Izvor: [53]

Kada se vozila puste u promet, prijevozni proces se promatra na operativnoj razini, gdje je vrijeme poluobrta zadano, vrijeme putovanja dobije se iz stvarnih podataka, a vrijeme zadržavanja na odredišnom terminusu preuzima ulogu kompenzacije neravnomjernosti prijevoznog procesa. U tom slučaju, postoje tri mogućnosti raspona vremena zadržavanja na odredišnom terminusu:

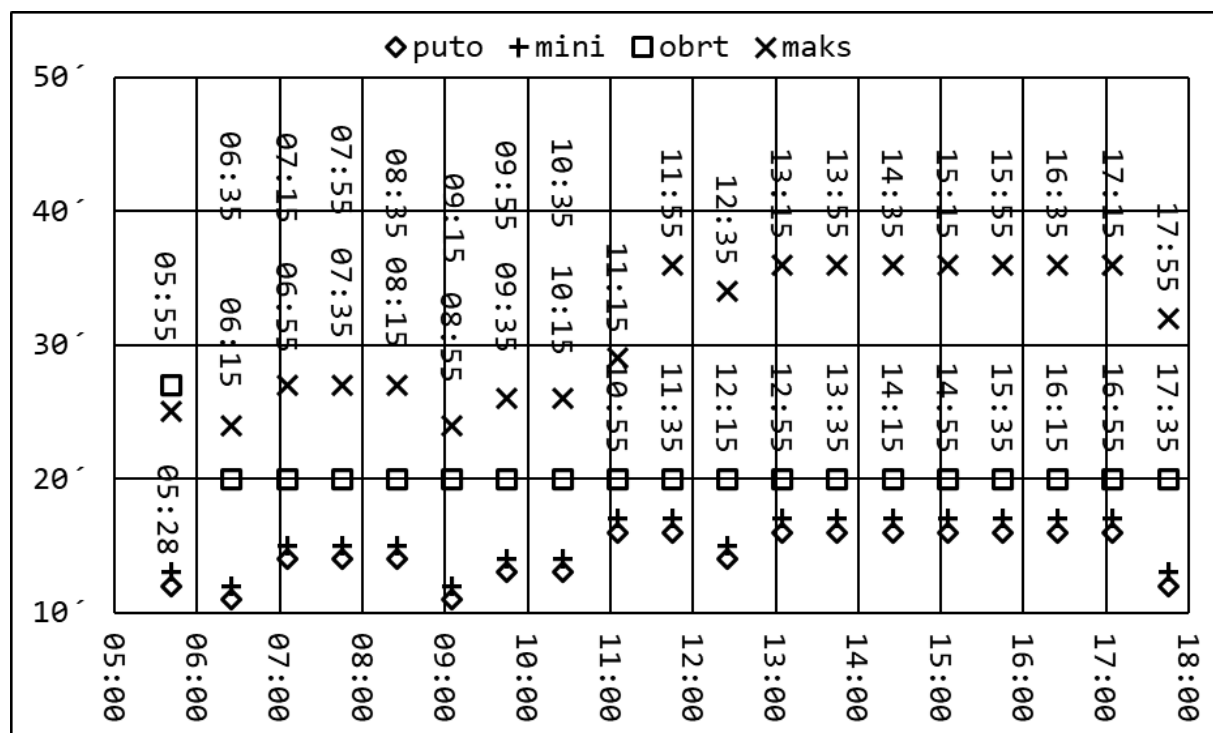
- ako je vrijeme često negativno, vozači često kasne sa sljedećim polaskom, odnosno vrijeme odmora vozača je prekratko
- ako je vrijeme često pozitivno s relativno velikim vrijednostima u odnosu na vrijeme poluobrta, vrijeme odmora vozača je predugo
- ako je vrijeme često pozitivno s relativno malim vrijednostima u odnosu na vrijeme poluobrta, vozni red je optimalan.

Primjer ponašanja vremena u stvarnom prijevoznom procesu prikazuje Slika 3. Radi se o autobusnoj liniji 212 Dubec – Sesvete, u istočnom dijelu Zagreba. Promatrajući liniju kroz karakteristično razdoblje od 06:00 do 18:00 tijekom radnog dana na trasi Sesvete – Dubec, uočava se da je vrijeme poluobrta zadano voznim redom (označeno kvadratićem) konstantno, te da je slijed polazaka s terminala zadan voznim redom također konstantan i iznosi 20' / v (trenutci ucrtani u dijagramu su trenutak polaska s izvorišnog terminusa i trenutak polaska s

odredišnog terminusa, pa je razlika tih vremena vrijeme poluobrtu od 20 ´).

Da bi vrijeme odmora vozača na terminalu bilo optimalno, vrijeme putovanja mora biti u optimalnom odnosu s vremenom poluobrtu. Razlog tome je pojava teoretskih donjih i gornjih granica vremena poluobrtu koje proizlaze iz vremena putovanja označenog nakošenim kvadratićem:

- donja granica („mini“) je posljedica činjenice što vozači, pri dolasku na odredišni terminal, moraju imati uključeno minimalno vrijeme odmora prije nastavka kretanja u suprotnom smjeru – na slici je prikazana križićem i mora vrijediti kako je minimalno vrijeme poluobrtu smjera vrijeme putovanja smjera uvećano za minimalno vrijeme odmora vozača na odredišnom terminalu (koje na slici iznosi jednu minutu);
- gornja granica („maks“) je posljedica sprječavanja zagušenja terminala, i ona je jednaka umnošku slijeda i broja perona na odredišnom terminalu uvećanog za vrijeme putovanja.



Slika 3. Detaljni prikaz vremena poluobrtu i putovanja u jednom danu na primjeru autobusne linije
Izvor: [54]

Donja granica vremena poluobrtu, stvarno vrijeme poluobrtu i gornja granica vremena poluobrtu stoga moraju biti u vezi:

$$T_{Md} + t \leq T_{Od} \leq N_d i + T_{md} \quad (4)$$

T_{Md} maksimalno vrijeme putovanja na liniji
 t zadano minimalno vrijeme odmora vozača na terminalima
 T_{Od} vrijeme poluobrtu smjera d na liniji zadano voznim redom

N_d	broj perona na odredišnom terminalu smjera d
i	sljed vozila na liniji
T_{md}	minimalno vrijeme putovanja na liniji

Izvor: [53]

Iz jednadžbe se uočavaju dvije nepovoljnosti koje mogu nastati za vozni red u prijevoznom procesu:

- u nepovoljnom slučaju u kojemu je donja granica manja od gornje granice, vrijeme poluobrta može se naći ispod donje granice (kada je vrijeme putovanja predugo) ili iznad gornje granice (kada je kombinacija slijeda vozila, broja perona ili vremena putovanja premala)
- u eliminacijskom slučaju, gornja granica je ispod donje granice, te se za liniju vozni red ne može izraditi.

Zato je u masovnom javnom gradskom prijevozu izuzetno bitno što manje odudaranje i varijabilnost vremena putovanja kada se promatra između izvorišnog i odredišnog terminala, jer se tada može izraditi stabilan vozni red fleksibilan za neravnomjernosti. Poželjna vrijednost vremena putovanja u praksi jest 90% vremena poluobrta, odnosno prosječno vrijeme zadržavanja na terminalu je tada 10% vremena poluobrta.

2.3 Odudaranje i varijabilnost vremena putovanja

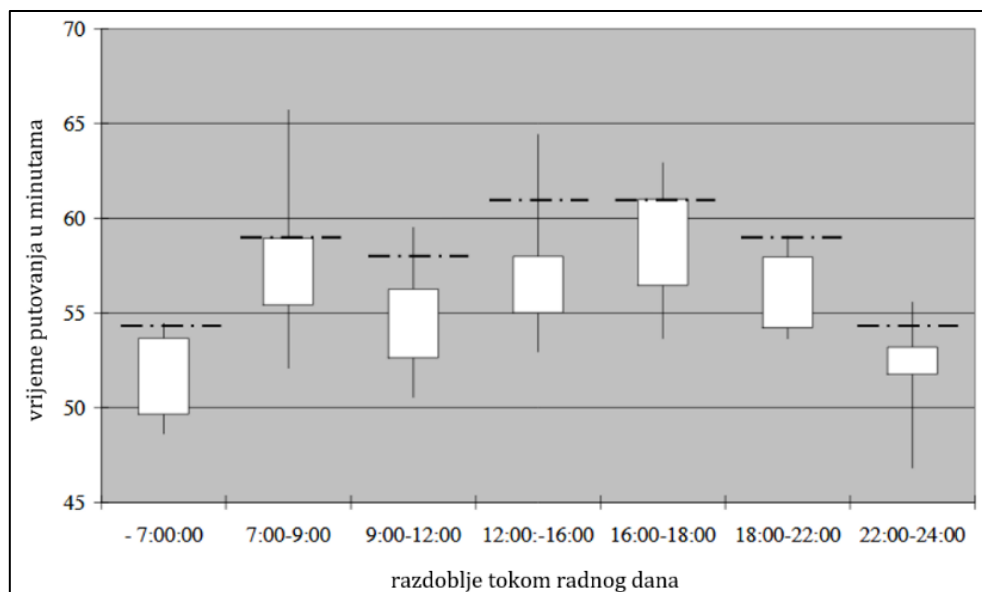
Vremena vožnje i vremena zadržavanja vozila na stajalištima su pod utjecajem različitih faktora: prometnih tokova, ulazaka i izlazaka putnika na stajalištima, semaforiziranih raskrižja, vremenskih uvjeta, pješačkih prijelaza, održavanja prometnica, prometnih incidenata i nesreća te ponašanja vozača [55], koji čine vremena vožnje i zadržavanja na stajalištima neravnomjernima. Slučaj idealne mreže linija javnog prijevoza, kod koje je vrijeme putovanja minimalno i konstantno, jest nemoguć ako je mreža linija pod utjecajem ulične mreže na kojoj se nalazi. Zbog toga se javljaju dvije posljedice za vrijeme putovanja:

- srednje vrijeme putovanja na promatranom segmentu nije jednako minimalnom (idealnom), nego je veće – ova pojava naziva se odudaranje vremena putovanja
- minimalne i maksimalne vrijednosti vremena putovanja na promatranom segmentu nisu jednake srednjoj vrijednosti, nego su manje, odnosno veće – ova pojava naziva se varijabilnost vremena putovanja.

Razdiobe vremena putovanja mogu se prikazivati za razna razdoblja, ovisno o potrebi – za mjesec u godini, dane u tjednu ili razdoblja tijekom dana. Slika 4 je tipičan primjer prikaza

razdiobe vremena putovanja u razdobljima tijekom radnog dana, gdje su bijelim područjem obuhvaćena vremena putovanja od 25-tog do 75-tog percentila uzorka (interkvartilni raspon). Iz slike se vidi da su veće vrijednosti vremena putovanja tipične za jutarnje i poslijepodnevne vršne periode, dok je raspon za poslijepodnevni period veći od jutarnjeg jer putnici moraju stići točno na vrijeme na posao ujutro, no ne i na lokaciju stanovanja poslijepodne. Prema [56], postoje tri načina promatranja varijabilnosti vremena putovanja:

- prema vozilima – promatra se varijabilnost prema pojedinim vozilima koja prometuju na istoj liniji u istom vremenskom periodu; varijabilnost se javlja zbog vremena čekanja na raskrižjima, konflikata s pješacima i vozača koji imaju različite stilove vožnje
- prema razdobljima – promatra se varijabilnost prema pojedinim vozilima na istoj liniji, no u različitim razdobljima u jednom danu; varijabilnost se javlja zbog varijacije prijevozne potražnje, prometnih nesreća i meteoroloških uvjeta
- prema danima – promatra se varijabilnost istih linija u isto vrijeme, no u različite dane; varijabilnost se javlja zbog neravnomjerne prijevozne potražnje, ponašanja vozača, aktivnosti u prometu, meteoroloških uvjeta i prometnih nesreća.



Slika 4. Primjer razdiobe vremena putovanja na liniji po razdobljima tijekom dana
Izvor: prilagodio autor prema [27]

Unatoč važnosti varijabilnosti vremena putovanja, u prethodnim istraživanjima nije posvećena dovoljna pozornost vremenu putovanja vozila, što je uglavnom posljedica složenog problema prikupljanja podataka u tehnološkom smislu. No u zadnjem je desetljeću u znatnoj mjeri prisutna primjena tehnologija automatskog lociranja vozila (eng. *automatic vehicle location* – AVL) i automatiziranog brojenja putnika (eng. *automated passenger counting* – APC), te je

navedeni tehnološki napredak popraćen razvojem detaljnijih istraživanja koja obuhvaćaju i vrijeme provedeno u vozilu [57]. Pri tome se najveći broj istraživanja bavi predviđanjem vremena dolaska vozila na stajalište, radi omogućavanja kvalitetne informacije za putnike na zaslonima na stajalištima ili u aplikaciji za pametne uređaje.

Kumulativni efekt u javnom gradskom prijevozu koji pridonosi varijabilnosti vremena putovanja je uobičajena pojava te se očituje kroz:

- kašnjenje pri dolasku na terminal – u tom slučaju vozač nema mogućnost odmora, već mora nastaviti sa sljedećom vožnjom, te je već na početku izgubio dio vremena putovanja u suprotnom smjeru;
- nagomilavanje vozila (eng. *vehicle bunching*) – u tom slučaju dolazi do sastajanja dva vozila na istoj liniji tako da prethodno vozilo s prevelikom zauzetošću usporava sljedeće vozilo s premalom zauzetošću, a vremena putovanja oba vozila dodatno se povećavaju.

Nagomilavanje vozila se događa zbog varijabilnosti vremena vožnje i vremena zadržavanja na stajalištima u mreži, što uzrokuje neravnomjeran slijed vozila. Kako slijed postaje neravnomjeran, tako se vrijeme zadržavanja na stajalištu prethodnog vozila (s većim slijedom) počinje povećavati, a vrijeme zadržavanja na stajalištu sljedećeg vozila (s manjim slijedom) počinje se smanjivati, budući da je veća izmjena putnika kod vozila s većim slijedom. Što je slijed nepravilniji, to je vjerojatnost dodatnog rasta nepravilnosti veća, te je zbog toga nagomilavanje vozila uobičajena pojava u javnom gradskom prijevozu. Nagomilavanje vozila se može dodatno potencirati ukoliko vozač krene s izvorišnog terminala prerano ili prekasno u odnosu na vozni red.

Glede prijevozne ponude, mogu se promatrati dva ekstremna slučaja. Ukoliko je na liniji ili koridoru na mreži broj vozila premalen, udobnost vožnje bit će smanjena zbog velike zauzetosti vozila. S druge strane, ukoliko je broj vozila prevelik, tada je slijed malen, što povećava vjerojatnost nagomilavanja vozila, s javljanjem prethodnih vozila prevelike zauzetosti i slijedbenih vozila premale zauzetosti, što također predstavlja problem. Stoga je pronalazak optimalnog broja vozila na liniji od iznimne važnosti radi udaljšavanja od oba navedena ekstrema.

2.4 Statističko opisivanje vremena putovanja

Istraživanja razdiobe vremena putovanja su većinom rezultirala normalnom razdiobom [56]. No neka istraživanja pokazala su kako razdioba može pokazivati pozitivnu asimetričnost [58].

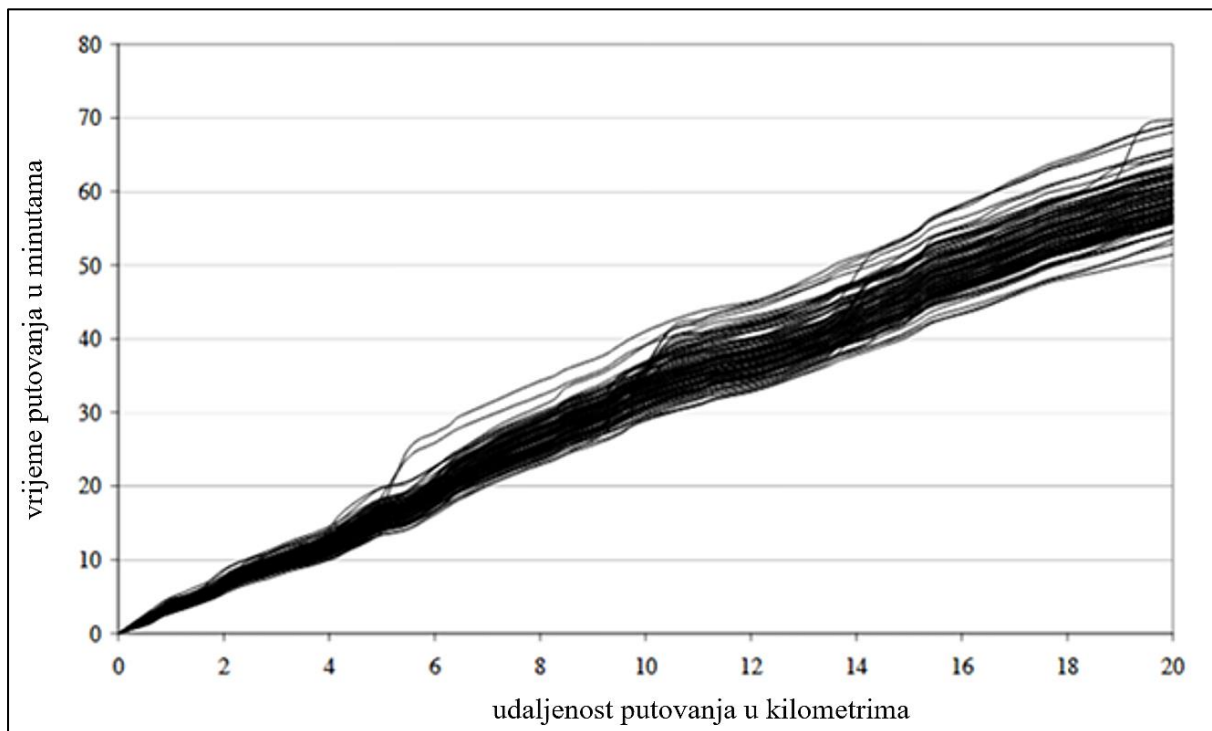
Pojedina istraživanja u javnom prijevozu putnika i analiza vremena putovanja vozila pokazala su kako pojedine razdiobe dobro opisuju varijabilnost vremena putovanja kao što su: gama-razdioba za jutarnji vršni period [59], normalna razdioba za bilo koje razdoblje [60], log-normalna razdioba [61] i log-logistička razdioba [62]. Log-normalna razdioba se pokazala najboljom za autobusni prijevoz u gradskim područjima [63]. Simetrične (normalne) razdiobe [64] i asimetrične (log-normalne ili gama) razdiobe [65], najbolje su opisivale vrijeme putovanja unatoč dobivanju negativnih vrijednosti normalnom razdiobom i vrlo malih vrijednosti log-normalnom razdiobom. U istraživanju [57] pokazalo se također kako je normalna razdioba bolja za opisivanje varijabilnosti vremena putovanja u vršnom periodu, dok je log-normalna razdioba bolja za izvanvršni period. Istraživanje [66] je ispitivalo 5 razdioba vremena putovanja za različite udaljenosti putovanja, te na temelju njega vrijeme putovanja najbolje opisuje log-normalna razdioba na udaljenostima manjim od 7 do 8 km, a iznad tih vrijednosti, normalna razdioba je dominantna.

Kada se varijabilnost vremena putovanja želi prikazati kao opisna statistička veličina, obično se primjenjuju sljedeće veličine [67]:

- standardna devijacija: uobičajena matematička mjera nepravilnosti apsolutnog karaktera u minutama
- koeficijent varijacije: uobičajena matematička mjera nepravilnosti relativnog karaktera u postotcima
- razlika između 90-tog percentila i 10-tog percentila $T_{90} - T_{10}$ pokazuje širinu razdiobe (u minutama) i ima ulogu sličnu standardnoj devijaciji
- razlika između devedesetog i desetog percentila podijeljena s medijanom $\Delta_{90/10}$ pokazuje odnos širine razdiobe prema medijalnoj vrijednosti (u postotcima) i ima ulogu sličnu koeficijentu varijacije
- razlika između medijana i desetog percentila $T_{50} - T_{10}$ u minutama opisuje odnos kraćih putovanja i sredine uzorka
- razlika između devedesetog percentila i medijana $T_{90} - T_{50}$ u minutama opisuje odnos dužih putovanja i sredine uzorka.

U istraživanjima koja koriste standardnu devijaciju kao mjeru varijabilnosti vremena putovanja vozila, nekoliko istraživanja pokazalo je kako standardna devijacija raste linearno s prosječnim vremenom putovanja [68]. Drugim riječima, varijabilnost vremena putovanja je takva da širina uzorka vremena putovanja raste s prosječnim vremenom putovanja ili, kako prikazuje Slika 5,

duljinom putovanja. U istraživanju [69] pokazano je tijekom više dana kako je varijabilnost vremena putovanja takva da je veličina $\Delta_{90/10}$ inverzna ili konstantna s porastom prosječnog vremena putovanja, a veličina $T_{90} - T_{10}$ raste linearno s prosječnim vremenom putovanja. Također, u istraživanju [57] pokazalo se kako je standardna devijacija mogla bolje opisati varijabilnost vremena putovanja od $T_{90} - T_{10}$ iako obje veličine rastu linearno s prosječnim vremenom putovanja. U istraživanju [70] navodi se da su medijan i funkcija razdiobe vremena putovanja bolji pokazatelji od prosjeka.



Slika 5. Prikaz varijabilnosti vremena putovanja u ovisnosti o udaljenosti putovanja
Izvor: prilagodio autor prema [27]

U istraživanju varijabilnosti vremena putovanja vozila potrebno je voditi računa o rezoluciji u kojoj se promatra varijabilnost, odnosno o širini klasifikacijskog uzorka u minutama. U javnom gradskom prijevozu, praktično je uzeti razdoblje u kojemu je broj vozila na liniji bio konstantan, jer se broj vozila određuje ionako za to razdoblje. No takav način promatranja može rezultirati nepreciznim uzorkom, jer premala rezolucija rezultira nedovoljnom količinom prikupljenih podataka za određena razdoblja, a prevelika rezolucija slabom mogućnošću opisivanja uzorka. Istraživanje [57] na odabranim rezolucijama od 15 i 60 minuta pokazalo je da je u maloj rezoluciji od 15 minuta razdioba normalna, no za veliku rezoluciju od 60 minuta, normalna razdioba bolje opisuje vršna razdoblja, a log-normalna izvanvršna razdoblja. Prema tome, način odabira razdiobe je bitan ovisno o promatračkom intervalu i promatranom razdoblju tijekom dana (vršno, izvanvršno).

2.5 Utjecaj vremena putovanja na putnike

Pouzdanost usluge iz perspektive putnika, u tradicionalnom smislu, izražava se putem:

- vremena provedenog u vozilu;
- vremena čekanja na dolazak vozila;
- zauzetosti vozila.

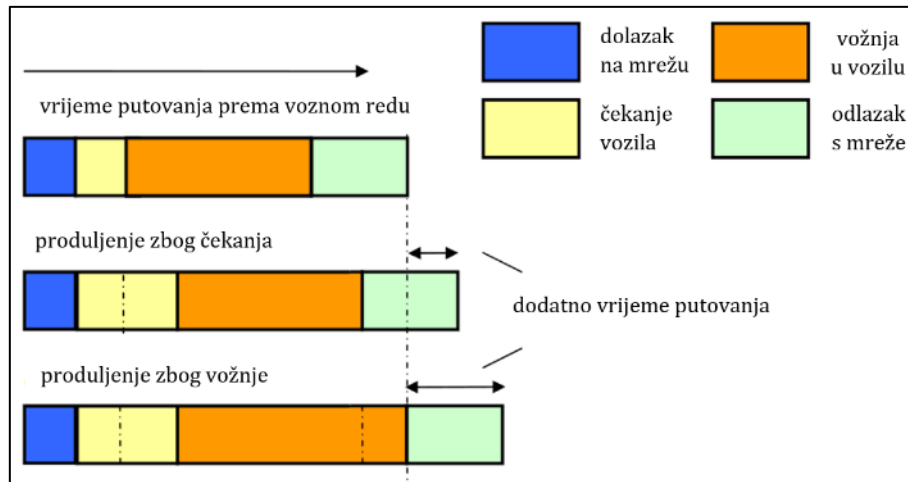
Osim navedena tri glavna faktora, na putnike mogu utjecati i drugi, vanjski faktori, vezani uz atraktivnost javnoga gradskoga prijevoza, zbog kojih putnici mogu otkazati ili promijeniti putovanje javnim prijevozom, ili upotrijebiti drugi modalitet za svoje putovanje. Varijabilnost vremena putovanja izravno utječe na putnike, i ona im je jedna od najbitnijih kategorija kvalitete usluge. Kod nepouzdanosti usluge, putnici najčešće doživljavaju sljedeća tri problema [71]:

- ukupno prosječno vrijeme putovanja putnika se povećava, jer se povećavaju vremena vožnje između stajališta i vremena zadržavanja na stajalištima – putnici u tom slučaju moraju planirati veće individualno vrijeme putovanja
- povećava se varijabilnost ukupnog vremena putovanja putnika, jer postoji varijabilnost trenutka polaska vozila, dolaska vozila, vremena vožnje između stajališta i vremena zadržavanja na stajalištu – putnici u tom slučaju moraju planirati dodatno vrijeme putovanja da bi stigli na odredište na vrijeme
- vjerojatnost pronalaska sjedećeg ili stajaćeg mjesta se smanjuje s povećanjem zauzetosti vozila, što putnicima smanjuje udobnost vožnje.

Budući da je putnicima bitan dolazak na vrijeme na određena odredišta (primjerice, s lokacije stanovanja na posao u vršnim opterećenjima), posljedica ovih problema za putnike je planiranje dodatne vremenske zalihe da bi stigli na odredište na vrijeme. U istraživanju [72] pokazano je kako je to dodatno planirano vrijeme funkcija doživljene varijabilnosti usluge od strane putnika, te se predlaže razlika između 95-tog i 50-tog percentila vremena putovanja kao iznos tog dodatnog vremena.

Nastanak dodatnog vremena putovanja kod putnika prikazuje Slika 6. U slučaju kada vozilo prometuje točno prema voznom redu, nema nikakvih poremećaja za putnike. No poremećaji mogu nastati zbog nepravilnog slijeda vozila koji produljuje prosječno vrijeme čekanja. Također, poremećaji mogu nastati zbog nepravilnog vremena provedenog u vozilu, što dodatno može produljiti vrijeme putovanja. Dodatno vrijeme putovanja dobije se prema navedenim

vremenskim gubitcima. Ovaj indikator također ima prednost u tome što se njime isključuje problem pouzdanog voznog reda male operativne brzine, kao što je navedeno u [73].



Slika 6. Razlozi javljanja dodatnog vremena putovanja

Izvor: prilagodio autor prema [27]

Za izračun dodatnog vremena putovanja, potrebno je pretpostaviti sljedeće [27]:

- promatra se razdoblje konstantnog broja vozila (primjerice, poslijepodnevni vršni period)
- pretpostavlja se konstantna prijevozna potražnja na linijama
- svi putnici su u mogućnosti ukrcati se na prvo vozilo koje im stigne na stajalište.

S dolaskom putnika na stajališta nasumce, dodatno vrijeme računa se korištenjem koeficijenta varijacije stvarnog slijeda [74]:

$$E(t_{dlj}) = \frac{E(i_{lj})}{2} COV^2(i_{lj}) \quad (5)$$

$E(t_{dlj})$ | prosječno dodatno vrijeme čekanja po putniku linije l na stajalištu j
 i_{lj} | stvarna vrijednost slijeda vozila linije l na stajalištu j

Izvor: [74]

Dodatno vrijeme putovanja po putniku je pogodan indikator za iskaz utjecaja neravnomjernosti usluge za putnike. No ono se odnosi samo na prosječno produljenje vremena putovanja zadano voznim redom, te kao takvo ne može izraziti samu varijabilnost, što također smanjuje njegovu kvalitetu. Kako bi se i varijabilnost uračunala u indikator, uveden je indikator naziva dodatno zaštitno vrijeme (eng. *reliability buffer time* – RBT) prema istraživanju [72], u kojemu se naglašava da je, osim prosječnog vremena putovanja, potrebno uzeti u obzir i 95-ti percentil vremena putovanja, jer putnici tijekom planiranja svojih putovanja moraju uzeti u obzir još dodatnog vremena u njihovo stvarno vrijeme putovanja. Kada putnici uračunaju dodatno zaštitno vrijeme, onda smanjuju vjerojatnost kašnjenja na posao koje nastaje zbog izvanrednih

događaja.

Idealno bi bilo kada bi se dodatno zaštitno vrijeme moglo računati za cijelo putovanje putnika. No na temelju dostupnosti podataka prijevoznika, dodatno zaštitno vrijeme se može računati samo za vrijeme čekanja na dolazak vozila i vrijeme provedeno u vozilu, te se taj zbroj može proširiti težinskim koeficijentom kako bi se dobilo ukupno dodatno zaštitno vrijeme za putnike.

Za čekanje na dolazak vozila na stajalištu dodatno zaštitno vrijeme računa se prema formuli:

$$RBT_{\check{c}} = \sum_{j=1}^{n_{lj}} (\alpha_{lj} RBT_{\check{c}ij}); \sum_j \alpha_{lj} = 1 \quad (6)$$

$RBT_{\check{c}}$	prosječno dodatno zaštitno vrijeme zbog čekanja na dolazak vozila
α_{lj}	udio putnika linije l koji se ukrcava na stajalištu j
$RBT_{\check{c}ij}$	dodatno zaštitno vrijeme na stajalištu j linije l zbog varijabilnosti vremena čekanja na dolazak vozila

Izvor: [72]

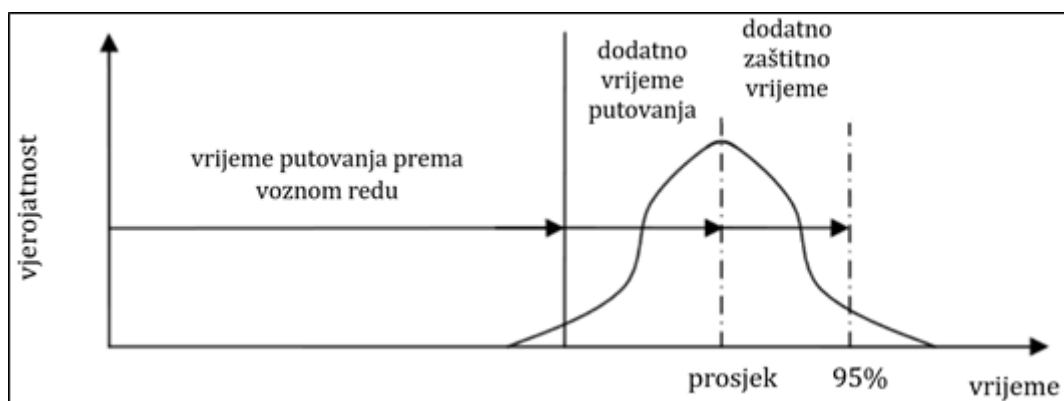
Za vožnje u vozilu dodatno zaštitno vrijeme računa se prema formuli:

$$RBT_V = \sum_{j=1}^{n_{lj}-1} (\beta_{lj} RBT_{vij}); \sum_j \beta_{lj} = 1 \quad (7)$$

RBT_V	prosječno dodatno zaštitno vrijeme zbog vožnji
β_{lj}	udio putnika linije l koji putuje između stajališta j i $j + 1$
RBT_{vij}	dodatno zaštitno vrijeme na stajalištu j linije l zbog varijabilnosti vremena vožnje

Izvor: [72]

Radi lakšeg snalaženja, odnos dodatnog zašitnog vremena i dodatnog vremena putovanja prikazuje Slika 7.



Slika 7. Odnos zašitnog vremena i dodatnog vremena putovanja

Izvor: prilagodio autor prema [27]

Činjenica je kako varijabilnost vremena putovanja vozila smanjuje pouzdanost pružene usluge tako da povećava putnicima vrijeme čekanja na dolazak vozila na stajalištu i vrijeme provedeno u vozilu. U istraživanjima koja su provedena dokazana je iznimna važnost smanjenja

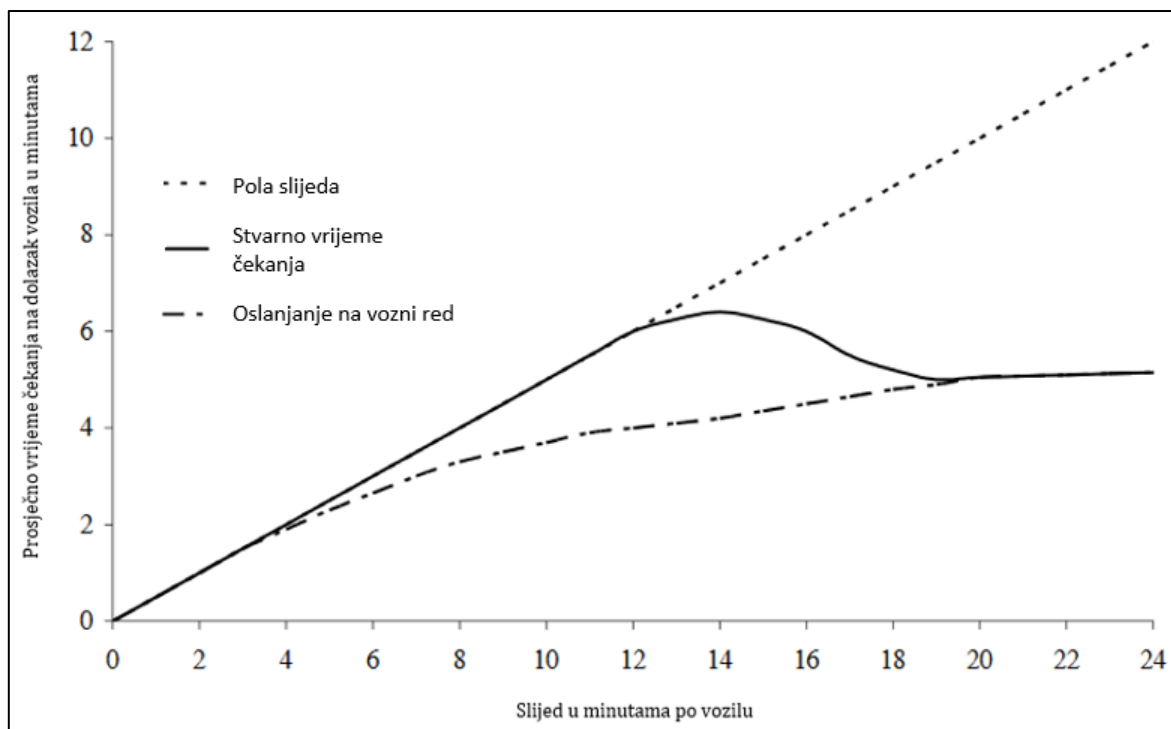
varijabilnosti vremena putovanja jer:

- se smanjuje stres putnicima zbog nesigurnosti oko dolaska na odredište na vrijeme, te se smanjuje nesigurnost odabira linije javnog prijevoza [75]
- je putnicima bitnije smanjenje varijabilnosti vremena putovanja od smanjenja prosječnog vremena putovanja, jer oni mogu preciznije planirati polazak od mjesta stanovanja [70]
- prijevoznici mogu bolje odrediti optimalan vozni red s težnjom minimiziranja operativnih troškova, i određivanjem vremena odmora vozača takvih da vozači ne kasne s polaskom u suprotnom smjeru linije i da ne dođe do zagušenja terminala [76].

2.5.1 Utjecaj vremena čekanja na dolazak vozila

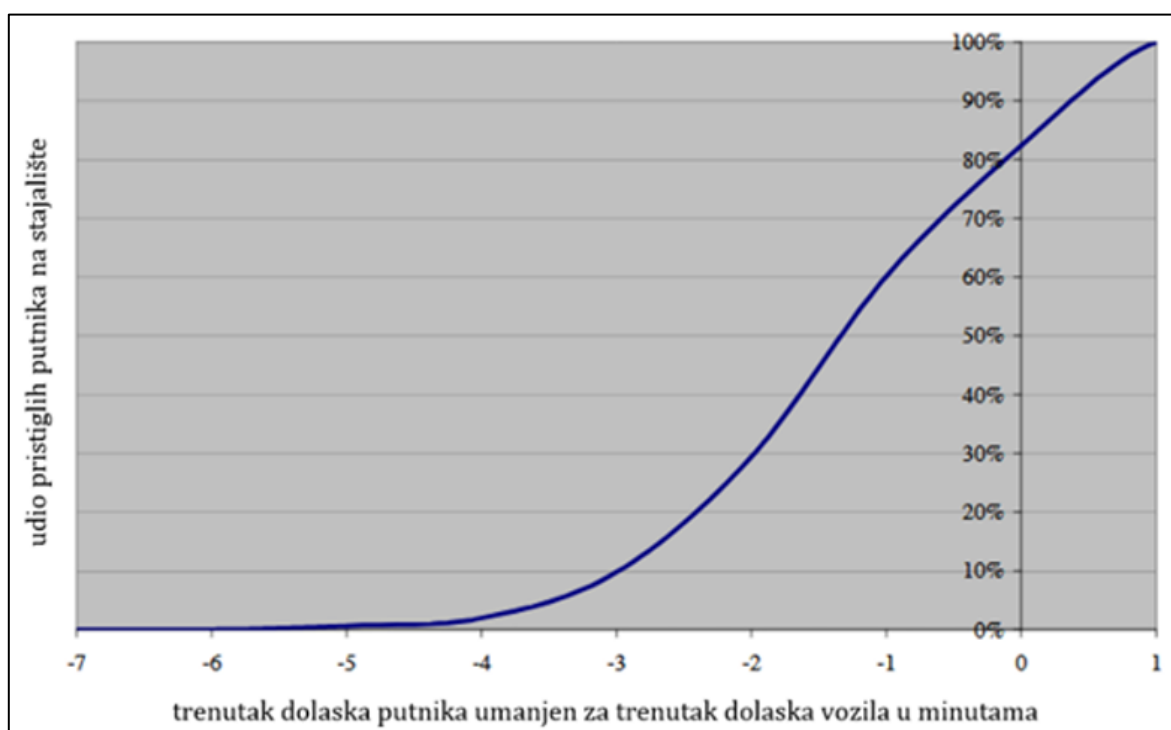
Vrijeme čekanja na dolazak vozila se može promatrati kroz dva slučaja slijeda vozila:

- u slučaju slijeda manjeg od deset minuta po vozilu, što je područje interesa ovoga rada (Slika 8 – lijevi dio slike), putnici dolaze na stajališta nasumce, te je istraživanjima pokazano kako je u slučaju konstantnog slijeda vozila vrijeme čekanja na dolazak vozila jednako polovini slijeda
- u slučaju slijeda većeg od deset minuta po vozilu (Slika 8 – desni dio slike), putnici dolaze na stajalište oslanjajući se na vozni red, pa se prosječna vrijednost čekanja na dolazak vozila približava vrijednosti od pet minuta.



Slika 8. Ovisnost vremena čekanja na dolazak vozila o slijedu
Izvor: prilagodio autor prema [2]

U slučaju kada je slijed velik (Slika 9), poštivanje voznog reda (točnost) je najznačajniji faktor, jer ukoliko vozilo prerano napusti stajalište, neki putnici bi se mogli suočiti s izrazito velikim vremenom čekanja na dolazak vozila na stajalište. S druge strane, u slučaju kada je slijed malen, poštivanje voznog reda postaje manje bitno, a do izražaja dolazi pravilnost slijeda vozila (redovitost). Ako je slijed varijabilan, to će uzrokovati varijabilnosti prosječnog vremena čekanja na dolazak vozila. Putnici koji su došli na stajalište uoči dolaska vozila s manjim slijedom doživjet će manje prosječno vrijeme čekanja na dolazak vozila, a putnici koji su došli na stajalište uoči dolaska vozila s većim slijedom doživjet će veće prosječno vrijeme čekanja na dolazak vozila. No tih putnika je i bilo više, tako da će prosječno vrijeme čekanja na dolazak vozila morati biti u konačnici veće.



Slika 9. Primjer vremenske razdiobe dolazaka putnika na stajalište kada je slijed vozila velik
Izvor: prilagodio autor prema [27]

2.5.2 Utjecaj vremena provedenog u vozilu

Varijabilnost vremena putovanja vozila imat će utjecaj na varijabilnost vremena koje putnici provedu u vozilu. Za neke putnike, vrijeme provedeno u vozilu bit će duže, dok će neki putnici provesti zbog varijabilnosti u vozilu kraće vrijeme. U slučaju nagomilavanja vozila, prethodno će vozilo imati više putnika, kojima će vrijeme provedeno u vozilu biti duže, a sljedbeno vozilo će imati manje putnika, kojima će vrijeme provedeno u vozilu biti kraće (iako će u trenutku kada sljedbeno vozilo bude iza prethodnoga, ostatak vremena biti jednako velik i za putnike u tom vozilu). Zbog navedenog, očito je da će se prosječno vrijeme provedeno u vozilu po

putniku povećati zbog nepravilnosti koje dovode do nagomilavanja vozila, te još drastičnije, zbog samog nagomilavanja vozila.

2.5.3 Utjecaj zauzetosti vozila

Iz prakse je poznato kako zauzetost vozila ima izražen utjecaj na vrijeme izmjene putnika na stajalištu kada je velika, stoga je za uspostavljanje točnih modela potrebno jasno kvantificirati zauzetost vozila iz broja putnika i kapaciteta vozila. Uobičajena je praksa prikazivanja kapaciteta vozila ukupnim brojem putničkih mjesta koji se dobiva zbrajanjem ukupnog broja sjedećih mjesta i ukupnog broja stajaćih mjesta, tako da se broj stajaćih mjesta određuje prema unaprijed zadanom standardu. Na taj način zauzetost vozila se na jednostavan način izražava u obliku postotka ukupnog kapaciteta kojeg zauzimaju putnici u vozilu. No iz takvog načina prikaza zauzetosti vozila proizlaze sljedeća dva problema:

- standard za izračun broja stajaćih mjesta varira u svijetu, najčešće tako da u sustavima javnog prijevoza putnika s većim brojem putnika stajaće mjesto zauzima manju površinu
- dojam o zauzetosti vozila varira, budući da varira odnos sjedećih mjesta i stajaće površine s promjenom tipa vozila.

Stoga, za precizan prikaz zauzetosti vozila, potrebno je za mjere kapaciteta jednog vozila navesti:

- broj sjedećih mjesta izražen u putnicima
- stajaću površinu za putnike u vozilu (površina u vozilu na kojoj je dozvoljeno stajanje putnika) u metrima kvadratnim.

Na ovaj način su jednoznačno definirane veličine kapaciteta vozila koje ne ovise o standardu, već isključivo o unutrašnjim karakteristikama vozila, a dojam zauzetosti na ovaj način bit će univerzalan za bilo koji tip vozila javnog prijevoza, jer je mjerna jedinica zauzetosti uvijek ista – putnici po metru kvadratnom. Ovakav prikaz kapaciteta vozila definiran je pravilnikom E/ECE/324 [77] – vrijedi:

$$c = S + Pg \Leftrightarrow g = \frac{1}{P}c - \frac{S}{P} \quad (8)$$

c	broj putnika u vozilu
S	broj sjedećih mjesta
P	stajaća površina vozila
g	zauzetost vozila

Izvor: [77]

Iz jednadžbe uočava se sljedeće:

- ako je zauzetost negativna, postoje prazna sjedeća mjesta, a ako je pozitivna, zauzeta su sva sjedeća mjesta, te u vozilu ima i stajaćih putnika
- ako se broj putnika u vozilu poveća za jedan, zauzetost će se promijeniti za recipročnu vrijednost stajaće površine, stoga zauzetost raste sporije ako je stajaća površina veća
- kada u vozilu nema putnika, dobije se da je zauzetost vozila $-S/P$, odnosno to je zauzetost praznog vozila, i u usporedbi tipova vozila ona je veća (bliža nuli) kada u vozilu dominira stajaća površina, a manja je (dalja od nule u negativnom smjeru) kada u vozilu dominiraju sjedeća mjesta.

Iako je definicija zauzetosti vozila preko gustoće stajaćih putnika pogodna za preciznu kvantifikaciju zauzetosti vozila, ona nije mjera dizajna unutarnjeg prostora vozila. Posebice je kod niskopodnih tramvaja izraženo postojanje uskih prolaza zbog kompromisa u smještaju opreme vozila, zbog kojih je smanjena mogućnost slobodnog kretanja stajaćih putnika u vozilu pri velikoj zauzetosti vozila (Slika 10), što smanjuje učinkovitost izmjene putnika na stajalištima.



Slika 10. Široka i uska stajaća površina tramvaja TMK 2200

Izvor: [78]

Prema [2], dojam zauzetosti vozila za putnike prikazuje Tablica 2. Dojam zauzetosti može se definirati i putem razine usluge [79], određujući razine usluge od A (najpovoljnije) do F (sudaranja putnika).

Kod malih sljedova vozila, dolazak na stajališta je nasumičan, i ako se pretpostavi uniformna razdioba dolazaka na stajališta, kako se povećava varijabilnost slijeda vozila, tako se povećava zauzetost vozila za ono vozilo koje ima veći slijed od pravilnog, a smanjuje za ono vozilo koje

ima manji sljed od pravilnog. Slično vremenima, smanjenu udobnost vožnje doživjet će veći broj putnika, jer je veći broj putnika u vozilu s većom zauzetošću. U protivnom, s pravilnim sljedom, osim veće udobnosti vožnje, veća je i vjerojatnost jednake zauzetosti vozila, što prijevozniku daje više mogućnosti za planiranje optimalne zauzetosti vozila.

Tablica 2. Dojam zauzetosti vozila za putnike

zauzetost vozila	stajanje	kretanje kroz vozilo
1,0p/m ²	neometano	lako
2,5p/m ²	uz povremene doticaje	uz ometanje drugih putnika
4,0p/m ²	uz česte doticaje	otežano
5,0p/m ²	neudobno	vrlo otežano
7,0p/m ²	vrlo neudobno	izrazito otežano uz moguće ozljede

Izvor: prilagodio autor prema [2]

2.6 Utjecajni faktori smetnji na vrijeme putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu

S aspekta prijevozne ponude, osnovni element promatranja je jedno putovanje vozila, čiji su okviri definirani vremenom poluobrt, a u stvarnosti započinje polaskom s izvorišnog terminusa i traje do polaska s odredišnog terminusa. To rezultira vremenima vožnje između stajališta i zadržavanja na stajalištima po ruti. Prema voznom redu, svako putovanje se planira deterministički te za određena razdoblja tijekom dana (primjerice, vršne ili izvanvršne periode). U idealnom slučaju, vozila krenu s izvorišnog terminusa točno u trenutku definiranom voznim redom, no u praksi, poremećaji mogu nastati zbog:

- ponašanja vozača koji je krenuo neopravdano prerano ili prekasno s izvorišnog terminusa (opravdano kašnjenje polaska s izvorišnog terminusa događa se kada je vozač kasnio s prethodnom vožnjom)
- poremećaja na mreži, koji uzrokuju varijabilnost vremena putovanja po ruti.

Općenito, varijabilnost vremena vožnje se događa zbog međusobno povezanih poremećaja na mreži [80]. U najgorem slučaju, zbog preranog ili prekasnog polaska vozila, varijabilnost se događa već pri polasku vozila, te onda ona može narasti dodatno tijekom prometovanja na mreži. Po samoj ruti vozila, varijabilnost se očituje i u vožnjama između stajališta, i zadržavanjima na stajalištima. Dobivanje preciznih podataka o pojedinom utjecajnom faktoru ovisi o tehnologijama koje su prisutne u vozilima javnoga gradskoga prijevoza.

Dobivanje preciznih podataka o pojedinom faktoru ovisi o tehnologijama koje su prisutne u vozilima javnoga gradskoga prijevoza. Prethodna istraživanja najviše su uzimala u obzir

duljinu putovanja, broj semaforiziranih raskrižja, način korištenja zemljišta, kašnjenje s polaskom i vremenske uvjete kao prostorne varijable, i razdoblje tijekom dana kao vremensku varijablu. Također, ovdje utjecaj mogu imati ponašanje vozača, prijevozna potražnja, varijabilnost protoka vozila i prometne nesreće.

2.6.1 Faktori smetnji prema odnosu prijevozne ponude i potražnje

Prema odnosu prijevozne ponude i potražnje, faktori smetnji koji utječu na varijabilnost vremena putovanja mogu se svrstati u dvije glavne kategorije [81]:

- vezane za prijevoznu potražnju – najizraženiji faktori su tokovi vozila na raskrižjima i tokovi putnika [19]
- vezane za prijevoznu ponudu (kapacitet) – najizraženiji faktori su vremenski uvjeti [42], prometne nesreće [82] i ponašanje vozača [3].

Za duljinu putovanja se pokazalo kako znatno utječe na pouzdanost javnog prijevoza, jer s porastom duljine putovanja počinje rasti vjerojatnost pojavljivanja negativnih faktora kao što su parkirana vozila, nesemaforizirani pješачki prijelazi ili promet koji blokira trak javnog prijevoza [83].

Velika gustoća stajališta se pokazala kao negativni indikator utjecaja na pouzdanost usluge javnog prijevoza [84]. Što je veća gustoća stajališta na ruti, to je veća vjerojatnost postojanja vozila koja se nisu zaustavila na stajalištu. Gustoća stajališta je indikator koji odražava varijabilnost prijevozne potražnje – veća gustoća stajališta je povezana s većom aktivnošću putnika, obično u gradskim središtima.

Za semaforizirana raskrižja se pokazalo kako negativno utječu na pouzdanost usluge, jer različita vozila kroz različite dane imaju različita kašnjenja [83]. Također se pokazalo kako gustoća semaforiziranih raskrižja može samo približno opisati varijabilnost.

Vozači trebaju uoči svojih polazaka s terminala poštivati vozni red, odnosno ne smiju krenuti niti prerano niti prekasno s terminala. Pokazalo se da vozači koji krenu ranije s terminala imaju veća vremena putovanja u usporedbi s vozačima koji krenu na vrijeme ili prekasno [69]. Pri tome su se uzimali i prosjek i standardna devijacija razlika između polaska prema voznom redu i stvarnog polaska.

Različita područja u gradu će generirati različite prijevozne potražnje na stajalištima i različita prometna opterećenja na raskrižjima, uzimajući u obzir i socio-ekonomske karakteristike

stanovništva i način korištenja zemljišta [85]. Primjerice, u industrijskoj zoni grada prijevozna potražnja je usporedno manja u odnosu na gradsko središte, te će tamo doći do manjih problema vezanih za vrijeme putovanja.

Vremenski uvjeti, a poglavito kiša, utječu i na ponudu i na potražnju u javnom gradskom prijevozu putnika. Vozači nastoje povećati sigurnosni razmak između vozila za vrijeme kiše, što smanjuje kapacitet na ruti na kojoj se vozilo nalazi. No kiša može imati i suprotan utjecaj na potražnju, jer će putnici nastojati odgoditi putovanje pri takvim uvjetima ili koristiti osobni automobil, što može rezultirati smanjenom varijabilnošću vremena putovanja [86]. Također, utjecaj kiše može biti značajniji kada je protok vozila veći [87]. Kao nezavisne varijable mogu se uzeti prosjek i standardna devijacija količine kiše u promatranom vremenu.

Vremenska razdoblja tijekom dana imaju značajan utjecaj na varijabilnost vremena putovanja jer ih karakteriziraju različiti prometni uvjeti, koji nisu uzeti u obzir pri promatranju drugih nezavisnih varijabli. Očekivano je varijabilnost veća u vrijeme vršnih perioda u usporedbi s izvanvršnim periodima.

U istraživanju [57] pokazalo se kako na varijabilnost vremena putovanja veći utjecaj ima broj semaforiziranih raskrižja u većini perioda u odnosu na broj stajališta, što daje naglasak na prioritet javnoga gradskoga prijevoza na raskrižjima i posebne trakove za javni prijevoz u blizini raskrižja kao dominantne mjere za smanjenje varijabilnosti vremena putovanja. Poštivanje voznog reda u trenutku polaska s terminala također rezultira smanjenjem varijabilnosti vremena putovanja. Nepovoljni vremenski uvjeti, kao što je kiša, također su smanjili varijabilnost.

2.6.2 Faktori smetnji prema upravljivosti

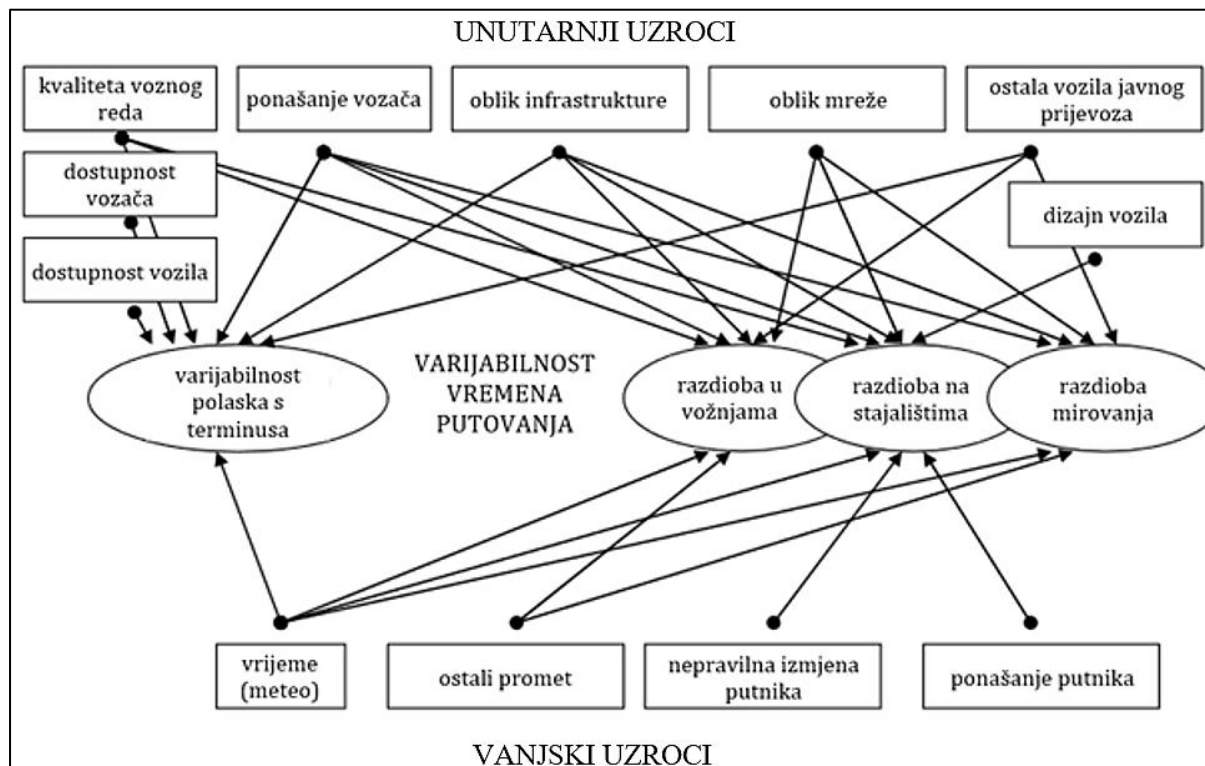
Prema kriteriju upravljivosti, faktori koji utječu na varijabilnost vremena putovanja mogu se podijeliti na (Slika 11):

- unutarnje (interne) uzroke, koji su pod utjecajem prijevoznika
- vanjske (eksterne) uzroke, koji su izvan utjecaja prijevoznika.

Promatrajući vrijeme vožnje između stajališta, ono se sastoji od ubrzavanja vozila nakon što vozilo napusti stajalište, usporavanja vozila prije nego što vozilo stigne na stajalište, te neplaniranih zaustavljanja vozila (primjerice, na semaforiziranim raskrižjima). Čak i ako vozilo stoji na stajalištu ispred kojeg je semaforizirano raskrižje, dio vremena se izgubio na zadržavanje na stajalištu zbog izmjene putnika, no nakon obavljene izmjene putnika,

semaforski uređaj blokira daljnje prometovanje vozila, pa bi to dodatno vrijeme trebalo biti uključeno u vožnju umjesto zadržavanja (iako je tu distinkciju teško napraviti mjerenjima). Unutarnji uzroci varijabilnosti vremena vožnji između stajališta su:

- ponašanje vozača – stil vožnje svakog vozača je različit, što rezultira većim ili manjim brzinama, ubrzavanjima i usporenjima
- ostala vozila javnog prijevoza – kada je slijed vozila malen, odnosno približava se propusnoj moći koridora, vozila počinju smetati jedna drugima; vozila također smetaju jedna drugima na raskrižjima u različitim fazama ili stajalištima kada izmjena putnika prethodnog vozila ne dozvoljava izmjenu putnika sljedećeg vozila
- oblik infrastrukture – razne konfiguracije infrastrukture (stajališta, trakovi, raskrižja) uzrokuju razne propusne moći, što stvara uska grla u prometu
- kvaliteta linija na mreži – primjerice, linije koje dijele isti koridor mogu uzrokovati nagomilavanje vozila pri malenom slijedu ukoliko polasci s terminala nisu koordinirani, a veća duljina smjera linije povećava varijabilnost
- kvaliteta voznog reda – kod nekvalitetnog voznog reda može se smanjiti kvaliteta vožnje vozača jer pokušavaju kompenzirati nedostatke voznog reda.



Slika 11. Uzroci varijabilnosti vremena putovanja prema kriteriju utjecaja
Izvor: prilagodio autor prema [27]

Vanjski uzroci varijabilnosti vremena vožnji između stajališta su:

- ostali sudionici u prometu – utjecaj ostalog prometa najbolje se vidi na raskrižjima (neovisno o tome jesu li semaforizirana); također, zajednički trakovi s ostalim prometom stvaraju varijabilnosti
- meteorološki uvjeti – različiti meteorološki uvjeti uzrokuju različite varijabilnosti; primjerice, sama promjena vremena se smatra većim uzročnikom varijabilnosti od lošeg vremena ustaljenog intenziteta.

Promatrajući vrijeme zadržavanja na stajalištu, varijabilnost se događa zbog svih radnji od kojih se zadržavanje sastoji: otvaranja vrata, iskrcaja i ukrcaja putnika te zatvaranja vrata. Kao i kod vožnje, uzroci varijabilnosti mogu biti unutarnji i vanjski. Unutarnji uzroci varijabilnosti vremena zadržavanja na stajalištima su:

- ponašanje vozača – način na koji vozači otvaraju i zatvaraju vrata vozila, te primjerice, vozači koji pričekaju putnike koji kasne na ulazak u vozilo mogu uzrokovati varijabilnosti
- vrata i unutarnji prostor vozila – broj i položaj vrata, te dizajn unutarnjeg prostora vozila mogu uvelike utjecati na tokove putnika u vozilu, te naposljetku izmjenu putnika na stajalištu
- dizajn stajališta – također utječe na varijabilnost u smislu duljine, širine, lokacije nadstrešnice i ostalih elemenata stajališta.

Vanjski uzroci varijabilnosti vremena zadržavanja na stajalištu su:

- ponašanje putnika – razni tipovi putnika (primjerice, dobne skupine, putnici s prtljagom, putnici s manje iskustva) imaju različite brzine ukrcaja i iskrcaja
- neravnomjerne izmjene putnika – vremena zadržavanja na stajalištima ovise o broju putnika koji ulaze i izlaze te njihovom rasporedu po vratima vozila.

2.6.3 Faktori smetnji prema pružanju u prostoru

Prema pružanju u prostoru, faktori smetnji mogu biti poprečni (transverzalni) i uzdužni (longitudinalni). Poprečni faktori smetnji se pružaju poprečno na smjer kretanja vozila, a njihovo područje djelovanja je maleno. Zbog toga je za njih karakteristično da vozila u trenutku nailaska moraju usporiti većim usporenjem i po potrebi se zaustaviti sve dok je područje djelovanja zauzeto. Za poprečne faktore smetnji karakteristične su linija zaustavljanja (poprečna linija koja se ne smije prijeći u slučaju zauzetosti) i područje djelovanja (površina koja je zauzeta faktorom smetnji). Transverzalni faktori smetnji mogu biti stajališta, nesemaforizirani pješački prijelazi i semaforizirana raskrižja.

Za uzdužne faktore smetnji karakteristično je da se pružaju duž cijele trase, odnosno dijele isti prometni trak s javnim prijevozom. Zato oni nastaju u ovisnosti o izdvojenosti traka za javni prijevoz. Primjerice:

- ako je trak za javni prijevoz fizički odvojen na posebnoj površini (često zelenoj s kolosiječnim zastorom), smetnje jedino mogu proizvesti vozila javnoga gradskoga prijevoza u slučaju nagomilavanja vozila, stoga je utjecaj faktora smetnji malen
- ako je trak za javni prijevoz odvojen oznakom na kolniku, najčešće žutom bojom, osim vozila javnog prijevoza, trakom se mogu koristiti točno definirane skupine vozila prema zakonskoj regulativi i može doći do nepoštivanja traka od strane vozila bez dopuštenja za prometovanje trakom, stoga je utjecaj faktora smetnji djelomičan
- ako je trak za javni prijevoz mješoviti trak, najčešće označen bijelom bojom, sva ga vozila mogu koristiti, stoga je u ovom slučaju utjecaj faktora smetnji najizraženiji.

Prema tome, uzdužni faktori smetnji dijele se u dvije skupine: tokove vozila javnog prijevoza i tokove ostalih vozila u prometnom toku (osobna, dostavna, teretna).

2.6.4 Faktori smetnji prema izravnosti

Prema izravnosti, faktori smetnji mogu biti izravni i posredni. Kumulativni efekt neravnomjernosti prijevozne ponude u javnom prijevozu javlja se kada zajednički doprinos više faktora postane veći nego što bi bio zbroj doprinosa svakog pojedinačnog faktora. U javnom prijevozu on je čest, a nastaje pojavom posrednih faktora smetnji. Posredni faktori smetnji su svi faktori koji utječu na drugi faktor smetnji koji u konačnici utječe na vrijeme putovanja. Drugim riječima, neki posredni faktori, kada bi se promatrali odvojeno, ne bi imali utjecaj na vozila da se nisu pojavili u kombinaciji s izravnim ili drugim posrednim faktorima smetnji. Neki od primjera su:

- semaforizirano raskrižje pored stajališta koje uzrokuje zadržavanje vozila u području stajališta koje uzrokuje nemogućnost dolaska sljedećeg vozila na stajalište
- tok usporednih pješaka na bočnom pješačkom prijelazu koji zaustavlja tok desnih skretača koji u zajedničkom traku onemogućuju prolazak vozila javnog prijevoza u zelenoj fazi raskrižja
- semaforizirano raskrižje koje zadržava vozilo javnog prijevoza do vlastite faze, a navedeno vozilo zadržava vozilo iza koje prolazi u trenutačnoj fazi.

Posljedica kumulativnog efekta je nagli rast vremena vožnje i nepravilnosti u vremenima

putovanja, budući da se javlja u nepravilnim vremenskim razmacima. Kumulativni efekt može nastupiti i zbog nezakonitih radnji u mreži.

2.6.5 Faktori smetnji prema zakonskoj regulativi

Prema zakonskoj regulativi, faktori smetnji mogu biti zakoniti i nezakoniti, a nezakoniti faktori smetnji mogu stvarati velike probleme s vremenom putovanja budući da su povremeni, pa se kod nekih vozila javljaju velika odstupanja vremena putovanja u odnosu na tipičan uzorak. Primjeri radnji koje stvaraju nezakonite faktore smetnji su:

- oduzimanje prednosti vozilima javnog prijevoza na semaforiziranim ili nesemaforiziranim raskrižjima od strane cestovnih vozila ili drugih vozila javnog prijevoza
- oduzimanje prednosti vozilima duž linije od strane pješaka
- oduzimanje prednosti vozilima tijekom izlaska vozila s parkirališnog mjesta ili zbog nepropisnog parkiranja vozila pored traka za javni prijevoz
- nepoštivanje žutih trakova tako da se koriste neovlašteno od strane ostalih sudionika u prometu (osobna, dostavna i teretna vozila).

Oduzimanje prednosti u bilo kakvom obliku može uzrokovati nastanak prometnih nesreća, pa sa stajališta sigurnosti valja razmotriti moguća opasna mjesta (mjesta na kojima pješaci neoprezno pretrčavaju kolnik ili mjesta sa slabom preglednošću). Nepropisno parkiranje vozila pored traka za javni prijevoz uzrokuje zastoje na mreži linija, dok nepoštivanje žutih trakova, uz povećanje vremena putovanja putnika, ima za posljedicu stvaranje neravnomjernosti prijevozne ponude u mreži linija.

2.7 Mjere za smanjenje odudaranja i varijabilnosti vremena putovanja na operativnoj razini

Zbog intenzivnog razvoja inteligentnih transportnih sustava (eng. *intelligent transport systems* – ITS) u prethodna dva desetljeća, omogućen je razvoj instrumenata za smanjenje odudaranja i varijabilnosti vremena putovanja na operativnoj razini. U literaturi postoji korištenje termina inteligentnih transportnih sustava javnog prijevoza (eng. *intelligent public transport systems* – IPTS) [88], što se odnosi na primjenu ITS-a u području javnog prijevoza putnika.

Postoji znatan broj istraživanja koja ističu važnost inteligentnih transportnih sustava za poboljšanje kvalitete usluge u javnom prijevozu, te posebno pouzdanosti. U istraživanju [89] definiran je raspon primjene inteligentnih transportnih sustava u autobusnom prijevozu, ističući

da je potencijal za implementaciju ovisniji o voljnosti organizacijskih sustava, nego o postojećim tehnologijama. U istraživanju [90] se ističe da su inteligentni transportni sustavi i sustavi za obradu velikih količina podataka dva najznačajnija faktora za znatno poboljšanje usluge javnog prijevoza. Također se ističu područja u javnom prijevozu koja se u tehnološkom smislu i dalje pokazuju problematičnima: odabir rute putovanja putnika, dodjela vozila na mrežu u manje pouzdanim mrežama, interakcija prijevozne ponude i potražnje te učinak informacija na korisnike.

Inteligentni transportni sustavi u javnom prijevozu putnika oslanjaju se na različite tehnologije koje se mogu svrstati u pet glavnih kategorija [88]:

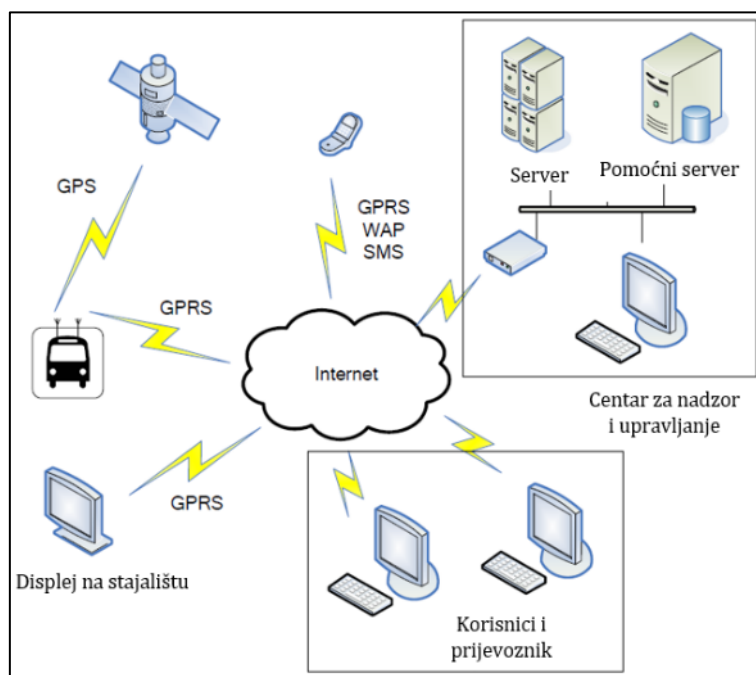
- AVL;
- informacije za korisnike;
- APC;
- geografski informacijski sustavi (eng. *geographic information systems* – GIS);
- sustavi podrške donošenju odluka.

Sustav AVL služi za automatsko određivanje i slanje informacije o lokaciji vozila, te se tako dobiveni podatci objedinjuju u sustavu za praćenje vozila, obično lociranom u sustavu upravljanja prometom prijevoznika. Lokacija se određuje korištenjem sustava za određivanje geografske lokacije vozila kao što je GPS Sjedinjenih Američkih Država, a prijenos podataka najčešće sustavom SMS (eng. *short message service*), sustavom GPRS (eng. *general packet radio service*), ili sustavom satelitskog ili terestičkog radija između vozila i radio prijemnika. U posljednje vrijeme je povećano korištenje CCTV (eng. *closed-circuit television*) kamera za dobivanje lokacije vozila [91]. Spektar radio područja koji se najčešće koristi je GSM (eng. *global system for mobile communications*), zbog potrebne količine prijenosa podataka i malih troškova. Također, na ovaj način se mogu dobiti podatci o telemetriji vozila (primjerice smjer, visina ili brzina).

Postoji pet ključnih funkcionalnih komponenti AVL-a [92], čije odnose između funkcionalnih komponenti prikazuje Slika 12:

- oprema u vozilu, koja se koristi za praćenje položaja vozila u realnom vremenu i pružanje dodatnih mogućnosti
- oprema na infrastrukturi – odašiljači za prijenos podataka o položaju vozila i ostalih informacija

- centar za nadzor i upravljanje, u kojemu se prate položaji vozila u realnom vremenu, te se primjenjuju automatizirane radnje za optimiziranje voznog parka
- sustavi za komunikaciju između centra za nadzor i upravljanje te vozila, tako da i vozilo i centar imaju odašiljače i prijemnike
- oprema na stajalištu, kroz koju se prosljeđuju informacije putnicima na stajalištima.



Slika 12. Funkcionalne komponente AVL-a
Izvor: [93]

Glavna zadaća sustava informacija za korisnike je pružanje informacija putnicima vezanih za vozni red i trenutno stanje u prometu da bi putnici što lakše i efikasnije mogli planirati i izvršavati vlastita putovanja. Informacije za korisnike se mogu svrstati u dvije kategorije [94]:

- zaslone za pružanje informacija o vozilima koja se nalaze na stajalištima – osim informacija o dolasku vozila, mogu služiti za pružanje informacija o promjenama na mreži ili incidentnim situacijama; informacije se šalju obično putem GSM sustava ili bežične radijske mreže, te se tako osiguravaju putnicima putne informacije
- napredni sustavi za informiranje korisnika – služe se pametnim telefonima i internetskom vezom za pružanje informacija korisnicima o prometnim uvjetima, optimalnim rutama; ovakvi sustavi su, osim putnih informacija, sposobni putnicima pružiti i predputne informacije.

Zadaća sustava APC je pružanje informacija prijevozniku u vezi ukrcaja i iskrcaja putnika te zauzetosti vozila. Te informacije se mogu upotrijebiti za određivanje optimalnog voznog reda,

određivanje optimalnog algoritma za upravljanje vozila u stvarnom vremenu, sprječavanje prekomjerne zauzetosti vozila, ili analizu performansi sustava. Tehnologije kojima se obavlja automatsko brojenje putnika su najčešće:

- infracrvena osjetila, kod kojih se brojenje obavlja tako da se prekine svjetlosni snop u trenutku prolaska putnika kroz vrata vozila
- kamere, koje su ugrađene u vozilu te detektiraju putnike koristeći stereoskopski vid.

Iako se za obje tehnologije pokazalo da imaju pouzdanost veću od 95 %, kamere sa stereoskopskim vidom imaju veći potencijal od infracrvenih osjetila, jer za razliku od njih, mogu detektirati putnike s velikom preciznošću u uvjetima velikog protoka putnika i u situacijama kada znatno osciliraju temperatura zraka ili jakost svjetlosti. Očekuje se upravo u javnom gradskom prijevozu najznačajniji porast primjene ove tehnologije, jer znatno može pridonijeti povećanju pouzdanosti usluge [95].

Geografski informacijski sustavi prijevozniku služe za kartografsku podršku praćenja vozila, tako da dohvaćaju, pohranjuju, upravljaju, analiziraju i prezentiraju bilo kakve vrste geografskih podataka vezanih za linije ili mrežu linija. Geografski informacijski sustav se oslanja na komunikaciju pomoću sustava za određivanje geografske lokacije vozila, što dozvoljava mapiranje podataka o položaju vozila u mreži u realnom vremenu, te je u mogućnosti lokalizirati poremećaje i incidente u slučaju njihova nastanka. Također je značajna upotreba GIS-a u analizi toka vozila za ocjenu usluge javnog prijevoza i ocjenu kvalitete mreže linija javnog prijevoza.

Sustavi podrške donošenju odluka imaju dvije glavne zadaće u prijevoznom procesu – izradu voznog reda i izradu algoritama za raspoređivanje vozila. Prvenstveno, na osnovi analize prometnih tokova i prijevozne potražnje u vršnim i izvanvršnim periodima tijekom dana uspostavlja se optimalan vozni red, a njegova izrada vrši se najčešće heurističkim algoritmima uzimajući u obzir lokalne uvjete. Nakon uspostave optimalnog voznog reda, stvarni proces može biti znatno narušen u odnosu na vozni red, uzrokujući pad kvalitete usluge u obliku zagušenja, prometnih nesreća i nezadovoljstva putnika. Prema tome, potrebno je izvršiti radnje unutar voznog reda koje se nazivaju raspoređivanje vozila (eng. *vehicle scheduling*). Za raspoređivanje vozila koriste se algoritmi koji rješavaju problem u stvarnom vremenu u prijevozničkom centru za nadzor i upravljanje. Sustav podrške donošenju odluka funkcionira u tri faze [96]:

- dijagnostička faza – nadzire se i analizira mreža kako bi se detektirale nepravilnosti u odnosu na uobičajeno stanje korištenjem AVL-a
- faza donošenja odluke – sustav predlaže radnje i strategije za otklanjanje otkrivenih nepravilnosti
- faza provjere odluke – donesene odluke se provjeravaju korištenjem točnih metoda ili simulacijama.

Vozni redovi linija s malim slijedom se ne mogu jednostavno održavati u stvarnosti, poglavito zbog povećane vjerojatnosti nagomilavanja vozila. U literaturi su najčešće dva načina rješavanja problema nagomilavanja vozila: planerski (koji pronalazi izvor problema putem modela) i operativni (koji nastoji riješiti problem korištenjem ITS-a u realnom vremenu) [9]. U literaturi se nagomilavanje vozila javnog prijevoza smatra jednim od najvećih problema pouzdanosti usluge, kao posljedica loše redovitosti vozila. U istraživanju [97] se pokazalo kako bi se primjenom jednostavne strategije kontrole slijeda vozila na linijama pomoću GPS uređaja u vozilu u komunikaciji s centrom za nadzor postigao znatni napredak u sprječavanju nagomilavanja vozila uz relativno niske troškove i kompleksnost sustava. Istraživanje [98] je pokazalo da je primjena sustava kontrole zasnovanog na slijedu najučinkovitija za linije koje nemaju definiran vozni red, već je definiran samo slijed. Istraživanja ističu kako najbolji način za smanjenje nagomilavanja vozila uključuje i planerski i operativni pristup.

2.7.1 Prioritet javnoga gradskoga prijevoza

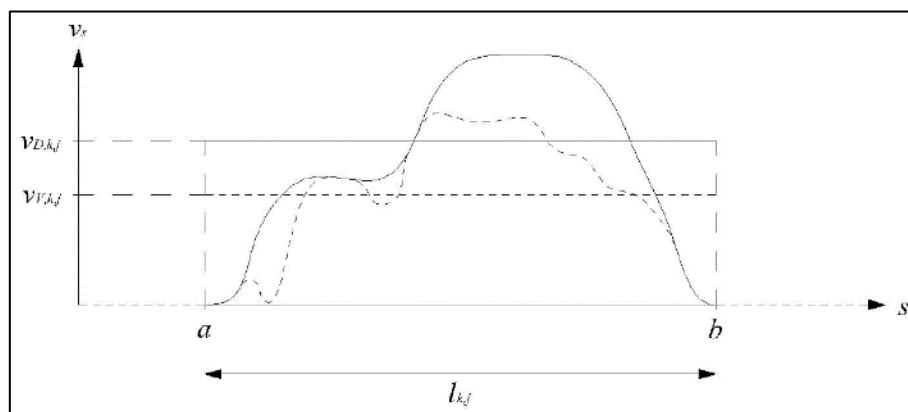
Prioritet javnoga gradskoga prijevoza je skup bilo kakvih mjera koje rezultiraju povlaštenim položajem javnoga gradskoga prijevoza u odnosu na ostale sudionike u prometu. Pritom se povlašteni položaj očituje povećanjem brzine prometovanja između stajališta nakon primjene mjera u odnosu na prethodno stanje. Zadaća prioriteta javnoga gradskoga prijevoza je eliminacija neželjenih učinaka faktora smetnji. Prioritet sustava javnog prijevoza u većini slučajeva se mora oslanjati na uporabu informacijsko-komunikacijske tehnologije, ITS-a i prijevozne telematike, a funkcioniranje gradskog prometa bez primjene ITS-a je znatno neučinkovitije zbog rastućih prometnih, ekonomskih i ekoloških zahtjeva koji se postavljaju na prometnu mrežu.

Prioritet javnoga gradskoga prijevoza se može objasniti stvarnom i teoretskom krivuljom kretanja vozila između stajališta, koju prikazuje Slika 13. Kada se uzmu u obzir ograničenja mreže i zakonska ograničenja, između bilo kojih susjednih stajališta a i b (duljine $l_{k,j}$) može se definirati optimalna krivulja kretanja vozila (na slici 4 označena punom crtom). No u

stvarnosti, vozilo zbog različitih faktora smetnji se ne kreće prema optimalnoj krivulji kretanja, već stvarnoj krivulji kretanja (na slici označena isprekidano), što uzrokuje različite stvarne ($v_{V,k,j}$) i teoretske ($v_{D,k,j}$) prosječne brzine vožnje između stajališta, odnosno stvarna brzina kretanja vozila je u određenom udjelu teoretske. Prema tome, prioritet vozila nastoji približiti stvarnu brzinu kretanja vozila teoretskoj.

Postoje tri vrste prioriteta javnoga gradskoga prijevoza:

- zakonodavni, uvođenjem prometnih pravila ili prenamjenom prometnih trakova koji daju prednosti javnom prijevozu
- fizički, gdje se povlaštenu položaj postiže izdvajanjem kolosijeka ili trakova u kojima prometuje javni gradski prijevoz od ostalog prometa
- operativni, gdje se korištenjem tehnoloških rješenja nastoji postići prolazak kroz semaforizirano raskrižje bez usporavanja.



Slika 13. Objašnjenje prioriteta vozila javnoga gradskoga prijevoza teoretskom i stvarnom krivuljom kretanja
Izvor: [99]

Zakonodavni prioritet služi za eliminaciju nezakonitih faktora smetnji, odnosno preventivnog je karaktera. Da bi javni prijevoz mogao funkcionirati kao dio sustava gradske ulične mreže, potrebna su pravila u prometnom sustavu, većinom zasnovana na općim karakteristikama vozila i infrastrukture kojima se sustav služi. No zakonska regulativa, osim svoje primarne uloge, ima ulogu osiguravanja prioriteta na mjestima gdje je prioritet tramvaja izvediv ili u interesu prometne politike grada. Bitan dio zakonskih odrednica koje određuju ponašanje vozila javnog prijevoza u prometnom sustavu odnosi se na prednosti upravljanja na raskrižjima. Tako su mjerodavni redom ovlaštena osoba, potom svjetlosna signalizacija, vertikalna signalizacija, s prometnim pravilima na začelju. U javnom gradskom prijevozu, to znači sljedeće:

- za vozila javnog prijevoza koja prilaze semaforiziranom raskrižju vrijede jednaka ograničenja kao i za sva ostala vozila (ne smiju proći raskrižjem ukoliko nije aktivna vlastita faza)
- vozila koja prilaze pješačkim prijelazima moraju propustiti pješake koji imaju namjeru kretati se ili se kreću pješačkim prijelazom
- za vozila koja prilaze nesemaforiziranom raskrižju s prometnim znakovima vrijedi poštivanje signalizacije (u pravilu je ona postavljena u korist vozila javnog prijevoza)
- za tračnička vozila koja prilaze nesemaforiziranom raskrižju bez prometnih znakova vrijedi prednost prolaska nad ostalim vozilima (prema pravilu o tračničkim vozilima)
- za vozila koja prilaze nesemaforiziranom raskrižju bez prometnih znakova vrijede ista pravila koja vrijede za cestovna vozila, no tračnička vozila imaju prednost prolaska u odnosu na ostala vozila
- ako je namjena prometnih trakova takva da ih mogu koristiti druga vozila, za njih će vrijediti ista pravila kao i za vozila javnog prijevoza.

Za prometne površine po kojima se kreću vozila javnog prijevoza vrijedi sljedeće:

- zabranjeno je zaustavljanje ili parkiranje na obilježenim stajalištima ili u njihovoj blizini
- preporučuje se propuštanje vozila javnog prijevoza ukoliko kreće sa stajališta
- obvezatno je poštivanje žutih trakova za sve nepovlaštene skupine vozila
- zabranjeno je kretanje pješaka po trakovima za javni prijevoz.

Osim preventivnog, zakonodavni prioritet mora biti i represivnog (korektivnog) karaktera, odnosno propisati sankcije u slučajevima nepoštivanja zakonske regulative. Najveći problem obično predstavlja nepoštivanje žutih trakova. Uzimajući u obzir dostignuća postojeće tehnologije, problemu se može pristupiti primjenom sustava za nadgledanje i praćenje poštivanja prometnih propisa. U takve sustave najčešće su implementirane sljedeće tehnologije:

- CCTV kamere za videonadzor
- program za automatsko prepoznavanje registracijskih oznaka (eng. *automatic number plate recognition* – ANPR);
- sustav za određivanje geografske lokacije.

Kamere za videonadzor mogu u sebi imati ugrađen ANPR koji pomoću ugrađenih algoritama vrši pripremu znakova na registarskim oznakama. Nakon što se znakovi pripreme, ulaze u

program za optičko prepoznavanje simbola (eng. *optical character recognition* – OCR), te se na taj način registracijske oznake mogu obrađivati elektronički. Sustav za određivanje geografske lokacije služi za određivanje položaja vozila.

Pod pojmom fizičkog prioriteta smatraju se različiti oblici rezerviranja određenih površina na kolniku namijenjenih vozilima javnoga gradskoga prijevoza kao posebno izdvojeni prometni trakovi. Fizički prioritet je u odnosu na zakonodavni prioritet bolji, jer eliminira nezakonite faktore smetnji, te idealna brzina putovanja može biti veća. Često je rezultat prostornih mogućnosti koje pruža koridor kojim prolaze vozila javnoga gradskoga prijevoza. Najčešće ga je moguće ostvariti u središnjem dijelu gradskih avenija.

Fizički prioritet se može ostvariti građevinski kao nadzeman, podzeman i u razini. Nadzemni i podzemni prioriteti se koriste kod tračničkih sustava kao što je metro ili laka gradska željeznica, gdje je neophodan zbog visoke razine prometne usluge sustava uslijed velikih potražnji za prijevozom. Kod tramvajskog podsustava fizički prioritet je u pravilu u razini. Može se klasificirati kao:

- potpuni fizički prioritet u razini
- djelomičan fizički prioritet u razini.

U slučaju potpunog fizičkog prioriteta u razini nemoguć je dolazak gotovo svih ostalih vozila na trasu linije javnog prijevoza. Za tramvajski podsustav to se izvodi raznim načinima izvedbe kolosiječnog zastora tramvajskih kolosijeka (kolosijek bez kolosiječnog zastora ili sa šljunčanim ili zemljanim zastorom) ili dodavanjem fizičke barijere između koridora za tramvajski promet i kolnika za cestovni promet. Kod djelomičnog fizičkog prioriteta u razini razdvajanje trakova za tramvajski promet postiže se obično dodavanjem izdignutih oznaka na kolniku između traka za javni prijevoz i ostali promet ili određivanjem kretanja vozila javnog prijevoza suprotnim smjerom u odnosu na ostali promet.

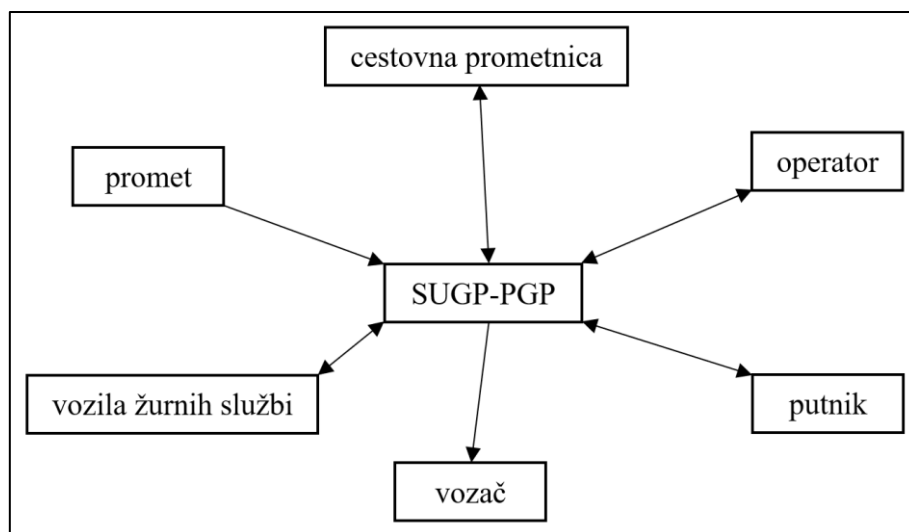
U sklopu operativnog prioriteta nastoje se pronaći mjere koje eliminiraju utjecaj poprečnih faktora smetnji, omogućavajući vozilima javnog prijevoza prednost prolaska preko poprečne prepreke (najčešće semaforiziranog raskrižja) bez potrebe za zaustavljanjem. Promatrajući način upravljanja semaforiziranim raskrižjima, mogu se razlikovati:

- vremenski ustaljeno upravljanje
- prometno ovisno upravljanje.

Vremenski ustaljeno upravljanje je upravljanje s konstantnim ciklusom i konstantnim

vremenima slobodnog prolaska za svaku fazu. Trajanje pojedinačnih faza se utvrđuje brojenjem prometa, i oblikuje tako da se određenim vremenskim intervalima tijekom dana dodijele određeni signalni planovi, zbog različitih zahtjeva tokova na privozima raskrižja tijekom dana. Kod prometno ovisnog upravljanja, uz uvažavanje postojećeg signalnog plana, primjenjuju se tehnologije koje prepoznaju prisutnost na privozu ili pješačkom prijelazu. Na taj način signalni plan može preskočiti na odgovarajuću fazu raskrižja, što rezultira uštedama u vremenima putovanja svih sudionika u raskrižju. Tehnologija detekcije vozila se može upotrijebiti i za vozila javnog prijevoza.

Sustav upravljanja prioritetom javnoga gradskoga prijevoza (SUGP-PGP), kojeg prikazuje Slika 14, sastoji se od podsustava centraliziranog vođenja prometa, podsustava lokalnog vođenja, podsustava lokalne cestovne infrastrukture i podsustava za ostale periferne funkcionalnosti [100]. Moduli podsustava centraliziranog vođenja prometa (kontrola područja, razmjena podataka, podatkovni nadzor, arhiviranje i krajnji modul) su zaduženi za prikupljanje i razmjenu informacija na temelju kojih se primjenjuju strategije upravljanja prometom na pojedinim područjima.



Slika 14. Kontekst sustava upravljanja prioritetom javnoga gradskoga prijevoza prema FRAME arhitekturi sa smjerovima komunikacije između elemenata sustava

Izvor: [100]

Osnovni koncept osiguravanja prednosti prolaska raskrižjem sastoji se od prepoznavanja (detekcije) vozila, prosljeđivanja informacije semaforskom uređaju te izvršenje promjene signalne slike konfliktnog semaforiziranog raskrižja. Prednost prolaska raskrižjem u sklopu aktivnog operativnog prioriteta se osigurava pomoću tehnologija transpondera, detektora ili radijske veze. U kolnik na mjestu gdje se želi ostvariti detekcija ugrađuje se detektor (antena) u asfaltnu podlogu. Nailaskom vozila, informacija o prisutnosti se prosljeđuje prijemnom

računalu koje informaciju dalje prenosi kontrolnom uređaju. Bitno obilježje svih uređaja mora biti izdržljivost u svim vremenskim uvjetima. Veliku ulogu zauzima i mjesto postavljanja detektora. Optimalno ga je postaviti prije zaustavne linije na mjestu početka nove dionice nakon semaforiziranog raskrižja, a ako se nakon raskrižja nalazi stajalište, onda nakon samog stajališta, radi izbjegavanja nepravilnosti uzrokovanih zadržavanjem na stajalištu te radi što ranije detekcije vozila kako bi sustav imao najveću moguću vremensku zalihu u trenutku kada detektira vozilo javnog prijevoza.

Algoritam odvijanja faza u semaforiskim uređajima mora biti prilagođen, odnosno programiran tako da može pravovremeno promijeniti ili produljiti fazu dozvoljenog prolaska za tramvaje ukoliko je to ostvarivo sa stajališta sigurnosti i udobnosti vožnje za sve sudionike u promatranom raskrižju. U slučaju više vozila javnog prijevoza koja su najavila svoj dolazak u raskrižje, dodjeljivanje prednosti prolaska raskrižjem prema određenom kriteriju, odnosno specifičnim zahtjevima, ovisi o mogućnostima ugrađene opreme (mogućnostima transpondera i detektora), prilagodljivosti algoritma signalnog plana raskrižja i mogućnosti prosljeđivanja informacija o kriteriju prednosti prolaska nad drugim vozilima, ako je u vozilu prisutna tehnologija koja omogućava realizaciju informacije specifičnog zahtjeva.

Načini na koji se postiže prioritet na raskrižjima mogu biti izvedeni kao:

- produljenje zelene faze
- raniji nastup faze
- dodatna faza
- povlačenje faze.

Postoje dvije vrste arhitektura za prioritet vozila javnog prijevoza [92]:

- centralizirana arhitektura, u kojoj vozilo komunicira s centrom, te se odluka o prioritetu donosi na temelju algoritma u samom centru (algoritam može ovisiti o vremenima putovanja ili slijedu)
- decentralizirana arhitektura, u kojoj je vozilo (umjesto s centrom za upravljanje) u izravnoj komunikaciji s uređajem, te se odluka o prioritetu donosi na temelju lokalnih uvjeta.

Još detaljnije se prioritet na raskrižjima gdje postoji više oblika javnog prijevoza može dodjeljivati tako da veći prioritet imaju tramvaji u odnosu na autobuse, ili vozila s većim brojem putnika u odnosu na ona s manje putnika, ili tako da vozila žurnih službi imaju veću prednost prolaska raskrižjem od javnog prijevoza radi poboljšanja prometne sigurnosti. Tada

bi javni gradski prijevoz imao uvjetni prioritet, a vozila žurnih službi bezuvjetni prioritet.

Primjena prioriteta javnoga gradskoga prijevoza je značajna za sve dionike – putnike, prijevoznika i lokalnu zajednicu jer:

- smanjuju se troškovi prijevoznika, jer se za jednaku prijevoznu ponudu dobije manji potreban broj vozila i vozača
- smanjuju se eksterni troškovi, jer su manje promjene brzina kretanja vozila i kraće vrijeme putovanja
- smanjuje se utjecaj na okoliš
- putnicima se skraćuje vrijeme putovanja i varijabilnost vremena putovanja, što čini uslugu javnoga gradskoga prijevoza pouzdanijom i atraktivnijom
- smanjuje se zagušenje vozila javnoga gradskoga prijevoza i utjecaj zagušenja ostalih sudionika u prometu na javni prijevoz.

Prioritet vozila na raskrižjima može biti i jako učinkovita mjera u zadržavanju vozila radi postizanja ravnomjernog toka vozila, što smanjuje vjerojatnost nagomilavanja vozila. Tako primjerice, vozila koja su urala u odnosu na vozni red ne bi dobila prednost na raskrižju, za razliku od vozila koja kasne [101], koja bi imala najveću prednost. Prioritet je potrebno ostvarivati na različite načine, jer zbog sve većih zahtjeva koji se postavljaju na gradsku prometnu mrežu, problemi neučinkovitosti javnog prijevoza moraju se rješavati lokalno, orijentirajući se više na pojedinačne dionice ili raskrižja, nego općenito na mrežu.

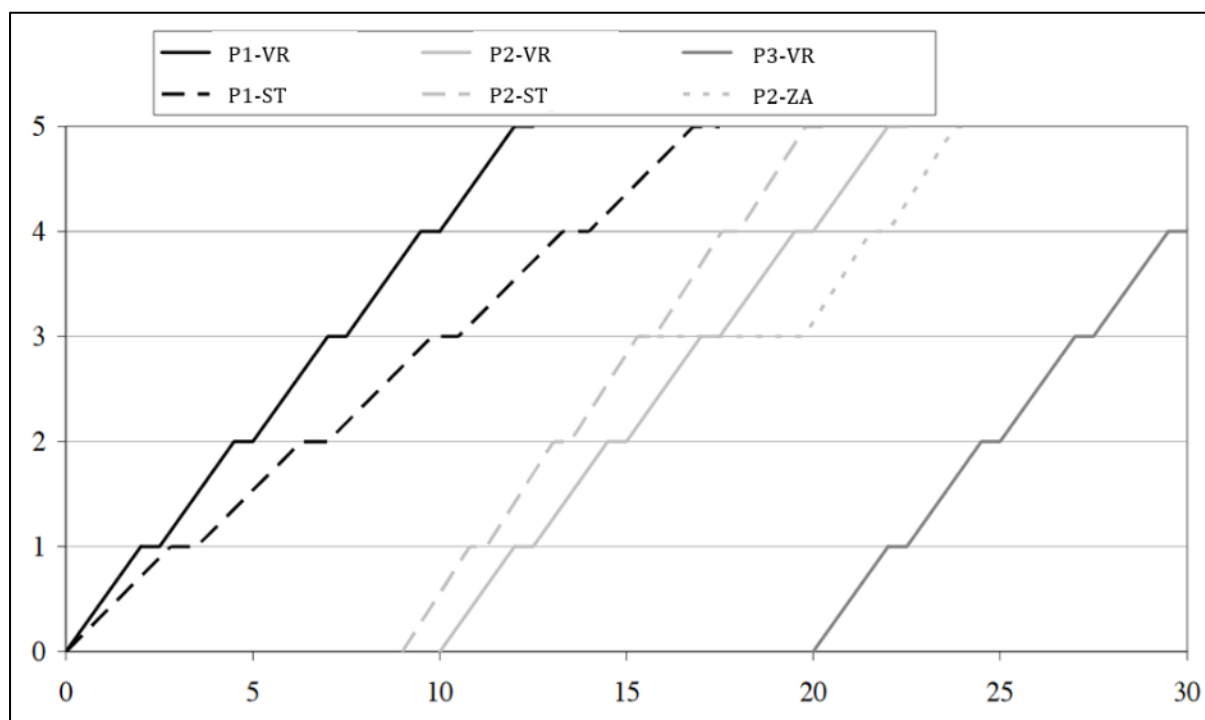
Jedino operativni prioritet, odnosno prioritet na raskrižjima pripada u domenu inteligentnih transportnih sustava, odnosno adaptivnog upravljanja prometom na semaforiziranim raskrižjima. Efikasnost funkcioniranja sustava može se pratiti vremenskim gubitcima, duljinom repa čekanja, prosječnim vremenom putovanja, rizikom nastajanja prometnih nesreća, maksimalnim individualnim čekanjem ili maksimalnom duljinom repa čekanja oko raskrižja. Na taj način adaptivni sustav upravljanja omogućuje zaštitu od preopterećenja i nestabilnog ponašanja sustava [100]. S porastom složenosti raskrižja operativni prioritet postaje manje značajan. Kompleksna raskrižja mogu biti, primjerice, raskrižja dviju avenija ili raskrižja gdje se tramvajski promet nalazi na svim privozima s raznolikim mogućnostima kretanja kroz raskrižje.

2.7.2 Zadržavanje vozila

Zadržavanje vozila je mjera koja pripada u operativnu domenu, i pod njom se podrazumijeva

bilo koji postupak koji će smanjiti operativnu brzinu vozila, no na taj način postići veću ravnomjernost nekog drugog parametra za prijevoznika bitnijeg od operativne brzine. Postoje dvije vrste zadržavanja vozila [27]:

- zadržavanje zasnovano na voznom redu (aspekt točnosti) – nastoje se prilagoditi polasci sa stajališta prebrzih vozila – primjenjuje se i za velike i za male sljedove vozila, a prilagodba polaska može se obaviti ili samo na nekim stajalištima ili na svim stajalištima
- zadržavanje zasnovano na slijedu vozila (aspekt redovitosti) – nastoji se prilagoditi slijed između vozila tako da se na stajalištima zadržavaju ona vozila koja imaju manji slijed od onog određenim voznim redom – primjenjuje se obično samo za male sljedove, najčešće samo na najznačajnijim stajalištima – stajalištima na kojima je omjer putnika koji su ostali u vozilu i putnika koji su se izmijenili (izašli iz vozila i ušli u vozilo) malen.



Slika 15. Kretanje vozila primjenom zadržavanja vozila zasnovanog na slijedu
Izvor: prilagodio autor prema [27]

Učinak primjenom zadržavanja vozila zasnovanog na slijedu prikazuje Slika 15. Vozilo 2 je trebalo prema voznom redu imati kretanje koje opisuje krivulja „P2-VR“, no u stvarnosti, vozilo se kretalo brže (krivulja „P2-ST“) u odnosu na vozni red, stoga se zadržalo na stajalištu 3, tako da se prilagodi kašnjenju vozila 1 (krivulja „P1-ST“), te je definirano novo kretanje nakon trećeg stajališta kao krivulja „P2-ZA“. Iz ovakvog primjera je jasno kako je zadržavanje zasnovano na slijedu vozila u tehnološkom smislu teže za izvedbu, jer je potreban pregled položaja svih vozila u stvarnom vremenu, dok s druge strane, ovakva prilagodba može u

potpunosti eliminirati vrijeme zadržavanja na odredišnom terminusu, čineći prijevozni proces učinkovitijim.

Pokazalo se kako primjena zadržavanja vozila pozitivno utječe na vrijeme putovanja putnika, reducirajući vremenske gubitke za putnike (u smislu redukcije vremena čekanja na dolazak vozila, iako je vrijeme putovanja za putnike u vozilu veće) do 60% ako se zadržavanje primijeni samo na dva ključna stajališta na smjeru linije [27]. Zadržavanje vozila nije samo korisno radi izjednačavanja sljedova i poštivanja voznog reda, već i radi minimiziranja zauzetosti vozila, budući da je neravnomjernost zauzetosti vozila krajnja posljedica neravnomjernih sljedova. U tu svrhu, uz AVL, potreban je APC i sustav podrške.

3 PRIKUPLJANJE I OBRADA PODATAKA

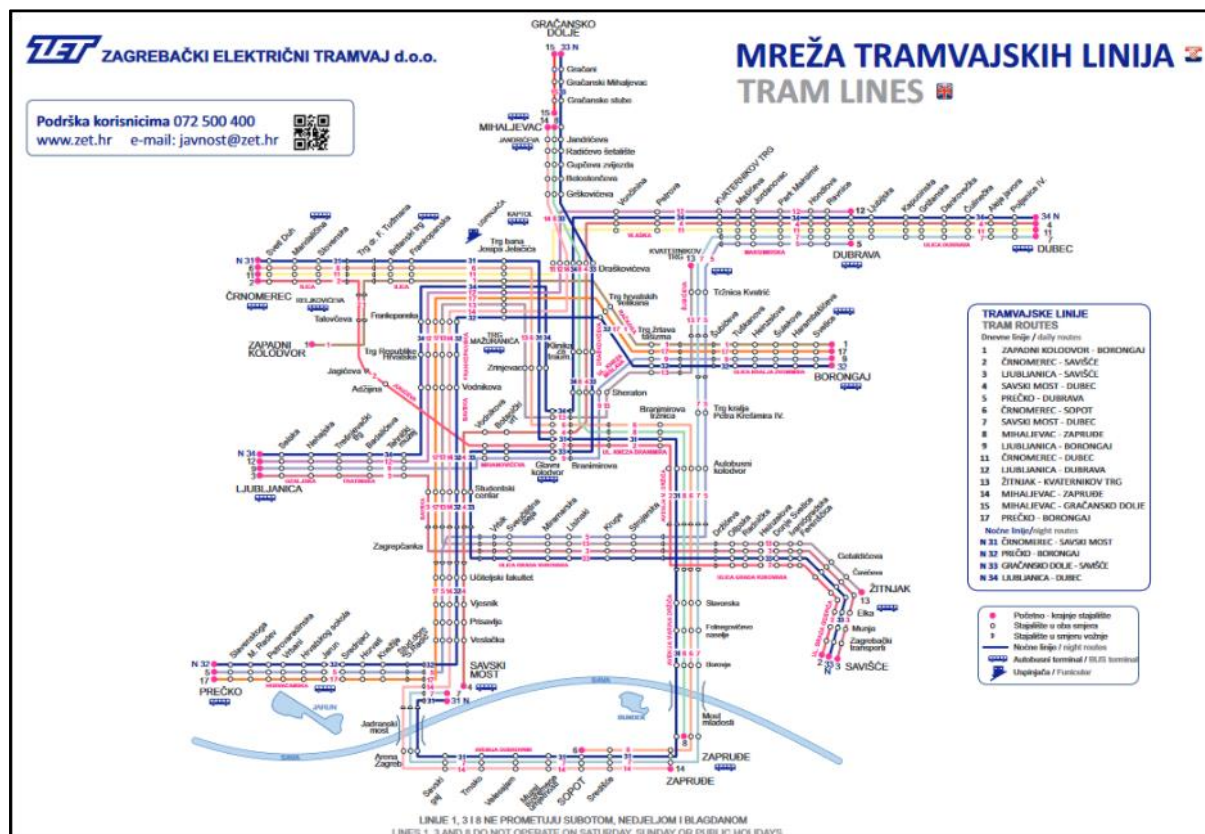
Široko područje obuhvata je grad Zagreb (naselje Zagreb), koji je najveći grad u Republici Hrvatskoj, sa 690 tisuća stanovnika i gustoćom naseljenosti 2200 stanovnika po kilometru kvadratnom. [102]. Sa stupnjem motorizacije od 420 osobnih vozila na 1000 stanovnika, prometna zagušenja uobičajena su u jutarnjim i poslijepodnevnim vršnim periodima [103].

Javni gradski prijevoz se odvija tramvajem (15 linija u dnevnom prometu) i autobusom (140 linija u dnevnom prometu), u nadležnosti prijevoznika Zagrebački električni tramvaj (ZET) [104]. Mreža tramvajskih linija (Slika 16) sadrži ukupno 120 km tramvajskih kolosijeka. Maksimalna zabilježena obrtna brzina je iznosila 15 km/h 1999., te od tada njezina vrijednost opada i trenutačno iznosi 13 km/h, čineći tramvajski promet jednim od najsporijih na području Europe. Mala operativna brzina posljedica je nepostojanja prometne politike koja se bavi prioriteto javnoga gradskoga prijevoza i nepostojanjem sveobuhvatnog ITS sustava. Tako postoje problemi s izdvajanjem trakova za javni prijevoz, nepoštivanjem žutih trakova, te ne postoji prioritet na raskrižjima, što čini javni prijevoz neatraktivnim za putnike. Osim u domeni ZET-a, koji je tijelo zaduženo za javni gradski prijevoz, problem prioriteta pripada i u domenu Grada Zagreba, koji subvencionira ZET u visini od 72 % troškova [105].

Mrežu tramvajskih linija karakterizira velika prijevozna potražnja i malen slijed vozila, što je uobičajeno za gradske linije javnog prijevoza. Tramvajski terminali položeni su u perifernim dijelovima grada, zbog čega su linije većinom dijagonalne, a mreža je dobro povezana. No zbog toga su linije dugačke, što nepovoljno utječe na vrijeme putovanja. Ubrzo nakon polaska vozila s izvorišnog terminusa mogu se javiti problemi s nagomilavanjem vozila koje je u slučaju tramvajskog i gradskog autobusnog prometa dodatno potpomognuto:

- vozačima koji katkad ne kreću na vrijeme s izvorišnog terminala, već s terminala u periferiji grada koji nemaju uslužnih sadržaja kreću ranije da bi proveli više vremena na suprotnom terminalu s više uslužnih sadržaja
- voznim redom u kojemu polasci s terminala nisu regulirani između linija kako bi bili ravnomjerni, već su polasci ravnomjerni samo na pojedinačnim linijama, s posljedicom povremenih polazaka vozila različitih linija s istog terminala u isto vrijeme i nagomilavanjem pojedinih vozila već na početku trase putovanja

- velikom gustoćom tramvaja u mreži linija, tako da je prosječan razmak između susjednih tramvaja 0,7 km, koji je u središnjem dijelu grada po kojemu prometuje velik broj linija i manji.

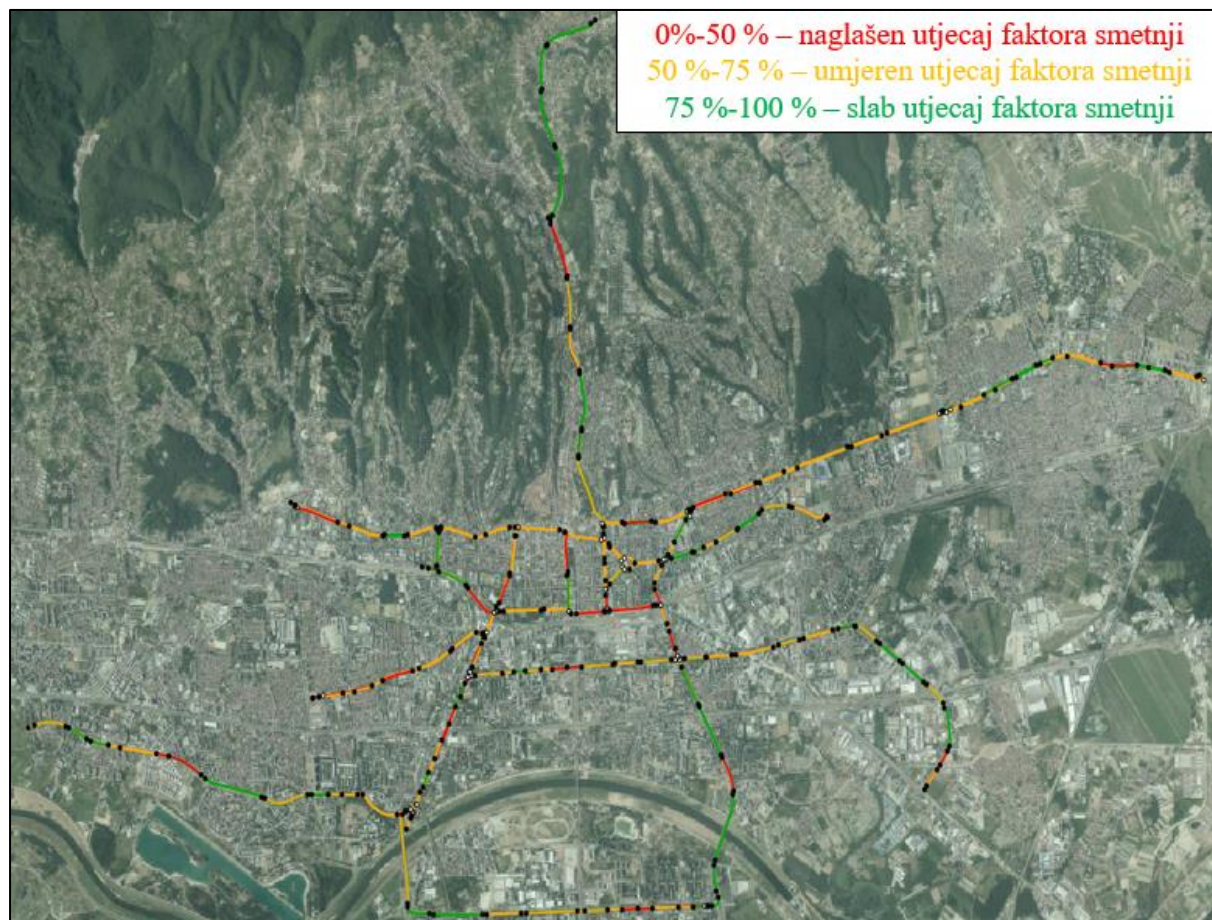


Slika 16. Mreža tramvajskih linija Zagreba – shematski prikaz
Izvor: [106]

Glede prioriteta javnoga gradskoga prijevoza grada Zagreba, postoji nekoliko istraživanja. U istraživanju [107] dobili su se odnosi stvarnih i idealnih brzina (Slika 17), tako da su se idealne brzine dobile iz stvarnog uzorka. Pokazalo se da bi povećanje operativne brzine bilo 41 % u slučaju idealnih brzina putovanja. U istraživanju [108] pokazano je da bi se samo poštivanjem žutih trakova postiglo povećanje operativne brzine za 3,6 %. U istraživanju [109] pokazalo se da bi implementacija prioriteta na raskrižjima u potpunosti rezultirala povećanjem operativne brzine za 23 %. Sva istraživanja naglašavaju da postoji velik prostor za poboljšanje operativne brzine poboljšanjem prioriteta tramvajskog podsustava.

Postoji nekoliko primijenjenih rješenja prioriteta tramvajskog podsustava u Zagrebu, no sva su ostala u fazi pilot-projekata. Prvo rješenje je bilo naziva „Davanje prioriteta javnom prijevozu“ u sklopu europskog projekta CIVITAS-ELAN iz programa FP7. Prioritet je primijenjen kao produljenje zelene faze na tri raskrižja u Savskoj ulici, te su se postigle vremenske uštede od 5 % na koridoru [110]. U sklopu istog projekta, uvedena je mjera poštivanja trakova za javni

gradski prijevoz od strane prometne policije, što je rezultiralo vremenskim uštedama od 25 % na istom koridoru.

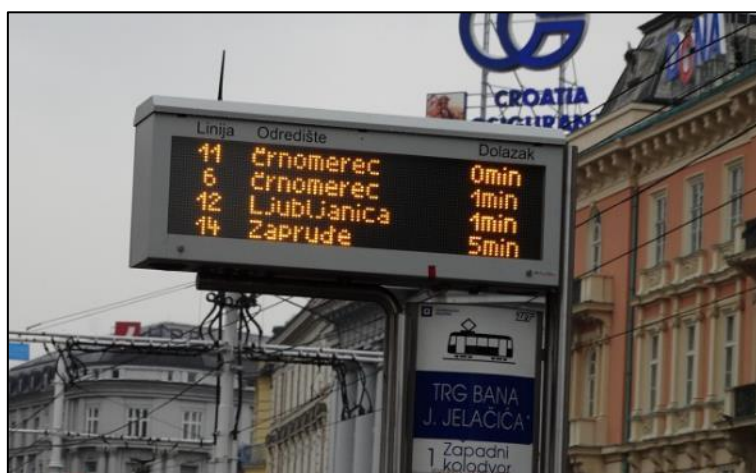


Slika 17. Odnos prosječne stvarne i idealne brzine vožnje kao pokazatelj prioriteta
Izvor: [107]

U postojećem stanju mreže linija javnog prijevoza Zagreba, postoje sljedeće primjene inteligentnih transportnih sustava:

- AVL i GIS – postoje uređaji za praćenje u vozilima i središnji sustav za praćenje kod prijevoznika na mreži, gdje se praćenje vozila može vidjeti na jednostavnoj karti s osvježavanjem informacija svakih deset sekundi, no ti se podatci ne pohranjuju niti analiziraju
- informacije za korisnike – kao zasloni na tramvajskim i autobusnim stajalištima (Slika 18) – određivanje potrebnog vremena do dolaska vozila određuje se samo na temelju lokacije vozila, što u vršnim periodima smanjuje preciznost; postojala je kroz godinu dana aplikacija treće strane za pametne uređaje koja je putnicima omogućavala uvid u predputne informacije, no obustavljena je nakon godine dana rada

- automatsko brojenje putnika – postoje vanjske i unutarnje kamere u tramvajima koje mogu snimiti izmjenu putnika, no podatci se ne obrađuju i čuvaju se kratko vrijeme
- sustav podrške – ne postoje optimizacijski algoritmi, već se vozni red izrađuje na temelju iskustva, što dugoročno može povećati troškove zbog činjenice što resursi nisu iskorišteni optimalno; u Zagrebu trenutačno ne postoji sveobuhvatni centar za nadzor i upravljanje prometom, koji bi osim javnog prijevoza, uključio i druge modalitete.



Slika 18. Putne informacije – zaslon na tramvajskom stajalištu
Izvor: [111]

Zagrebački električni tramvaj je primijenio sustav ATRON za praćenje vozila. No javili su se problemi vezani uz troškove održavanja sustava i nedostatak standardizacije, pa se opseg sustava morao smanjiti. Problem ATRON-a je u tome što se izgradio ITS koji nema mogućnost postizanja operativnog prioriteta javnog prijevoza koji bi trebao biti osnova za izgradnju svih ostalih podsustava, što bi dovelo do točnosti informacija. Stoga u postojećem stanju, putnici se ne mogu u potpunosti osloniti na dinamičko informiranje. Dodatni problem je u modernizaciji sustava naplate karata, koja je iziskivala velika sredstva, no uveden je zatvoreni sustav naplate karata koji ne komunicira s drugim sustavima, te nije postignuto automatizirano brojenje putnika.

Po pitanju mjere zadržavanja vozila, u mreži tramvajskih i autobusnih linija dosada nije bilo konkretne primjene. Jedini način kako se kompenziraju nepravilnosti je tradicionalno putem voznog reda, tako da se na odredišnom terminalu dodjeljuje vrijeme odmora vozača. Zadržavanje vozila upitno je za primjenu zbog:

- nedovoljno razvijenog sustava podrške kod prijevoznika koji ne može raditi precizne izračune

- velike opterećenosti mreže linija koja rijetko može dozvoliti mogućnost dužeg zadržavanja vozila na stajalištu
- slabe izdvojenosti mreže od ostalog prometa, narušavajući mogućnost preciznih izračuna.

Tablica 3. Karakteristike dnevnih tramvajskih linija, radni dan, studeni 2020., poslijepodnevni vršni period

broj	naziv linije	opseg	vrijeme obrta	brzina obrta	broj vozila	sljedi	frekvencija
1	Zapadni kolodvor – Borongaj	12km	1h00'	12km/h	5v	12'10"/v	5v/h
2	Črnomerec – Savišće	21km	1h50'	12km/h	14v	7'50"/v	8v/h
3	Ljubljana – Savišće	20km	1h40'	12km/h	8v	12'20"/v	5v/h
4	Savski most – Dubec	25km	2h10'	12km/h	14v	9'00"/v	7v/h
5	Prečko – Dubrava	29km	2h20'	12km/h	12v	11'40"/v	5v/h
6	Črnomerec – Sopot	21km	1h40'	13km/h	16v	6'10"/v	10v/h
7	Savski most – Dubec	33km	2h20'	14km/h	18v	7'30"/v	8v/h
8	Mihaljevac – Zaprude	17km	1h10'	14km/h	5v	14'50"/v	4v/h
9	Ljubljana – Borongaj	15km	1h20'	11km/h	10v	8'10"/v	7v/h
11	Črnomerec – Dubec	24km	1h50'	13km/h	18v	6'10"/v	10v/h
12	Ljubljana – Dubrava	19km	1h40'	12km/h	14v	6'50"/v	9v/h
13	Žitnjak – Kvaternikov trg	23km	2h00'	11km/h	10v	11'50"/v	5v/h
14	Mihaljevac – Zaprude	26km	2h00'	13km/h	16v	7'20"/v	8v/h
15	Mihaljevac – Gračansko Dolje	5km	20'	14km/h	2v	11'30"/v	5v/h
17	Prečko – Borongaj	25km	2h00'	12km/h	17v	7'10"/v	8v/h

Izvor: [106]

Tablica 4. Karakteristike tramvajskog voznog parka

naziv	pušten u promet	broj vozila	broj vrata	sjedala	stajajuća površina	visina poda vozila	duljina vozila	najveća brzina
TMK 201 701	1974.	6v	6	37	30m ²	0,9m	28m	56km/h
ČKD Tatra T4	1976.	2v	3	20	14m ²	0,9m	14m	55km/h
ČKD Tatra T4 B4	1977.	25v	6	41	29m ²	0,9m	29m	55km/h
ČKD Tatra KT4	1985.	32v	4	25	21m ²	0,9m	18m	55km/h
TMK 2100	1994.	12v	5	45	30m ²	0,9m	27m	58km/h
TMK 2200	2005.	100v	6	48	39m ²	0,4m	32m	70km/h
TMK 2300	2009.	2v	4	35	21m ²	0,4m	21m	70km/h

Izvor: autor

U ZET-u se koriste primitivni modeli na temelju prethodnih iskustava, a vozni red se konstruira prema razvrstavanju u razdoblja tijekom dana u profile – postoji nekoliko takvih profila, koji su vršni, izvanvršni, subotnji i nedjeljni. Prema tome, jedan profil vremena putovanja predstavlja jedan primitivni model. Primitivni modeli, iako učinkoviti na velikom broju mjerenja, jedina su mogućnost za oblikovanje voznog reda, budući da nedostaje sustavno prikupljanje prometnih podataka i podataka o javnom gradskom prijevozu, što onemogućuje detaljno prometno-tehnološko održavanje sustava.

Prema Zakonu o radnom vremenu, obveznim odmorima mobilnih radnika i uređajima za bilježenje u cestovnom prijevozu [112], vozačima se mora osigurati odmor od pola sata tijekom radnog vremena, no to vrijeme nije uračunato u vrijeme zadržavanja na terminalu, već se oduzima od ukupnog radnog vremena tijekom dana. Prijevoznik određuje vozni red pri kojem se vozači u prosjeku odmaraju na odredišnom terminalu pet minuta, pa prema tome ta vremena u radnom vremenu vozača nisu obvezatna, osiguravajući vozačima nastavak vožnje u suprotnom smjeru bez odmaranja u slučaju kašnjenja.

Karakteristike dnevnih tramvajskih linija za interesno vrijeme ovog rada prikazuje Tablica 3 – poslijepodnevni vršni period u studenom 2020. Tramvajska vozila tijekom jednog radnog dana imaju jutarnji i poslijepodnevni vršni profil na kojemu je broj vozila maksimalan, a između tih profila postoje profili s manje vozila na mreži.

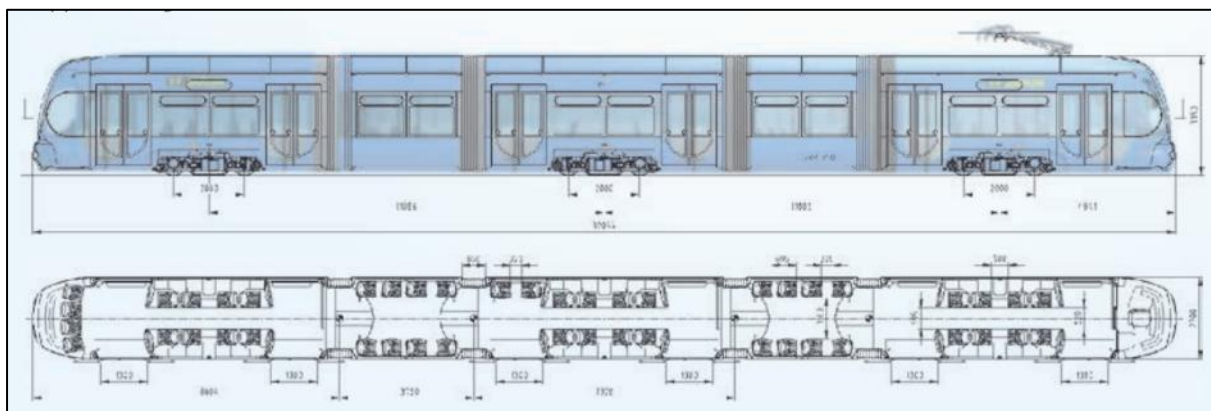


Slika 19. Tipovi tramvaja novijeg datuma: ČKD Tatra KT4 (gore lijevo), TMK 2100 (gore desno), TMK 2200 (dolje lijevo) i TMK 2300 (dolje desno)

Izvor: autor

Vozni park mreže tramvajskih linija Zagreba je heterogen i čine ga tipovi tramvaja domaćeg (TMK) i stranog proizvođača (ČKD Tatra). Karakteristike voznog parka prikazuje Tablica 4. Tramvaji pušteni u promet nakon 2000. imaju bolje karakteristike brzina, ubrzanja i usporenja

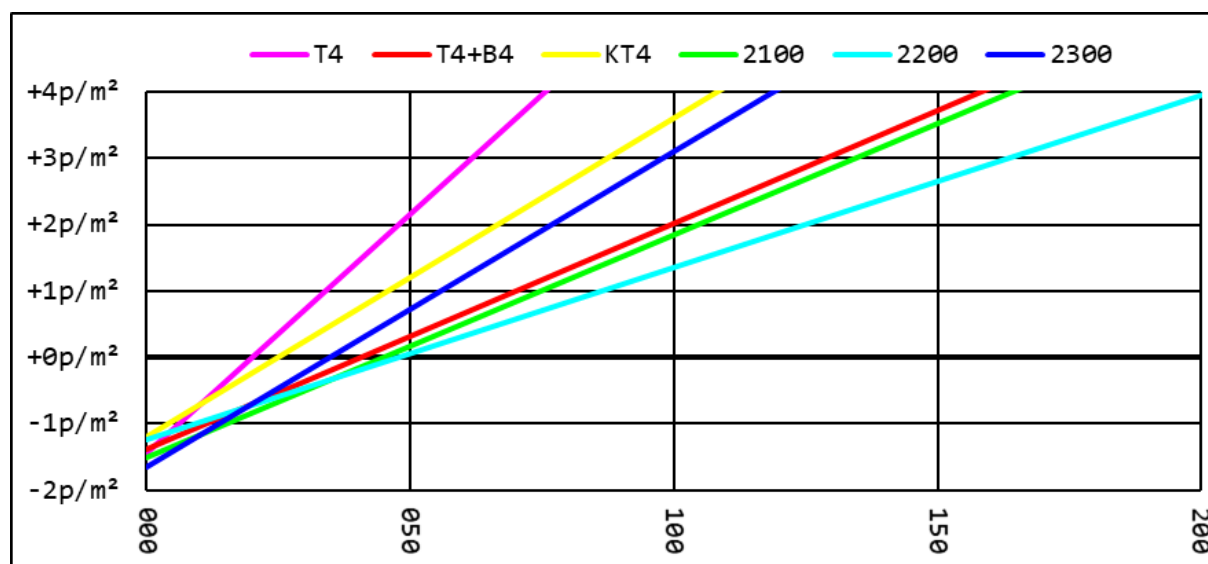
Zbog niskopodnog dizajna novih tramvaja, smanjeno je vrijeme zadržavanja tramvaja na stajalištima u slučajevima velike prijevozne potražnje (Slika 20). No kako se vidi s tlocrta slike, postoje prolazi u tramvaju koji su široki samo za prolazak jednog putnika, što je rezultat kompromisa u dizajnu koji je rezultirao niskopodnošću vozila. Zbog toga pri velikoj zauzetosti vozila dolazi do otežanog kretanja putnika unutar vozila i nedovoljnog iskorištenja kapaciteta vozila.



Izvor: [78]

U Zagrebu postoje tri tipa trakova za tramvajski promet:

- bijeli trak je prometna površina koju osim tramvajskih vozila mogu koristiti ostala vozila – 26 % mreže
- žuti trak, osim tramvaja mogu koristiti autobusi ZET-a i taksi vozila – 21 % mreže
- zeleni trak (fizički odvojen trak) najčešće je na središnjim dijelovima avenija i mostovima – 54 % mreže.



Slika 21. Zauzetost vozila u ovisnosti o broju putnika u vozilu

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Zakonodavni prioritet žutih trakova u Zagrebu funkcionira u preventivnom smislu samo kada su u susjednim trakovima tokovi osobnih vozila stabilni. S porastom protoka vozila u trakovima koji se nalaze pored žutih trakova raste vjerojatnost njihova nepoštivanja. Također, nepoštivanje žutih trakova javlja se kada žuti trak prelazi u bijeli trak uoči semaforiziranog raskrižja, pa vozači ulaze u žute trakove koji se nastavljaju kao bijeli trakovi za skretanje udesno. U postojećem stanju, ne postoje mjere korekcije koje bi sankcionirale neovlašteno korištenje žutih trakova, niti mjere koje bi postigle djelomičan fizički prioritet postavljanjem barijera.

Bijeli trakovi se nalaze na površinama blizu raskrižja, gdje je potrebno osigurati trak za desno skretanje vozila, ili na mjestima gdje se želi osigurati dovoljan kapacitet za promet osobnih vozila.

Stajališta u mreži tramvajskih linija mogu imati jedan ili dva perona (najčešće u slučaju velike prijevozne ponude i potražnje na ključnim mjestima u gradu), a u odnosu na postojanje semaforiziranog raskrižja u blizini, mogu biti:

- ispred raskrižja (eng. *near-side*) – kada između prostora stajališta i prostora semaforiziranog raskrižja nema dovoljne duljine traka za jedno vozilo
- iza raskrižja (eng. *far-side*) – kada između prostora raskrižja i prostora stajališta nema dovoljne duljine traka za jedno vozilo
- između raskrižja (eng. *mid-block*) – kada stajalište ne pripada niti jednoj od prethodne dvije navedene kategorije.

Prema definicijama, stajališta teoretski mogu biti i ispred raskrižja i iza raskrižja, no to je u praksi rijedak slučaj. Optimalnost položaja stajališta u odnosu na semaforizirano raskrižje se može promotriti s više aspekata:

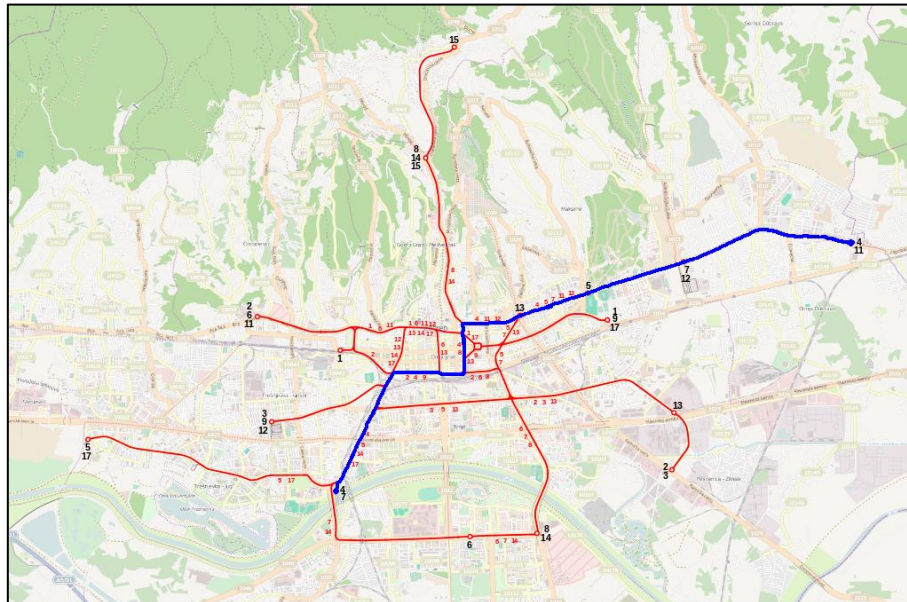
- s aspekta prometne sigurnosti, stajališta prije raskrižja su uvijek nepovoljnija opcija ako je ispred stajališta pješački prijelaz (iako je semaforiziran) zbog sigurnosti pješaka
- s aspekta propusne moći, češće je povoljnija situacija kada je stajalište nakon semaforiziranog raskrižja, jer je manja vjerojatnost pojave kumulativnog efekta zbog interakcija vremena zadržavanja na stajalištu i faza raskrižja; ako je udio zelene faze u raskrižju velik, kao u slučaju tramvajskih koridora duž avenija, tada je stajalište iza raskrižja povoljnija opcija jer je manja vjerojatnost zaustavljanja vozila zbog raskrižja; u slučaju velikog udjela trajanja crvene faze u ciklusu raskrižja stajalište prije raskrižja postaje povoljnija opcija
- s aspekta udobnosti vožnje, održavanja vozila, energetske učinkovitosti i ergonomije, stajališta prije raskrižja su povoljnija opcija jer je manji broj složenih radnji za vozače.

3.1 Karakteristike tramvajske linije 4

Budući da je ručno prikupljanje podataka zbog ograničenja moglo obuhvatiti samo jednu tramvajsku liniju, odabrana je linija 4 Savski most – Dubec u Zagrebu. S opsegom od 25 km, linija zauzima 21 % mreže tramvajskih linija. Slika 22 prikazuje područje rasprostiranja linije u tramvajskoj mreži – linija je prema [53] dijagonalna, te povezuje sjeveroistočni i jugozapadni dio grada. No u kontekstu istraživanja, linija je karakteristična po tome što obuhvaća najveći broj koridora u mreži tramvajskih linija u kojima je frekvencija zadana voznim redom velika, a utjecaj ostalog prometa najizraženiji, što liniju, među svim dnevnim i noćnim tramvajskim linijama, čini optimalnom za provedbu istraživanja.

Linija se sastoji od 31 stajališta, od kojih su dva, Branimirova i Dubec, jednostruka i pripadaju smjeru Savski most – Dubec. Ukupan broj pojedinačnih stajališta je stoga 60, od kojih su tri

na terminalima – na terminalu Savski most je jedno stajalište za izlaz putnika i jedno stajalište za ulaz putnika (terminus), a na terminalu Dubec postoji samo jedno stajalište koje je i za izlaz i za ulaz putnika (terminus). Tako linija ima ukupno 60 odsječaka između stajališta, od kojih je na jednom odsječku, koji povezuje izlazno i ulazno stajalište na terminalu Savski most, vozilo prazno.



Slika 22. Položaj tramvajske linije 4 u mreži tramvajskih linija Zagreba
Izvor: prilagodio autor prema [114]

Terminali (Slika 23) imaju sljedeća obilježja:

- terminal Savski most se nalazi na jugozapadnom rubu linije, ima 2 perona na svakom od dva kolosijeka, gdje je vanjski kolosijek namijenjen samo za liniju 4
- terminal Dubec nalazi se na sjeveroistočnom rubu linije, ima 2 perona na svakom od dva kolosijeka, a unutarnji kolosijek namijenjen je za linije 4 i 7.

Na terminalu Savski most, zbog premale udaljenosti kolosijeka, vozila na susjednim kolosijecima se nerijetko zaustavljaju jedno iza drugoga, da bi putnicima bio olakšan ulazak u vozilo. No to u vršnim periodima može smanjiti kapacitet terminala, budući da jedna od linija u tom slučaju, umjesto dva, raspolaže jednim kolosijekom. Za terminal se predlaže rekonstrukcija u intermodalni terminal koji bi obuhvatio i željeznički promet [115].

Na terminalu Dubec, linija 11, zbog manjeg slijeda od linija 4 i 7, mora imati zaseban kolosijek, pa zbog dijeljenja kolosijeka s linijom 7, dolazi do poremećaja u vremenima dolaska na terminal i odlaska s terminala prema voznom redu. U situacijama kada je frekvencija vozila maksimalna, dolazi do zagušenja terminala, pa pojedina vozila ne mogu ući u prostor terminala,

a izmjena putnika obavlja se na raskrižju prije terminala, smanjujući kvalitetu usluge za putnike, koji najčešće na terminalu presjedaju na autobusne linije. I prije produženja s terminala Dubrava na terminal Dubec, linija 7 imala je najveći opseg na mreži, a prijevozna ponuda terminala bila je zadovoljavajuća. Stoga, ukoliko se ne izgradi dodatni kolosijek, preporučuje se povratak na prethodno stanje, u kojem je jedan kolosijek za jednu liniju uobičajena učinkovita praksa.



Slika 23. Terminali tramvajske linije 4: Savski most (lijevo) i Dubec (desno)

Izvor: autor

Linija 4 ima najveći udio žutih trakova od svih tramvajskih linija od 64 %, pa je varijabilnost vremena putovanja posebno izražena zbog nepoštivanja žutih trakova od strane osobnih vozila, što je pokazano u [99]. Iz položaja tramvajske linije 4 u mreži vidi se kako jedine dvije linije koje nisu u interakciji s linijom 4 su linije 1 i 15, odnosno linija 4 je u interakciji na manjem ili većem dijelu opsega s gotovo svim ostalim tramvajskim linijama.



Slika 24. Kritična stajališta na liniji po pitanju nagomilavanja vozila: Branimirova (lijevo) i Kvaternikov trg (desno)

Izvor: [99]

Dionice linije su sljedeće:

- Savska cesta, za koju je karakterističan utjecaj tokova ostalih vozila kroz bijele trakove i nepoštivanje žutih trakova
- Ulica Antuna Mihanovića, ulica Valentina Vodnika i Branimirova ulica, gdje je velik udio poprečnih pješačkih prijelaza, a kod stajališta Botanički vrt tramvajski promet je na sporednom privozu na kojemu je velik udio crvene faze u raskrižju; također je u smjeru Savski most – Dubec tramvajski trak u suprotnom smjeru (eng. *contraflow lane*) od ostalih vozila
- Draškovićeve ulica, gdje je trak u smjeru Dubec – Savski most u suprotnom smjeru od ostalog prometa
- Vlaška ulica sadrži velik udio bijelih trakova zbog relativno uskog prostora ulične mreže i poznata je po izraženim tokovima vozila u tim trakovima
- Maksimirska cesta je poznata po velikom broju parkirališnih mjesta za vozila uzduž tramvajskih trakova bliže središtu grada, a na dijelu daljem od središta grada (prema terminalu Dubrava) postižu se najveće brzine prometovanja tramvaja na liniji
- Avenija Dubrava je dio koji je najudaljeniji od središta grada, na kojoj je tramvajski promet pod utjecajem sinkroniziranih semaforiziranih raskrižja.

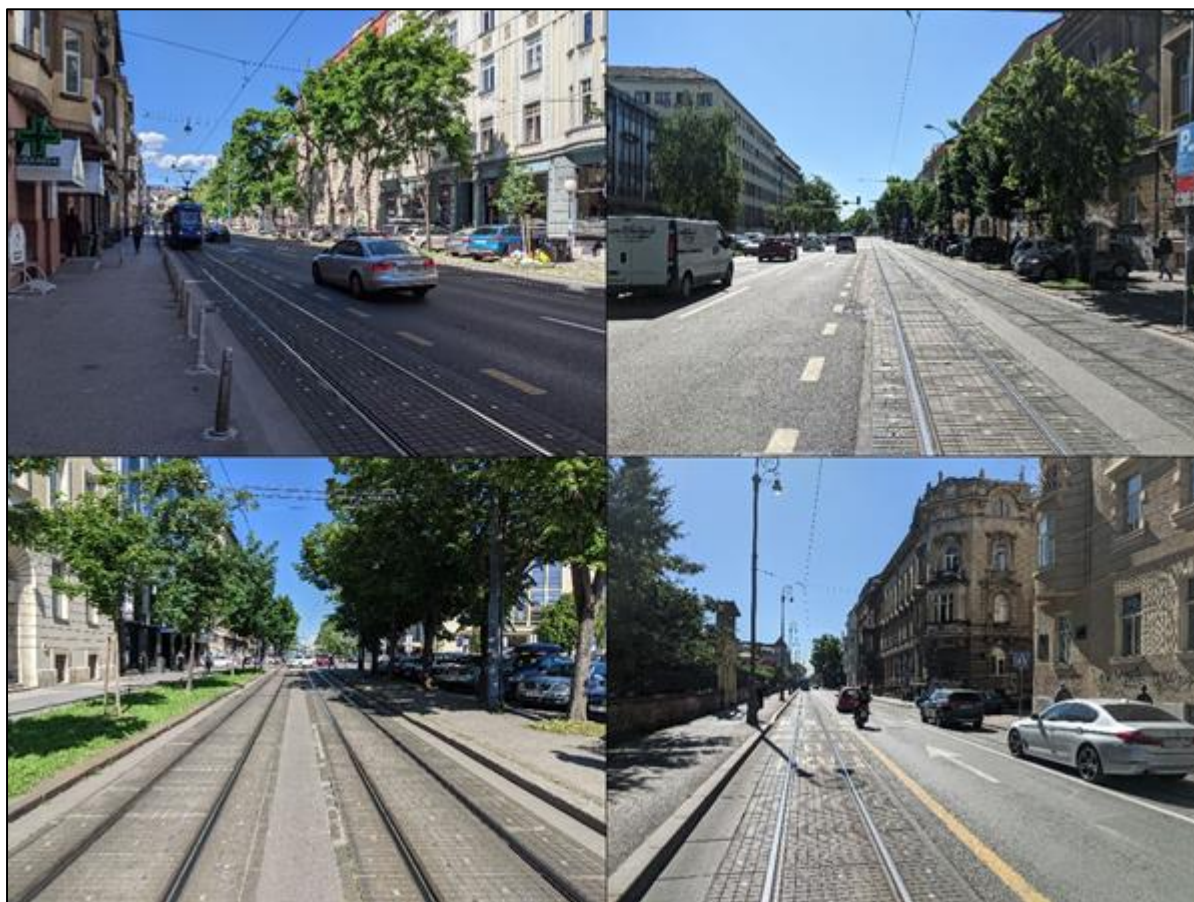
Dva najkritičnija stajališta na liniji su stajalište Branimirova i stajalište Kvaternikov trg u smjeru terminala Savski most (Slika 24), na kojima dolazi do nagomilavanja vozila, jer stajališta imaju jedan peron i nalaze se ispred semaforiziranog raskrižja s malim udjelom zelene faze u ciklusu, a ukupna frekvencija vozila je velika.

Iako na liniji niti na jednom dijelu trase ne postoji potpuni fizički prioritet, postoje mjesta na mreži na kojima nema utjecaja ostalih vozila – primjerice:

- kod stajališta Traumatologija (Slika 25 – gore lijevo), gdje je žuti trak u smjeru Savski most – Dubec u suprotnom smjeru od tokova ostalih vozila
- kod stajališta Branimirova (Slika 25 – gore desno), gdje konfiguracija trakova stvara trak za javni prijevoz u suprotnom smjeru od ostalih vozila
- kod stajališta Glavni kolodvor (Slika 25 – dolje lijevo), gdje ostala vozila ne mogu prometovati
- kod stajališta Botanički vrt (Slika 25 – dolje desno), gdje je žuti trak u smjeru Savski most – Dubec u suprotnom smjeru od tokova ostalih vozila.

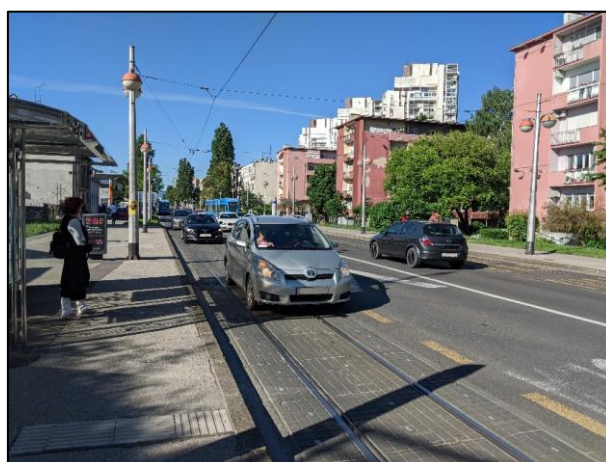
Nepoštivanje žutih trakova nastaje najčešće u jutarnjem i poslijepodnevnom vršnom periodu na koridoru Savske ceste (Slika 26), gdje nastaje zbog jako izraženih tokova ostalih vozila, koji

u potpunosti blokiraju trak vozila, pa dio vozila prelazi u žuti trak radi vremenskih ušteda. Što je veći broj vozila u žutom traku, veća je i vjerojatnost nepoštivanja žutih trakova. Nepoštivanje žutih trakova događa se i zbog stvaranja repa čekanja preko duljine bijelog traka za desno skretanje uoči semaforiziranih raskrižja (Slika 27).



Slika 25. Dionice linije sa zanemarivim utjecajem tokova vozila – trakovi u suprotnom smjeru ili izdvojeni trakovi

Izvor: autor



Slika 26. Nepoštivanje žutih trakova kod stajališta Veslačka

Izvor: autor

Kumulativni efekt smetnji posebno je izražen na stajalištima Jordanovac, Mašićeva i

Kvaternikov trg u smjeru središta grada, gdje nakon stajališta slijedi trak za desno skretanje prije semaforiziranog raskrižja ili se trak za desno skretanje nastavlja odmah nakon stajališta, a desni skretači prolaze raskrižjem u istoj fazi kao i tramvaji i pješaci koje vozila moraju propustiti na usporednom pješačkom prijelazu (Slika 28). Tako tramvaji povremeno ne uspijevaju proći raskrižjem za vrijeme vlastite faze.



Slika 27. Nepoštivanje žutih trakova zbog repa čekanja desnih skretača kod stajališta Vjesnik
Izvor: autor



Slika 28. Kumulativni efekt faktora smetnji – stajališta, traka za desno skretanje, semaforiziranog raskrižja i usporednih pješaka kod stajališta Kvaternikov trg
Izvor: autor



Slika 29. Parkirana vozila pored tramvajskog traka: na označenim parkirališnim mjestima kod stajališta Mašićeva (lijevo) i na neoznačenim površinama uz nepropisno parkiranje kod stajališta Prisavlje (desno)
Izvor: autor

Na Maksimirskoj cesti pored stajališta Kvaternikov trg, Mašićeva, Jordanovac i Park

Maksimir, u oba smjera nalaze se parkirana vozila pored tramvajskih kolosijeka na označenim parkirališnim mjestima (Slika 29 – lijevo). No na nekim dijelovima trase vozila se mogu parkirati na neoznačenim površinama za parkiranje, kako je pješacima omogućeno barem 1,6 metara širine pješačkog nogostupa (Slika 29 – desno), te nerijetko dolazi i do nepropisnih parkiranja. Bez obzira na postojanje parkirališnih mjesta, problemi koje stvaraju parkirana vozila su sljedeći:

- povremeno sprječavanje normalnog odvijanja tramvajskog prometa zbog nepropisno parkiranih vozila
- povećanje rizika od nastanka prometnih nesreća
- smanjenje idealne brzine prometovanja, jer vozači tramvaja voze opreznije pored parkirališnih mjesta zbog opasnosti od nepropisnog uključivanja osobnih vozila u promet.



Slika 30. Kumulativni efekt smetnji pješaka na nesemaforiziranom pješačkom prijelazu i tokova ostalih vozila – Vlačka ulica
Izvor: autor



Slika 31. Semaforizirani pješački prijelaz u istoj fazi kao i tramvaji koji skreću desno, stajalište Vodnikova
Izvor: autor

Izražen utjecaj tokova osobnih vozila na bijelom traku naglašen je u Vlačkoj ulici u smjeru stajališta Draškovićeve, gdje intenzivan pješački tok na pješačkom prijelazu i izražen tok osobnih vozila usporavaju tramvajski promet od stajališta Vončinina do stajališta Draškovićeve (Slika 30). Taj dio se pokazuje problematičnim zbog kumulativnog efekta tokova pješaka i osobnih vozila.

Samo jedan semaforizirani pješački prijelaz na liniji ima fazu takvu da se pješaci kreću u istoj fazi kao i tramvaji na linijama 4 i 9 koji skreću desno (Slika 31). Takav pješački prijelaz se smatra nesemaforiziranim pješačkim prijelazom, jer pješaci imaju prednost prolaska nad tramvajem u istoj fazi.

3.2 Dobivanje opisnih veličina vremena putovanja

Za prikupljanje podataka o vremenima putovanja istražila se mogućnost dobivanja povijesnih podataka. U tu svrhu, dostupan je bio Master plan Grada Zagreba, Zagrebačke županije i Krapinsko-zagorske županije iz 2019. [116]. Uvidom u podatke, zaključeno je da detaljnost podataka nije zadovoljavajuća za dobivanje željenih vremena putovanja u rezoluciji od jedne sekunde.

Tablica 5. Karakteristike segmenata tramvajske linije 4 za vrijeme prikupljanja podataka

oznaka segmenta	duljina	linije koje prometuju segmentom	frekvencija prema voznom redu	slijed prema voznom redu	broj uzoraka
01 30 svms stdm	0,1km	4 7	15v/h	4'10"/v	160
02 30 stdm vjsn	0,9km	4 5 14 17	28v/h	2'10"/v	320
03 30 vjsn zgrp	0,6km	4 5 14 17	28v/h	2'10"/v	320
04 30 zgrp stcn	0,5km	3 4 13 14 17	33v/h	1'50"/v	380
05 30 stcn vdnk	0,3km	4 9 12 13 14 17	45v/h	1'20"/v	530
06 30 vdnk glkl	0,9km	2 4 9	22v/h	2'50"/v	250
07 30 glkl brnm	0,5km	2 4 6 9 13	37v/h	1'40"/v	420
08 30 brnm shrt	0,2km	4 8 9 13	23v/h	2'40"/v	270
09 30 shrt trhr	0,5km	4 8	11v/h	5'30"/v	120
10 30 trhr drsk	0,1km	4 8 11 12 14	38v/h	1'40"/v	440
11 30 drsk kvtg	1,1km	4 11 12	25v/h	2'20"/v	290
12 30 kvtg mksm	1,5km	4 5 7 11 12	38v/h	1'30"/v	430
13 30 mksm dbrv	1,8km	4 5 7 11 12	38v/h	1'30"/v	430
14 30 dbrv dnkv	1,6km	4 7 11	24v/h	2'30"/v	270
15 30 dnkv dubc	1,9km	4 7 11	24v/h	2'30"/v	270
16 30 dubc dnkv	1,7km	4 7 11	24v/h	2'30"/v	270
17 30 dnkv dbrv	1,6km	4 7 11	24v/h	2'30"/v	260
18 30 dbrv mksm	1,8km	4 5 7 11 12	38v/h	1'30"/v	420
19 30 mksm kvtg	1,4km	4 5 7 11 12	38v/h	1'30"/v	420
20 30 kvtg drsk	1,1km	4 11 12	25v/h	2'20"/v	280
21 30 drsk trhr	0,1km	4 8 11 12 14	38v/h	1'40"/v	450
22 30 trhr shrt	0,5km	4 8	11v/h	5'30"/v	120
23 30 shrt brnm	0,2km	4 8 9 13	23v/h	2'40"/v	260
24 30 brnm glkl	0,5km	2 4 6 9 13	37v/h	1'40"/v	420
25 30 glkl vdnk	0,9km	2 4 9	22v/h	2'50"/v	240
26 30 vdnk stcn	0,3km	4 9 12 13 14 17	45v/h	1'20"/v	520
27 30 stcn zgrp	0,5km	3 4 13 14 17	33v/h	1'50"/v	380

oznaka segmenta	duljina	linije koje prometuju segmentom	frekvencija prema voznom redu	sljedeć prema voznom redu	broj uzoraka
28 30 zgrp vjsn	0,6km	4 5 14 17	28v/h	2'10"/v	320
29 30 vjsn stdm	0,9km	4 5 14 17	28v/h	2'10"/v	320
30 30 stdm svms	0,2km	4 7	15v/h	4'10"/v	160

Izvor: autor uz korištenje programa *Microsoft Excel* [113]

Zagrebački električni tramvaj vodi evidenciju vremena putovanja u svrhu izrade voznog reda. Također, na raspolaganju je sustav praćenja vozila. No pokazalo se da obrada vremena ne bi rezultirala vremenima putovanja u rezoluciji od jedne sekunde, stoga se odustalo od prikupljanja podataka o vremenima na taj način.

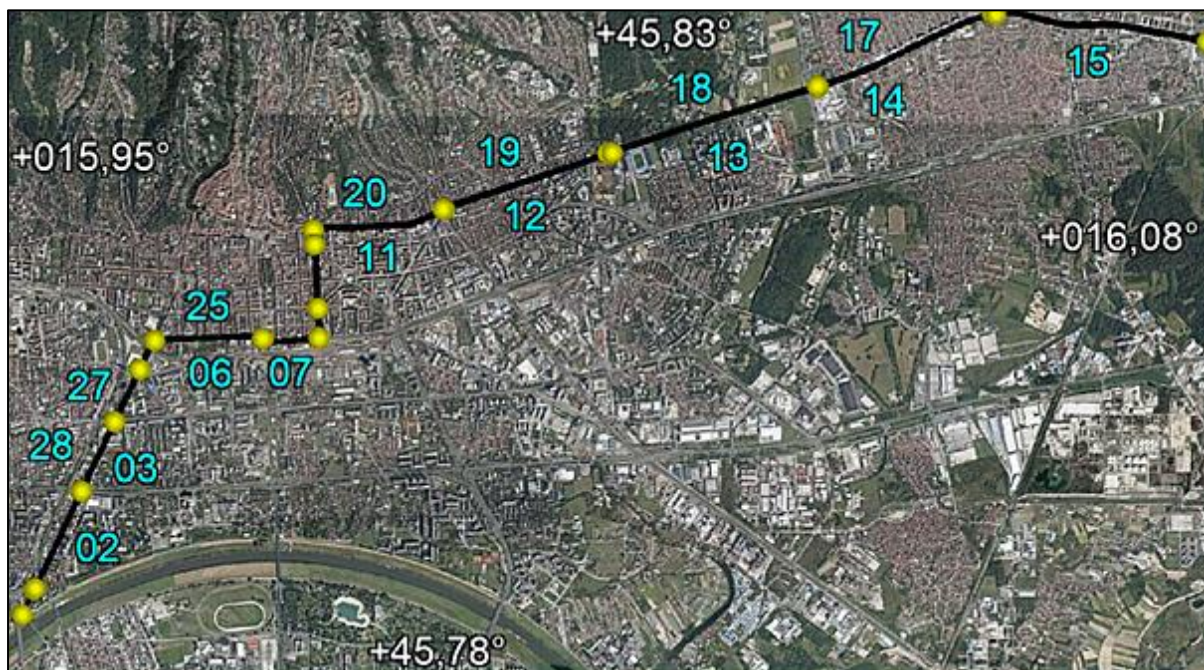
Alternativni način prikupljanja podataka o broju putnika bi uključivao kamere ugrađene u vozila javnog prijevoza, no nalaze se samo u tramvajima TMK 2200 i TMK 2300, te se pokazalo da bi prikupljanje i obrada podataka iz kamera bila zahtjevna, budući da ne postoji sustav automatiziranog brojenja putnika povezan s kamerama.

Prikupljanje podataka se provodilo za vrijeme pandemije SARS-CoV-2, no u vrijeme prikupljanja podataka nisu bile uvedene epidemiološke mjere koje bi rezultirale poremećajima u prijevoznom procesu. Vozni red koji je bio aktualan u to vrijeme je uobičajeni jesenski vozni red, u kojemu u vršnim periodima prometuje maksimalan broj tramvaja.

Za potrebe dobivanja vremena, tramvajska linija 4 podijelila se na segmente. Pristupilo se ručnom terenskom prikupljanju podataka o vremenima, koje su obavljali brojitelji tako da su bilježili prolaskе vozila promatranjem. Brojitelji su stajali na rubovima segmenata gdje dolazi do uključivanja i isključivanja tramvajskih linija iz koridora tramvajske linije 4. Tako je jedan brojitelj bilježio prolaskе prednjih krajeva tramvaja na zadanom presjeku u oba smjera. Bitno je napomenuti da je promatrački presjek, koji je granica između segmenata, bilo mjesto koje je najčešće u sredini prostora semaforiziranog raskrižja, budući da je na njemu mala vjerojatnost usporavanja i zaustavljanja vozila koje prolazi u vlastitoj fazi, te nema utjecaja ostalih tokova vozila.

Karakteristike odabranih segmenata prikazuje Tablica 5. Segmenti označeni brojevima od 1 do 15 predstavljaju smjer linije Savski most – Dubec, a segmenti označeni brojevima od 16 do 30 smjer Dubec – Savski most. Iz tablice se vidi da su segmenti duži oko terminala Dubec, jer se terminal nalazi u periferiji grada. Odabir segmenata prema konstantnosti frekvencije rezultira činjenicom da najkraći segmenti ima duljinu 0,1 km, a najduži segment 1,9 km. Također je primjetan odnos veća frekvencija – manji slijed – veći broj prikupljenih podataka

zbog reciprociteta frekvencije i slijeda, te većeg broja prolazaka tramvaja pri većoj frekvenciji u jednakom razdoblju promatranja. Položaj segmenata linije 4 u gradskom tkivu Zagreba prikazuje Slika 32. Segmenti su označeni crnim linijama i brojevima, a žutim krugovima su označene granice segmenata.



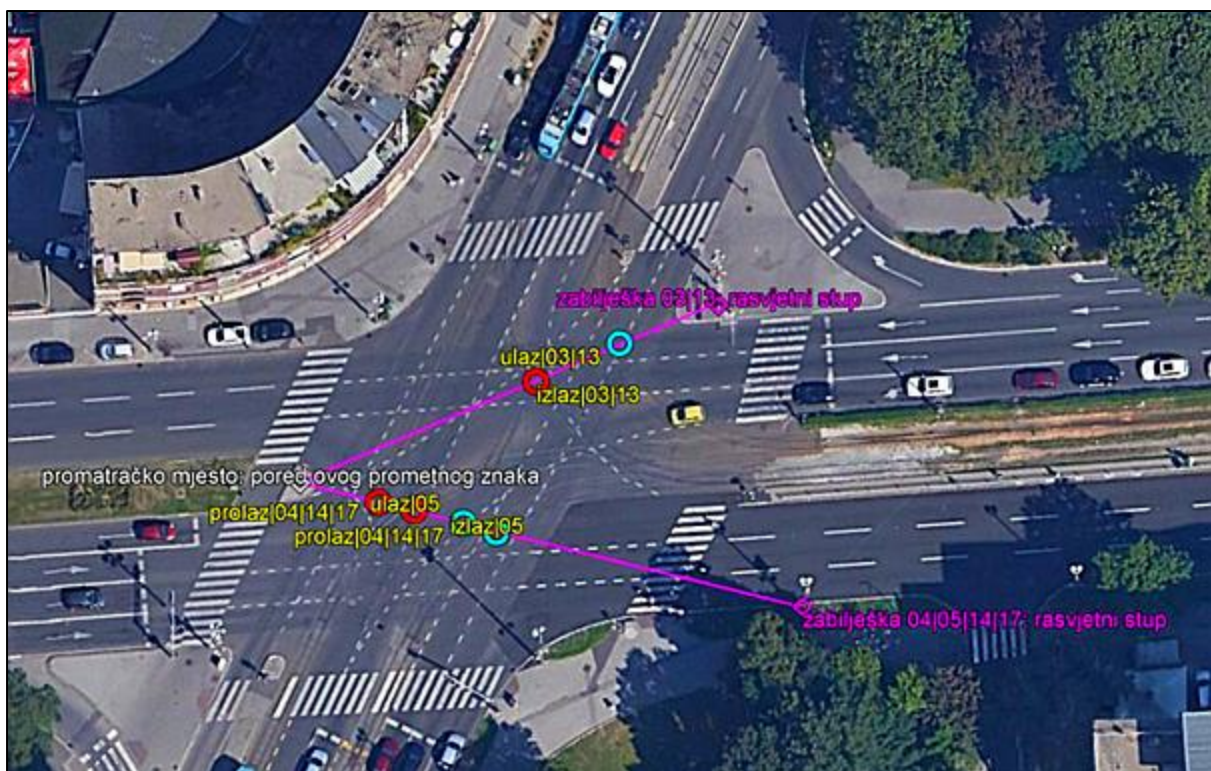
Slika 32. Segmenti tramvajske linije 4 u gradskom tkivu Zagreba
Izvor: autor uz korištenje programa Google Earth Pro [117]

Podatci su se prikupljali samo u poslijepodnevnom vršnom periodu, jer prije nastupanja vršnih perioda vozila dolaze iz spremišta, te se nakon završetka perioda vozila povlače u spremište, a u jutarnjem vršnom periodu je razdoblje kada su sva vozila na linijama istovremeno vrlo kratko, dok u poslijepodnevnom vršnom periodu, prema podacima ZET-a, razdoblje kada su sva vozila na mreži započinje radnim danom prije 15:00, a završava nakon 17:00. Nadalje, maksimalno opterećenje prometom osobnih vozila poslijepodne je najčešće između 16:00 i 17:00, stoga je za prikupljanje podataka odabran period od 15:00 do 17:00 u šest dana tijekom studenog 2020.:

- 05.11.2020. (četvrtak)
- 11.11.2020. (srijeda)
- 12.11.2020. (četvrtak)
- 19.11.2020. (četvrtak)
- 25.11.2020. (srijeda)
- 26.11.2020. (četvrtak).

Kako su brojitelji bilježili svaki prolazak tramvaja svih šest dana, prikupljeni podatci za navedeno poslijepodnevno razdoblje predstavljaju populaciju. Osim brojitelja na promatračkim mjestima, angažirani su dodatni brojitelji koji su mjerili vrijeme trajanja crvenih i zelenih faza za tramvaje na semaforiziranim raskrižjima i pješačkim prijelazima, te bilježili mjesta na kojima su se javljali izraženi tokovi vozila na tramvajskim kolosijecima.

Primjer jednog od ukupno 16 promatračkih mjesta prikazuje Slika 33. Zabilješke trenutka prolaska vozila na 14 promatračkih mjesta predstavljaju početni trenutak vremena putovanja u segmentu za dva segmenta koja počinju na promatračkom mjestu, te završni trenutak vremena putovanja za dva segmenta koja završavaju na promatračkom mjestu. Na svim promatračkim mjestima odabrani su najčešće rasvjetni stupovi ili stupovi semafora u pozadini vidnog polja kao mjesto detekcije prolaska prednjeg kraja tramvaja, a osim zbog činjenice što su raskrižja povoljna mjesta zbog zabilješke uključivanja i isključivanja ostalih tramvajskih linija na liniju 4, zbog faza gotovo nikad nema smetnji pri prolasku tramvaja mjestom detekcije, odnosno tramvaji se kreću teoretskom brzinom mjestom detekcije.



Slika 33. Primjer konfiguracije promatračkog mjesta kod stajališta Zagrepčanka na granici segmenata 3 i 4, te 27 i 28

Izvor: autor uz korištenje programa Google Earth Pro [117]

Preostala dva promatračka mjesta su terminali Savski most i Dubec, na kojima su brojitelji bilježili trenutke dolaska vozila na izlazno stajalište i trenutke odlaska vozila s ulaznog stajališta (na terminalu Savski most stajališta za izlaz i ulaz putnika su različita, dok se na

terminalu Dubec izlaz i ulaz putnika obavlja na istom stajalištu). U svrhu dobivanja vremena putovanja, na terminalima se u obzir nisu uzimala ni vremena zadržavanja na izlaznim i ulaznim stajalištima niti vožnje između stajališta, budući da te radnje pripadaju procesu zadržavanja vozila na terminalu, pa tako mogu biti pod znatnim utjecajem ponašanja vozača u praznom vozilu.

Po uzoru na prethodna istraživanja, za pokazatelje vremena putovanja, iz kojih će se dobiti zavisne varijable višestruke linearne regresije, odabrane su veličine apsolutnog karaktera koje prikazuje Tablica 6. Sve veličine najbolje je izraziti u minutama, jer se pokazuje za javni gradski prijevoz da je minuta najpogodnija mjerna jedinica vremena u kontekstu slijeda, frekvencije i transportnog rada. Za razliku od ostalih veličina koje opisuju odudaranje, zadnje dvije navedene veličine u tablici, razlika između devedesetog i desetog percentila i standardna devijacija, opisuju varijabilnost uzorka.

Tablica 6. Odabrani pokazatelji vremena putovanja apsolutnog karaktera u minutama

oznaka veličine	naziv	primjena
T	idealno vrijeme putovanja	nezavisna varijabla
t_{MI}	nulti percentil uzorka ili minimum	odudaranje
t_{10}	deseti percentil uzorka	odudaranje
t_{50}	pedeseti percentil uzorka ili medijan	odudaranje
t_{AV}	aritmetička sredina uzorka	odudaranje
t_{90}	devedeseti percentil uzorka	odudaranje
t_{MA}	stoti percentil uzorka ili maksimum	odudaranje
$t_{90} - t_{10}$	razlika između devedesetog i desetog percentila uzorka	varijabilnost
t_{SD}	standardna devijacija uzorka	varijabilnost

Izvor: autor

No osim stvarnih vremena putovanja, na temelju kojih će se izvršiti validacija modela, potrebno je za uspostavu modela odrediti relativne veličine, koje će se koristiti za izgradnju modela. Te veličine mogu biti relativne s obzirom na idealno vrijeme putovanja ili drugo vrijeme, te također po uzoru na prethodna istraživanja, odabiru se relativni pokazatelji koje prikazuje Tablica 7. Sve veličine su postotna odstupanja, jer će za uspostavu korelacija u modelu vremena putovanja biti zanimljiva promjena jednih u odnosu na druge. U slučaju veličina relativnog karaktera, varijabilnost uzorka opisuju veličine koje nisu dobivene u odnosu na idealno vrijeme putovanja, kao i koeficijent varijacije.

Tablica 7. Odabrani pokazatelji vremena putovanja relativnog karaktera u postotcima

veličina	opis	primjena
$\frac{t_{MI}}{T} - 1 = v_{MI/T}$	odstupanje minimalnog vremena putovanja od idealnog vremena putovanja	odudaranje

veličina	opis	primjena
$\frac{t_{10}}{T} - 1 = v_{10/T}$	odstupanje desetog percentila vremena putovanja od idealnog vremena putovanja	odudaranje
$\frac{t_{50}}{T} - 1 = v_{50/T}$	odstupanje medijalnog vremena putovanja od idealnog vremena putovanja	odudaranje
$\frac{t_{50}}{t_{10}} - 1 = v_{50/10}$	odstupanje medijalnog vremena putovanja od desetog percentila vremena putovanja	varijabilnost
$\frac{t_{90}}{T} - 1 = v_{90/T}$	odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od idealnog vremena putovanja	odudaranje
$\frac{t_{90}}{t_{50}} - 1 = v_{90/50}$	odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od medijalnog vremena putovanja	varijabilnost
$\frac{t_{MA}}{T} - 1 = v_{MA/T}$	odstupanje maksimalnog vremena putovanja od idealnog vremena putovanja	odudaranje
$\frac{t_{90} - t_{10}}{t_{50}} = \Delta_{90/10}$	omjer razlike devedesetog i desetog percentila vremena putovanja s medijalnim vremenom putovanja	varijabilnost
$1 - \frac{t_{10}}{t_{50}}$	odstupanje desetog percentila vremena putovanja od medijalnog vremena putovanja	varijabilnost
$\frac{t_{AV}}{T} - 1 = v_{AV/T}$	odstupanje prosječnog vremena putovanja od idealnog vremena putovanja	odudaranje
$\frac{t_{SD}}{t_{AV}}$	omjer standardne devijacije i prosječnog vremena putovanja – koeficijent varijacije	varijabilnost

Izvor: autor

3.3 Određivanje idealnog vremena putovanja

Za razliku od većine provedenih istraživanja ovog tipa, posebnost ovog istraživanja je u prometno-tehnološkom aspektu, što u slučaju vremena putovanja znači određivanje idealne vrijednosti vremena putovanja, u slučaju kada:

- bi tramvaji na semaforiziranim raskrižjima prolazili kroz zeleno, odnosno ne bi bilo usporavanja tramvaja zbog crvenog na raskrižju
- na nesemaforiziranim pješačkim prijelazima ne bi bilo pješaka
- smanjenje brzine tramvaja ne bi uzrokovala niti osobna vozila niti druga vozila javnog prijevoza, a vozila bi prometovala idealnim brzinama.

Za određivanje idealnog vremena putovanja, također se pretpostavlja jedinstveno ubrzanje, usporenje i vožnja konstantnom brzinom – drugim riječima, karakteristike vozila i ponašanje vozača su isti. Prema tome, u svakoj točki na trasi linije bi se u idealnim uvjetima mogla definirati jedinstvena brzina prometovanja.

Za dobivanje idealnog vremena putovanja, bilo je potrebno podijeliti svaki segment na odsječke prema dva uvjeta:

- na svakom odsječku brzina ili ubrzanje su konstantni
- na svakom odsječku tip odsječka je konstantan.

3.3.1 Mjerodavne brzine prema stilu vožnje

Za svaku točku na svakom segmentu odredila se maksimalna konstantna brzina kojom vozilo može prometovati. Pretpostavlja se da je u idealnim uvjetima ponašanje vozača stohastičkog karaktera, stoga se modeliranje idealnih konstantnih brzina izvršilo mjerenjem brzine vožnje vozača u večernjim satima, kada su uvjeti u mreži linija bili bliži idealnim. Opaženo je da bi za dovoljno jednostavan i precizan model brzine trebalo kvantificirati, tako da se koristi najmanja brzina koja je potrebna u mreži, a sve ostale brzine bile bi višekratnici najmanje brzine. Dobiveno je kako se ta brzina kreće između 9 km/h i 12 km/h u slučajevima kada tramvaj prelazi preko aktivne skretnice (skretnice kod koje je za vrijeme prikupljanja podataka moguća promjena smjera kretanja). Da bi vrijednost bila matematički jednostavna i u mjernoj jedinici metara u sekundi, koja je ključna za ubrzanja i usporenja, kao minimalna vrijednost mjerodavne brzine uzeta je 10,8 km/h ili 3 m/s. Daljnjim opažanjem prometovanja vozila u idealnim uvjetima određeni su slučajevi prometovanja na mreži i pripadajuće konstantne brzine, koje prikazuje Tablica 8.

Tablica 8. Dodijeljene konstantne brzine prema radnjama u mreži

slučaj	dodijeljena brzina
zadržavanje na stajalištu	0,0 km/h 0m/s
vožnja preko aktivne skretnice od prolaska prednjeg kraja vozila 6 m prije skretnice do prolaska prednjeg kraja vozila preko mjesta razilaženja obje tračnice	10,8 km/h 3m/s
vožnja preko zavoja do 21,6 m tračničke tangente od prolaska prednjeg kraja vozila početkom zavoja do prolaska prednjeg kraja vozila 30 m nakon kraja zavoja	
vožnja preko križanja s ostalim kolosijecima (ulaznim, poprečnim, izlaznim) na kojima nema aktivne skretnice od prolaska prednjeg kraja vozila početkom križanja do prolaska prednjeg kraja vozila 30 m nakon križanja	21,6 km/h 6m/s
vožnja preko zavoja do 32,4 m tračničke tangente od prolaska prednjeg kraja vozila početkom zavoja do prolaska prednjeg kraja vozila 30 m nakon kraja zavoja	
vožnja preko nesemaforiziranih pješačkih prijelaza od prolaska prednjeg kraja vozila 36 m prije linije zaustavljanja za pješački prijelaz do prolaska prednjeg kraja tramvaja preko linije zaustavljanja	32,4 km/h 9m/s
vožnja pored niza parkirališnih mjesta za automobile neposredno uz tramvajski trak od mjesta početka prvog parkirališnog mjesta u nizu do mjesta prolaska prednjeg kraja vozila krajem zadnjeg parkirališnog mjesta u nizu	
vožnja ispod nadvožnjaka koja uzrokuje spuštanje pantografa ispod uobičajene visine od prolaska prednjeg kraja vozila početkom nadvožnjaka do prolaska prednjeg kraja vozila 30 m nakon kraja nadvožnjaka	
vožnja preko zavoja do 43,2 m tračničke tangente od prolaska prednjeg kraja vozila početkom zavoja do prolaska prednjeg kraja vozila 30 m nakon kraja zavoja	
slobodna vožnja po tramvajskim kolosijecima koji nisu potpuno izdvojeni od ostalog prometa fizičkom barijerom ili kolničkim zastorom	43,2 km/h 12m/s
slobodna vožnja po tramvajskim kolosijecima potpuno izdvojenim od ostalog prometa fizičkom barijerom ili kolničkim zastorom	54,0 km/h 15m/s

Izvor: autor

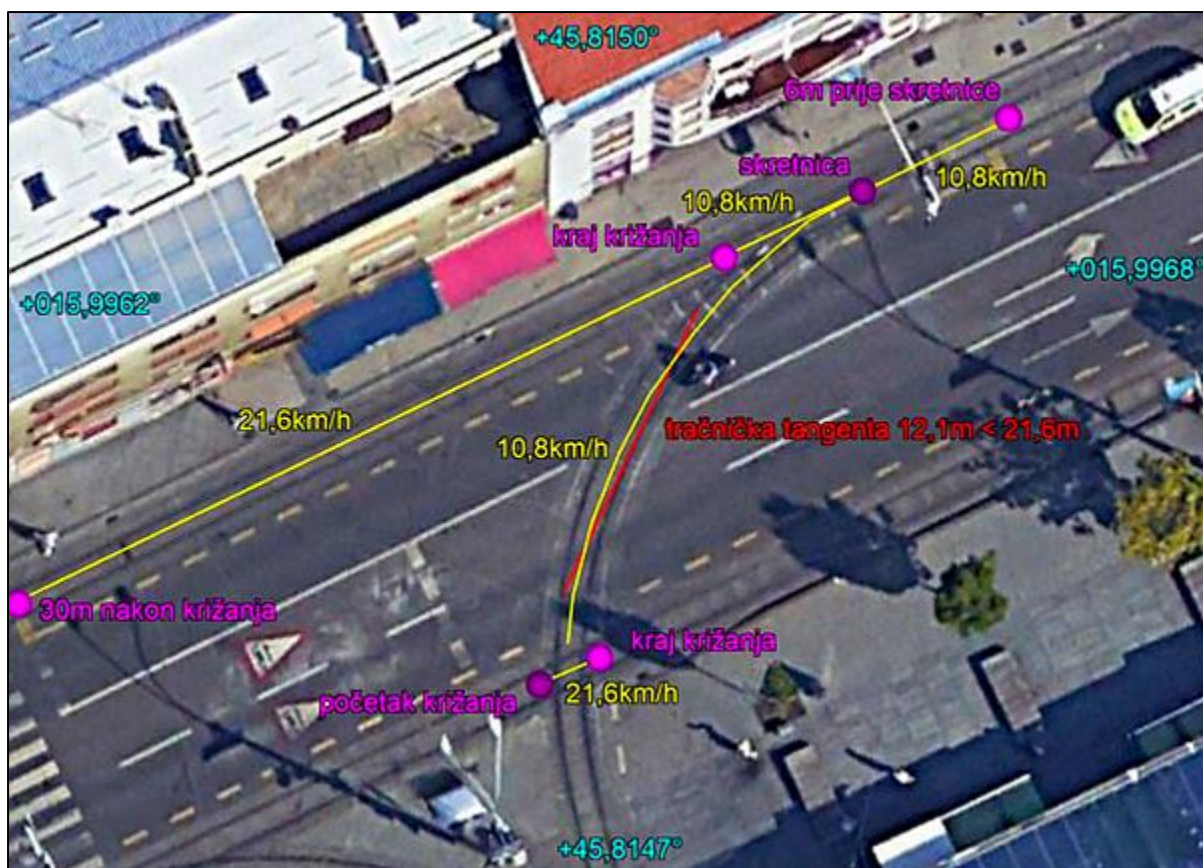


Slika 34. Mjerodavna brzina kod nesemaforiziranog pješačkog prijelaza, stajalište Botanički vrt
Izvor: autor uz korištenje programa Google Earth Pro [117]

Za podatke iz tablice u idealnim uvjetima vrijede sljedeće napomene:

- vozači smanjuju brzinu tijekom prolaska parkirališnim mjestima zbog opasnosti oduzimanja prednosti tramvaju od strane parkiranih vozila koja se uključuju u promet
- preko nesemaforiziranih pješačkih prijelaza vozači smanjuju brzinu da bi mogli zaustaviti vozilo prije pješačkog prijelaza naglim kočenjem u slučaju neočekivanog ponašanja pješaka u prometu
- ukoliko je više radnji u konfliktu na istom prostoru, mjerodavna je manja brzina
- kako linija 4 nema potpuno izdvojenih kolosijeka od ostalog prometa, brzina od 54,0 km/h nije se koristila niti na jednom dijelu mreže
- tračnička tangenta je zamišljena dužina koja u zavoju na njegovom najzakrivljenijem dijelu, spaja dvije točke vanjske tračnice, a pritom dodiruje unutarnju tračnicu zavoja
- vrijednost od 30 m nakon prolaska određena je prema najduljem tipu tramvaja, TMK 2200
- mjerodavne brzine nisu pod utjecajem zakonske regulative niti na jednom mjestu na trasi linije 4, budući da je zakonsko ograničenje brzine tramvaja 50 km/h, što se nigdje ne postiže na liniji, osim u rijetkim slučajevima manjih ograničenja brzine prometnim znakovima, kao što je između stajališta Mašićeva i Jordanovac, no promatranjem se pokazalo da u tim slučajevima vozači ne poštuju ograničenje brzine, pa je smislenije zanemariti ograničenja brzine radi točnosti modela.

Primjer određivanja mjerodavne brzine na primjeru nesemaforiziranog pješačkog prijelaza prikazuje Slika 34, a na primjeru zavoja, skretnice i križanja Slika 35.



Slika 35. Mjerodavna brzina na skretnici, križanju i u zavoju, stajalište Kvaternikov trg
Izvor: autor uz korištenje programa Google Earth Pro [117]

3.3.2 Zadržavanja na stajalištima

Budući da je vjerojatnost zaustavljanja tramvaja i otvaranja vrata u poslijepodnevnom vršnom periodu potpuna, pod vremenom zadržavanja na stajalištima u ovom modelu podrazumijeva se vrijeme od trenutka potpunog zaustavljanja vozila radi izmjene putnika na stajalištu do trenutka polaska vozila sa stajališta. Prema tome, usporavanja prije zaustavljanja i ubrzavanja nakon zaustavljanja ne uzimaju se u obzir, već te radnje pripadaju vremenu vožnje. Iznimka je slučaj u kojemu je semaforizirano raskrižje za tramvaje odmah nakon stajališta, te iako nije bitno za ovaj model, kao vrijeme zadržavanja na stajalištu podrazumijeva se samo vrijeme koje je bilo potrebno vozilu za zadržavanje u slučaju zelene faze na semaforiziranom raskrižju, pa se dodatno vrijeme izgubljeno zbog crvene faze raskrižja pripisuje vremenima vožnje.

Karakteristike svih stajališta na liniji 4 – smjer i segment kojemu pripadaju, položaj u odnosu na semaforizirano raskrižje, i klasifikaciju prema prijevoznoj potražnji prikazuje Tablica 9. Kako se u prikupljanje podataka nisu mogla uključiti vremena zadržavanja na stajalištima, ona se određuju iz pretpostavke da je u idealnim uvjetima prijevozna ponuda ravnomjerna, pa onda vrijeme zadržavanja nije pod utjecajem neravnomjerne prijevozne potražnje u vezi s

neravnomjernom prijevoznom ponudom, već se stajališta dijele u dvije skupine:

- s velikom prijevoznom potražnjom, što uključuje stajališta na raskrižjima tramvajskih kolosijeka i stajališta na terminalima, kojima se dodjeljuje konstantno vrijeme zadržavanja od 18 " – u tablici označena vrijednostima „da|raskrižje“ i „da|terminal“
- s malom prijevoznom potražnjom, što uključuje ostala stajališta, kojima se dodjeljuje vrijeme od 12 " – u tablici označena vrijednošću „ne“.

Tablica 9. Karakteristike stajališta tramvajske linije 4

segment	smjer na liniji	oznaka	broj perona	položaj u odnosu na semaforizirano raskrižje	prijevozna potražnja
02 30 stdm vjsn	svms dubc	veslac 025	1v	između	ne
02 30 stdm vjsn	svms dubc	prisav 026	1v	nakon	ne
03 30 vjsn zgrp	svms dubc	vjesni 026	1v	nakon	ne
03 30 vjsn zgrp	svms dubc	ucifak 026	1v	nakon	ne
04 30 zgrp stcn	svms dubc	zagrep 025	1v	nakon	da raskrižje
04 30 zgrp stcn	svms dubc	stucen 025	1v	prije	da raskrižje
06 30 vdnk glkl	svms dubc	vodnik 087	1v	između	da raskrižje
06 30 vdnk glkl	svms dubc	botvrt 087	1v	prije	ne
07 30 glkl brnm	svms dubc	glakol 085	2v	između	da terminal
07 30 glkl brnm	svms dubc	branim 086	1v	prije	ne
09 30 shrt trhr	svms dubc	sherat 357	1v	nakon	ne
09 30 shrt trhr	svms dubc	trauma 358	1v	prije	ne
10 30 trhr drsk	svms dubc	drasko 357	2v	između	da raskrižje
11 30 drsk kvtg	svms dubc	voncin 090	1v	prije	ne
11 30 drsk kvtg	svms dubc	petrov 090	1v	nakon	ne
11 30 drsk kvtg	svms dubc	kvatrg 064	1v	prije	da terminal
12 30 kvtg mksm	svms dubc	masice 072	1v	nakon	ne
12 30 kvtg mksm	svms dubc	jordan 072	1v	nakon	ne
12 30 kvtg mksm	svms dubc	maksim 070	1v	nakon	da terminal
13 30 mksm dbrv	svms dubc	hondlo 071	1v	nakon	ne
13 30 mksm dbrv	svms dubc	ravnic 073	1v	prije	ne
14 30 dbrv dnkv	svms dubc	dubrav 071	1v	prije	da terminal
14 30 dbrv dnkv	svms dubc	ljubij 063	1v	nakon	ne
14 30 dbrv dnkv	svms dubc	kapuci 065	1v	nakon	ne
14 30 dbrv dnkv	svms dubc	grizan 069	1v	prije	ne
15 30 dnkv dubc	svms dubc	dankov 085	1v	nakon	ne
15 30 dnkv dubc	svms dubc	culine 096	1v	nakon	ne
15 30 dnkv dubc	svms dubc	alejav 100	1v	nakon	ne
15 30 dnkv dubc	svms dubc	poljiv 100	1v	prije	ne
-----	svms dubc	dubecc 286	2v	nakon	da terminal
16 30 dubc dnkv	dubc svms	poljiv 281	1v	nakon	ne
16 30 dubc dnkv	dubc svms	alejav 269	1v	nakon	ne
16 30 dubc dnkv	dubc svms	culine 282	1v	nakon	ne
17 30 dnkv dbrv	dubc svms	dankov 252	1v	prije	ne

segment	smjer na liniji	oznaka	broj perona	položaj u odnosu na semaforizirano raskrižje	prijevozna potražnja
17 30 dnkv dbrv	dubc svms	grizan 246	1v	nakon	ne
17 30 dnkv dbrv	dubc svms	kapuci 244	1v	prije	ne
17 30 dnkv dbrv	dubc svms	ljubij 244	1v	nakon	ne
17 30 dnkv dbrv	dubc svms	dubrav 253	1v	između	da terminal
18 30 dbrv mksm	dubc svms	ravnic 252	1v	prije	ne
18 30 dbrv mksm	dubc svms	hondlo 251	1v	prije	ne
19 30 mksm kvgt	dubc svms	maksim 252	1v	nakon	da terminal
19 30 mksm kvgt	dubc svms	jordan 251	1v	prije	ne
19 30 mksm kvgt	dubc svms	masice 253	1v	prije	ne
19 30 mksm kvgt	dubc svms	kvatrg 243	1v	prije	da terminal
20 30 kvgt drsk	dubc svms	petrov 268	1v	prije	ne
20 30 kvgt drsk	dubc svms	voncin 270	1v	nakon	ne
21 30 drsk trhr	dubc svms	drasko 178	2v	između	da raskrižje
22 30 trhr shrt	dubc svms	trauma 178	1v	prije	ne
23 30 shrt brnm	dubc svms	sherat 177	1v	između	ne
24 30 brnm glkl	dubc svms	glakol 265	2v	između	da terminal
25 30 glkl vdnk	dubc svms	botvrt 268	1v	prije	ne
25 30 glkl vdnk	dubc svms	vodnik 268	1v	između	da raskrižje
27 30 stcn zgrp	dubc svms	stucen 204	2v	nakon	da raskrižje
28 30 zgrp vjsn	dubc svms	zagrep 205	1v	nakon	da raskrižje
28 30 zgrp vjsn	dubc svms	ucifak 205	1v	nakon	ne
29 30 vjsn stdm	dubc svms	vjesni 205	1v	između	ne
29 30 vjsn stdm	dubc svms	prisav 206	1v	nakon	ne
29 30 vjsn stdm	dubc svms	veslac 206	1v	između	ne
-----	dubc svms	savmos 197	1v	između	da terminal
-----	dubc svms	savmos 026	2v	između	da terminal

Izvor: autor uz korištenje programa *Microsoft Excel* [113]

Vrijednosti od 18" i 12" su dobivene mjerenjem i pod pretpostavkom da je na stajalištima s većom prijevoznom potražnjom vrijeme zadržavanja 50 % veće. U tablici je također prikazan položaj stajališta u odnosu na semaforizirano raskrižje, te postoje tri vrijednosti, koje su se dodjeljivale na temelju postojanja dovoljnog prostora za barem jedno vozilo od 30 m između stajališta i raskrižja ili obrnuto:

- „prije“ (između kraja prostora stajališta i početka prostora raskrižja manje je od 30 m, a prije prostora stajališta nema ograničenja)
- „nakon“ (između kraja prostora stajališta i početka prostora raskrižja manje je od 30 m, a nakon prostora stajališta nema ograničenja)
- „između“ (nema ograničenja ni prije početka prostora stajališta niti nakon kraja prostora stajališta).

Glede stvaranja kumulativnog efekta zbog interakcija stajališta i raskrižja, efekt bi trebao biti neznatan na stajalištima između i nakon semaforiziranih raskrižja, dok se kod stajališta prije semaforiziranih raskrižja stvara problem zadržavanja na stajalištu za vrijeme zelene faze i blokiranja dolaska sljedećeg vozila na stajalište za vrijeme crvene faze. Kako je prethodno navedeno, stajališta na terminalima Savski most i Dubec ne pripadaju niti jednom segmentu, jer njihova vremena ne pripadaju vremenima putovanja.

3.3.3 Ubrzanja i usporenja prema karakteristikama vozila

Ubrzanja vozila su se mjerila nakon zadržavanja na stajalištu, a usporenja vozila prije dolaska na stajalište, jer su to jedine situacije na mreži kada je zajamčeno zaustavljanje vozila. Također, mjerenje ubrzanja i usporenja obavljalo se oko reprezentativnih stajališta u mreži koja nisu pod nagibom (na liniji 4 ne postoje značajni nagibi) navečer, kada je velika vjerojatnost izbjegavanja konflikata s drugim vozilima javnog prijevoza ili ostalim vozilima. Mjereno je vrijeme potrebno vozilu od brzine 36 km/h do zaustavljanja na stajalištu za usporenje i vrijeme potrebno vozilu za ubrzavanje nakon polaska sa stajališta do 36 km/h za ubrzanje, te se pretpostavlja jednoliko ubrzanje i usporenje vozila prema jednadžbi:

$$a = \frac{V_K - V_P}{\Delta t} \quad (9)$$

a	akceleracija vozila (pozitivna vrijednost označava ubrzanje, negativna usporenje)
V_K	konačna brzina vozila (nula pri usporenju, 36km/h pri ubrzanju)
V_P	početna brzina vozila (36km/h pri usporenju, nula pri ubrzanju)
Δt	izmjereno vrijeme

Izvor: [2]

Kao i kod brzina, mjerenjem ubrzanja i usporenja tramvaja oko stajališta pokazala se stohastičnost zbog stila vožnje vozača i činjenice kasne li ili su u prednosti u odnosu na vozni red, no primjetno je kako ubrzanje i usporenje vozila ovise o tipu vozila, te kako se za svaki tip mogu odrediti mjerodavne vrijednosti, koje prikazuje Tablica 10, tako da se uočava kako vozila novijeg datuma imaju bolje karakteristike ubrzanja i usporenja zbog suvremenijih tehnologija upravljanja.

Tablica 10. Najčešće vrijednosti ubrzanja i usporenja prema tipu tramvaja dobivene mjerenjem

tip tramvaja	godina puštanja u promet	akceleracija – ubrzanje	akceleracija – usporenje
ČKD Tatra T4+B4	1977.	+0,7m/s ²	–1,1m/s ²
ČKD Tatra KT4	1985.	+0,8m/s ²	–1,1m/s ²
TMK 2100	1994.	+0,8m/s ²	–1,0m/s ²
TMK 2200	2005.	+0,9m/s ²	–1,2m/s ²

Izvor: autor

Nadalje, za potrebe konstrukcije odsječaka u geografskom okruženju, prikladno je imati cjelobrojnu vrijednost prijedene udaljenosti za vrijeme ubrzanja i usporenja, a za konačne i početne brzine uvrstiti prethodno definirane kategorije konstantnih brzina. Prijedena udaljenost pri jednolikom ubrzanju i usporenju dobiva se iz formule:

$$\Delta s = \frac{V_K^2 - V_P^2}{2a} \quad (10)$$

Δs | prijedena udaljenost
 V_K | konačna brzina vozila (nula pri usporenju, 36 km/h pri ubrzanju)
 V_P | početna brzina vozila (36 km/h pri usporenju, nula pri ubrzanju)
 a | jednoliko ubrzanje ili usporenje

Izvor: [2]

Prema jednadžbi, ukoliko se uzmu vrijednosti dobivenih brzina, koje su u metrima u sekundi višekratnici broja 3, očito je da će razlika u brojniku biti višekratnik broja 9, pa se za dobivanje cjelobrojnih vrijednosti prijedene udaljenosti u metrima u sekundi na kvadrat mora zapisati u obliku razlomka kojemu brojnik mora biti 3 ili 9, a nazivnik višekratnik broja 2. Prema tome, matematički pogodne veličine za ubrzanje i usporenje, koje bi rezultirale cijelim brojem metara i imale smisla za vozila javnog prijevoza prikazuje Tablica 11. Vrijednost $-2,250 \text{ m/s}^2$ bi odgovarala slučaju intenzivnog kočenja vozila javnog prijevoza u slučaju opasnosti, pa nije pogodna za model. Vrijednost $-1,500 \text{ m/s}^2$, iako predstavlja normalno kočenje vozila javnog prijevoza, nije se u praksi pokazala dostižnom za tramvaje, pa se kao vrijednost usporenja pri uobičajenom kočenju odabrala $-1,125 \text{ m/s}^2$. Vrijednost od $+0,900 \text{ m/s}^2$, iako ju u pravilu TMK 2200 postiže u praksi, nije se pokazala dostižnom za ostale tipove tramvaja, pa se kao mjerodavna vrijednost ubrzanja za tramvaje odabrala $+0,750 \text{ m/s}^2$.

Tablica 11. Karakteristične vrijednosti ubrzanja i usporenja za dobivanje cjelobrojne vrijednosti prijedene udaljenosti u metrima na temelju karakterističnih vrijednosti brzina

donja granica gornja granica	0m/s 3m/s	3m/s 6m/s	6m/s 9m/s	9m/s 12m/s	12m/s 15m/s
$\pm \frac{9\text{m}}{4\text{s}^2} = \pm 2,250\text{m/s}^2$	2m	6m	10m	14m	18m
$\pm \frac{9\text{m}}{6\text{s}^2} = \pm \frac{3\text{m}}{2\text{s}^2} = \pm 1,500\text{m/s}^2$	3m	9m	15m	21m	27m
$\pm \frac{9\text{m}}{8\text{s}^2} = \pm 1,125\text{m/s}^2$	4m	12m	20m	28m	36m
$\pm \frac{9\text{m}}{10\text{s}^2} = \pm 0,900\text{m/s}^2$	5m	15m	25m	35m	45m
$\pm \frac{9\text{m}}{12\text{s}^2} = \pm \frac{3\text{m}}{4\text{s}^2} = \pm 0,750\text{m/s}^2$	6m	18m	30m	42m	54m

Izvor: autor

Ubrzavanja i usporavanja su se dodjeljivala na liniji gdje je god bilo moguće postići maksimalnu brzinu i na vrijeme usporiti vozilo, jer to odgovara stilu vožnje većine vozača u

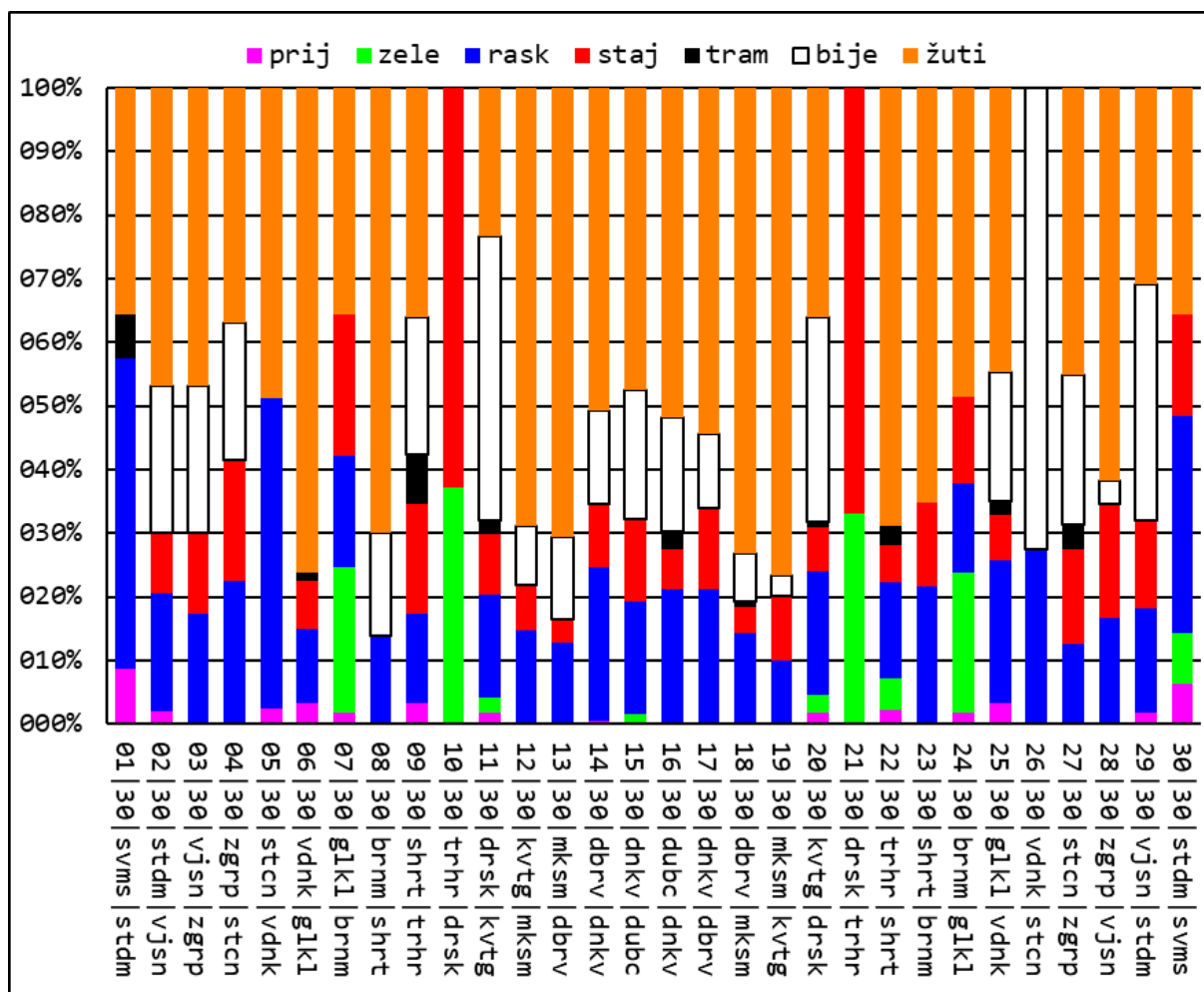
idealnim uvjetima. Prema tome, ne postoje dijelovi linije na kojima je odmah nakon ubrzavanja slijedilo usporavanje, nego je morao postojati dovoljno malen dio u kojemu se vozilo kretalo nekom od definiranih konstantnih brzina.

3.3.4 Tip cestovnih trakova

Osim prema mjerodavnim ubrzanjima, brzinama i usporenjima, odsječci na segmentima odredili su se prema namjeni u šest kategorija:

- „prij“ – nesemaforizirani pješački prijelaz – od zaustavne linije za pješački prijelaz do prestanka zebre
- „zele“ – trak potpuno odvojen od ostalog prometa ili trak na kojemu praktički nikad nema ostalih vozila – zeleni trak
- „rask“ – raskrižje – raskrižje ne mora biti semaforizirano, a podrazumijeva ukupan prostor u kojemu vozilo javnog prijevoza ima prednost prolaska nad ostalim vozilima; najčešće započinje semaforom, a završava poprečnim semaforiziranim pješačkim prijelazom u suprotnoj fazi raskrižja
- „staj“ – stajalište – trak u kojemu se nalazi vozilo zaustavljeno na stajalištu
- „tram“ – nesemaforizirano raskrižje s tramvajskim prometom – od početka interakcija tramvajskih kolosijeka do završetka interakcija tramvajskih kolosijeka, gdje određeni smjerovi kretanja tramvaja imaju prednost u odnosu na druge
- „bije“ – trak kojeg mogu koristiti sva vozila ili bijeli trak – najčešće se nastavlja nakon žutog traka, a završava na raskrižju i služi ostalim vozilima za skretanje desno u raskrižju, te ta vozila često moraju propustiti pješake na usporednom pješačkom prijelazu u istoj fazi
- „žuti“ – trak kojeg mogu koristiti samo vozila javnog prijevoza i taksiji – za žute trakove je karakteristično da ih ne poštuju ostala vozila u vršnim periodima pri velikim protocima vozila.

Prema svakom tipu traka, za svaki segment se može dobiti udio pojedinog tipa traka, kojeg prikazuje Slika 36. Udio pojedinog tipa traka na segmentu je važan za izgradnju modela, jer može ukazati na faktore smetnji koji su izraženiji po djelovanju, pogotovo na kratkim segmentima ili segmentima koji imaju manje različitih tipova trakova. Uočava se kako, usporedivši sa zelenim ili bijelim trakovima, na tramvajskoj liniji 4 prevladavaju žuti trakovi kao što je prethodno navedeno, te značajni udio duljine segmenta također zauzimaju raskrižja, stajališta i bijeli trakovi.



Slika 36. Prostorni udio tipova traka po segmentu
Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]



Slika 37. Stajalište Draškovićeva na segmentima 10 i 21
Izvor: autor

Segmenti 10 i 21 znatno odudaraju od drugih segmenata, jer su kratki i samo uključuju stajalište Draškovićeva (Slika 37), jer je stajalište (s dva perona u oba smjera) naglašena točka visoke frekvencije vozila i velike prijevozne potražnje zbog odvajanja kolosijeka u smjeru terminala Mihaljevac, Kvaternikovog trga, Trga žrtava fašizma, Trga bana Josipa Jelačića i

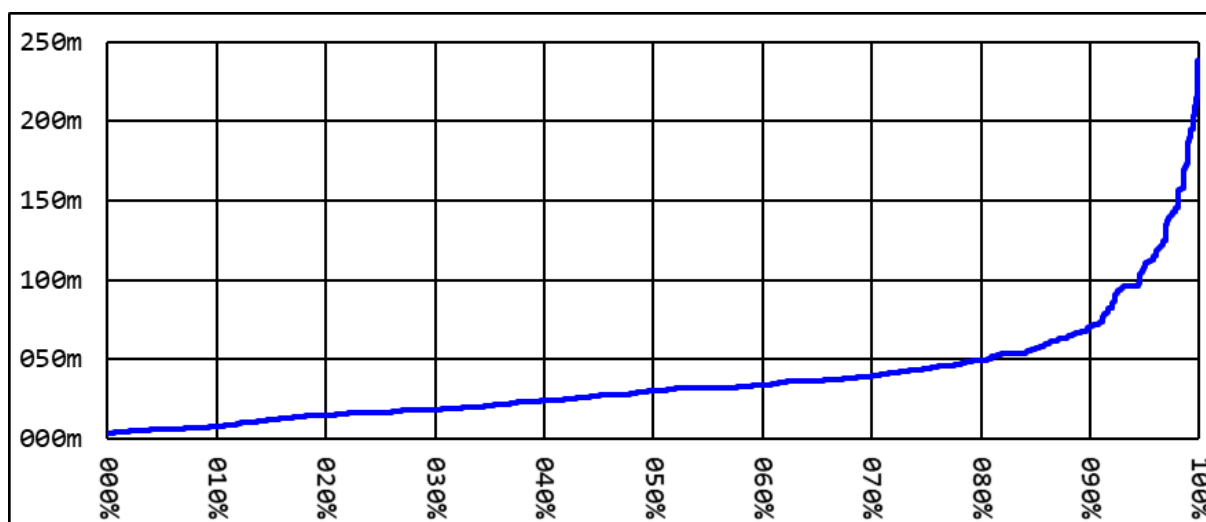
Glavnog kolodvora. Segmenti u oba smjera su kratki radi očuvanja konstantne frekvencije voznog reda.

3.3.5 Određivanje odsječaka iz načina vožnje i tipa trakova

Odsječci na svakom segmentu određeni su prema kriteriju:

- mjerodavnih ubrzanja, brzina i usporenja
- tipa traka
- rubova segmenata.

Kriteriji su uzrokovali različite duljine segmenata – od 3 m do 239 m. Kumulativnu razdiobu duljina segmenata prikazuje Slika 38, iz koje se vidi kako je većina odsječaka manjih duljina – 80 % do 50 m, zbog čestih promjena tipova traka i načina kretanja vozila.



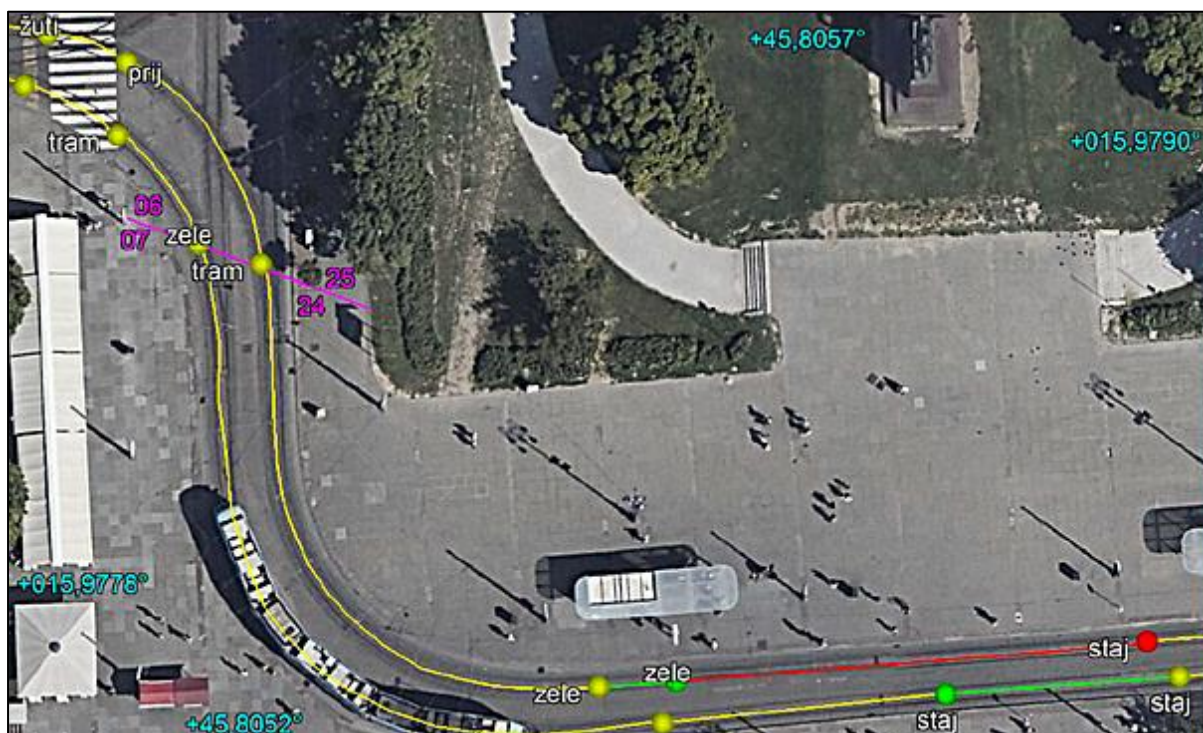
Slika 38. Kumulativna razdioba duljina odsječaka na liniji
Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Primjer određivanja odsječaka u geografskom okruženju na temelju načina vožnje i tipa traka na granici segmenata 6 i 7 te 24 i 25 pored stajališta Glavni kolodvor prikazuje Slika 39. Nazivi segmenata označeni su na početku segmenta, tako da su:

- zelenom bojom označeni segmenti konstantnog ubrzanja
- žutom bojom označeni segmenti konstantne brzine
- crvenom bojom označeni segmenti konstantnog usporenja.

Uzevši u obzir navedeno, Tablica 12 prikazuje idealno vrijeme putovanja i ostale veličine koje su od važnosti za uspostavu modela vremena putovanja. Navedena je frekvencija prema voznom redu u vozilima po minuti, jer se istraživanjem pokazalo da je minuta optimalna

jedinica vremena za modeliranje (okvirni vremenski razmak između stajališta i između semaforiziranih raskrižja je u redu veličine jedne minute). Uočljivo je kako je idealna brzina putovanja ovisna o duljini segmenta i broju stajališta, jer se na stajalištima vozila uvijek moraju zaustaviti, na dužim segmentima je manja gustoća stajališta, dok na kratkim segmentima dobivenim u ovom istraživanju uvijek postoji prepreka kao što je stajalište ili semaforizirano raskrižje.



Slika 39. Primjer određivanja odsječaka na granici segmenata 06 i 07 te 24 i 25 kod stajališta Glavni kolodvor
Izvor: autor uz korištenje programa Google Earth Pro [117]

Tablica 12. Idealno vrijeme putovanja i ostale relevantne karakteristike segmenata

oznaka segmenta	broj uzoraka	duljina	idealno vrijeme putovanja	frekvencija voznog reda	idealna brzina putovanja	ukupno semafora	ukupno stajališta
01 30 svms stdm	160	0,1km	30"	0,2v/'	13km/h	1	0
02 30 stdm vjsn	320	0,9km	2'20"	0,5v/'	23km/h	2	2
03 30 vjsn zgrp	320	0,6km	1'50"	0,5v/'	21km/h	2	2
04 30 zgrp stcn	380	0,5km	1'50"	0,6v/'	16km/h	1	2
05 30 stcn vdkn	530	0,3km	50"	0,7v/'	20km/h	2	0
06 30 vdkn glkl	250	0,9km	2'50"	0,4v/'	19km/h	3	2
07 30 glkl brnm	420	0,5km	2'00"	0,6v/'	15km/h	2	2
08 30 brnm shrt	270	0,2km	50"	0,4v/'	18km/h	1	0
09 30 shrt trhr	120	0,5km	1'50"	0,2v/'	18km/h	2	2
10 30 trhr drsk	440	0,1km	50"	0,6v/'	10km/h	0	1
11 30 drsk kvtg	290	1,1km	3'30"	0,4v/'	19km/h	6	3
12 30 kvtg mksm	430	1,5km	4'00"	0,6v/'	22km/h	6	3
13 30 mksm dbrv	430	1,8km	3'40"	0,6v/'	29km/h	6	2

oznaka segmenta	broj uzoraka	duljina	idealno vrijeme putovanja	frekvencija voznog reda	idealna brzina putovanja	ukupno semafora	ukupno stajališta
14 30 dbrv dnkv	270	1,6km	4'20"	0,4v/'	22km/h	8	4
15 30 dnkv dubc	270	1,9km	4'50"	0,4v/'	23km/h	6	5
16 30 dubc dnkv	270	1,7km	4'10"	0,4v/'	25km/h	6	3
17 30 dnkv dbrv	260	1,6km	4'30"	0,4v/'	21km/h	7	5
18 30 dbrv mksm	420	1,8km	3'50"	0,6v/'	29km/h	6	2
19 30 mksm kvtg	420	1,4km	4'20"	0,6v/'	20km/h	7	4
20 30 kvtg drsk	280	1,1km	3'10"	0,4v/'	22km/h	5	2
21 30 drsk trhr	450	0,1km	50"	0,6v/'	8km/h	0	1
22 30 trhr shrt	120	0,5km	1'20"	0,2v/'	24km/h	3	1
23 30 shrt brnm	260	0,2km	1'00"	0,4v/'	15km/h	1	1
24 30 brnm glkl	420	0,5km	1'50"	0,6v/'	17km/h	1	1
25 30 glkl vdnk	240	0,9km	2'50"	0,4v/'	19km/h	4	2
26 30 vdnk stcn	520	0,3km	50"	0,7v/'	18km/h	2	0
27 30 stcn zgrp	380	0,5km	1'30"	0,6v/'	20km/h	1	1
28 30 zgrp vjsn	320	0,6km	2'00"	0,5v/'	19km/h	2	2
29 30 vjsn stdm	320	0,9km	2'50"	0,5v/'	20km/h	2	3
30 30 stdm svms	160	0,2km	30"	0,2v/'	24km/h	0	1

Izvor: autor uz korištenje programa *Microsoft Excel* [113]

3.4 Dobivanje parametara faktora smetnji

Osim podataka za modeliranje idealnog vremena putovanja i podataka za dobivanje stvarnih vrijednosti vremena putovanja, prikupljali su se podatci vezani za faktore smetnji. Podatci su se dobivali iz:

- voznog reda prijevoznika u promatranom razdoblju: ukupna frekvencija vozila na segmentu
- geografskog okruženja: duljine segmenata, broj stajališta, tip stajališta prema prijevoznoj potražnji, broj perona na stajalištu, broj semaforiziranih raskrižja, broj nesemaforiziranih pješačkih prijelaza
- terenskih prikupljanja: trajanje zelene i crvene faze za tramvaje na semaforiziranim raskrižjima i nesemaforiziranim pješačkim prijelazima, izvanredna ograničenja brzine kretanja tramvaja, odsjeci s kritičnim tokovima vozila.

Na cijeloj liniji samo je jedan slučaj koordiniranih signalnih planova susjednih raskrižja na maloj razdaljini, tako da između raskrižja nema posrednih smetnji kao što su stajališta – raskrižje Vodnikova – Savska – Jukićeva, gdje je signalni plan raskrižja koje se javlja nakon lijevog skretanja tramvaja linija 4 i 9 (Slika 40) podešen tako da navedene linije odmah prolaze kroz raskrižje, jer bi u protivnom tramvaji zagušili raskrižje. Tako se na tom raskrižju uzima

kako nema semafora, već tramvaji slobodno prolaze raskrižjem nakon lijevog skretanja iz Vodnikove ulice na Savsku cestu.



Slika 40. Raskrižje koordiniranog signalnog plana za nadolazeće lijeve skretače između stajališta Vodnikova i Studentski centar
Izvor: autor

4 UTVRĐIVANJE RELEVANTNIH VELIČINA ZA MODELIRANJE VREMENA PUTOVANJA

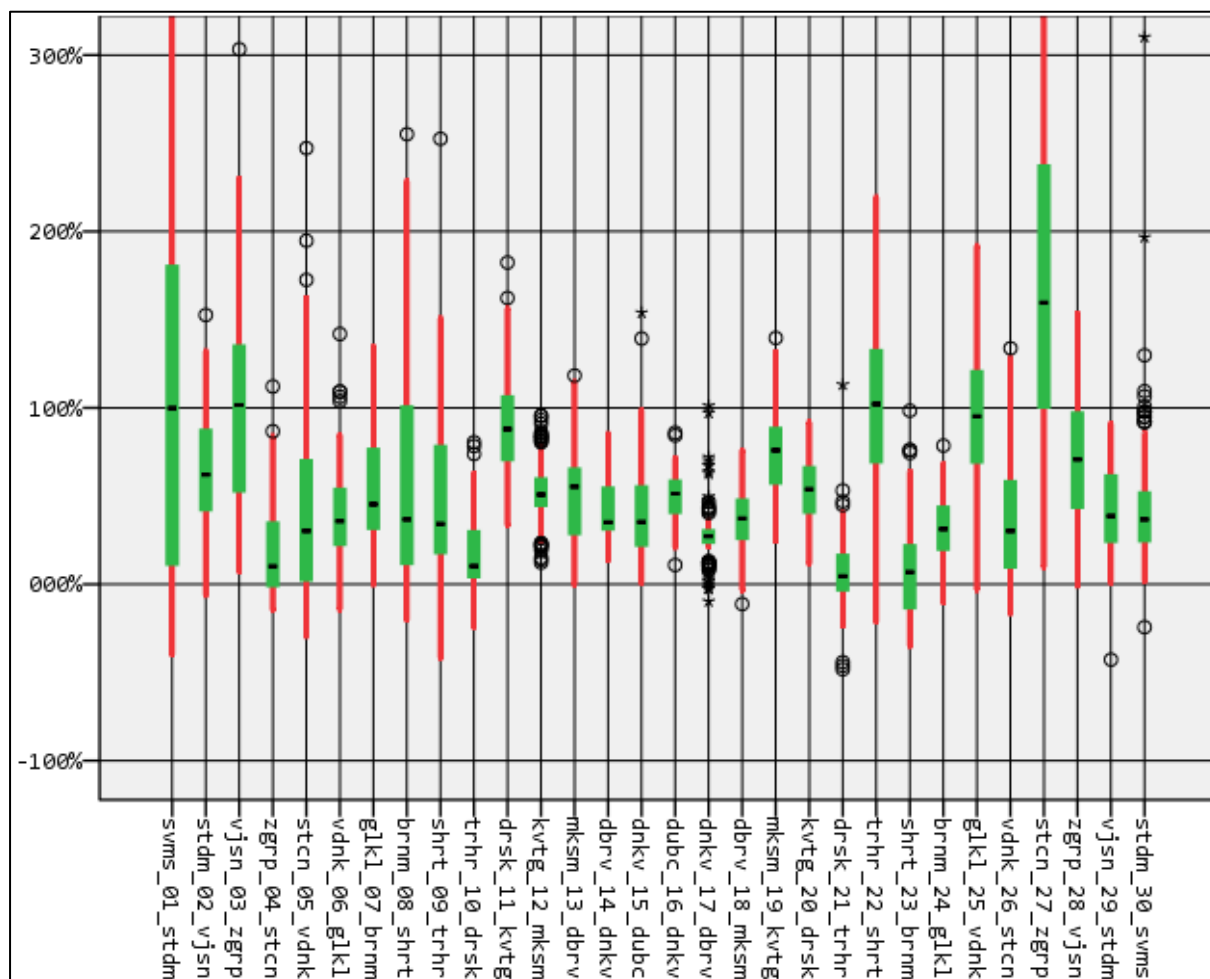
Relevantni faktori smetnji za modeliranje vremena putovanja utvrdili su se ponašanjem apsolutnih i relativnih pokazatelja vremena putovanja, na temelju prethodnih istraživanja faktora smetnji i poznavanja prijevoznog procesa u mreži tramvajskih linija. Dobivene vrijednosti vremena putovanja apsolutnog karaktera prikazuje Tablica 13. Uočava se da postoji relativno velika razlika između desetog percentila i minimuma, te devedesetog percentila i maksimuma. Razlog tome je pojava ekstremnih vremena putovanja koja su rezultat izvanrednih događaja u slučaju maksimuma i nepoštivanja prometnih pravila u slučaju minimuma. Na većini segmenata je medijan vremena putovanja manji od prosjeka, jer su odstupanja oko maksimuma u pravilu veća. Na segmentima oko terminala Dubec vrijedi da je medijalna vrijednost veća od prosječne.

Tablica 13. Dobivene vrijednosti pokazatelja vremena putovanja apsolutnog karaktera

oznaka segmenta	broj uzoraka	t_{MI}	t_{10}	t_{50}	t_{AV}	t_{90}	t_{MA}	$t_{90} - t_{10}$	t_{SD}
01 30 svms stdm	160	15"	23"	50"	53"	1'27"	2'31"	1'04"	27"
02 30 stdm vjsn	320	2'08"	2'48"	3'43"	3'44"	4'39"	6'37"	1'51"	43"
03 30 vjsn zgrp	320	1'56"	2'30"	3'36"	3'39"	5'06"	7'27"	2'36"	58"
04 30 zgrp stcn	380	1'24"	1'43"	2'05"	2'12"	2'52"	3'54"	1'09"	28"
05 30 stcn vdnk	530	33"	46"	1'08"	1'13"	1'43"	6'02"	57"	30"
06 30 vdnk glkl	250	2'24"	2'59"	3'44"	3'50"	4'47"	6'47"	1'48"	43"
07 30 glkl brnm	420	1'38"	2'14"	2'57"	3'04"	3'56"	5'20"	1'42"	40"
08 30 brnm shrt	270	31"	42"	1'04"	1'13"	1'52"	4'20"	1'11"	33"
09 30 shrt trhr	120	1'03"	1'44"	2'25"	2'38"	3'43"	6'21"	2'00"	50"
10 30 trhr drsk	440	20"	43"	50"	53"	1'06"	1'51"	23"	11"
11 30 drsk kvtg	290	4'33"	5'29"	6'36"	6'40"	7'52"	10'04"	2'23"	57"
12 30 kvtg mksm	430	3'47"	4'55"	6'07"	6'00"	6'46"	8'00"	1'51"	43"
13 30 mksm dbrv	430	3'41"	4'35"	5'41"	5'28"	6'18"	8'05"	1'42"	43"
14 30 dbrv dnkv	270	4'52"	5'23"	5'46"	6'05"	6'46"	15'24"	1'23"	58"
15 30 dnkv dubc	270	4'51"	5'48"	6'35"	6'59"	9'03"	12'25"	3'15"	1'22"
16 30 dubc dnkv	270	4'38"	5'29"	6'17"	6'12"	6'43"	8'29"	1'14"	34"
17 30 dnkv dbrv	260	4'02"	4'53"	5'40"	5'40"	6'25"	8'59"	1'32"	42"
18 30 dbrv mksm	420	3'22"	4'17"	5'04"	5'03"	5'47"	7'04"	1'30"	37"
19 30 mksm kvtg	420	5'11"	6'24"	7'30"	7'31"	8'49"	10'57"	2'25"	54"
20 30 kvtg drsk	280	3'23"	4'04"	4'44"	4'47"	5'33"	6'19"	1'29"	35"
21 30 drsk trhr	450	22"	43"	51"	53"	1'05"	1'44"	22"	11"
22 30 trhr shrt	120	1'02"	1'52"	2'39"	2'40"	3'35"	4'12"	1'43"	39"
23 30 shrt brnm	260	28"	46"	1'06"	1'10"	1'42"	2'15"	56"	21"
24 30 brnm glkl	420	1'19"	1'53"	2'16"	2'16"	2'37"	3'12"	44"	17"

oznaka segmenta	broj uzoraka	t_{MI}	t_{10}	t_{50}	t_{AV}	t_{90}	t_{MA}	$t_{90} - t_{10}$	t_{SD}
25 30 gkl vdkn	240	2'47"	4'07"	5'35"	5'38"	7'15"	9'34"	3'08"	1'14"
26 30 vdkn stcn	520	32"	54"	1'11"	1'17"	1'46"	2'57"	52"	23"
27 30 stcn zgrp	380	1'27"	2'18"	3'33"	3'42"	5'23"	7'33"	3'05"	1'10"
28 30 zgrp vjsn	320	1'49"	2'18"	3'14"	3'18"	4'15"	5'29"	1'57"	45"
29 30 vjsn stdm	320	1'35"	3'09"	3'44"	3'53"	4'46"	5'54"	1'36"	39"
30 30 stdm svms	160	26"	39"	46"	49"	1'01"	2'21"	22"	12"

Izvor: autor uz korištenje programa *Microsoft Excel* [113]



Slika 41. Kvartilna razdioba odstupanja stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja

Izvor: autor uz korištenje programa *IBM SPSS Statistics 23* [118]

Kvartilnu razdiobu odstupanja vremena putovanja od idealnog vremena putovanja prikazuje Slika 41. Na osi ordinata vrijednost nula označava idealno vrijeme putovanja. Prema tome, vrijednost od -100% odgovara nuli, vrijednost od 100% označava dvostruko vrijeme putovanja, vrijednost od 200% trostruko vrijeme putovanja, a vrijednost od 300% četverostruko vrijeme putovanja. Na osi apscisa poredani su svi segmenti linije. Kvartilna razdioba je prikazana na uobičajeni način:

- donja crvena linija: prvi kvartil od minimuma do 25-tog percentila

- donja zelena površina: drugi kvartil od 25-tog percentila do medijana (medijan je crna kratka horizontalna linija koja razdvaja dvije zelene površine)
- gornja zelena površina: treći kvartil od medijana do 75-tog percentila
- gornja crvena linija: zadnji kvartil od 75-tog percentila do maksimuma.

Važno je primijetiti kako minimum i maksimum nisu stvarni iz uzorka, već se eliminiraju iz analize stršeće vrijednosti (engl. *outlier*) na temelju interkvartilnog raspona, koji se dobije kao razlika 75-tog i 25-tog percentila. Postoje dvije kategorije stršećih vrijednosti:

- zvjezdica: ekstremne stršeće vrijednosti – vrijednosti veće od 75-tog percentila uvećanog za trostruki interkvartilni raspon ili 25-tog percentila umanjenog za trostruki interkvartilni raspon
- kružić: umjerene stršeće vrijednosti – vrijednosti veće od 75-tog percentila uvećanog za tri polovine interkvartilnog raspona ili 25-tog percentila umanjenog za tri polovine interkvartilnog raspona.

Do stršećih vrijednosti može doći pojavom izvanrednih situacija na segmentu, koje su uzrokovale nagomilavanje vozila ili prekomjerno čekanje na faktoru smetnji:

- u slučaju segmenta 12 javljalo se nepoštivanje žutog traka uoči raskrižja kod stajališta Park Maksimir
- u slučaju segmenta 17 uključivanje vozila s terminala Dubrava i semaforizirano raskrižje stvaraju rep čekanja tramvaja
- u slučaju segmenta 30 vozači imaju tendenciju na terminalu Savski most zaustaviti vozilo prije tramvajskog stajališta za iskrcaj putnika na autobusnom stajalištu na kojemu se također obavlja iskrcaj putnika, a bilježio se trenutak zaustavljanja na tramvajskom stajalištu.

Analizu stršećih vrijednosti je poželjno napraviti posebice u slučajevima kada su kao pokazatelji važni prosjek, standardna devijacija i koeficijent varijacije, no u slučajevima percentila kao pokazatelja, što je uobičajenije za javni prijevoz, stršeće vrijednosti neće uzrokovati značajne probleme, jer će se ograničavanjem uzorka isključiti iz daljnje analize.

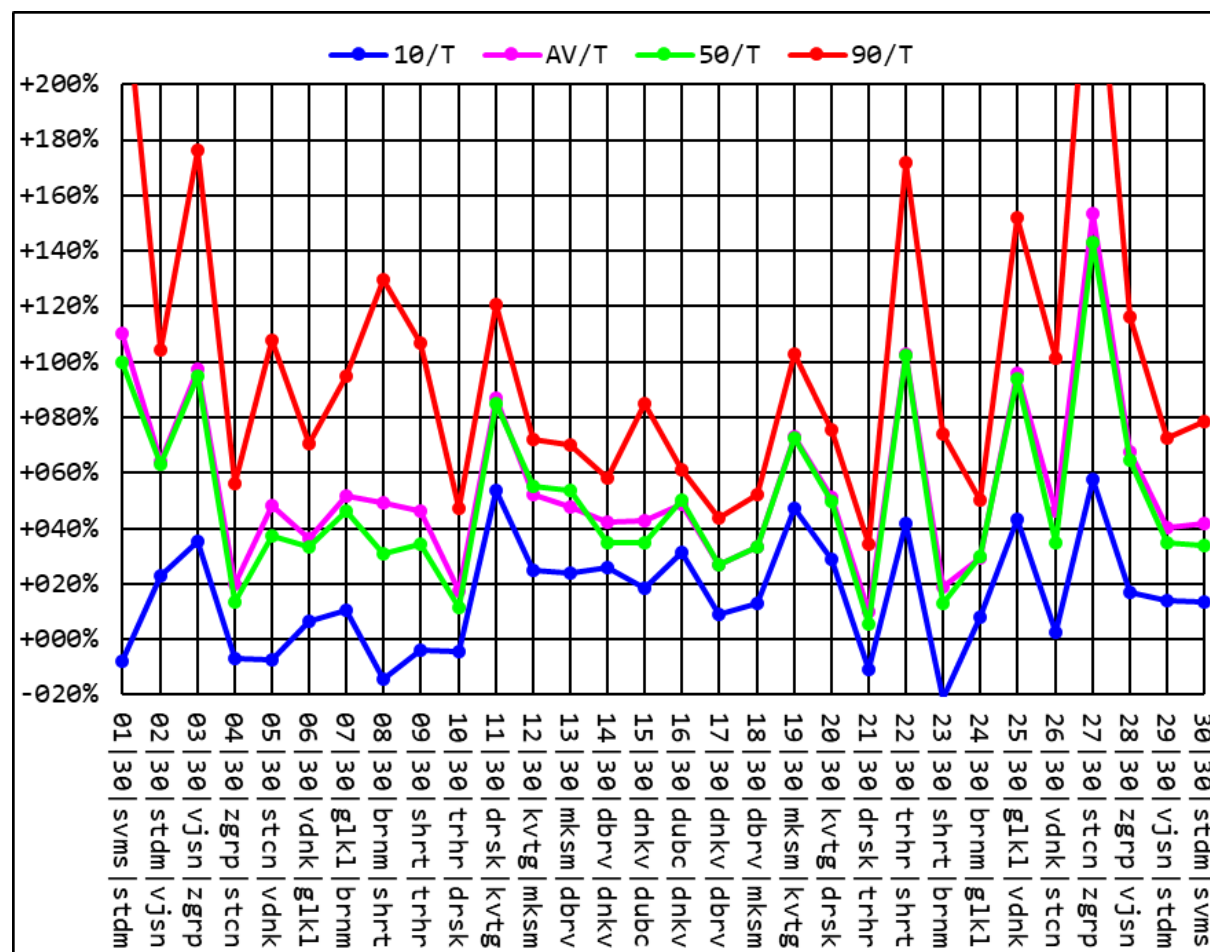
Na slici je uočljivo kako se većini segmenata odstupanje medijalne od idealne vrijednosti kreće oko 50 %, odnosno vrijeme putovanja je u stvarnosti 1,5 puta veće od idealne vrijednosti. Postoje segmenti na kojima je medijalno vrijeme gotovo jednako idealnom (primjerice, segmenti 10 i 21 na kojima se nalazi stajalište Draškovićeve), te postoje segmenti koji imaju

jako izraženo odstupanje vremena putovanja (primjerice, segmenti 01, 03, 22, i 27), s medijanom većim od dvostruke vrijednosti idealnog vremena putovanja.

4.1 Utvrđivanje zavisnih varijabli vremena putovanja

Dobivene vrijednosti odabranih pokazatelja vremena putovanja koje se uspoređuju s idealnim vremenom putovanja na temelju analize veličina prikazuje Slika 42. Određene su četiri veličine za koje se uočava mogućnost prikazivanja kao zavisne varijable modela:

- $v_{10/T}$ (na slici 10/T): odstupanje desetog percentila od idealnog vremena putovanja
- $v_{AV/T}$ (na slici AV/T): odstupanje aritmetičke sredine od idealnog vremena putovanja
- $v_{50/T}$ (na slici 50/T): odstupanje medijana od idealnog vremena putovanja
- $v_{90/T}$ (na slici 90/T): odstupanje devedesetog percentila od idealnog vremena putovanja.

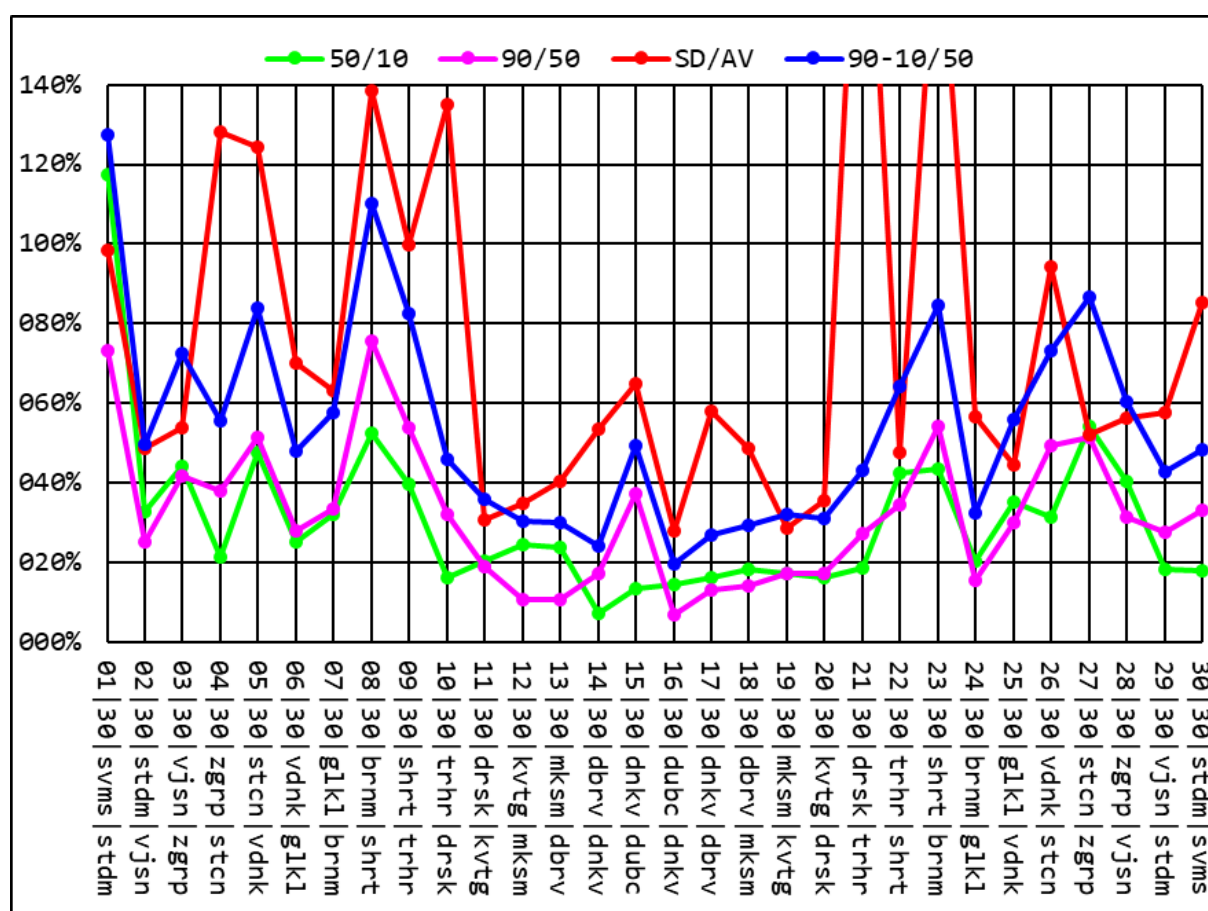


Slika 42. Vrijednosti relativnih veličina koje se uspoređuju s idealnim vremenom putovanja

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Uočava se sljedeće:

- postoje slučajevi u kojima deseti i devedeseti percentil u određenoj mjeri prate medijan (smjer Dubec – Savski most), no također postoje i slučajevi gdje navedeno ne vrijedi (smjer Savski most – Dubec), odnosno veličine međusobno mogu pokazati određenu razinu ovisnosti, no korelacija će se potvrditi u matricnoj korelacijskoj analizi
- ekstremnije vrijednosti svih veličina (vrlo malih odstupanja desetog percentila i vrlo velikog odstupanja devedesetog percentila) su u smjeru Dubec – Savski most, što sugerira da je taj smjer pogodniji za modeliranje
- razlika između medijana i prosjeka je dovoljno mala, što sugerira pogodnost obje veličine za zavisnu varijablu, no za razliku od prosjeka, medijan je u javnom gradskom prijevozu putnika prihvatljivija veličina za modeliranje, jer prijevozniku je bitnije poznavati vrijeme putovanja tramvaja u sredini uzorka od poznavanja prosječnog vremena putovanja
- veličina $v_{10/T}$ bi se u daljnjoj analizi mogla pokazati problematičnom za modeliranje, budući da može imati i pozitivne i negativne vrijednosti, jer se mjerenjem pokazuje da postoje vozila koja postižu i manje vrijeme od idealnog vremena putovanja.



Slika 43. Vrijednosti relativnih veličina koje se uspoređuju s medijanom ili prosjekom

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Dobivene vrijednosti odabranih pokazatelja vremena putovanja koje analiziraju varijabilnost

na temelju analize veličina prikazuje Slika 43. Određene su četiri veličine za koje se uočava mogućnost prikazivanja kao zavisne varijable modela:

- $v_{50/10}$ (na slici 50/10): odstupanje medijana od desetog percentila vremena putovanja
- $v_{90/50}$ (na slici 90/50): odstupanje devedesetog percentila od medijalnog vremena putovanja
- t_{SD}/t_{AV} (na slici SD/AV): koeficijent varijacije
- $\Delta_{90/10}$ (na slici 90 – 10/50): razlika devedesetog i desetog percentila u omjeru s medijalnim vremenom putovanja.

Uočava se sljedeće:

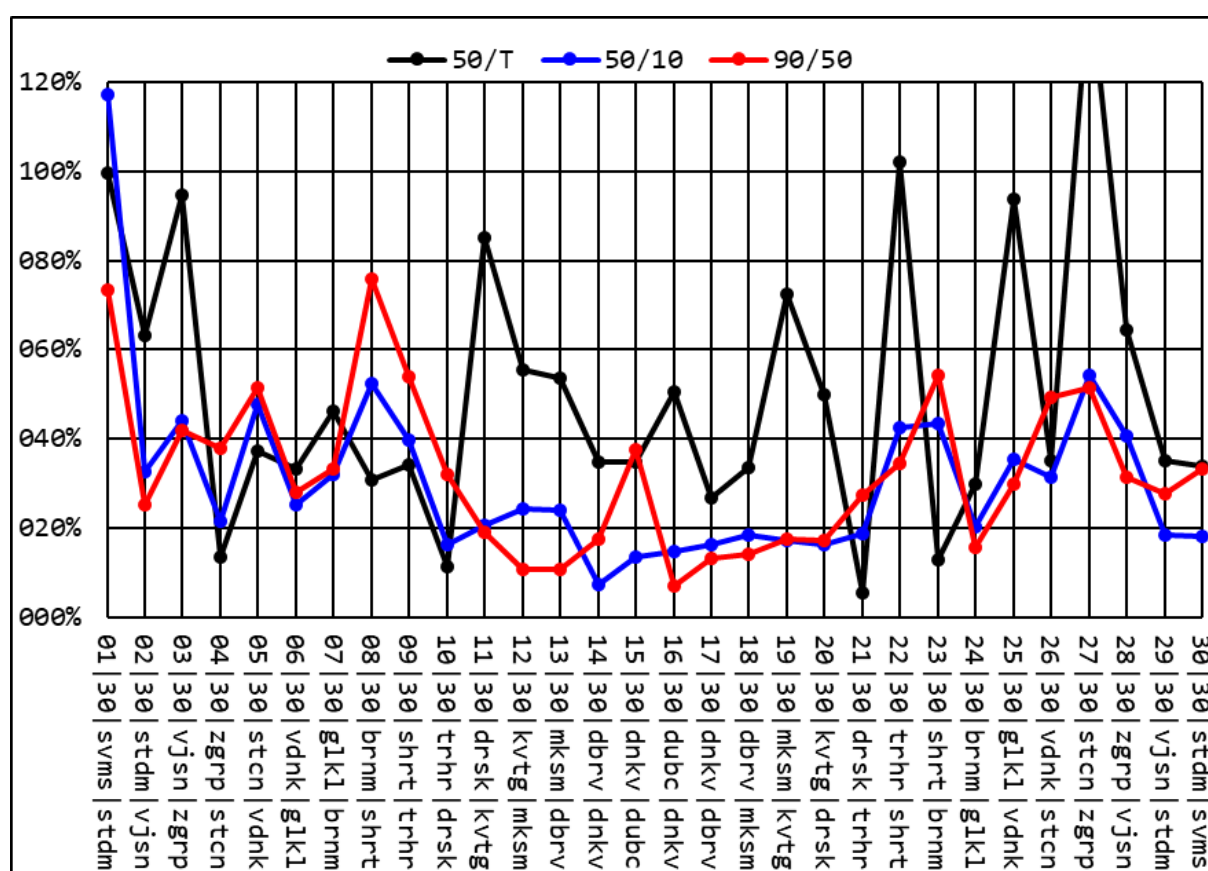
- međusobno su slične veličine t_{SD}/t_{AV} i $\Delta_{90/10}$, jer opisuju širinu uzorka u odnosu na središnju vrijednost, no t_{SD}/t_{AV} poprima ekstremnije vrijednosti, pa bi tako veličina $\Delta_{90/10}$ bila pogodnija
- unatoč većoj pogodnosti u odnosu na t_{SD}/t_{AV} , veličina $\Delta_{90/10}$ nije pogodna, jer se veličine $v_{50/10}$ i $v_{90/50}$ ne ponašaju dovoljno slično.

Na temelju zaključaka iz odabira veličina koje prikazuju odudaranje i varijabilnost, uočava se da bi najpogodnije veličine za prikazivanje varijabilnosti vremena putovanja bile $v_{50/T}$, $v_{50/10}$ i $v_{90/50}$, jer su međusobno usporedive, što je i smisao uvođenja veličina varijabilnosti kao veličina relativnog karaktera uz veličine vremena putovanja kao veličine apsolutnog karaktera. Međusobna usporedivost može se argumentirati na sljedeći način:

- kada bi vrijedilo za segment $v_{50/T} = v_{50/10}$, to bi značilo da je deseti percentil vremena putovanja jednak idealnom vremenu putovanja, a u drugačijim odnosima tih dviju veličina bi se moglo donijeti odluku o tome je li problem na segmentu u odudaranju ili varijabilnosti
- kada bi vrijedilo za segment $v_{50/T} = v_{90/50}$, odstupanje devedesetog percentila u odnosu na medijan jednako je intenzivno kao i odstupanje medijana od idealnog vremena, što također daje mogućnost donošenja odluke o tome gdje se nalazi problem kod segmenta
- kada bi vrijedilo za segment $v_{50/10} = v_{90/50}$, varijabilnosti su jednake s obje strane uzorka, odnosno to bi upućivalo da je razdioba vremena putovanja na segmentu lognormalna.

Radi mogućnosti usporedbe, navedene su tri varijable prikazane zasebno (Slika 44), te se uočava sljedeće:

- ne može se uočiti veza između $v_{50/T}$ s ostalim veličinama, stoga se vrijeme putovanja ne može opisati samo medijalnom vrijednošću
- nagli skokovi varijabilnosti $v_{50/T}$ u smjeru Dubec – Savski most sugeriraju da bi model izgrađen na tom smjeru bio pouzdaniji, za razliku od smjera Savski most – Dubec, gdje tri veličine imaju slične vrijednosti
- očito je da je $v_{50/T}$ veća od preostalih veličina oko terminala Dubec, gdje su segmenti najduži, te je na tom dijelu manje naglih skokova veličina $v_{50/10}$ i $v_{90/10}$
- iako se uočavaju određene pravilnosti u odnosu veličina $v_{50/10}$ i $v_{90/50}$, (slično $v_{10/T}$ i $v_{90/T}$), one su dovoljno različite i ne mogu se opisati jedinstvenim parametrom.



Slika 44. Usporedba vrijednosti najpogodnijih veličina za opisivanje vremena putovanja

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Prema odabranim veličinama za prikaz odudaranja i varijabilnosti, istaknut će se segmenti najlošijih performansi za tri kriterija, jer se prema veličinama relativnog karaktera segmenti mogu uspoređivati. Podatke prikazuje Tablica 14. Uočava se da se segment 1 javlja u sva tri pokazatelja, jer je najkraći, no također se na njemu nalazi jedno semaforizirano raskrižje, te je vjerojatno da zajednički utjecaj navedenoga daje najlošije rezultate. U sva tri pokazatelja se javlja i segment 27, te je taj segment najlošiji na cijeloj liniji po pitanju varijabilnosti

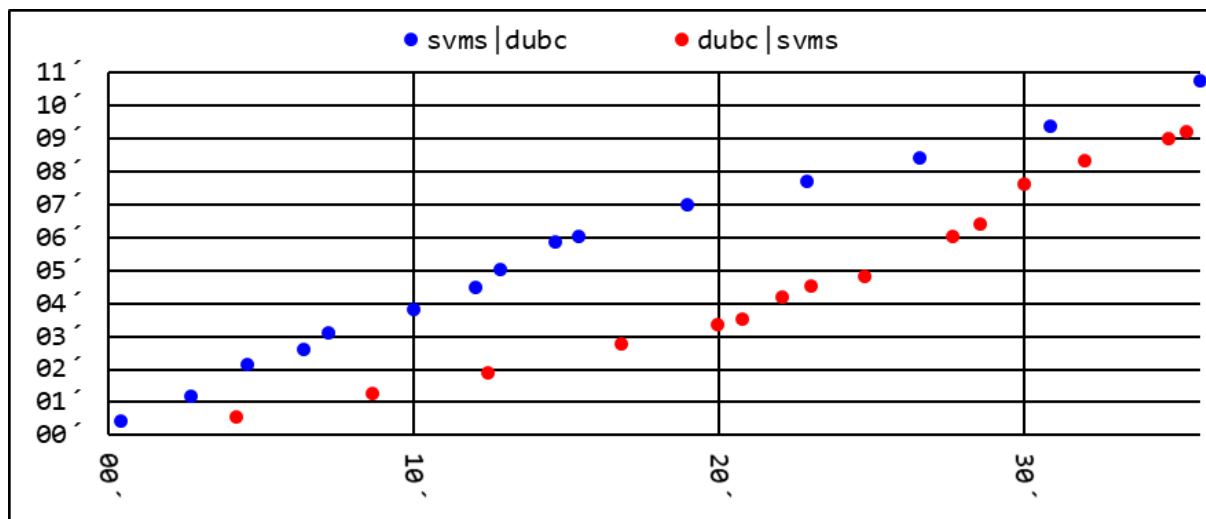
medijalnog vremena putovanja u odnosu na idealno. Pretpostavljeni razlozi za najlošije performanse ovog segmenta su postojanje jednog semaforiziranog raskrižja, mala duljina segmenta i utjecaj toka ostalih vozila zbog desnih skretača na semaforiziranom raskrižju.

Tablica 14. Segmenti najlošijih performansi prema veličinama relativnog karaktera

rang	$v_{50/T}$ – naziv	$v_{50/T}$ – vrijednost	$v_{50/10}$ – naziv	$v_{50/10}$ – vrijednost	$v_{90/50}$ – naziv	$v_{90/50}$ – vrijednost
1	27 30 stcn zgrp	143%	01 30 svms stdm	117%	08 30 brnm shrt	76%
2	22 30 trhr shrt	102%	27 30 stcn zgrp	54%	01 30 svms stdm	73%
3	01 30 svms stdm	100%	08 30 brnm shrt	52%	23 30 shrt brnm	54%
4	03 30 vjsn zgrp	95%	09 30 stcn vdk	48%	09 30 shrt trhr	54%
5	25 30 glkl vdk	94%	03 30 vjsn zgrp	44%	27 30 stcn zgrp	52%

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Svi segmenti navedeni u tablici pripadaju većinom u kratke segmente, pa je očito da je duljina segmenta u izrazitoj vezi s varijabilnostima. Unatoč tome, kada bi se za odabrane veličine izračunale prosječne vrijednosti, dobilo bi se za $v_{50/T}$ 51 %, za $v_{50/10}$ 31 % i za $v_{90/50}$ 32 %. Dakle, u prosjeku vrijeme putovanja odstupa od idealnog 1,5 puta, a odstupanje u smjeru t_{10} i t_{50} je slično i kreće se oko 30%, što je manje od odstupanja medijalne vrijednosti od idealne, no ipak značajno, jer dolazi do rasipanja uzorka kojeg stvara neravnomjernost vremena putovanja.

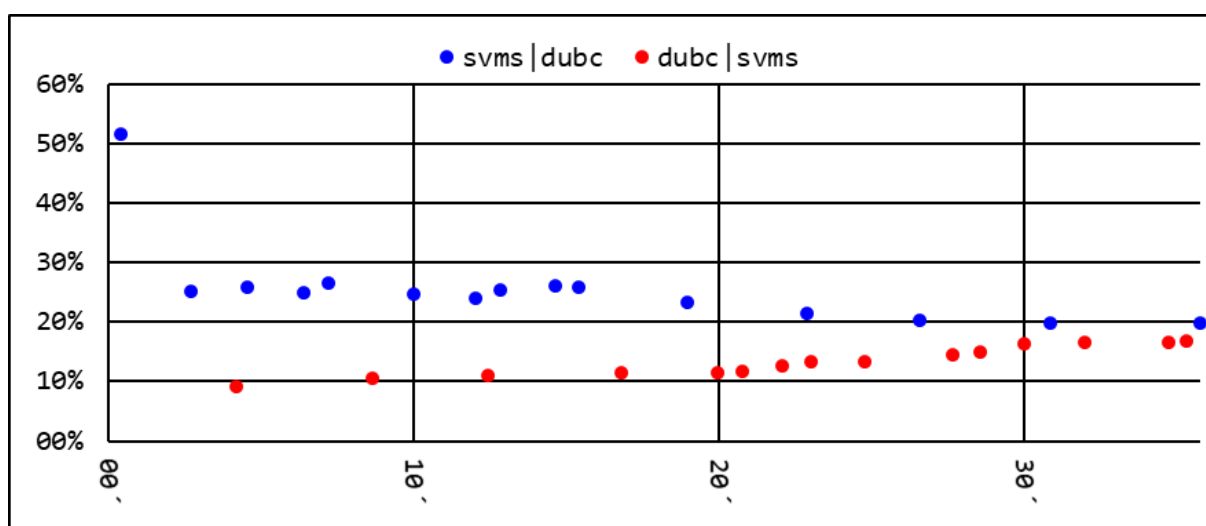


Slika 45. Ponašanje standardne devijacije vremena putovanja s porastom idealnog vremena putovanja

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Po uzoru na prethodna istraživanja [57], također će se utvrditi kumulativno ponašanje standardne devijacije vremena putovanja i koeficijenta varijacije, no u ovom kontekstu, veličine se neće uspoređivati s porastom prosječnog vremena putovanja, već s porastom idealnog vremena putovanja, jer je prikladnije usporediti kretanje promatranih veličina s referencom koja opisuje kapacitet sustava.

Ponašanje standardne devijacije prikazuje Slika 45. Smjer Savski most – Dubec označen je plavom, a smjer Dubec – Savski most crvenom bojom. Točke prikazuju kumulativnu vrijednost standardne devijacije na kraju segmenata, budući da se na tom mjestu obavljalo mjerenje. Kada se usporede smjerovi, vidi se da je rast standardne devijacije u smjeru Savski most – Dubec na prvoj polovici smjera veći, te onda usporava, dok je rast u suprotnom smjeru suprotnog karaktera – prvo slabiji, pa nakon polovice smjera izraženiji. To se može objasniti činjenicom da je prijevozni proces stabilniji oko terminala Dubec jer je dalji od središta grada nego terminal Savski most. Ako se promotri idealno vrijeme putovanja od terminala do terminala (desni rub slike), vidi se kako se vrijednosti dvaju smjerova počinju približavati jedna drugoj, budući da trase između dva ista terminala moraju imati slične karakteristike prijevoznog procesa.



Slika 46. Ponašanje koeficijenta varijacije s porastom idealnog vremena putovanja
Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Ponašanje koeficijenta varijacije prikazuje Slika 46. Kao i na prethodnoj slici, smjer Savski most – Dubec označen je plavom, smjer Dubec – Savski most crvenom bojom, a točke prikazuju kumulativnu vrijednost koeficijenta varijacije na kraju segmenata, budući da se na tom mjestu obavljalo mjerenje. Ako se promotri smjer Savski most – Dubec, vidi se da se započinje s velikom vrijednošću, te se događa nagli pad koji završava na otprilike četiri minute, te se nakon toga nastavlja lagani pad koji se stabilizira na 20 % nakon pola sata idealnog vremena putovanja. Smjer Dubec – Savski most nema veliku prvu vrijednost koeficijenta varijacije jer prvi segment ima idealno vrijeme putovanja od otprilike pet minuta, pa nije bilo mjerenja pri vrijednostima manjim od četiri minute. Za razliku od suprotnog smjera, ovdje se događa blagi rast koeficijenta varijacije i stabilizacija na vrijednosti nešto manjoj od smjera Dubec – Savski most. Razlog za ovakvo ponašanje je isti kao kod standardne devijacije –

prelazak iz zahtjevnijeg u manje zahtjevan prijevozni proces i obrnuto. Iako se sa slike ne može izravno uočiti, pretpostavlja se da ponašanje koeficijenta varijacije prati oblik hiperbole s asimptotama od otprilike 17 % odnosno 20 % koeficijenta varijacije i nula minuta idealnog vremena putovanja.

4.2 Razdioba vremena putovanja prema segmentima

Radi boljeg uvida u ponašanje vremena putovanja na segmentima, koristit će se parametri za opisivanje normalnosti razdiobe putem:

- testa asimetrije (eng. *skewness*): SKW
- testa spljoštenosti (eng. *kurtosis*): KRT
- testa Kolmogorov-Smirnov: K-S
- testa Shapiro-Wilk: S-W.

Za određivanje je li razdioba vremena putovanja na segmentu normalna, koristili su se uvjeti:

- test Shapiro-Wilk mora pokazivati značajnost od barem 1 %
- test Kolmogorov-Smirnov mora pokazivati značajnost od barem 5 %
- u testu asimetričnosti, omjer vrijednosti i standardne greške (stupac „SKW – omjer“) ne smije biti veći od 2,5.

Podatke prikazuje Tablica 15. Segmenti koji zadovoljavaju navedene uvjete označeni su crvenom bojom. Segmenti 12 i 13 označeni ružičasto su također zanimljivi, jer unatoč tome što nisu prošli testove K-S i S-W, imaju vrijednosti omjera kod testa asimetričnosti manje od 2,5. Razlog tome je postojanje praznih područja u razdiobama, koja su položena simetrično, pa te razdiobe oponašaju normalnu razdiobu. Prazna područja se javljaju zbog položaja stajališta nakon semaforiziranih raskrižja, identičnih ciklusa na raskrižju od 1'40" i velikih udjela zelene faze u ciklusu na raskrižjima, koji rezultiraju efektom ustaljenog kretanja vozila, pa niti jedno vozilo nije moglo postići vrijednosti koje se nalaze u praznim dijelovima razdiobe.

Tablica 15. Provjera normalnosti razdioba vremena putovanja po segmentima

oznaka segmenta	broj uzoraka	SKW – vrijednost	SKW – omjer	KRT – vrijednost	KRT – omjer	K-S – vrijednost	S-W – vrijednost
01 30 svms stdm	160	+1,0	4,6	+1,3	3,0	0%	0%
02 30 stdm vjsn	320	+0,2	0,7	-0,2	0,5	20%	91%
03 30 vjsn zgrp	320	+0,6	2,9	+0,6	1,4	6%	0%
04 30 zgrp stcn	380	+1,2	5,5	+1,2	2,6	0%	0%
05 30 stcn vdnk	530	+1,3	5,7	+2,1	4,8	0%	0%
06 30 vdnk glkl	250	+0,9	3,9	+1,5	3,4	1%	0%

oznaka segmenta	broj uzoraka	SKW – vrijednost	SKW – omjer	KRT – vrijednost	KRT – omjer	K-S – vrijednost	S-W – vrijednost
07 30 glkl brnm	420	+0,6	2,6	−0,3	0,8	0%	0%
08 30 brnm shrt	270	+1,9	8,5	+5,1	9,9	0%	0%
09 30 shrt trhr	120	+1,0	4,4	+2,2	5,1	0%	0%
10 30 trhr drsk	440	+1,0	4,6	+0,9	2,1	0%	0%
11 30 drsk kvgtg	290	+0,5	2,4	+0,7	1,5	20%	4%
12 30 kvgtg mksm	430	+0,2	0,8	−0,0	0,1	0%	0%
13 30 mksm dbrv	430	+0,3	1,2	+0,2	0,5	0%	0%
14 30 dbrv dnkv	270	+0,7	3,1	+0,4	1,0	0%	0%
15 30 dnkv dubc	270	+1,5	6,5	+3,3	7,5	0%	0%
16 30 dubc dnkv	270	−0,3	1,2	+0,8	1,2	5%	2%
17 30 dnkv dbrv	260	+1,4	6,6	+4,9	9,9	0%	0%
18 30 dbrv mksm	420	−0,0	0,0	+0,4	0,9	20%	47%
19 30 mksm kvgtg	420	+0,6	2,8	−0,0	0,1	5%	0%
20 30 kvgtg drsk	280	+0,0	0,0	−0,5	1,1	20%	44%
21 30 drsk trhr	450	+1,2	5,3	+7,1	9,9	0%	0%
22 30 trhr shrt	120	+0,2	0,8	−0,2	0,3	20%	66%
23 30 shrt brnm	260	+0,9	3,9	+0,6	1,3	0%	0%
24 30 brnm glkl	420	+0,1	0,2	−0,2	0,4	20%	97%
25 30 glkl vdnk	240	+0,2	1,0	−0,1	0,3	20%	55%
26 30 vdnk stcn	520	+0,7	3,0	−0,2	0,5	0%	0%
27 30 stcn zgrp	380	+0,6	2,7	−0,1	0,3	1%	0%
28 30 zgrp vjns	320	+0,1	0,3	−0,6	1,4	20%	19%
29 30 vjns stdm	320	−0,2	0,9	+0,2	0,4	9%	2%
30 30 stdm svms	160	+3,4	9,9	+9,9	9,9	0%	0%

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

Iz podataka iz tablice se zaključuje:

- ako se zanemare segmenti 12 i 13, normalna razdioba se događa u jednoj trećini slučajeva, što je razumljivo, budući da je period prikupljanja bio dva sata, te iako su frekvencija vozila javnog prijevoza i signalni planovi raskrižja bili nepromijenjeni, uvjeti tokova ostalih vozila su se karakteristično pojačavali od 15: 00 prema 17: 00
- asimetričnost razdiobi (stupac „SKW – vrijednost“) je pretežito pozitivna, što ukazuje da su razdiobe većinom pomaknute udesno, odnosno imaju tendenciju umjesto normalnih biti log-normalne, no logaritmiranjem vrijednosti se pokazalo gotovo uvijek da razdiobe koje nisu normalne nisu niti log-normalne prema istim testovima za normalnu razdiobu
- spljoštenost razdiobi (stupac „KRT – vrijednost“) je pretežito pozitivna, pa su razdiobe uglavnom češće koncentrirane oko prosjeka te rjeđe dalje od prosjeka u odnosu na normalnu razdiobu

- velike vrijednosti omjera i pri testu asimetričnosti i pri testu spljoštenosti se javljaju pretežito na kratkim segmentima.

Vremena putovanja su detaljno prikazana u prilogima (Prilog 1 – Prilog 30). Oba dijagrama na osi apscisa imaju prikazano odstupanje vremena putovanja od idealnog vremena putovanja u postotcima, pa se tako kreću u vrijednostima od -100% (vrijeme putovanja je nula) preko 0% (vrijeme putovanja je jednako idealnom vremenu putovanja) do $+250\%$, što predstavlja vrijeme putovanja 3,5 puta veće od idealne vrijednosti.

Na gornjem kumulativnom dijagramu navedenih priloga prikazani su percentili uzorka kumulativno od manjeg prema većem, a donji frekvencijski dijagram predstavlja derivaciju gornjeg dijagrama (površina ispod krivulje donjeg dijagrama mora biti 100%), pa je mjerna jedinica postotak po postotku, odnosno donji dijagram prikazuje za koliko posto raste količina uzorka s promjenom vrijednosti omjera stvarnog i idealnog vremena putovanja od jedan posto. Frekvencijski razredi određeni su korištenjem programskog alata *IBM SPSS Statistics 23*. U skladu s provjerom normalnosti razdioba, vidi se sljedeće:

- na ružičasto označenim segmentima se u prilogima vidi pojava područja u sredini uzorka s malom učestalošću pojave vrijednosti vremena putovanja, zbog nenamjerno koordiniranih signalnih planova raskrižja (Prilog 12 i Prilog 13)
- segment 17 (Prilog 17) ima vrijednosti vremena putovanja koje su najviše koncentrirane oko središnje vrijednosti, što čini taj segment najizraženijim po pitanju sinkroniziranosti na mreži, jer faktori koji bi remetili sinkronizaciju raskrižja kao što su frekvencija zadana voznim redom ili tokovi vozila nisu izraženi na tom segmentu
- za razliku od segmenta 17, segmenti 1, 3, 5, 8, 22, 27 i 28 imaju spljošten uzorak vremena putovanja, u kojima porast uzorka nigdje ne postiže $1\%/%$, i ti segmenti su kratki ili je za njih značajan utjecaj tokova ostalih vozila
- za segmente vrijedi okvirno pravilo u kojemu s povećanjem medijalne vrijednosti uzorka raste raspon većine uzorka, te u skladu s tim, uzorak postaje spljošteniji.

4.3 Utvrđivanje nezavisnih varijabli faktora smetnji

Odstupanje vremena putovanja od idealne vrijednosti u mreži linija javnoga gradskoga prijevoza uzrokuju različiti faktori smetnji koje se mogu javiti pri prometovanju vozila. Prethodno je navedeno pet podjela faktora smetnji prema različitim kriterijima, no za ovo istraživanje, najznačajnija je podjela prema načinu pružanja, pa su se faktori smetnji

klasificirali kao:

- poprečni ili transversalni: faktori koji se javljaju u jednoj točki segmenta, i djeluju kao prepreka – semaforizirana raskrižja, nesemaforizirani pješački prijelazi i stajališta; zbog javljanja na različitim dijelovima segmenta, pretpostavka je da će varijable poprečnih faktora smetnji biti međusobno nezavisne
- uzdužni ili longitudinalni: faktori koji se javljaju duž cijelog odsjeka segmenta ili duž cijelog segmenta – tokovi vozila javnog prijevoza, tokovi ostalih vozila i frekvencija na segmentu, te također karakteristike kao što su duljina segmenta, idealno vrijeme putovanja i brzina na segmentu; kod longitudinalnih faktora smetnji je nejasno hoće li, zbog pružanja čitavom duljinom segmenta, biti međusobne zavisnosti s transversalnim faktorima smetnji.

Budući da će se model služiti idealnim vremenom putovanja kao polazištem, razumljivo je da vrijeme preuzima ulogu prostora, pa će većina potencijalnih odabranih varijabli koje prikazuju faktore smetnji biti vremenske gustoće umjesto tradicionalnih prostornih gustoća, jer je razumljivo da je bolji podatak za segment idealno vrijeme putovanja umjesto, primjerice, duljine segmenta ili idealne brzine putovanja, budući da na segmentima postoji veći ili manji broj stajališta, čineći brzine putovanja i duljine segmenata manje pouzdanim varijablama. Zbog uspoređivanja s idealnim vremenom putovanja, sve nezavisne varijable će se moći odrediti kao kontinuirane varijable. Iako će se neki faktori smetnji moći prikazati samo u diskretnom obliku, u konačnici će to za cijeli segment uvijek rezultirati kontinuiranom vrijednošću.

Nezavisne varijable su se utvrđivale na cjelokupnom uzorku podataka, radi dobivanja što preciznijeg uvida u ponašanje na čitavom uzorku, bez obzira na izgradnju ili validaciju modela. Također, varijable su se kvantificirale tako da se pretpostavljalo nepovoljnije stanje s povećanjem vrijednosti nezavisne varijable, pa bi broj pozitivnih korelacija trebao biti znatno veći od broja negativnih korelacija.

Nezavisne varijable, koje predstavljaju faktore smetnji, grupirat će se u nekoliko kategorija. Varijable su odabrane na temelju prethodnih istraživanja i iskustva. Zbog pretpostavke zavisnosti poprečnih i uzdužnih faktora smetnji u kontekstu opisivanja kumulativnog efekta u mreži linija javnog prijevoza, u korelacijsku analizu bile su uključene i varijante navedenih varijabli u nastavku, kao što je umnožak frekvencija vozila javnog prijevoza i transversalnih faktora smetnji ili transformacija varijabli u eksponencijalne ili logaritamske, no pokazalo se da kod takvih varijabli nije došlo do značajnih korelacija, te su se zbog kompleksnosti isključile iz daljnje analize, budući da su se značajnije korelacije mogle dobiti jednostavnim

interpretacijama faktora smetnji.

Prikupljanjem podataka se nisu mogla dobiti vremena zadržavanja na stajalištima. Stoga kod odabira nezavisnih varijabli, najbolja karakteristika koja opisuje prijevoznu potražnju na stajalištima je dodjeljivanje vrijednosti od 12 " za stajališta s niskom prijevoznom potražnjom, te 18 " za stajališta s visokom prijevoznom potražnjom.

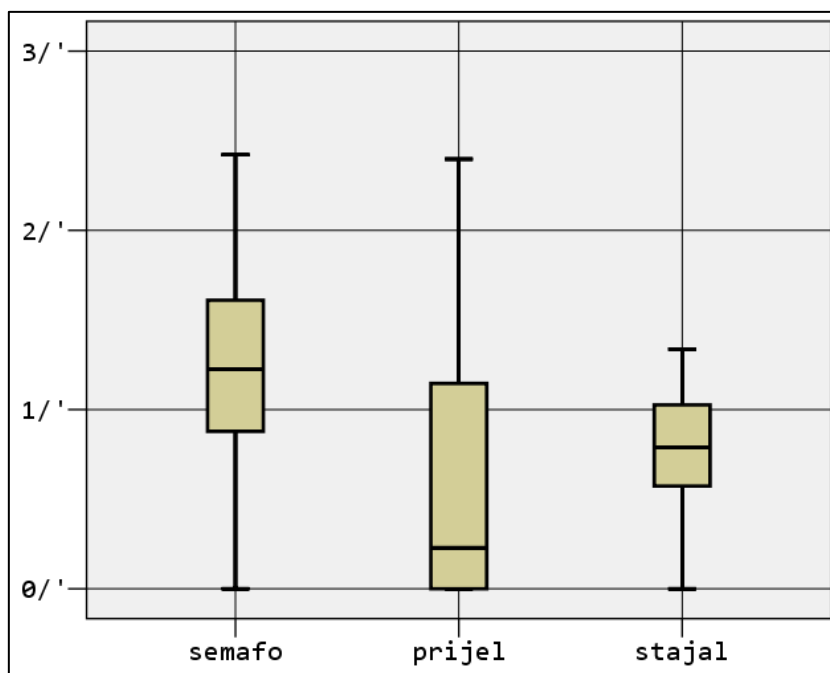
4.3.1 Ukupan broj poprečnih faktora smetnji

Odnos ukupnog broja poprečnog faktora smetnji i idealnog vremena putovanja segmentom definira se na sljedeći način:

$$g_I = \frac{I}{T} \quad (11)$$

g_I T I	odnos ukupnog broja poprečnog faktora smetnji i idealnog vremena putovanja idealno vrijeme putovanja segmentom ukupan broj pojavljivanja poprečnog faktora smetnji na segmentu
---------------------	--

Izvor: autor



Slika 47. Rasponi vrijednosti odnosa ukupnog broja faktora smetnji i idealnog vremena putovanja
Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

Pogodna mjerna jedinica je minuta na minus prvu, odnosno po minuti. Određuje se za semaforizirana raskrižja, nesemaforizirane pješačke prijelaze i stajališta posebno. Navedena veličina bit će veća sa smanjenjem idealnog vremena putovanja odnosno duljine segmenta, a veća s povećanjem broja poprečnog faktora smetnji, pa se prema tome pretpostavlja povećanje odudaranja i varijabilnosti vremena putovanja s povećavanjem vrijednosti veličine.

Interkvartilne raspone vrijednosti veličine za sve tipove poprečnih faktora smetnji – semaforizirana raskrižja („semafo“), nesemaforizirane pješačke prijelaze („prijel“) i stajališta („stajal“) prikazuje Slika 47. Vrijednost od jedan po minuti ukazuje da je broj faktora smetnji jednak idealnom vremenu putovanja u minutama. Većina pješačkih prijelaza u mreži je semaforizirana, stoga je manja gustoća nesemaforiziranih pješačkih prijelaza. No vidljivo je da je gustoća semaforiziranih raskrižja u pravilu veća od gustoće stajališta na segmentima.

4.3.2 Udio zbroja trajanja crvenih faza na poprečnim faktorima smetnji

Udio zbroja trajanja crvenih faza poprečnog faktora smetnji u idealnom vremenu putovanja segmentom definira se na sljedeći način:

$$p_R = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^I R_i \quad (12)$$

p_R	udio zbroja trajanja crvenih faza poprečnog faktora smetnji
T	idealno vrijeme putovanja segmentom
I	ukupan broj pojavljivanja promatranog faktora smetnji na segmentu
R_i	trajanje crvene faze na i -tom poprečnom faktoru smetnji

Izvor: autor

Pretpostavka utjecaja udjela crvene faze jest povećanje odudaranja i varijabilnosti vremena putovanja s povećanjem udjela crvene faze, jer se povećava ukupno trajanje crvene faze (brojnik) ili se smanjuje idealno vrijeme putovanja (nazivnik). Za raskrižja je određivanje trajanja crvene faze jednostavno iz mjerenja, no ista veličina se može odrediti i za nesemaforizirane pješačke prijelaze i za stajališta.

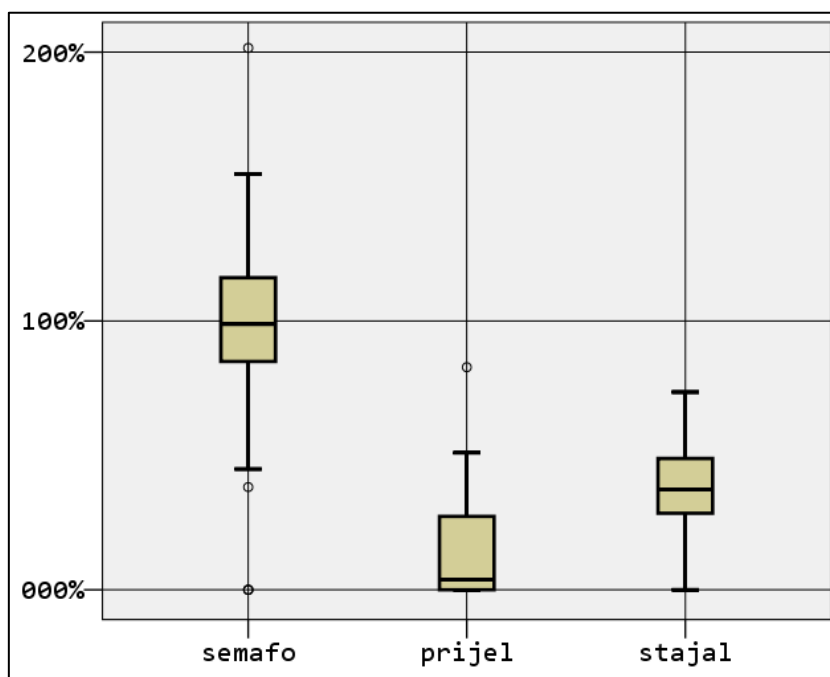
Kod nesemaforiziranih pješačkih prijelaza pretpostavit će se da je trajanje crvene faze količnik duljine prijelaza i prosječne brzine kretanja pješaka, koja je određena kao 1 m/s, što je prilagođeno najsporijim pješacima – ukupno metara duljine pješačkog prijelaza je ukupno sekundi trajanja crvene faze. Razlog ovakvog promatranja trajanja crvene faze jest pretpostavka da:

- pješaci individualno (jedan po jedan) prelaze preko pješačkog prijelaza
- dok pješaci ne prelaze, vozilima je aktivna zelena faza
- u trenutku ulaska pješaka na pješački prijelaz, faza za vozila se mijenja iz zelene u crvenu, te se vraća u zelenu u trenutku kada pješak napušta prijelaz.

Kod stajališta će se pretpostaviti da crvena faza traje od trenutka kada prednji kraj tramvaja ulazi u prostor stajališta do trenutka kada stražnji kraj tramvaja napušta prostor stajališta, a to

vrijeme se dobije tako da se na idealno vrijeme zadržavanja na stajalištu doda vrijeme kretanja unutar prostora stajališta od 15 " – to je vrijeme potrebno od trenutka ulaska prednjeg kraja vozila do zaustavljanja uvećano za vrijeme koje je potrebno od pokretanja vozila dok stražnji kraj vozila ne napusti stajalište. Drugim riječima, stajališta se ponašaju kao crvena faza semaforiziranog raskrižja za vozilo koje se želi zaustaviti na njemu, no ne može jer prethodno vozilo zauzima prostor stajališta.

Kretanje vrijednosti udjela crvene faze na segmentima za semaforizirana raskrižja („semafo“), nesemaforizirane pješačke prijelaze („prijel“) i stajališta („stajal“) prikazuje Slika 48. Vrijednost od 100 % ukazuje da je zbroj trajanja svih crvenih faza na segmentu jednak idealnom vremenu putovanja. Za semaforizirana raskrižja se javljaju najveće vrijednosti, odnosno na semaforiziranim raskrižjima crvena faza traje razmjerno duže nego na prijelazima ili stajalištima. Zbog manje gustoće nesemaforiziranih pješačkih prijelaza, udio zbroja trajanja crvenih faza je najmanji, a za stajališta se kreće oko 50% idealnog vremena putovanja.



Slika 48. Rasponi vrijednosti udjela zbroja trajanja crvenih faza u idealnom vremenu putovanja
Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

4.3.3 Udio zbroja omjera dvostruke crvene faze i ciklusa na poprečnim faktorima smetnji

Za razliku od prethodne veličine, ova veličina ne uzima samo u obzir trajanje crvene faze, već odnos trajanja crvene faze i ciklusa, budući da ciklus raskrižja uključuje izmjenu crvene i zelene faze. Definira se kao dvostruki zbroj trajanja svih crvenih faza na segmentu podijeljen s ciklusom, te je taj zbroj u omjeru s idealnim vremenom putovanja:

$$g_{2R/C} = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^I \frac{R_i}{C_i} \quad (13)$$

$g_{2R/C}$	udio zbroja omjera trajanja dvostruke crvene faze i ciklusa poprečnog faktora smetnji u idealnom vremenu putovanja segmentom
T	idealno vrijeme putovanja segmentom
I	ukupan broj pojavljivanja promatranog poprečnog faktora smetnji na segmentu
R_i	trajanje crvene faze na i -tom poprečnom faktoru smetnji
C_i	trajanje ciklusa na i -tom poprečnom faktoru smetnji

Izvor: autor

Razlog uvođenja dvostruke vrijednosti trajanja crvene faze je mogućnost usporedbe, budući da će ovako definiran odnos imati vrijednost jedan po minuti u slučaju kada crvena faza čini pola ciklusa (druga polovica je zeleno), pa to predstavlja kritičnu vrijednost na kojoj manji udio crvene faze prelazi u veći. Kod raskrižja se ciklus definira kao vrijeme između početka dvije uzastopne istoimene faze (primjerice, vrijeme između susjedna dva početka crvene faze), no ciklus se može definirati i za nesemaforizirane pješačke prijelaze i za stajališta.

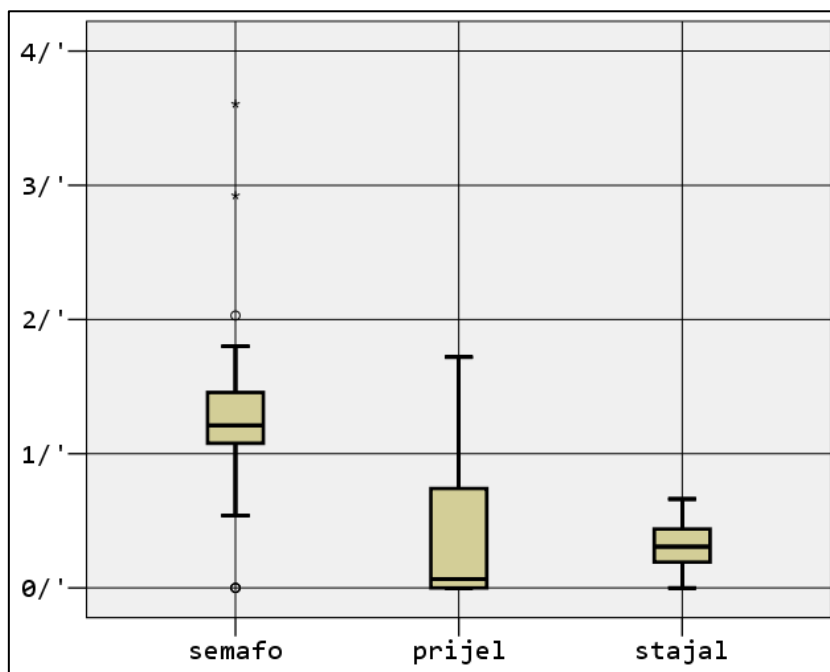
Kod nesemaforiziranih pješačkih prijelaza odabralo se dovoljno dugo vrijeme promatranja pješačkog prijelaza od deset minuta, kada se mjerilo ukupno vrijeme u kojem je pješački prijelaz bio zauzet pješacima. Dijeljenjem vremena zauzetosti prijelaza pješacima i vremena promatranja dobio se udio crvene faze u ciklusu. Naposljetku, omjerom trajanja crvene faze i udjela crvene faze dobio se ciklus na prijelazu.

U jedinom slučaju semaforiziranog pješačkog prijelaza na raskrižju Savske ceste, Vodnikove ulice i Jukićeve ulice, gdje pješaci prelaze u istoj fazi kao desni skretači tramvajskih linija 4 i 9, ciklus se dobio tako da se promatralo ukupno deset minuta samo zelene faze za pješake, a trajanje crvene faze je prethodno objašnjeno. To je učinjeno zato što pješaci ne mogu prelaziti preko pješačkog prijelaza za vrijeme crvene faze.

Na stajalištima se ciklus dobio kao umnožak slijeda vozila na segmentu i broja perona na stajalištu. Naime, slično prethodno definiranom trajanju crvene faze na stajalištima, za ciklus se može pretpostaviti da je prosječno vrijeme od ulaska prednjeg kraja vozila u prostor stajališta do ulaska prednjeg kraja sljedećeg vozila u prostor stajališta, što je identično definiciji slijeda vozila na segmentu. Jedina razlika je u tome što stajalište može imati dva perona, pa je tada ciklus dvostruka vrijednost slijeda vozila, budući da stajalište odjednom može primiti dvostruko više vozila.

Raspon vrijednosti udjela zbroja omjera trajanja dvostruke crvene faze i ciklusa u idealnom vremenu putovanja za semaforizirana raskrižja („semafo“), nesemaforizirane pješačke

prijelaze („prijel“) i stajališta („stajal“) prikazuje Slika 49. Vrijednost od jedan po minuti ukazuje na to da je ukupan zbroja omjera trajanja dvostruke crvene faze i ciklusa na segmentu za promatrani poprečni faktor smetnji jednak idealnom vremenu putovanja na segmentu u minutama. Na raskrižjima je veći udio crvene faze, pa u skladu s time i promatrana veličina.



Slika 49. Raspon vrijednosti udjela zbroja omjera trajanja dvostruke crvene faze i ciklusa u idealnom vremenu putovanja segmentom

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

4.3.4 Udio zbroja omjera trajanja crvene i zelene faze na poprečnim faktorima smetnji

Osim udjela u ciklusu, zanimljiva je pretpostavka u kojoj vrijeme putovanja narušava odnos crvene i zelene faze. Definira se kao zbroj omjera trajanja crvene i zelene faze na pojedinom poprečnom faktoru smetnji podijeljen s idealnim vremenom putovanja:

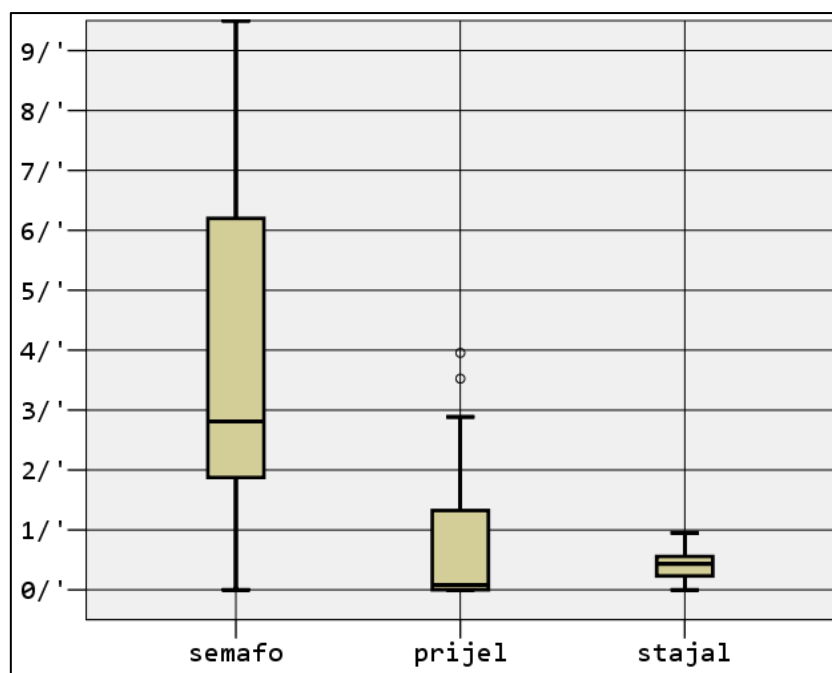
$$g_{R/G} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^I \frac{R_i}{C_i - R_i} \quad (14)$$

$g_{R/G}$	udio zbroja omjera trajanja crvene i zelene faze poprečnog faktora smetnji u idealnom vremenu putovanja segmentom
T	idealno vrijeme putovanja segmentom
I	ukupan broj pojavljivanja promatranog poprečnog faktora smetnji
R_i	trajanje crvene faze na i -tom poprečnom faktoru smetnji
C_i	trajanje ciklusa na i -tom poprečnom faktoru smetnji

Izvor: autor

Crvena faza i ciklus se definiraju na isti način kao kod prethodnih veličina. Vrijednost od jedan u minuti sugerira da je na segmentu zbroja omjera trajanja crvene i zelene faze jednak idealnom

vremenu putovanja u minutama. Budući da je u nazivniku manja vrijednost nego u prethodnoj nezavisnoj varijabli, očekuju se ekstremniji rasponi, što potvrđuje Slika 50, jer crvena faza može na nekim raskrižjima biti nekoliko puta dulja od zelene faze.



Slika 50. Udio zbroja omjera trajanja crvene i zelene faze u idealnom vremenu putovanja segmentom
Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

4.3.5 Udio ukupnog izgubljenog vremena na poprečnim faktorima smetnji

Izuzevši veličinu zbroja trajanja crvenih faza, prethodno predložene veličine uzimaju u obzir geometrijsku vjerojatnost, odnosno pretpostavljaju rast vremena putovanja iz omjera, što je u skladu s vjerojatnošću prolaska kroz raskrižje vozila pri dolasku na poprečni faktor smetnji. No idealno bi bilo dobiti uvid u vrijeme koje su vozila u stvarnosti izgubila zbog faktora smetnji, ako je poznato trajanje crvene faze i trajanje ciklusa na poprečnim faktorima smetnji.

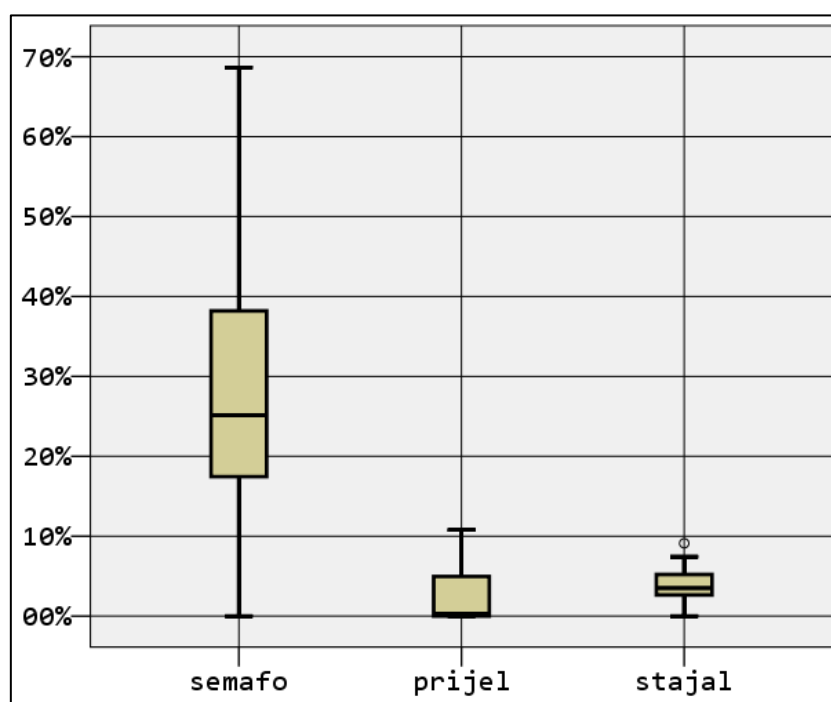
Prosječno izgubljeno vrijeme se može izračunati teoretski, ukoliko se promotri jednostavan slučaj u kojemu su zanemarena usporavanja i ubrzavanja vozila zbog faktora smetnji. Neka vozila nasumce dolaze na faktor smetnji, koji ima definirano trajanje crvene faze R_i i trajanje ciklusa C_i . Ako vozila nailaze prema faktoru uniformno, i nema smetnji drugih vozila, tada je kroz zelenu fazu raskrižja moglo proći $(C_i - R_i)/C_i = 1 - R_i/C_i$ vozila, a izgubljeno vrijeme za ta vozila bit će nula. Za razliku od njih, preostalih R_i/C_i vozila moralo je čekati promjenu faze iz crvene u zelenu, a izgubljeno vrijeme ovisi o tome u kojem je dijelu crvene faze svako vozilo stiglo u raskrižje. Može se pokazati da je prosječno izgubljeno vrijeme za vozila koja su stigla na raskrižje u crvenoj fazi pola trajanja crvene faze, jer je prema uniformnoj razdiobi dio

vozila došao na početak, dio u sredinu, a dio na kraj crvene faze. Prema tome, vrijedi:

$$p = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^I \left(0 * \frac{C_i - R_i}{C_i} + \frac{R_i}{2} * \frac{R_i}{C_i} \right) = \frac{1}{2T} \sum_{i=1}^I \frac{R_i^2}{C_i} \quad (15)$$

p	udio ukupnog izgubljenog vremena na poprečnom faktoru smetnji u idealnom vremenu putovanja segmentom
T	idealno vrijeme putovanja segmentom
I	ukupan broj pojavljivanja promatranog poprečnog faktora smetnji na segmentu
R_i	trajanje crvene faze na i -tom faktoru smetnji
C_i	trajanje ciklusa na i -tom faktoru smetnji

Izvor: autor



Slika 51. Raspon vrijednosti udjela ukupnog izgubljenog vremena na poprečnim faktorima smetnji u idealnom vremenu putovanja segmentom

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

Prema jednadžbi, kao i kod udjela zbroja trajanja crvenih faza, udio ukupnog izgubljenog vremena u idealnom vremenu putovanja će biti u postotcima. Slika 51 prikazuje raspon vrijednosti udjela ukupnog izgubljenog vremena u idealnom vremenu putovanja za semaforizirana raskrižja („semafo“), nesemaforizirane pješačke prijelaze („prijel“) i stajališta („stajal“). Iako su rasponi razmjerno slični prethodnim nezavisnim varijablama kada se usporede raskrižja, prijelazi i stajališta, za razliku od prethodnih veličina, udio za semaforizirana raskrižja se ne kreće oko jedan odnosno 100 %, već su vrijednosti manje, odnosno idealno vrijeme putovanja na segmentu uvijek je duže od ukupnog izgubljenog vremena na poprečnim faktorima smetnji.

Razumijevanje jednadžbe (15) se može poboljšati promatranjem slučaja jednog poprečnog

faktora smetnji, bez idealnog vremena putovanja:

$$\frac{t_i}{R_i} = \frac{R_i}{2C_i} \quad (16)$$

t_i	prosječno izgubljeno vrijeme na i -tom faktoru smetnji
R_i	trajanje crvene faze na i -tom faktoru smetnji
C_i	trajanje ciklusa na i -tom faktoru smetnji

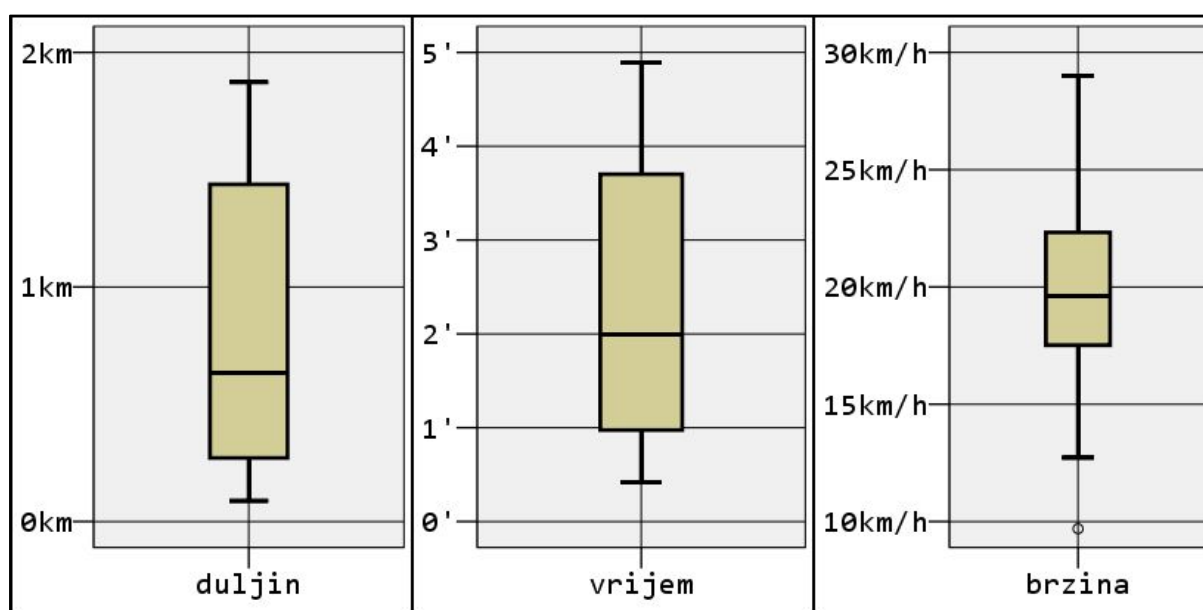
Izvor: autor

Drugim riječima, prosječno izgubljeno vrijeme na jednom poprečnom faktoru smetnji:

- je nula ako je udio crvene faze u ciklusu nula (u slučaju kada se crvena faza u istom trenutku uključi i isključi)
- raste linearno s porastom omjera trajanja crvene faze i ciklusa
- je maksimalnog iznosa pola trajanja crvene faze (u slučaju kada se zelena faza u istom trenutku uključi i isključi).

4.3.6 Idealno vrijeme putovanja

Iako je idealno vrijeme putovanja na segmentu u potpunosti dobiveno na temelju opažanja ponašanja vozača i performansi vozila, ono može utjecati na zavisne varijable. Primjerice, idealno vrijeme putovanja će uzrokovati kraće i duže segmente u vremenskom smislu, pa se pretpostavlja da kratko idealno vrijeme putovanja može uzrokovati veća rasipanja uzorka vremena putovanja, odnosno veće vrijednosti veličina koje se uspoređuju s medijanom.



Slika 52. Rasponi vrijednosti duljine segmenta, idealnog vremena putovanja i idealne brzine putovanja

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

Osim idealnog vremena putovanja (T), u obzir će se uzeti i stvarna duljina segmenta u

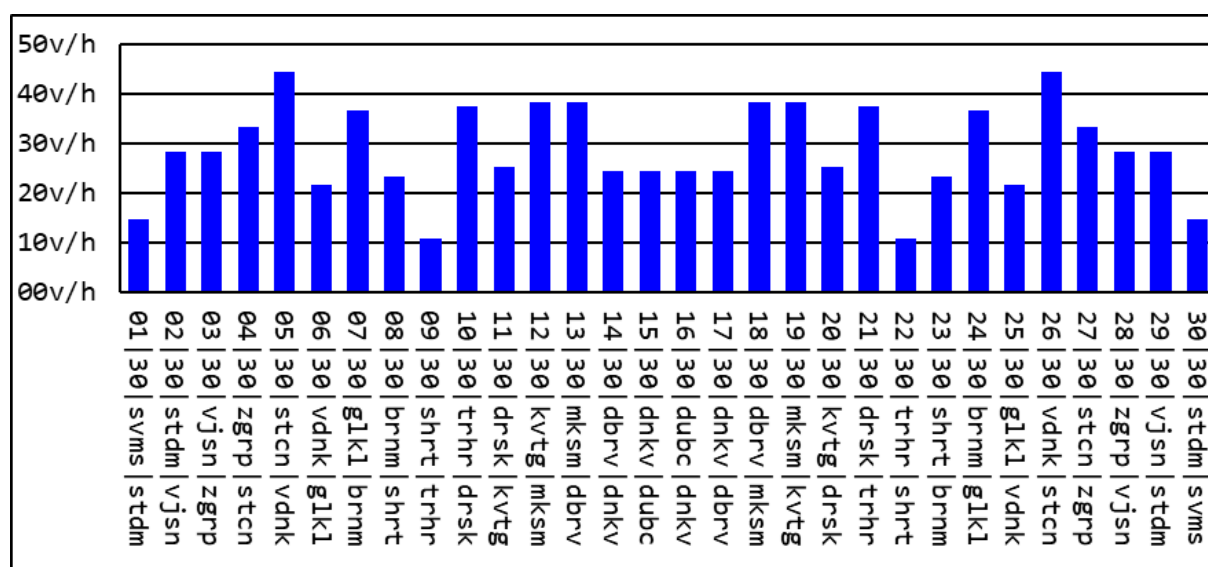
kilometrima (L), te idealna brzina putovanja u kilometrima na sat (V), iako se zbog manje preciznosti u odnosu na idealno vrijeme putovanja ne očekuje bolja korelacija duljine i brzine. Raspone svih triju navedenih veličina u uzorku prikazuje Slika 52.

Osim triju navedenih veličina, zanimljiva je i nezavisna varijabla recipročne vrijednosti idealnog vremena putovanja, jer je smisleno je da će u definiciji većine nezavisnih varijabli idealno vrijeme putovanja biti u nazivniku, jer se percentili vremena putovanja uspoređuju s idealnim vremenom putovanja. Navedena veličina će se označavati kao T^{-1} i mjeriti u postotcima u minuti (%/').

4.3.7 Frekvencija voznog reda

Frekvencija voznog reda je već uzeta u obzir kao dio utjecajnih transversalnih faktora smetnji za stajališta, jer se za stajališta pretpostavlja da je ciklus slijed vozila, koji je recipročna vrijednost frekvencije – dakle, ciklus, pa tako i frekvencija, javljaju se na stajalištima kod nezavisnih varijabli:

- prosječnog udjela dvostrukog crvenog u ciklusu u idealnom vremenu putovanja
- prosječnog odnosa crvenog i zelenog u idealnom vremenu putovanja
- udjela izgubljenog vremena u idealnom vremenu putovanja.



Slika 53. Frekvencija vozila na segmentima

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

No frekvencija vozila javnoga gradskoga prijevoza će se razmatrati i samostalno, budući da je pretpostavka kako se s porastom frekvencije vrijeme putovanja udaljava od idealne vrijednosti. Budući da su operatori kapaciteta javnoga gradskoga prijevoza stajališta (jer u idealnim

uvjetima vozila se moraju zaustaviti na stajalištima), a uzima se da je granično vrijeme zauzimanja prostora stajališta jedna minuta, tada je kritična vrijednost frekvencije 60 v/h ili 1 v/'. Iako je to teoretska vrijednost, pretpostavljena idealna vrijednost u istraživanju je 27 " odnosno 33 ", pa bi realna kritična vrijednost frekvencije u ovom slučaju bila oko 120 v/h odnosno 2 v'.

Iako se frekvencija vozila bitno razlikuje na segmentima (Slika 53), tokovi tramvajskih vozila su manje izraženi od tokova ostalih vozila, pa će se pokazati u korelacijskoj analizi ima li većeg utjecaja frekvencije putem poprečnih faktora smetnji ili samostalno.

U razmatranju frekvencije vozila bi se, primjerice, mogla razmotriti i udaljenost početka segmenta od izvorišnog terminala linije, budući da se očekuju veće nepravilnosti rasporeda vozila s rastom udaljenosti od izvorišnog terminala. No zbog toga što u slučaju mreže tramvajskih linija Zagreba ne postoji u tramvajskom prometu ravnomjerno kretanje vozila na različitim linijama s istog terminala, pretpostavlja se da će u tom kontekstu frekvencija vozila biti dovoljno kvalitetna nezavisna varijabla.

4.3.8 Vremenski udio tipova trakova

Osnovna je pretpostavka da vremenski udio pojedinog tipa traka utječe na vrijeme putovanja. U skladu s opisima tipova trakova iz poglavlja 3.3.4, pretpostavlja se da bi se utjecaj mogao javiti kod bijelih trakova i žutih trakova, no primjećuje se sljedeće:

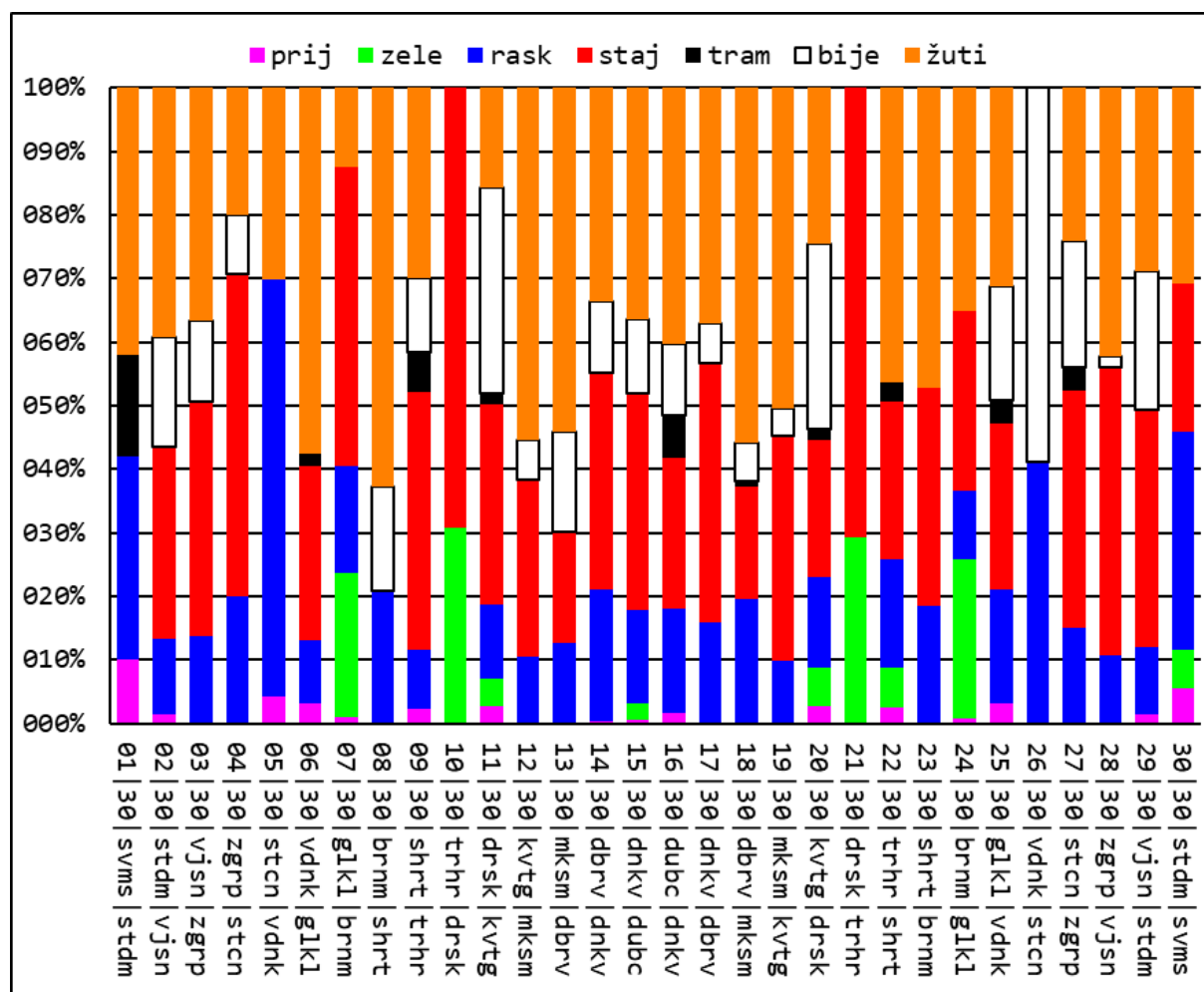
- u slučaju bijelih trakova neki trakovi mogu imati veće opterećenje ostalim vozilima od drugih, pa opterećenje nije uniformno
- u slučaju žutih trakova, nepoštivanje žutih trakova se ne javlja uniformno, već postoje kritična mjesta na mreži po tom pitanju.

S druge strane, stajališta, raskrižja, prijelazi i tramvajska raskrižja ne bi trebala imati nikakav utjecaj, budući da radnje na četiri navedena tipa traka ne bi trebala biti u vezi s vremenom putovanja preko tog tipa traka jer:

- na tramvajskim raskrižjima („tram“) se očekuje da je prolazak samo manjeg udjela tramvaja bio odgođen zbog drugih tramvaja
- na stajalištima („staj“) se očekuje da je vrijeme putovanja narušeno neravnomjernošću prijevozne ponude ili neravnomjernošću prijevozne potražnje, no ne i vremenom putovanja prostorom stajališta

- na raskrižjima („rask“) sami semafori uzrokuju varijabilnost ukoliko postoji, no vjerojatnost idealnog prometovanja prostorom raskrižja je velika
- na prijelazima („prij“) pješaci uzrokuju varijabilnost ukoliko postoji, no vjerojatnost idealnog prometovanja prostorom pješačkog prijelaza je maksimalna.

Uzevši u obzir navedeno, pretpostavlja se da vremenski udjeli tipova traka neće biti u vezi sa zavisnim varijablama. Vremenske udjele za svaki tip traka prikazuje Slika 54. Kada se usporede s prethodno prikazanim dijagramom prostornih udjela pojedinih vrsta trakova, uočava se da je razmjerno veći vremenski udio na stajalištima, jer se u vrijeme provedeno na stajalištu računa i vrijeme kretanja po prostoru stajališta i vrijeme zadržavanja na stajalištu, što daje realniju sliku vremenskih udjela u odnosu na prostorne udjele.



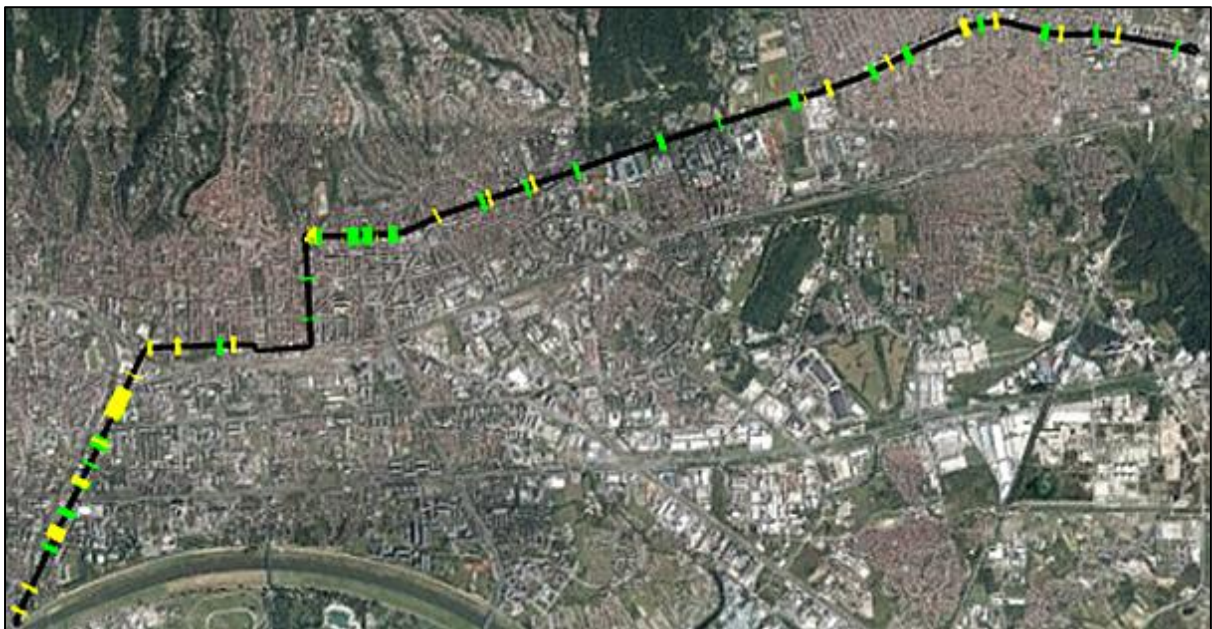
Slika 54. Vremenski udio trakova na segmentu prema vrstama
Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

4.3.9 Utjecaj ostalih vozila

Na tramvajskim kolosijecima je uobičajeno javljanje ostalih vozila. No u poslijepodnevnom vršnom periodu su tokovi ostalih vozila posebno izraženi, te se protok vozila može približiti

kapacitetu prometnice i premašiti ga. Brzini vozila se na kapacitetu može dodijeliti maksimalna vrijednost koja se dodijelila tramvajskom prometu od 43,2 km/h, a preko kapaciteta tok postaje nestabilan i brzina mu opada, što će svakako utjecati na vrijeme putovanja tramvaja koji se nađu u nestabilnom ili zagušenom toku vozila. Nadalje, na stvaranje nestabilnih tokova ostalih vozila utječu i semaforizirana raskrižja, zbog kojih se stvaraju repovi čekanja vozila u kojima tramvaji gube veliku količinu vremena.

Po pitanju ostalih vozila, problem se također može stvoriti zbog propisno ili nepropisno parkiranih vozila uz tramvajske kolosijeke, ili zbog vozila koja ulaze i izlaze na parkirališna mjesta uz tramvajske kolosijeke. Nadalje, postoji i čest problem vozila u bijelom traku koja su desni skretači na semaforiziranom raskrižju, gdje u istoj fazi prolaze pješaci koje vozila moraju propustiti, pa na taj način sprječavaju prolazak tramvaja u istoj fazi.



Slika 55. Odsječci s kritičnim prometnim tokom na liniji 4: u smjeru Savski most – Dubec (zeleno) i u smjeru Dubec – Savski most (žuto)

Izvor: autor uz korištenje programa Google Earth Pro [117]

Budući da navedeni slučajevi nisu jednostavni za modeliranje, brojitelje se uputilo na označavanje dijelova mreže na kojima su primijetili za vrijeme prikupljanja podataka u više od 50 % vremena nestabilan tok ostalih vozila u kojemu bi tramvaj prometovao manjom brzinom od idealne. Nakon prikupljanja informacija brojitelja o nestabilnim odsječcima, za svaki odsječak su se dodjeljivale vrijednosti:

- jedan, ako je odsječak pripadao dijelu mreže na kojemu je brojitelj primijetio nestabilan tok
- jedan, ako bijeli trak služi za desne skretače na semaforiziranom raskrižju, gdje usporedni pješaci imaju zeleno u istoj fazi, bez obzira na to je li tok nestabilan

- nula, na svim ostalim odsječcima koji ne zadovoljavaju prva dva kriterija.

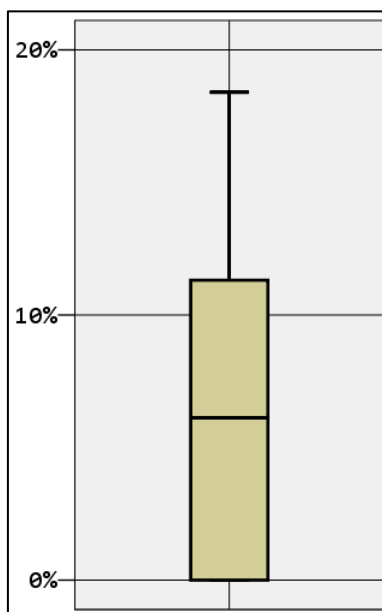
Kritične odsječke na liniji 4 prikazuje Slika 55, tako da su zelenom bojom označeni kritični odsječci na smjeru Savski most – Dubec, a žutom bojom odsječci na smjeru Dubec – Savski most. Nestabilni tokovi javljali su se duž Savske ceste i Vlačke ulice u oba smjera. Sve ostalo su vozila u bijelom traku kao desni skretači na semaforiziranom raskrižju u istoj fazi s usporednim pješacima, uz napomenu da su se na prostoru stajališta Jordanovac i Mašićeva u smjeru Kvaternikovog trga dodijelile vrijednosti jedan također, jer se stajališta nalaze na bijelom traku desnih skretača.

Vremenski udio kritičnih odsječaka na pojedinim segmentima će rezultirati određenim postotkom za svaki segment, jer je:

$$f = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^I f_i t_i \quad (17)$$

f	vremenski udio odsječaka kritičnog toka ostalih vozila na segmentu
T	idealno vrijeme putovanja segmentom
f_i	kritičnost tokova ostalih vozila i -tog odsječka (nula ili jedan)
t_i	idealno vrijeme putovanja na i -tom odsječku segmenta
I	broj odsječaka na segmentu

Izvor: autor



Slika 56. Raspon vrijednosti vremenskog udjela odsječaka s kritičnim tokom ostalih vozila na segmentu
Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

Raspone vrijednosti vremenskog udjela odsječaka kritičnog toka ostalih vozila na segmentu za sve segmente na liniji prikazuje Slika 56. Vrijednosti ne prelaze 20 %. Postoji samo jedna stršeća vrijednost, koja nije prikazana na slici, a pridružena je segmentu 27 i iznosi 35 %. Već

je ranije pokazano da je taj segment jedan od najkritičnijih na liniji, što se potvrđuje najvećim utjecajem tokova ostalih vozila.

4.4 Korelacijska analiza

Korelacijska analiza se provela na čitavom uzorku prikupljenih podataka (oba smjera linije), da bi se moglo dobiti pouzdanije kretanje veličina. Za potrebe korelacijske analize korišten je Pearsonov koeficijent korelacije i razina značajnosti [119]. Pozitivan Pearsonov koeficijent označava pozitivnu, a negativan koeficijent označava negativnu korelaciju. Uz korištenje razine pouzdanosti od 95 %, tumačenje vrijednosti značajnosti je sljedeće:

- slaba korelacija, razine značajnosti iznad 5 %, označena je crnom bojom
- jaka korelacija, razine značajnosti između 1 % i 5 %, označena je ružičastom bojom
- izuzetno jaka korelacija, razine značajnosti do 1 %, označena je crvenom bojom.

Korelacijska analiza provest će se prema hipotezi 1 uzimajući u obzir faktore smetnji, a prema hipotezi 2 uzimajući u obzir neravnomjernost prijevozne ponude.

4.4.1 Korelacija vremena putovanja i faktora smetnji

Nakon provedene korelacijske analize, dobivene vrijednosti prikazuje Tablica 16 kao postotke, tako da je koeficijent korelacije iznad, a razina značajnosti ispod. Zavisne varijable grupirane su po sličnosti:

- $v_{10/T}$ i $v_{50/10}$ opisuju ponašanje ranijih vozila (zavisne varijable 1 i 2)
- $v_{AV/T}$ i $v_{50/T}$ opisuju ponašanje srednjih vozila (zavisne varijable 3 i 4)
- $v_{90/T}$ i $v_{90/50}$ opisuju ponašanje kasnijih vozila (zavisne varijable 5 i 6)
- t_{SD}/t_{AV} i $\Delta_{90/10}$ opisuju zajedničko ponašanje ranijih i kasnijih vozila (zavisne varijable 7 i 8).

Tablica 16. Korelacija odabranih zavisnih i nezavisnih varijabli

nezavisna varijabla	zav 1 $v_{AV/T}$	zav 2 $v_{50/T}$	zav 3 $v_{10/T}$	zav 4 $v_{50/10}$	zav 5 $v_{90/T}$	zav 6 $v_{90/50}$	zav 7 t_{SD}/t_{AV}	zav 8 $\Delta_{90/10}$
omjer ukupnog broja raskrižja i idealnog vremena putovanja	+34% 7%	+34% 7%	+19% 32%	+34% 7%	+31% 10%	+9% 65%	−35% 6%	+17% 37%
omjer ukupnog broja prijelaza i idealnog vremena putovanja	+19% 32%	+17% 38%	−0% 99%	+28% 13%	+22% 24%	+15% 43%	−11% 56%	+19% 32%
omjer ukupnog broja stajališta i idealnog vremena putovanja	−21% 27%	−15% 43%	+12% 52%	−42% 2%	−31% 10%	−38% 4%	+4% 85%	−41% 3%
udio zbroja trajanja crvenih faza raskrižja u T	+67% 0%	+65% 0%	+22% 24%	+72% 0%	+71% 0%	+38% 4%	−28% 13%	+52% 0%

nezavisna varijabla	zav 1 v_{AV}/T	zav 2 v_{50}/T	zav 3 v_{10}/T	zav 4 $v_{50/10}$	zav 5 v_{90}/T	zav 6 $v_{90/50}$	zav 7 t_{SD}/t_{AV}	zav 8 $\Delta_{90/10}$
udio zbroja trajanja crvenih faza prijelaza u T	+21% 26%	+19% 32%	+4% 84%	+26% 16%	+23% 21%	+15% 42%	-10% 58%	+18% 33%
udio zbroja trajanja crvenih faza stajališta u T	-23% 23%	-17% 37%	+9% 66%	-42% 2%	-31% 9%	-36% 5%	+11% 58%	-39% 3%
udio zbroja omjera trajanja dvostruke crvene faze i ciklusa raskrižja u T	+61% 0%	+59% 1%	+19% 33%	+69% 0%	+65% 0%	+36% 5%	-25% 18%	+49% 1%
udio zbroja omjera trajanja dvostruke crvene faze i ciklusa prijelaza u T	+19% 32%	+17% 38%	+9% 65%	+14% 47%	+18% 33%	+13% 49%	-8% 67%	+15% 42%
udio zbroja omjera trajanja dvostruke crvene faze i ciklusa stajališta u T	-23% 22%	-15% 42%	+17% 37%	-46% 1%	-37% 4%	-50% 1%	-9% 62%	-51% 0%
udio zbroja omjera trajanja crvene i zelene faze raskrižja u T	+73% 0%	+70% 0%	+25% 19%	+72% 0%	+79% 0%	+44% 1%	-19% +32%	+57% 0%
udio zbroja omjera trajanja crvene i zelene faze prijelaza u T	+18% 33%	+16% 40%	+7% 72%	+14% 46%	+19% 33%	+16% 39%	-4% 84%	+18% 33%
udio zbroja omjera trajanja crvene i zelene faze stajališta u T	-22% 24%	-14% 47%	+18% 36%	-44% 2%	-36% 5%	-50% 1%	-12% 53%	-50% 1%
udio ukupnog izgubljenog vremena u T raskrižja	+76% 0%	+72% 0%	+20% 29%	+82% 0%	+83% 0%	+51% 0%	-18% 35%	+65% 0%
udio ukupnog izgubljenog vremena u T prijelaza	+20% 29%	+18% 34%	+13% 49%	+10% 59%	+18% 34%	+11% 57%	-10% 59%	+12% 52%
udio ukupnog izgubljenog vremena u T stajališta	-24% 20%	-17% 37%	+13% 48%	-45% 2%	-37% 5%	-47% 1%	-3% 88%	-48% 1%
duljina segmenta u kilometrima	-6% 75%	+4% 84%	+49% 1%	-52% 0%	-32% 9%	-70% 0%	-66% 0%	-69% 0%
idealno vrijeme putovanja na segmentu u minutama	-7% 71%	+2% 90%	+51% 0%	-56% 0%	-34% 7%	-71% 0%	-66% 0%	-71% 0%
recipročno idealno vrijeme putovanja segmenta u minutama na minus prvu	+6% 76%	-4% 85%	-53% 0%	+65% 0%	+33% 7%	+69% 0%	+61% 0%	+68% 0%
idealna brzina putovanja na segmentu u metrima u sekundi	+17% 37%	+24% 20%	+51% 0%	-28% 13%	-4% 83%	-45% 1%	-70% 0%	-40% 3%
frekvencija voznog reda na segmentu u vozilima po minuti	-25% 18%	-22% 25%	-6% 75%	-28% 14%	-30% 11%	-26% 17%	+8% 69%	-26% 16%
vremenski udio nesemaforiziranih pješačkih prijelaza na segmentu	+31% 10%	+28% 14%	-8% 67%	+59% 0%	+41% 2%	+33% 8%	-3% 88%	+40% 3%
vremenski udio zelenih trakova na segmentu	-34% 7%	-33% 8%	-24% 21%	-22% 25%	-31% 9%	-14% 46%	+37% 5%	-18% 34%
vremenski udio raskrižja na segmentu	+9% 64%	+2% 92%	-23% 23%	35% 6%	+21% 26%	+41% 3%	+11% 57%	+41% 3%
vremenski udio stajališta na segmentu	-27% 15%	-23% 21%	+1% 97%	-43% 2%	-32% 8%	-30% 11%	+24% 21%	-36% 5%
vremenski udio tramvajskih raskrižja na segmentu	+47% 1%	+45% 1%	+1% 98%	+71% 0%	+57% 0%	+36% 5%	-7% 72%	+46% 1%
vremenski udio bijelih trakova na segmentu	+19% 33%	+16% 39%	+27% 14%	-11% 55%	+12% 52%	+3% 88%	-24% 20%	-1% 96%
vremenski udio žutih trakova na segmentu	+12% 53%	+16% 41%	+9% 65%	+17% 37%	+9% 65%	-5% 80%	-32% 8%	+3% 87%
vremenski udio odsječaka kritičnih tokova ostalih vozila na segmentu	+64% 0%	+63% 0%	+66% 0%	+3% 89%	+51% 1%	+3% 86%	-39% 3%	+5% 78%

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

Na temelju dobivenih korelacija u tablici, donose se sljedeći zaključci u vezi odabira zavisnih i nezavisnih varijabli:

- zbog prevelikih razlika između ponašanja zavisnih varijabli desetog i devedesetog percentila (zavisne varijable 3, 4, 5 i 6), izbacuju se iz daljnje analize zavisne varijable koeficijenta varijacije i razlika devedesetog i desetog percentila u omjeru s medijanom (zavisne varijable 7 i 8), jer bi korištenje tih varijabli stvorilo poteškoće pri validaciji modela
- iako prosječno odstupanje vremena putovanja od idealnog pokazuje bolje vrijednosti od medijalnog, budući da te vrijednosti nisu znatne, izbacuje se prosjek iz daljnje analize, jer je bolje opisivati vremena putovanja medijalnom vrijednošću zbog poznavanja vrijednosti srednjeg člana uzorka u prijevoznom procesu
- za semaforizirana raskrižja, izbacuju se iz daljnje analize sve varijable za opisivanja poprečnih faktora smetnji, osim udjela ukupnog izgubljenog vremena u idealnom vremenu putovanja, jer pokazuje najbolju korelaciju
- za nesemaforizirane pješačke prijelaze, ne postoji korelacija niti jedne zavisne i nezavisne varijable, pa se izbacuju iz daljnje analize sve varijable poprečnih faktora smetnji; tijekom prikupljanja podataka o nesemaforiziranim pješačkim prijelazima, primijećeno je da pješaci većinom ulaze na prijelaz kada su pred prijelazom osobni automobili, no ipak propuštaju tramvaje, bez obzira na to što imaju prednost prolaska nad njima, što se jedino može povezati s percepcijom velike mase vozila
- za stajališta, izbacit će se sve varijable za opisivanje poprečnih faktora smetnji iz daljnje analize, osim udjela ukupnog izgubljenog vremena u idealnom vremenu putovanja, jer navedena nezavisna varijabla pokazuje najbolju korelaciju; no korelacija je neočekivano negativna, što sugerira kako se vrijednosti zavisne varijable smanjuju s povećanjem broja stajališta; uspostava modela provjerit će značajnost varijable
- za opisivanje duljine segmenta u prostoru ili vremenu, iz daljnje analize izbacuju se duljina segmenta i idealna brzina putovanja, jer osim što pokazuju slabiju korelaciju u usporedbi s idealnim vremenom putovanja, za ovakvu vrstu analize je jasno da idealno vrijeme putovanja stvara najbolju sliku stvarne duljine segmenta; nadalje, i samo idealno vrijeme putovanja će se izbaciti iz analize, jer su segmenti u analizi kratki (do pet minuta), a model bi trebao biti u mogućnosti opisivati vrijeme putovanja neovisno o duljini segmenta, pa je recipročna vrijednost idealnog vremena putovanja bolja veličina, jer pri velikim duljinama segmenata teži nuli

- ukupna frekvencija na segmentu se izbacuje iz daljnje analize, jer nije pokazala korelaciju, što se objašnjava činjenicom da, iako na nekim segmentima doseže vrijednost od 0,7 v/ i stvara repove čekanja tramvaja, ona u usporedbi s tokom osobnih vozila je znatno manja; prema tome, ostaje samo frekvencija u obliku slijeda koja je ugrađena u nezavisne varijable poprečnih faktora smetnji koji sadrže ciklus
- glede vremenskih udjela uzdužnih faktora smetnji, pokazuje se korelacija kod tramvajskih raskrižja i pješačkih prijelaza, stoga se preostali vremenski udjeli (zeleni trakovi, raskrižja, stajališta, bijeli trakovi, žuti trakovi) izbacuju iz daljnje analize; primjetno je da vremenski udjeli bijelih i žutih trakova ne pokazuju nikakvu korelaciju s vremenom putovanja, jer veći protok vozila na bijelim trakovima i veće nepoštivanje žutih trakova ne ovise samo o tipu traka, nego i o lokaciji na mreži, što i pokazuje značajna korelacija vremenskog udjela odsječka s kritičnim tokom ostalih vozila
- ako se usporede veličine koje opisuju vozila koja su uranila, predviđa se da će veličina $v_{50/10}$ proizvesti pouzdaniji model od veličine $v_{10/T}$, zbog pojavljivanja više značajnih korelacija
- ako se usporede veličine koje opisuju vozila koja su zakasnila, predviđa se da će veličina $v_{90/T}$ proizvesti pouzdaniji model od veličine $v_{90/50}$, zbog pojavljivanja više značajnih korelacija.

Iako su iz daljnje analize izbačene varijable za koje je očito postojanje međusobne zavisnosti (primjerice, raskrižja su se prikazivala na pomoću nekoliko varijabli, ili se duljina segmenta prikazivala prostorom, vremenom ili brzinom), preostale nezavisne varijable potrebno je podvrgnuti utvrđivanju međusobne zavisnosti. Rezultate prikazuje Tablica 17, u obliku dva pokazatelja:

- tolerancije, koja se dobije kada se od vrijednosti jedan oduzme koeficijent korelacije promatrane nezavisne varijable (koja preuzima ulogu zavisne varijable u promatranom slučaju) s ostalim nezavisnim varijablama – prihvatljiva je vrijednost iznad 30 %
- faktora napuhavanja varijance (eng. *variance inflation factor*), koji je recipročna vrijednost tolerancije; postojanje blage kolinearnosti je moguće pri vrijednostima većim od 3, te jake kolinearnosti pri vrijednostima većim od 5.

Prema tablici, s faktorom napuhavanja varijance 3,0 i 3,5 eventualno postojanje međusobne kolinearnosti pokazuju vremenski udio pješačkih prijelaza na segmentu i vremenski udio tramvajskih raskrižja na segmentu, te će se tijekom izgradnje modela voditi računa o utjecaju

te dvije varijable na model.

Iako je u javnom gradskom prijevozu izražen kumulativni efekt koji povećava vrijeme putovanja, korelacijska analiza i analiza međusobne kolinearnosti su pokazale da su se značajno bolje korelacije uspostavile kada su se faktori smetnji opisivali na jednostavan način jednom nezavisnom varijablom, a pritom se nije pokazala međusobna zavisnost nezavisnih varijabli.

Tablica 17. Odabrane nezavisne varijable za uspostavu modela s provjerom međusobne korelacije

nezavisna varijabla u višestrukoj linearnoj regresiji s ostalim nezavisnim varijablama	tolerancija	faktor napuhavanja varijance
udio ukupnog izgubljenog vremena u T raskrižja ($p sema$)	44%	2,3
udio ukupnog izgubljenog vremena u T stajališta ($p staj$)	62%	1,6
recipročno idealno vrijeme putovanja u minutama na minus prvu (T^{-1})	60%	1,7
vremenski udio nesemaforiziranih pješačkih prijelaza na segmentu ($w prij$)	33%	3,0
vremenski udio tramvajskih raskrižja na segmentu ($w tram$)	28%	3,5
vremenski udio odsječaka s kritičnim tokovima ostalih vozila na segmentu (f)	90%	1,1

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

4.4.2 Korelacija vremena putovanja i neravnomjernosti prijevozne ponude

Hipoteza 2 razmatra utjecaj neravnomjernosti prijevozne ponude na vrijeme putovanja. Frekvencija zadana voznim redom, za koju se pretpostavljalo da je najbolja veličina za opis neravnomjernosti prijevozne ponude, bila je uključena kao samostalna veličina i u kontekstu izgubljenog vremena na stajalištima analogno semaforiziranim raskrižjima. No kako je pokazano u korelacijskoj analizi vremena putovanja i faktora smetnji, ne postoji značajna korelacija između bilo kojeg od pokazatelja vremena putovanja i bilo koje veličine u kojima je bila uključena frekvencija voznog reda za vrijednosti do 45 v/h, te se isto pokazalo i sa slijedom voznog reda.

Za sve veličine koje su se koristile za modeliranje vremena putovanja (idealno vrijeme putovanja, semaforizirana raskrižja, tokovi ostalih vozila) karakteristična je nepovezanost s vremenima putovanja vozila javnoga gradskoga prijevoza. Drugim riječima, za model nije potrebno mjerenje samih vremena, već samo poznavanje geometrije mreže, zakonskih ograničenja, karakteristika ubrzavanja i usporavanja vozila javnoga gradskoga prijevoza, faza semaforiziranih raskrižja i ponašanja tokova ostalih vozila.

Prikupljanjem podataka dobivene su i vrijednosti sljedova vozila na rubu svakog od segmenata, koji mogu kvalitetnije opisati neravnomjernost prijevozne ponude od frekvencije ili slijeda voznog reda. No za razliku od frekvencije zadane voznim redom, te su veličine izravno vezane

za vrijeme putovanja, te se u skladu s time nisu razmatrale u korelacijskoj analizi vremena putovanja i faktora smetnji, već se njihov utjecaj na vrijeme putovanja razmatrao zasebno. Provela se korelacijska analiza, koju prikazuje Tablica 18, tako da su za zavisne odabrane dosada korištene varijable, te je uvedeno četrnaest nezavisnih varijabli neravnomjernosti prijevozne ponude za koje se provjeravala korelacija.

Tablica 18. Korelacija zavisnih varijabli odabranih za model i nezavisnih varijabli koje opisuju neravnomjernost prijevozne ponude

nezavisna varijabla	zav 1 $v_{AV/T}$	zav 2 $v_{50/T}$	zav 3 $v_{10/T}$	zav 4 $v_{50/10}$	zav 5 $v_{90/T}$	zav 6 $v_{90/50}$	zav 7 t_{SD}/t_{AV}	zav 8 $\Delta_{90/10}$
prosječna frekvencija vozila na segmentu	-14% 46%	-15% 44%	-16% 39%	-6% 77%	-9% 64%	+8% 66%	+19% 32%	+7% 71%
standardna devijacija frekvencije na segmentu	-17% 37%	-24% 20%	-40% 3%	+15% 43%	+1% 97%	+48% 1%	+36% 5%	+42% 2%
prosječan slijed vozila na segmentu	+25% 18%	+21% 26%	0% 99%	+33% 7%	+32% 8%	+32% 9%	-2% 92%	+33% 7%
standardna devijacija slijeda vozila na segmentu	+18% 35%	+13% 51%	-8% 68%	+30% 11%	+27% 14%	+38% 4%	+06% 77%	+37% 5%
postotno povećanje prosječne frekvencije u odnosu na vozni red	+2% 91%	-4% 85%	-25% 18%	+24% 20%	+17% 36%	+47% 1%	+25% 19%	+44% 2%
postotno povećanje prosječnog slijeda u odnosu na vozni red	+10% 62%	+10% 60%	+9% 65%	+7% 71%	+9% 65%	-1% 96%	-22% 24%	-1% 98%
prosječno apsolutno povećanje frekvencije kroz segment	+11% 56%	+10% 60%	+6% 77%	+10% 61%	+9% 62%	+4% 82%	-15% 43%	+6% 74%
prosječno apsolutno povećanje slijeda kroz segment	+11% 55%	+9% 64%	+17% 36%	-11% 53%	+10% 60%	+6% 76%	-5% 79%	-0% 99%
prosječno postotno povećanje frekvencije kroz segment	+14% 46%	+15% 44%	+18% 35%	-1% 95%	+10% 61%	-2% 93%	-24% 19%	-1% 97%
prosječno postotno povećanje slijeda kroz segment	+28% 14%	+29% 13%	+32% 9%	-3% 87%	+22% 25%	+0% 99%	-27% 14%	+2% 93%
udio sljedova manjih od 120 sekundi po vozilu	-26% 16%	-22% 23%	+0% 99%	-34% 7%	-34% 6%	-33% 8%	+2% 91%	-34% 7%
udio sljedova manjih od 60 sekundi po vozilu	-27% 16%	-27% 16%	-22% 25%	-17% 36%	-23% 21%	-6% 75%	26% 16%	-9% 65%
udio sljedova manjih od 30 sekundi po vozilu	-5% 80%	3% 87%	-4% 85%	-4% 83%	-5% 78%	-6% 75%	+3% 87%	-3% 86%
prosječna postotna razlika između veće i manje vrijednosti sljedova	+28% 13%	+30% 11%	+36% 5%	-5% 81%	+20% 30%	-5% 79%	-37% 4%	-3% 88%

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

Uvijek su se posebno analizirali i slijed i frekvencija, jer su recipročne vrijednosti, pa korelacija može biti različita. Nisu se posebno analizirali rubovi segmenta, već je uvijek određena prosječna vrijednost ili vrijednost koja opisuje odnos rubova segmenata. Za odabir nezavisnih varijabli, uzimalo se u obzir sljedeće:

- za prosječno izmjerene sljedove i frekvenciju razmatrali su se prosjeci i standardne devijacije – četiri veličine

- razmatralo se postotno odstupanje slijeda i frekvencije od voznog reda (koje može biti pozitivno ili negativno) – dvije veličine
- razmatrali su se odnosi vrijednosti izmjerenih na kraju segmenta u odnosu na vrijednosti izmjerene na početku segmenta u apsolutnom i relativnom obliku koje mogu biti pozitivne i negativne – četiri veličine
- koristile su se veličine udjela sljedova za opis nagomilavanja vozila – tri veličine
- koristila se veličina koja opisuje postotno povećanje maksimalne u odnosu na minimalnu vrijednost sljedova, bez obzira radi li se o početku ili kraju segmenta, te tako može biti samo pozitivna – jedna veličina.

Dobiveno je da je jedina zavisna varijabla na koju postoji značajniji utjecaj odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja u odnosu na medijalno vrijeme putovanja, a nezavisne varijable koje imaju značajan utjecaj na nju su standardna devijacija frekvencije na segmentu i postotno povećanje frekvencije u odnosu na vozni red, uz manje značajan utjecaj standardne devijacije slijeda vozila na segmentu. Prema definiciji svih triju veličina, one mogu međusobno biti nezavisne, a razlika je u tome što standardna devijacija frekvencije na segmentu može imati veliki raspon vrijednosti, budući da su se javljali jako mali sljedovi za vozila koja jedno iza drugoga prolaze kroz semaforizirana raskrižja.

5 KONSTRUKCIJA PROGNOŠTIČKOG MODELA VREMENA PUTOVANJA

Precizno definiran model vremena putovanja u javnom gradskom prijevozu na mrežama linija gdje je jedini siguran polazak vozila s izvorišnog terminala prema voznom redu mora sadržavati:

- idealno vrijeme putovanja, koje je mjera dinamičkog kapaciteta i na temelju koje se dobivaju ostale vrijednosti
- srednju vrijednost, da bi se izračunalo koliko je vrijeme putovanja za srednje vozilo u uzorku, i koliko bi se srednji vozač na određišnom terminalu zadržavao – korelacijska analiza je pokazala da je $v_{50/T}$ prihvatljiva veličina
- vrijednost koja opisuje ranija vozila, da bi se pri što manjem broju dolazaka vozila na određišni terminal izbjeglo zagušenje terminala – korelacijska analiza je pokazala da je $v_{50/10}$ bolji kandidat od $v_{10/T}$
- vrijednost koja opisuje kasnija vozila, da bi što manji broj polazaka vozila s određišnog terminala kasnio u odnosu na vozni red – korelacijska analiza je pokazala da je $v_{90/T}$ bolji kandidat od $v_{90/50}$.

Koristeći definicije veličina, može se definirati odnos između veličina koje služe za prikaz ponašanja vremena putovanja ranijih i kasnijih vozila, uz poznavanje odstupanja medijalne vrijednosti vremena putovanja od idealne. Prema tome, ukoliko se pokaže za modeliranje veća pogodnost veličina $v_{10/T}$ odnosno $v_{90/T}$, mogu se koristiti formule za transformaciju u $v_{50/10}$ odnosno $v_{90/50}$:

$$v_{50/10} = \frac{v_{50/T} - v_{10/T}}{1 + v_{10/T}} \quad (18)$$

$$v_{90/50} = \frac{v_{90/T} - v_{50/T}}{1 + v_{50/T}} \quad (19)$$

$v_{50/10}$	odstupanje medijalnog vremena putovanja od desetog percentila
$v_{50/T}$	odstupanje medijalnog vremena putovanja od idealnog
$v_{10/T}$	odstupanje desetog percentila vremena putovanja od idealnog
$v_{90/50}$	odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od medijalnog
$v_{90/T}$	odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od idealnog

Izvor: autor

Jedina razlika je u tome što će se za prikaz pojedinih veličina, umjesto linearnih funkcija,

koristiti racionalne funkcije ili polinomi. Navedene jednadžbe se mogu koristiti i za izračun desetog, odnosno devedesetog percentila vremena putovanja. Izgradnja modela će pokazati koja je od navedenih veličina prihvatljivija na temelju izlaznih parametara modela i smislenosti varijabli koje su ostale kao značajne u modelu.

Budući da je uspostavljeni model potrebno validirati, uzorak će se podijeliti prema smjerovima tramvajske linije 4, odnosno pola uzorka će služiti za konstrukciju modela, a pola uzorka za validaciju. Razlog podjele uzorka na ovaj način je uobičajena praksa podjele uzorka na polovine i dodatna činjenica da su smjerovi tramvajskih linija međusobno nezavisni uzorci, jer se međusobna ovisnost uzastopnih polazaka vozila eliminira na terminalu na kojemu su polasci definirani prema voznom redu. Također, oba smjera imaju sličan sastav tipova segmenata na smjeru linije, pa se pretpostavlja da će se kašnjenja ponašati slično. Segmenti su podijeljeni na sljedeći način:

- konstrukcija modela: smjer Dubec – Savski most (od segmenta 16 do segmenta 30)
- validacija modela: smjer Savski most – Dubec (od segmenta 01 do segmenta 15).

Za izgradnju modela se odabrao smjer Dubec – Savski most jer je u poslijepodnevnom vršnom periodu izraženiji problem tokova vozila u tom smjeru (Savska cesta i Vlaška ulica), pa će tako i model biti precizniji po pitanju nezavisne varijable vremenskog udjela odsječaka s kritičnim tokovima ostalih vozila.

5.1 Dobivanje modela višestrukom linearnom regresijom

Model se uspostavio u programskom alatu *IBM SPSS Statistics 23* korištenjem višestruke linearne regresije, tako da su se beznačajne varijable eliminirale pomoću tehnika:

- biranja sprijeda (eng. *forward selection*)
- unatražnog isključivanja (eng. *backward elimination*)
- postepenog biranja (eng. *stepwise selection*).

Pokazalo se da je tehnika postepenog biranja bila dovoljna za uspostavu modela koji su izbacili beznačajne nezavisne varijable tako da eliminacije imaju smisla u prometnom sustavu. Modeli su se konstruirali za zavisne varijable koje su odabrane za daljnju analizu nakon eliminacija u korelacijskoj analizi, te će se prikazati samo modeli s korigiranim R^2 iznad 60 % i značajnošću manjom od pet promila. Dobivene modele prikazuje Tablica 19.

Radi dobivanja detaljnih uvida u model, i odabira najprikladnijeg modela za sve tri zavisne

varijable, provedena je analiza nezavisnih varijabli i njima pripadajućih koeficijenata. Rezultate prikazuje Tablica 20, tako da je za svaki model navedena vrijednost koeficijenta u odgovarajućoj mjernoj jedinici kao gornji podatak, t-vrijednost (apsolutna vrijednost omjera koeficijenta i standardne greške) kao srednji podatak, te značajnost kao donji podatak. Iako su vrijednosti koeficijenata dobivene programskim alatom u rezoluciji jednog promila, zaokružene su na jedan posto jer se smatra da neće doći do značajne pogreške u validaciji zbog zaokruživanja.

Tablica 19. Dobiveni modeli za relevantne zavisne varijable nakon provedene višestruke linearne regresije

model	korigirani R^2	standardna pogreška procjene	zbroj kvadrata modela	zbroj kvadrata grešaka	sredina kvadrata modela	sredina kvadrata grešaka	F	značajnost
$v_{50/T} 1$	61%	0,23	1,23	0,69	1,23	0,05	23	0,0%
$v_{50/T} 2$	90%	0,12	1,75	0,17	0,88	0,01	62	0,0%
$v_{10/T} 1$	63%	0,13	0,46	0,21	0,23	0,02	13	0,1%
$v_{50/10} 1$	65%	0,08	0,17	0,07	0,08	0,01	14	0,1%
$v_{50/10} 2$	80%	0,06	0,20	0,04	0,07	0,00	19	0,0%
$v_{90/T} 1$	86%	0,23	4,61	0,65	2,31	0,05	43	0,0%
$v_{90/T} 2$	92%	0,17	4,94	0,32	1,65	0,03	57	0,0%
$v_{90/50} 1$	63%	0,09	0,22	0,09	0,07	0,01	09	0,3%

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

Nakon provedene analize nezavisnih varijabli i njima pripadajućih koeficijenata, donose se sljedeći zaključci:

- problem međusobne korelacije (Tablica 17) je eliminiran, jer provjerom međusobne korelacije nezavisnih varijabli koje su ostale u svakom modelu, međusobna korelacija se nije zabilježila niti u jednom modelu
- nezavisna varijabla udjela izgubljenog vremena na stajalištima nije bila značajna niti u jednom modelu, što sugerira da nagomilavanje vozila na mreži nije posljedica stajališta s jednim peronom u kombinaciji s velikom frekvencijom vozila, već isključivo semaforiziranih raskrižja u blizini tih stajališta – drugim riječima, dokazalo se da do frekvencije od 45 v/h (iznad slijeda od $1'20''/v$) nagomilavanje vozila ne bi bilo značajno na stajalištima kada u njihovoj blizini ne bi postojala semaforizirana raskrižja
- nezavisna varijabla vremenskog udjela nesemaforiziranih pješačkih prijelaza, uz slabu t-vrijednost, pokazuje negativnu korelaciju u modelima $v_{50/10}|2$ i $v_{90/50}|1$, što sugerira da s većim vremenskim udjelom nesemaforiziranih pješačkih prijelaza u segmentu varijabilnost vremena putovanja opada, što nema smisla kod opisivanja pješačkih prijelaza,

stoga se navedena dva modela koja sadrže tu nezavisnu varijablu eliminiraju iz analize, što ujedno eliminira i vremenski udio nesemaforiziranih pješačkih prijelaza iz analize

- u modelu $v_{10/T}|1$ nezavisne varijable su vremenski udio tramvajskih raskrižja na segmentu i vremenski udio odsječaka kritičnih tokova ostalih vozila na segmentu, što s prometnog aspekta nema smisla, pa se model izbacuje iz daljnje analize, što ujedno i eliminira vremenski udio tramvajskih raskrižja na segmentu kao nezavisnu varijablu jer se smatra da međusobna propuštanja tramvaja na raskrižjima nisu mogla dovesti do primjetnih varijabilnosti
- kao što je bilo predviđeno korelacijskom analizom, za opisivanje desetog percentila vremena putovanja pogodnija je veličina $v_{50/10}$, a za opisivanje devedesetog percentila vremena putovanja pogodnija je veličina $v_{90/T}$
- model $v_{50/T}|1$ se izbacuje iz daljnje analize zbog slabije korelacije u odnosu na model $v_{50/T}|2$
- model $v_{90/T}|2$ se izbacuje iz daljnje analize jer, iako ima veći koeficijent determinacije od $v_{90/T}|1$, t-vrijednost i značajnost recipročnog idealnog vremena putovanja sugeriraju da bi se model mogao opisati i bez te varijable, pa tako biti manje kompleksan
- u svim modelima konstanta ima značajnost uvijek veću od 5 %, što sugerira da su modeli dobro opisani, i da ne postoji neotkrivena značajna nezavisna varijabla za opisivanje vremena putovanja; konstante se stoga eliminiraju iz modela radi smanjenja kompleksnosti modela.

Tablica 20. Rezultati za nezavisne varijable modela i njihove koeficijente

model	korigirani R^2	konstanta	$p sema$	$p staj$	T^{-1}	$w prij$	$w tram$	f
$v_{50/T} 1$	61%	+14% 1,4 17%	+144% 4,8 0%	ne	ne	ne	ne	ne
$v_{50/T} 2$	90%	+3% 0,6 58%	+116% 7,3 0%	ne	ne	ne	ne	+215% 6,1 0%
$v_{10/T} 1$	63%	+1% 0,3 81%	ne	ne	ne	ne	+516% 2,9 1%	+135% 3,5 1%
$v_{50/10} 1$	65%	+4% 0,8 42%	+54% 5,2 0%	ne	+13% 2,8 2%	ne	ne	ne
$v_{50/10} 2$	80%	+5% 1,2 27%	+58% 7,2 0%	ne	+17% 4,4 0%	-305% 3,1 1%	ne	ne
$v_{90/T} 1$	86%	+17% 1,6 13%	+176% 5,6 0%	ne	ne	ne	ne	+378% 5,5 0%

model	korigirani R^2	konstanta	$p sema$	$p staj$	T^{-1}	$w prij$	$w tram$	f
$v_{90/T} 2$	92%	-12% 1,0 37%	+201% 8,3 0%	ne	+35% 3,4 1%	ne	ne	+378% 7,5 0%
$v_{90/50} 1$	63%	+3% 0,6 58%	+40% 3,3 1%	ne	+29% 4,9 0%	-334% 2,2 5%	ne	ne

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

Zaključno, prikazuju se matematičkom formulom odabrana tri modela, tako da se nakon eliminacije izgubljenog vremena na stajalištu kao nezavisne varijable podrazumijevaju za veličinu p samo semaforizirana raskrižja. Za opisivanje medijalnog vremena putovanja, mjerodavan je model $v_{50/T}|2$:

$$v_{50/T} = 116\%p + 215\%f = 116\% * \frac{1}{2T} \sum_{i=1}^I \frac{R_i^2}{C_i} + 215\% * \frac{1}{T} \sum_{j=1}^J f_j t_j \quad (20)$$

$v_{50/T}$	odstupanje medijalnog vremena putovanja od idealnog
p	udio ukupnog izgubljenog vremena na semaforiziranim raskrižjima u idealnom vremenu putovanja
f	vremenski udio odsječaka s kritičnim tokovima ostalih vozila u idealnom vremenu putovanja
T	idealno vrijeme putovanja segmentom
I	broj semaforiziranih raskrižja
R_i	trajanje crvene faze na i -tom semaforiziranom raskrižju
C_i	trajanje ciklusa na i -tom semaforiziranom raskrižju
J	broj odsječaka na segmentu
f_j	kritičnost tokova ostalih vozila j -tog odsječka (nula ili jedan)
t_j	idealno vrijeme putovanja na j -tom odsječku segmenta

Izvor: autor

Za opisivanje desetog percentila vremena putovanja, mjerodavan je model $v_{50/10}|1$:

$$v_{50/10} = 54\%p + 13\%T^{-1} = 54\% * \frac{1}{2T} \sum_{i=1}^I \frac{R_i^2}{C_i} + 13\% * \frac{1}{T} \quad (21)$$

$v_{50/10}$	odstupanje medijalnog vremena putovanja od desetog percentila
p	udio ukupnog izgubljenog vremena na semaforiziranim raskrižjima u idealnom vremenu putovanja
T	idealno vrijeme putovanja segmentom
f	vremenski udio odsječaka s kritičnim tokovima ostalih vozila u idealnom vremenu putovanja
I	broj semaforiziranih raskrižja
R_i	trajanje crvene faze na i -tom semaforiziranom raskrižju
C_i	trajanje ciklusa na i -tom semaforiziranom raskrižju

Izvor: autor

Za opisivanje devedesetog percentila vremena putovanja, odabran je model $v_{90/T}|1$, te je

korištenjem formule za transformaciju dobivena veličina $v_{90/50}$:

$$v_{90/T} = 176\%p + 378\%f = 176\% * \frac{1}{2T} \sum_{i=1}^I \frac{R_i^2}{C_i} + 378\% * \frac{1}{T} \sum_{j=1}^J f_j t_j \quad (22)$$

$$v_{90/50} = \frac{v_{90/T} - v_{50/T}}{1 + v_{50/T}} = \frac{60\%p + 163\%f}{100\% + 116\%p + 215\%f} \quad (23)$$

$v_{90/T}$	odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od idealnog
p	udio ukupnog izgubljenog vremena na semaforiziranim raskrižjima u idealnom vremenu putovanja
f	vremenski udio odsječaka s kritičnim tokovima ostalih vozila u idealnom vremenu putovanja
T	idealno vrijeme putovanja segmentom
I	broj semaforiziranih raskrižja
R_i	trajanje crvene faze na i -tom semaforiziranom raskrižju
C_i	trajanje ciklusa na i -tom semaforiziranom raskrižju
J	broj odsječaka na segmentu
f_j	kritičnost tokova ostalih vozila j -tog odsjeka (nula ili jedan)
t_j	idealno vrijeme putovanja na j -tom odsjeku segmenta
$v_{90/50}$	odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od medijalnog
$v_{50/T}$	odstupanje medijalnog vremena putovanja od idealnog

Izvor: autor

5.2 Provjera opravdanosti primjene višestruke linearne regresije

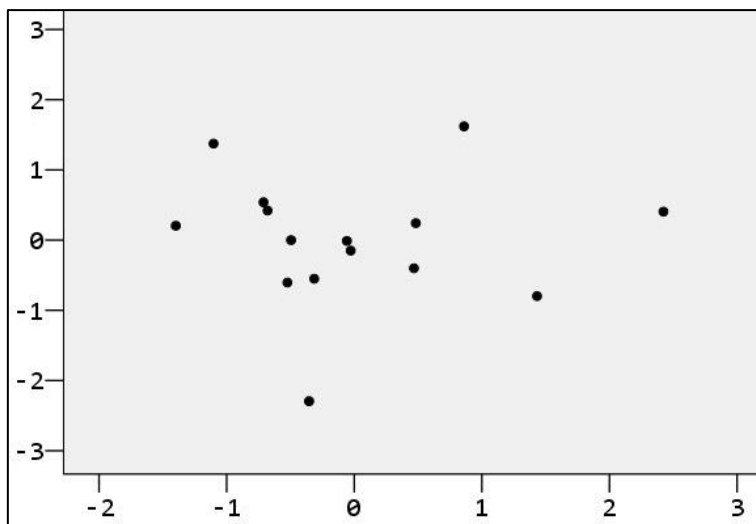
Da bi postupak izgradnje modela višestrukom linearnom regresijom bio opravdan, potrebno je ispuniti četiri uvjeta [120]:

- ovisnost između zavisne i nezavisnih varijabli mora biti linearna – pokazano linearnim jednadžbama modela
- ne smije postojati međusobna zavisnost nezavisnih varijabli – nezavisnost pokazuje Tablica 17, a varijable za koje je postojala mogućnost međusobne kolinearnosti su eliminirane, te se pri izgradnji modela ponovno pokazalo da nema međusobnih zavisnosti
- varijanca grešaka mora biti konstantna – provjerit će se grafički
- razdioba grešaka mora biti normalna – provjerit će se testovima.

Za provjeru konstantnosti varijance, na grafičkim prikazima na osi apscisa nalazi se standardizirana vrijednost zavisne varijable, a na osi ordinata standardizirana vrijednost greške (eng. *residual*). Test provjere konstantnosti varijance je prolazan ukoliko rasipanje grešaka i za standardiziranu vrijednost zavisne varijable i za standardiziranu vrijednost greške nije manja od -3 i nije veća od $+3$, odnosno sve se točke nalaze u polju oblika kvadrata sa stranicama početne vrijednosti -3 i završne vrijednosti $+3$. Rezultate prikazuju Slika 57 za $v_{50/T}$, Slika

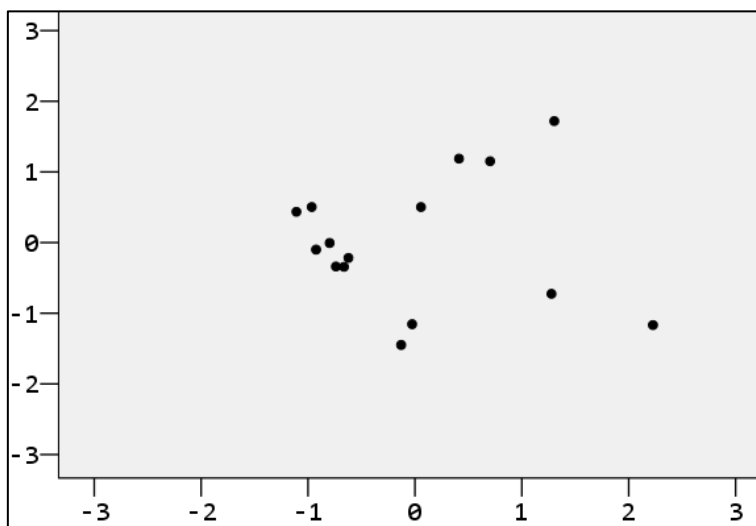
58 za $v_{50/10}$ i Slika 59 za $v_{90/T}$.

Iz slika se primjećuje da su rijetka rasipanja standardiziranih vrijednosti zavisne varijable i rasipanja standardiziranih vrijednosti grešaka većih od dvije standardne devijacije, te se s većom vjerojatnošću može potvrditi da su odnosi tih rasipanja slični, odnosno točke dijagrama tvore kvadratni oblik, stoga zavisne varijable imaju prolazan test konstantnosti varijance.



Slika 57. Provjera konstantnosti varijance grafičkom metodom za odstupanje medijalnog vremena putovanja od idealnog

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]



Slika 58. Provjera konstantnosti varijance grafičkom metodom za odstupanje medijalnog vremena putovanja od desetog percentila

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

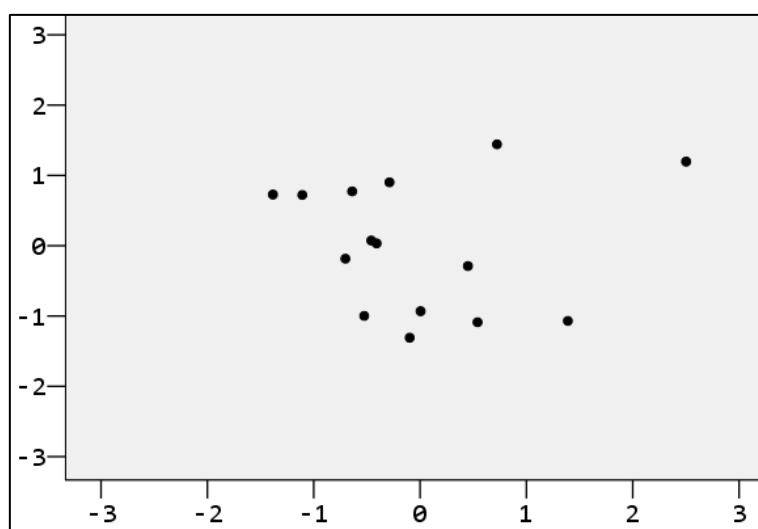
Za provjeru normalnosti rasipanja zavisne varijable, koristit će se četiri testa:

- test asimetrije: SKW
- test spljoštenosti: KRT
- test Kolmogorov-Smirnov: K-S

- test Shapiro-Wilk: S-W.

Testiranje se provodi na nestandardiziranim vrijednostima ostataka. Rezultate prikazuje Tablica 21. Budući da se radi o malom uzorku od 15 segmenata, iz tablice se donose sljedeći zaključci:

- apsolutni omjer u testovima asimetrije i spljoštenosti je za sve modele rezultirao vrijednošću manjom od 2, što potvrđuje normalnost razdiobe
- vrijednosti testova Kolmogorov-Smirnov i Shapiro-Wilk rezultirali su vrijednostima iznad 5 %, što također potvrđuje normalnost razdiobe.



Slika 59. Provjera konstantnosti varijance grafičkom metodom za odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od idealnog

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

Tablica 21. Testiranje normalnosti razdiobe grešaka

model	test SKW: vrijednost	test SKW: standardna greška	test SKW: omjer	test KRT: vrijednost	test KRT: standardna greška	test KRT: omjer	test K-S: vrijednost	test S-W: vrijednost
$v_{50/T}$	-0,61	0,58	-1,1	+2,06	1,12	+1,8	20%	36%
$v_{50/10}$	+0,21	0,58	+0,4	-0,63	1,12	-0,6	20%	83%
$v_{90/T}$	+0,01	0,58	+0,2	-1,48	1,12	-1,3	19%	19%

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

Na temelju rezultata uspostavljenog modela i provjere normalnosti grešaka, utvrđuje se da su tri uspostavljena modela dopuštena, jer su prošla na testovima normalnosti ostataka pri višestrukoj linearnoj regresiji.

5.3 Modeliranje vremena putovanja na temelju neravnomjernosti prijevozne ponude

Prema dobivenim rezultatima u korelacijskoj analizi vremena putovanja i neravnomjernosti

prijevozne ponude, pokušat će se uspostaviti model koji će kao zavisnu varijablu razmatrati $v_{90/50}$, a za nezavisne varijable će uzeti u obzir sve tri varijable korištene za konstrukciju modela na temelju faktora smetnji i sve nezavisne varijable koje opisuju neravnomjernost prijevozne ponude za koje se pokazala značajnija korelacija (6 varijabli). Model se pokušava uspostaviti također na smjeru Dubec – Savski most, a dobiveni rezultati se uspoređuju s prethodno odabranim modelom odstupanja devedesetog percentila u odnosu na idealno vrijeme putovanja, budući da obje veličine opisuju ponašanje devedesetog percentila vremena putovanja.

Za dobivanje modela koristile su se iste tehnike kao i kod prethodnog modela. Dobivena su dva modela korigiranog koeficijenta determinacije većeg od 60 %, no iz daljnje analize je eliminiran model korigiranog koeficijenta determinacije od 71 %, jer nije sadržavao niti jednu od nezavisnih varijabli koje opisuju neravnomjernost prijevozne ponude. Preostali model uključuje sve tri nezavisne varijable koje su se javljale u prethodno utvrđenim modelima – p , T^{-1} i f , te standardnu devijaciju frekvencije. Usporedbu parametara modela prikazuje Tablica 22, u kojoj se vidi da je korigirani koeficijent determinacije 5 % manji, a F-vrijednost značajno manja od prethodno utvrđenog modela za ponašanje devedesetog percentila vremena putovanja.

Tablica 22. Usporedba parametara prethodno dobivenog modela devedesetog percentila vremena putovanja s dobivenim modelom koji uključuje neravnomjernost prijevozne ponude

model	korigirani R^2	standardna pogreška procjene	zbroj kvadrata modela	zbroj kvadrata grešaka	sredina kvadrata modela	sredina kvadrata grešaka	F	značajnost
utvrđeni $v_{90/T}$	86%	0,23	4,61	0,65	2,31	0,05	43	0,0%
dobiveni $v_{90/50}$	81%	0,06	0,26	0,04	0,06	0,04	16	0,0%

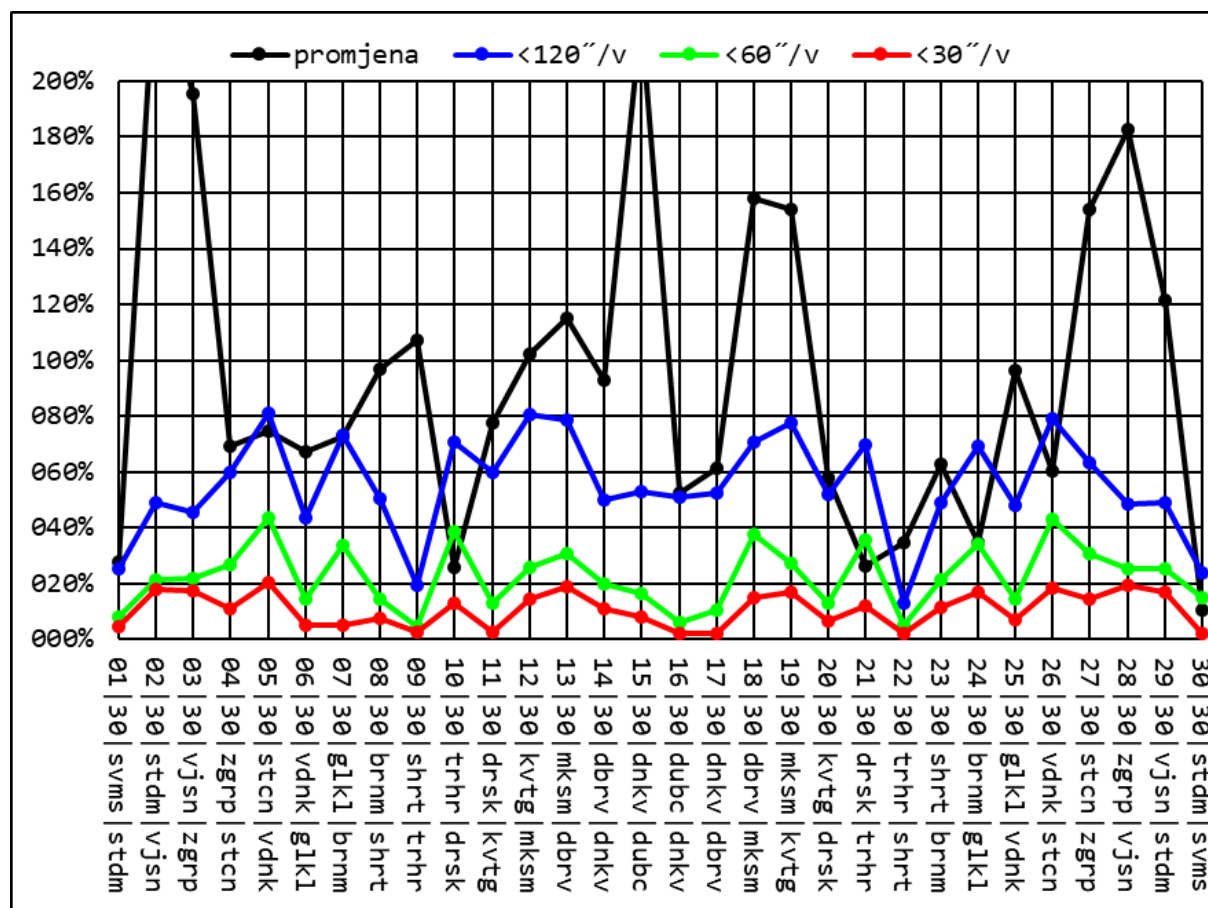
Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

Prema dobivenim rezultatima, uvođenjem nezavisnih varijabli koje opisuju neravnomjernost prijevozne ponude, postigla se određena korelacija za odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od medijalnog, no model se nije pokazao pouzdanijim od prethodno utvrđenog modela odstupanja devedesetog percentila vremena putovanja od idealnog, a pritom ima četiri nezavisne varijable, od kojih je jedna izravno vezana za prikupljene podatke o vremenima putovanja. Stoga se hipoteza 2 rada o utjecaju neravnomjernosti prijevozne ponude na idealno vrijeme putovanja odbacuje.

Ponašanje vrijednosti nezavisnih varijabli koje opisuju neravnomjernost prijevozne ponude po

segmentima prikazuje Slika 60, tako da su odabrane zadnje četiri varijable iz korelacijske analize vremena putovanja i neravnomjernosti prijevozne ponude:

- udio sljedova manjih od 120 "/v (plavo)
- udio sljedova manjih od 60 "/v (narančasto)
- udio sljedova manjih od 30 "/v (crveno)
- prosječna postotna razlika između veće i manje vrijednosti sljedova (crno).



Slika 60. Vrijednosti odabranih nezavisnih varijabli za opisivanje neravnomjernosti prijevozne ponude

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Budući da prosječna postotna razlika između veće i manje vrijednosti slijeda vozila (koja nije pokazala značajnu korelaciju) ne promatra početak ili kraj, već samo postotnu promjenu vrijednosti od manje do veće vrijednosti slijeda, ona je pokazatelj velikih intenziteta promjena sljedova vozila, i po ponašanju ove krivulje očituju se segmenti po najvećoj promjeni vrijednosti vremena putovanja: Savska cesta gotovo do terminala Savski most zbog izraženih tokova ostalih vozila, segmenti od terminala Dubrava do Kvaternikovog trga zbog jakog utjecaja raskrižja, i segment prije terminala Dubec, zbog nedostatka kapaciteta terminala. U svim slučajevima je također izražena frekvencija voznog reda na segmentima.

Preostale tri veličine, udio sljedova manjih od 120, 60 i 30 sekundi po vozilu opisuju udio nagomilanih vozila (nije se pokazala značajna korelacija), te se sa slike vidi kako je međusoban odnos svih triju veličina vrlo sličan, te je izrazit porast svih triju veličina s frekvencijom vozila, odnosno sa smanjenjem slijeda vozila prema voznom redu. Najveće vrijednosti su na segmentima s najvećom frekvencijom u oba smjera između Studentskog centra i Vodnikove, te između Kvaternikovog trga i Dubrave.

Detaljnije ponašanje vrijednosti nezavisnih varijabli za sve segmente prikazano je u prilogima (Prilog 31 – Prilog 60). Na gornjem dijagramu prikazane su na osi apscisa vrijednosti slijeda od nula do devet minuta po vozilu, a na osi ordinata percentil uzorka. Vrijednosti su prikazane kumulativno od manje prema većoj vrijednosti. Plavom bojom su označene vrijednosti početnog (ulaznog) slijeda u segment, a crvenom završnog (izlaznog) slijeda iz segmenta za sve linije koje prometuju tim segmentom. Crnom bojom je označena vrijednost slijeda na segmentu zadanog voznim redom, a ružičastom vrijednost prosječnog zabilježenog slijeda na segmentu. Prosječna vrijednost slijeda je uvijek veća u odnosu na vrijednost zadanu voznim redom, no ne premašuje vrijednost od 5 % slijeda zadanog voznim redom (iako je s porastom vrijednosti slijeda razmak između vrijednosti veći), osim na segmentu 30 (Prilog 60), gdje je bila 7 % jer su se vozači zaustavljali prije stajališta za izlaz putnika zbog autobusa koji su iskrcavali putnike na terminalu u traku za tramvajski promet. Krivulje sljedova pokazuju dva različita obrasca:

- glatke krivulje, koje nastaju kada na rubu segmenta ne postoje semaforizirana raskrižja
- stepenaste krivulje, koje nastaju kada na rubu segmenata postoje semaforizirana raskrižja.

Razlog stvaranja stepenastih krivulja je činjenica što na semaforima postoji crvena faza, pa vozila mogu proći samo u zelenoj fazi, te u skladu s konstantnim ciklusom i konstantnim fazama u ciklusu, mjesta gdje krivulja naglo raste (gdje je gotovo vertikalna) su višekratnici trajanja ciklusa raskrižja. Krivulje imaju jače izražen stepenasti oblik ako je udio zelene faze u ciklusu manji, frekvencija vozila veća, i ako postoji stajalište ispred semaforiziranog raskrižja na kraju segmenta pa vozila prolaze raskrižjem u koncentriranim vremenskim razmacima (primjerice, kraj segmenta 11 – Prilog 41, na kojemu je nagomilavanje vozila jako izraženo te vozači ne smiju prijeći preko prethodnog raskrižja ako se na stajalištu nalazi tramvaj da ne bi zagušili tokove na tom raskrižju). Stepenasti oblik krivulja sljedova je češći u završnoj nego u početnoj vrijednosti slijeda na segmentu, jer se i početak i kraj segmenta najčešće nalaze odmah nakon semafora, pa vozila ulaze u segment češće u suprotnim fazama, a izlaze iz segmenta

češće u istoj fazi.

Na donjem dijagramu priloga prikazana je kumulativna postotna promjena završnog slijeda u odnosu na početnu vrijednost, tako da je na osi apscisa prikazana postotna promjena od polovine početne vrijednosti do dvostruke početne vrijednosti, a na osi ordinata kumulativni postotak uzorka. Svako pridruživanje plave točke crvenoj (povlačenje horizontalne linije između vrijednosti) pripada točno jednom vozilu. Crvena krivulja označava postotnu promjenu krajnjeg slijeda, a plava početnu vrijednost slijeda (promjena od nula posto), tako da:

- pozitivna vrijednost ukazuje na povećanje završnog slijeda u odnosu na početnu vrijednost
- negativna vrijednost ukazuje na smanjenje završnog slijeda u odnosu na početnu vrijednost.

Prema tome, što je izraženije približavanje crvene krivulje plavoj, to su odstupanja završnog slijeda u odnosu na početni u većem postotku bliža nuli. To je posebno izraženo na segmentima koji okružuju stajalište Draškovićeve (segment 10 – Prilog 40 i segment 21 – Prilog 51), jer granice segmenata se ne nalaze na semaforiziranim raskrižjima, pa je između polovine i dvostruke početne vrijednosti slijeda otprilike 95 % sljedova. Najizraženija odstupanja se nalaze na segmentu Studentski centar – Zagrepčanka (segment 27 – Prilog 57), na kojemu je između polovine i dvostruke vrijednosti početne vrijednosti na kraju segmenta ostalo samo 60 % sljedova, čineći segment najlošijim po pitanju nastupanja promjena uvjeta, što potvrđuje činjenicu da taj segment na cijelom uzorku ima najizraženiji utjecaj tokova ostalih vozila.

5.4 Vrijednosti nezavisnih varijabli

Iako su vrijednosti nezavisnih varijabli prikazane putem interkvartilnih raspona u poglavlju 4.3, za nezavisne varijable na kojima su se uspostavili modeli prikazat će se tablično i grafički ponašanje nezavisnih varijabli, da bi se dobilo uvid u mogućnost primjene modela na drugim mrežama linija javnog prijevoza.

Najvažnije pokazatelje nezavisnih varijabli modela prikazuje Tablica 23. Dolazi se do sljedećih zaključaka:

- iako je idealno vrijeme putovanja T u uzorku ispod pet minuta, što je malen uzorak ako se usporedi s mogućim vrijednostima idealnog vremena putovanja u jednom smjeru do sat vremena, model bi trebao biti u mogućnosti predvidjeti vrijeme putovanja bez obzira na duljinu segmenta, odnosno idealno vrijeme putovanja na njemu, jer se vrijednost recipročne vrijednosti idealnog vremena putovanja približava nuli na velikim segmentima; za razliku

od idealnog vremena putovanja, vrijednosti za p i f se dobivaju omjerima, odnosno prikazani su kao gustoće, no niti kod njih se ne javlja linearni rast s duljinom segmenta

- kada se usporede koeficijenti nezavisnih varijabli između modela, smisleno je da vrijednosti rastu na relaciji od $v_{50/10}$ preko $v_{50/T}$ do $v_{90/T}$, jer bi i vremena putovanja trebala biti u takvom odnosu
- minimum vrijednosti od p i f je isti (nula), pa ako se usporede umnošci maksimuma (raspona) s koeficijentima modela, dobiju se slične vrijednosti (u slučaju $v_{50/T}$ $116\% \cdot 69\%$ je 6% veće od $215\% \cdot 35\%$, a u slučaju $v_{90/T}$ $176\% \cdot 69\%$ je 9% manje od $378\% \cdot 35\%$) – drugim riječima, vrijednosti umnoška koeficijenta i vrijednosti nezavisnih varijabli imaju slične raspone za p i f
- iako nije bitno ispitivanje normalnosti nezavisnih varijabli, navode se pokazatelji asimetričnosti, spljoštenosti, testa Kolmogorov-Smirnov i testa Shapiro-Wilk, iz kojih se vidi kako je razdioba od p normalna, dok normalnost od T^{-1} nije potvrđena u 50 % testova, a od f u 75 % testova.

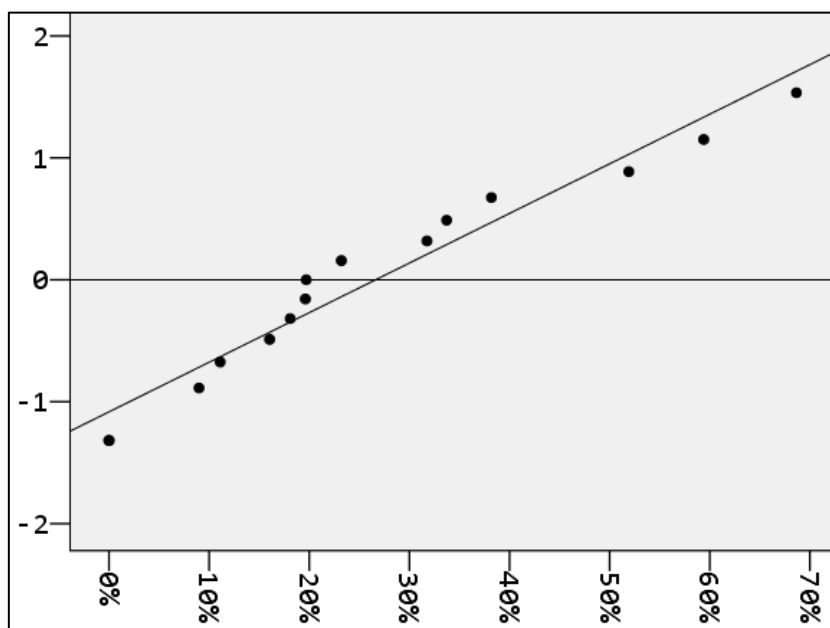
Tablica 23. Pokazatelji nezavisnih varijabli modela

pokazatelj	p	T^{-1}	f
koeficijent modela $v_{50/T}$	+116%	ne	+215%
koeficijent modela $v_{50/10}$	+54%	+13%'	ne
koeficijent modela $v_{90/T}$	+176%	ne	+378%
aritmetička sredina	27%	64%/'	9%
standardna pogreška	5%	12%/'	2%
medijan	20%	51%/'	9%
standardna devijacija	21%	46%/'	9%
minimum	0%	22%/'	0%
maksimum	69%	175%/'	35%
raspon	69%	152%/'	35%
interkvartilni raspon	27%	76%/'	12%
test SKW: apsolutni omjer	1,2	2,0	2,8
test KRT: apsolutni omjer	0,2	0,7	3,1
test K-S: vrijednost	20%	12%	20%
test S-W: vrijednost	31%	2%	1%

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

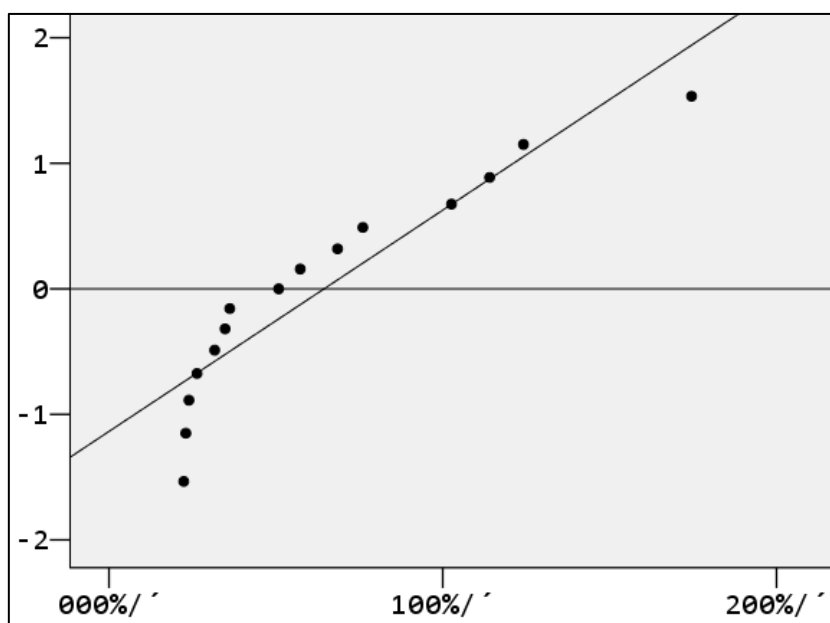
Ponašanje svih 15 vrijednosti nezavisnih varijabli prikazuju Slika 61 za p , Slika 62 za T^{-1} i Slika 63 za f . Na osi apscisa se nalaze vrijednosti nezavisne varijable, a na osi ordinata odstupanje od aritmetičke sredine u standardnim devijacijama. Horizontalnom linijom je označena aritmetička sredina, a kosom linijom projicirane vrijednosti nezavisne varijable u slučaju normalne razdiobe. Stoga mjesto presijecanja dviju linija predstavlja aritmetičku

sredinu, s pripadajućom vrijednosti na osi apscisa.



Slika 61. Vrijednosti nezavisne varijable udjela ukupnog izgubljenog vremena na raskrižjima u idealnom vremenu putovanja

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

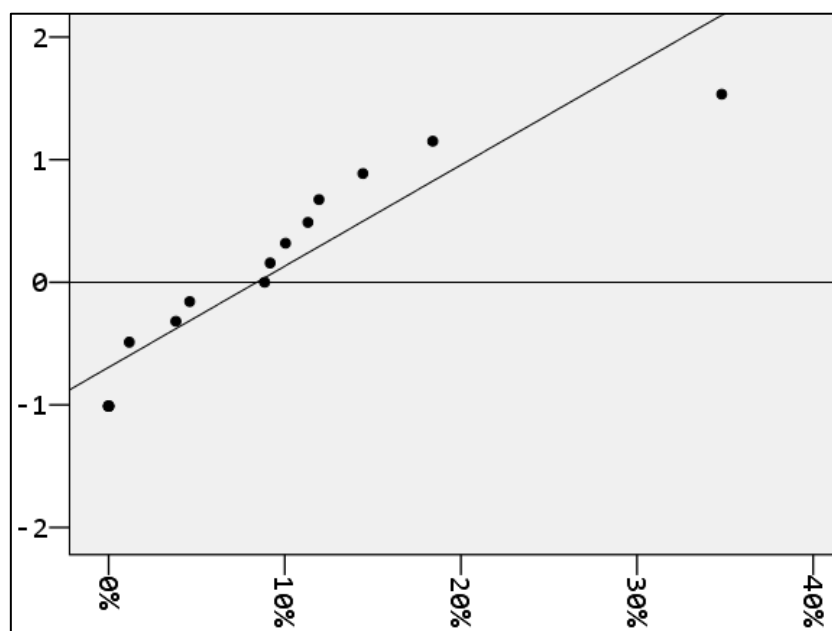


Slika 62. Vrijednosti nezavisne varijable recipročnog idealnog vremena putovanja na segmentu

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

U slučaju udjela ukupnog izgubljenog vremena na raskrižjima u idealnom vremenu putovanja, na dijagramu se može uočiti da se stvarne vrijednosti kreću oko projiciranih, što potvrđuje normalnost razdiobe varijable. U slučaju recipročnog idealnog vremena putovanja na segmentu, znatna odstupanja se javljaju kada se vrijednost približava nuli, odnosno kada je idealno vrijeme putovanja dugotrajno (dugački segmenti). Glede vremenskog udjela odsječaka s kritičnim tokovima ostalih vozila na segmentu, vidi se da odstupanje od normalne razdiobe

generira jedan uzorak s vrijednošću između 30 % i 40 %.



Slika 63. Vrijednosti nezavisne varijable vremenskog udjela odsječka s kritičnim tokovima ostalih vozila na segmentu

Izvor: autor uz korištenje programa IBM SPSS Statistics 23 [118]

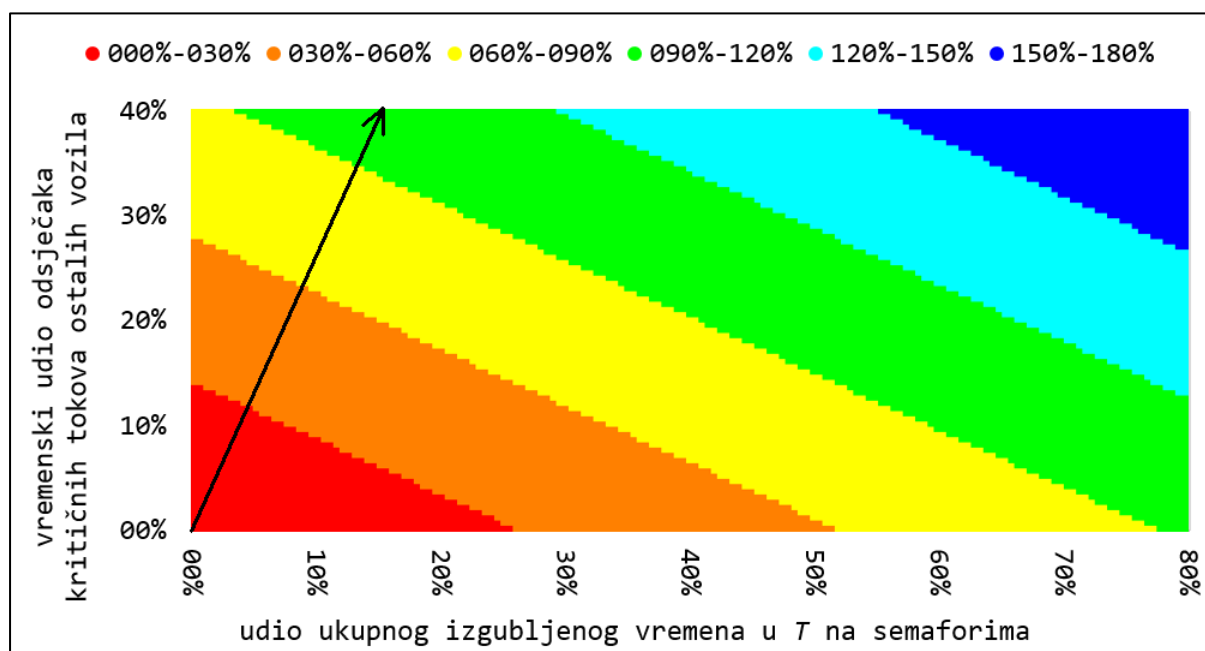
5.5 Vrijednosti zavisnih varijabli

Nakon prikaza kretanja vrijednosti nezavisnih varijabli u, prikazuje se kretanje vrijednosti modeliranih zavisnih varijabli, da bi se ispitalo je li smisleno kretanje vrijednosti za raspone nezavisnih varijabli tijekom modeliranja. Pri tome se neće promatrati modelirano odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od idealnog, već će se promatrati odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od medijalnog vremena putovanja za kasnija vozila.

Budući da je svaka od zavisnih varijabli u sva tri modela funkcija točno dviju nezavisnih varijabli, moguće je prikazati grafički dvije nezavisne varijable na osi apscisa i ordinata, te bojama označiti vrijednosti zavisne varijable. Također se u jednadžbama vidi da je udio ukupnog izgubljenog vremena u idealnom vremenu putovanja na semaforima jedna od nezavisnih varijabli, pa će se ona na slikama prikazati na osi apscisa, radi usporedbe. Da bi se vidjelo ponašanje vrijednosti zavisne varijable, vrijednosti su podijeljene u kategorije od 30 % u svim dijagramima, te postoji maksimalno šest kategorija, označenih bojama od crvene za najniže vrijednosti do plave za najviše vrijednosti.

Ponašanje varijabilnosti medijalnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja prikazuje Slika 64. Odstupanje medijalnog vremena putovanja od idealnog, u usporedbi s druge dvije zavisne varijable, ima najširi raspon vrijednosti koji može dosegnuti i 180 %, pri

vrijednostima od 80 % za p i 40 % za f , odnosno u tom slučaju je medijalno vrijeme putovanja 2,8 puta veće od idealnog. Prema položaju boja na slici, vidi se da je najveći rast zavisne varijable u slučaju kada porast od 10 % za p okvirno odgovara porastu od f za 25 %, odnosno p je dominantna nezavisna varijabla, jer ima dvostruko jači utjecaj na promjenu zavisne varijable od f . Valja napomenuti da teoretska maksimalna vrijednost od f može biti 100 %, dok p nema ograničenja, a vrijednost od 100 % ukazuje na to da se na semaforima prosječno gubi jednaka količina vremena koliko je idealno vrijeme putovanja na segmentu.



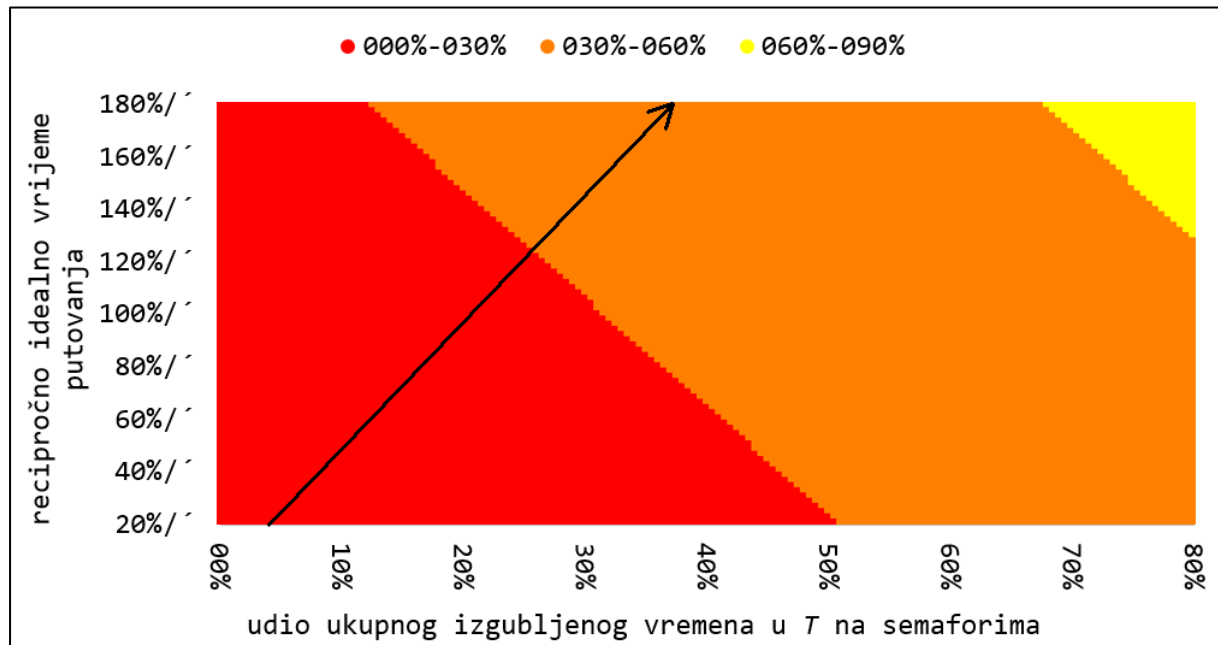
Slika 64. Vrijednosti modeliranog odstupanja medijalnog vremena putovanja od idealnog u ovisnosti o nezavisnim varijablama

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Ponašanje varijabilnosti medijalnog vremena putovanja u odnosu na deseti percentil vremena putovanja, odnosno ponašanje ranijih vozila prikazuje Slika 65. U modeliranom uzorku ono može biti u najvećoj vrijednosti između 60 % i 90 %. Prema položaju boja na slici, vidi se da je najveći rast zavisne varijable u slučaju kada porast od 10 % za p okvirno odgovara porastu od T^{-1} za 50 %, odnosno p je dominantna nezavisna varijabla, jer ima okvirno šest puta izraženiji utjecaj od T^{-1} na promjenu zavisne varijable. Budući da teoretski ne postoji ograničenje idealnog vremena putovanja, njegova recipročna vrijednost može biti bilo gdje između nule i beskonačnosti (iako su vrijednosti jako blizu nule u ovom kontekstu besmislene), a vrijednost od 100 %/' označava vrijednost idealnog vremena putovanja od jedne minute.

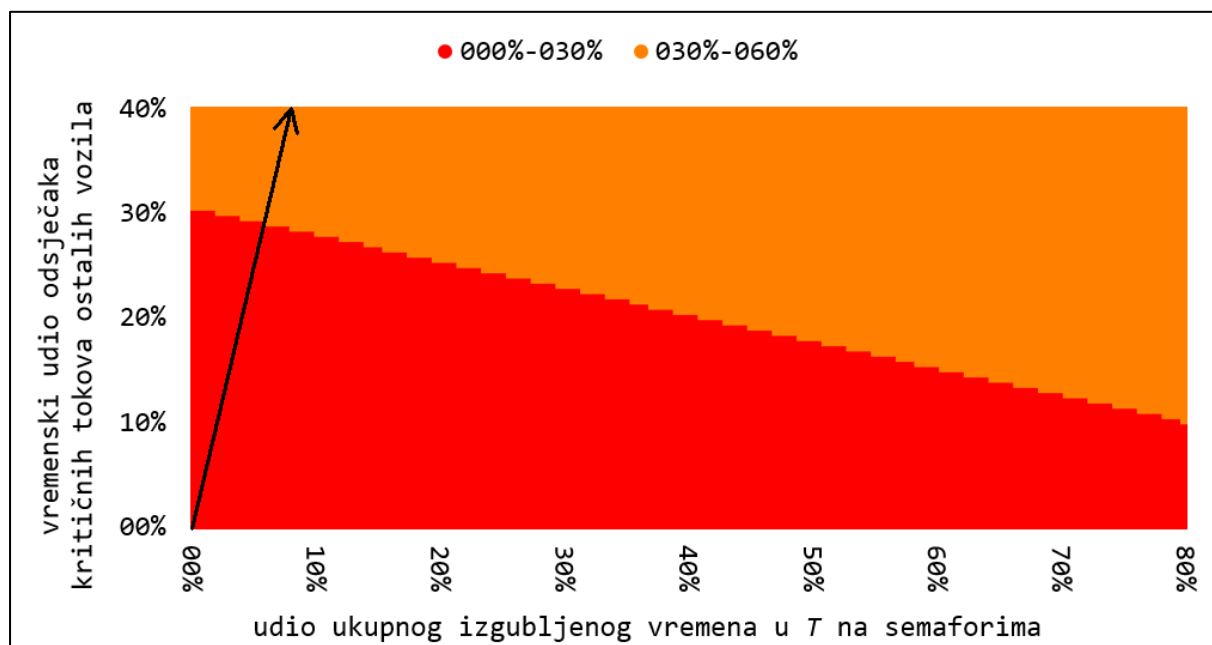
Ponašanje varijabilnosti devedesetog percentila vremena putovanja u odnosu na medijalno vrijeme putovanja, odnosno ponašanje kasnijih vozila prikazuje Slika 66. Vidi se da, unatoč

racionalnoj funkciji, ponašanje je vrlo slično ponašanju ranijih putovanja, a rasponi su u definiranim domenama nezavisnih varijabli maksimalno od 30 % do 60 % i ponašaju se linearno. U ovom slučaju, povećanju od p za 10 % okvirno odgovara povećanje od f za 50 %, odnosno p je dominantna nezavisna varijabla, i nema teoretskog ograničenja za razliku od f .



Slika 65. Vrijednosti modeliranog odstupanja medijalnog vremena putovanja u odnosu na deseti percentil u ovisnosti o nezavisnim varijablama

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]



Slika 66. Vrijednosti modelirane varijabilnosti devedesetog percentila vremena putovanja u odnosu na medijalno vrijeme putovanja u ovisnosti o nezavisnim varijablama

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

6 VALIDACIJA MODELA

Validacija modela izvršit će se na drugoj polovici uzorka, odnosno 15 segmenata na smjeru Savski most – Dubec, tako da se uspoređuju veličine apsolutnog karaktera – vremena putovanja, jer je u kontekstu optimalnog prijevoznog procesa i izrade optimalnog voznog reda potrebno usporediti modelirana vremena putovanja sa stvarnim vremenima putovanja. Korištenjem jednadžbi modela i jednadžbi za transformaciju veličina, vremena putovanja se mogu definirati putem veličina modela na sljedeći način:

- t_{50} iz $v_{50/T}$
- t_{10} iz $v_{50/10}$
- t_{90} iz $v_{90/10}$.

Prema definicijama, dobiju se jednadžbe vremena, koje su linearne funkcije u slučaju medijana i devedesetog percentila vremena putovanja jer se vrijednosti dobiju izravno iz varijabilnosti, dok je deseti percentil vremena putovanja racionalna funkcija, jer se izvodi kombinacijom $v_{50/10}$ i $v_{50/T}$:

$$t_{50} = T(1 + v_{50/T}) = T(1 + 1,16p + 2,15f) \quad (24)$$

$$t_{10} = T \frac{1 + v_{50/T}}{1 + v_{50/10}} = T \frac{1 + 1,16p + 2,15f}{1 + 0,54p + 0,13'T^{-1}} \quad (25)$$

$$t_{90} = T(1 + v_{50/T})(1 + v_{90/50}) = T(1 + 1,76p + 3,78f) \quad (26)$$

t_{50}	medijalno vrijeme putovanja
T	idealno vrijeme putovanja
$v_{50/T}$	odstupanje medijalnog vremena putovanja od idealnog
p	udio ukupnog izgubljenog vremena na raskrižjima u idealnom vremenu putovanja
f	vremenski udio odsječaka s kritičnim tokovima ostalih vozila u idealnom vremenu putovanja
t_{10}	deseti percentil vremena putovanja
$v_{50/10}$	odstupanje medijalnog vremena putovanja od desetog percentila
t_{90}	devedeseti percentil vremena putovanja
$v_{90/T}$	odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od idealnog

Izvor: autor

6.1 Metodologija validacije

Vrijeme putovanja je uvijek veće od nule, a može imati manje i veće vrijednosti, bez obzira na duljinu segmenta. Stoga je za validaciju modela optimalno korištenje pokazatelja koji su relativnog karaktera, odnosno pokazatelja koji stavljaju vremena u relativne odnose, pa se na taj način dobivaju postotci. Odabrano je pet pokazatelja, da bi se na temelju više metoda moglo

doći do konkretnog zaključka o prihvatljivosti modela.

Pokazatelj koji se razlikuje značajnije od preostala četiri je normirana srednja kvadratna pogreška (*NRMSE*), jer se dobiva kao uobičajena srednja kvadratna pogreška, zbrajanjem kvadrata razlika, no razlika je u tome što je ova varijanta prilagođena za relativna odstupanja tako da se dobivena vrijednost podijeli s razlikom stvarnog maksimuma i minimuma – rasponom uzorka.

Preostale četiri veličine su sličnog karaktera. Kod srednje apsolutne postotne pogreške (*MAPE*) i simetrične srednje apsolutne postotne pogreške (*SMAPE*), apsolutna vrijednost razlika stvarnih i modeliranih vrijednosti se dijeli s brojem uzoraka, a razlika je u vrijednosti s kojom se uspoređuje uzorak (stvarna ili prosjek stvarne i modelirane). Obje veličine imaju i težinske varijante (*WMAPE* i *WSMAPE*), gdje je razlika u tome što se razlike između stvarne i modelirane vrijednosti ne dijele s brojem uzoraka, već je on sadržan u zbroju prosjeka. Svih pet veličina definira se na sljedeći način:

$$NRMSE = \frac{1}{M_{MAX} - M_{MIN}} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (M_k - m_k)^2}{K}} \quad (27)$$

$$MAPE = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{|M_k - m_k|}{|M_k|} \quad (28)$$

$$WMAPE = \frac{\sum_{k=1}^K |M_k - m_k|}{\sum_{k=1}^K |M_k|} \quad (29)$$

$$SMAPE = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{|M_k - m_k|}{0,5 * (M_k + m_k)} \quad (30)$$

$$WSMAPE = \frac{\sum_{k=1}^K |M_k - m_k|}{\sum_{k=1}^K 0,5 * (M_k + m_k)} \quad (31)$$

<i>NRMSE</i>	normirana srednja kvadratna pogreška (eng. <i>normalized root mean square error</i>)
<i>M_{MAX}</i>	maksimalna stvarna vrijednost uzorka
<i>M_{MIN}</i>	minimalna stvarna vrijednost uzorka
<i>K</i>	broj uzoraka
<i>M_k</i>	stvarna <i>k</i> -ta vrijednost uzorka
<i>m_k</i>	modelirana <i>k</i> -ta vrijednost uzorka
<i>MAPE</i>	srednja apsolutna postotna pogreška (eng. <i>mean absolute percentage error</i>)
<i>WMAPE</i>	srednja težinska apsolutna postotna pogreška (eng. <i>weighted mean absolute percentage error</i>)
<i>SMAPE</i>	simetrična srednja apsolutna postotna pogreška (eng. <i>symmetric mean absolute percentage error</i>)
<i>WSMAPE</i>	simetrična srednja težinska apsolutna postotna pogreška (eng. <i>weighted symmetric mean absolute percentage error</i>)

Izvor: [119]

Navedene veličine za validaciju ukazuju na to da se greška modela može dogoditi i u

pozitivnom i u negativnom smjeru. Prema tome, očito je da će najveći problem biti u odstupanju desetog i devedesetog percentila vremena putovanja, jer se mora pretpostaviti pesimistički scenarij, u kojemu će se dogoditi odstupanje desetog percentila prema manjim vrijednostima i odstupanje devedesetog percentila prema većim vrijednostima. Iako je u ovom kontekstu medijalno vrijeme putovanja manji problem, što je veće njegovo odstupanje, to je prijevoznik manje siguran koliko se vozači prosječno odmaraju na odredišnom terminalu.

6.2 Određivanje minimalnog i maksimalnog vremena putovanja na temelju validacije modela

Nakon provedene validacije, dobivene realne i modelirane vrijednosti prikazuje Tablica 24. Radi lakše usporedbe, stupci su poredani po vrijednosti vremena putovanja: idealno – deseti percentil – medijan – devedeseti percentil. Uočava se da je devedeseti percentil vremena putovanja u stvarnosti jako velik u odnosu na modeliranu vrijednost za segment 15, jer se radi o zadnjem segmentu na smjeru Savski most – Dubec, gdje problem nastaje na terminalu na kojemu se nalaze dva tramvajska kolosijeka koja opslužuju tri linije, pa se gubi dodatno vrijeme prije samog zaustavljanja vozila na terminalu.

Tablica 24. Realne i modelirane vrijednosti vremena putovanja

segment	T (idealno)	T_{10} (stvarno)	t_{10} (model)	T_{50} (stvarno)	t_{50} (model)	T_{90} (stvarno)	t_{90} (model)
01 30 svms stdm	25"	23"	29"	50"	53"	1'27"	1'07"
02 30 stdm vjsn	2'17"	2'48"	2'51"	3'43"	3'34"	4'39"	4'20"
03 30 vjsn zgrp	1'51"	2'30"	2'38"	3'36"	3'26"	5'06"	4'25"
04 30 zgrp stcn	1'50"	1'43"	2'06"	2'05"	2'24"	2'52"	2'46"
05 30 stcn vdnk	50"	46"	50"	1'08"	1'05"	1'43"	1'13"
06 30 vdnk glkl	2'48"	2'59"	3'19"	3'44"	3'56"	4'47"	4'35"
07 30 glkl brnm	2'01"	2'14"	2'17"	2'57"	2'54"	3'56"	3'21"
08 30 brnm shrt	49"	42"	1'01"	1'04"	1'26"	1'52"	1'48"
09 30 shrt trhr	1'48"	1'44"	2'16"	2'25"	2'55"	3'43"	3'33"
10 30 trhr drsk	45"	43"	38"	50"	45"	1'06"	45"
11 30 drsk kvtg	3'34"	5'29"	5'08"	6'36"	6'11"	7'52"	7'51"
12 30 kvtg mksm	3'56"	4'55"	4'44"	6'07"	5'30"	6'46"	6'26"
13 30 mksm dbrv	3'42"	4'35"	4'46"	5'41"	5'23"	6'18"	6'28"
14 30 dbrv dnkv	4'16"	5'23"	5'01"	5'46"	5'40"	6'46"	6'30"
15 30 dnkv dubc	4'53"	5'48"	5'44"	6'35"	6'39"	9'03"	7'39"

Izvor: autor uz korištenje programa *Microsoft Excel* [113]

Dobivene vrijednosti validacije za sve tri vrijednosti vremena putovanja i sve metode validacije prikazuje Tablica 25. Budući da različite metode daju različite rezultate, uzela se aritmetička sredina vrijednosti svih pet metoda kao mjerodavna, da bi se eliminirala mogućnost krivo

interpretirane greške zbog pojedinačne metode. Glede medijana vremena putovanja, odstupanje od 7 % neće stvoriti problem s prometno-tehnološkog aspekta, no zbog te greške može doći do nesigurnosti oko prosječnog vremena odmora vozača na odredišnom terminalu.

Tablica 25. Dobivene vrijednosti validacije

vrijeme putovanja	<i>NRMSE</i>	<i>MAPE</i>	<i>WMAPE</i>	<i>SMAPE</i>	<i>WSMAPE</i>	aritmetička sredina
t_{50}	5%	9%	6%	8%	6%	7%
t_{10}	5%	12%	7%	11%	7%	9%
t_{90}	6%	11%	8%	12%	8%	9%

Izvor: autor uz korištenje programa *Microsoft Excel* [113]

Budući da validacija ne može odrediti u kojem je smjeru odstupanje kada se usporede realne i modelirane vrijednosti, prema rezultatima validacije, smisleno je:

- odrediti minimalno vrijeme putovanja za izradu voznog reda tako da bude barem deseti percentil vremena putovanja umanjen za 9 %
- odrediti maksimalno vrijeme putovanja za izradu voznog reda tako da bude barem devedeseti percentil vremena putovanja uvećan za 9 %.

Dobivene se vrijednosti mogu prikazati jednakžbama:

$$t_{MI} = t_{10} - 9\%t_{10} = 0,91t_{90} \quad (32)$$

$$t_{MA} = t_{90} + 9\%t_{90} = 1,09t_{90} \quad (33)$$

t_{MI}	minimalno vrijeme putovanja
t_{10}	deseti percentil vremena putovanja
t_{MA}	maksimalno vrijeme putovanja
t_{90}	devedeseti percentil vremena putovanja

Izvor: autor

6.3 Provjera ponašanja ekstremnih vrijednosti vremena putovanja

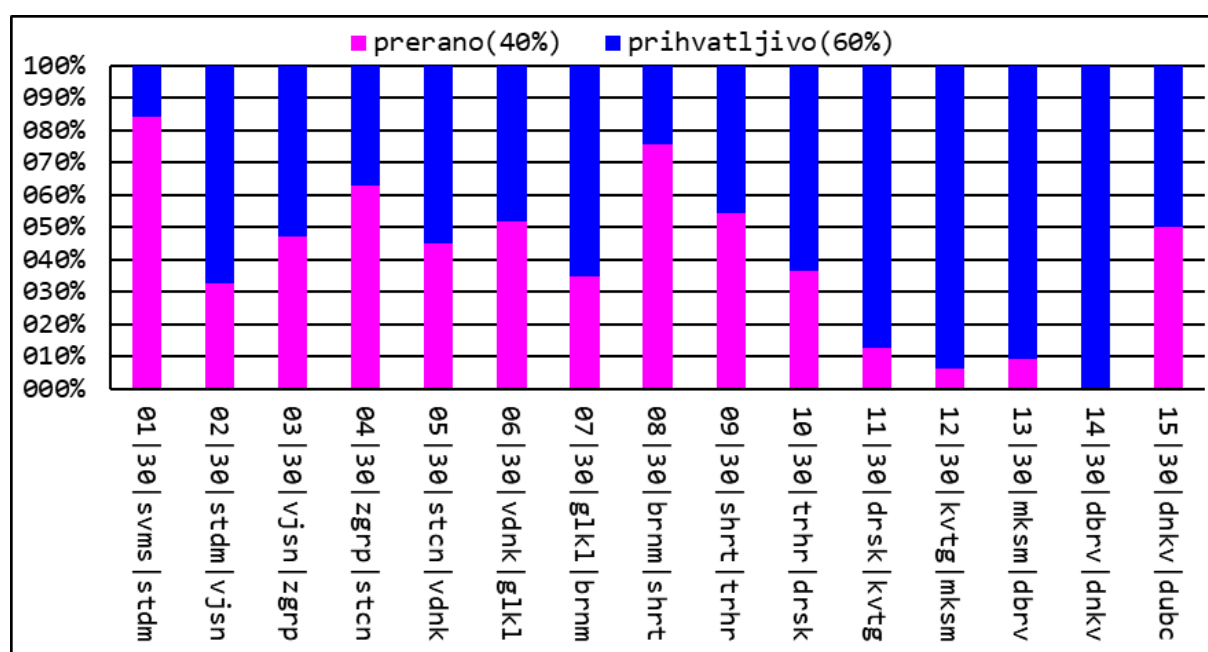
U uspostavljenom modelu, primjetno je sljedeće:

- modeliran je pedeseti percentil vremena putovanja, koji je idealan za iskazivanje srednjeg vremena putovanja, jer je prijevozniku u interesu poznavati vrijednost vremena putovanja onog vozila koje se našlo u sredini uzorka, a ne kolika je prosječna vrijednost vremena putovanja, budući da ona može stvoriti krivu sliku o vremenima putovanja zbog izvanrednih događaja
- za prikaz ekstremnih vrijednosti, modelirani su deseti i devedeseti percentil vremena putovanja, jer vrijednosti veće od devedesetog percentila (izvanredne situacije) i manje od

desetog percentila (nepoštivanje pravila) počnu se ubrzano povećavati odnosno ubrzano smanjivati, pa bi modeliranje tih veličina bilo nepouzdanost

- zbog situacija koje uzrokuju maksimalne i minimalne vrijednosti vremena putovanja, nemoguće je očekivati da će svako vozilo s dugim vremenom putovanja uspjeti krenuti na vrijeme s određeno terminala, te je također nemoguće očekivati da neće doći do zagušenja terminala za svako vozilo s malim vremenom putovanja; prihvatljivo bi bilo određivanje takvih vrijednosti minimalnog i maksimalnog vremena putovanja koje će zadovoljiti većinu uzorka, a ekstremna vozila će pričekati dok terminal ne bude slobodan ili će nadoknaditi zaostatak u vremenu u narednim vožnjama.

Prema tome, nakon validacije percentila vremena putovanja modela i određivanja vrijednosti minimuma i maksimuma, potrebno je na uzorku za validaciju izračunati koliki će udio validiranog uzorka biti unutar granica minimuma i maksimuma, odnosno koliko tramvaja će stići na zagašen terminal ili kasniti sa sljedećim polaskom. To će se učiniti tako da se na uzorku za validaciju izdvoje sve vrijednosti koje su ispod modeliranog desetog percentila, odnosno iznad modeliranog devedesetog percentila.



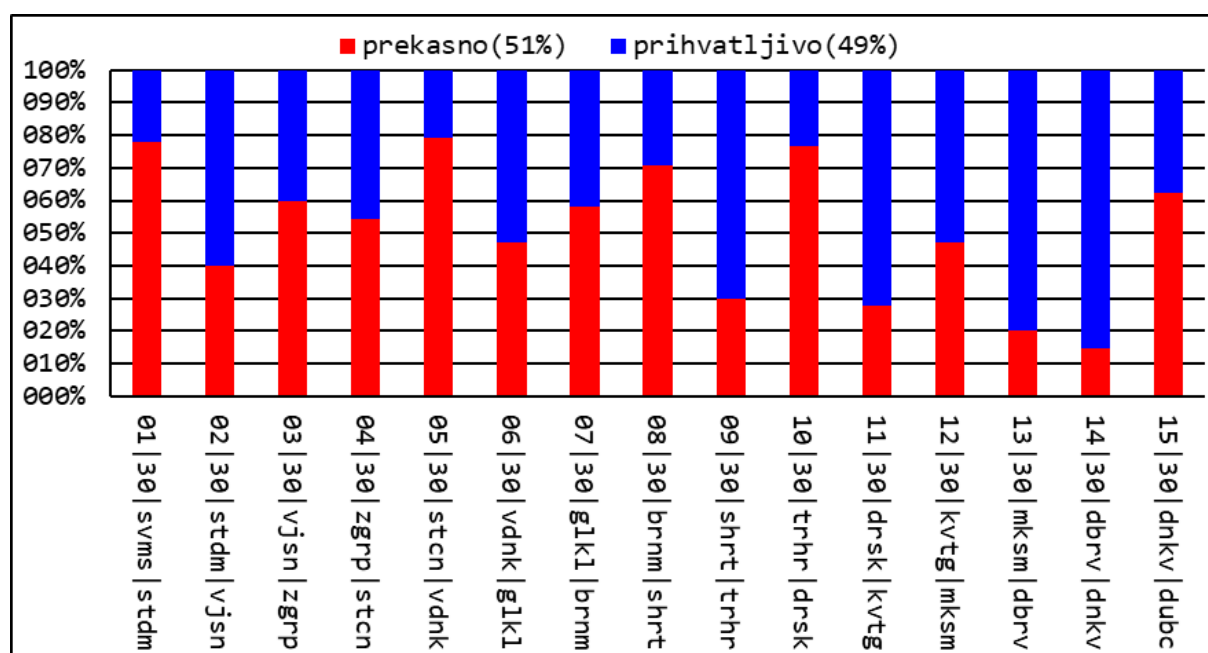
Slika 67. Udio vremena putovanja ispod minimuma određenog validacijom u uzorku vremena putovanja ispod desetog percentila

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Rezultati su prikazani po segmentima tako da se analizira samo uzorak vozila ispod desetog percentila vremena putovanja (Slika 67) i iznad devedesetog percentila (Slika 68). Ružičastom bojom su označena vremena ispod validiranog minimuma (prerano), crvenom bojom vremena iznad validiranog maksimuma (prekasno), a plavom bojom sva vremena koja su između

validiranog minimuma i desetog percentila, odnosno devedesetog percentila i maksimuma – prihvatljiva vremena. Dobiveno je:

- za smanjenje desetog percentila za 9 % dobiveno validacijom, ispod dobivenog minimuma ostalo je prosječno po segmentu 40 % vremena putovanja ispod desetog percentila vremena putovanja
- za povećanje devedesetog percentila za 9 % dobiveno validacijom, iznad dobivenog maksimuma ostalo je prosječno po segmentu 51 % vremena putovanja iznad devedesetog percentila.



Slika 68. Udio vremena putovanja iznad maksimuma određenog validacijom u uzorku vremena putovanja iznad devedesetog percentila

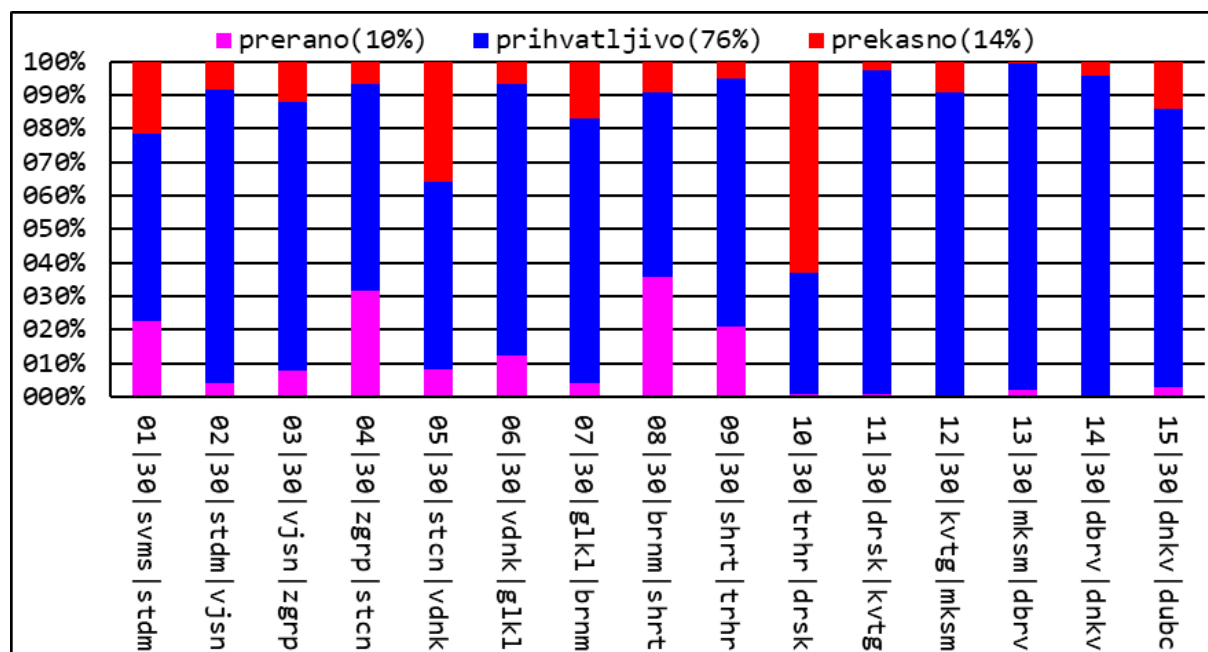
Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Prema tome, dobivene vrijednosti su prihvatljive jer nisu značajno prelazile polovinu uzorka vremena putovanja, pa će tako od svih vrijednosti vremena putovanja ispod desetog, odnosno iznad devedesetog percentila vremena putovanja, otprilike polovina biti unutar granica minimuma i maksimuma.

Osim na uzorku ispod desetog percentila i iznad devedesetog percentila, udio vremena ispod minimuma i iznad maksimuma prikazat će se uzimajući u obzir cijeli validirani uzorak, da bi se vidjelo koliki će biti udio kritičnih vozila u tom slučaju. Identično prethodnim slikama, ružičastom bojom su označena vremena ispod validiranog minimuma, crvenom bojom su označena vremena iznad validiranog maksimuma, a plavom bojom je u ovom slučaju obuhvaćen ostatak uzorka – od desetog percentila do devedesetog percentila. Rezultate

prikazuje Slika 69. Dobiveno je:

- za smanjenje desetog percentila za 9 % dobiveno validacijom, ispod dobivenog minimuma ostalo je prosječno po segmentu 10 % svih vremena putovanja
- za povećanje devedesetog percentila za 9 % dobiveno validacijom, iznad dobivenog maksimuma ostalo je prosječno po segmentu 14 % svih vremena putovanja.



Slika 69. Udio vremena putovanja ispod minimuma određenog validacijom i iznad maksimuma određenog validacijom u ukupnom uzorku vremena putovanja

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Prema tome, dobivene vrijednosti od 10 % i 14 % su, s obzirom na prikupljanje podataka u vršnom periodu, prihvatljive. Tako će okvirno svako deseto vozilo imati vrijeme putovanja ispod validiranog minimuma, a svako sedmo iznad validiranog maksimuma. Gledajući ukupno, svako četvrto vozilo u promatranom periodu imat će problema s preranim ili prekasnim dolaskom na terminal.

Sa prihvatljivošću validacije uzorka modela na drugom uzorku, prihvaća se hipoteza 1 o mogućnosti modeliranja vremena putovanja faktorima smetnji tako da su za svaki segment definirane četiri vrijednosti – idealno vrijeme putovanja, odstupanje medijalnog vremena putovanja od idealne vrijednosti, odstupanje medijalnog vremena putovanja od desetog percentila i odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od medijana.

7 TESTIRANJE MODELA IZMEĐU TERMINALA

Predstavljeni model vremena putovanja, koji je potom validiran, pokazao je da je prikladan za vremena putovanja na pojedinačnim segmentima. No u prijevoznom procesu zanimljivo je pitanje ukupnog vremena putovanja od terminala do terminala, te ostali parametri koji su potrebni za određivanje voznog reda linije, jer je potrebno težiti optimalnom voznom redu, u kojemu bi odnos vremena zadržavanja na odredišnom terminalu i vremena putovanja prema tom terminalu trebao biti idealan.

Ako se uzastopni segmenti spoje da bi se dobilo ukupno vrijeme putovanja na smjeru linije, ne postoje ograničenja jer bi vrijedilo za nezavisne varijable modela sljedeće:

- idealno vrijeme putovanja na više spojenih segmenata dobije se zbrajanjem pojedinačnih idealnih vremena
- ukupno izgubljeno vrijeme na raskrižjima na više spojenih segmenata dobije se zbrajanjem pojedinačnih izgubljenih vremena
- ukupno idealno vrijeme putovanja po kritičnim odsječcima na više spojenih segmenata dobije se zbrajanjem po pojedinim segmentima.

Parametri prijevoznog procesa odredit će se na uzorku za validaciju, odnosno smjeru Savski most – Dubec. Za čitav smjer, korištenjem jednadžbi (15) i (17) dobiva se:

$$p = \frac{09'47''}{35'46''} = 27\% \quad (34)$$

$$T^{-1} = (35'46'')^{-1} = 3\%/ ' \quad (35)$$

$$f = \frac{02'36''}{35'46''} = 7\% \quad (36)$$

p	udio ukupnog izgubljenog vremena na semaforiziranim raskrižjima u idealnom vremenu putovanja
f	vremenski udio odsječaka s kritičnim tokovima ostalih vozila u idealnom vremenu putovanja
T	idealno vrijeme putovanja

Izvor: autor

Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti u jednadžbe sva tri modela, dobije se:

$$v_{50/T} = 116\% * 27\% + 215\% * 7\% = 47\% \quad (37)$$

$$v_{50/10} = 54\% * 27\% + 13\% * 3\%/ ' = 15\% \quad (38)$$

$$v_{90/50} = \frac{60\% * 27\% + 163\% * 7\%}{100\% + 116\% * 27\% + 215\% * 7\%} = 19\% \quad (39)$$

$v_{50/T}$	odstupanje medijalnog vremena putovanja od idealnog
$v_{50/10}$	odstupanje medijalnog vremena putovanja od desetog percentila

$v_{90/50}$ | odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od medijalnog

Izvor: autor

Dakle, na smjeru Savski most – Dubec medijalno vrijeme putovanja je 47 % veće od idealnog vremena putovanja, dok se medijan udaljava od desetog percentila 15 % što je očekivano manje od udaljavanja devedesetog percentila od medijana od 19 %.

Na temelju modela i validacije, uvrštavanjem vrijednosti dobiju se sljedeći rezultati za karakteristične vrijednosti vremena putovanja:

$$t_{50} = T(1 + v_{50/T}) = 35'46''(1 + 47\%) = 52'42'' \quad (40)$$

$$t_{10} = 35'46'' \frac{1 + 47\%}{1 + 15\%} = 45'46'' \quad (41)$$

$$t_{90} = 35'46''(1 + 47\%)(1 + 19\%) = 62'48'' \quad (42)$$

$$t_{MI} = 0,91 * 45'46 = 41'48'' \quad (43)$$

$$t_{MA} = 1,09 * 62'48'' = 68'31'' \quad (44)$$

t_{50}	medijalno vrijeme putovanja
t_{10}	deseti percentil vremena putovanja
t_{90}	devedeseti percentil vremena putovanja
t_{MI}	minimalno vrijeme putovanja
t_{MA}	maksimalno vrijeme putovanja

Izvor: autor

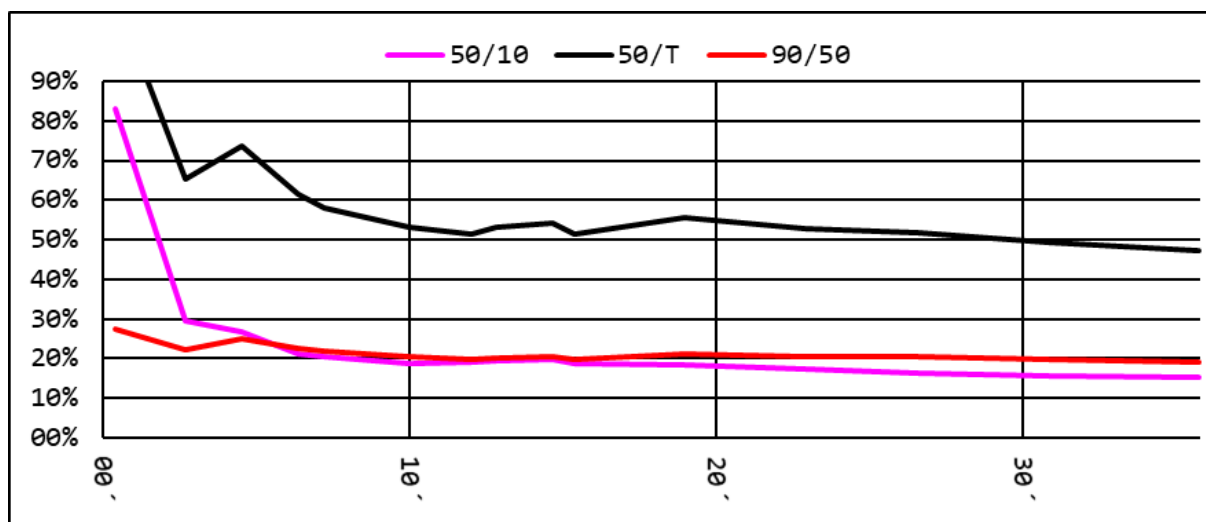
Prema službenim podacima ZET-a, za smjer Savski most – Dubec poznato je vrijeme putovanja od 52 ', što bi odgovaralo središnjoj vrijednosti u modeliranju od 52 ' 42 ". Glede vremena poluobrta, u vrijeme prikupljanja podataka službena vrijednost je bila 65 ', a maksimum vremena putovanja je 68 ' 31 ". Ako bi se na dobiveni maksimum dodala još jedna minuta koja uključuje izmjenu putnika na terminalu Dubec i minimalan odmor za vozača, dobiva se donja granica vremena poluobrta od 69 ' 31 ", te da je razlika stvarnog i modeliranog vremena poluobrta 4 ' 31 ", odnosno radi se o odstupanju od 5 %, što nije znatno odstupanje od stvarnosti, no usporedba s dobivenim maksimumom se ne može provesti, budući da nije poznat podatak koliko tramvaja ne uspijeva krenuti s terminala na vrijeme u stvarnosti u poslijepodnevnom vršnom periodu.

Ako se promotri slijed vozila, koji je iznosio u vrijeme prikupljanja podataka prosječno 9 ' 28 "/v, ako se slijed pomnoži s brojem perona na odredišnom terminalu, te se na to doda minimalno vrijeme putovanja, dobije se $2v * 9'28''/v + 41'48'' = 60'38''$, te bi to trebala biti gornja granica vremena poluobrta radi izbjegavanja zagušenja terminala. No očito je da je gornja granica manja od prethodno obrazložene donje granice. Zagušenje terminala se može izbjeći sporijom vožnjom, izbjegavajući prerani dolazak na terminal, a vozači tijekom vožnje

imaju evidenciju o odstupanju u odnosu na vozni red.

Osim izračuna vremena putovanja od terminala do terminala, odredit će se tri veličine koje opisuju varijabilnost i pet veličina vremena putovanja kumulativno od terminala Savski most do terminala Dubec, da bi se vidio trend ponašanja veličina s povećanjem duljine segmenta, tako da će se veličine usporediti s idealnim vremenom putovanja, koje je prikazano na osi apscisa.

Kumulativne veličine koje opisuju varijabilnost prema modelu prikazuje Slika 70. Vidi se da je $v_{50/T}$ uvijek veća od preostalih varijabilnosti bez obzira na duljinu segmenta, te se može konstatirati da nakon deset minuta idealnog vremena putovanja blago oscilira oko 50 %, ukazujući na potencijal povećanja postojeće brzine putovanja od 1,5 puta. Zbog malenog vremena putovanja, recipročna vrijednost postaje velika, pa zbog toga pri maloj kumulativnoj duljini $v_{50/10}$ naglo raste, no postaje stabilno s porastom idealnog vremena putovanja. Budući da je $v_{90/50}$ racionalna funkcija, ona nema nagli skok pri malim kumulativnim duljinama, no obje veličine se kreću u vrijednostima oko 20 %. Vrijednosti za kasnija vozila su veće od vrijednosti za ranija vozila, što je u skladu s asimetričnim razdiobama vremena putovanja. Za sve veličine, izgled slike poprima oblik hiperbole s koordinatnim osima kao asimptotama.



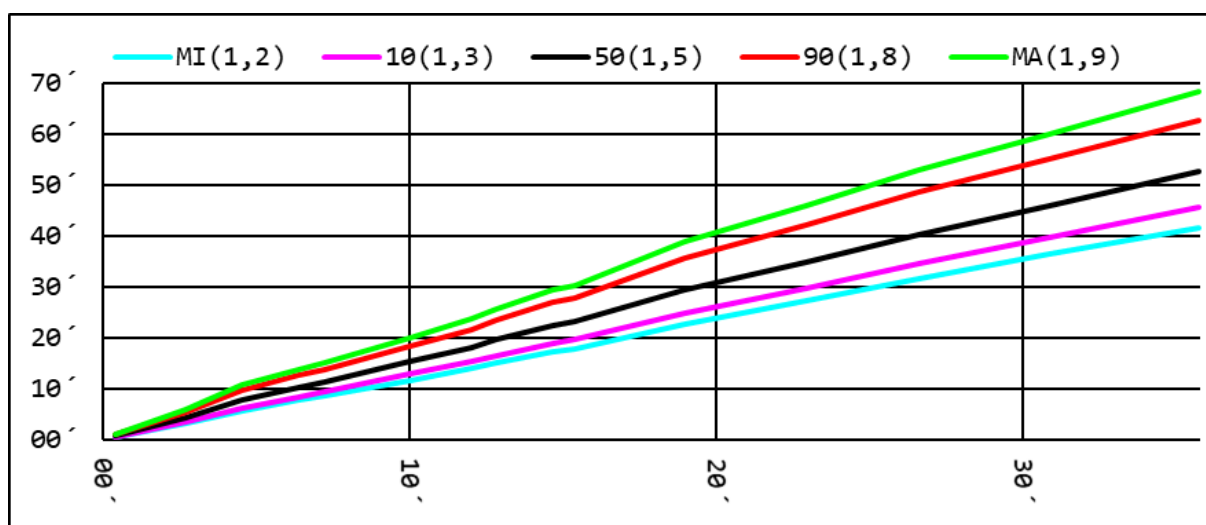
Slika 70. Kumulativno kretanje veličina odudaranja i varijabilnosti vremena putovanja od terminala Savski most do terminala Dubec prema modelu

Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Kumulativna vremena putovanja prema modelu prikazuje Slika 71, tako da je uz svako vrijeme putovanja prikazan omjer vrijednosti s idealnim vremenom putovanja na određenoj terminalu. Iz slike se vidi da se s povećanjem idealnog vremena putovanja modelirane vrijednosti (deseti percentil, medijan, devedeseti percentil) i vrijednosti određene validacijom

(minimum, maksimum) međusobno razdvajaju, odnosno standardna devijacija vremena putovanja raste s povećanjem idealnog vremena putovanja. Iako su na slici prikazane krivulje, slične su pravcima tako da:

- krivulja rasta medijalnog vremena putovanja je takva da je vrijednost otprilike 50 % veća od idealnog vremena putovanja (jer je odstupanje medijalnog vremena putovanja od idealnog toliko)
- krivulja rasta maksimuma je takva da je vrijednost otprilike dvostruko veća od idealnog vremena putovanja.



Slika 71. Kumulativno kretanje veličina vremena putovanja od terminala Savski most do terminala Dubec prema modelu

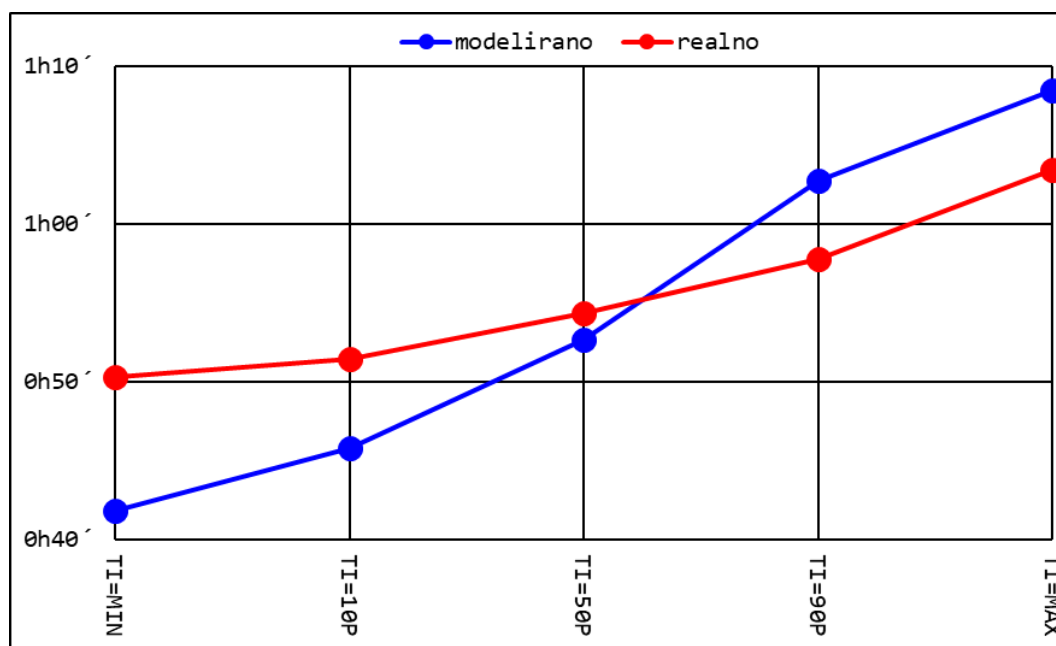
Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

Iako dobiveni podatci pokazuju vrijednosti vremena poluobrta na smjeru Savski most – Dubec unutar 5 % u usporedbi sa stvarnim vremenima poluobrta, radi osiguravanja optimalnog uzorka i konstantne frekvencije na segmentu, modeliranje se izvršilo na kratkim segmentima kojima je idealno vrijeme putovanja ispod pet minuta. Zbog toga postoji vjerojatnost pojave greške u modelu s povećanjem idealnog vremena putovanja, te bi vjerojatnost odstupanja stvarnih vrijednosti od modela bila najveća pri mjerenju vremena putovanja od terminala do terminala. Mogućnost pojave greške prikazuje Slika 72, gdje su za validirani uzorak uspoređene modelirane i realne vrijednosti vremena putovanja od terminala do terminala za minimum („TI=MIN“), deseti percentil („TI=10P“), medijan („TI=50P“), devedeseti percentil („TI=90P“) i maksimum („TI=MAX“) vremena putovanja.

Realni uzorak vremena putovanja se dobio tako da su se pronašli svi tramvaji na liniji 4 koji su uspjeli u šest dana prikupljanja podataka prijeći cijelu trasu od terminala Savski most do terminala Dubec. Budući da se radi o uobičajenom vremenu putovanja od skoro sat vremena,

cijelu trasu za vrijeme prikupljanja podataka uspjela su prijeći vozila koja su s terminala Savski most krenula otprilike između 15:00 i 16:00, budući da je period prikupljanja podataka uvijek bio od 15:00 do 17:00. Na taj način dobiveno je 36 uzoraka vremena putovanja od terminala do terminala u šest dana.

Iako os ordinata ne počinje s nulom radi kvalitete prikaza, pa se ne može vizualno interpretirati blizina realne crvene krivulje plavoj modeliranoj krivulji, iz vrijednosti se može zaključiti da je razlika modeliranog i realnog minimuma osam minuta, a razlika između modeliranog i realnog maksimuma je pet minuta. Te vrijednosti su razmjerno velike i u apsolutnom i u relativnom smislu, što pokazuje da modelu opada preciznost na opisivanju rubnih vrijednosti vremena putovanja s porastom duljine segmenta ili idealnog vremena putovanja segmentom. S druge strane, razlika između modelirane medijalne vrijednosti vremena putovanja u odnosu na stvarnu vrijednost nije velika, stoga model može opisivati medijalno vrijeme putovanja s velikom preciznošću i na dugačkim segmentima.



Slika 72. Usporedba modeliranih i realnih vremena putovanja od terminala Savski most do terminala Dubec
Izvor: autor uz korištenje programa Microsoft Excel [113]

8 ZAKLJUČAK

Vrijeme putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu jedan je od ključnih faktora pouzdanosti usluge, kvalitete usluge i održivosti prometnog sustava u gradovima, jer izravno utječe na odluku putnika o korištenju javnoga gradskoga prijevoza kao alternative osobnom automobilu, osiguravajući modalnu preraspodjelu gradskih putovanja na javni gradski prijevoz. Osim putnika, vrijeme putovanja značajno je za prijevoznika, zbog stabilizacije prijevoznog procesa, smanjenja nagomilavanja vozila i učinkovitijeg voznog reda uz smanjenje troškova. Naposljetku, značajnost vremena putovanja za lokalnu zajednicu se očituje u smanjenju eksternih troškova, utjecaja na okoliš, zauzetosti prostora i potrošnje energije.

Dosadašnja istraživanja vremena putovanja su se najviše fokusirala na varijabilnost koja opisuje odstupanja vremena putovanja od srednje vrijednosti. No budući da u prometno-tehnološkom smislu vrijeme putovanja može imati idealnu vrijednost, u ovom istraživanju uvodi se novi pojam, odudaranje vremena putovanja, koje se definira kao odstupanje srednje vrijednosti vremena putovanja od idealne vrijednosti, da bi se dobio uvid u odnos stvarnog i teoretskog stanja, ukazujući na mogućnosti za poboljšanja.

Istraživanje razdiobe vremena putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu u prethodnim istraživanjima najčešće je rezultiralo normalnom ili log-normalnom razdiobom vremena putovanja, ovisno o promatranom razdoblju tijekom dana, promatranom vremenskom rasponu ili udaljenosti putovanja. Rezultati ovog istraživanja, u kojemu postoji samo jedno razdoblje promatranja tijekom dana, jedan promatrački period od dva sata, i samo kratki segmenti, pokazuju da se normalna razdioba javila samo u jednoj trećini ukupnog broja segmenata, a razlog za to je promatrački period od dva sata, u kojemu, iako su signalni planovi raskrižja i frekvencija vozila bili konstantni, prometni uvjeti nisu, već se utjecaj tokova vozila povećavao od početka prema kraju promatračkog razdoblja. Razdiobe su gotovo uvijek pokazivale asimetričnost nadesno, a spljoštenost je ukazivala na veću koncentriranost vrijednosti oko središnje vrijednosti za razliku od normalne razdiobe. Velike vrijednosti asimetričnosti i spljoštenosti uzorka se javljaju na najkraćim segmentima, ukazujući na to da pouzdanost pokazatelja vremena putovanja opada s duljinom segmenta ili idealnim vremenom putovanja na segmentu.

U prethodnim istraživanjima vrijeme putovanja se opisivalo preko uobičajenih opisnih statističkih veličina – prosjeka, standardne devijacije, medijalnih vrijednosti te vrijednosti

rubnih percentila. Nadalje, varijabilnost vremena putovanja obično se opisuje omjerima navedenih veličina pa se dobiju koeficijent varijacije i omjeri razlika percentila. Za razliku od prethodnih istraživanja, rezultati ovog istraživanja nastali su na temelju usporedbe s idealnim umjesto prosječnog vremena putovanja, i sukladno prethodnim istraživanjima, pokazano je da standardna devijacija vremena putovanja raste s idealnim vremenom putovanja, a koeficijent varijacije opada s porastom idealnog vremena putovanja, tako da na velikim vrijednostima vremena putovanja rast standardne devijacije postaje linearan, a koeficijent varijacije postiže ravnotežnu vrijednost od oko 20 % idealnog vremena putovanja. Rezultati ovog istraživanja u području opisnih statističkih veličina vremena putovanja su pokazali da su najbolje odstupanje medijalnog vremena putovanja od idealnog za opisivanje odudaranja, te odstupanje medijalnog vremena putovanja od desetog percentila i odstupanje devedesetog percentila u odnosu na pedeseti percentil, za opisivanje varijabilnosti. Za dobivanje vremena putovanja na temelju navedenih veličina, dobiveno je da su najbolje veličine za opisivanje deseti percentil vremena putovanja, medijalno vrijeme putovanja i devedeseti percentil vremena putovanja.

U masovnom javnom gradskom prijevozu karakterističan je nagli razvoj inteligentnih transportnih sustava u zadnjim desetljećima, koji su omogućili, osim mjerenja vremena putovanja i broja putnika, i razne mjere za smanjenje odudaranja i varijabilnosti vremena putovanja na operativnoj razini koje se mogu kategorizirati u dvije skupine – prioritet javnoga gradskoga prijevoza i zadržavanje vozila. Prethodna istraživanja pokazala su da prioritet javnog prijevoza može znatno smanjiti odudaranje i varijabilnost vremena putovanja. I iako je zadržavanje vozila mjera koja povećava vrijeme putovanja, istraživanja su pokazala da postoje situacije u kojima zadržavanje vozila u konačnici smanjuje vrijeme putovanja jer se smanjuje neravnomjernost slijeda vozila. Zbog nepostojanja sustavnog rada na operativnom prioritetu tramvajskog prometa Zagreba, prikupljeni uzorak vremena putovanja je bio pogodan za provedbu ovakvog tipa istraživanja.

Budući da je često u javnom prijevozu odnos stvarnog i idealnog vremena putovanja nejasan, a dosadašnja istraživanja se većinom ne bave idealnim vremenom putovanja, u ovom istraživanju pristupilo se određivanju idealnog vremena putovanja putem otkrivanja uobičajenih obrazaca vožnji i zadržavanja na stajalištima na temelju ponašanja vozača, te uobičajenih ubrzanja i usporenja prema karakteristikama vozila. Opažanjima i mjerenjima u večernjim periodima pokazalo se da se ponašanje vozača i karakteristike vozila mogu upotrijebiti za definiciju konstantnih brzina u ovisnosti o radnji u mreži, te ubrzanja i usporenja u ovisnosti o performansama voznog parka. Na taj način mogu se dobiti precizni podatci o

idealnom vremenu putovanja kao osnovi za konstrukciju modela.

Prethodna istraživanja navode velik broj utjecajnih faktora smetnji na vrijeme putovanja, te ih kategoriziraju na nekoliko načina. Značajna je kategorizacija faktora smetnji na unutarnje i vanjske, jer ovisi o utjecaju prijevoznika. Unutarnji faktori smetnji su ponašanje vozača, ostala vozila javnog prijevoza, oblik infrastrukture, kvaliteta linija na mreži, kvaliteta voznog reda, vrata, unutarnji prostor vozila i dizajn stajališta. Vanjski faktori smetnji su ostali sudionici u prometu, meteorološki uvjeti, ponašanje putnika i neravnomjernost protoka putnika. Rezultati ovog istraživanja ukazali su na smislenost podjele utjecajnih faktora smetnji na poprečne (semaforizirana raskrižja, nesemaforizirani pješački prijelazi i stajališta) i uzdužne (frekvencija voznog reda i utjecaj tokova ostalih vozila), jer se podatci iste kategorije kao nezavisne varijable ponašaju slično. Nadalje, faktori smetnji se mogu lako i egzaktno kvantificirati, i imaju visoku razinu detaljnosti. Odabirale su se i nezavisne varijable koje opisuju kumulativni efekt više faktora smetnji, budući da se pretpostavlja mogućnost njegovog pojavljivanja u javnom gradskom prijevozu u uličnoj mreži. U ovom istraživanju, korelacijskom analizom utvrđeno je da kumulativni efekt nije bio značajan, te da na vrijeme putovanja utjecaj nemaju nesemaforizirani pješački prijelazi i frekvencija voznog reda, a znatan utjecaj imaju semaforizirana raskrižja, stajališta, idealno vrijeme putovanja, tokovi ostalih vozila i vremenski udjeli nesemaforiziranih pješačkih prijelaza i tramvajskih raskrižja.

Na temelju korelacijske analize, uspostavila su se tri prognostička modela vremena putovanja, te su se najboljima za modeliranje pokazali odstupanje medijalnog vremena putovanja od idealnog, odstupanje medijalnog vremena putovanja od desetog percentila, te odstupanje devedesetog percentila od idealnog vremena putovanja, iz kojeg se može izračunati odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od medijalnog transformacijom u racionalnu funkciju. Korištenjem višestruke linearne regresije postupcima biranja sprijeda, unatragnog isključivanja i postepenog biranja, eliminirane su varijable vremenskog udjela nesemaforiziranih pješačkih prijelaza, vremenskog udjela tramvajskih trakova, i prosječnog izgubljenog vremena na stajalištima, što je bilo očekivano. Dobiveno je da se zavisne varijable sva tri modela mogu opisati s tri nezavisne varijable – udjelom ukupnog izgubljenog vremena na semaforiziranim raskrižjima u idealnom vremenu putovanja, recipročnim idealnim vremenom putovanja i vremenskim udjelom odsječaka s kritičnim tokovima ostalih vozila. Korištenjem četiri testa, pokazala se opravdanost korištenja višestruke linearne regresije za uspostavu modela.

Radi dokazivanja istraživačke hipoteze 2, korelacijska analiza i uspostavljanje modela izvršilo se također između vremena putovanja i varijabli koje opisuju neravnomjernost prijevozne ponude, budući da su se iz uzorka, osim vremena, mogli izračunati i sljedovi vozila. Dobiveno je da jedina značajna korelacija postoji između odstupanja devedesetog percentila od medijalnog vremena putovanja i standardne devijacije stvarne frekvencije, odnosno njezinog povećanja u odnosu na vozni red. No uspostava modela višestrukom linearnom regresijom korištenjem tih varijabli pokazala je da varijable koje opisuju neravnomjernost prijevozne ponude nisu značajne za model, što odbacuje istraživačku hipotezu 2 – nije moguće utvrditi odnos između vremena putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu i neravnomjernosti prijevozne ponude.

Radi dokazivanja istraživačke hipoteze 1, nakon konstrukcije prognostičkog modela, pristupilo se validaciji modela. Korištenjem znanstvenih metoda za utvrđivanje grešaka relativnog karaktera, pokazalo se da je odstupanje modeliranog desetog i devedesetog percentila na validiranom uzorku u prosjeku 9 %, pa uzimajući u obzir nepreciznost modela, odredila su se minimalna i maksimalna vremena putovanja. Na temelju određenih minimuma i maksimuma iz validacije, pokazalo se da 10 % vozila ima vrijeme putovanja manje od minimuma, a 14 % vozila ima vrijeme putovanja veće od maksimuma. Zbog prihvatljivosti navedenih rezultata, validacija se pokazala prihvatljivom, te se na temelju toga se potvrđuje istraživačka hipoteza 1 – moguće je izraditi prognostički model vremena putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu na temelju faktora smetnji.

Radi provjere funkcioniranja modela na dugačkim segmentima, pristupilo se testiranju modela između terminala. Korištenjem rezultata iz validacije modela, izračunala su se vremena putovanja od terminala do terminala na uzorku odabranom za validaciju. U odnosu na vozni red aktualan u razdoblju prikupljanja podataka, pokazalo se da je za dugačke segmente model medijalnog vremena putovanja pogodan, dok modeli rubnih vrijednosti vremena putovanja nisu pogodni.

Prikazano istraživanje rezultiralo je novim znanstvenim spoznajama. Osim što je jedno od rijetkih istraživanja koje se bavi tramvajskim prometom, u istraživanju je stvarno vrijeme putovanja uspoređeno s idealnim vremenom putovanja kao reprezentantom kapaciteta sustava, te su u modelu obuhvaćeni prometni parametri mreže linija velike detaljnosti. Prema tome, ovo je novi prognostički model vremena putovanja u masovnom javnom gradskom prijevozu na temelju faktora smetnji za određivanje odudaranja i varijabilnosti vremena putovanja.

Za buduća istraživanja u masovnom javnom gradskom prijevozu putnika, predlaže se uspostava modela koji bi obuhvatio različite duljine segmenata, da bi se preciznije dobila informacija o ponašanju vremena putovanja s porastom idealnog vremena putovanja. Modeliranju idealnog vremena bi se trebalo pristupiti detaljnije, s ispitivanjem utjecaja ponašanja vozača, karakteristika vozila i ponašanja putnika. Budući da ovaj model nije bio u mogućnosti razdvojiti vožnje između stajališta i zadržavanja na stajalištima, predlaže se, u skladu s mogućnostima dobivanja podataka, zasebno modeliranje vožnji i zadržavanja na stajalištima radi poboljšanja preciznosti modela. Zbog nepravilnih razdioba vremena putovanja, potrebno je proširiti prikupljanje podataka na ostala razdoblja tijekom dana i proširiti promatračka razdoblja na kraća i duža, jer se može pokazati utjecaj drugih faktora s promjenom duljine promatračkog razdoblja i razdoblja tijekom dana. Iako se utjecaj tokova ostalih vozila pokazao kao bitna nezavisna varijabla sa značajnom ulogom u modelu, potrebno je preciznije kvantificirati utjecaj tokova ostalih vozila putem veličina za opisivanje prometnog toka.

LITERATURA

- [1] V. R. Vuchic, *Transportation for Livable Cities*, Routledge, 2017.
- [2] V. R. Vuchic, *Urban Transit: Operations, Planning, and Economics*, Wiley, 2005.
- [3] J. G. Strathman i J. R. Hopper, »Empirical analysis of bus transit on-time performance,« *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, svez. 27, br. 2, str. 93-100, 1993.
- [4] A. B. Kumar, L. Vanajakshi i S. C. Subramanian, »Bus travel time prediction using a time-space discretization approach,« *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, svez. 79, br. 1, str. 308-332, 2017.
- [5] C. P. Van Hinsbergen, J. W. Van Lint i F. M. Sanders, »Short-term traffic and travel time prediction models,« u *14th World Congress on Intelligent Transport Systems - ITS 2007*, Beijing, 2007.
- [6] R. Li i G. Rose, »Incorporating uncertainty into short-term travel time predictions,« *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, svez. 19, br. 6, str. 1006-1018, 2011.
- [7] Z. Ma, H. N. Koutsopoulos, L. Ferreira i M. Mesbah, »Estimation of trip travel time distribution using a generalized Markov chain approach,« *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, svez. 74, br. 1, str. 1-21, 2017.
- [8] Z. Yu, J. S. Wood i V. V. Gayah, »Using survival models to estimate bus travel times and associated uncertainties,« *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, svez. 74, br. 1, str. 366-382, 2017.
- [9] L. Moreira-Matias, J. Mendes-Moreira, J. F. de Sousa i J. Gama, »Improving mass transit operations by using AVL-based systems: A survey,« *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, svez. 16, br. 4, str. 1636-1653, 2015.
- [10] S. I. Chien, Y. Ding i C. Wei, »Dynamic bus arrival time prediction with artificial neural networks,« *Journal of Transportation Engineering*, svez. 128, br. 5, str. 429-438, 2002.
- [11] J. Haworth, J. Shawe-Taylor, T. Cheng i J. Wang, »Local online kernel ridge regression for forecasting of urban travel times,« *Transportation research part C: Emerging Technologies*, svez. 46, br. 1, str. 151-178, 2014.
- [12] Y. Kamarianakis, W. Shen i L. Wynter, »Real-time road traffic forecasting using regime-switching space-time models and adaptive LASSO,« *Applied stochastic models in business and industry*, svez. 28, br. 4, str. 297-315, 2012.
- [13] W. N. Venables i B. D. Ripley, *Modern Applied Statistics with S-PLUS*, New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- [14] T. Wolff i E. Ø. Lunde, *Travel Time Prediction-A Comparison Study on a common Data Set*, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2015.
- [15] B. Hamner, »Predicting travel times with context-dependent random forests by modeling local and aggregate traffic flow,« u *10th IEEE International Conference on Data Mining - ICDM 2010*, Sydney, 2010.
- [16] Y. Bin, Y. Zhongzhen i Y. Baozhen, »Bus arrival time prediction using support vector machines,« *Journal of Intelligent Transportation Systems*, svez. 10, br. 4, str. 151-158, 2006.
- [17] M. Chen, X. Liu, J. Xia i S. I. Chien, »A dynamic bus-arrival time prediction model based on APC data,« *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, svez. 19, br. 5, str. 364-376, 2004.
- [18] B. Yu, X. Song, F. Guan, Z. Yang i B. Yao, »k-Nearest neighbor model for multiple-time-step prediction of short-term traffic condition,« *Journal of Transportation Engineering*, svez. 142, br. 6, str. 04016018, 2016.
- [19] A. Shalaby i A. Farhan, »Prediction model of bus arrival and departure times using AVL and APC data,« *Journal of Public Transportation*, svez. 7, br. 1, str. 41-61, 2004.
- [20] G. Chen, X. Yang, J. An i D. Zhang, »Bus-arrival-time prediction models: Link-based and section-based,« *Journal of transportation engineering*, svez. 138, br. 1, str. 60-66, 2012.

- [21] Y. Kamarianakis i P. Prastacos, »Space-time modeling of traffic flow,« *Computers & Geosciences*, svez. 31, br. 2, str. 119-133, 2005.
- [22] S. V. Kumar, L. Vanajakshi i S. C. Subramanian, »Location-based data for estimated traffic on Urban arterial in heterogeneous traffic conditions,« *Transportation research record*, svez. 2239, br. 1, str. 16-22, 2011.
- [23] J. Wang, I. Tsapakis i C. Zhong, »A space-time delay neural network model for travel time prediction,« *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, svez. 52, br. 1, str. 145-160, 2016.
- [24] P. Kachroo, K. Ozbay i A. G. Hobeika, »Real-time travel time estimation using macroscopic traffic flow models,« u *4th IEEE Intelligent Transportation Systems - ITSC 2001*, Oakland, 2001.
- [25] J. Sau, N. E. El Faouzi, A. Ben Aissa i O. de Mouzon, »Particle filter-based real-time estimation and prediction of traffic conditions,« *Recent advances in stochastic modeling and data analysis*, str. 406-413, 2007.
- [26] D. B. Work, O. P. Tossavainen, S. Blandin, A. M. Bayen, T. Iwuchukwu i K. Tracton, »An ensemble Kalman filtering approach to highway traffic estimation using GPS enabled mobile devices,« u *47th IEEE Conference on Decision and Control - CDC 2008*, Cancún, 2008.
- [27] N. Van Oort, »Service Reliability and Urban Public Transport Design (PhD Thesis),« TRAIL Research School, Delft, 2011.
- [28] A. Ceder, *Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior*, Second Edition, Boca Raton: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2015.
- [29] European Commission, »White paper – European transport policy for 2010: time to decide,« 12 09 2001. [Mrežno]. Dostupno na: ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2001_white_paper_en. [Pokušaj pristupa 08 08 2020].
- [30] European Commission, »Green Paper - Towards a new culture for urban mobility,« 25 05 2007. [Mrežno]. Dostupno na: ec.europa.eu/transport/themes/urban/urban_mobility/green_paper_en. [Pokušaj pristupa 08 08 2020].
- [31] European Commission, »Action Plan on Urban Mobility,« 30 September 2009. [Mrežno]. Dostupno na: ec.europa.eu/transport/themes/urban/urban_mobility/action_plan_en. [Pokušaj pristupa 8 April 2019].
- [32] European Commission, »White paper 2011,« 28 March 2011. [Mrežno]. Dostupno na: ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2011_white_paper_en. [Pokušaj pristupa 08 08 2020].
- [33] European Commission, »Together towards competitive and resource-efficient urban mobility,« 17 12 2013. [Mrežno]. Dostupno na: ec.europa.eu/transport/themes/urban/urban-mobility/urban-mobility-package_en. [Pokušaj pristupa 08 08 2020].
- [34] A. Ceder i N. H. Wilson, »Bus network design,« *Transportation Research Part B: Methodological*, svez. 20, br. 4, str. 331-344, 1986.
- [35] P. Ryus, A. Danaher, M. Walker, F. Nichols, B. Carter, E. Ellis, L. Cherrington i A. Bruzzone, *Transit Capacity and Quality of Service Manual*, Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2013.
- [36] Transportation Research Board, *TCRP Report 47 - A Handbook for Measuring Customer Satisfaction and Service Quality*, Washington DC: National Academy Press, 1999.
- [37] European Committee for Standardization, *Transportation – Logistics and services – Public passenger transport – Service quality definition, targeting and measurement (EN 13816:2002)*, 2002.
- [38] D. Van Soest, M. Tight i C. D. Rogers, »Exploring the Distances People Walk to Access Public Transport,« *Transport Reviews*, svez. 1, br. 1, str. 1-23, 2019.
- [39] G. Štefančić, *Tehnologija gradskog prometa I*, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, 2008.
- [40] R. Daniels i C. Muley, »Explaining Walking Distance to Public Transport: The Dominance of Public Transport Supply,« *Journal of Transport and Land Use*, svez. 6, br. 2, str. 5-20, 2013.
- [41] D. Csikos i G. Currie, »Investigating consistency in transit passenger arrivals: insights from longitudinal automated fare collection data,« *Transportation Research Record*, svez. 2042, br. 1, str. 12-19, 2008.
- [42] M. Zhou, D. Wang, Q. Li, Y. Yue, W. Tu i R. Cao, »Impacts of weather on public transport ridership: Results from mining data from different sources,« *Transportation research part C: emerging technologies*, svez. 75, br. 1, str. 17-29, 2017.
- [43] M. Rahman, S. C. Wirasinghe i L. Kattan, »Users' views on current and future real-time bus information systems,« *Journal of advanced transportation*, svez. 47, br. 3, str. 336-354, 2013.

- [44] M. Rahman, S. C. Wirasinghe i L. Kattan, »The effect of time interval of bus location data on real-time bus arrival estimations,« *Transportmetrica A: Transport Science*, svez. 12, br. 8, str. 700-720, 2016.
- [45] C. Brakewood, S. Barbeau i K. Watkins, »An experiment evaluating the impacts of real-time transit information on bus riders in Tampa, Florida,« *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, svez. 69, br. 1, str. 409-422, 2014.
- [46] L. Tang i P. V. Thakuriah, »Ridership effects of real-time bus information system: A case study in the City of Chicago,« *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, svez. 22, br. 1, str. 146-161, 2012.
- [47] K. Dziekan i A. Vermeulen, »Psychological effects of and design preferences for real-time information displays,« *Journal of Public Transportation*, svez. 9, br. 1, str. 1-19, 2006.
- [48] F. Kurauchi, H. Shimamoto, Y. Ieda i M. Bell, »Evaluation of public transport connectivity reliability using capacity constrained transit assignment model,« u *Proceedings of the 2nd international Symposium on Transportation Network Reliability*, Christchurch, 2004.
- [49] R. Liu i S. Sinha, »Modelling Urban Bus Service and Passenger Reliability,« u *Proceedings of Instr 2007 conference*, The Hague, 2007.
- [50] Y. Tyrinopoulos i C. Antoniou, »Public transit user satisfaction: Variability and policy implications,« *Transport Policy*, svez. 15, br. 4, str. 260-272, 2008.
- [51] M. Slavulj, »Planiranje urbane mobilnosti mjerama upravljanja prijevoznom potražnjom (doktorska disertacija),« Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2013.
- [52] L. Sun, J. G. Jin, D.-H. Lee, K. Axhausen i A. Erath, »Demand-driven timetable design for metro services,« *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, svez. 46, br. 1, str. 284-299, 2014.
- [53] R. Banković, Javni gradski putnički prevoz, Beograd: Naučna knjiga, 1978.
- [54] K. Bartolović, »Izrada voznog reda na autobusnoj liniji 212 Dubec - Sesvete u Zagrebu (završni rad),« Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2020.
- [55] S. Tao, J. Corcoran, F. Rowe i M. Hickman, »To travel or not to travel: 'Weather' is the question. Modelling the effect of local weather conditions on bus ridership,« *Transportation research part C: emerging technologies*, svez. 86, br. 1, str. 147-167, 2018.
- [56] Z. Ma, L. Ferreira, M. Mesbah i S. Zhu, »Modeling distributions of travel time variability for bus operations,« *Journal of Advanced Transportation*, svez. 50, br. 1, str. 6-24, 2016.
- [57] E. Mazloumi, G. Currie i G. Rose, »Using GPS data to gain insight into public transport travel time variability,« *Journal of Transportation Engineering*, svez. 136, br. 7, str. 623-631, 2010.
- [58] A. J. Richardson i M. A. Taylor, »Travel time variability on commuter journeys,« *High Speed Ground Transportation Journal*, svez. 12, br. 1, str. 77-100, 1978.
- [59] W. C. Jordan i M. A. Turnquist, »Zone scheduling of bus routes to improve service reliability,« *Transportation science*, svez. 13, br. 3, str. 242-268, 1979.
- [60] M. A. Taylor, »Travel time variability—the case of two public modes,« *Transportation Science*, svez. 16, br. 4, str. 507-521, 1982.
- [61] N. Uno, F. Kurauchi, H. Tamura i I. Yasunori, »Using bus probe data for analysis of travel time variability,« *Journal of Intelligent Transportation Systems*, svez. 13, br. 1, str. 2-15, 2009.
- [62] Y. Xue, J. Jin, J. Lai i Y. D. Bin, »Empirical characteristics of transit travel time distribution for commuting routes,« Washington DC, 2011.
- [63] L. M. Kieu, A. Bhaskar i E. Chung, »Establishing definitions and modeling public transport travel time variability,« Washington DC, 2014.
- [64] M. Abkowitz, R. Josef, J. Tozzi i M. K. Driscoll, »Operational feasibility of timed transfer in transit systems,« *Journal of transportation engineering*, svez. 113, br. 2, str. 168-177, 1987.
- [65] S. C. Wirasinghe i G. Liu, »Determination of the number and locations of time points in transit schedule design—Case of a single run,« *Annals of Operations Research*, svez. 60, br. 1, str. 161-191, 1995.
- [66] M. M. Rahman, S. C. Wirasinghe i L. Kattan, »Analysis of bus travel time distributions for varying horizons and real-time applications,« *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, svez. 86, br. 1, str. 453-466, 2018.
- [67] E. Mazloumi, G. Currie i M. Sarvi, »Assessing measures of transit travel time variability and reliability using AVL data,« u *Transportation Research Board - 87th Annual Meeting*, Washington DC, 2008.

- [68] C. P. Ng i S. A. Brah, »A running time model for bus operations in Singapore,« *Road and Transport Research*, svez. 7, br. 3, str. 48-57, 1999.
- [69] E. Mazloumi, G. Currie i G. Rose, »Causes of travel time unreliability – a Melbourne case study,« u *31st Australasian Transport Research Forum - ATRF 2008*, Gold Coast, 2008.
- [70] J. Bates, J. Polak, P. Jones i A. Cook, »The valuation of reliability for personal travel,« *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, svez. 37, br. 2-3, str. 191-229, 2001.
- [71] R. B. Noland i J. W. Polak, »Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues,« *Transport reviews*, svez. 22, br. 1, str. 39-54, 2002.
- [72] P. G. Furth i T. H. Muller, »Service reliability and hidden waiting time: Insights from automatic vehicle location data,« *Transportation Research Record*, svez. 1955, br. 1, str. 79-87, 2006.
- [73] P. Furth i T. Muller, »Optimality conditions for public transport schedules with timepoint holding,« *Public Transport*, svez. 1, br. 1, str. 87-102, 2009.
- [74] R. Heap i T. Thomas, »The Modelling of Platooning Tendencies in Public Transport,« *Traffic Engineering & Control*, svez. 17, br. 819, str. 360-363, 1976.
- [75] C. Sun, G. Arr i R. P. Ramachandran, »Vehicle reidentification as method for deriving travel time and travel time distributions: Investigation,« *Transportation Research Record*, svez. 1826, br. 1, str. 25-30, 2003.
- [76] T. J. Kimpel, J. G. Strathman i S. Callas, »Improving scheduling through performance monitoring using AVL/APC data,« u *9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport - CASPT 2004*, San Diego, 2004.
- [77] *E/ECE/324 Regulation No. 36 - Uniform provisions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to their general construction*, 2008.
- [78] TŽV Gredelj, »Tramvajsko vozilo TMK 2200,« tzv-gredelj.hr, 29 05 2021. [Mrežno]. Dostupno na: tzv-gredelj.hr/site/tzv_tm_k_2200. [Pokušaj pristupa 29 05 2021].
- [79] Z. Li i D. A. Hensher, »Crowding in Public Transport: A Review of Objective and Subjective Measures,« *Journal of Public Transportation*, svez. 16, br. 2, str. 107-134, 2013.
- [80] M. Veiseth, N. Olsson i I. Saetermo, »Infrastructure's Influence On Rail Punctuality,« u *Proceedings of Urban Transport XII*, Coimbra, 2007.
- [81] Y. Du, F. Deng, F. Liao i Y. Ji, »Understanding the distribution characteristics of bus speed based on geocoded data,« *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, svez. 82, br. 1, str. 337-357, 2017.
- [82] A. M. Abdelfattah i A. M. Khan, »Models for predicting bus delays,« *Transportation Research Record*, svez. 1623, br. 1, str. 8-15, 1998.
- [83] M. D. Abkowitz i I. Engelstein, »Factors affecting running time on transit routes,« *Transportation Research Part A: General*, svez. 17, br. 2, str. 107-113, 1983.
- [84] B. P. Stermann i J. L. Schofer, »Factors affecting reliability of urban bus services,« *Journal of Transportation Engineering*, svez. 102, br. 1, str. 147-159, 1976.
- [85] H. S. Levinson, »Analyzing transit travel time performance,« *Transportation research record*, svez. 912, br. 1, str. 1-6, 1983.
- [86] M. Hofmann i M. O'Mahony, »The impact of adverse weather conditions on urban bus performance measures,« u *8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - ITSC 2005*, Vienna, 2005.
- [87] H. Tu, H. W. Van Lint i H. J. Van Zuylen, »Impact of adverse weather on travel time variability of freeway corridors,« u *Transportation Research Board 86th Annual Meeting*, Washington DC, 2007.
- [88] S. Elkosantini i S. Darmoul, »Intelligent Public Transportation Systems: A Review of Architectures and Enabling Technologies,« u *Proceedings of the 2013 International Conference on Advanced Logistics and Transport*, Sousse, 2013.
- [89] N. Hounsell, »Keeping buses moving: role of intelligent transport systems,« *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer*, svez. 157, br. 1, str. 55-60, 2004.
- [90] A. Nuzzolo i A. Comi, »Advanced public transport and intelligent transport systems: new modelling challenges,« *Transportmetrica A: Transport Science*, svez. 12, br. 8, str. 674-699, 2016.
- [91] M. Cracknell, J. McCarthy i D. Renaud, »Image detection in the real world, Intelligent Transportation,« u *ITS World Congress 2008*, New York, 2008.

- [92] N. Hounsell i F. McLeod, »Automatic Vehicle Location: Implementation, Application, and Benefits in the United Kingdom,« *Transportation REsearch Record*, svez. 1618, br. 1, str. 155-162, 1998.
- [93] B. Predić, D. Rančić, D. Stojanović i A. Milosavljević, »Automatic vehicle location in public bus transportation system,« u *Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on COMPUTERS*, Agios Nikolaos, 2007.
- [94] J. Adler i V. Blue, »Toward the design of intelligent traveler information systems,« *Transportation Research Part C: Emerging TEchnologies*, svez. 6, br. 3, str. 157-172, 1998.
- [95] MarketsandMarkets, »Automated Passenger Counting System Market – APC by Technology (Infrared, Stereoscopic Vision, Time-of-Flight), Application (Buses, Trains, Ferryboats), PIS by Systems, Application, and Geography - Global Forecast to 2022,« MarketsandMarkets, 11 12 2019. [Mrežno]. Dostupno na: [marketsandmarkets.com/Market-Reports/automatic-passenger-counting-information-system-market-17856390.html](https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/automatic-passenger-counting-information-system-market-17856390.html). [Pokušaj pristupa 26 07 2020].
- [96] I. Boudali, I. Ben Jaafar i K. Ghedira, »Distributed decision evaluation model in public transportation systems,« *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, svez. 21, br. 1, str. 419-429, 2008.
- [97] C. F. Daganzo, »A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analysis and comparisons,« *Transportation Research Part B: Methodological*, svez. 43, br. 10, str. 913-921, 2009.
- [98] P. Lizana, J. Muñoz, R. Giesen i F. Delgado, »Bus Control Strategy Application: Case Study of Santiago Transit System,« *Procedia Computer Science*, svez. 32, br. 1, str. 397-404, 2014.
- [99] D. Šojat, »Analiza prioriteta tramvajskog podsustava u gradu Zagrebu (diplomski rad),« Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2012.
- [100] I. Bošnjak, Inteligentni transportni sustavi 1, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti, 2006.
- [101] P. G. Furth i T. H. Muller, »Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service with Less Traffic Disruption,« *Transportation Research Record*, svez. 1731, br. 1, str. 23-30, 2000.
- [102] Grad Zagreb, »Statistički ljetopis Grada Zagreba 2020,« 31 12 2020. [Mrežno]. Dostupno na: zagreb.hr/statisticki-ljetopis-grada-zagreba/1044. [Pokušaj pristupa 28 08 2021].
- [103] Grad Zagreb, »Zagreb u brojkama,« zagreb.hr, 01 12 2020. [Mrežno]. Dostupno na: zagreb.hr/zagreb-u-brojkama/1045. [Pokušaj pristupa 06 06 2021].
- [104] Zagrebački električni tramvaj, »Usluge,« ZET, 27 07 2020. [Mrežno]. Dostupno na: zet.hr/usluge/7. [Pokušaj pristupa 27 07 2020].
- [105] Zagrebački električni tramvaj, »Poslovno izvješće tvrtke Zagrebački električni tramvaj d.o.o. I.-VI. 2020. godina,« 01 07 2020. [Mrežno]. Dostupno na: [zet.hr/UserDocsImages/Dokumenti i obrasci za preuzimanje/Poslovno izvješće ZET I-VI 2020.pdf.pdf](http://zet.hr/UserDocsImages/Dokumenti%20i%20obraci%20za%20preuzimanje/Poslovno%20izvješće%20ZET%20I-VI%202020.pdf.pdf). [Pokušaj pristupa 06 06 2021].
- [106] Zagrebački električni tramvaj, »Dnevne linije,« ZET, 29 04 2021. [Mrežno]. Dostupno na: zet.hr/tramvajski-prijevoz/dnevne-linije/249. [Pokušaj pristupa 29 04 2021].
- [107] D. Šojat, D. Brčić i M. Slavulj, »Analysis of transit service improvements in the City of Zagreb,« *Tehnički vjesnik – Technical Gazette*, svez. 24, br. 1, str. 217-223, 2017.
- [108] D. Brčić, M. Slavulj i D. Šojat, »The impact of public transport performance improvements on sustainable urban mobility,« u *3th International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2014*, Split, 2014.
- [109] L. Šimunović, D. Šojat, B. Radulović i Z. Plivelić, »An Estimation of Operating Speed Increase by Tram Signal Priority,« u *International Scientific Conference Science and Traffic Development - ZIRP 2018*, Opatija, 2018.
- [110] CIVITAS-ELAN, »Dodjela prioriteta tramvajima u Gradu Zagrebu,« CIVITAS-ELAN, 15 04 2018. [Mrežno]. Dostupno na: civitas.eu/content/elan. [Pokušaj pristupa 15 04 2018].
- [111] Srednja, »Zbog radova izmjene voznog reda ZET-a: Dvije tramvajske linije neće prometovati, a niz drugih mijenja trasu,« Srednja, 24 8 2017. [Mrežno]. Dostupno na: srednja.hr. [Pokušaj pristupa 26 7 2020].
- [112] Zakon.hr, »Zakon o radnom vremenu, obveznim odmorima mobilnih radnika i uređajima za bilježenje u cestovnom prijevozu,« 20 05 2017. [Mrežno]. Dostupno na: zakon.hr/z/247/Zakon-o-radnom-vremenu,-obveznim-odmorima-mobilnih-radnika-i-uređajima-za-bilježenje-u-cestovnom-prijevozu. [Pokušaj pristupa 02 06 2021].
- [113] Microsoft, »Microsoft Office,« Microsoft, 28 08 2021. [Mrežno]. Dostupno na: office.com. [Pokušaj pristupa 28 08 2021].

- [114] Wikipedija, »Javni gradski promet u Zagrebu,« 24 08 2021. [Mrežno]. Dostupno na: hr.wikipedia.org/wiki/Javni_gradski_promet_u_Zagrebu. [Pokušaj pristupa 26 08 2021].
- [115] S. Kelčec-Suhovec, J. Strukar, B. Karolina i S. Tantegl, »Studija intermodalnog putničkog terminala Sava-sjever,« CIVITAS-ELAN, Zagreb, 2010.
- [116] Ramboll A/S, Fakultet prometnih znanosti u Zagrebu, Urbanex d.o.o., Oikon d.o.o., »II. faza Master plana prometnog sustava Grada Zagreba, Zagrebačke županije i Krapinsko-Zagorske županije,« CONSULTANTS d.o.o. za menadžment, projektiranje, prostorno planiranje i stručni nadzor ugraditeljstvu, Dubrovnik, 2019.
- [117] Google Earth, »Earth Versions,« Google, 28 08 2021. [Mrežno]. Dostupno na: google.com/earth/versions/#earth-pro. [Pokušaj pristupa 28 08 2021].
- [118] IBM, »Downloading IBM SPSS Statistics 23,« IBM, 28 08 2021. [Mrežno]. Dostupno na: ibm.com/support/pages/node/581811. [Pokušaj pristupa 28 08 2021].
- [119] R. L. Ott i M. Longnecker, Statistical Methods & Data Analysis (Seventh Edition), Boston: Cengage Learning, 2015.
- [120] Statistics Solutions, »Assumptions of Multiple Linear Regression,« statisticssolutions.com, 01 01 2021. [Mrežno]. Dostupno na: statisticssolutions.com/assumptions-of-multiple-linear-regression/. [Pokušaj pristupa 08 05 2021].

POPIS SLIKA, TABLICA I PRILOGA

Slika 1. Dijagram toka istraživanja.....	9
Slika 2. Interakcije između elemenata prijevozne ponude i potražnje u javnom gradskom prijevozu	13
Slika 3. Detaljni prikaz vremena poluobrti i putovanja u jednom danu na primjeru autobusne linije	23
Slika 4. Primjer razdiobe vremena putovanja na liniji po razdobljima tijekom dana	25
Slika 5. Prikaz varijabilnosti vremena putovanja u ovisnosti o udaljenosti putovanja	28
Slika 6. Razlozi javljanja dodatnog vremena putovanja	30
Slika 7. Odnos zaštitnog vremena i dodatnog vremena putovanja	31
Slika 8. Ovisnost vremena čekanja na dolazak vozila o slijedu.....	32
Slika 9. Primjer vremenske razdiobe dolazaka putnika na stajalište kada je slijed vozila velik	33
Slika 10. Široka i uska stajanja površina tramvaja TMK 2200	35
Slika 11. Uzroci varijabilnosti vremena putovanja prema kriteriju utjecaja.....	39
Slika 12. Funkcionalne komponente AVL-a	44
Slika 13. Objašnjenje prioriteta vozila javnoga gradskoga prijevoza teoretskom i stvarnom krivuljom kretanja.....	47
Slika 14. Kontekst sustava upravljanja prioritetom javnoga gradskoga prijevoza prema FRAME arhitekturi sa smjerovima komunikacije između elemenata sustava	50
Slika 15. Kretanje vozila primjenom zadržavanja vozila zasnovanog na slijedu	53
Slika 16. Mreža tramvajskih linija Zagreba – shematski prikaz	56
Slika 17. Odnos prosječne stvarne i idealne brzine vožnje kao pokazatelj prioriteta	57
Slika 18. Putne informacije – zaslon na tramvajskom stajalištu	58
Slika 19. Tipovi tramvaja novijeg datuma: ČKD Tatra KT4 (gore lijevo), TMK 2100 (gore desno), TMK 2200 (dolje lijevo) i TMK 2300 (dolje desno).....	60
Slika 20. Niskopodni tramvaj TMK 2200 u Zagrebu – bokocrt (gore) i tlocrt (dolje)	61
Slika 21. Zauzetost vozila u ovisnosti o broju putnika u vozilu	62
Slika 22. Položaj tramvajske linije 4 u mreži tramvajskih linija Zagreba.....	64
Slika 23. Terminali tramvajske linije 4: Savski most (lijevo) i Dubec (desno)	65
Slika 24. Kritična stajališta na liniji po pitanju nagomilavanja vozila: Branimirova (lijevo) i Kvaternikov trg (desno).....	65
Slika 25. Dionice linije sa zanemarivim utjecajem tokova vozila – trakovi u suprotnom smjeru ili izdvojeni trakovi.....	67
Slika 26. Nepoštivanje žutih trakova kod stajališta Veslačka	67
Slika 27. Nepoštivanje žutih trakova zbog repa čekanja desnih skretača kod stajališta Vjesnik	68
Slika 28. Kumulativni efekt faktora smetnji – stajališta, traka za desno skretanje, semaforiziranog raskrižja i usporednih pješaka kod stajališta Kvaternikov trg	68
Slika 29. Parkirana vozila pored tramvajskog traka: na označenim parkirališnim mjestima kod stajališta Mašićeva (lijevo) i na neoznačenim površinama uz nepropisno parkiranje kod stajališta Prisavlje (desno).....	68
Slika 30. Kumulativni efekt smetnji pješaka na nesemaforiziranom pješačkom prijelazu i tokova ostalih vozila – Vlaška ulica	69
Slika 31. Semaforizirani pješački prijelaz u istoj fazi kao i tramvaji koji skreću desno, stajalište Vodnikova	69
Slika 32. Segmenti tramvajske linije 4 u gradskom tkivu Zagreba.....	72
Slika 33. Primjer konfiguracije promatračkog mjesta kod stajališta Zagrepčanka na granici segmenata 3 i 4, te 27 i 28.....	73
Slika 34. Mjerodavna brzina kod nesemaforiziranog pješačkog prijelaza, stajalište Botanički vrt	77
Slika 35. Mjerodavna brzina na skretnici, križanju i u zavoju, stajalište Kvaternikov trg.....	78
Slika 36. Prostorni udio tipova traka po segmentu	84
Slika 37. Stajalište Draškovićeva na segmentima 10 i 21.....	84
Slika 38. Kumulativna razdioba duljina odsječaka na liniji.....	85
Slika 39. Primjer određivanja odsječaka na granici segmenata 06 i 07 te 24 i 25 kod stajališta Glavni kolodvor	86
Slika 40. Raskrižje koordiniranog signalnog plana za nadolazeće lijeve skretače između stajališta Vodnikova i Studentski centar.....	88
Slika 41. Kvartilna razdioba odstupanja stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja	90

Slika 42. Vrijednosti relativnih veličina koje se uspoređuju s idealnim vremenom putovanja	92
Slika 43. Vrijednosti relativnih veličina koje se uspoređuju s medijanom ili prosjekom	93
Slika 44. Usporedba vrijednosti najpogodnijih veličina za opisivanje vremena putovanja	95
Slika 45. Ponašanje standardne devijacije vremena putovanja s porastom idealnog vremena putovanja	96
Slika 46. Ponašanje koeficijenta varijacije s porastom idealnog vremena putovanja	97
Slika 47. Rasponi vrijednosti odnosa ukupnog broja faktora smetnji i idealnog vremena putovanja	102
Slika 48. Rasponi vrijednosti udjela zbroja trajanja crvenih faza u idealnom vremenu putovanja	104
Slika 49. Raspon vrijednosti udjela zbroja omjera trajanja dvostruke crvene faze i ciklusa u idealnom vremenu putovanja segmentom	106
Slika 50. Udio zbroja omjera trajanja crvene i zelene faze u idealnom vremenu putovanja segmentom	107
Slika 51. Raspon vrijednosti udjela ukupnog izgubljenog vremena na poprečnim faktorima smetnji u idealnom vremenu putovanja segmentom	108
Slika 52. Rasponi vrijednosti duljine segmenta, idealnog vremena putovanja i idealne brzine putovanja	109
Slika 53. Frekvencija vozila na segmentima	110
Slika 54. Vremenski udio trakova na segmentu prema vrstama	112
Slika 55. Odsjeći s kritičnim prometnim tokom na liniji 4: u smjeru Savski most – Dubec (zeleno) i u smjeru Dubec – Savski most (žuto)	113
Slika 56. Raspon vrijednosti vremenskog udjela odsječaka s kritičnim tokom ostalih vozila na segmentu	114
Slika 57. Provjera konstantnosti varijance grafičkom metodom za odstupanje medijalnog vremena putovanja od idealnog	128
Slika 58. Provjera konstantnosti varijance grafičkom metodom za odstupanje medijalnog vremena putovanja od desetog percentila	128
Slika 59. Provjera konstantnosti varijance grafičkom metodom za odstupanje devedesetog percentila vremena putovanja od idealnog	129
Slika 60. Vrijednosti odabranih nezavisnih varijabli za opisivanje neravnomjernosti prijevozne ponude	131
Slika 61. Vrijednosti nezavisne varijable udjela ukupnog izgubljenog vremena na raskrižjima u idealnom vremenu putovanja	135
Slika 62. Vrijednosti nezavisne varijable recipročnog idealnog vremena putovanja na segmentu	135
Slika 63. Vrijednosti nezavisne varijable vremenskog udjela odsječaka s kritičnim tokovima ostalih vozila na segmentu	136
Slika 64. Vrijednosti modeliranog odstupanja medijalnog vremena putovanja od idealnog u ovisnosti o nezavisnim varijablama	137
Slika 65. Vrijednosti modeliranog odstupanja medijalnog vremena putovanja u odnosu na deseti percentil u ovisnosti o nezavisnim varijablama	138
Slika 66. Vrijednosti modelirane varijabilnosti devedesetog percentila vremena putovanja u odnosu na medijalno vrijeme putovanja u ovisnosti o nezavisnim varijablama	138
Slika 67. Udio vremena putovanja ispod minimuma određenog validacijom u uzorku vremena putovanja ispod desetog percentila	143
Slika 68. Udio vremena putovanja iznad maksimuma određenog validacijom u uzorku vremena putovanja iznad devedesetog percentila	144
Slika 69. Udio vremena putovanja ispod minimuma određenog validacijom i iznad maksimuma određenog validacijom u ukupnom uzorku vremena putovanja	145
Slika 70. Kumulativno kretanje veličina odudaranja i varijabilnosti vremena putovanja od terminala Savski most do terminala Dubec prema modelu	148
Slika 71. Kumulativno kretanje veličina vremena putovanja od terminala Savski most do terminala Dubec prema modelu	149
Slika 72. Usporedba modeliranih i realnih vremena putovanja od terminala Savski most do terminala Dubec	150
Tablica 1. Karakteristike triju razina upravljanja u javnom gradskom prijevozu	14
Tablica 2. Dojam zauzetosti vozila za putnike	36
Tablica 3. Karakteristike dnevnih tramvajskih linija, radni dan, studeni 2020., poslijepodnevni vršni period	59
Tablica 4. Karakteristike tramvajskog voznog parka	59
Tablica 5. Karakteristike segmenata tramvajske linije 4 za vrijeme prikupljanja podataka	70
Tablica 6. Odabrani pokazatelji vremena putovanja apsolutnog karaktera u minutama	74
Tablica 7. Odabrani pokazatelji vremena putovanja relativnog karaktera u postotcima	74

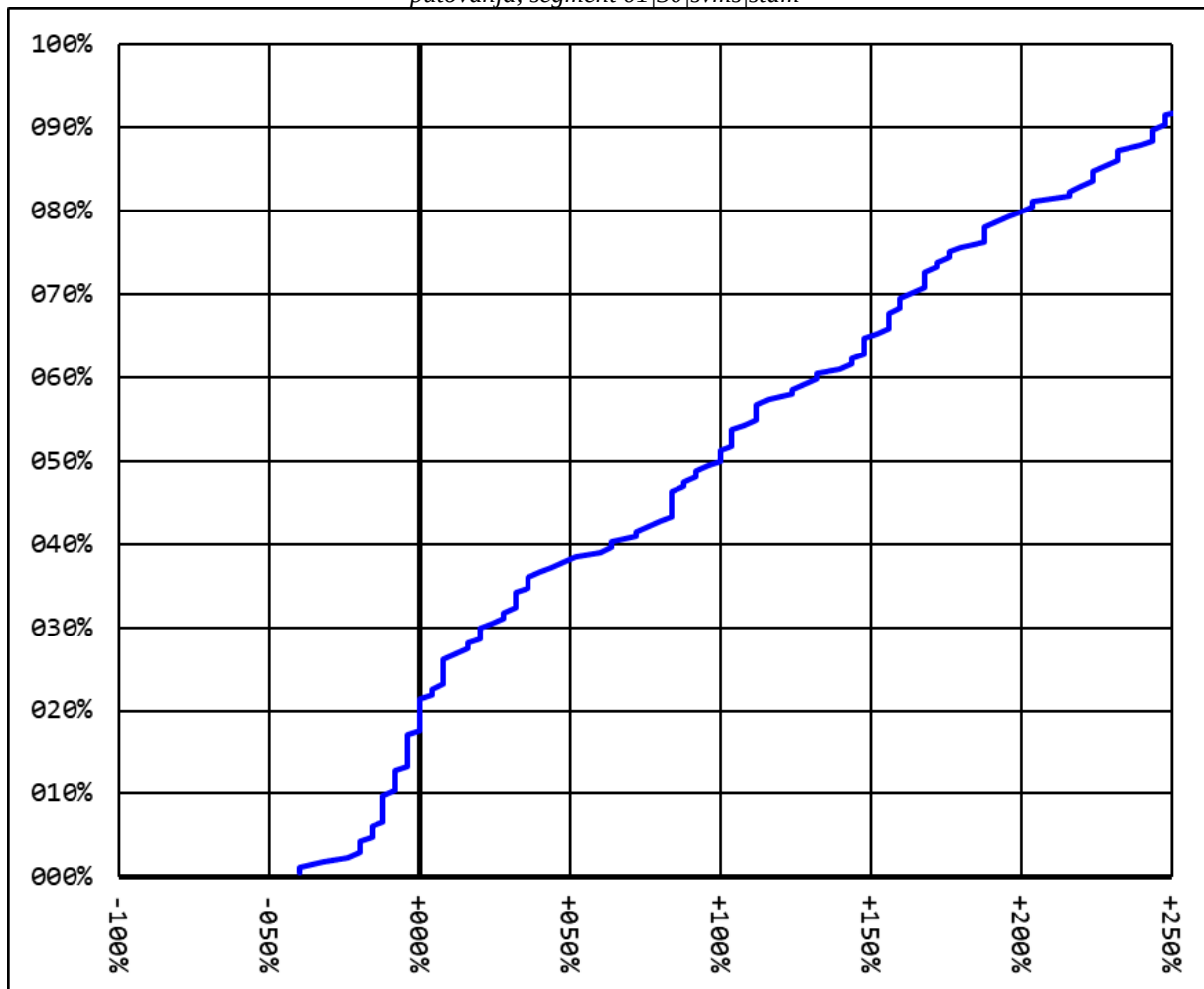
Tablica 8. Dodijeljene konstantne brzine prema radnjama u mreži	76
Tablica 9. Karakteristike stajališta tramvajske linije 4	79
Tablica 10. Najčešće vrijednosti ubrzanja i usporenja prema tipu tramvaja dobivene mjerenjem	81
Tablica 11. Karakteristične vrijednosti ubrzanja i usporenja za dobivanje cjelobrojne vrijednosti prijeđenog puta u metrima na temelju karakterističnih vrijednosti brzina.....	82
Tablica 12. Idealno vrijeme putovanja i ostale relevantne karakteristike segmenata	86
Tablica 13. Dobivene vrijednosti pokazatelja vremena putovanja apsolutnog karaktera	89
Tablica 14. Segmenti najlošijih performansi prema veličinama relativnog karaktera	96
Tablica 15. Provjera normalnosti razdioba vremena putovanja po segmentima.....	98
Tablica 16. Korelacija odabranih zavisnih i nezavisnih varijabli	115
Tablica 17. Odabrane nezavisne varijable za uspostavu modela s provjerom međusobne korelacije	119
Tablica 18. Korelacija zavisnih varijabli odabranih za model i nezavisnih varijabli koje opisuju neravnomjernost prijevozne ponude.....	120
Tablica 19. Dobiveni modeli za relevantne zavisne varijable nakon provedene višestruke linearne regresije	124
Tablica 20. Rezultati za nezavisne varijable modela i njihove koeficijente	125
Tablica 21. Testiranje normalnosti razdiobe grešaka.....	129
Tablica 22. Usporedba parametara prethodno dobivenog modela devedesetog percentila vremena putovanja s dobivenim modelom koji uključuje neravnomjernost prijevozne ponude.....	130
Tablica 23. Pokazatelji nezavisnih varijabli modela.....	134
Tablica 24. Realne i modelirane vrijednosti vremena putovanja	141
Tablica 25. Dobivene vrijednosti validacije	142

Prilog 1. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 01 30 svms stdm.....	167
Prilog 2. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 02 30 stdm vjsn	168
Prilog 3. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 03 30 vjsn zgrp	169
Prilog 4. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 04 30 zgrp stcn	170
Prilog 5. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 05 30 stcn vdnk	171
Prilog 6. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 06 30 vdnk glkl.....	172
Prilog 7. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 07 30 glkl brnm	173
Prilog 8. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 08 30 brnm shrt	174
Prilog 9. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 09 30 shrt trhr	175
Prilog 10. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 10 30 trhr drsk	176
Prilog 11. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 11 30 drsk kvtg.....	177
Prilog 12. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 12 30 kvtg mksm.....	178
Prilog 13. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 13 30 mksm dbrv.....	179
Prilog 14. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 14 30 dbrv dnkv	180
Prilog 15. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 15 30 dnkv dubc	181
Prilog 16. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 16 30 dubc dnkv	182
Prilog 17. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 17 30 dnkv dbrv	183
Prilog 18. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno	

vrijeme putovanja, segment 18 30 dbrv mksm.....	184
Prilog 19. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 19 30 mksm kvtg.....	185
Prilog 20. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 20 30 kvtg drsk.....	186
Prilog 21. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 21 30 drsk trhr.....	187
Prilog 22. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 22 30 trhr shrt.....	188
Prilog 23. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 23 30 shrt brnm.....	189
Prilog 24. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 24 30 brnm glkl.....	190
Prilog 25. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 25 30 glkl vdnk.....	191
Prilog 26. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 26 30 vdnk stcn.....	192
Prilog 27. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 27 30 stcn zgrp.....	193
Prilog 28. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 28 30 zgrp vjsn.....	194
Prilog 29. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 29 30 vjsn stdm.....	195
Prilog 30. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 30 30 stdm svms.....	196
Prilog 31. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 01 30 svms stdm.....	197
Prilog 32. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 02 30 stdm vjsn.....	198
Prilog 33. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 03 30 vjsn zgrp.....	199
Prilog 34. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 04 30 zgrp stcn.....	200
Prilog 35. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 05 30 stcn vdnk.....	201
Prilog 36. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 06 30 vdnk glkl.....	202
Prilog 37. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 07 30 glkl brnm.....	203
Prilog 38. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 08 30 brnm shrt.....	204
Prilog 39. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 09 30 shrt trhr.....	205
Prilog 40. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 10 30 trhr drsk.....	206
Prilog 41. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 11 30 drsk kvtg.....	207
Prilog 42. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 12 30 kvtg mksm.....	208
Prilog 43. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 13 30 mksm dbrv.....	209
Prilog 44. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 14 30 dbrv dnkv.....	210
Prilog 45. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 15 30 dnkv dubc.....	211
Prilog 46. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 16 30 dubc dnkv.....	212
Prilog 47. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 17 30 dnkv dubr.....	213
Prilog 48. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment	

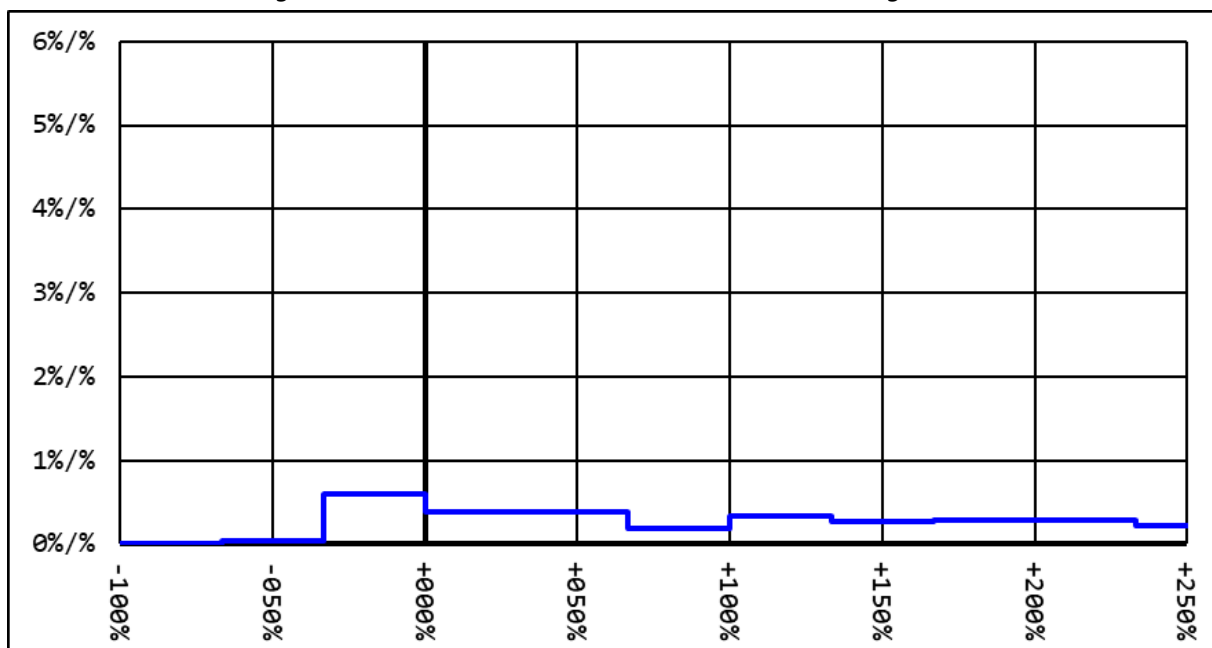
18 30 dbrv mksm.....	214
Prilog 49. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment	
19 30 mksm kvtg.....	215
Prilog 50. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment	
20 30 kvtg drsk.....	216
Prilog 51. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment	
21 30 drsk trhr.....	217
Prilog 52. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment	
22 30 trhr shrt.....	218
Prilog 53. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment	
23 30 shrt brnm.....	219
Prilog 54. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment	
24 30 brnm glkl.....	220
Prilog 55. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment	
25 30 glkl vdnk.....	221
Prilog 56. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment	
26 30 vdnk stcn.....	222
Prilog 57. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment	
27 30 stcn zgrp.....	223
Prilog 58. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment	
28 30 zgrp vjsn.....	224
Prilog 59. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment	
29 30 vjsn stdm.....	225
Prilog 60. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment	
30 30 stdm svms.....	226

Prilog 1. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 01|30|svms|stdm

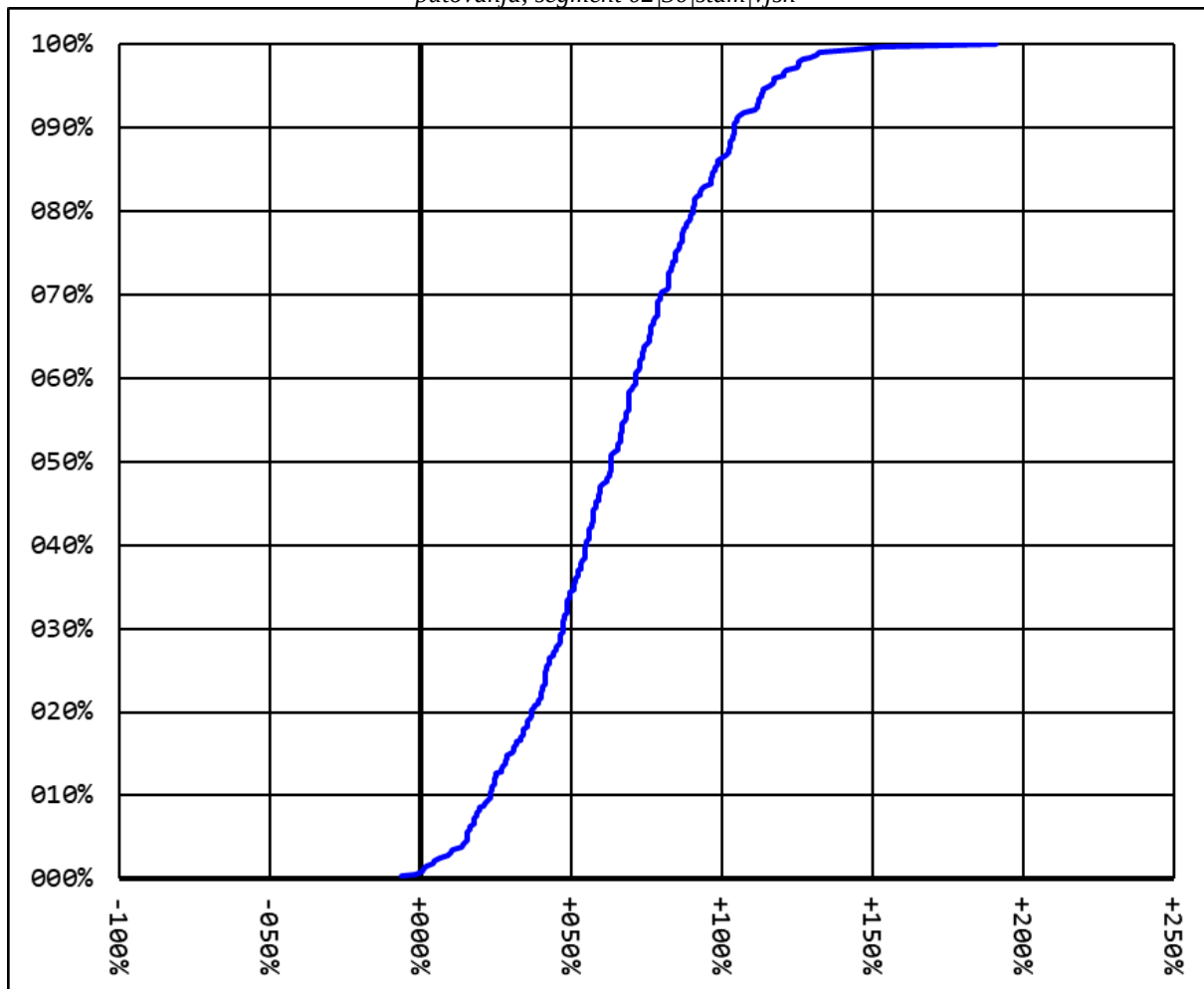


segment = 01|30|svms|stdm
duljina segmenta = 0,1km
frekvencija = 15v/h

idealno vrijeme = 0'25"
idealna brzina = 13km/h
broj uzoraka = 164

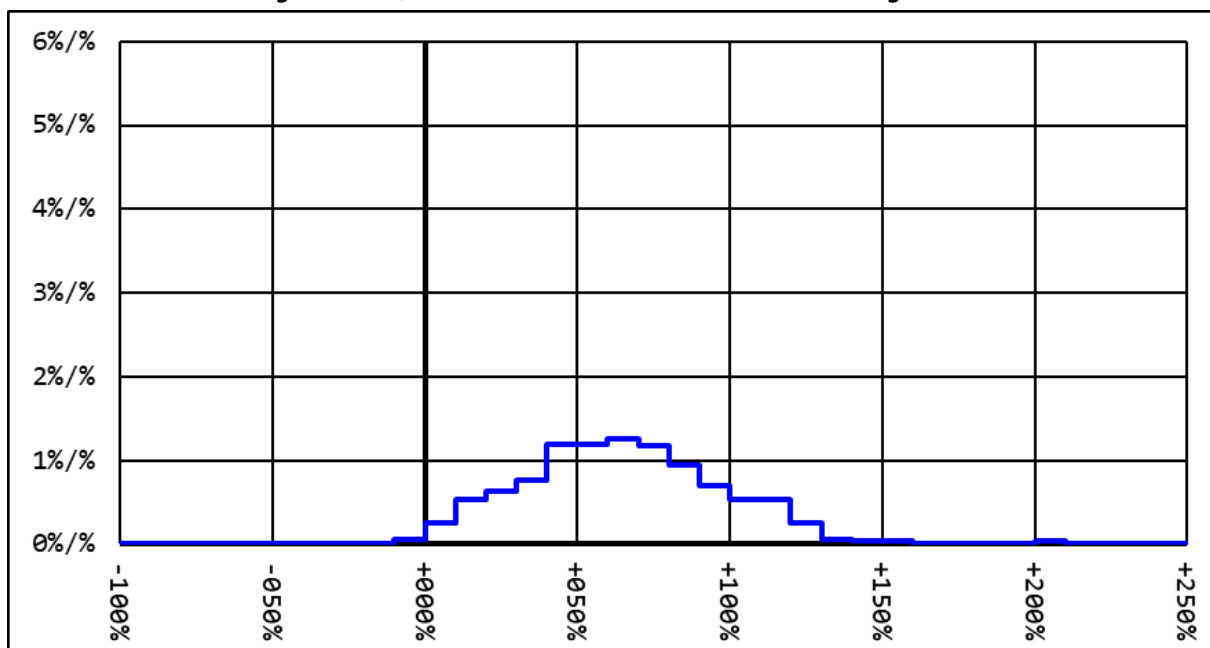


Prilog 2. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 02|30|stdm|vjsn

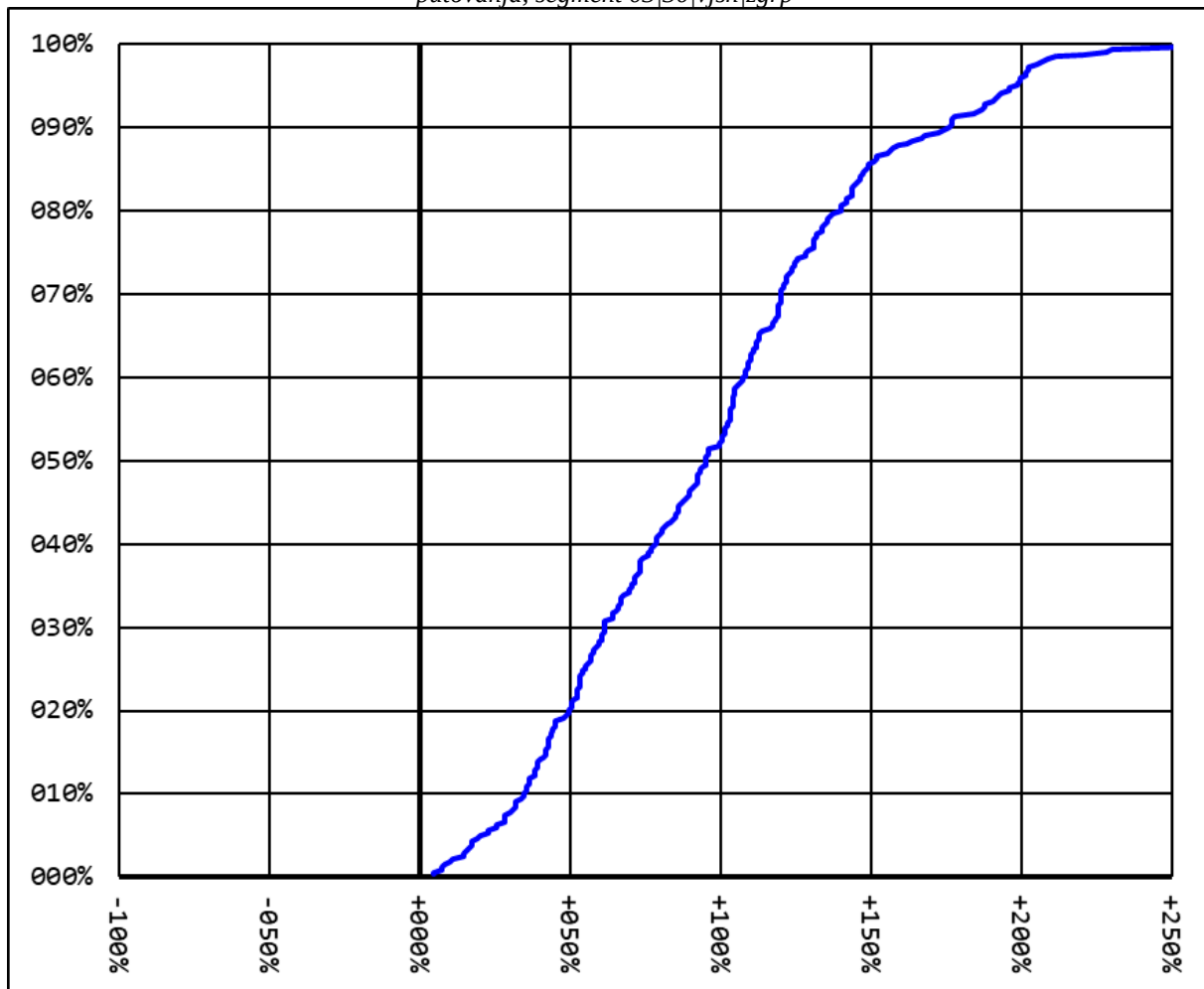


segment = 02|30|stdm|vjsn
duljina segmenta = 0,9km
frekvencija = 28v/h

idealno vrijeme = 2'17"
idealna brzina = 23km/h
broj uzoraka = 317

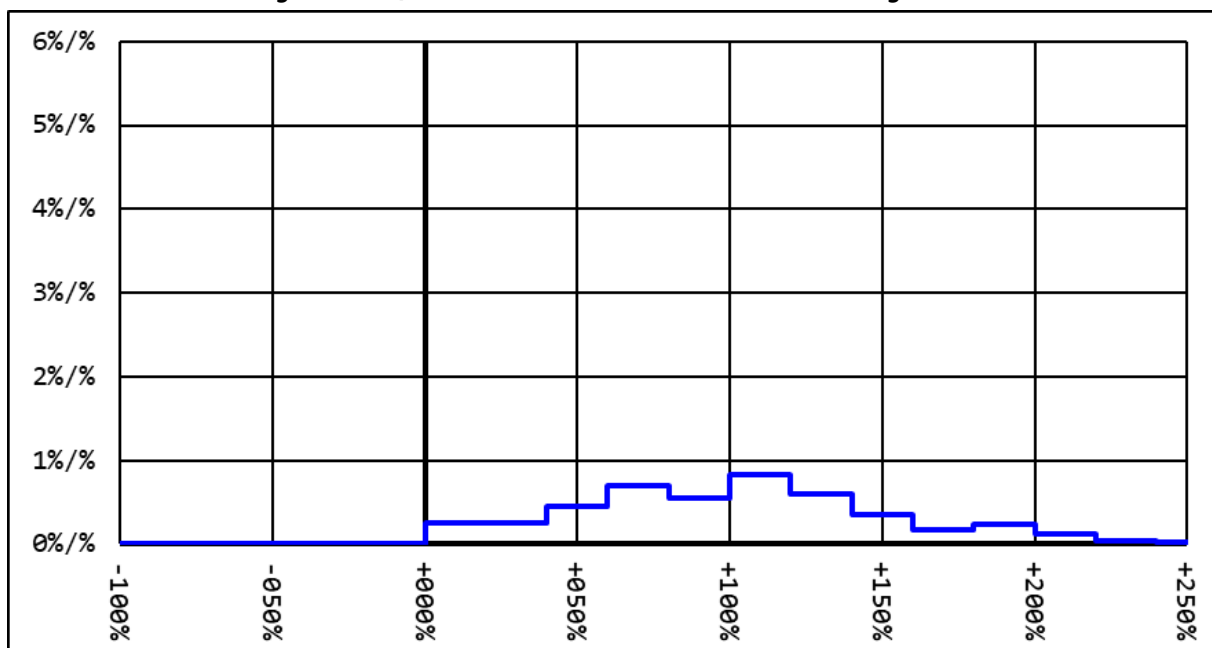


Prilog 3. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 03|30|vjsn|zgrp

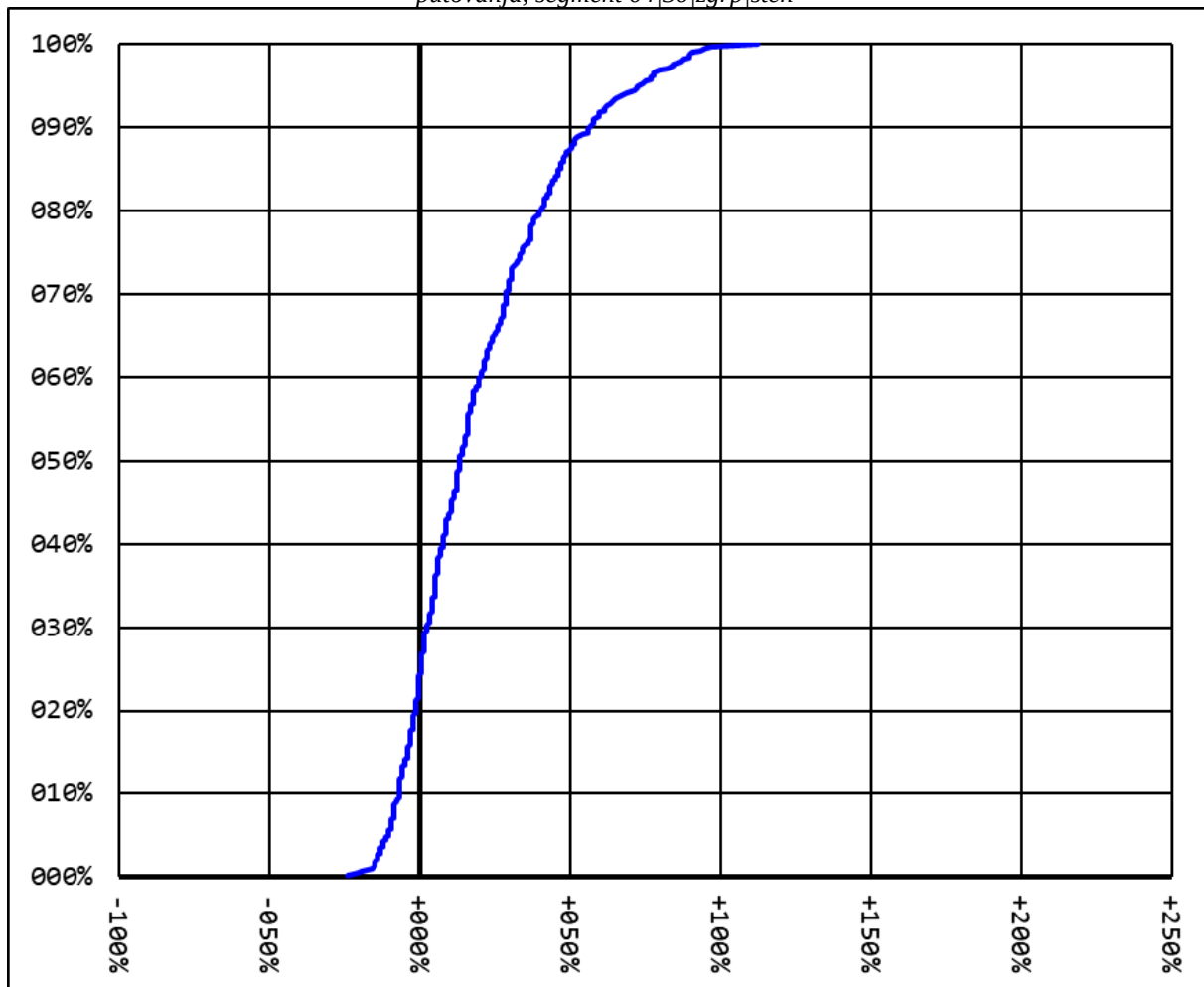


segment = 03|30|vjsn|zgrp
duljina segmenta = 0,6km
frekvencija = 28v/h

idealno vrijeme = 1'51"
idealna brzina = 21km/h
broj uzoraka = 319

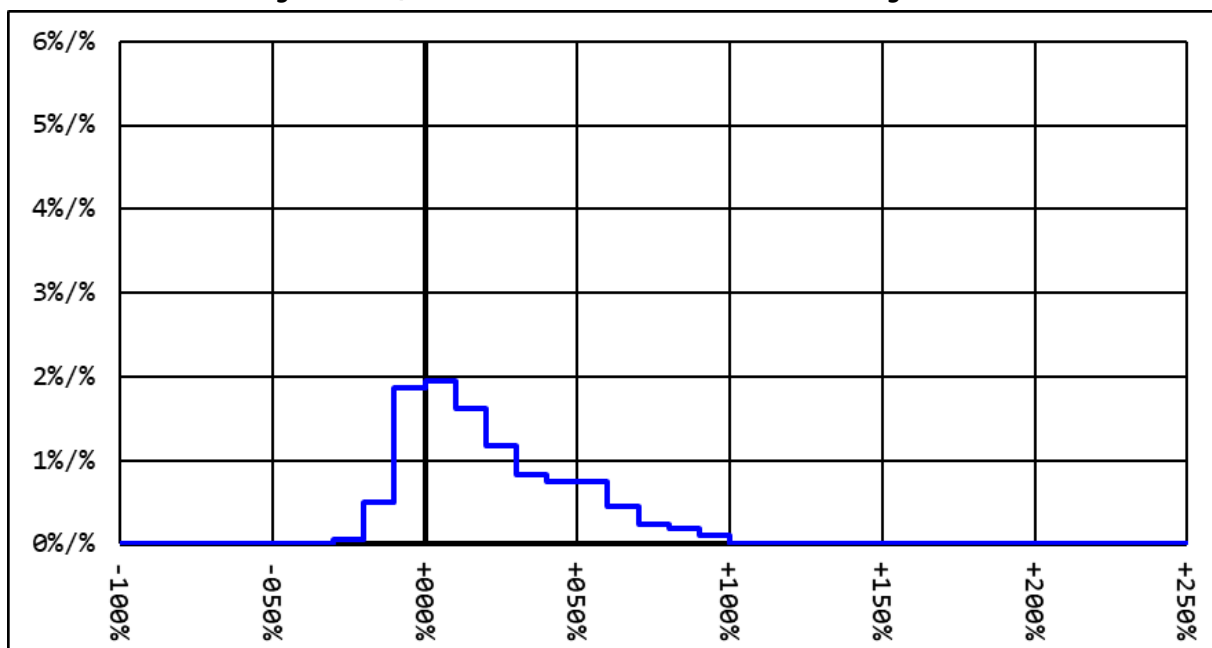


Prilog 4. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 04|30|zgrp|stcn

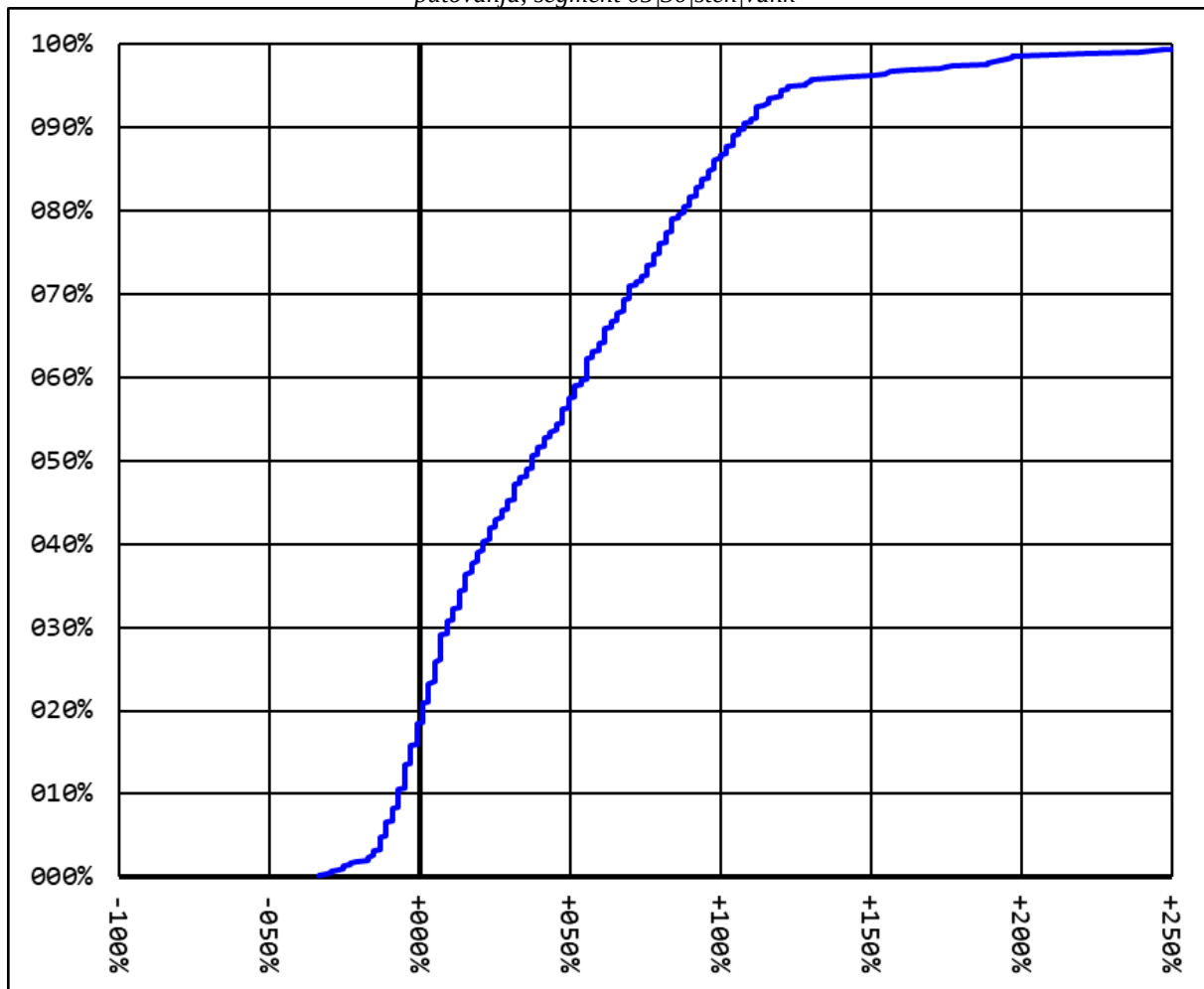


segment = 04|30|zgrp|stcn
duljina segmenta = 0,5km
frekvencija = 33v/h

idealno vrijeme = 1'50"
idealna brzina = 16km/h
broj uzoraka = 376

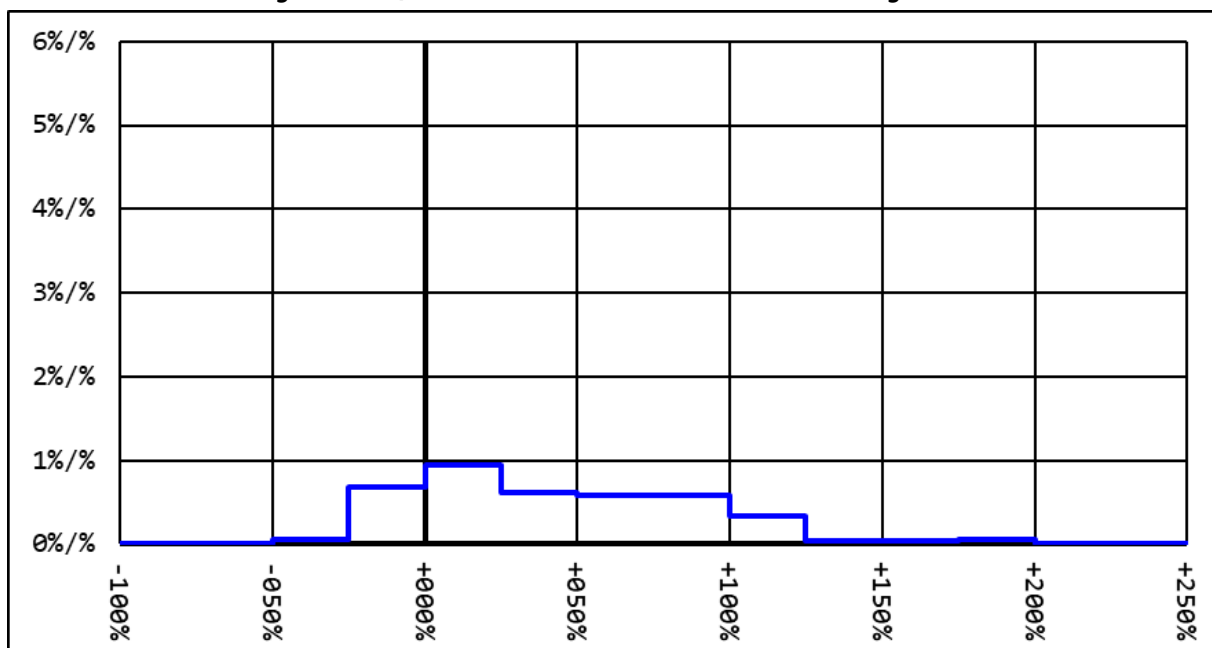


Prilog 5. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 05|30|stcn|vdk

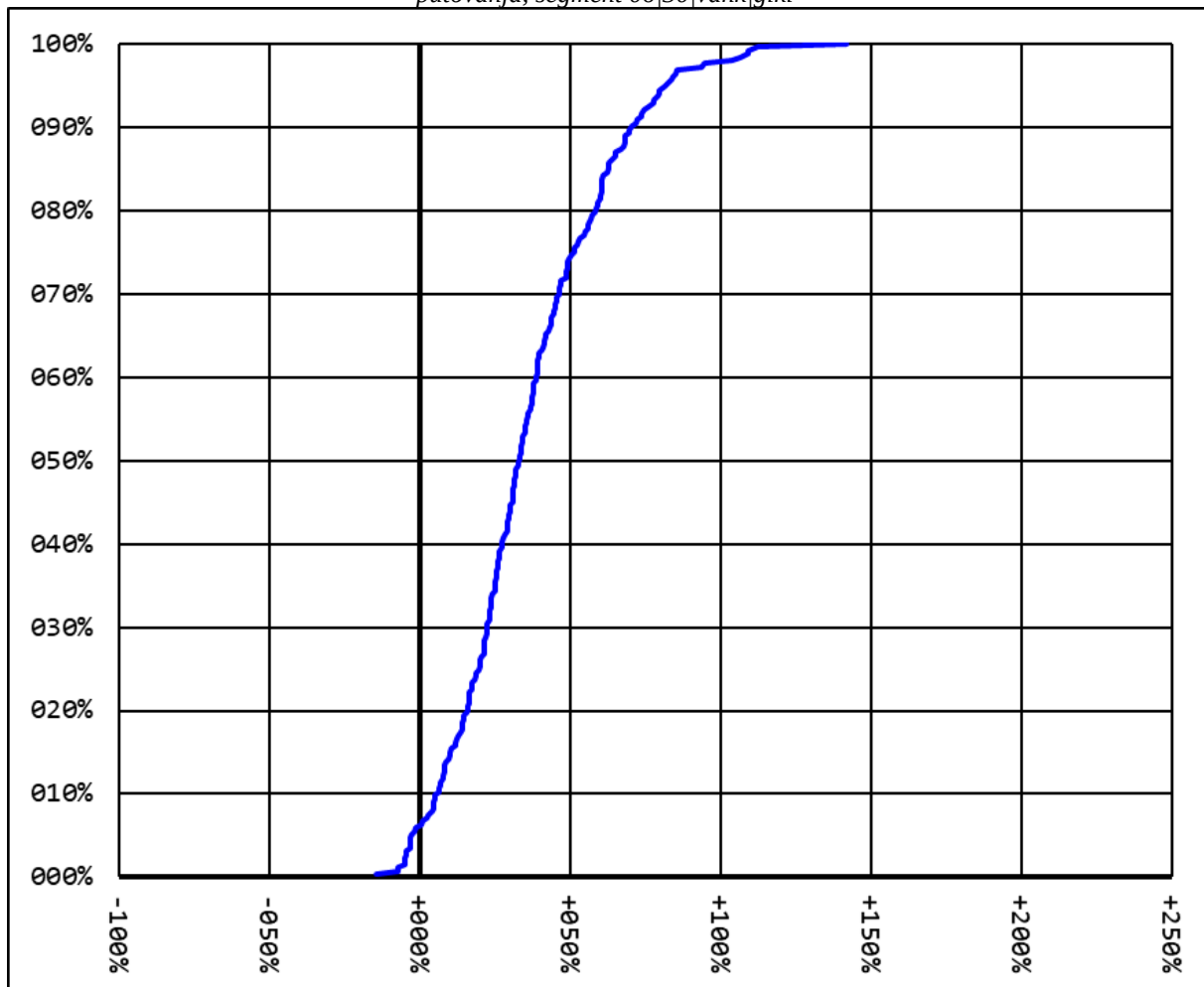


segment = 05|30|stcn|vdk
duljina segmenta = 0,3km
frekvencija = 45v/h

idealno vrijeme = 0'50"
idealna brzina = 20km/h
broj uzoraka = 533



Prilog 6. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 06|30|vdk|glkl



segment = 06|30|vdk|glkl

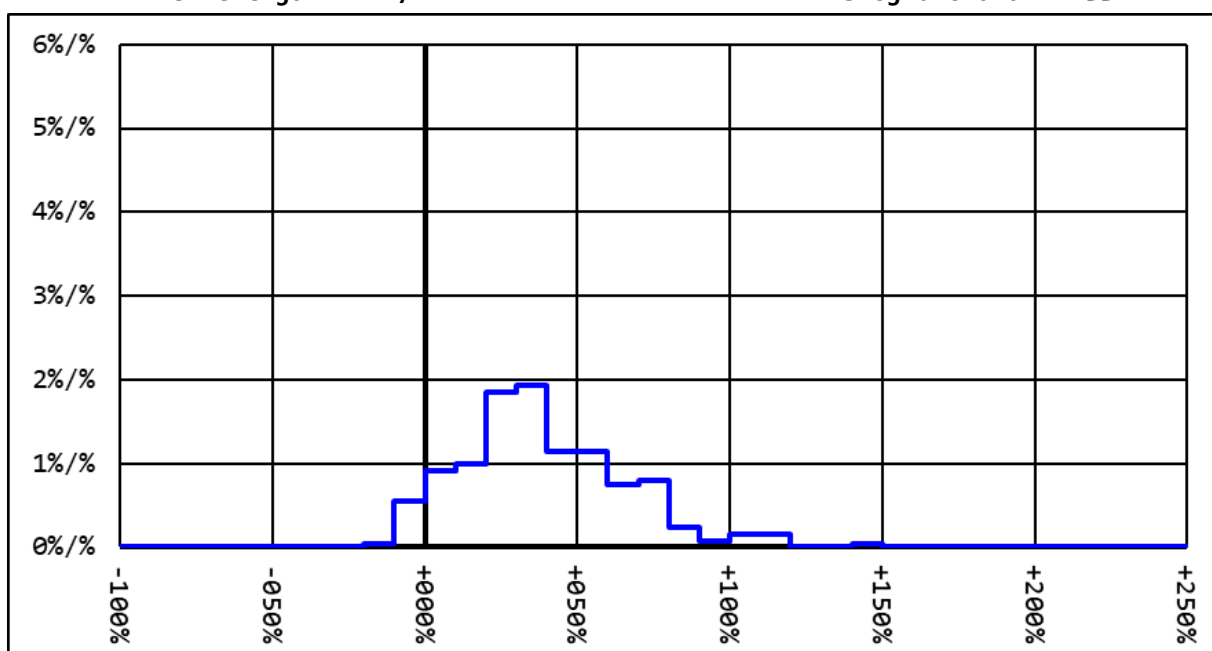
idealno vrijeme = 2'48"

duljina segmenta = 0,9km

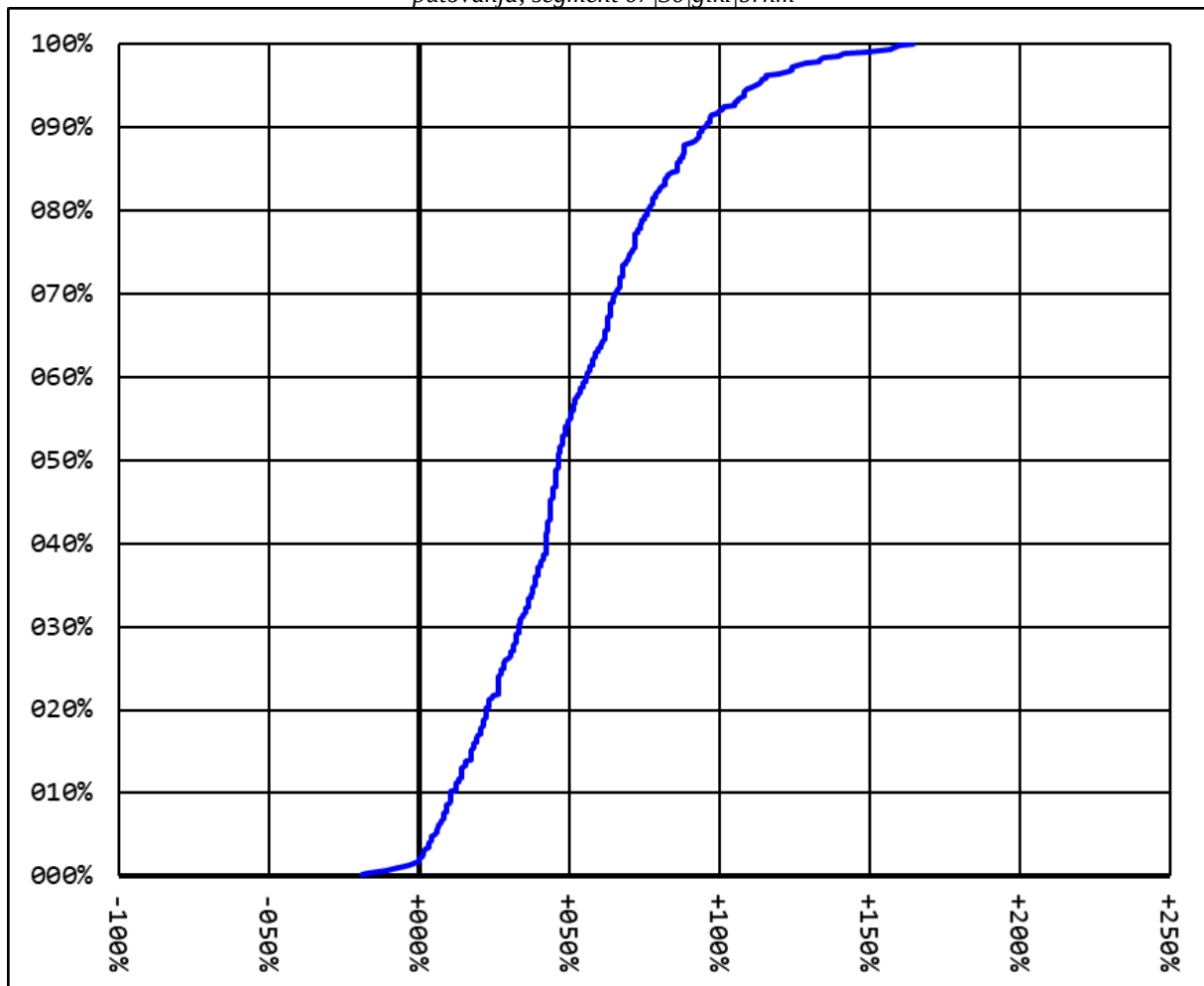
idealna brzina = 19km/h

frekvencija = 22v/h

broj uzoraka = 253



Prilog 7. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 07|30|glkl|brnm



segment = 07|30|glkl|brnm

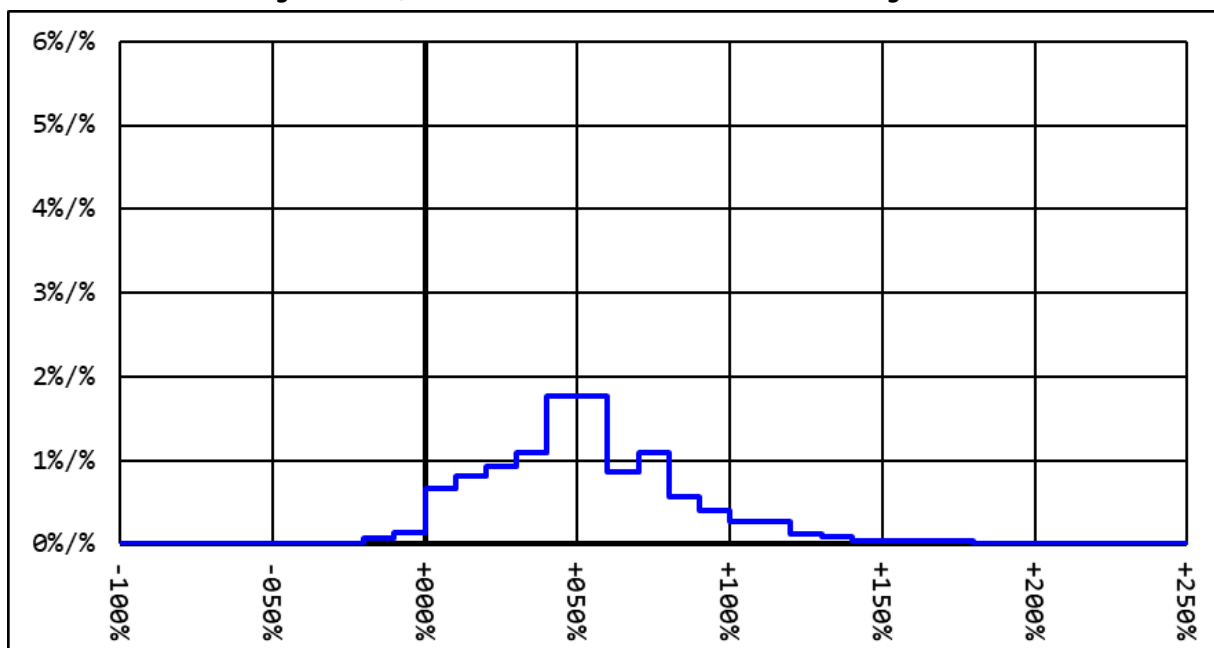
idealno vrijeme = 2'01"

duljina segmenta = 0,5km

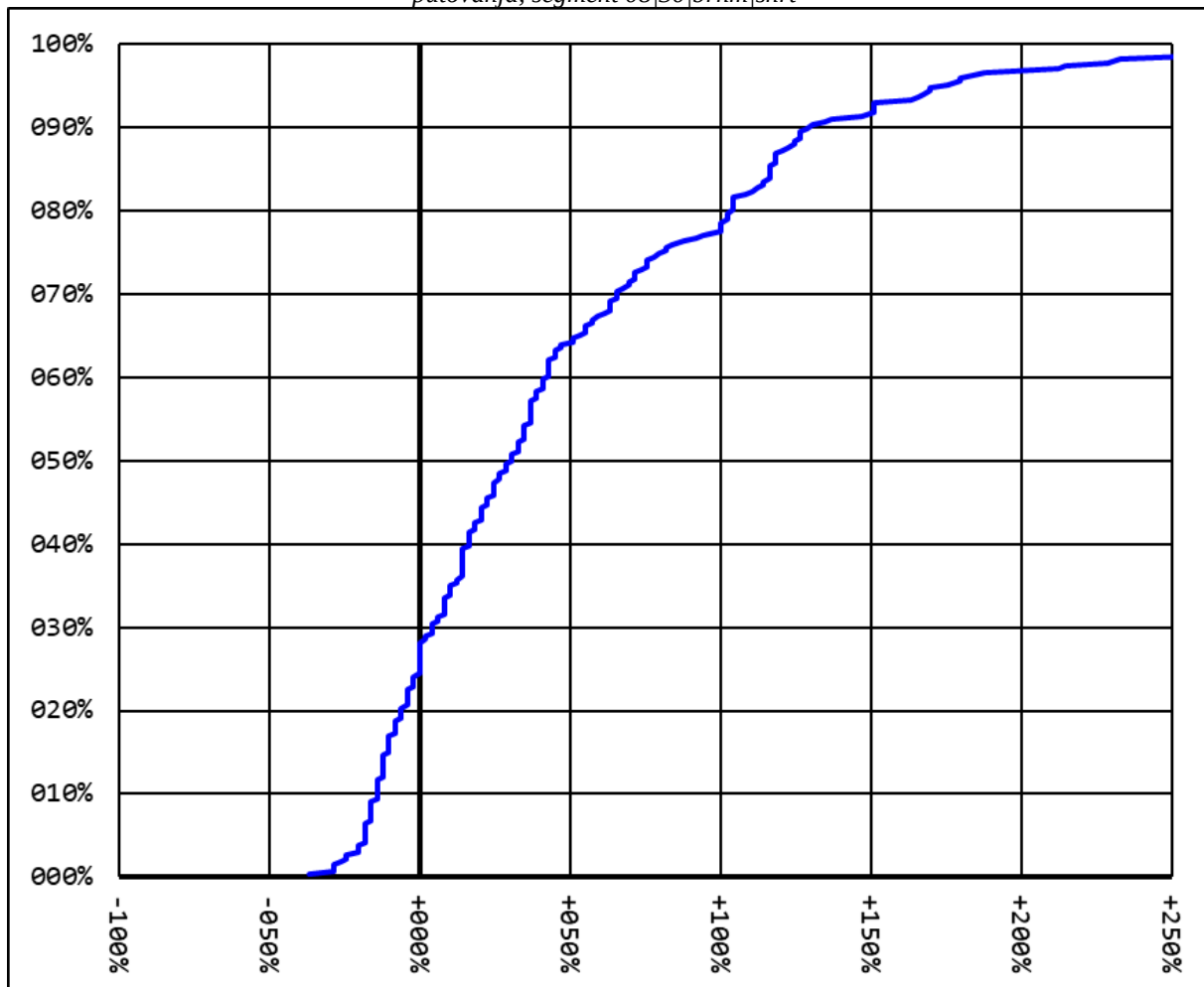
idealna brzina = 15km/h

frekvencija = 37v/h

broj uzoraka = 420

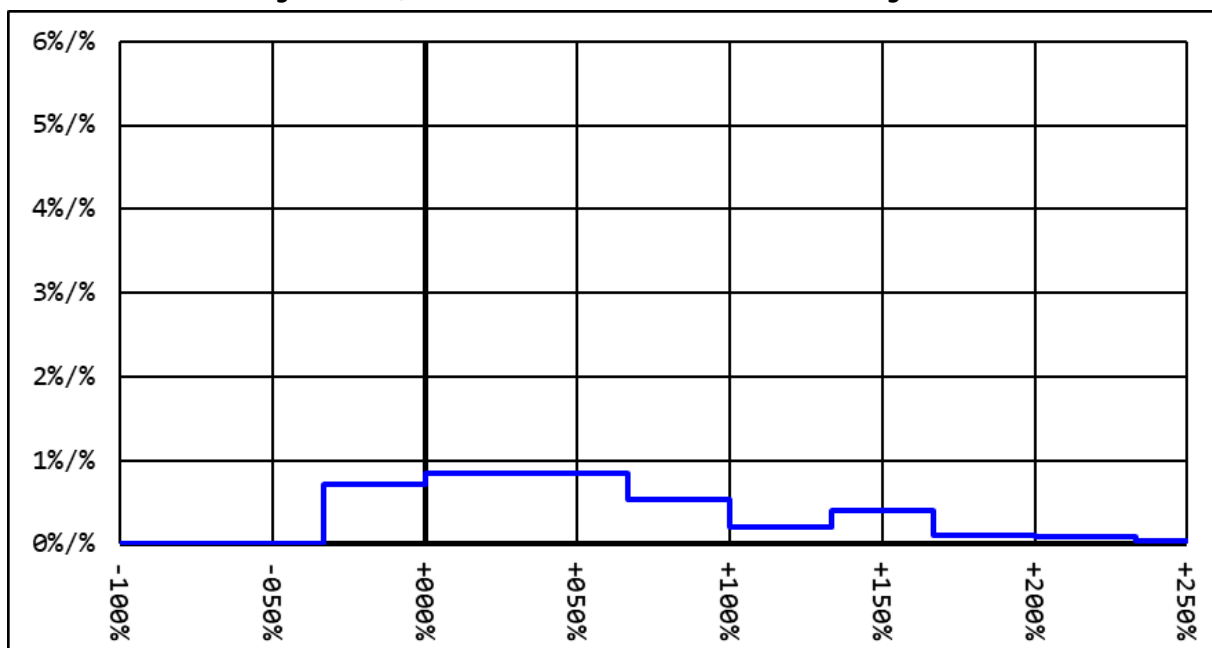


Prilog 8. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 08|30|brnm|shrt

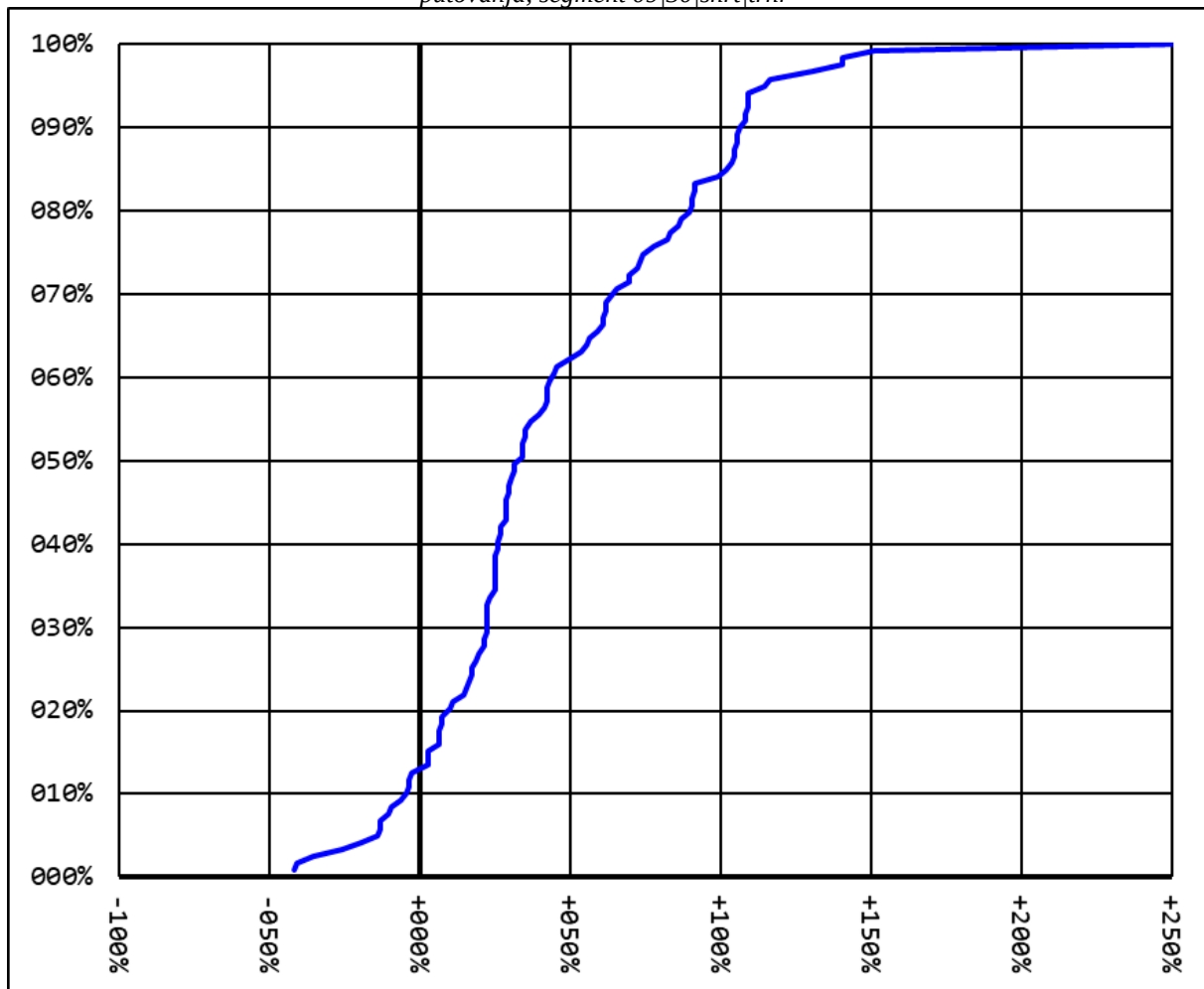


segment = 08|30|brnm|shrt
duljina segmenta = 0,2km
frekvencija = 23v/h

idealno vrijeme = 0'49"
idealna brzina = 18km/h
broj uzoraka = 266

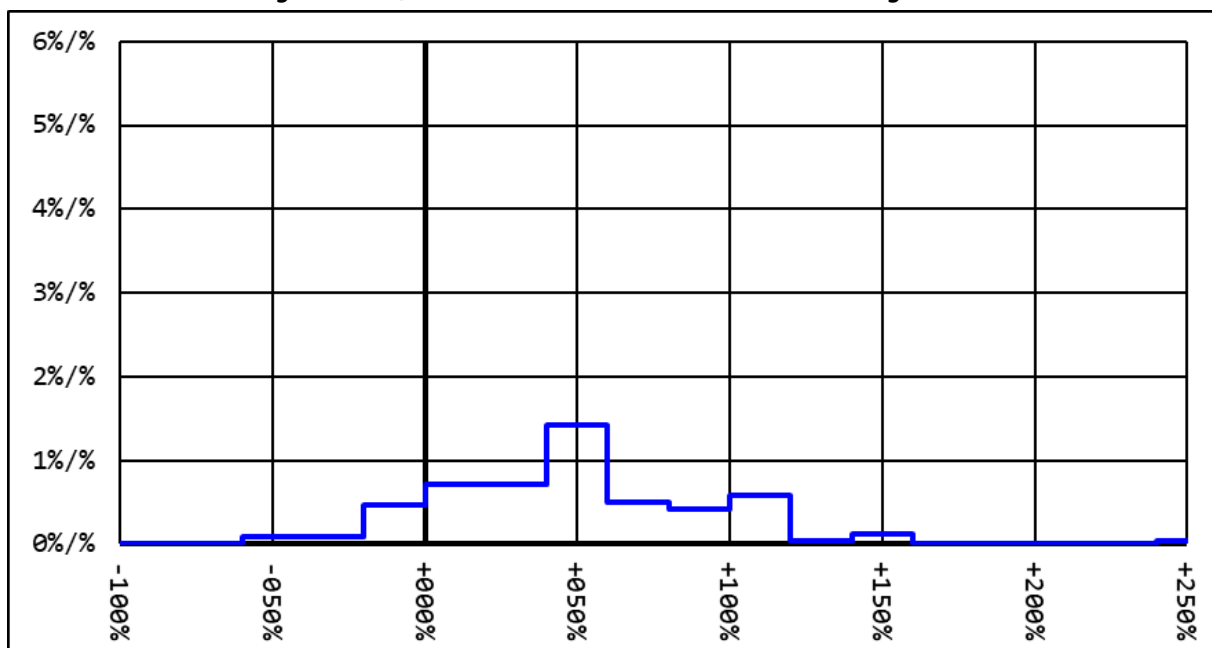


Prilog 9. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 09|30|shrt|trhr

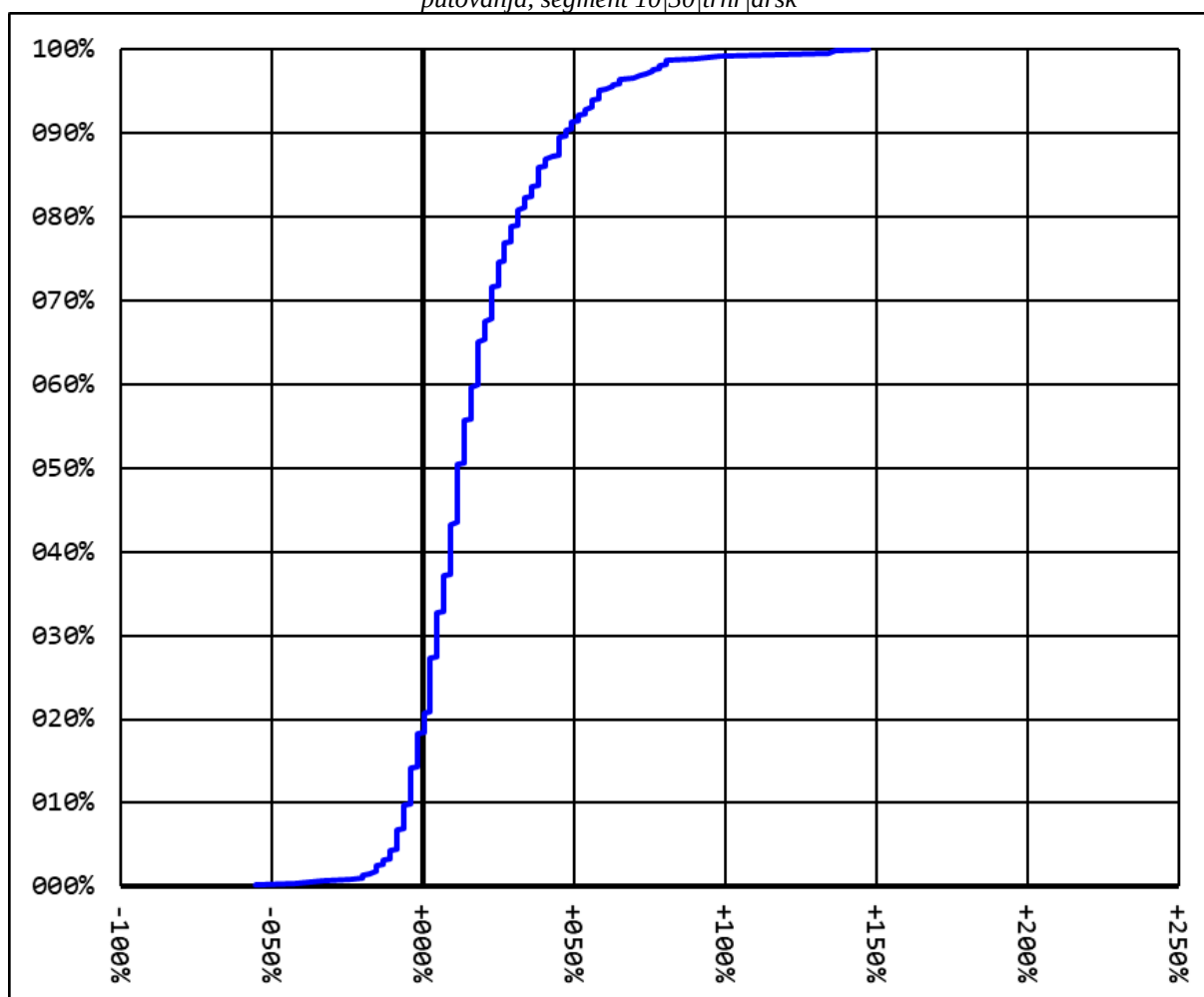


segment = 09|30|shrt|trhr
duljina segmenta = 0,5km
frekvencija = 11v/h

idealno vrijeme = 1'48"
idealna brzina = 18km/h
broj uzoraka = 119

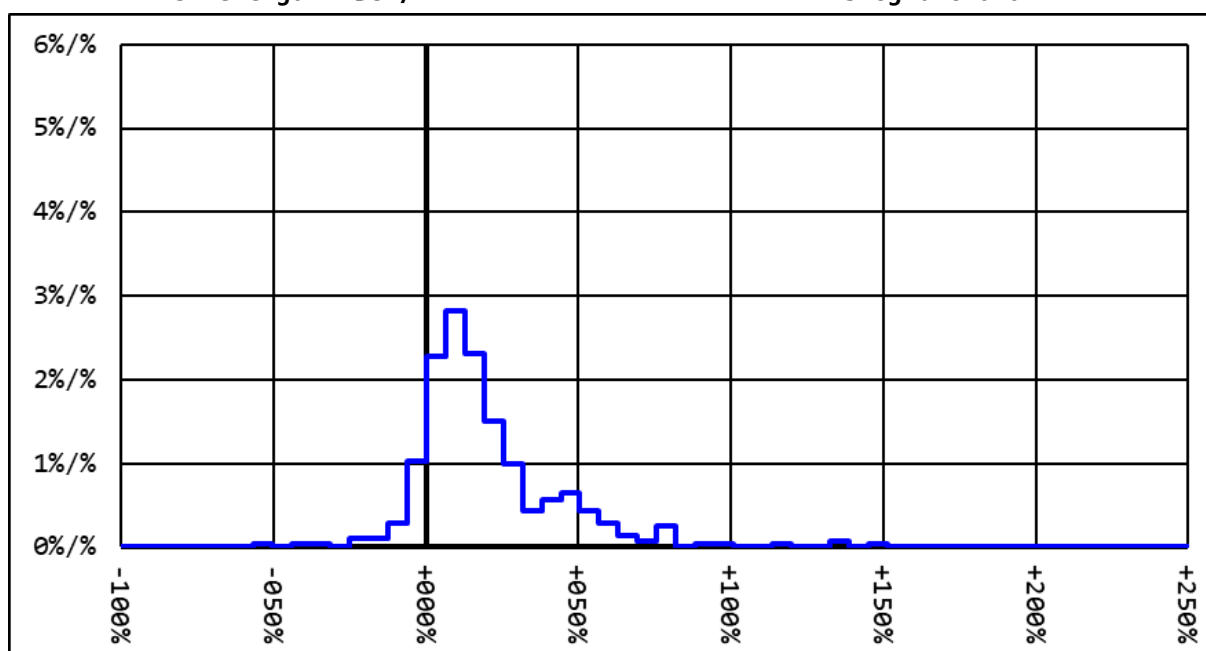


Prilog 10. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 10|30|trhr|drsk

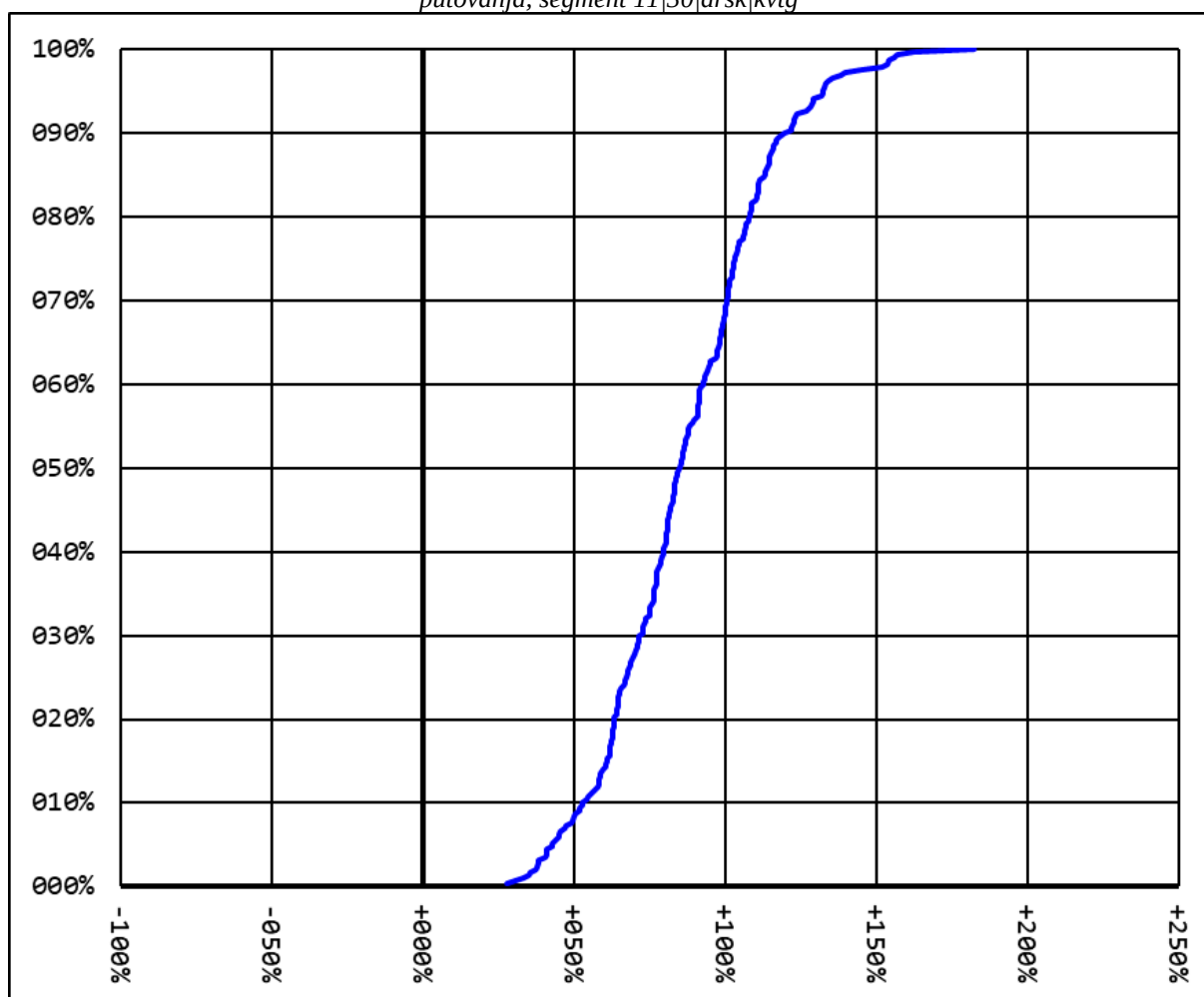


segment = 10|30|trhr|drsk
duljina segmenta = 0,1km
frekvencija = 38v/h

idealno vrijeme = 0'45"
idealna brzina = 10km/h
broj uzoraka = 444

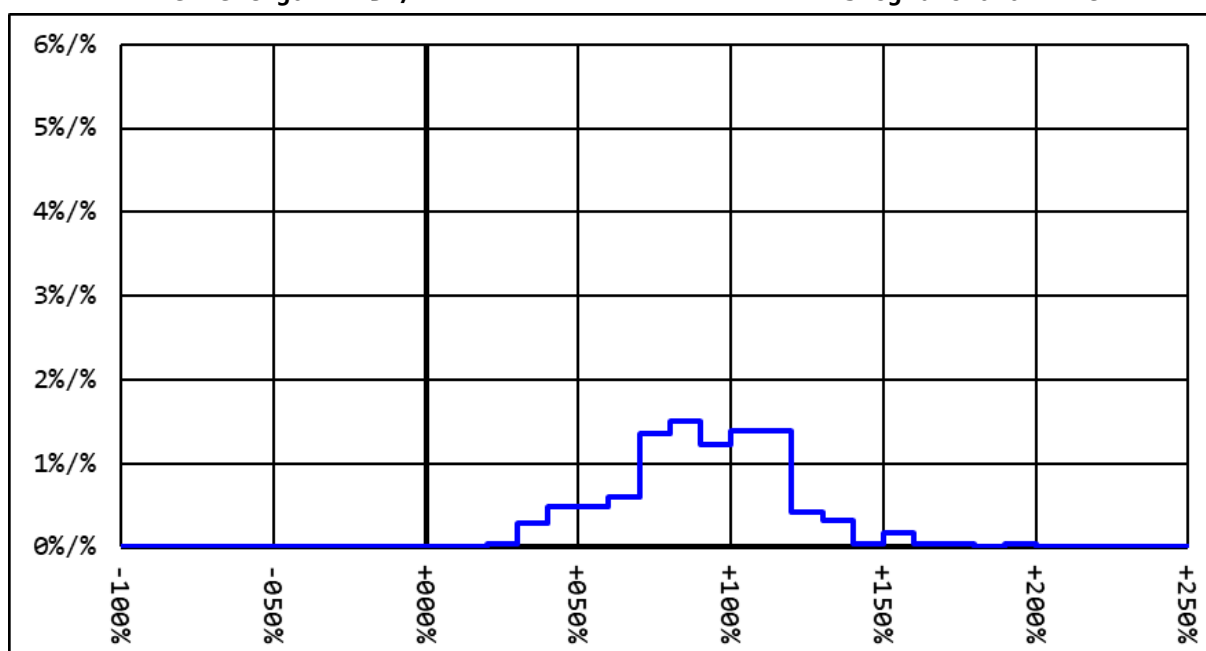


Prilog 11. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 11|30|drsk|kvtg

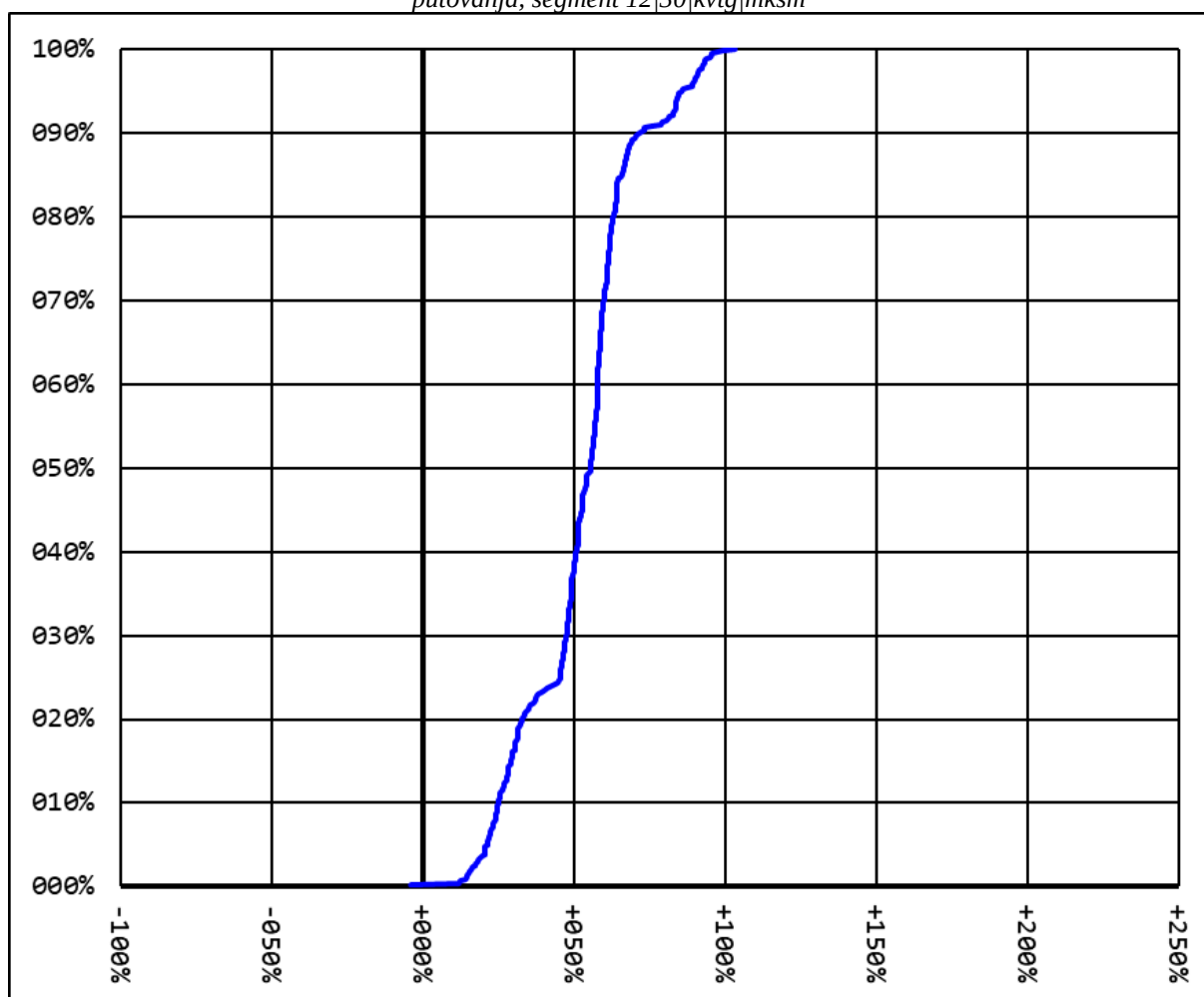


segment = 11|30|drsk|kvtg
duljina segmenta = 1,1km
frekvencija = 25v/h

idealno vrijeme = 3'34"
idealna brzina = 19km/h
broj uzoraka = 287

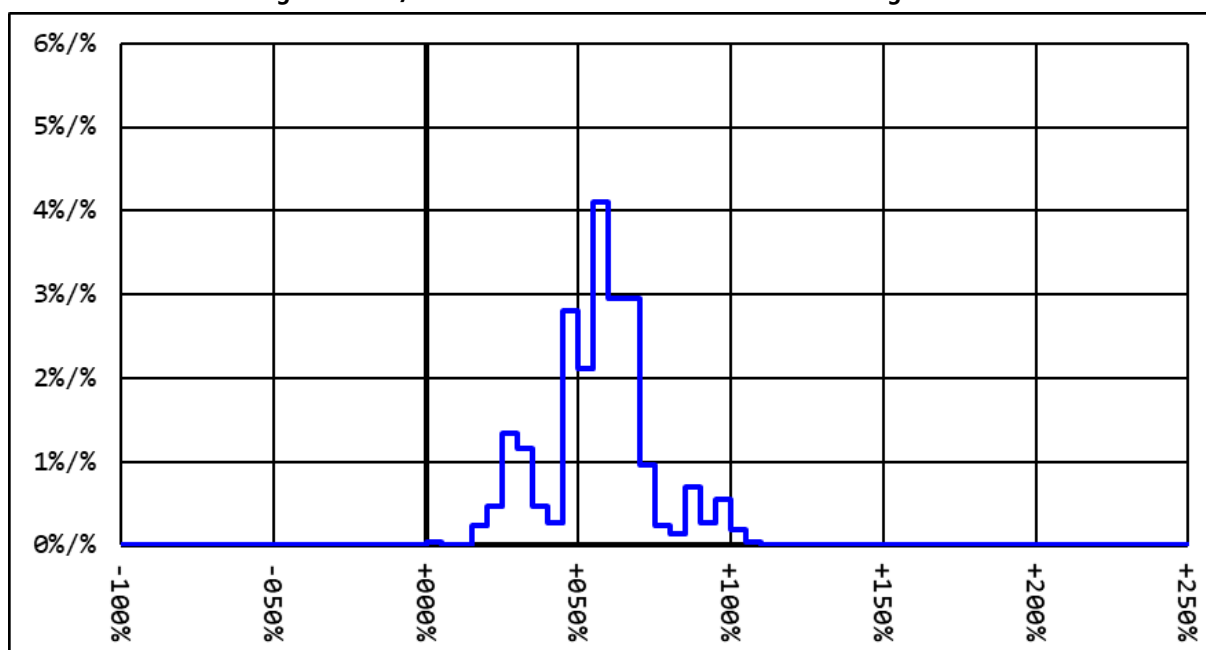


Prilog 12. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 12|30|kvtg|mksm

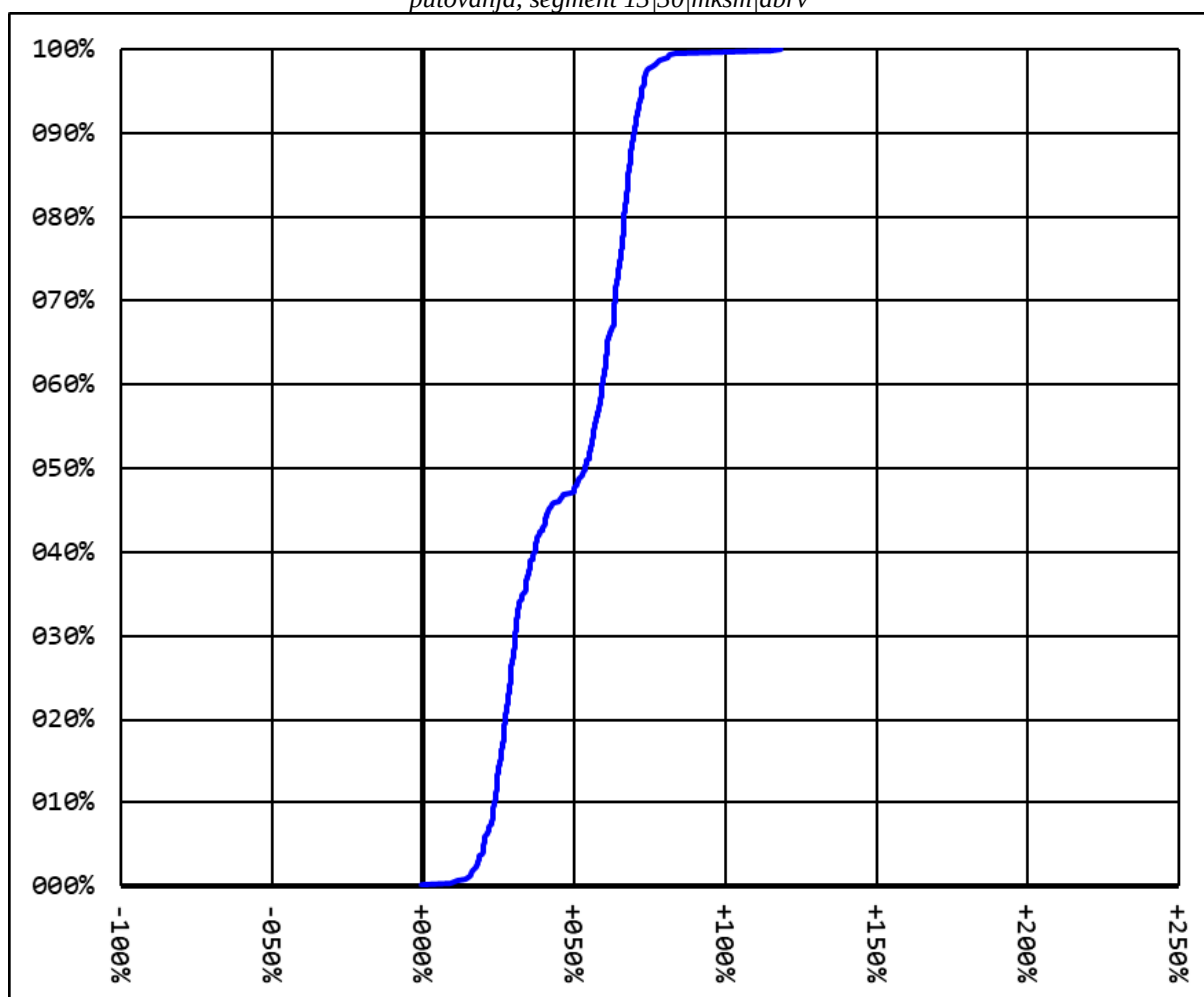


segment = 12|30|kvtg|mksm
 duljina segmenta = 1,5km
 frekvencija = 38v/h

idealno vrijeme = 3'56"
 idealna brzina = 22km/h
 broj uzoraka = 434

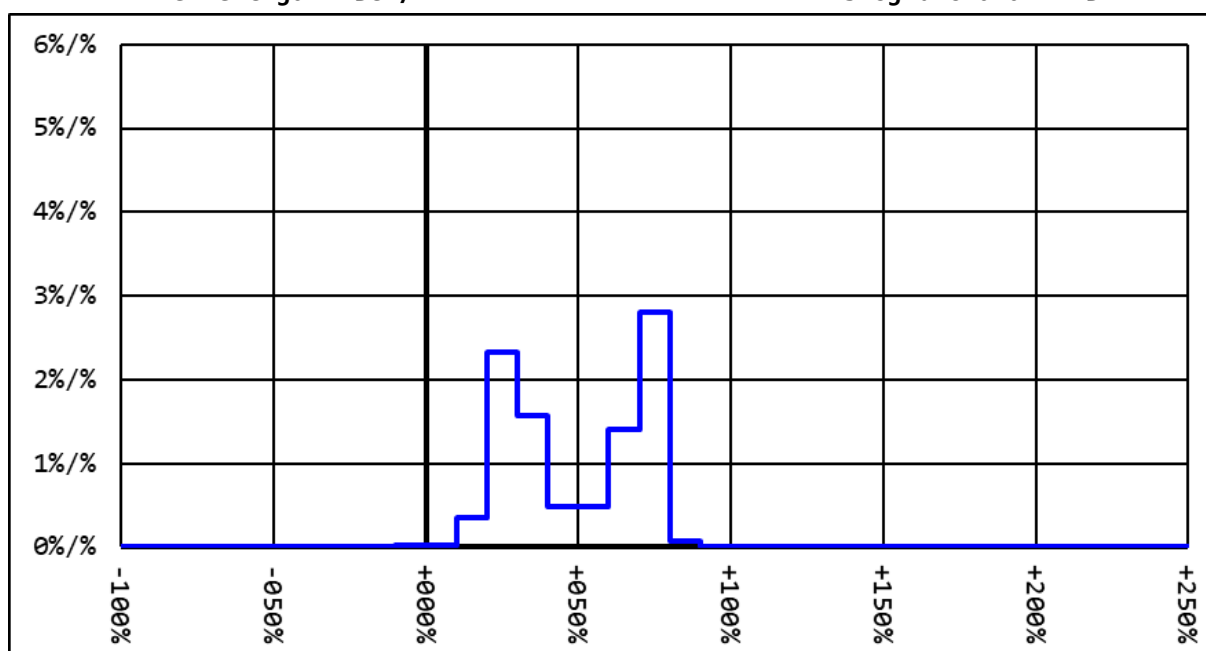


Prilog 13. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 13|30|mksm|dbrv

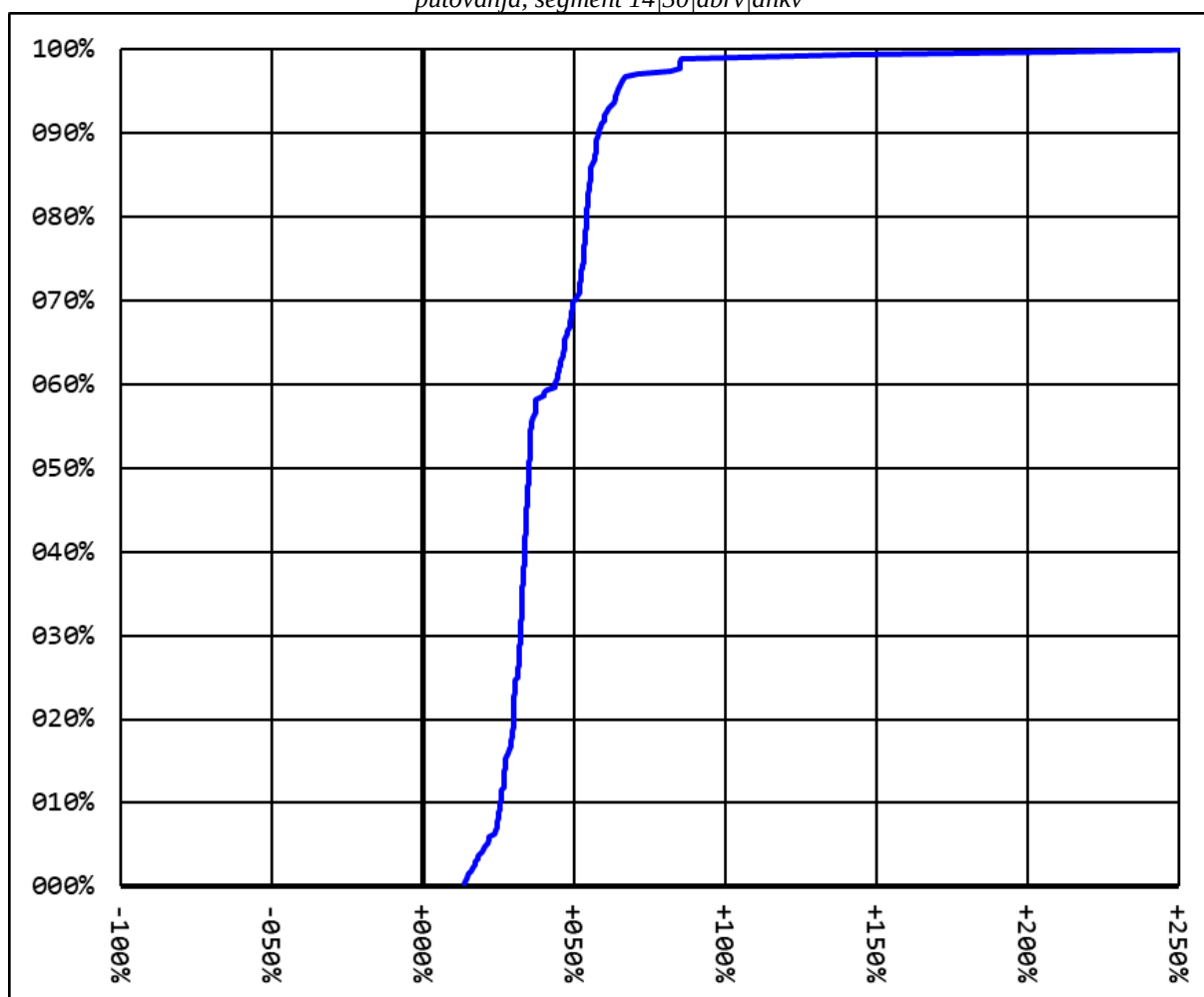


segment = 13|30|mksm|dbrv
duljina segmenta = 1,8km
frekvencija = 38v/h

idealno vrijeme = 3'42"
idealna brzina = 29km/h
broj uzoraka = 434

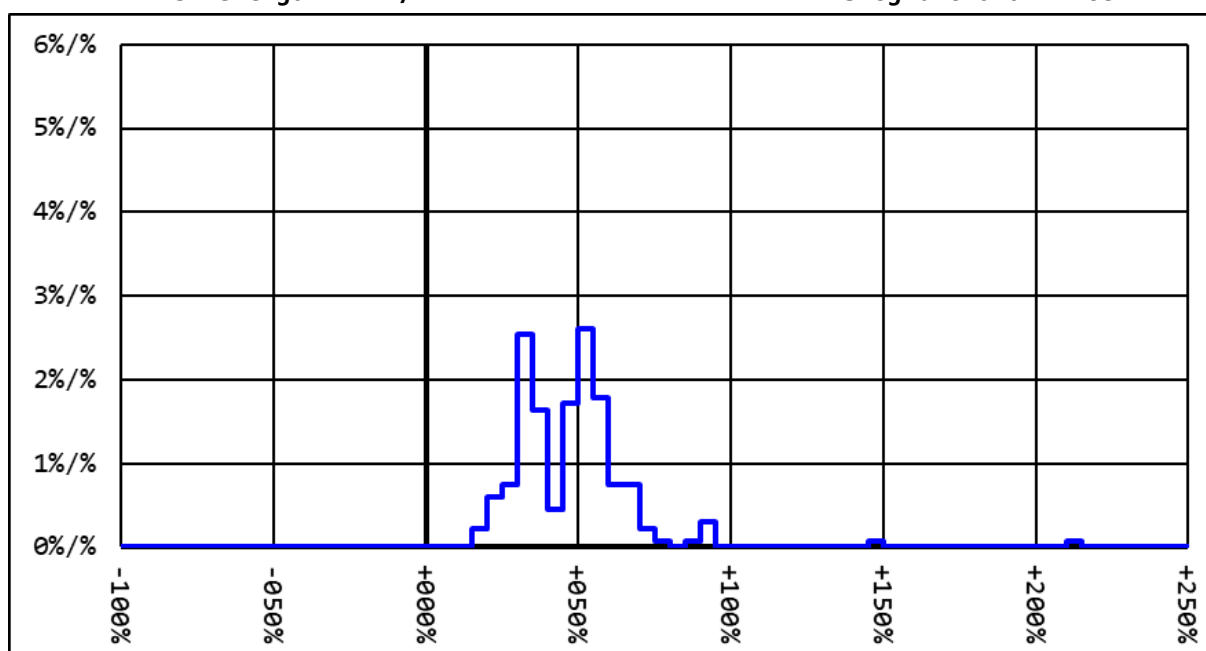


Prilog 14. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 14|30|dbrv|dnkv

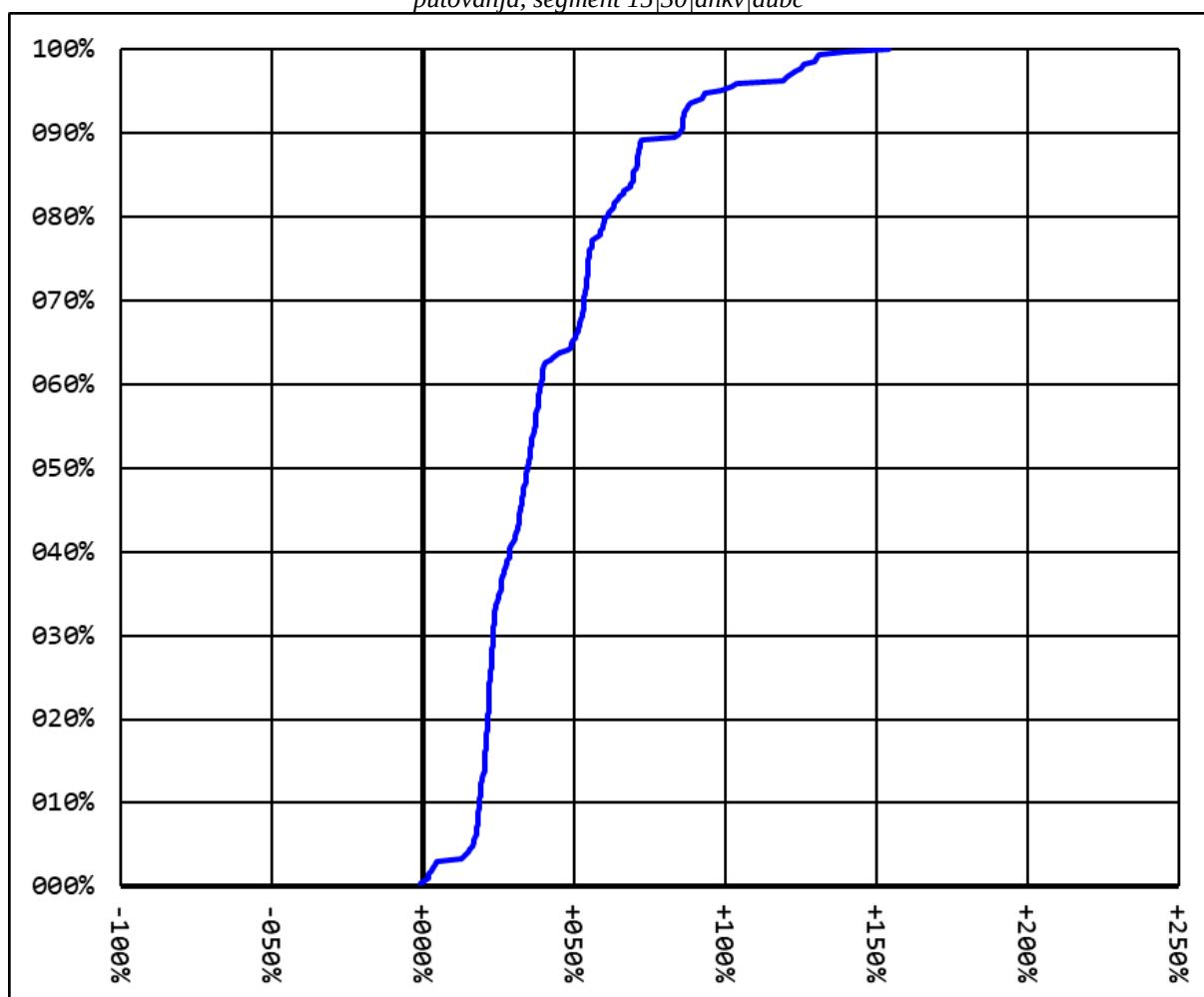


segment = 14|30|dbrv|dnkv
duljina segmenta = 1,6km
frekvencija = 24v/h

idealno vrijeme = 4'16"
idealna brzina = 22km/h
broj uzoraka = 268

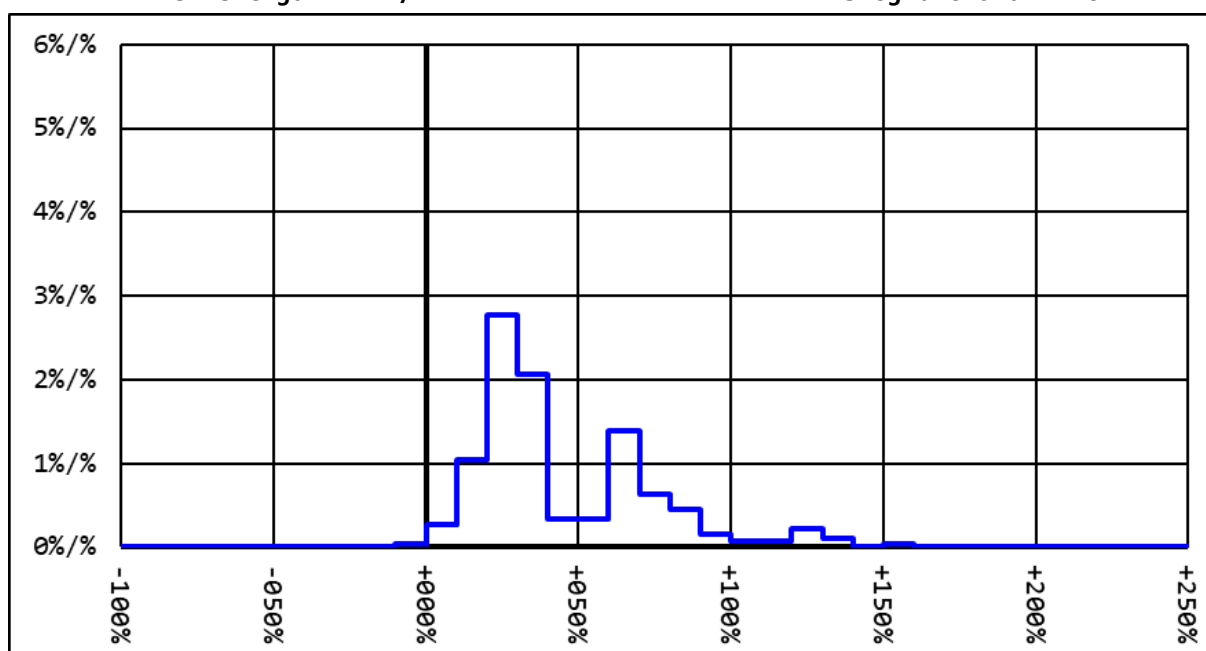


Prilog 15. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 15|30|dnkv|dubc

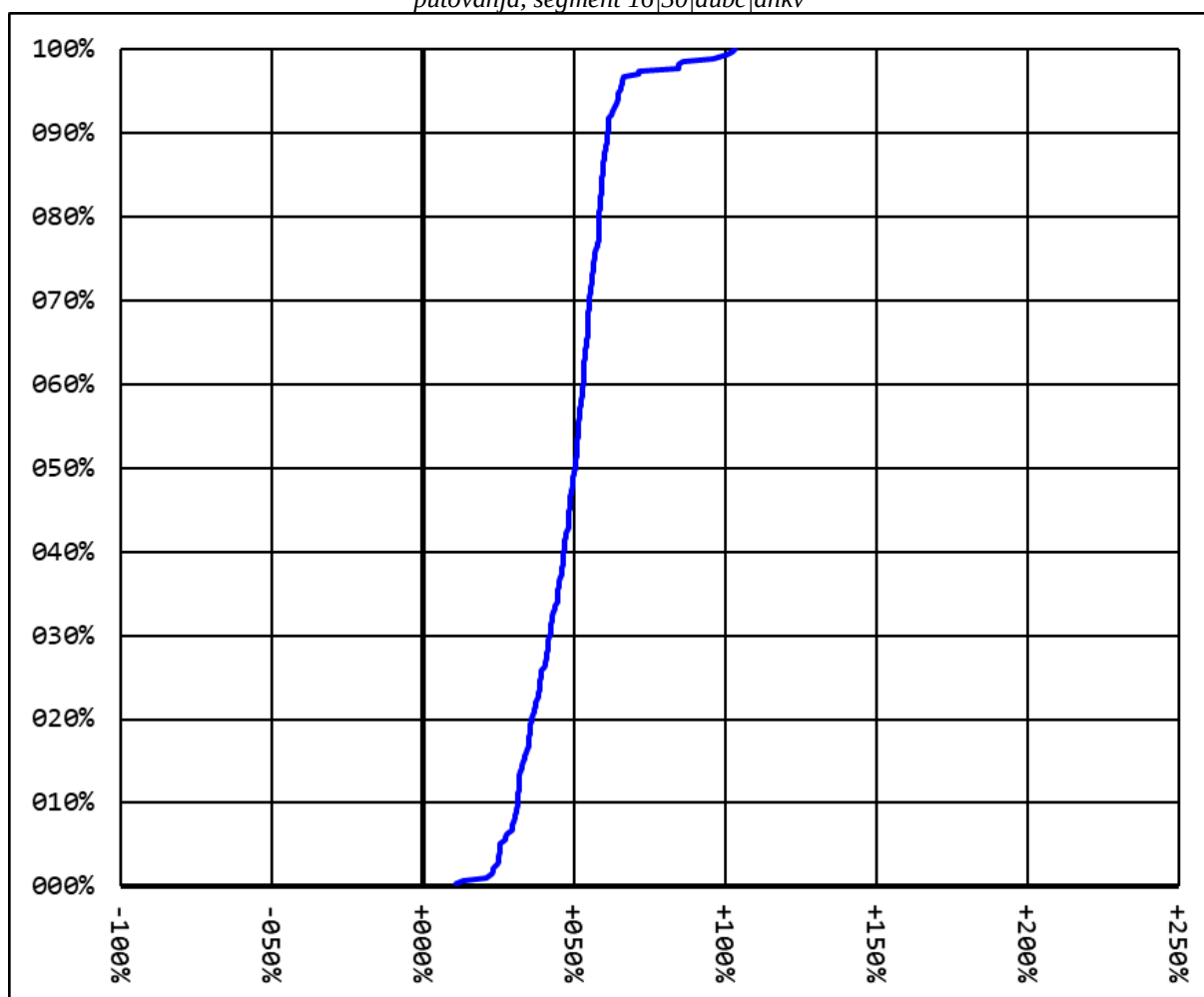


segment = 15|30|dnkv|dubc
duljina segmenta = 1,9km
frekvencija = 24v/h

idealno vrijeme = 4'53"
idealna brzina = 23km/h
broj uzoraka = 267

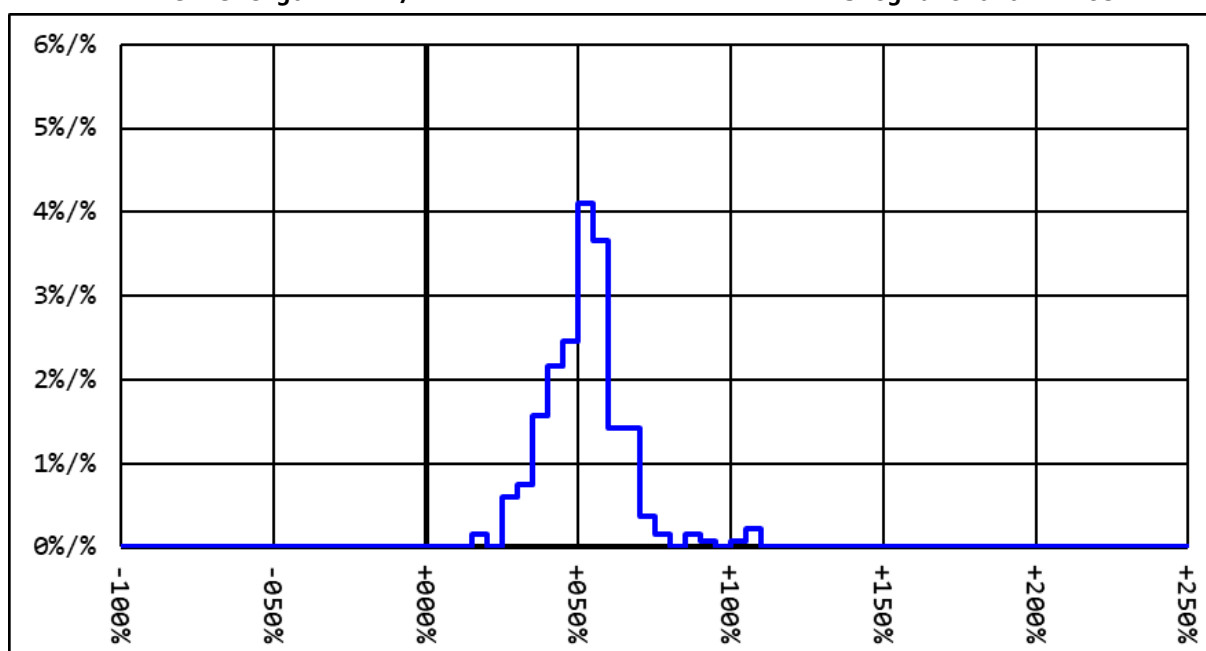


Prilog 16. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 16|30|dubc|dnkv

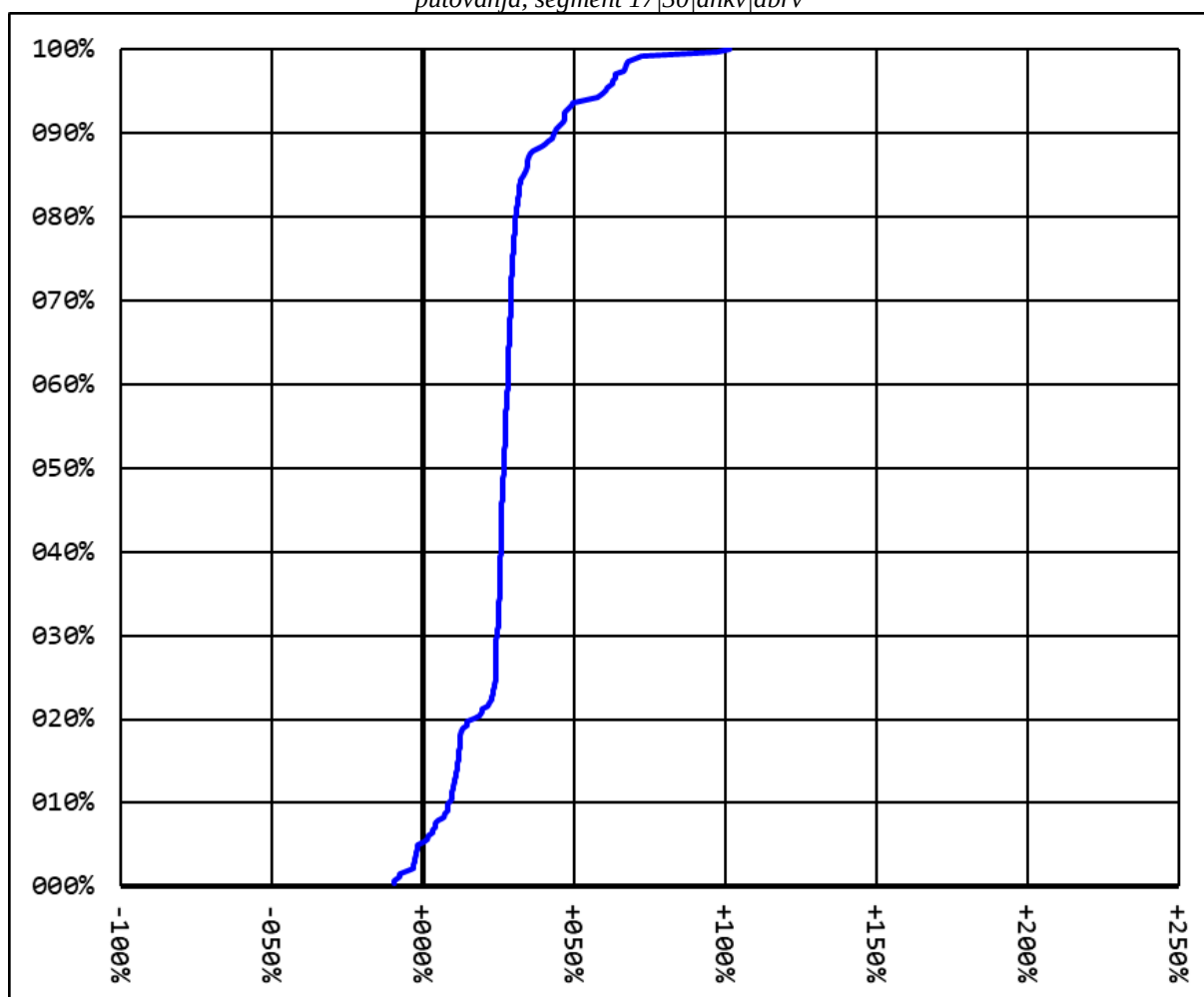


segment = 16|30|dubc|dnkv
duljina segmenta = 1,7km
frekvencija = 24v/h

idealno vrijeme = 4'11"
idealna brzina = 25km/h
broj uzoraka = 268

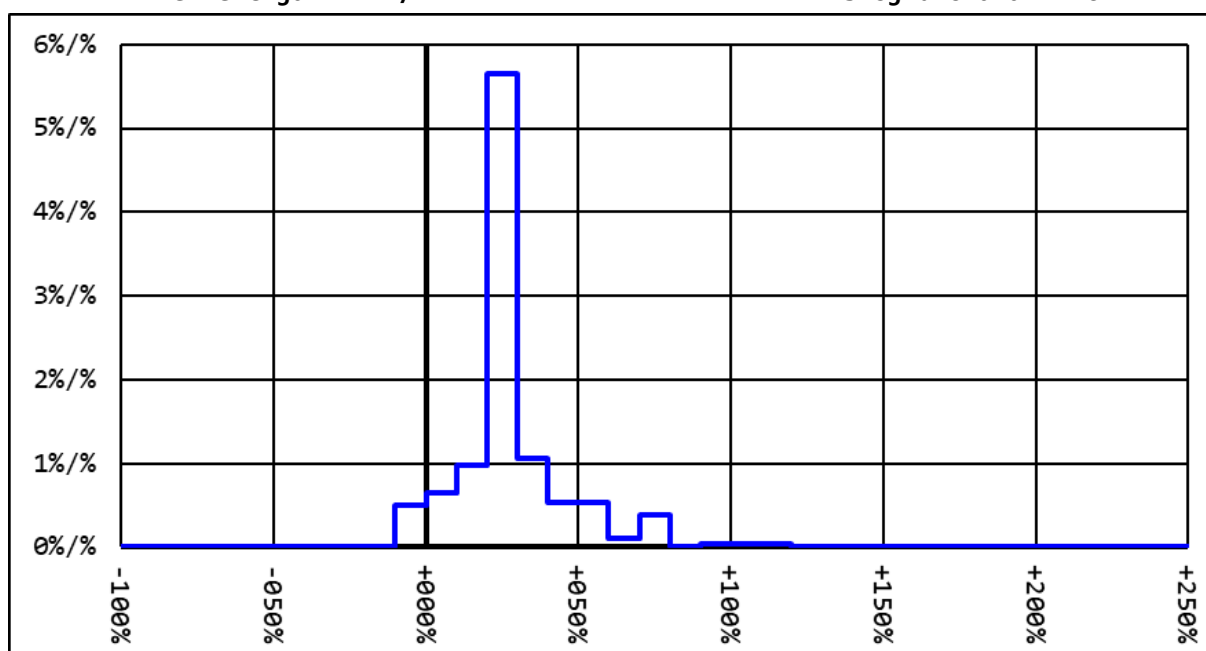


Prilog 17. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 17|30|dnkv|dbrv

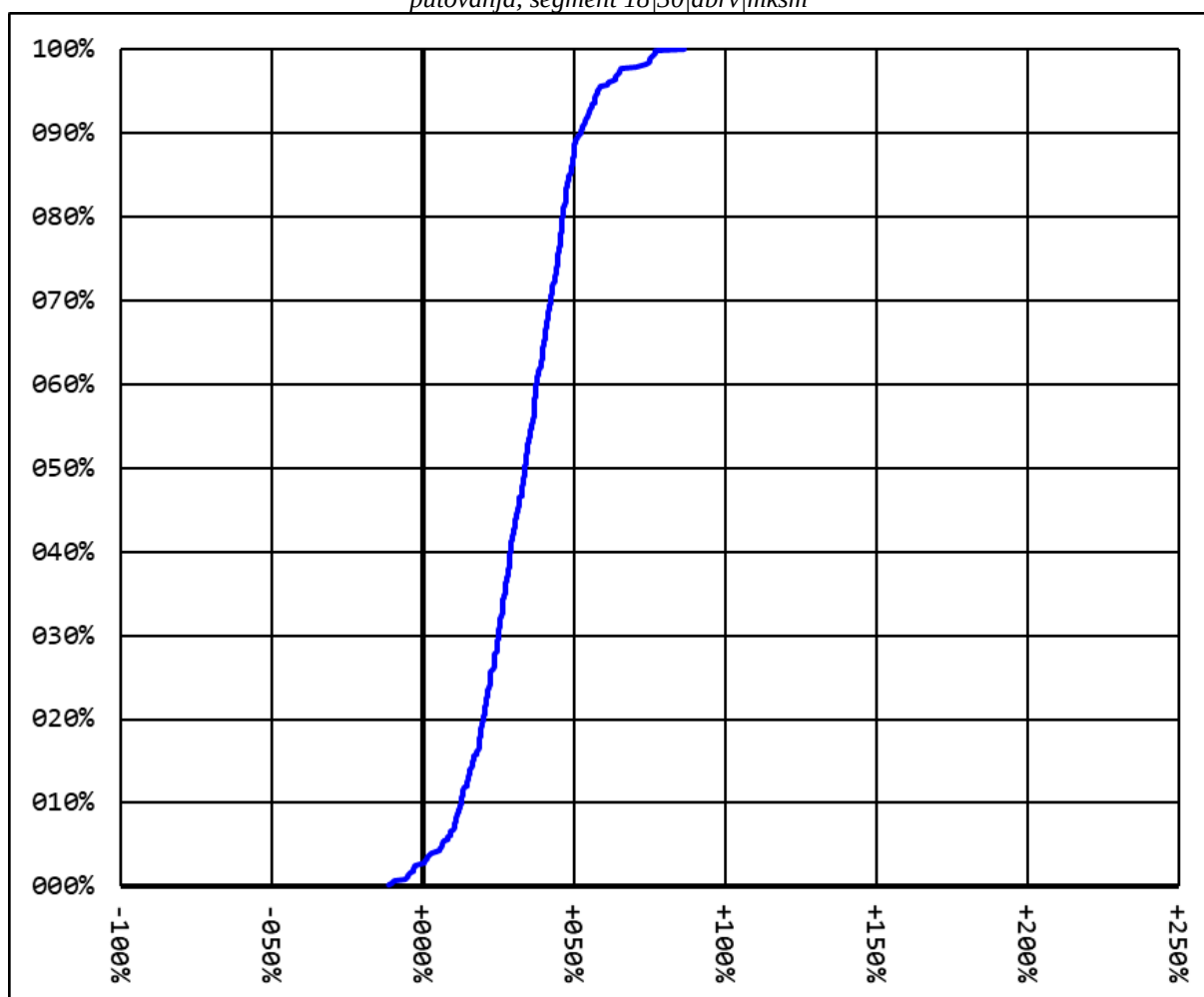


segment = 17|30|dnkv|dbrv
duljina segmenta = 1,6km
frekvencija = 24v/h

idealno vrijeme = 4'28"
idealna brzina = 21km/h
broj uzoraka = 264

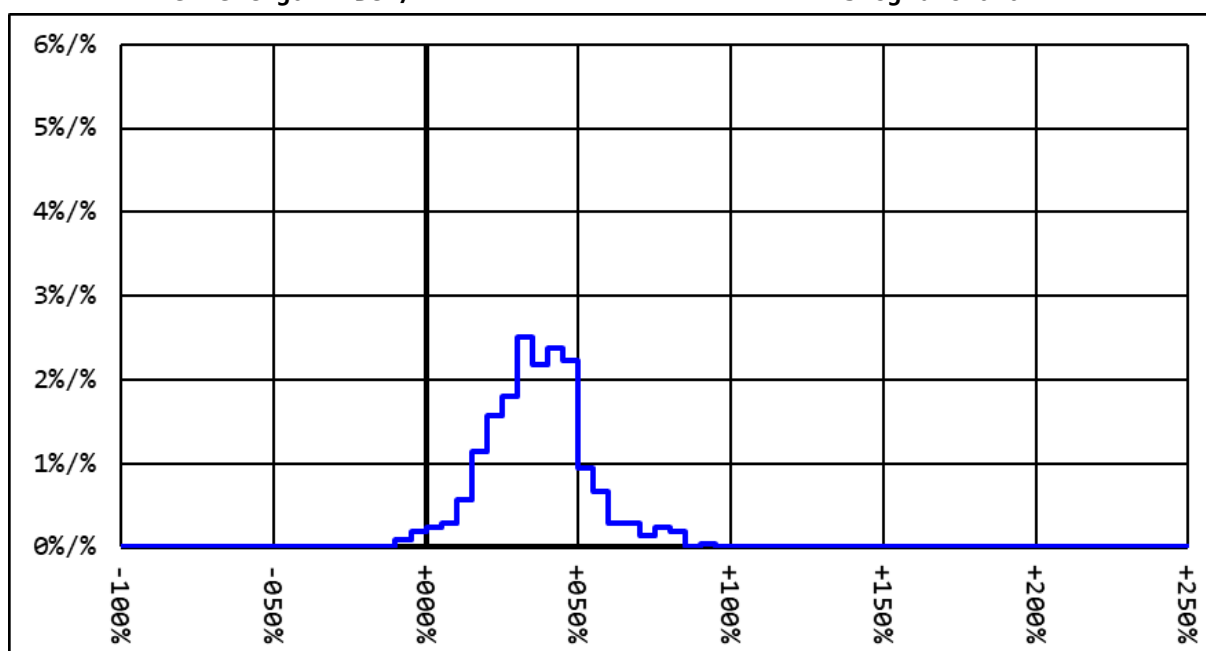


Prilog 18. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 18|30|dbrv|mksm

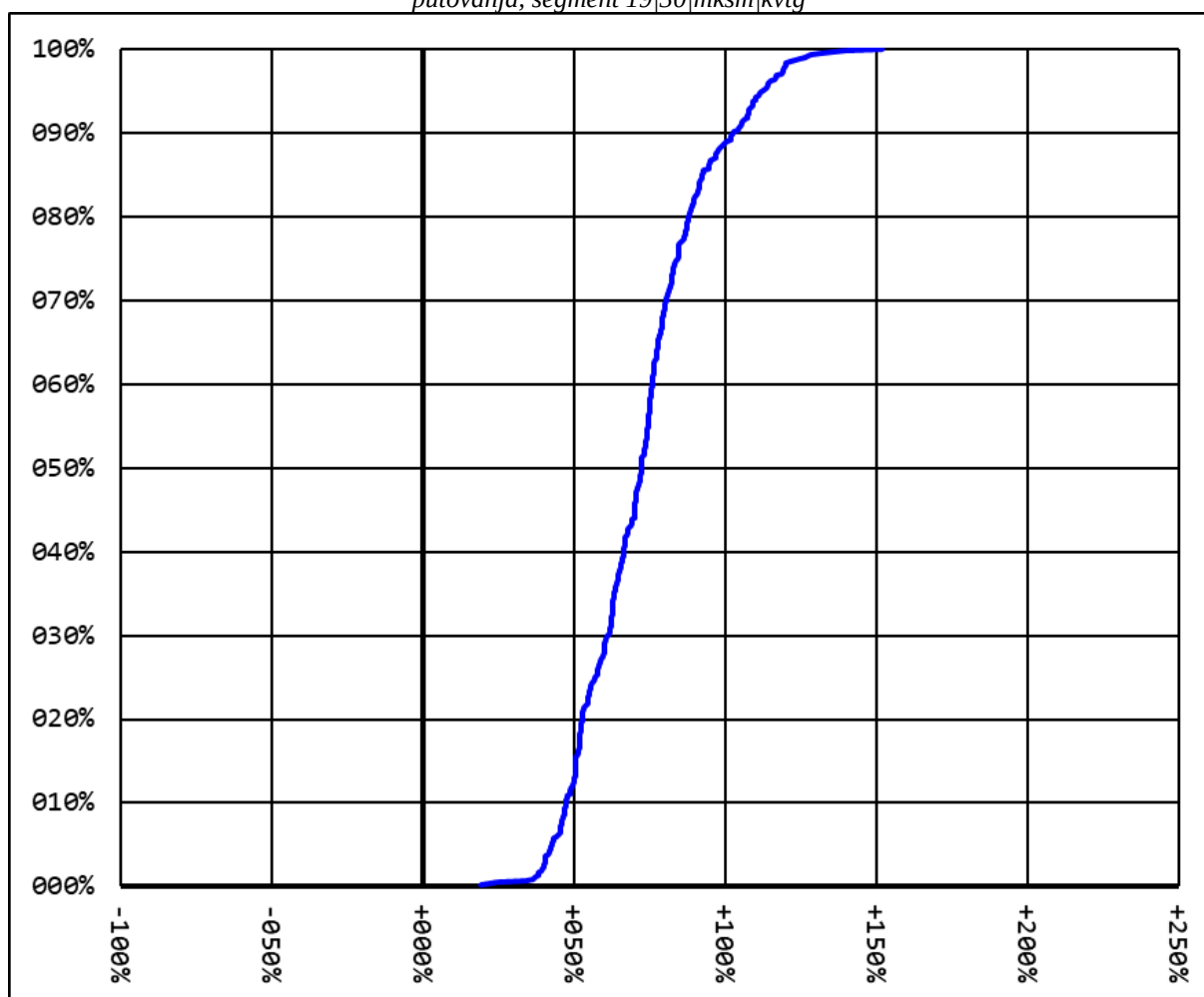


segment = 18|30|dbrv|mksm
 duljina segmenta = 1,8km
 frekvencija = 38v/h

idealno vrijeme = 3'48"
 idealna brzina = 29km/h
 broj uzoraka = 422

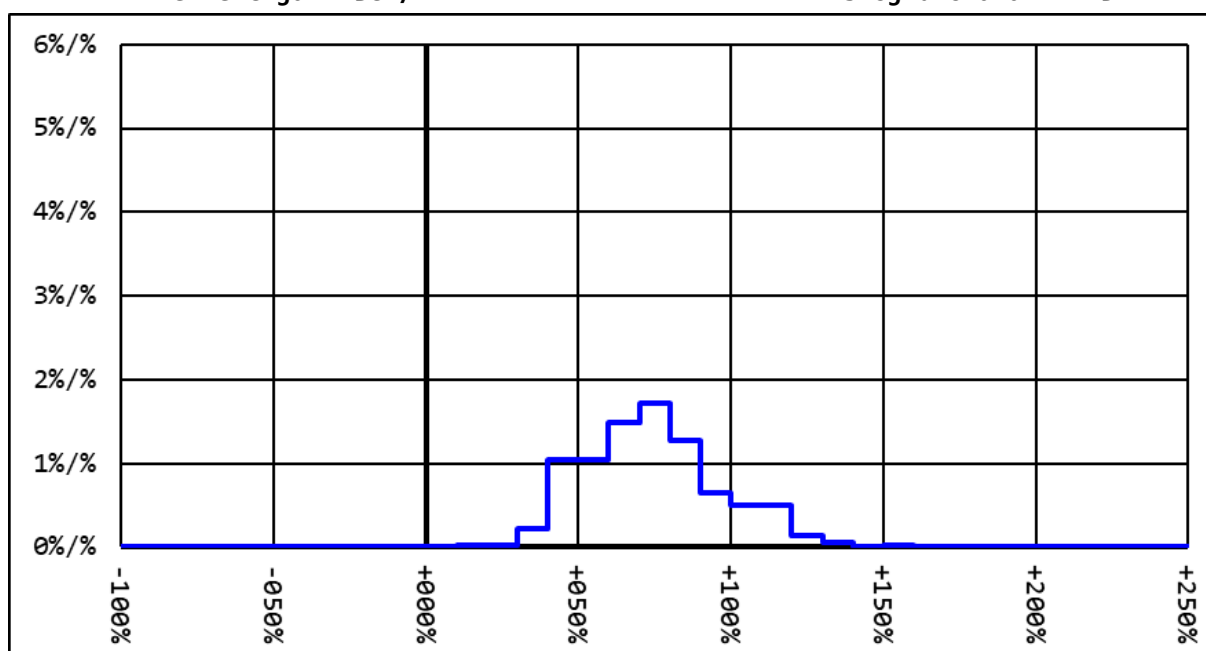


Prilog 19. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 19|30|mksm|kvtg

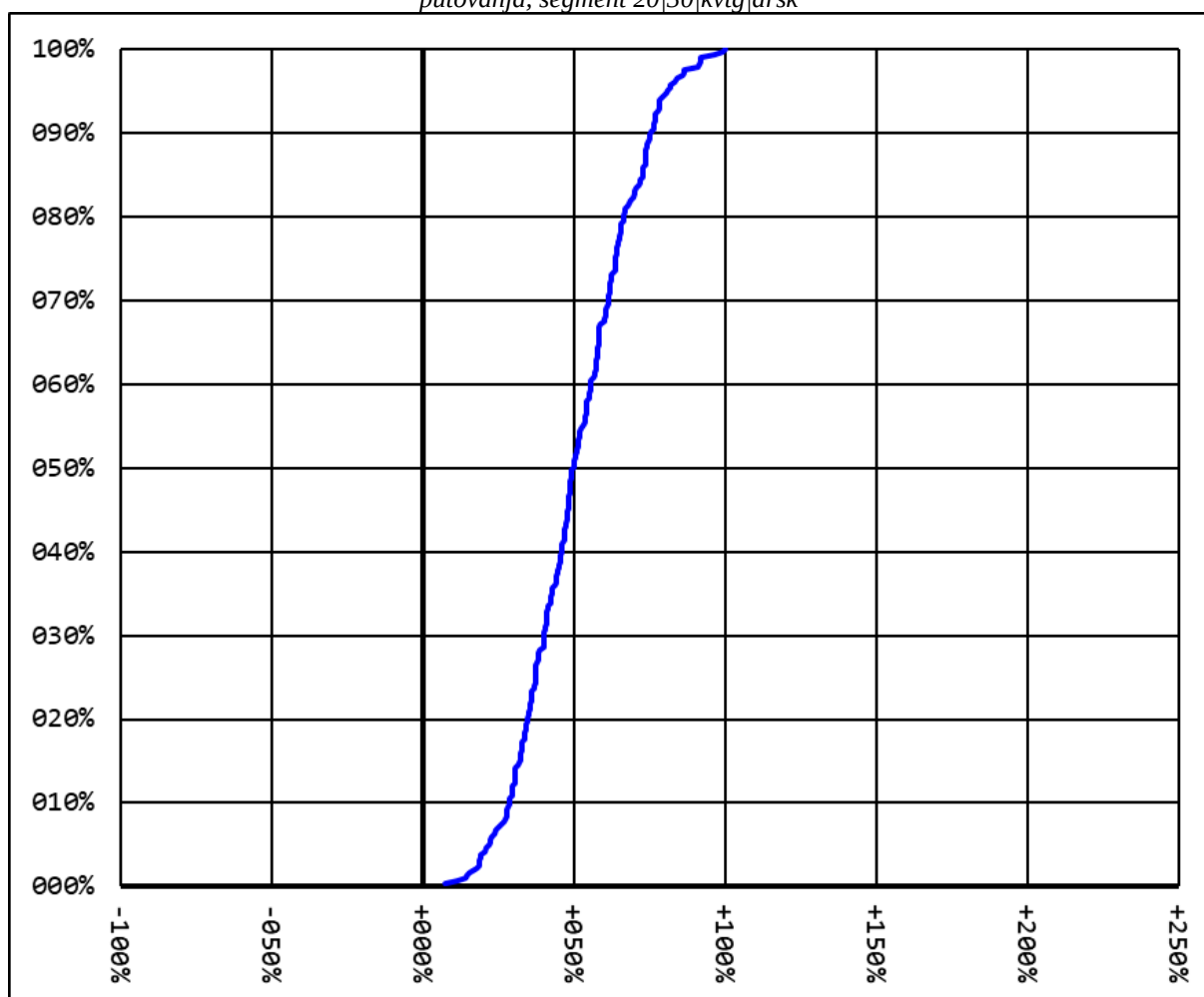


segment = 19|30|mksm|kvtg
duljina segmenta = 1,4km
frekvencija = 38v/h

idealno vrijeme = 4'21"
idealna brzina = 20km/h
broj uzoraka = 415

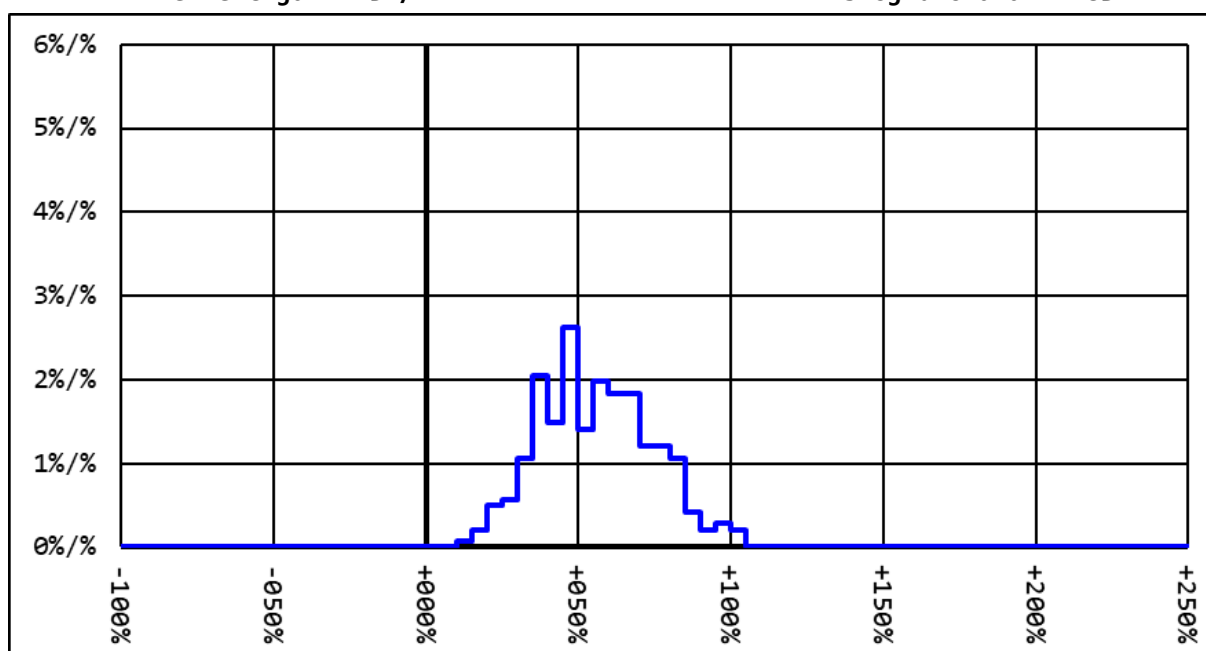


Prilog 20. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 20|30|kvtg|drsk

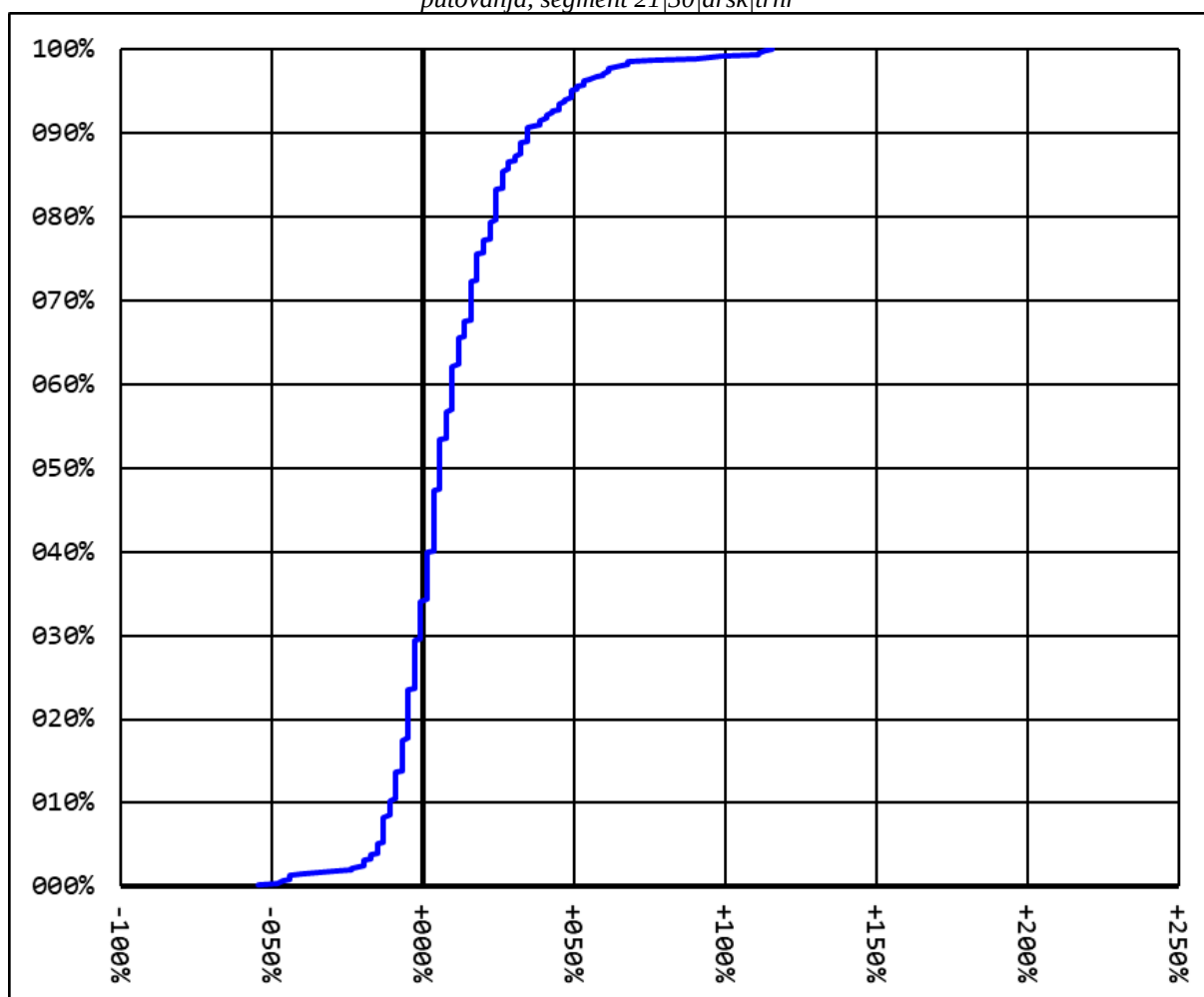


segment = 20|30|kvtg|drsk
 duljina segmenta = 1,1km
 frekvencija = 25v/h

idealno vrijeme = 3'10"
 idealna brzina = 22km/h
 broj uzoraka = 283



Prilog 21. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 21|30|drsk|trhr



segment = 21|30|drsk|trhr

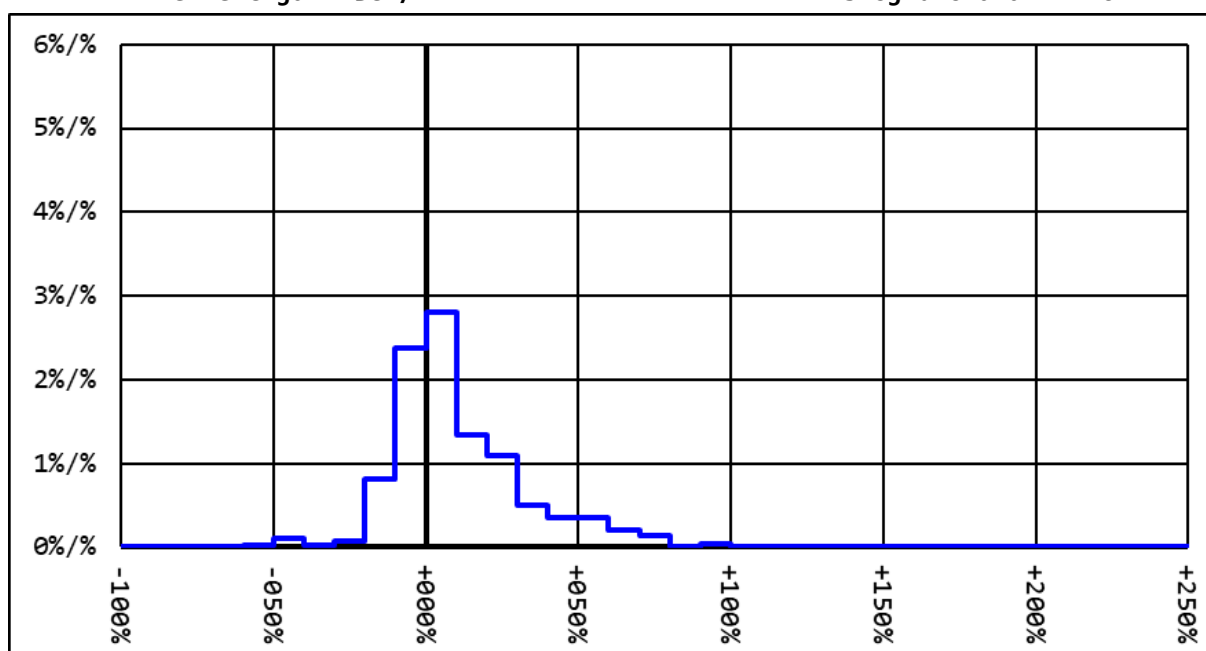
idealno vrijeme = 0'48"

duljina segmenta = 0,1km

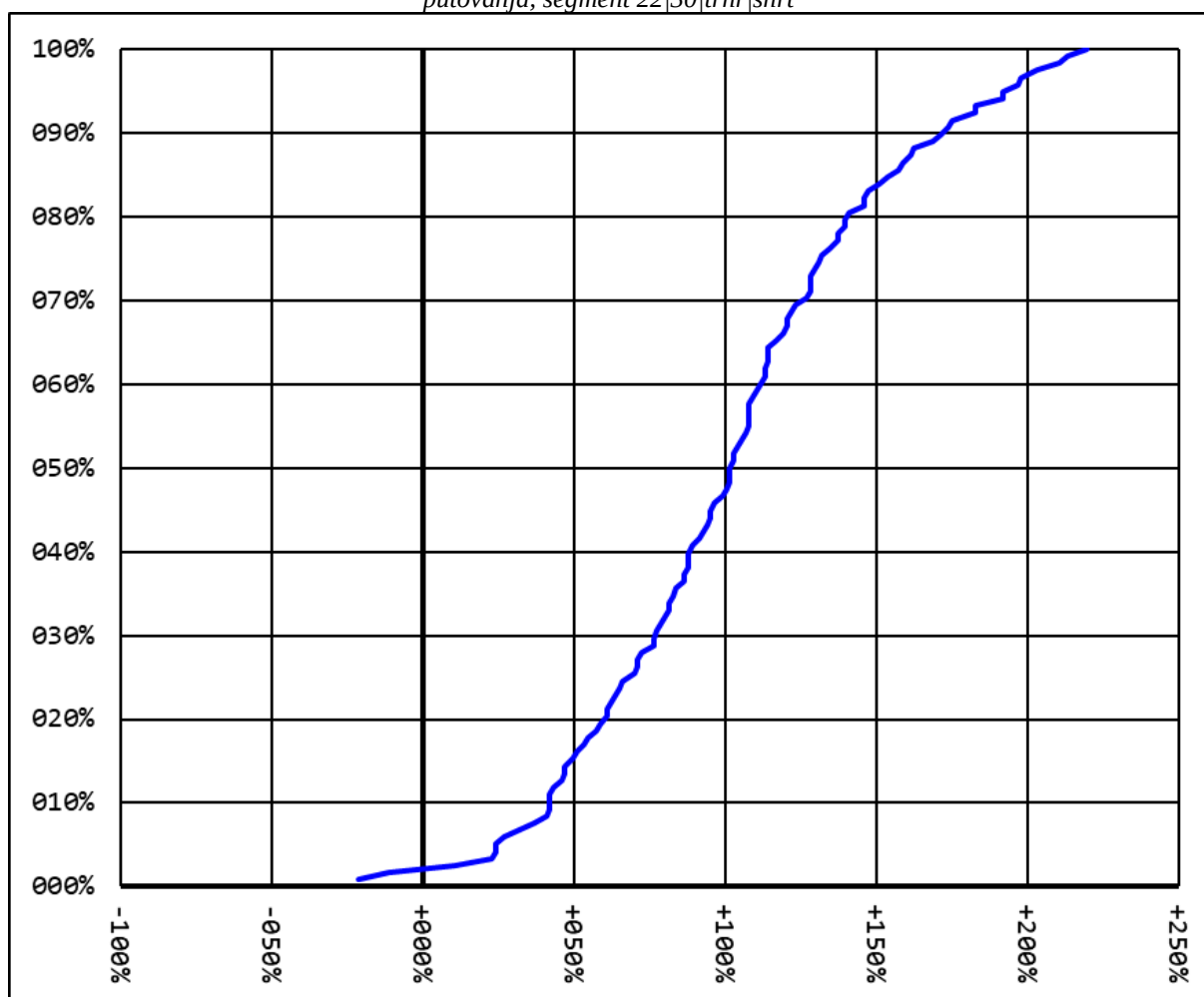
idealna brzina = 08km/h

frekvencija = 38v/h

broj uzoraka = 446

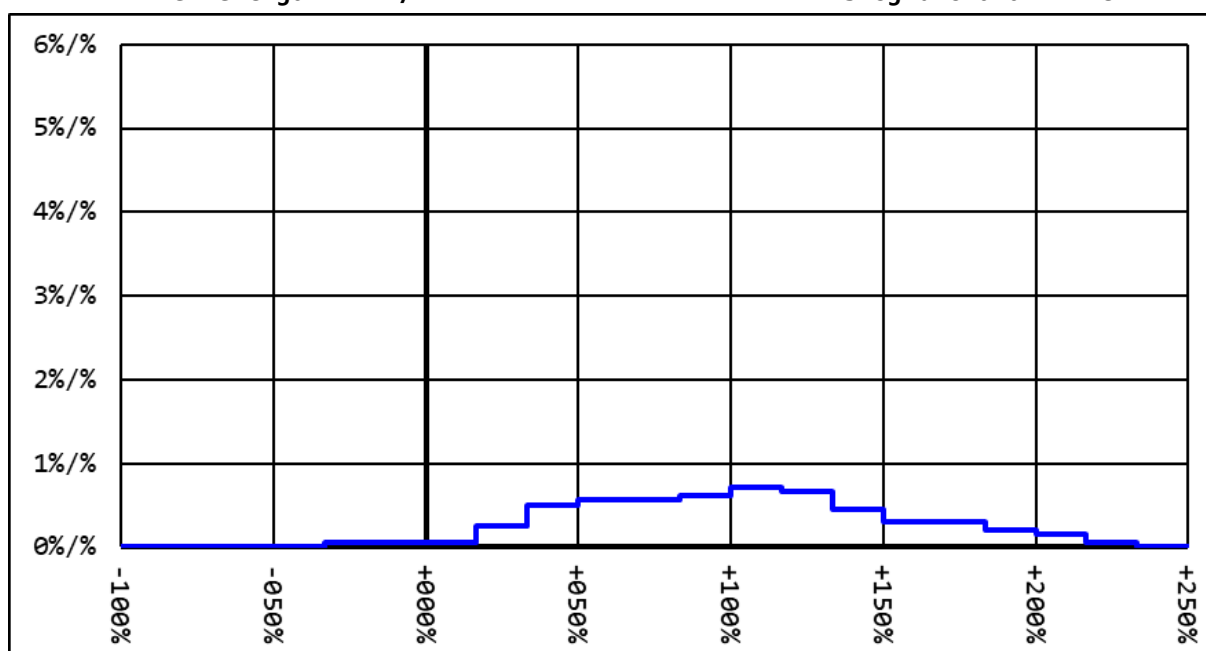


Prilog 22. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 22|30|trhr|shrt

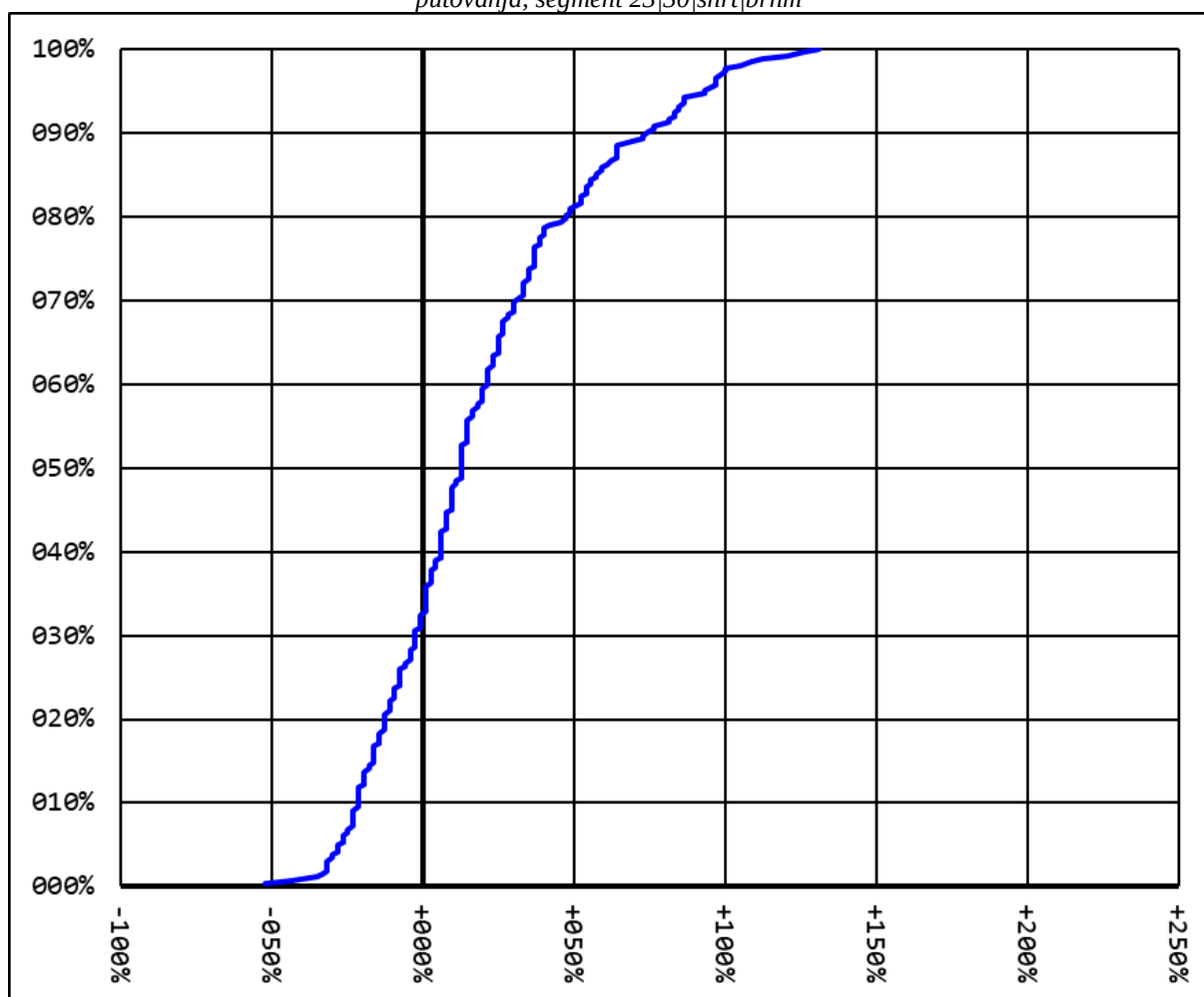


segment = 22|30|trhr|shrt
duljina segmenta = 0,5km
frekvencija = 11v/h

idealno vrijeme = 1'19"
idealna brzina = 24km/h
broj uzoraka = 118



Prilog 23. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 23|30|shrt|brnm



segment = 23|30|shrt|brnm

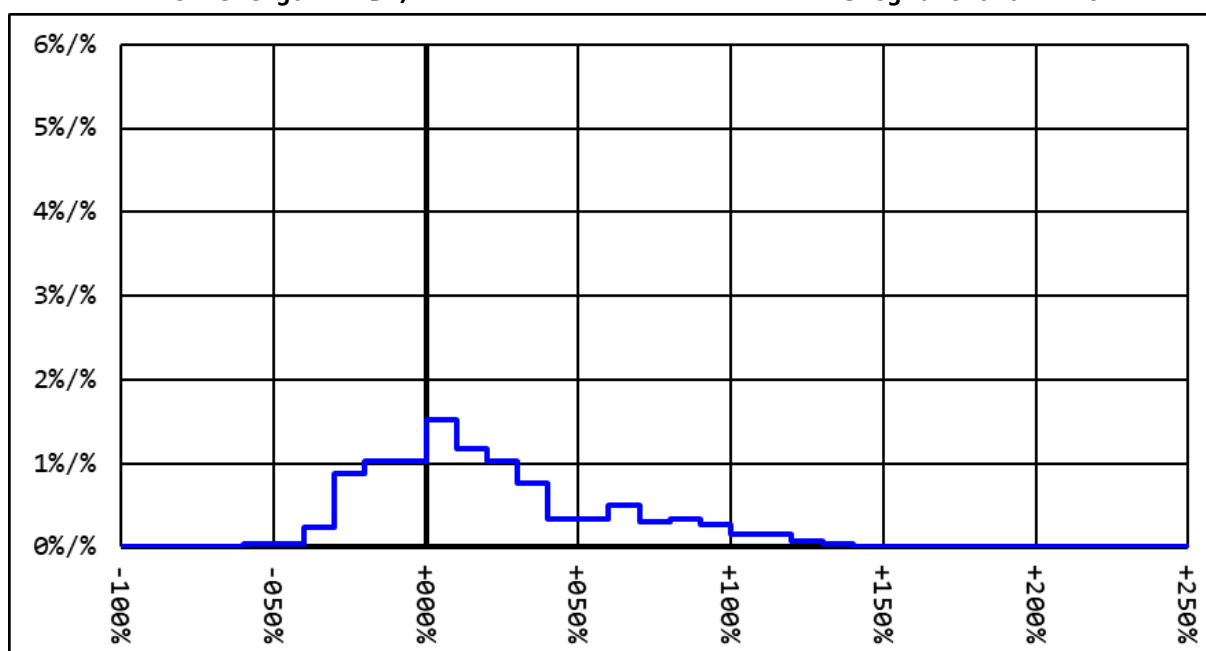
idealno vrijeme = 0'58"

duljina segmenta = 0,2km

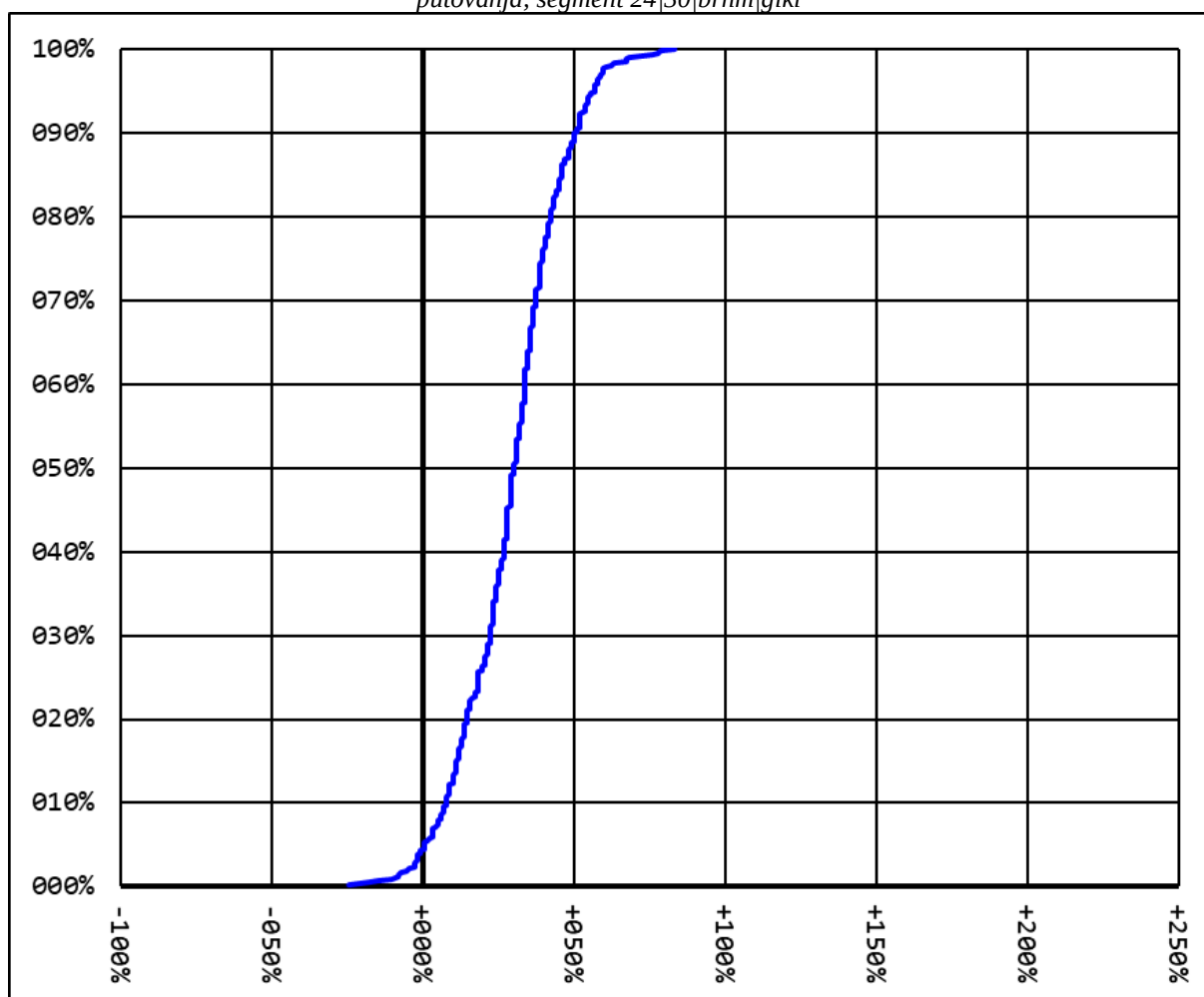
idealna brzina = 15km/h

frekvencija = 23v/h

broj uzoraka = 262

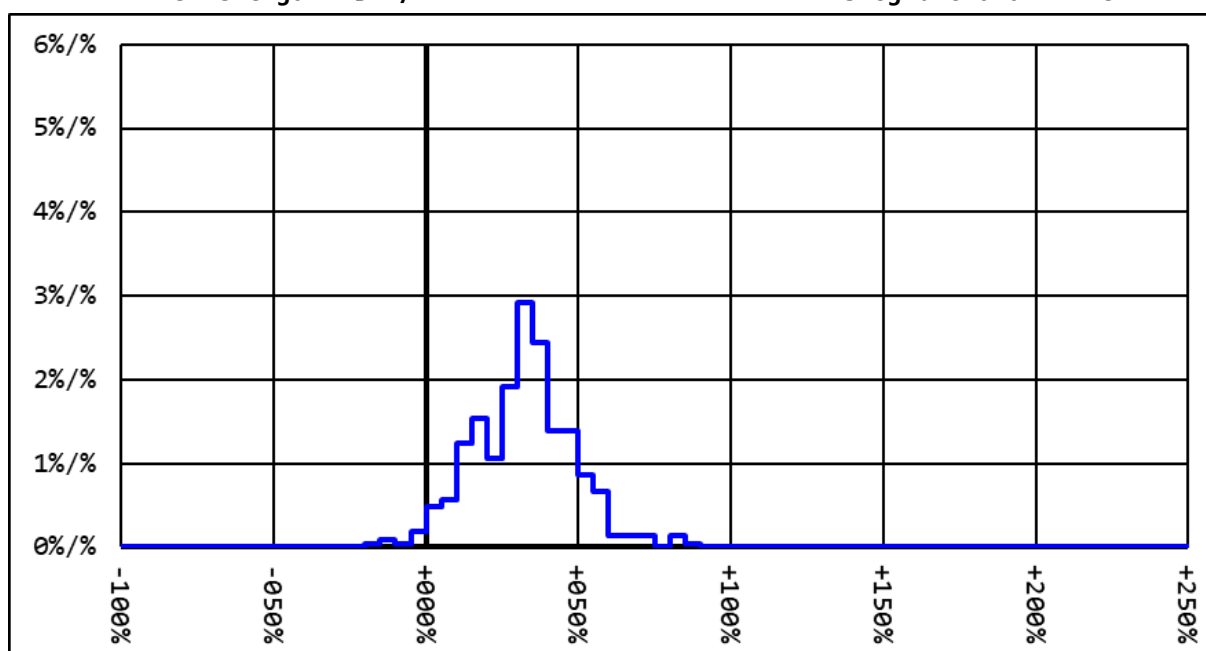


Prilog 24. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 24|30|brnm|glkl

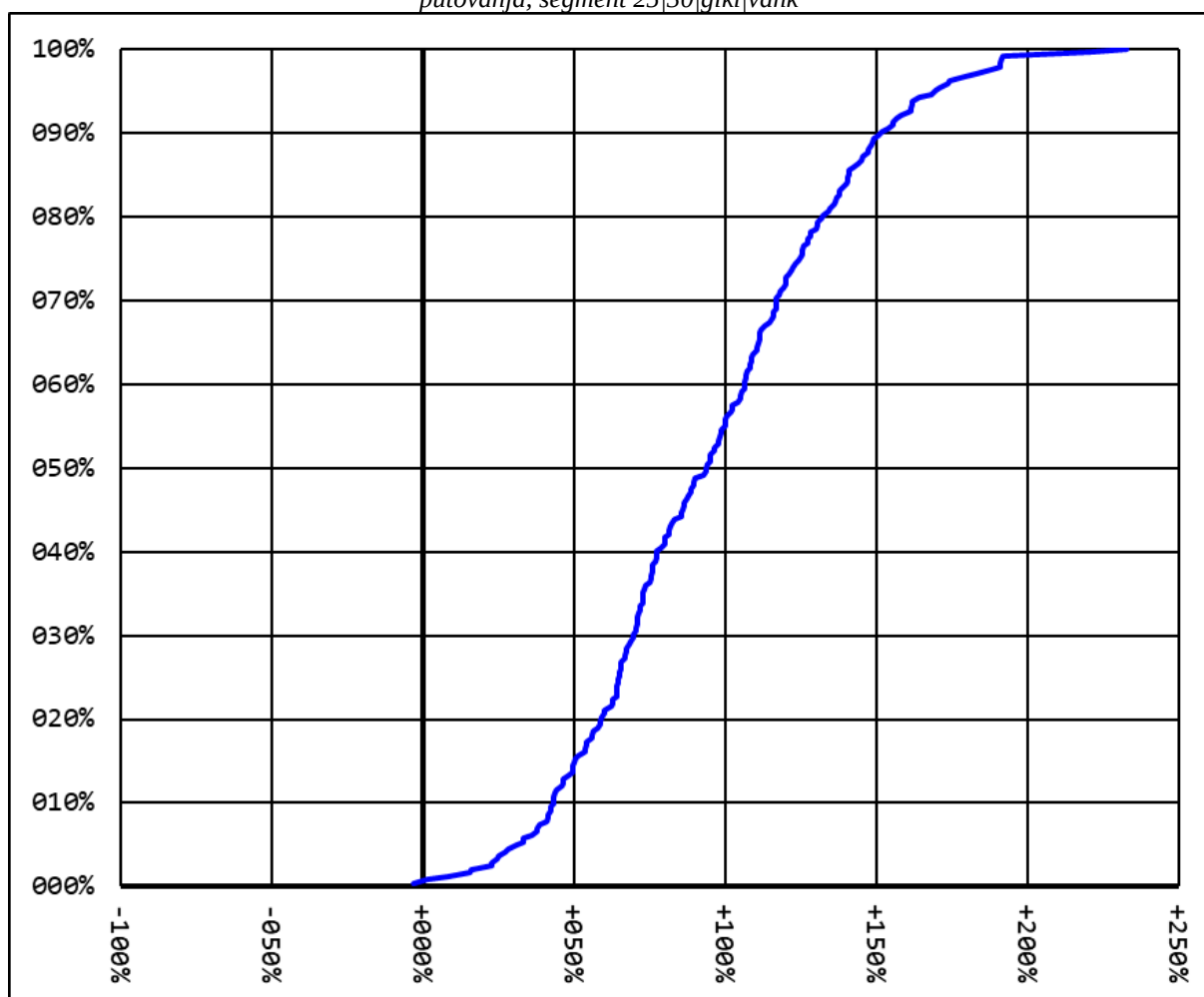


segment = 24|30|brnm|glkl
duljina segmenta = 0,5km
frekvencija = 37v/h

idealno vrijeme = 1'45"
idealna brzina = 17km/h
broj uzoraka = 418

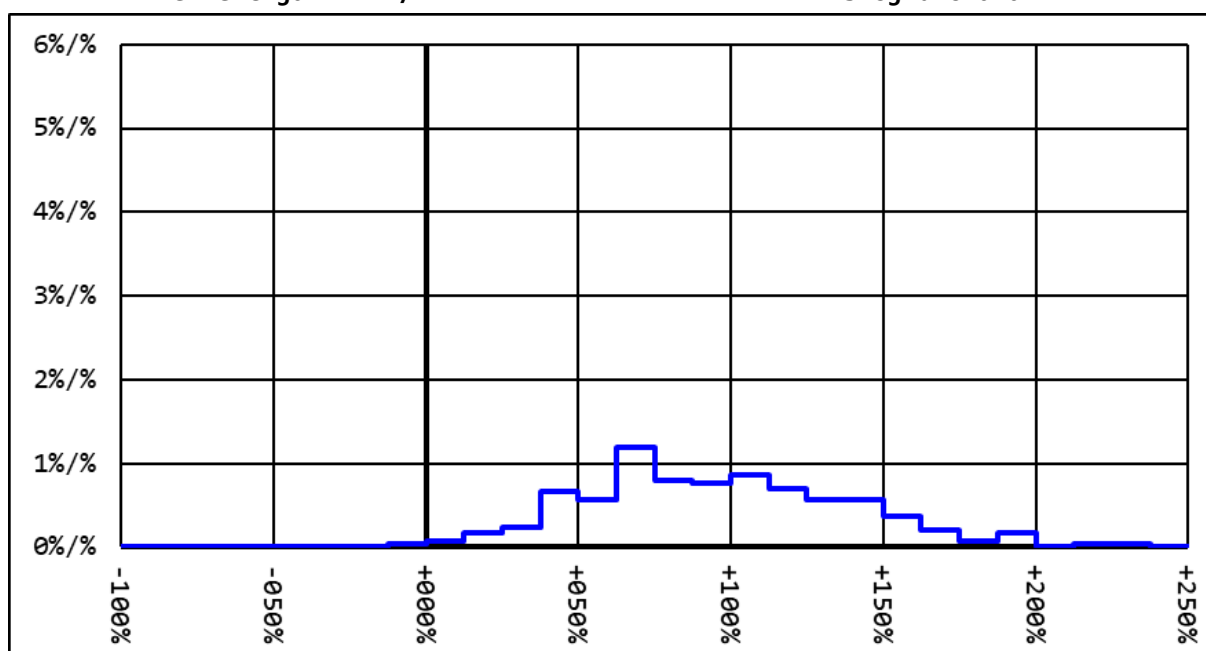


Prilog 25. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 25|30|glkl|vdnk

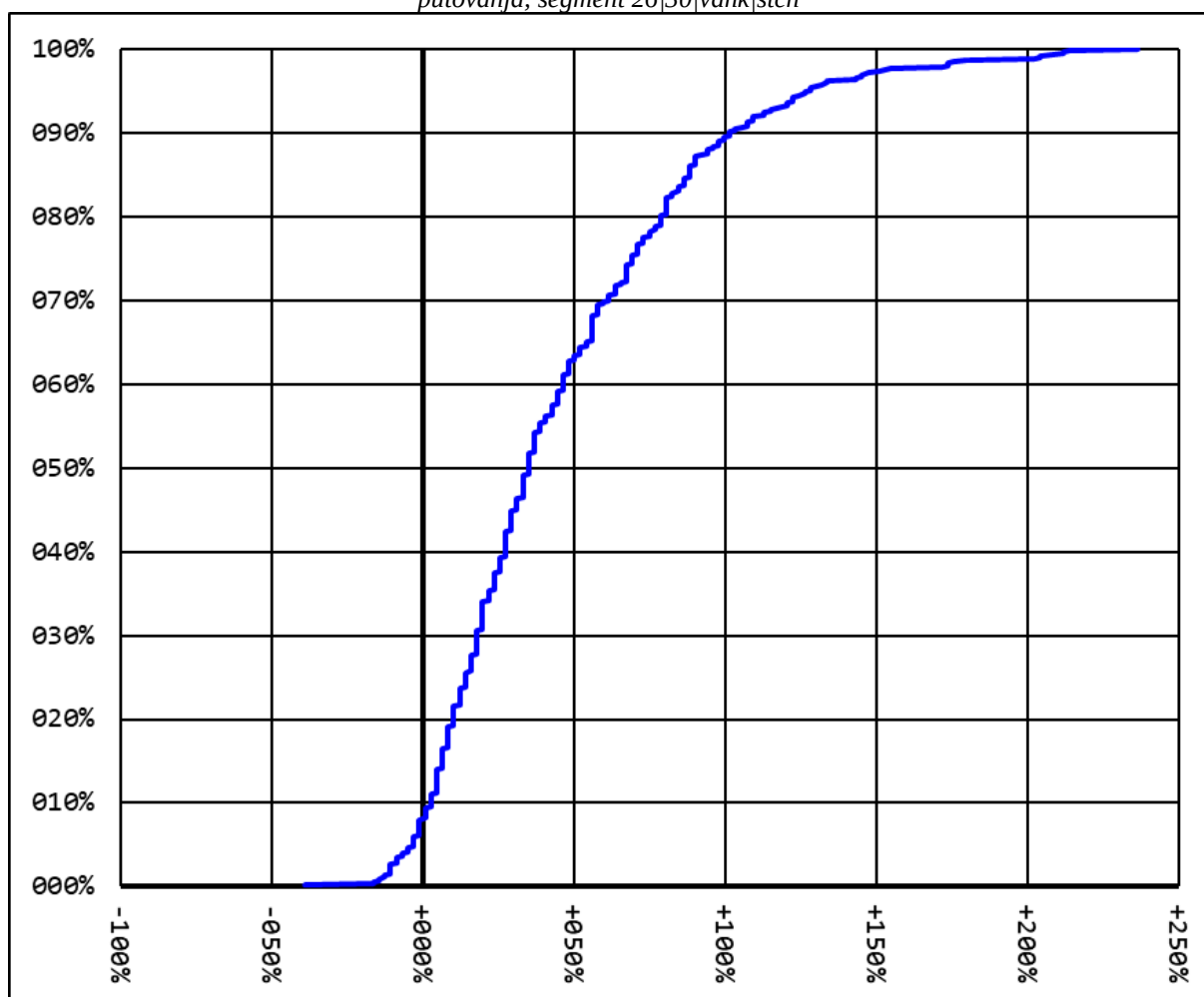


segment = 25|30|glkl|vdnk
duljina segmenta = 0,9km
frekvencija = 22v/h

idealno vrijeme = 2'53"
idealna brzina = 19km/h
broj uzoraka = 242



Prilog 26. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 26|30|vdk|stcn



segment = 26|30|vdk|stcn

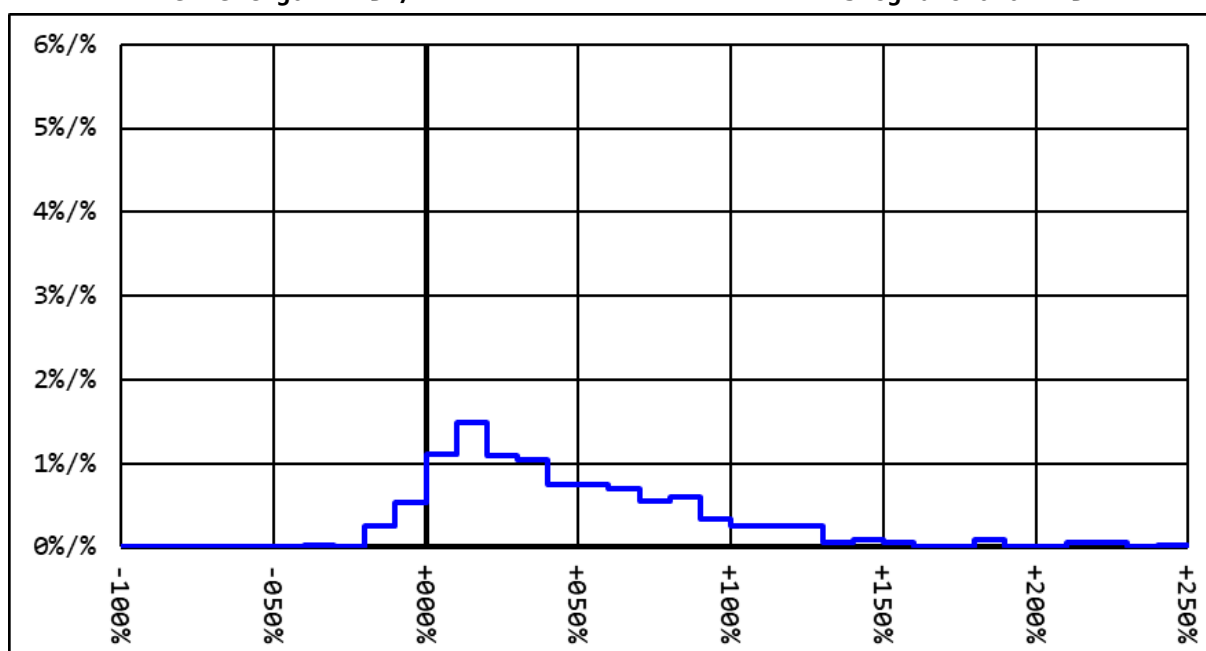
idealno vrijeme = 0'53"

duljina segmenta = 0,3km

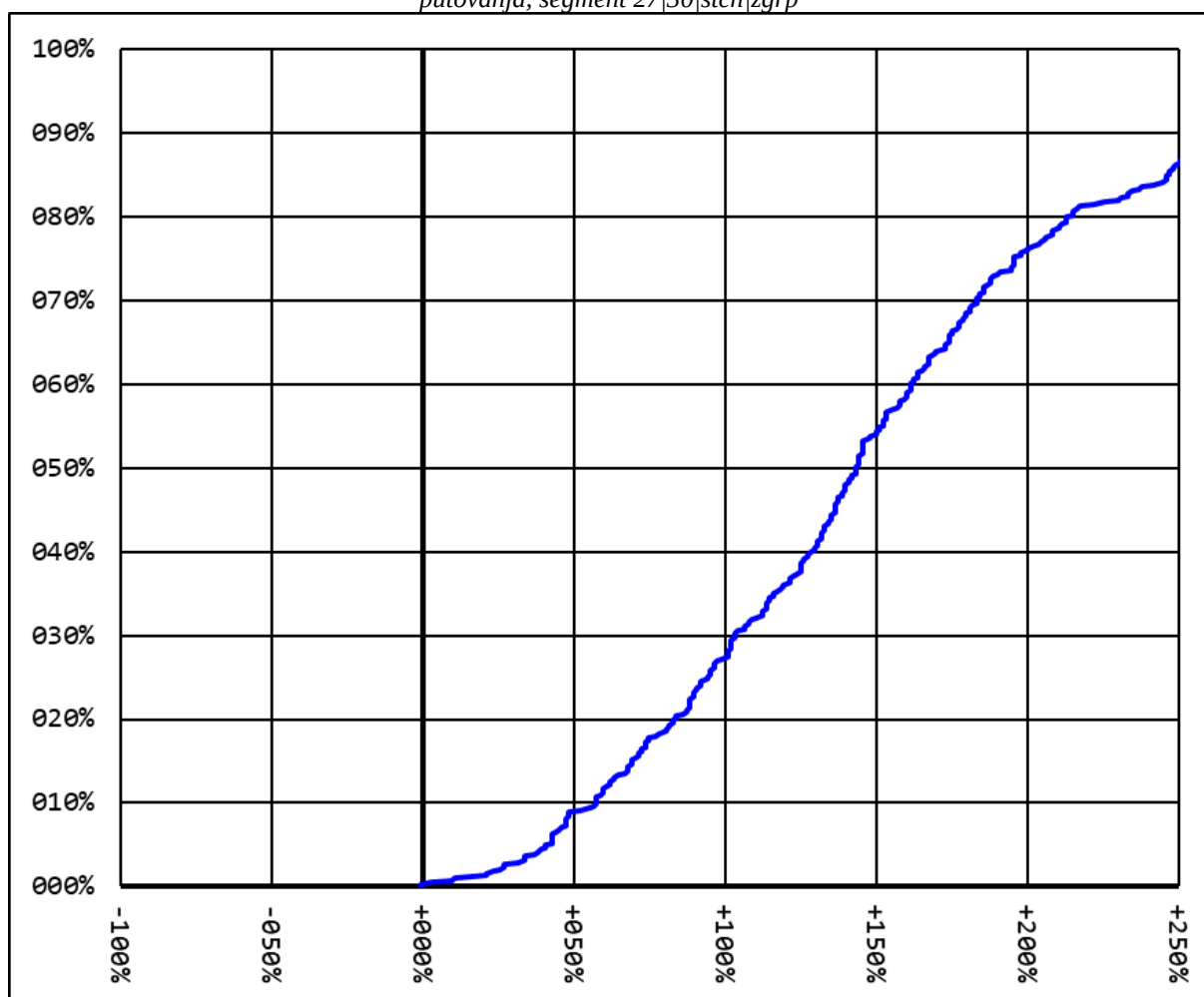
idealna brzina = 18km/h

frekvencija = 45v/h

broj uzoraka = 524

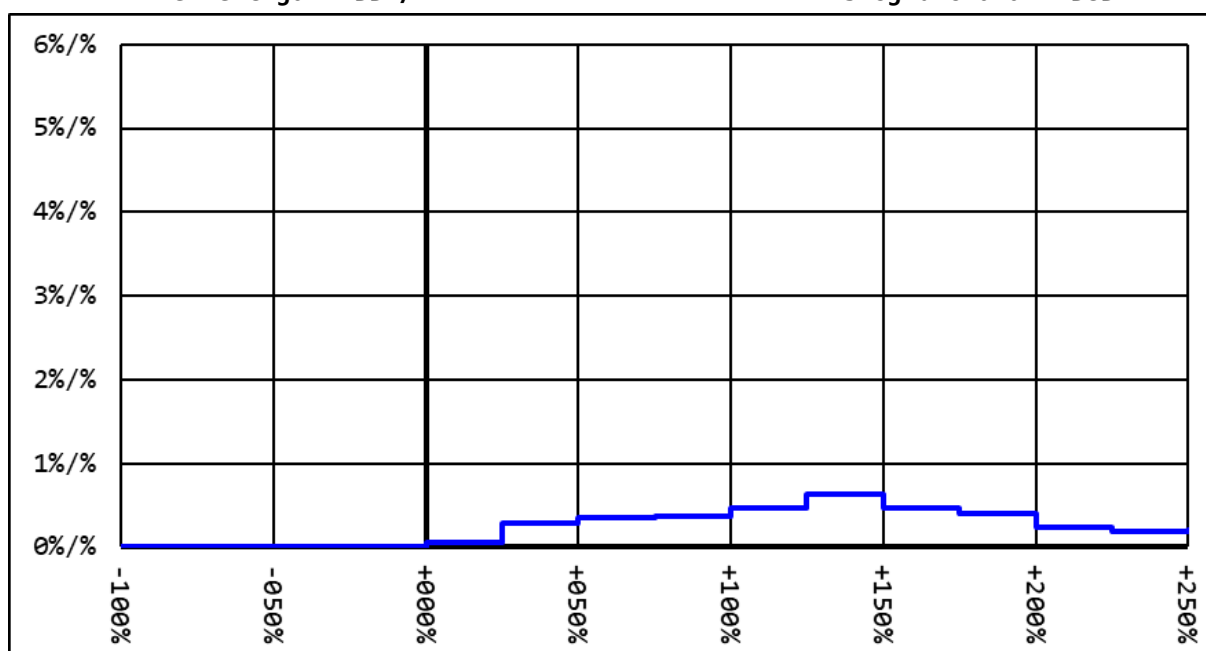


Prilog 27. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 27|30|stcn|zgrp

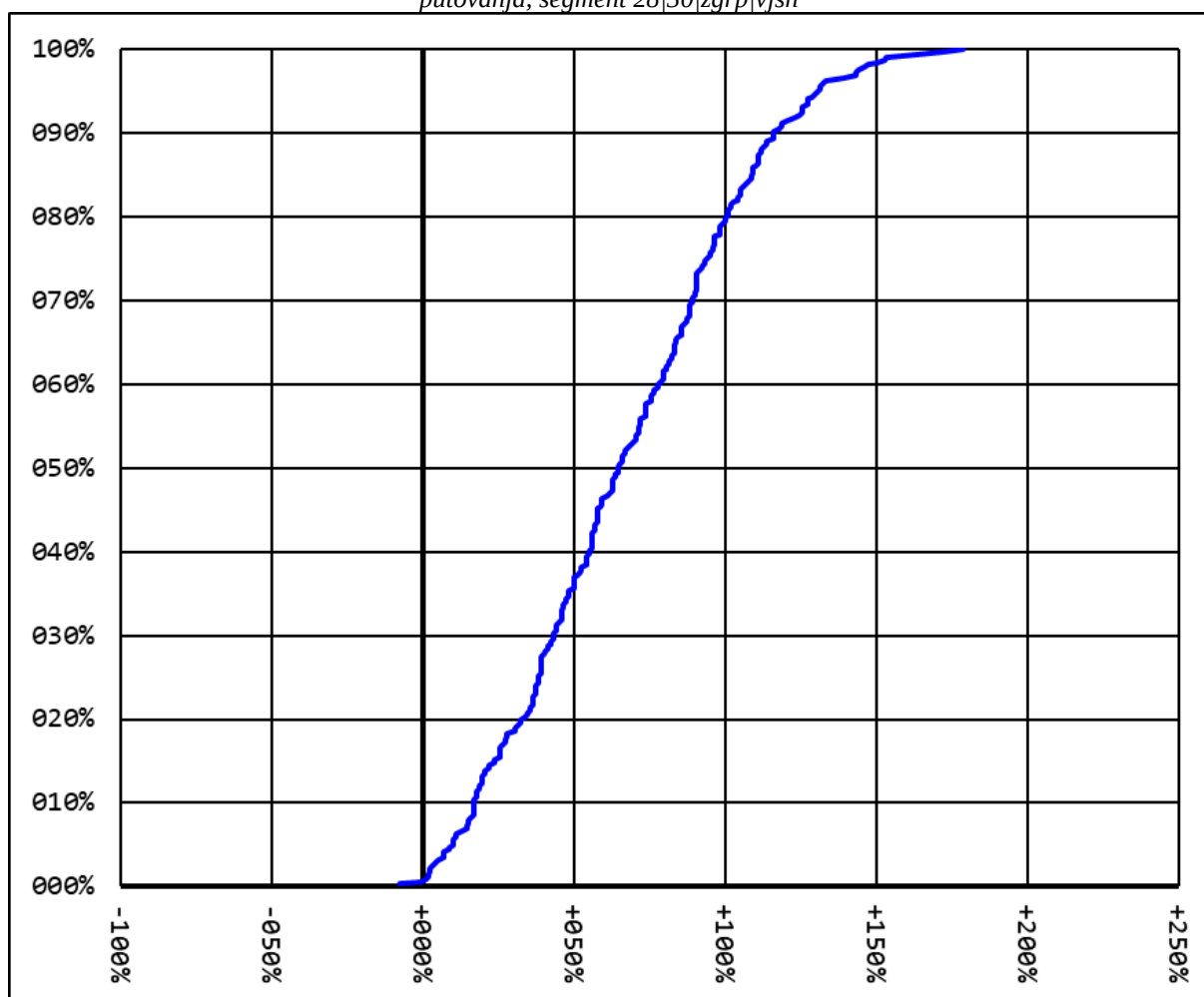


segment = 27|30|stcn|zgrp
duljina segmenta = 0,5km
frekvencija = 33v/h

idealno vrijeme = 1'28"
idealna brzina = 20km/h
broj uzoraka = 383

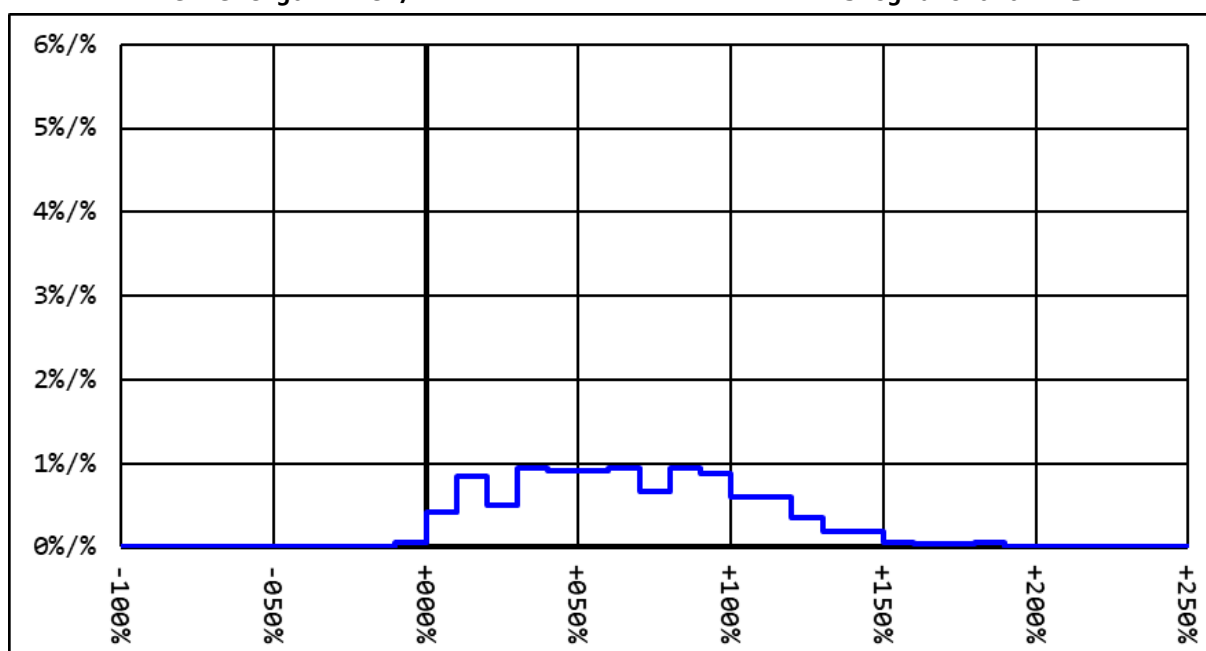


Prilog 28. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 28|30|zgrp|vjsn

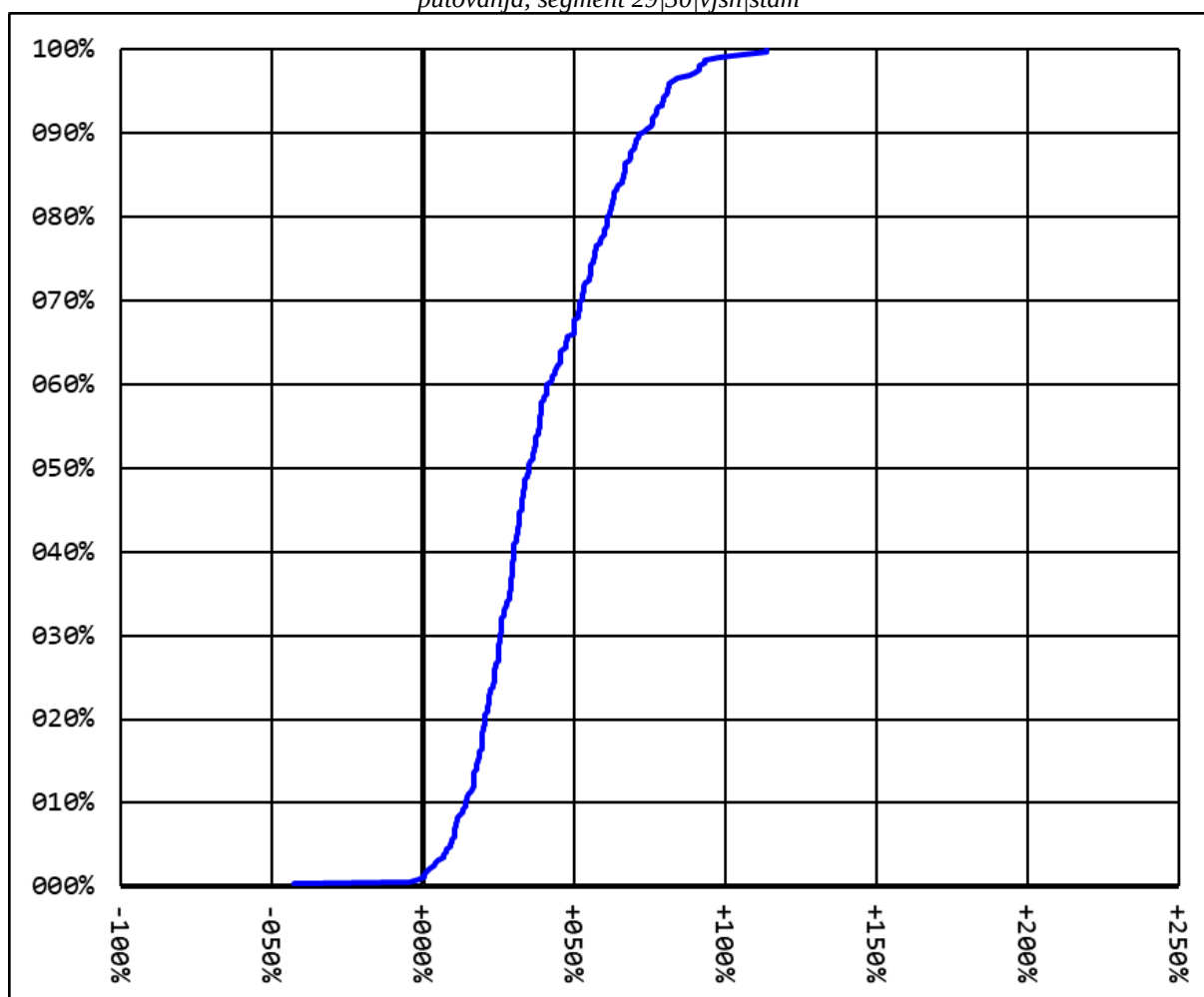


segment = 28|30|zgrp|vjsn
 duljina segmenta = 0,6km
 frekvencija = 28v/h

idealno vrijeme = 1'58"
 idealna brzina = 19km/h
 broj uzoraka = 317

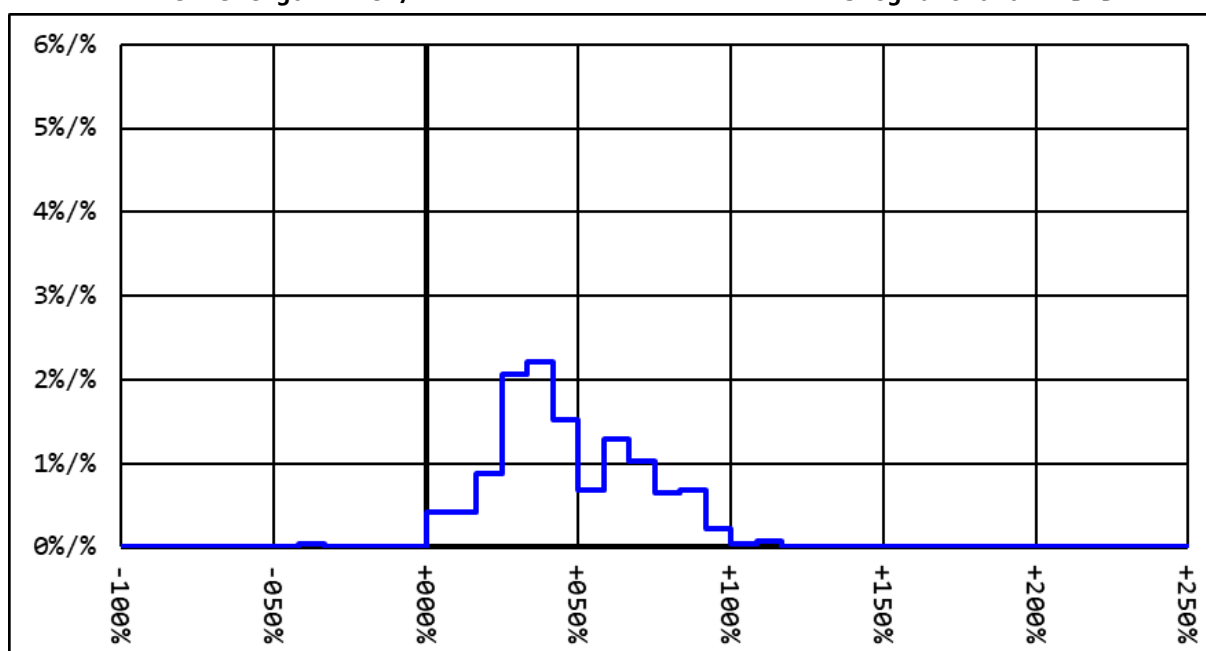


Prilog 29. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 29|30|vjsn|stdm

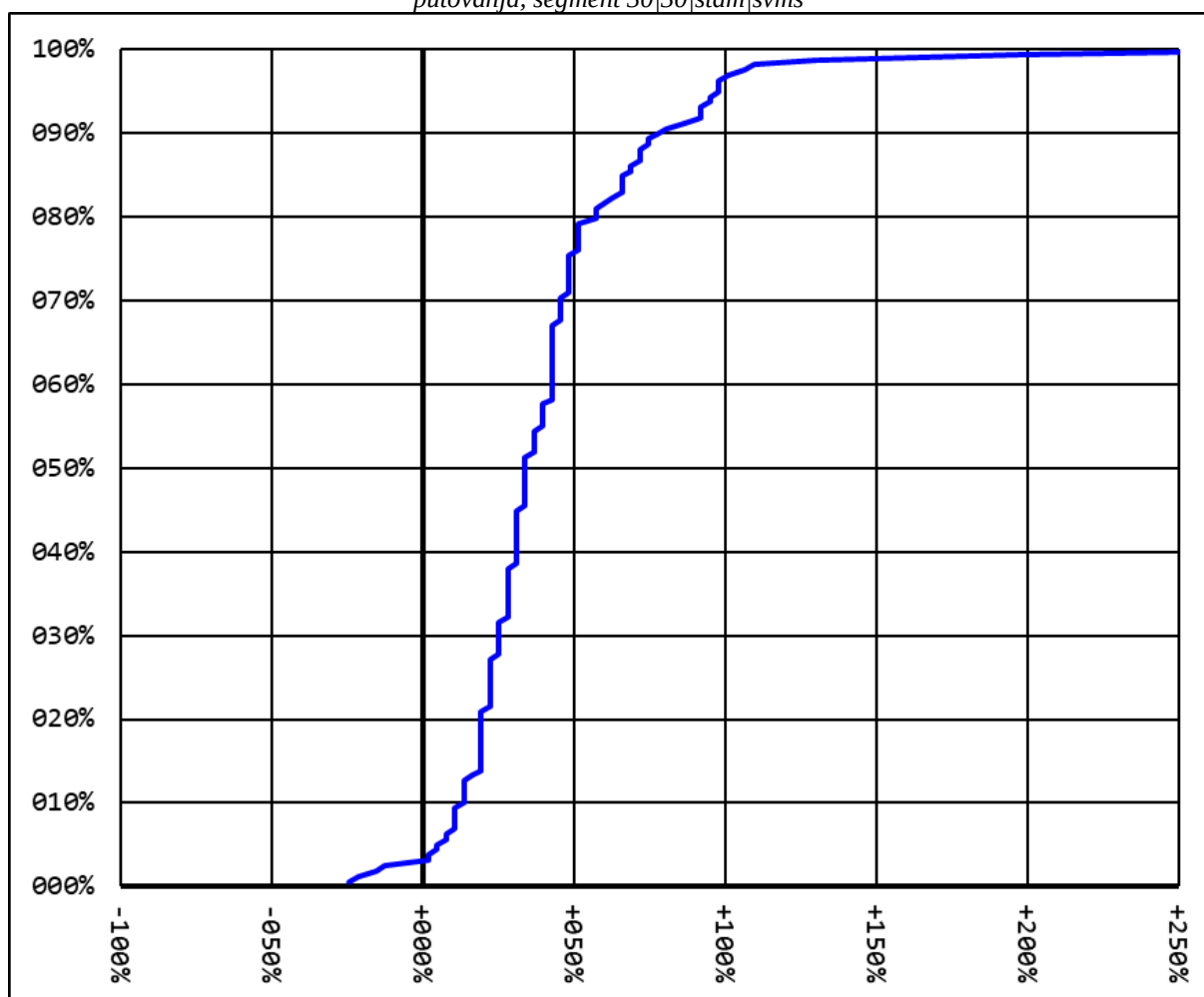


segment = 29|30|vjsn|stdm
duljina segmenta = 0,9km
frekvencija = 28v/h

idealno vrijeme = 2'46"
idealna brzina = 20km/h
broj uzoraka = 315

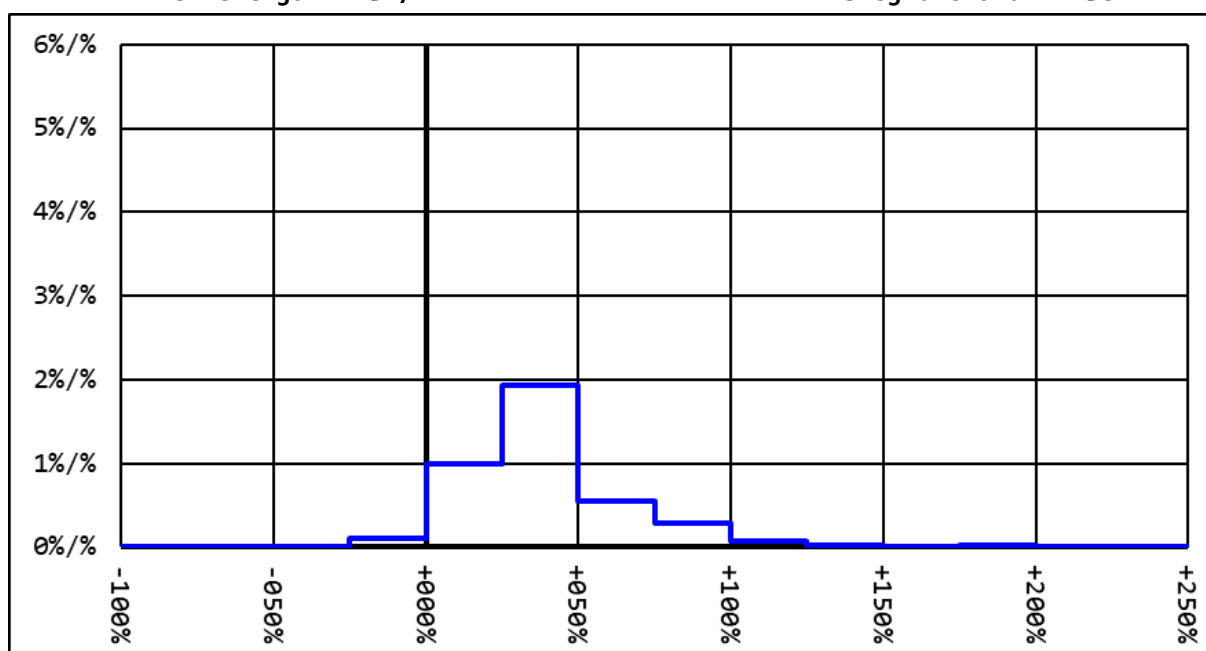


Prilog 30. Kumulativna i frekvencijska razdioba stvarnog vremena putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja, segment 30|30|stdm|svms

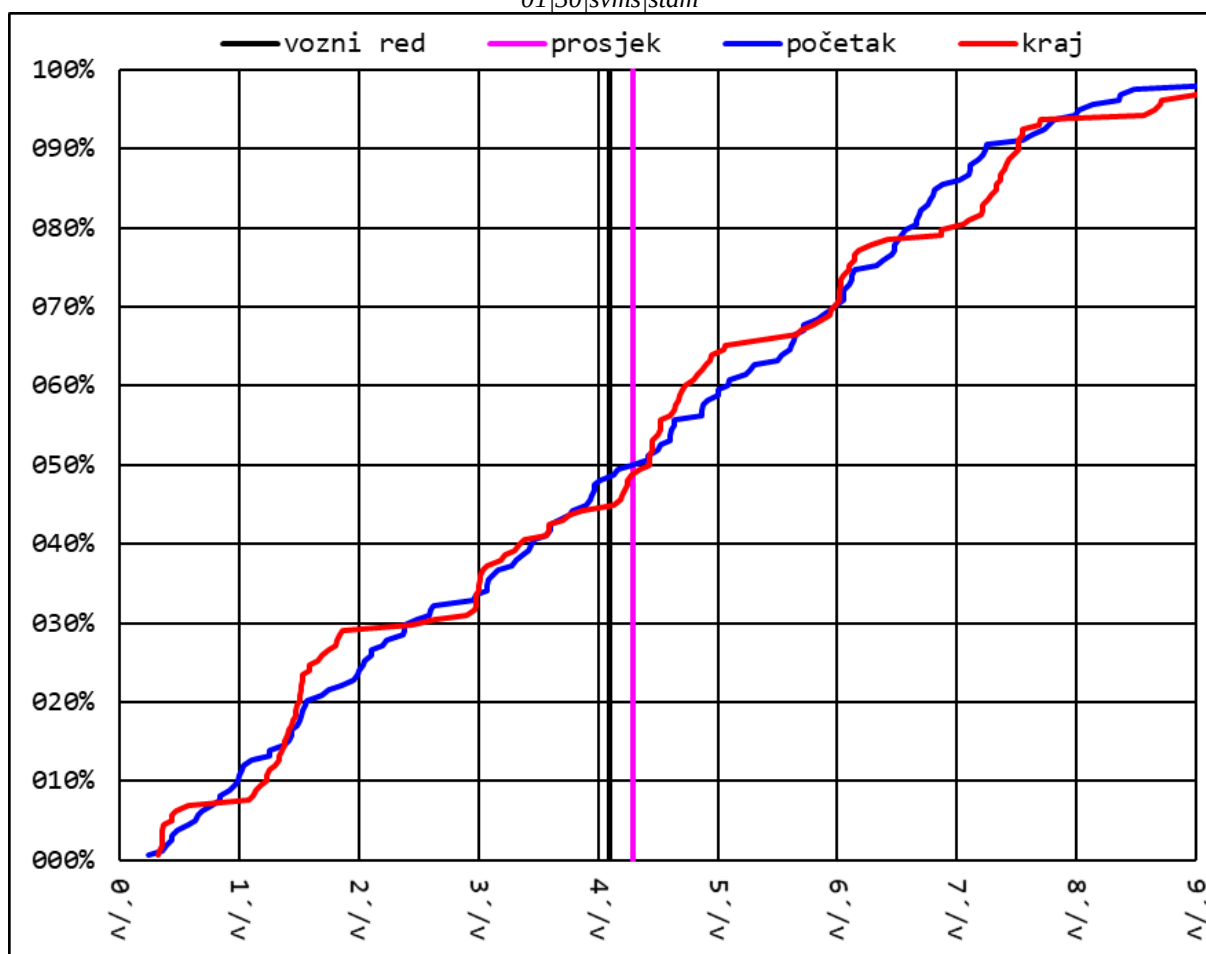


segment = 30|30|stdm|svms
duljina segmenta = 0,2km
frekvencija = 15v/h

idealno vrijeme = 0'34"
idealna brzina = 24km/h
broj uzoraka = 158



Prilog 31. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 01|30|svms|stdm



segment = 01|30|svms|stdm

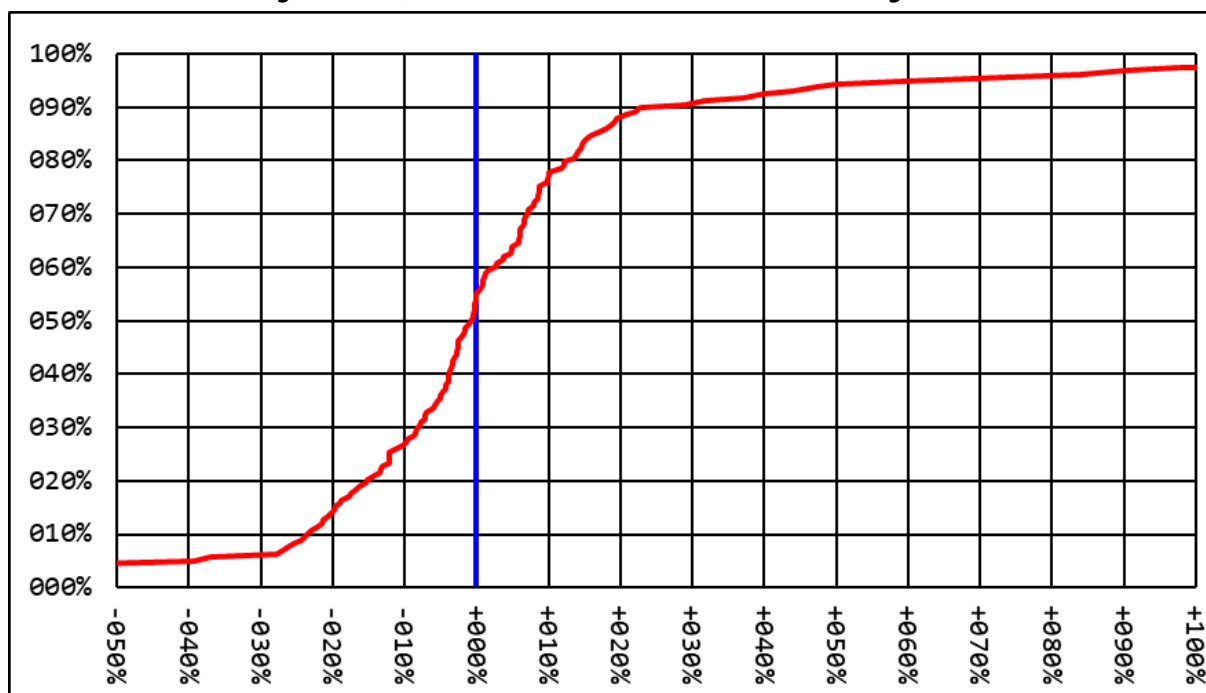
idealno vrijeme = 0'25"

duljina segmenta = 0,1km

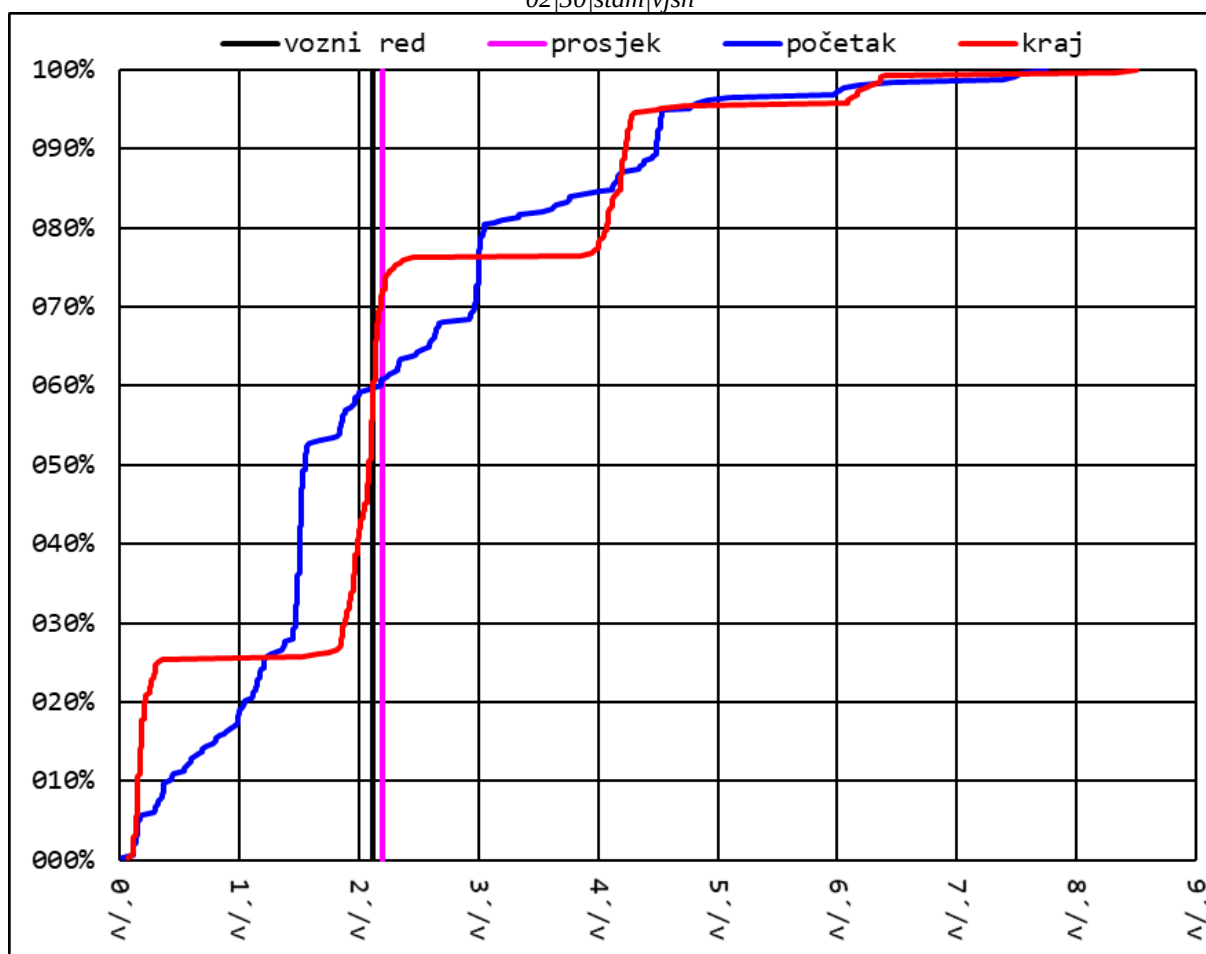
idealna brzina = 13km/h

frekvencija = 15v/h

broj uzoraka = 158



Prilog 32. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 02|30|stdm|vjsn



segment = 02|30|stdm|vjsn

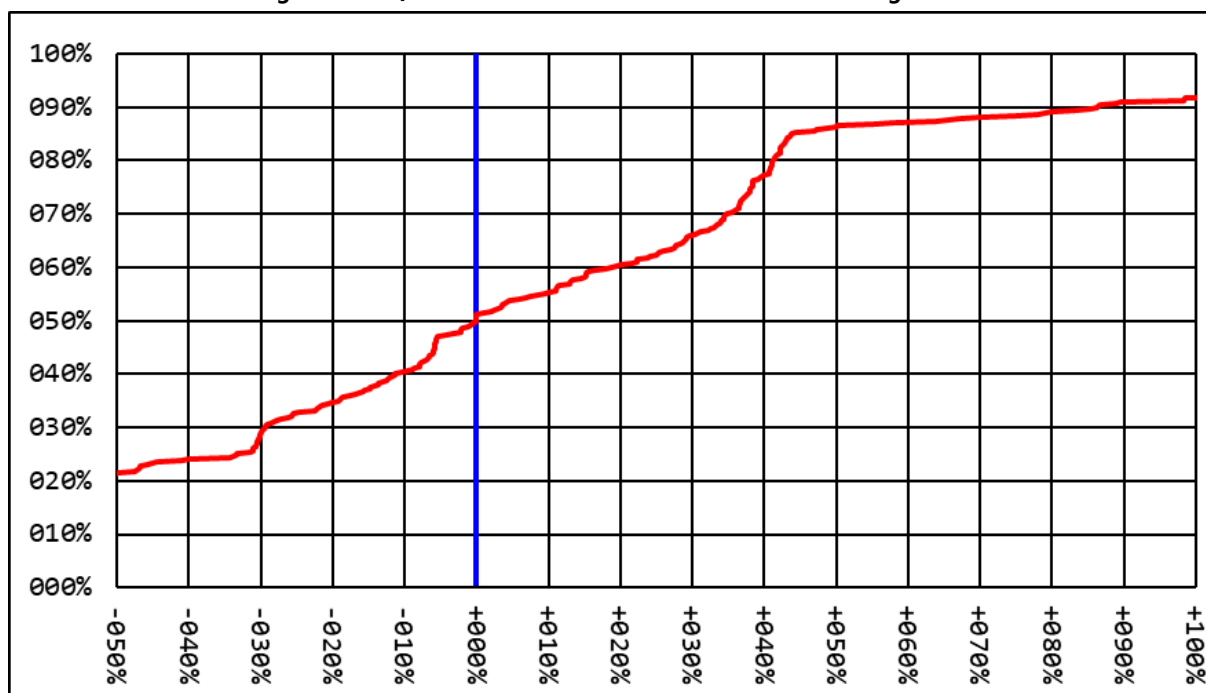
idealno vrijeme = 2'17"

duljina segmenta = 0,9km

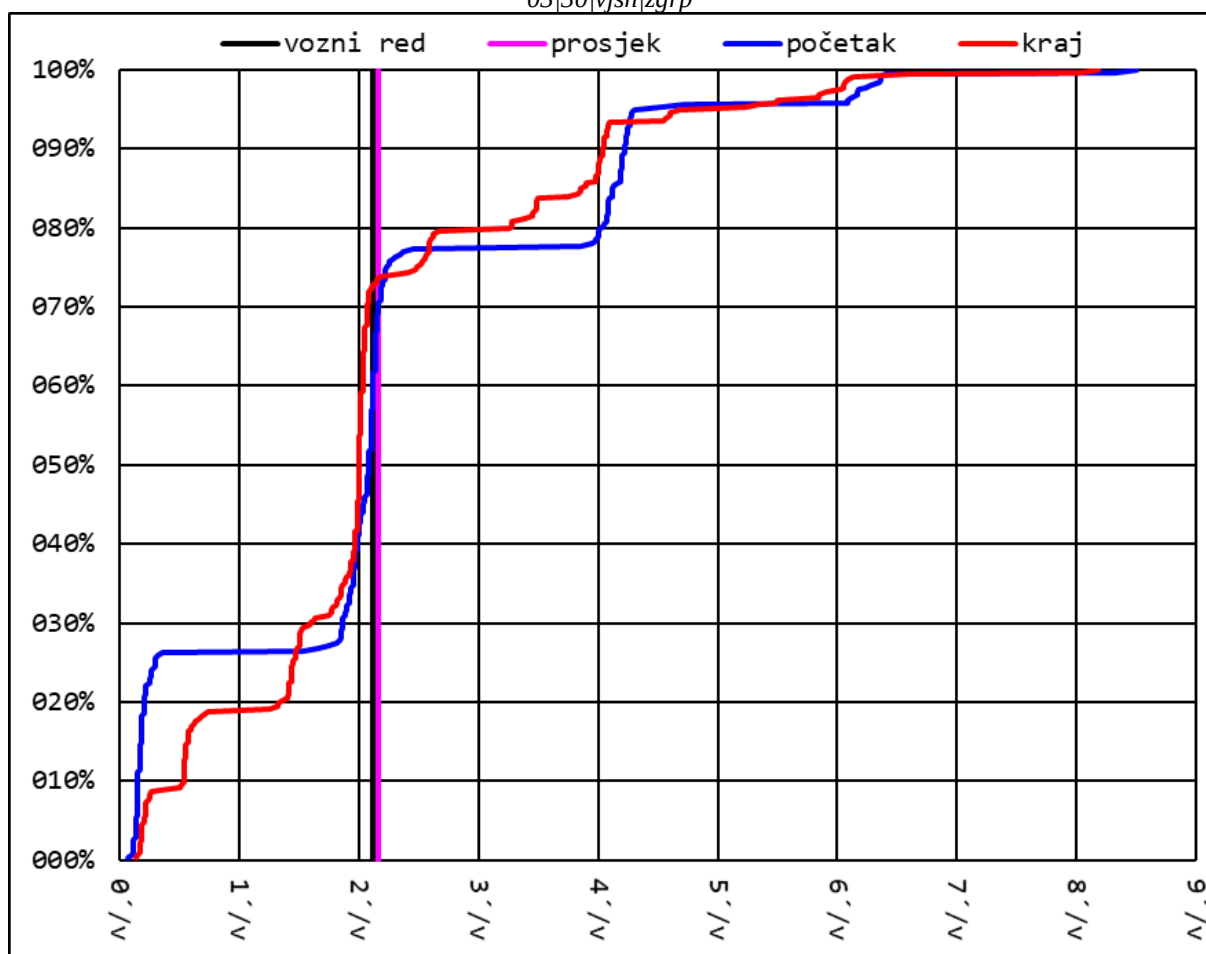
idealna brzina = 23km/h

frekvencija = 28v/h

broj uzoraka = 311



Prilog 33. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 03|30|vjsn|zgrp



segment = 03|30|vjsn|zgrp

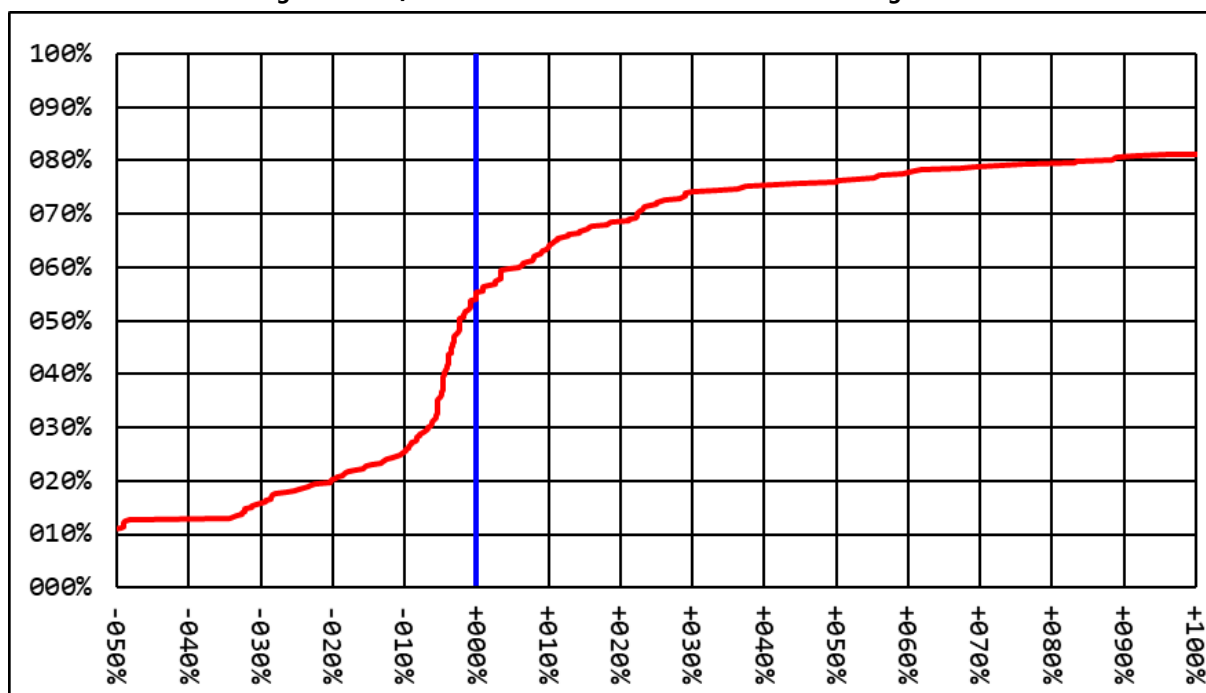
idealno vrijeme = 1'51"

duljina segmenta = 0,6km

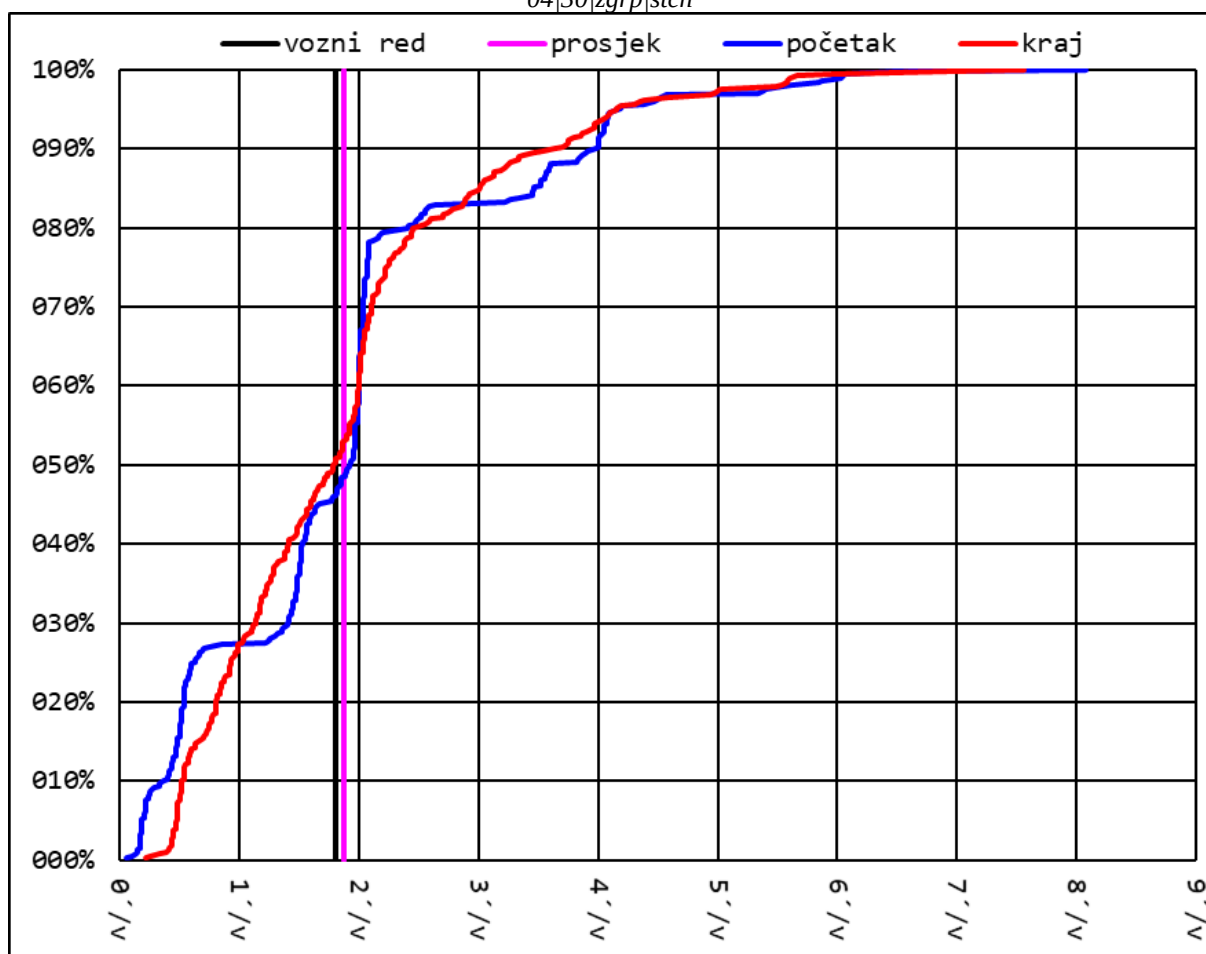
idealna brzina = 21km/h

frekvencija = 28v/h

broj uzoraka = 313



Prilog 34. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 04|30|zgrp|stcn



segment = 04|30|zgrp|stcn

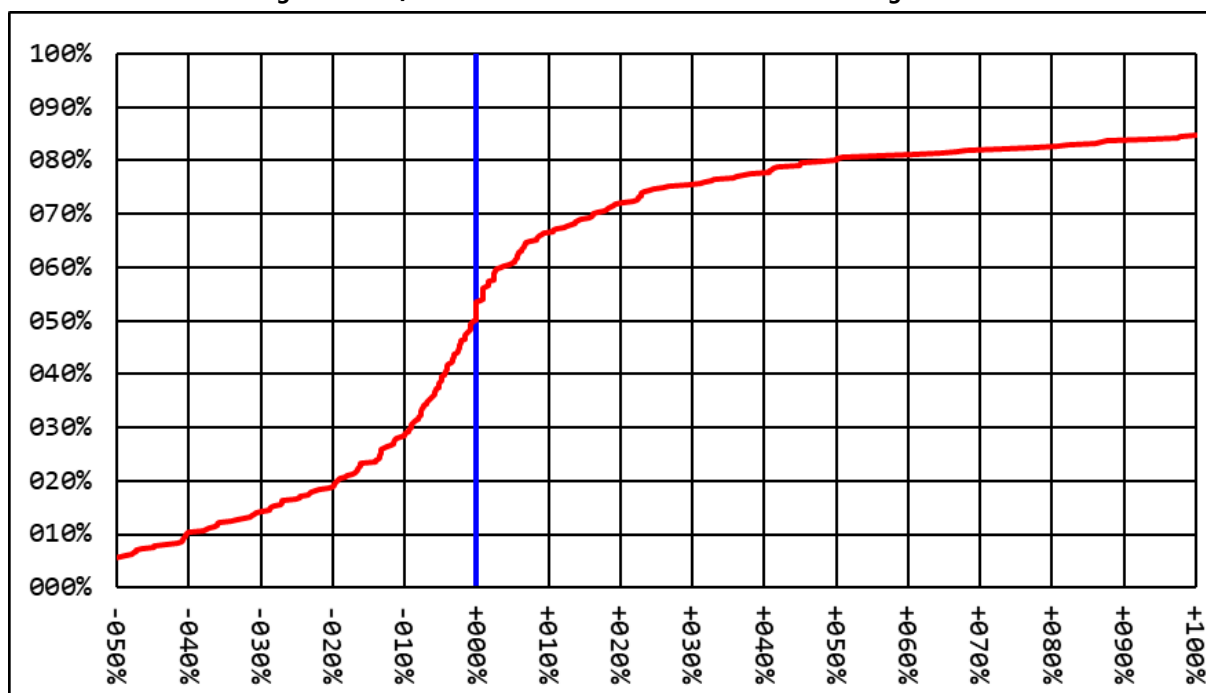
idealno vrijeme = 1'50"

duljina segmenta = 0,5km

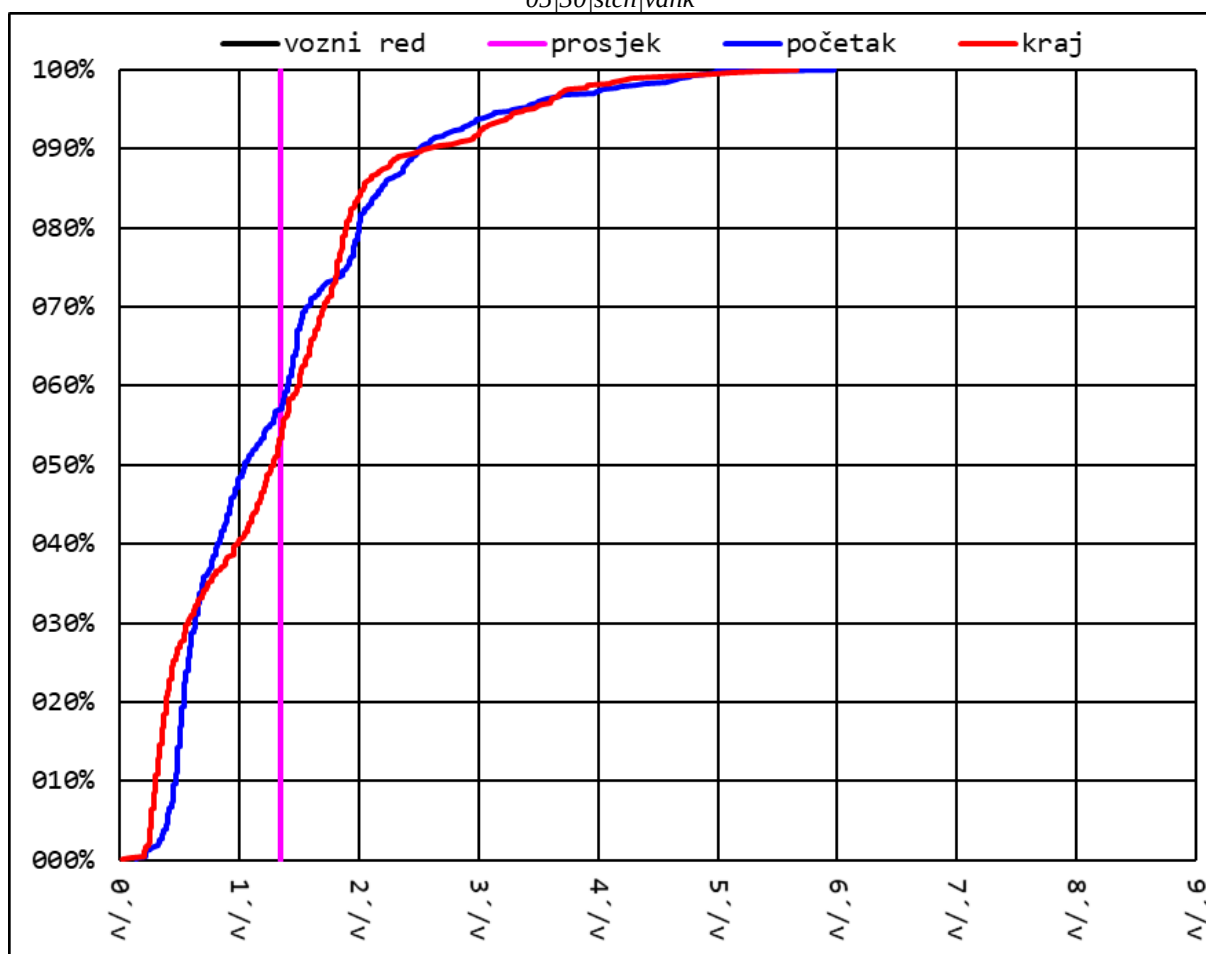
idealna brzina = 16km/h

frekvencija = 33v/h

broj uzoraka = 370



Prilog 35. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 05|30|stcn|vdk



segment = 05|30|stcn|vdk

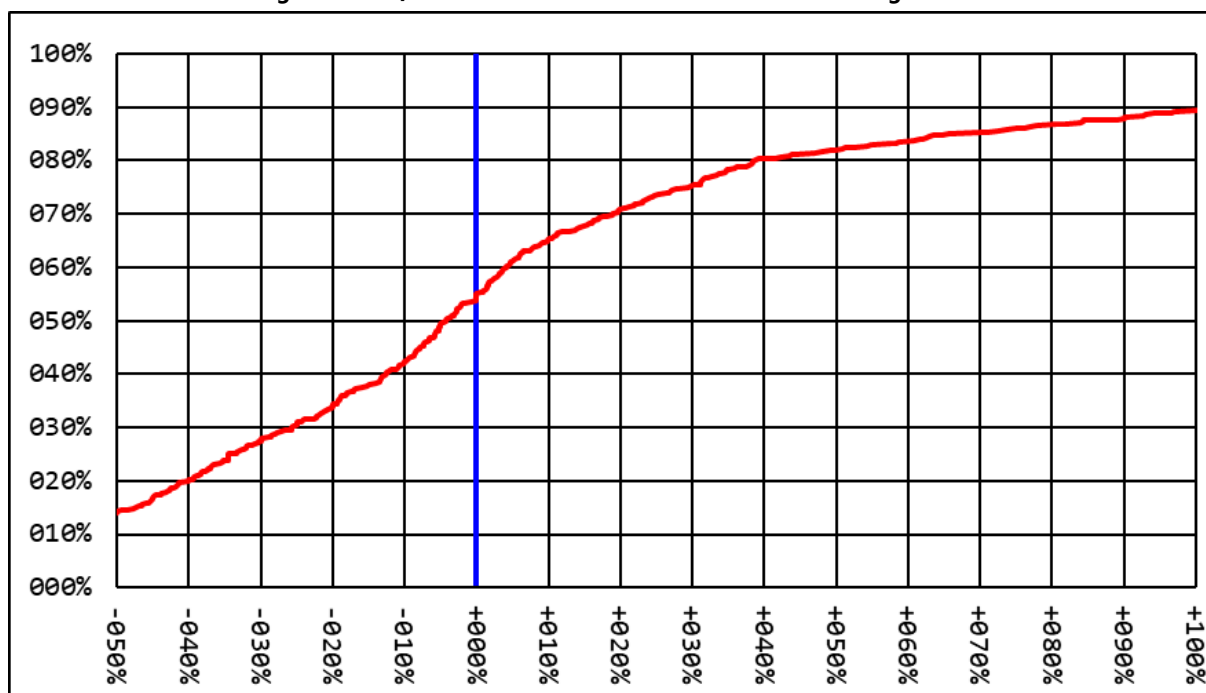
idealno vrijeme = 0'50"

duljina segmenta = 0,3km

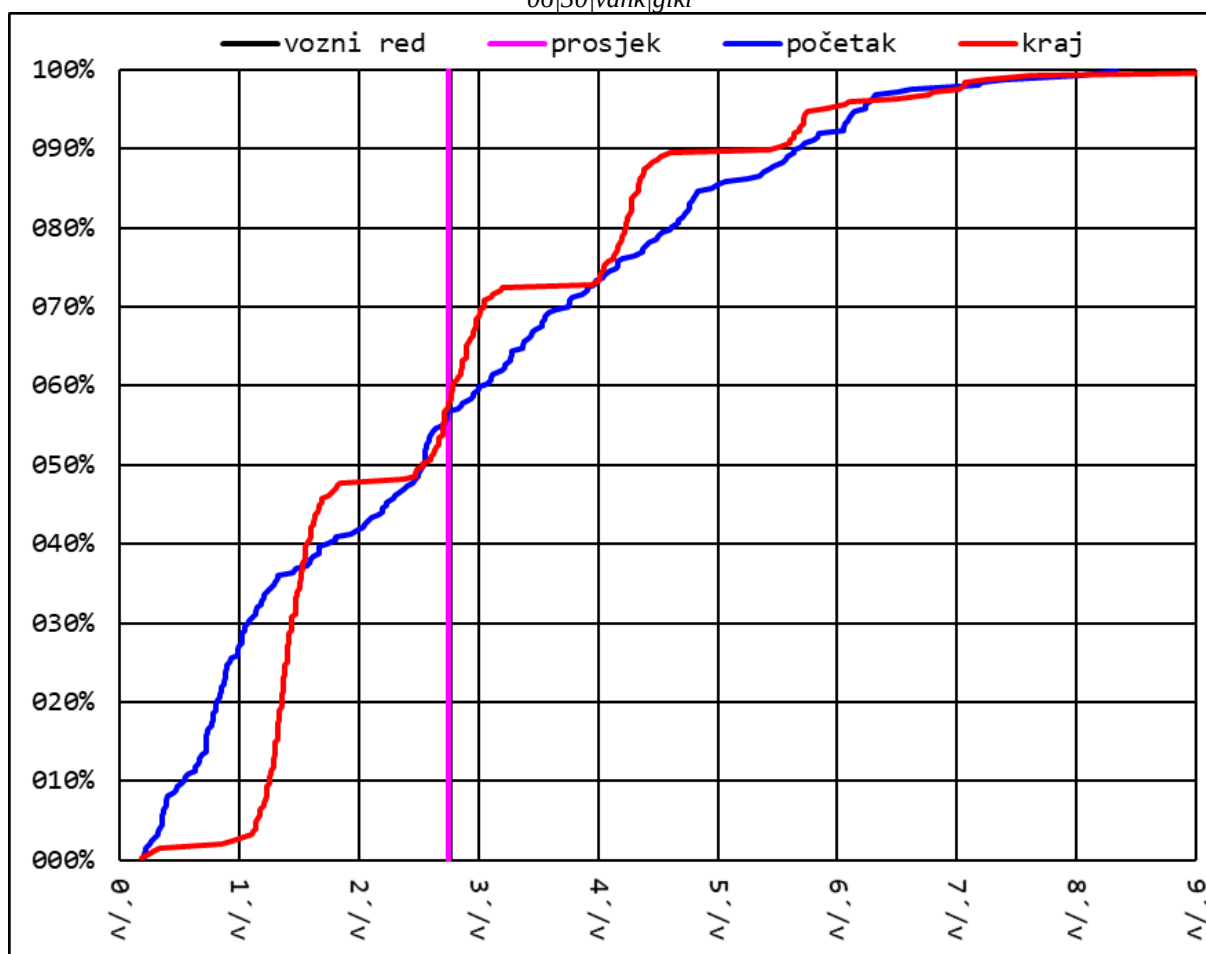
idealna brzina = 20km/h

frekvencija = 45v/h

broj uzoraka = 527



Prilog 36. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 06|30|vdkn|glkl



segment = 06|30|vdkn|glkl

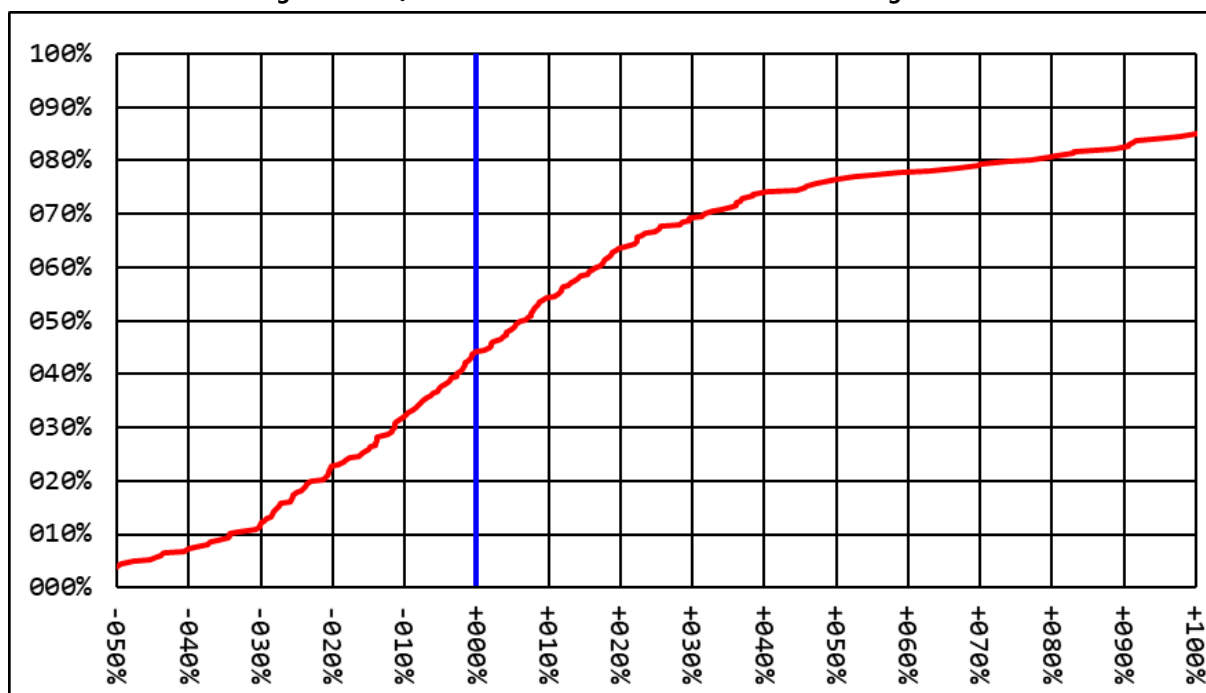
idealno vrijeme = 2'48"

duljina segmenta = 0,9km

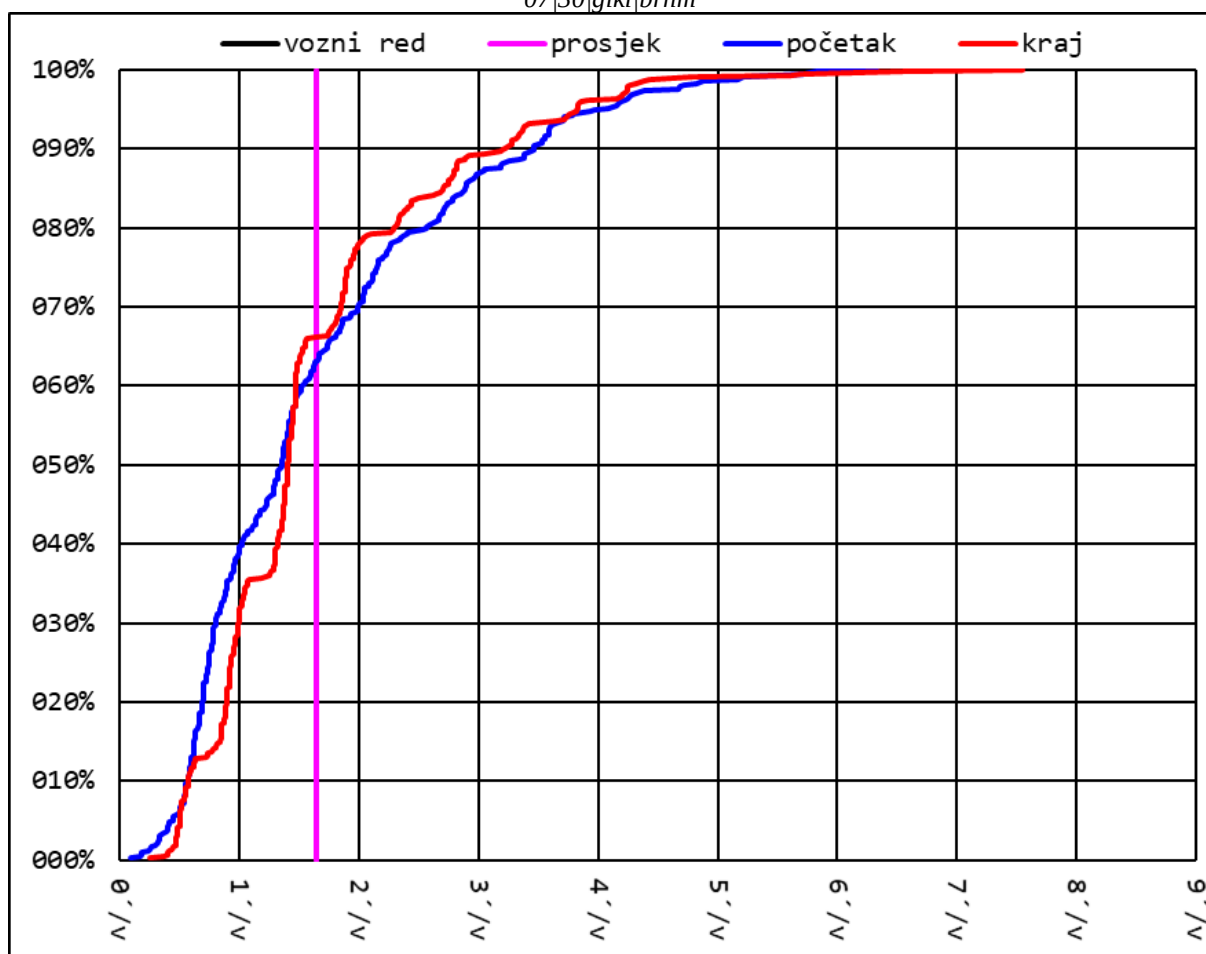
idealna brzina = 19km/h

frekvencija = 22v/h

broj uzoraka = 247



Prilog 37. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 07|30|glkl|brnm



segment = 07|30|glkl|brnm

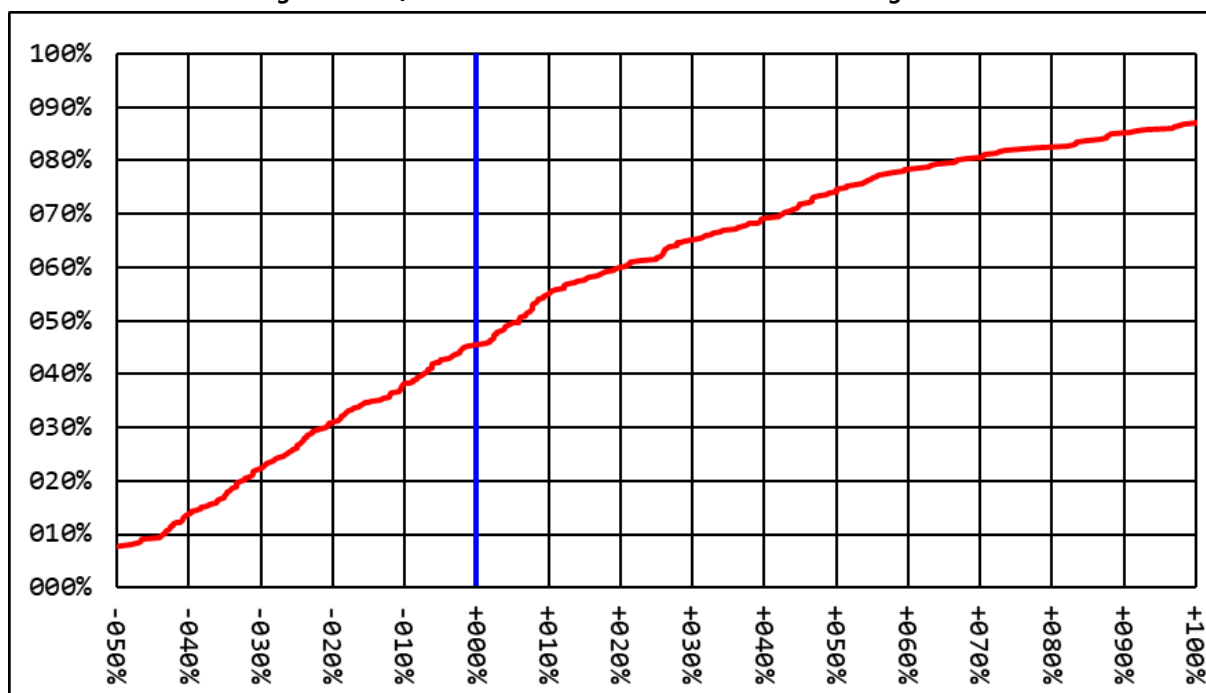
idealno vrijeme = 2'01"

duljina segmenta = 0,5km

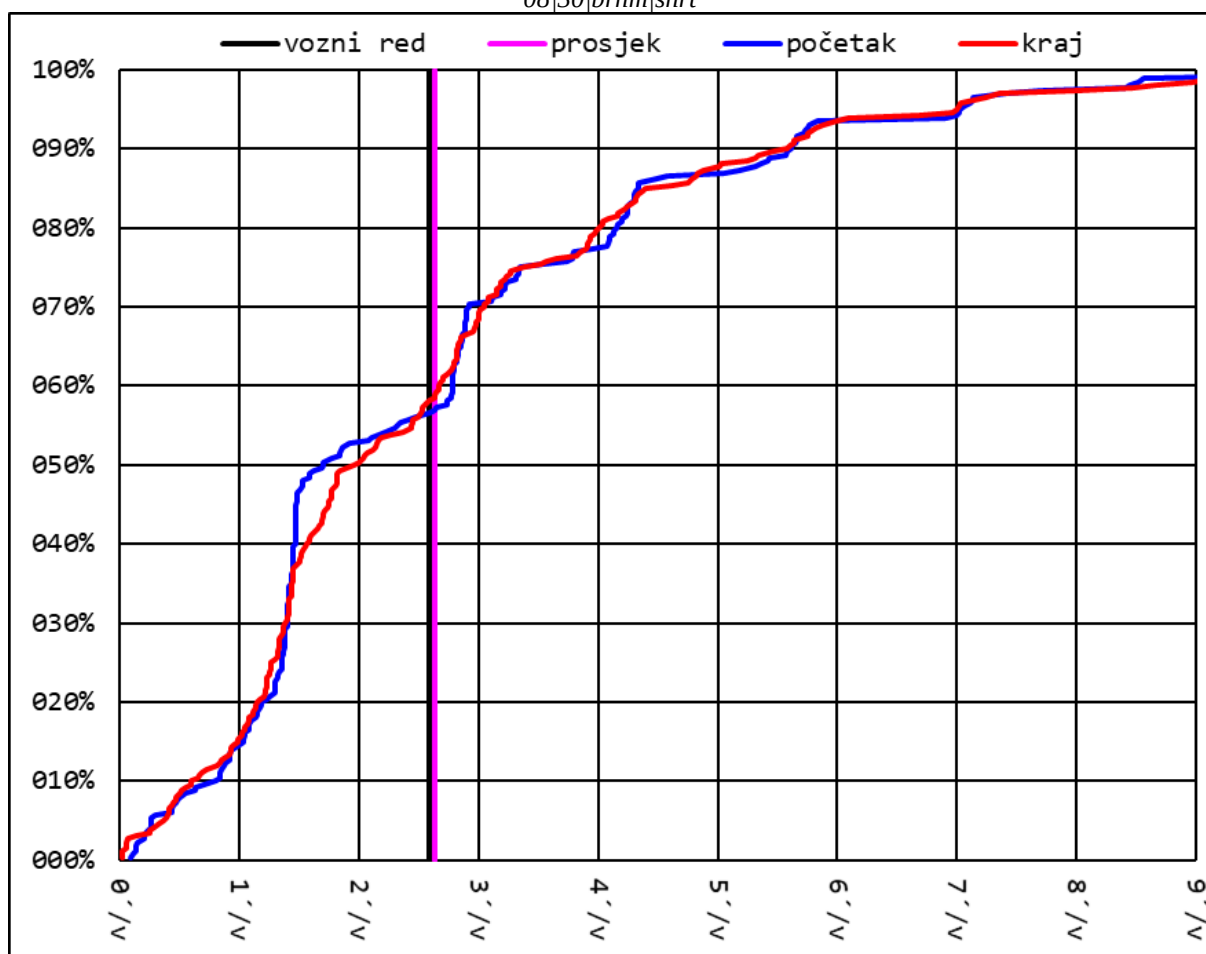
idealna brzina = 15km/h

frekvencija = 37v/h

broj uzoraka = 414



Prilog 38. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 08|30|brnm|shrt



segment = 08|30|brnm|shrt

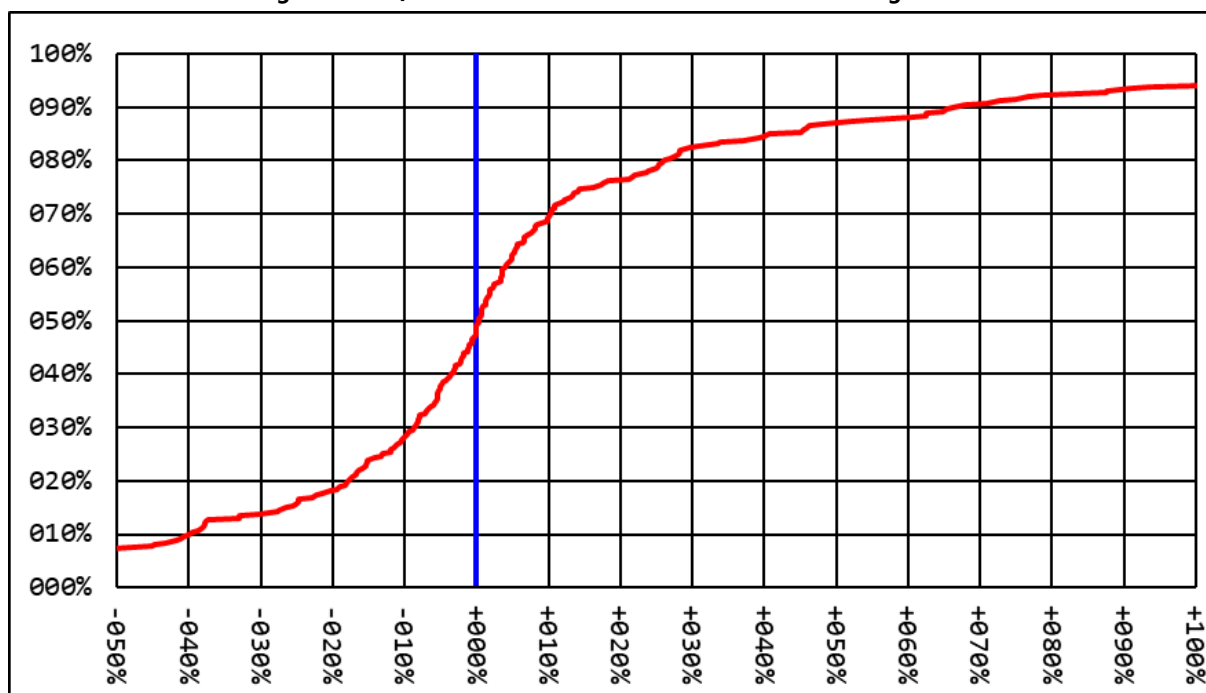
idealno vrijeme = 0'49"

duljina segmenta = 0,2km

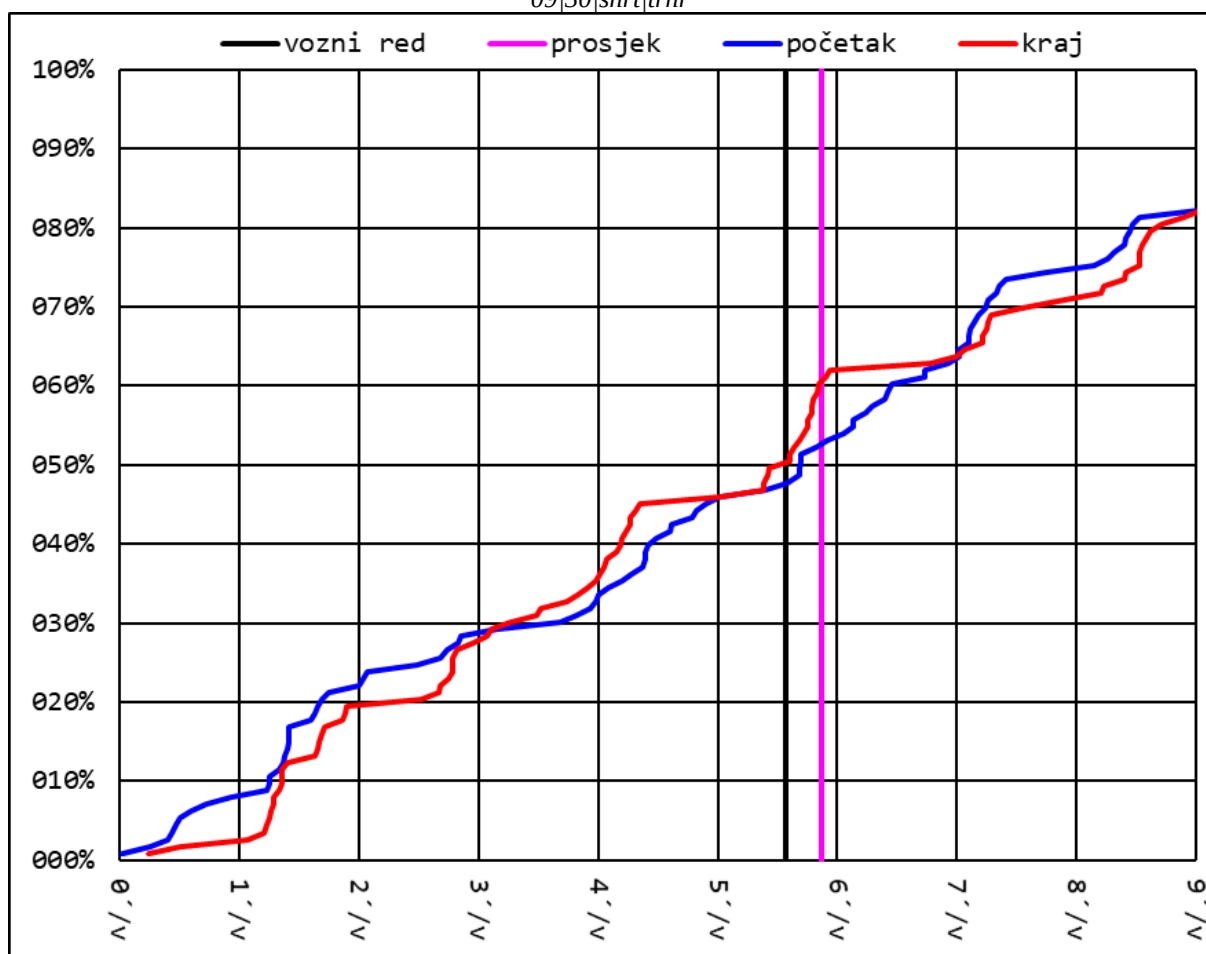
idealna brzina = 18km/h

frekvencija = 23v/h

broj uzoraka = 260



Prilog 39. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 09|30|shrt|trhr



segment = 09|30|shrt|trhr

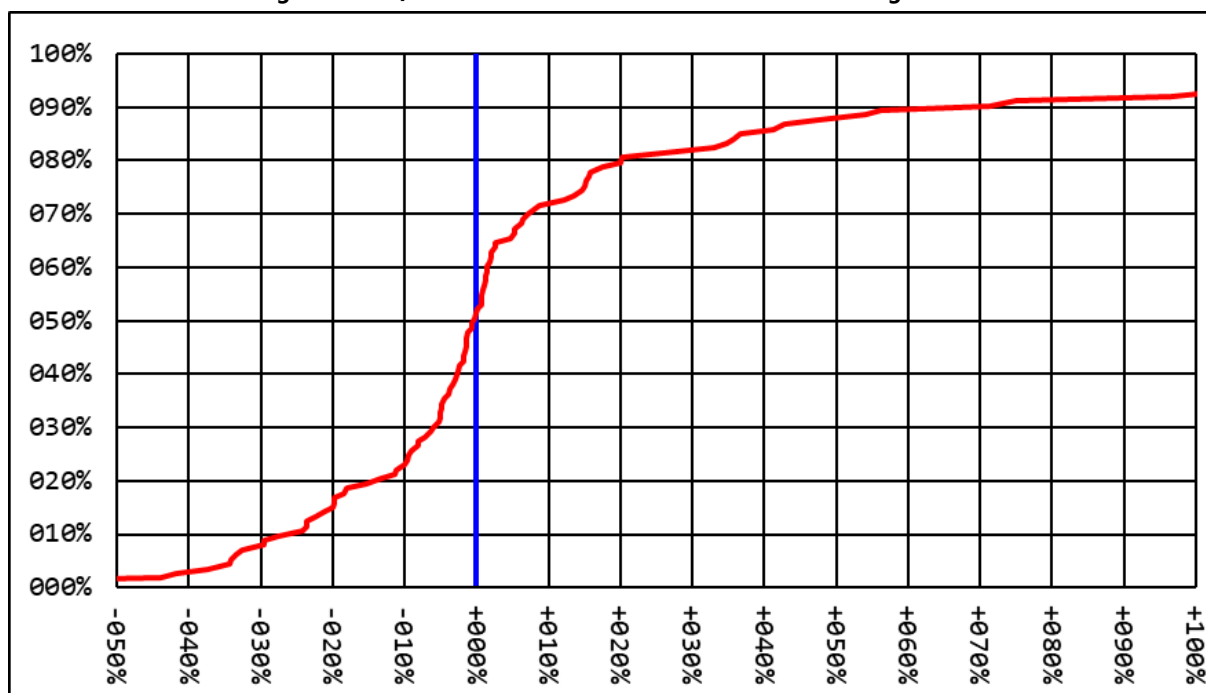
idealno vrijeme = 1'48"

duljina segmenta = 0,5km

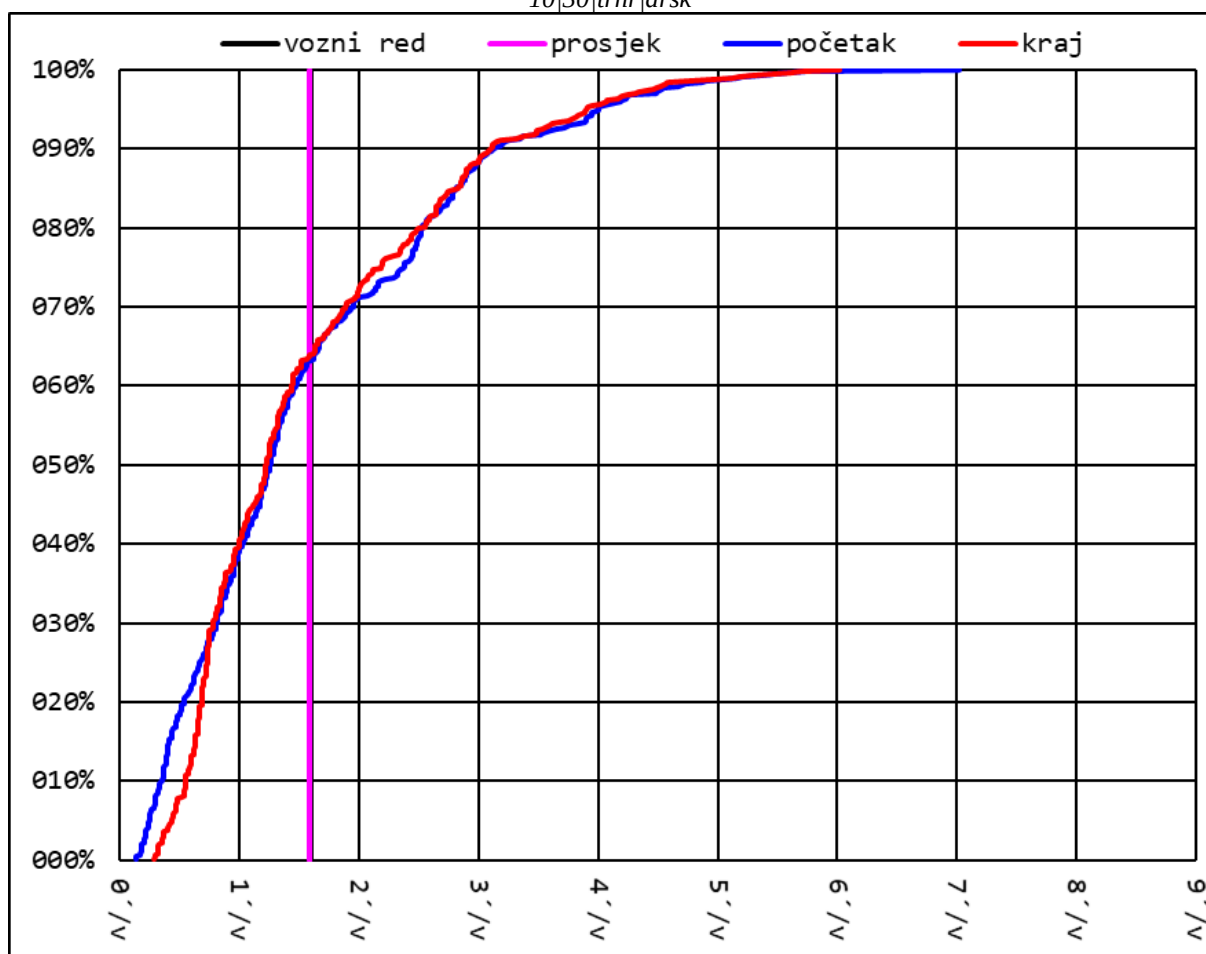
idealna brzina = 18km/h

frekvencija = 11v/h

broj uzoraka = 113



Prilog 40. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 10|30|trhr|drsk



segment = 10|30|trhr|drsk

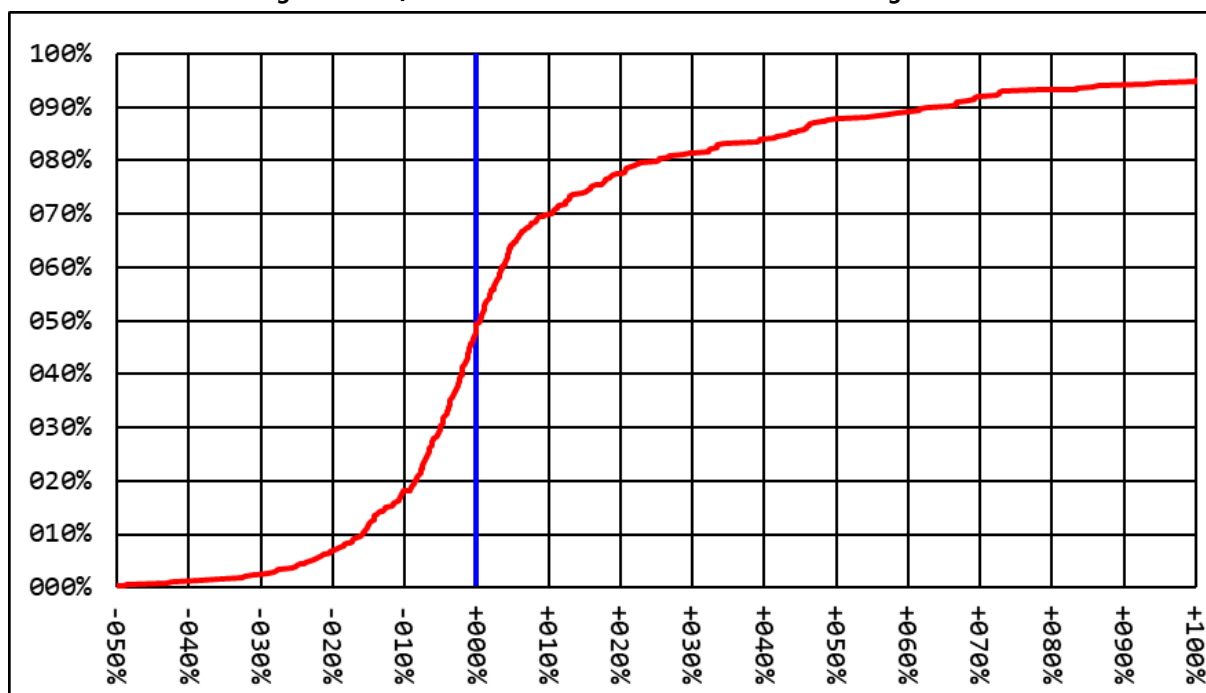
idealno vrijeme = 0'45"

duljina segmenta = 0,1km

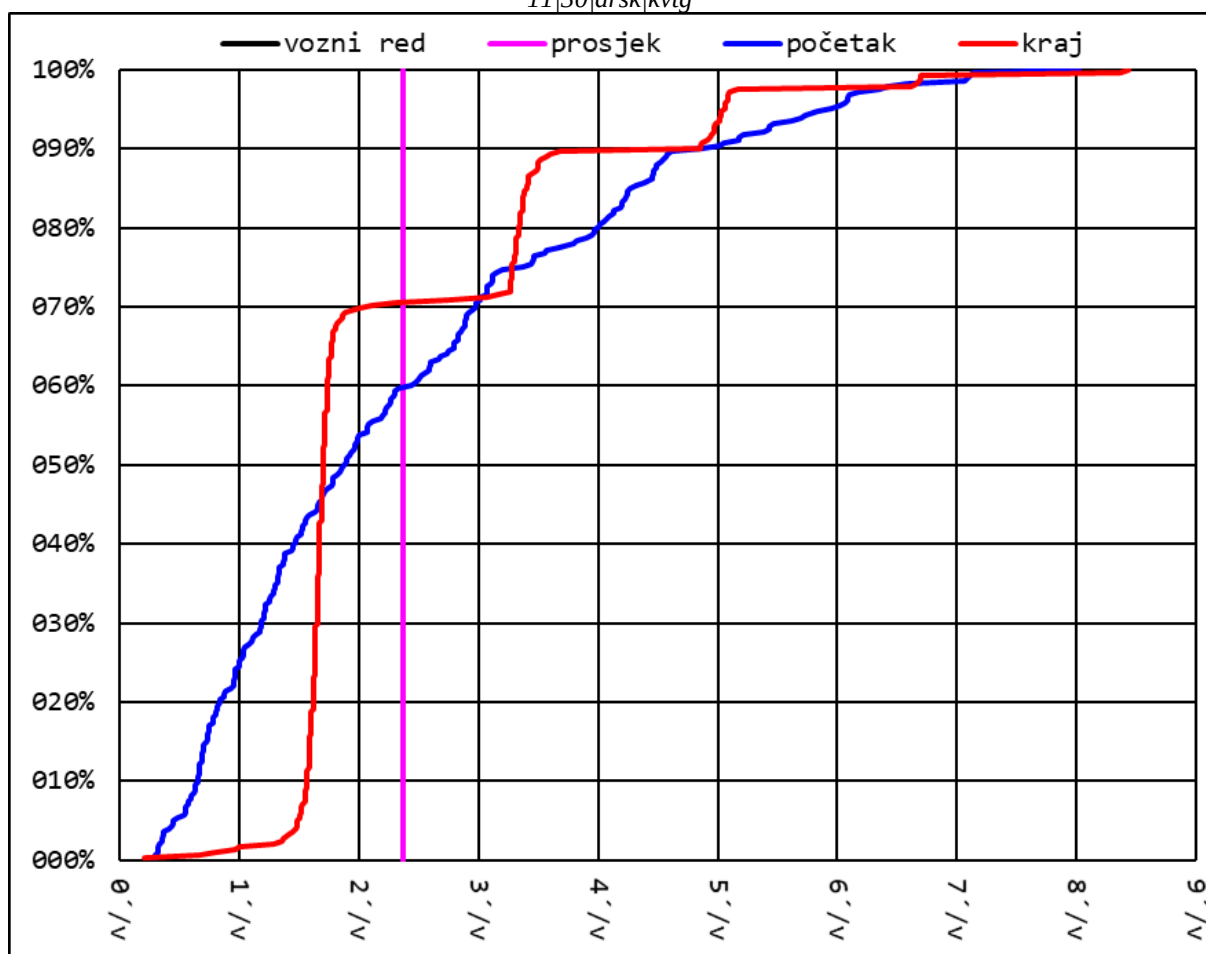
idealna brzina = 10km/h

frekvencija = 38v/h

broj uzoraka = 438



Prilog 41. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 11|30|drsk|kvtg



segment = 11|30|drsk|kvtg

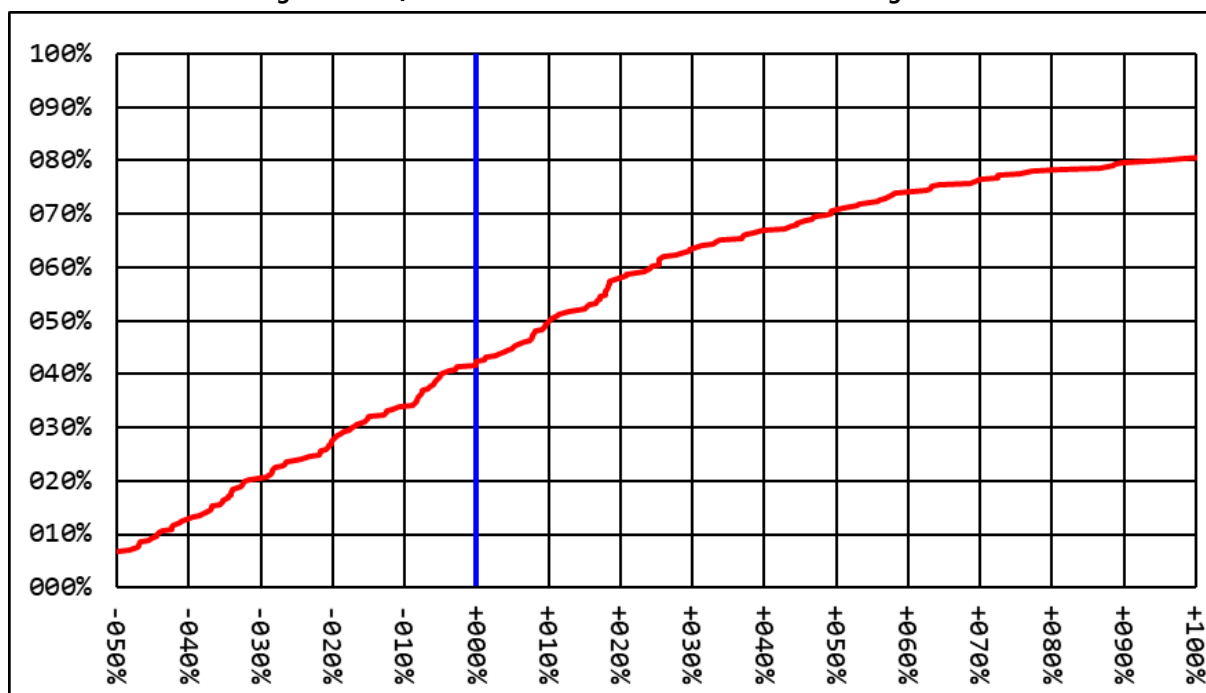
idealno vrijeme = 3'34"

duljina segmenta = 1,1km

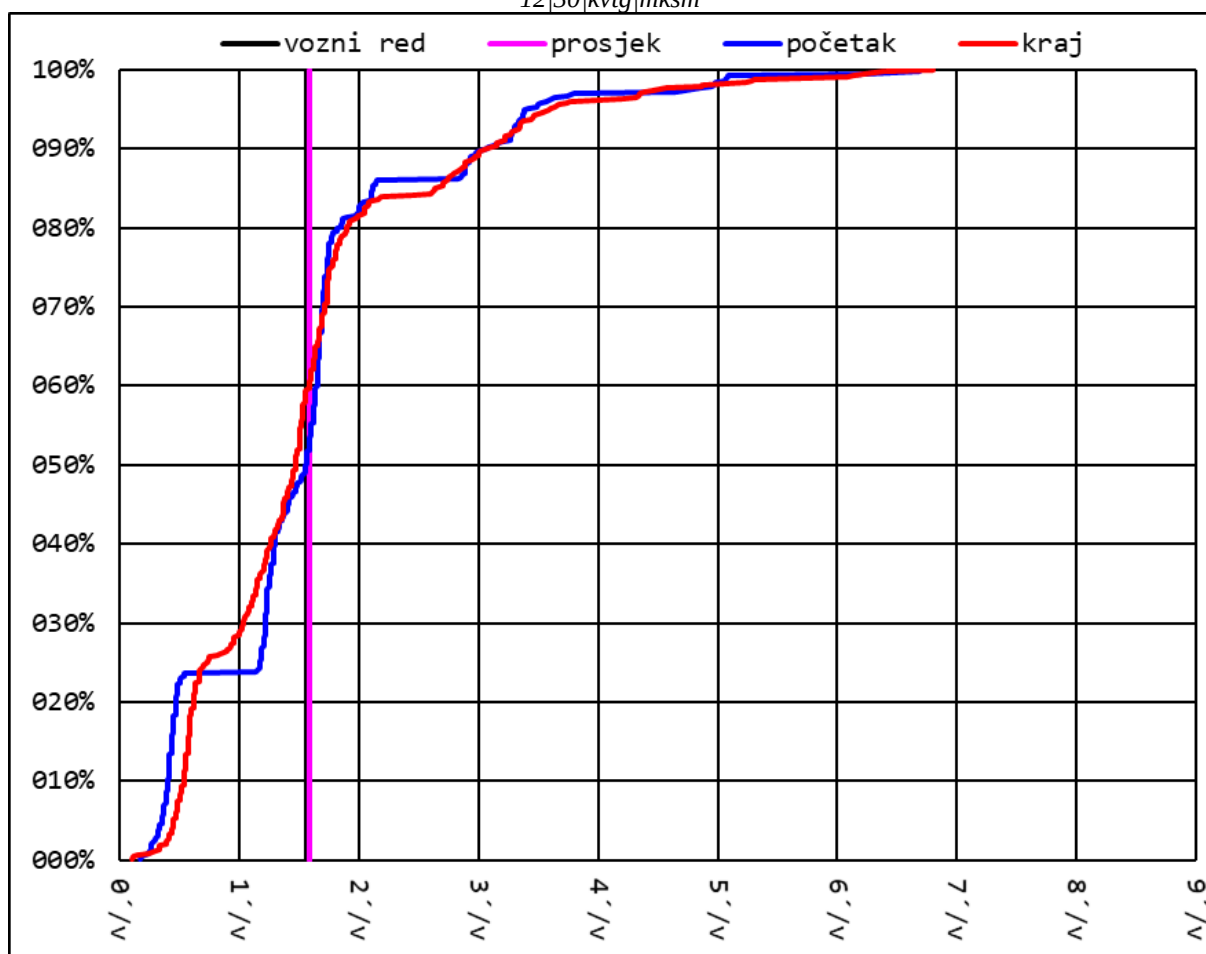
idealna brzina = 19km/h

frekvencija = 25v/h

broj uzoraka = 281

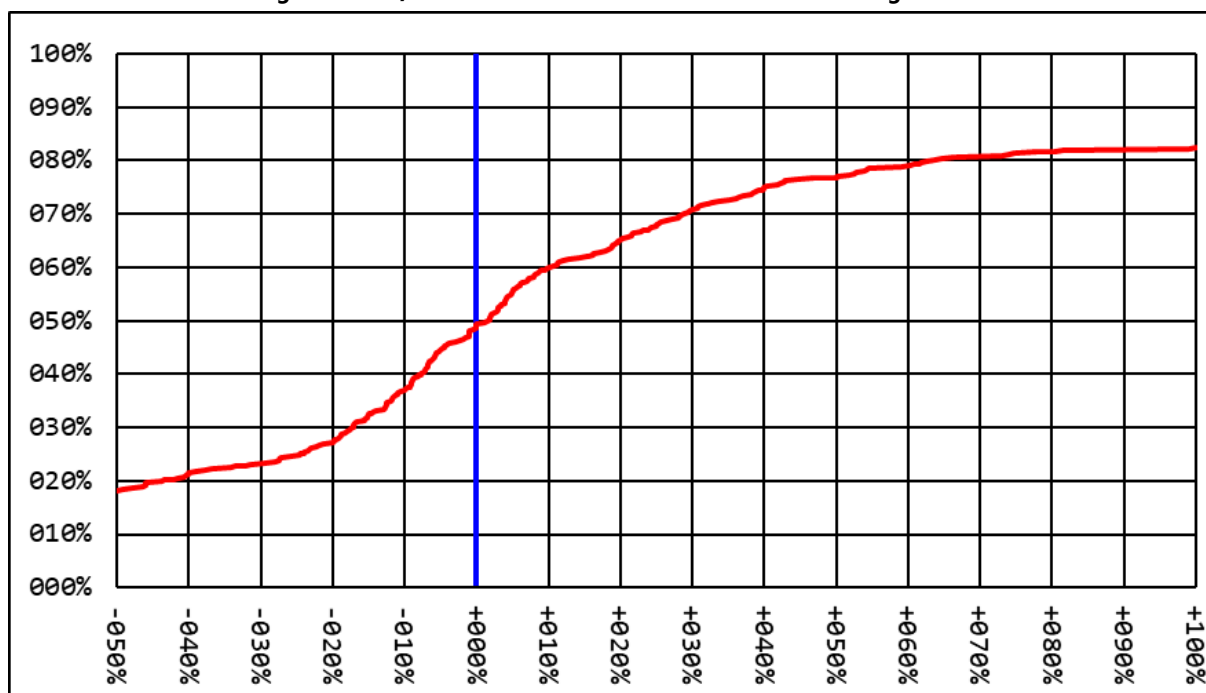


Prilog 42. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 12|30|kvtg|mksm

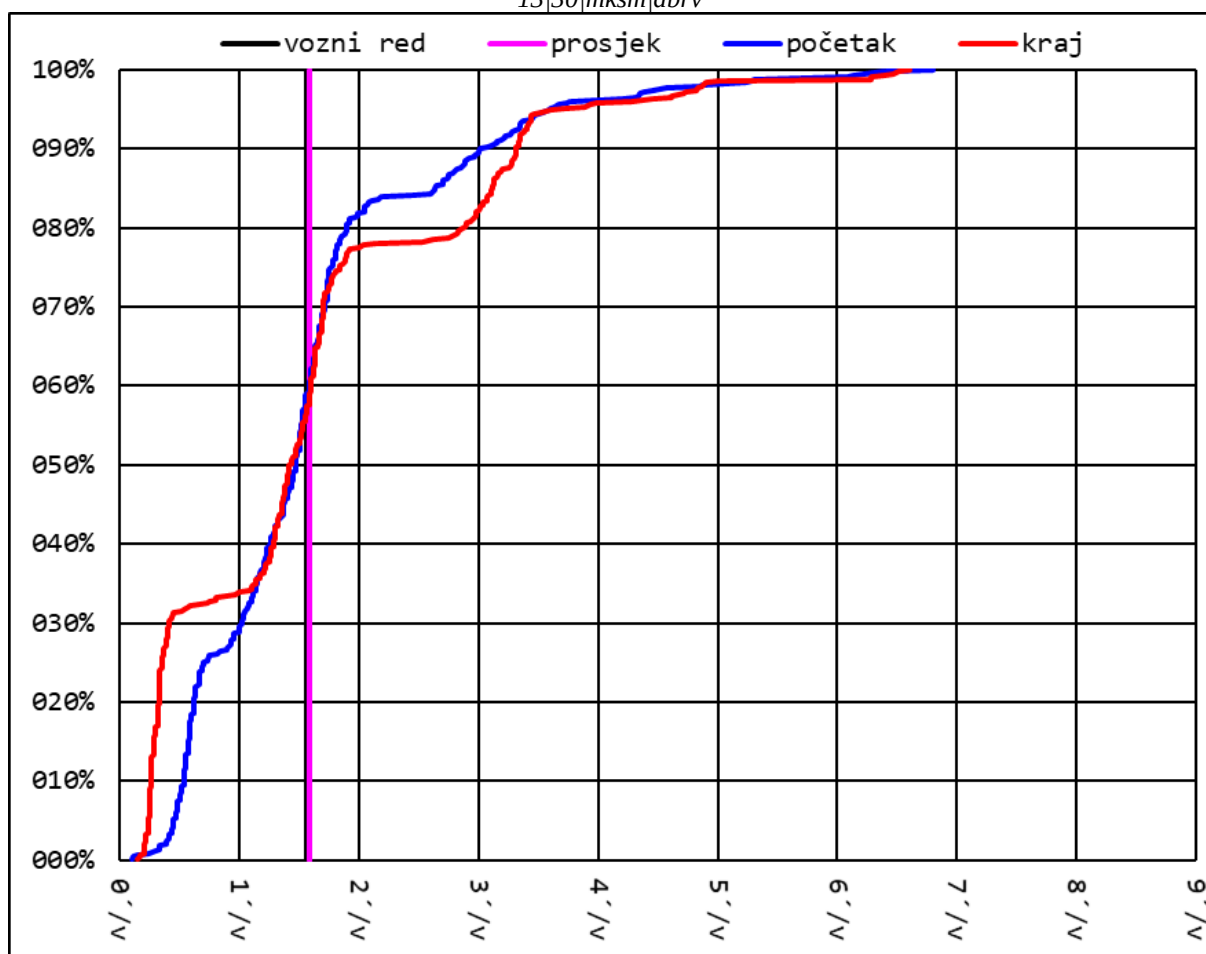


segment = 12|30|kvtg|mksm
 duljina segmenta = 1,5km
 frekvencija = 38v/h

idealno vrijeme = 3'56"
 idealna brzina = 22km/h
 broj uzoraka = 428



Prilog 43. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 13|30|mksm|dbrv



segment = 13|30|mksm|dbrv

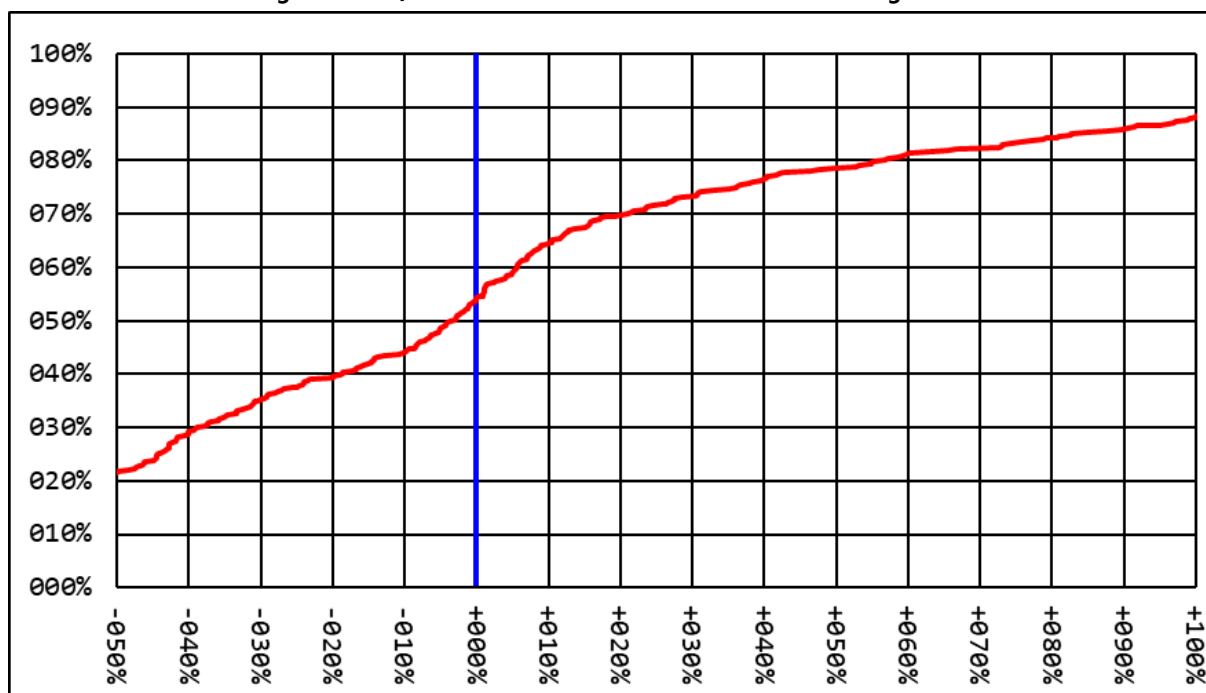
idealno vrijeme = 3'42"

duljina segmenta = 1,8km

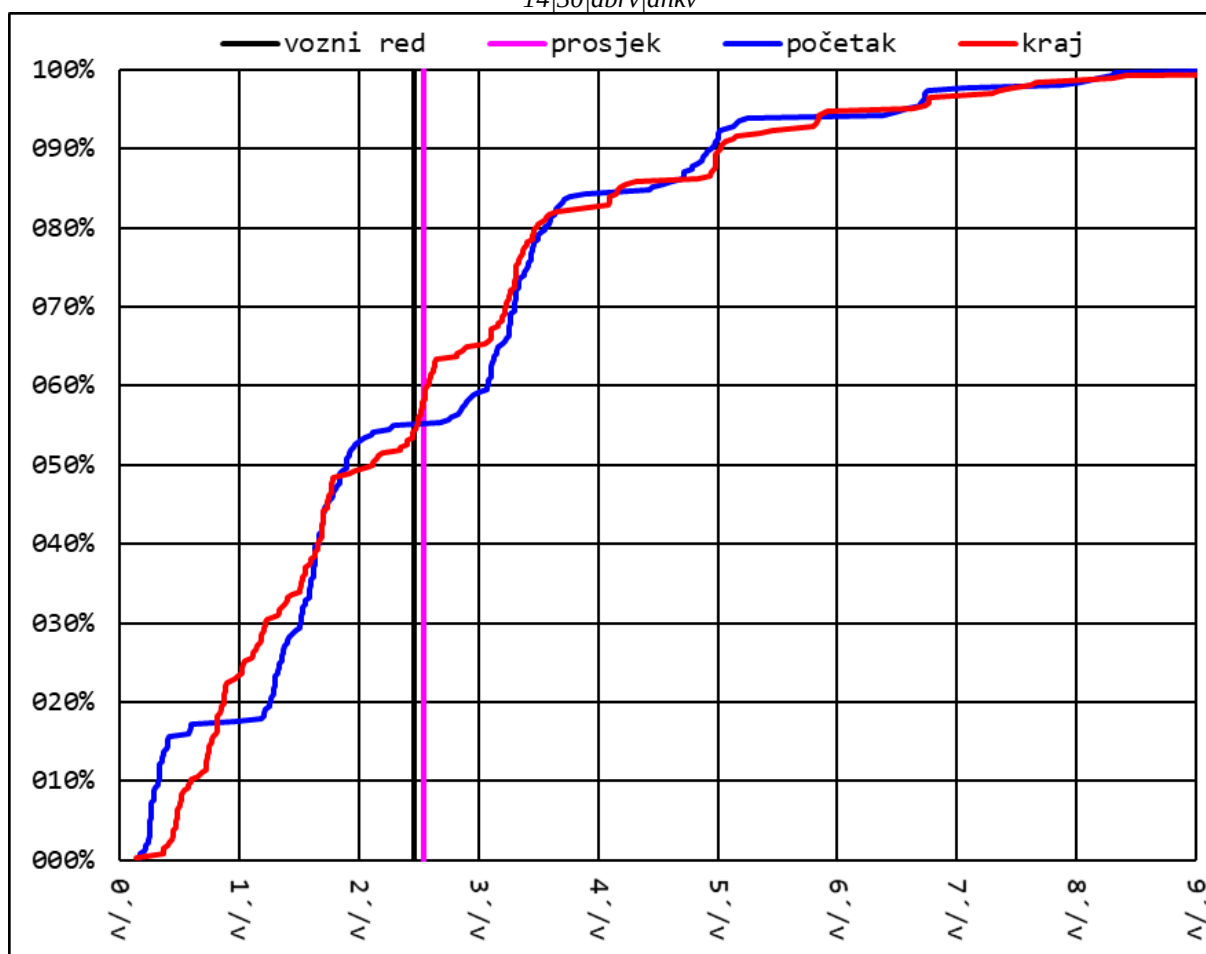
idealna brzina = 29km/h

frekvencija = 38v/h

broj uzoraka = 428



Prilog 44. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 14|30|dbrv|dnkv



segment = 14|30|dbrv|dnkv

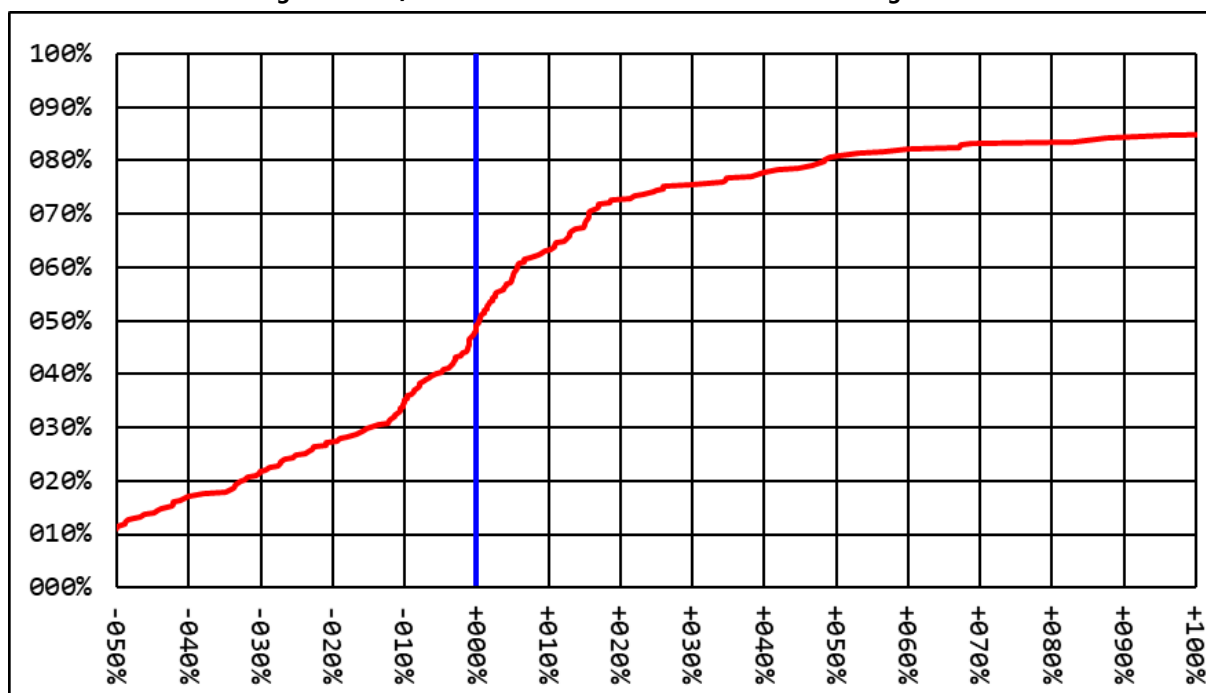
idealno vrijeme = 4'16"

duljina segmenta = 1,6km

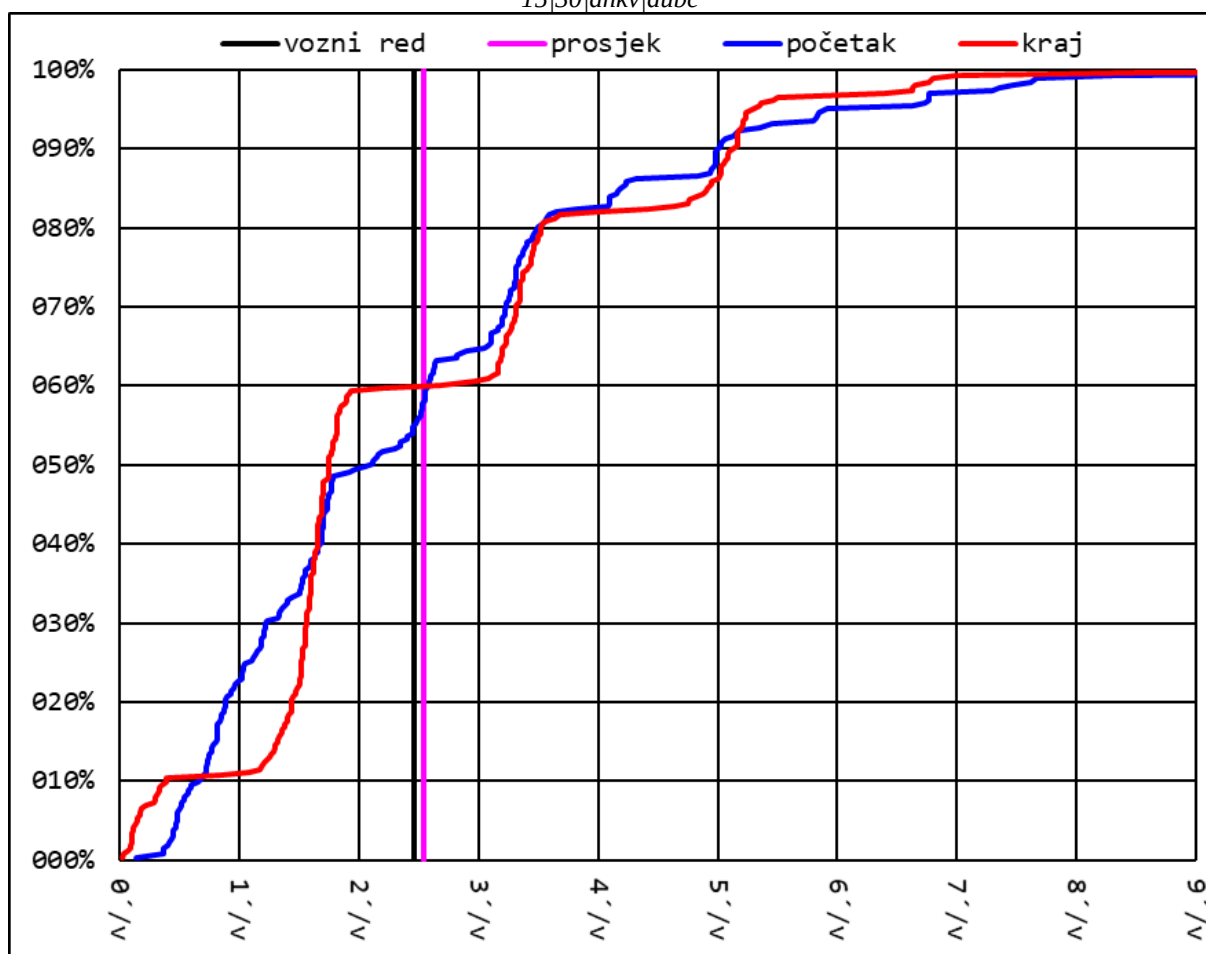
idealna brzina = 22km/h

frekvencija = 24v/h

broj uzoraka = 262



Prilog 45. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 15|30|dnkv|dubc



segment = 15|30|dnkv|dubc

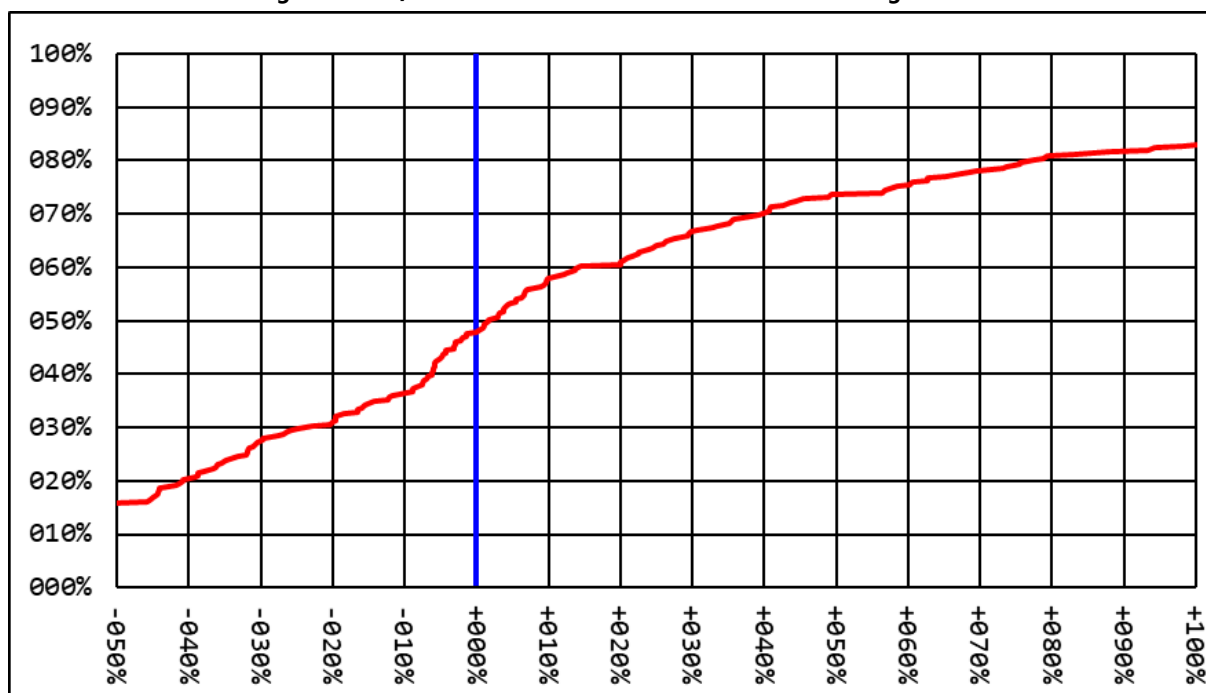
idealno vrijeme = 4'53"

duljina segmenta = 1,9km

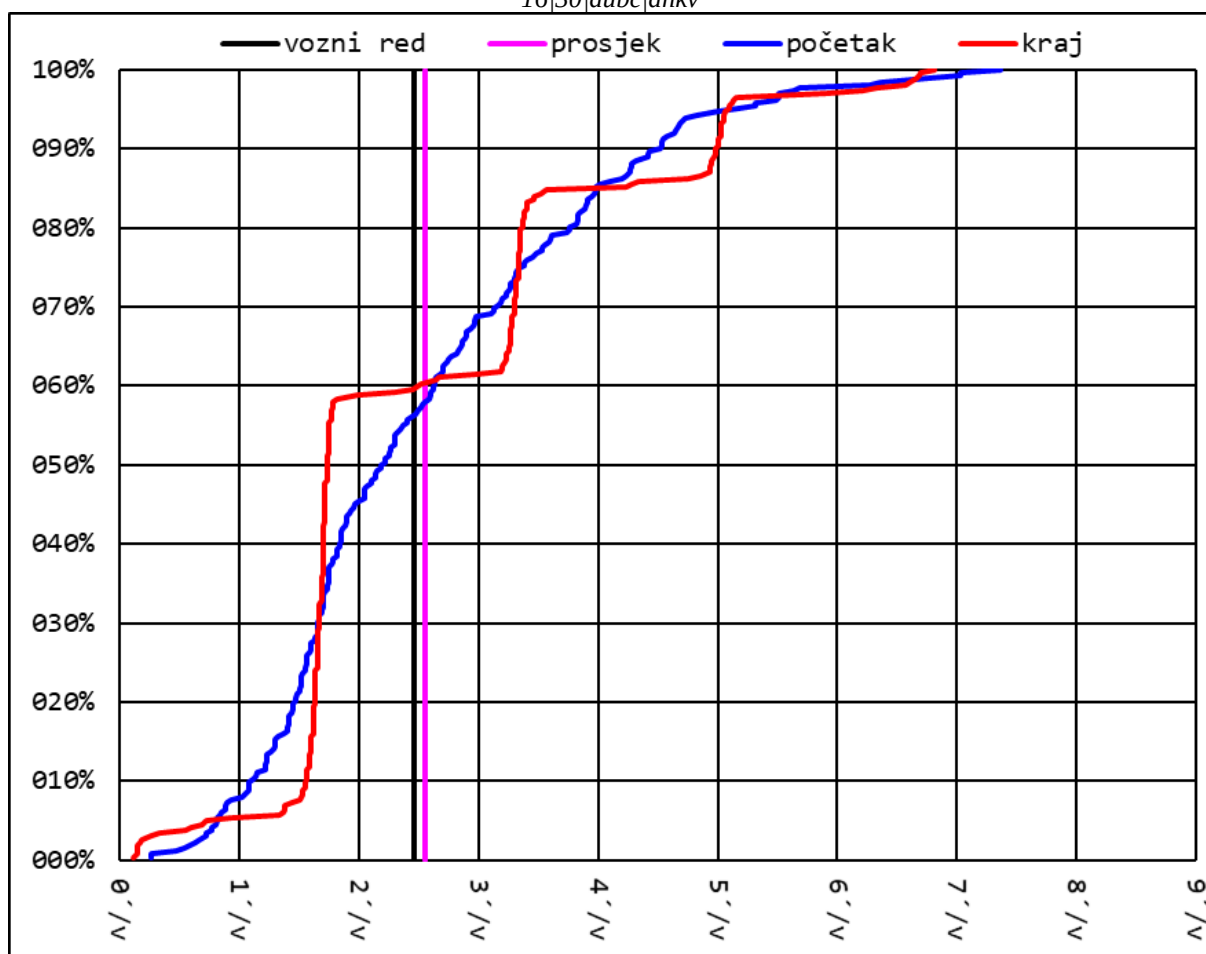
idealna brzina = 23km/h

frekvencija = 24v/h

broj uzoraka = 261



Prilog 46. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 16|30|dubc|dnkv



segment = 16|30|dubc|dnkv

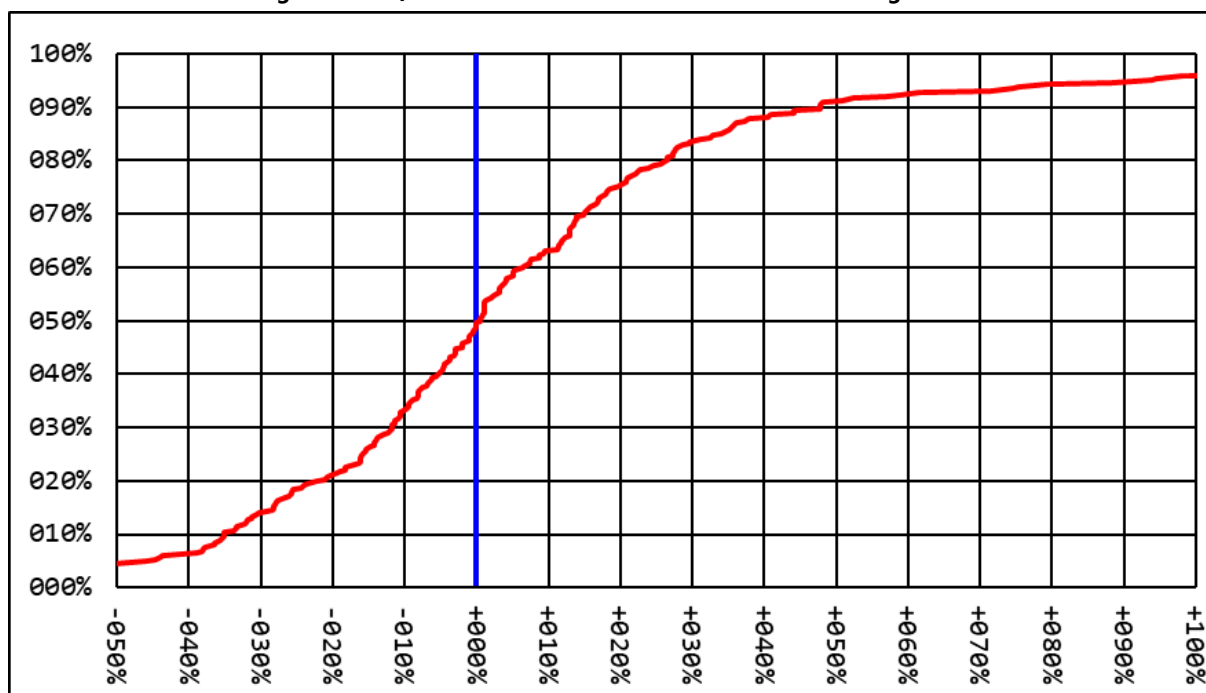
idealno vrijeme = 4'11"

duljina segmenta = 1,7km

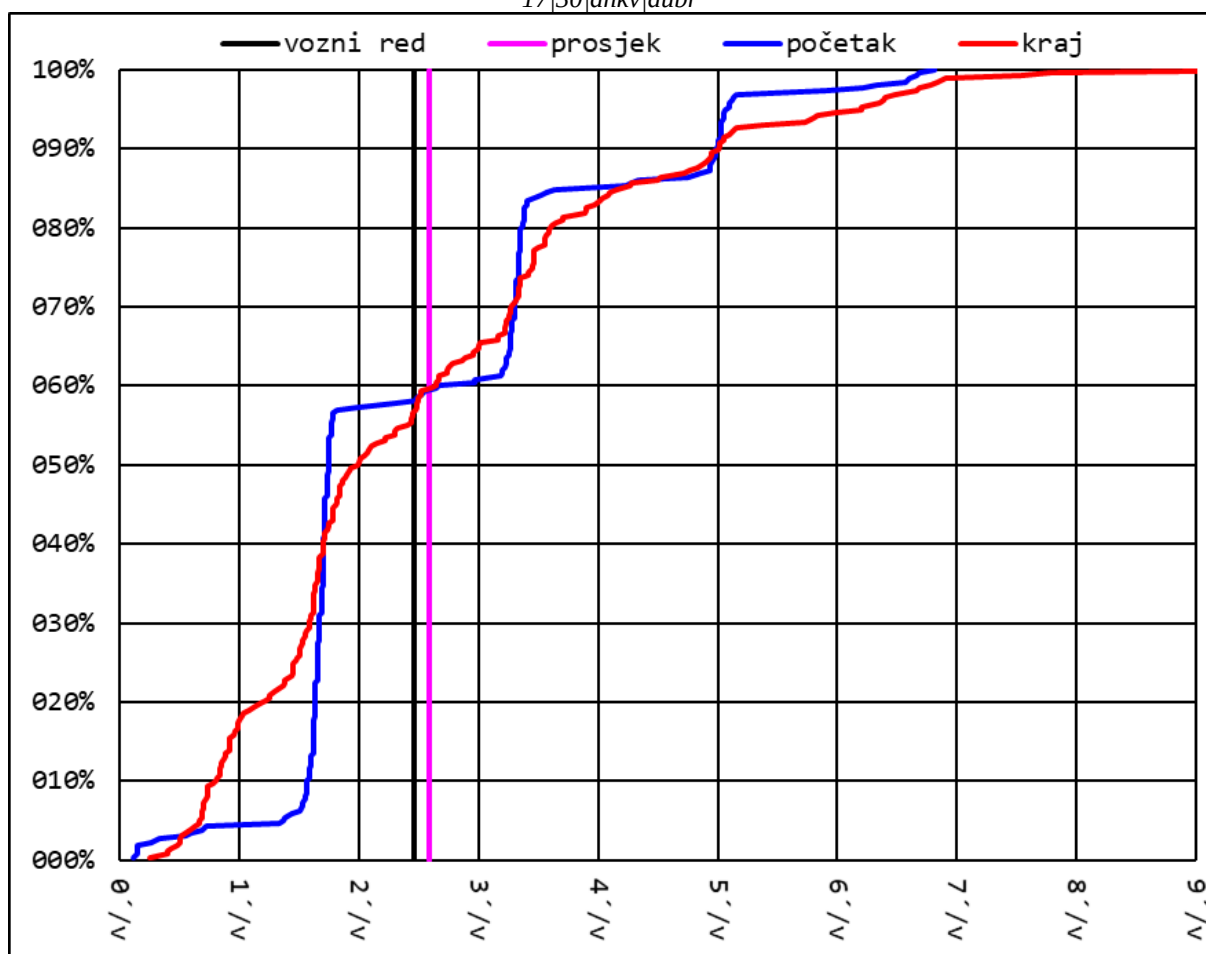
idealna brzina = 25km/h

frekvencija = 24v/h

broj uzoraka = 262



Prilog 47. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 17|30|dnkv|dubr



segment = 17|30|dnkv|dbrv

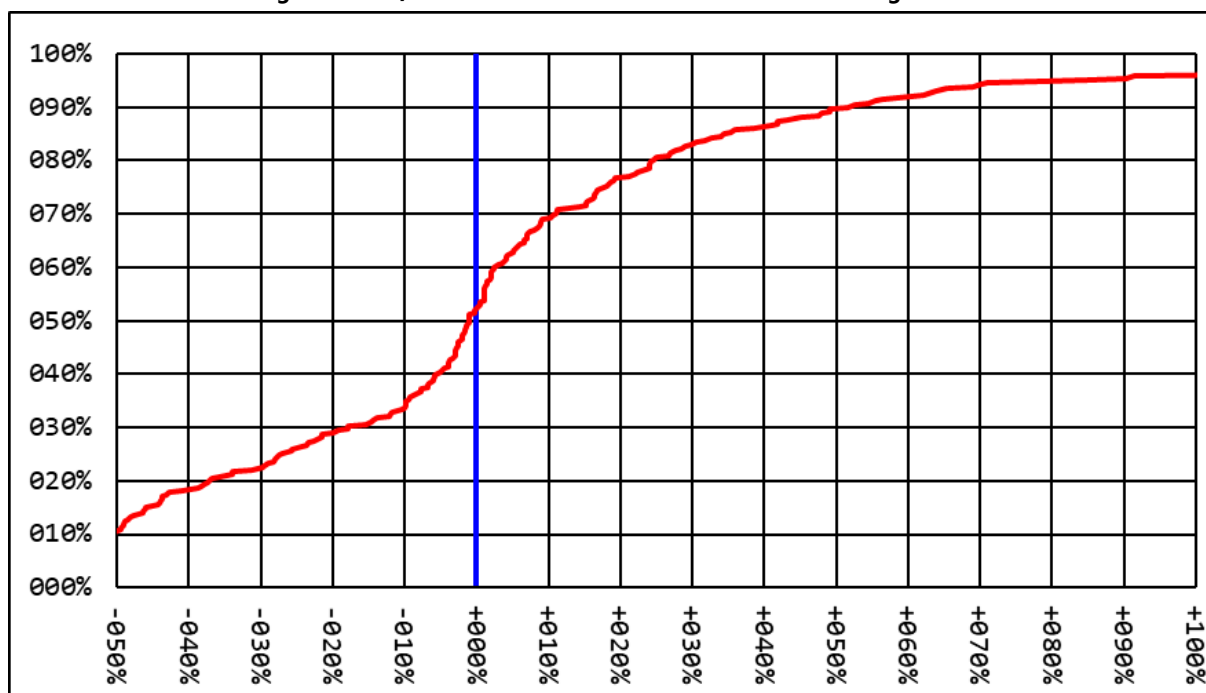
idealno vrijeme = 4'28"

duljina segmenta = 1,6km

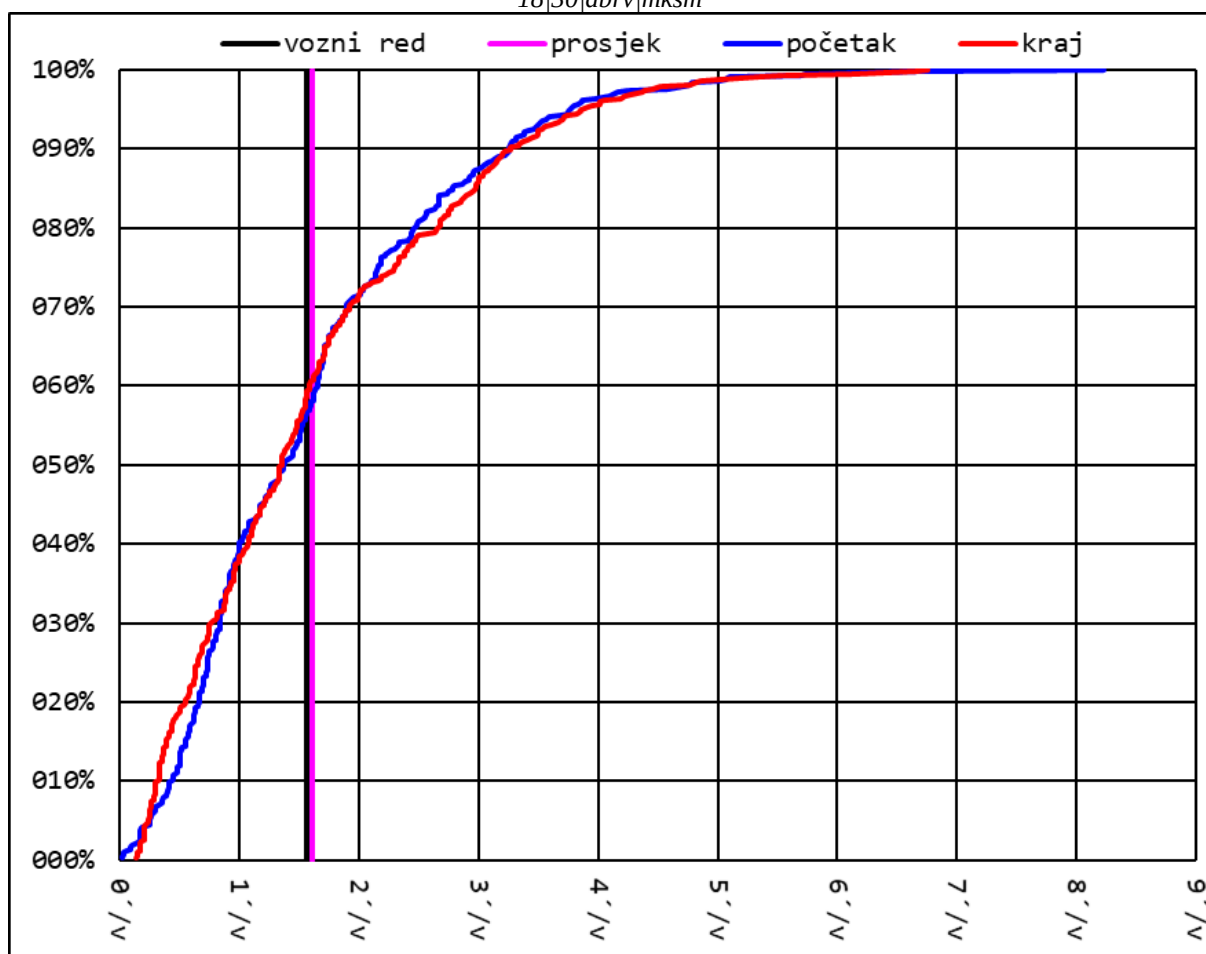
idealna brzina = 21km/h

frekvencija = 24v/h

broj uzoraka = 258



Prilog 48. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 18|30|dbrv|mksm



segment = 18|30|dbrv|mksm

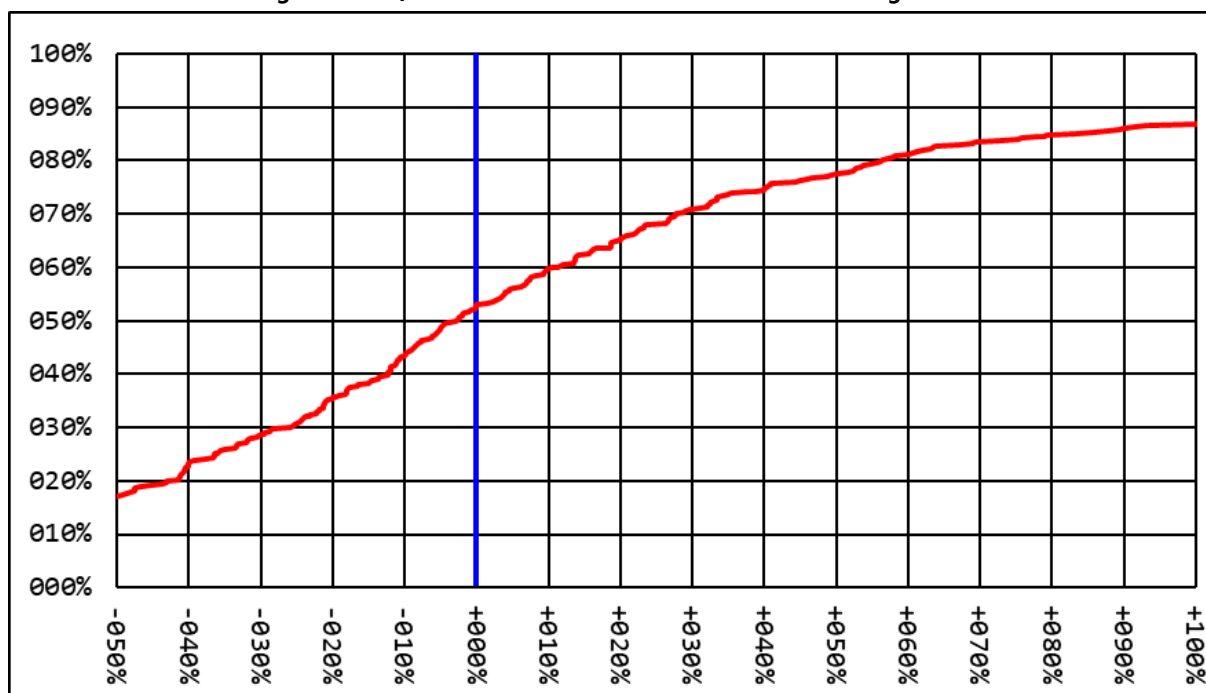
idealno vrijeme = 3'48"

duljina segmenta = 1,8km

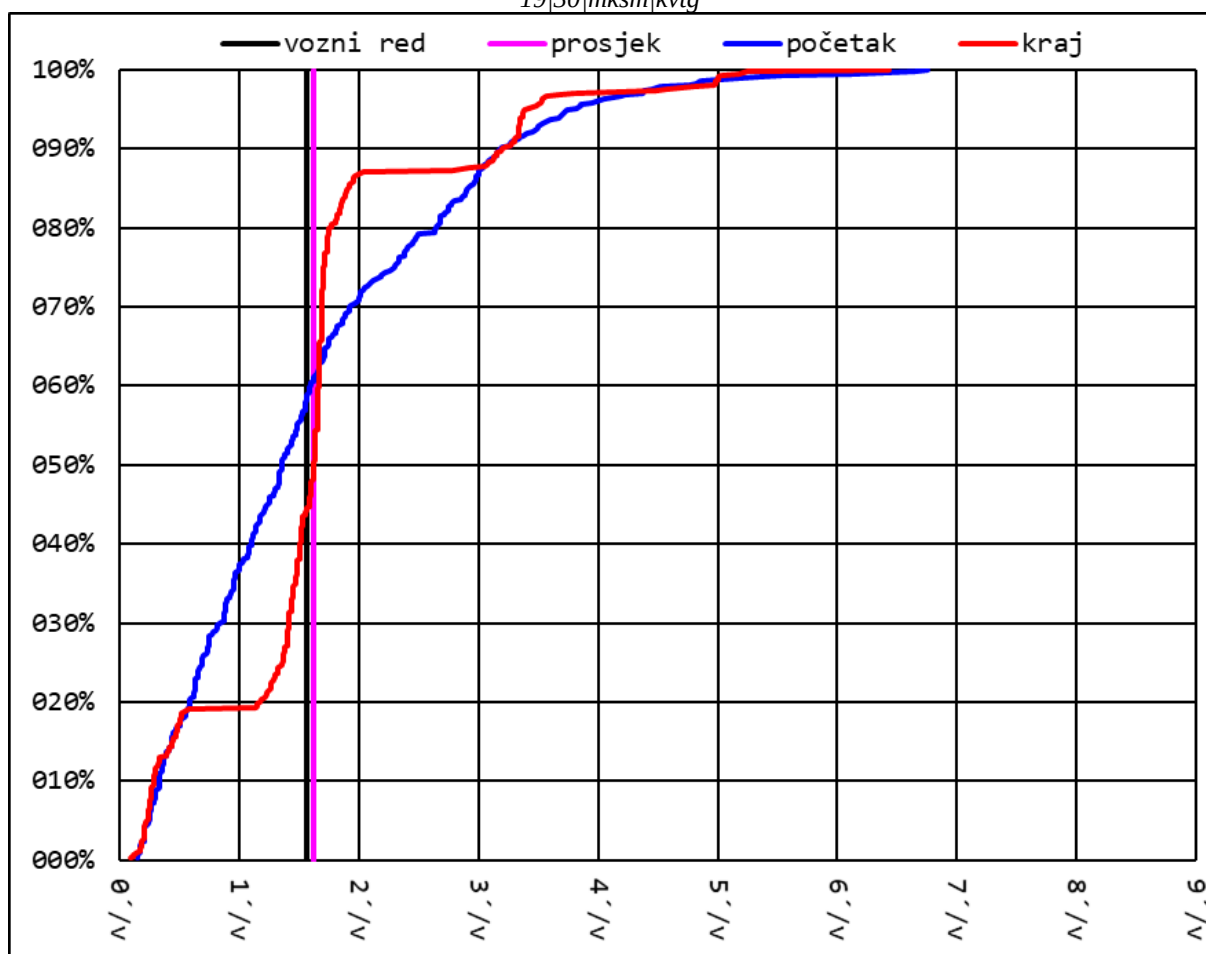
idealna brzina = 29km/h

frekvencija = 38v/h

broj uzoraka = 416



Prilog 49. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 19|30|mksm|kvtg



segment = 19|30|mksm|kvtg

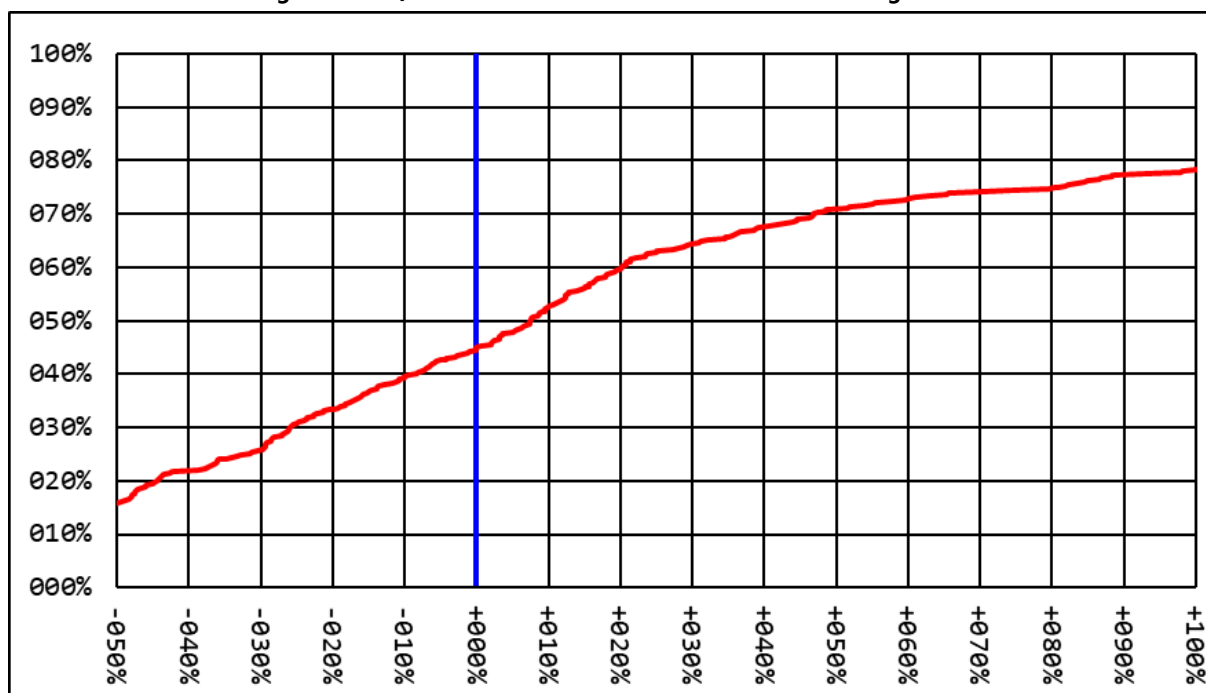
idealno vrijeme = 4'21"

duljina segmenta = 1,4km

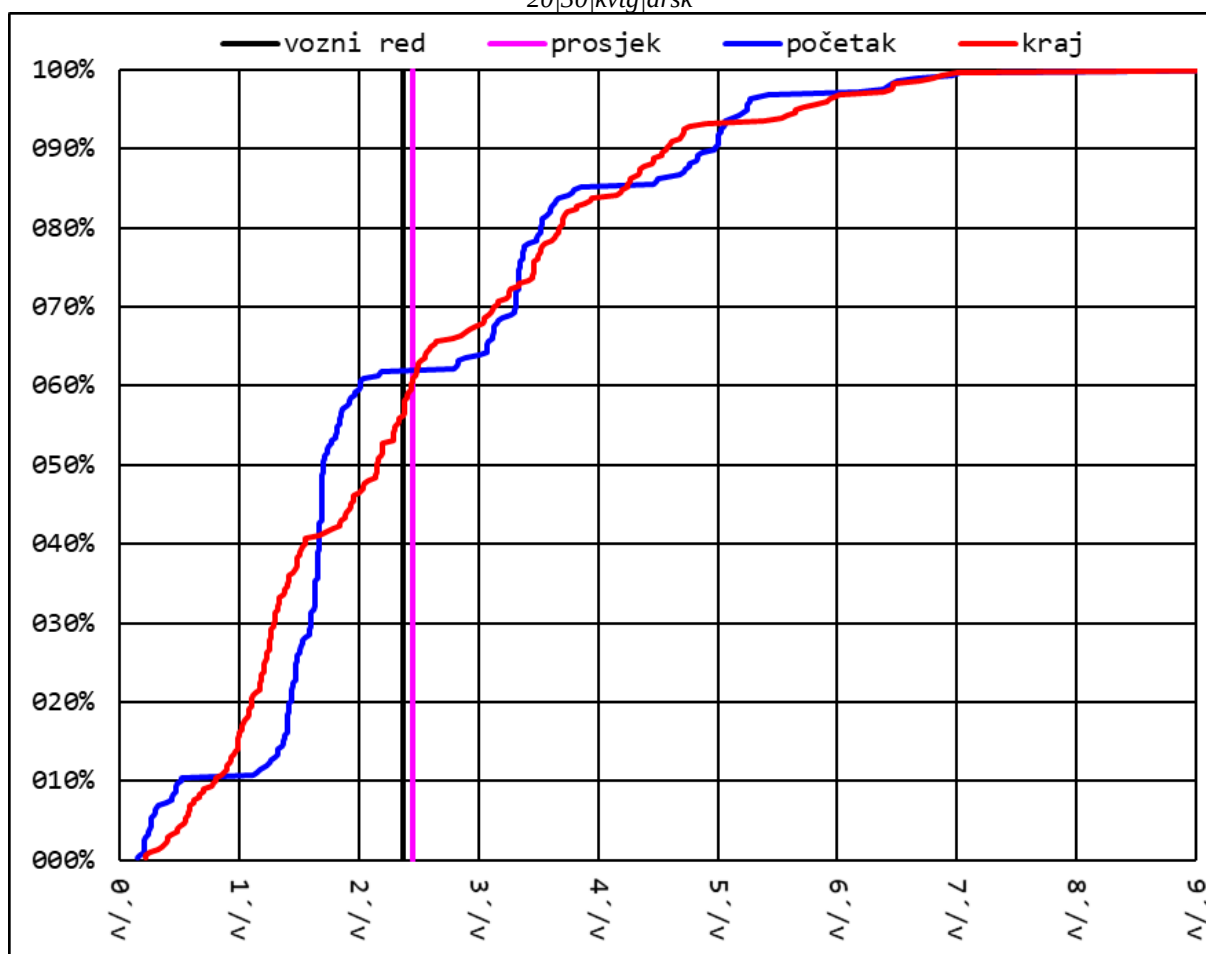
idealna brzina = 20km/h

frekvencija = 38v/h

broj uzoraka = 409



Prilog 50. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 20|30|kvtg|drsk



segment = 20|30|kvtg|drsk

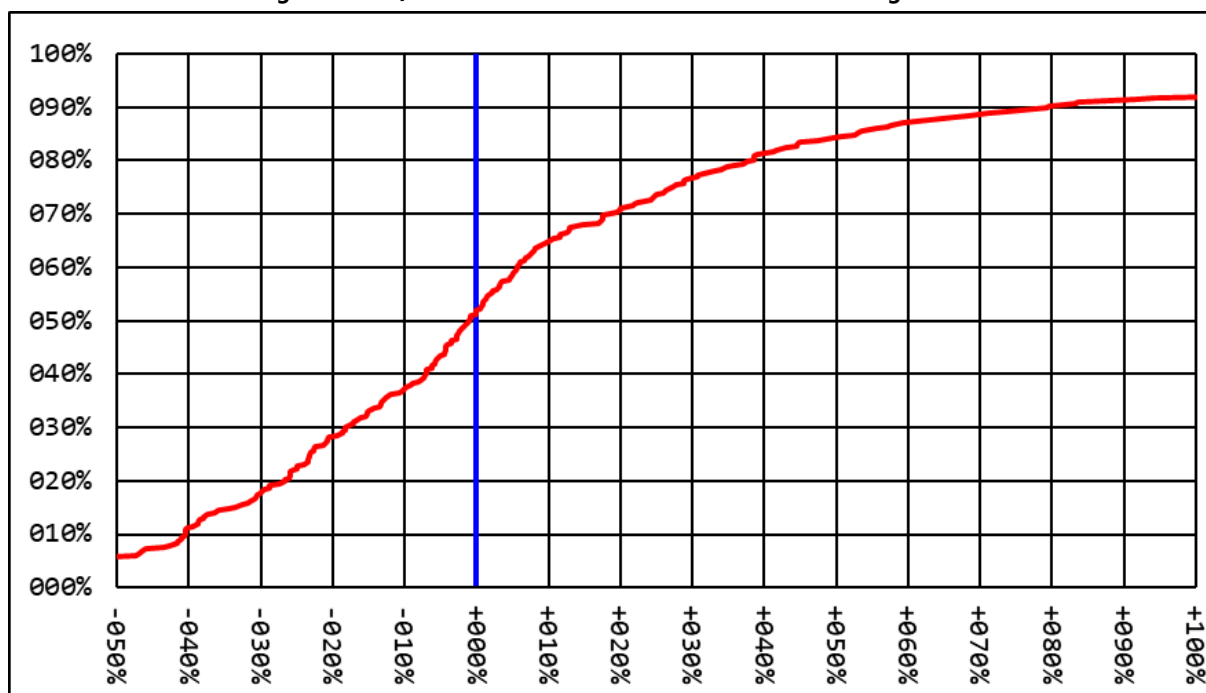
idealno vrijeme = 3'10"

duljina segmenta = 1,1km

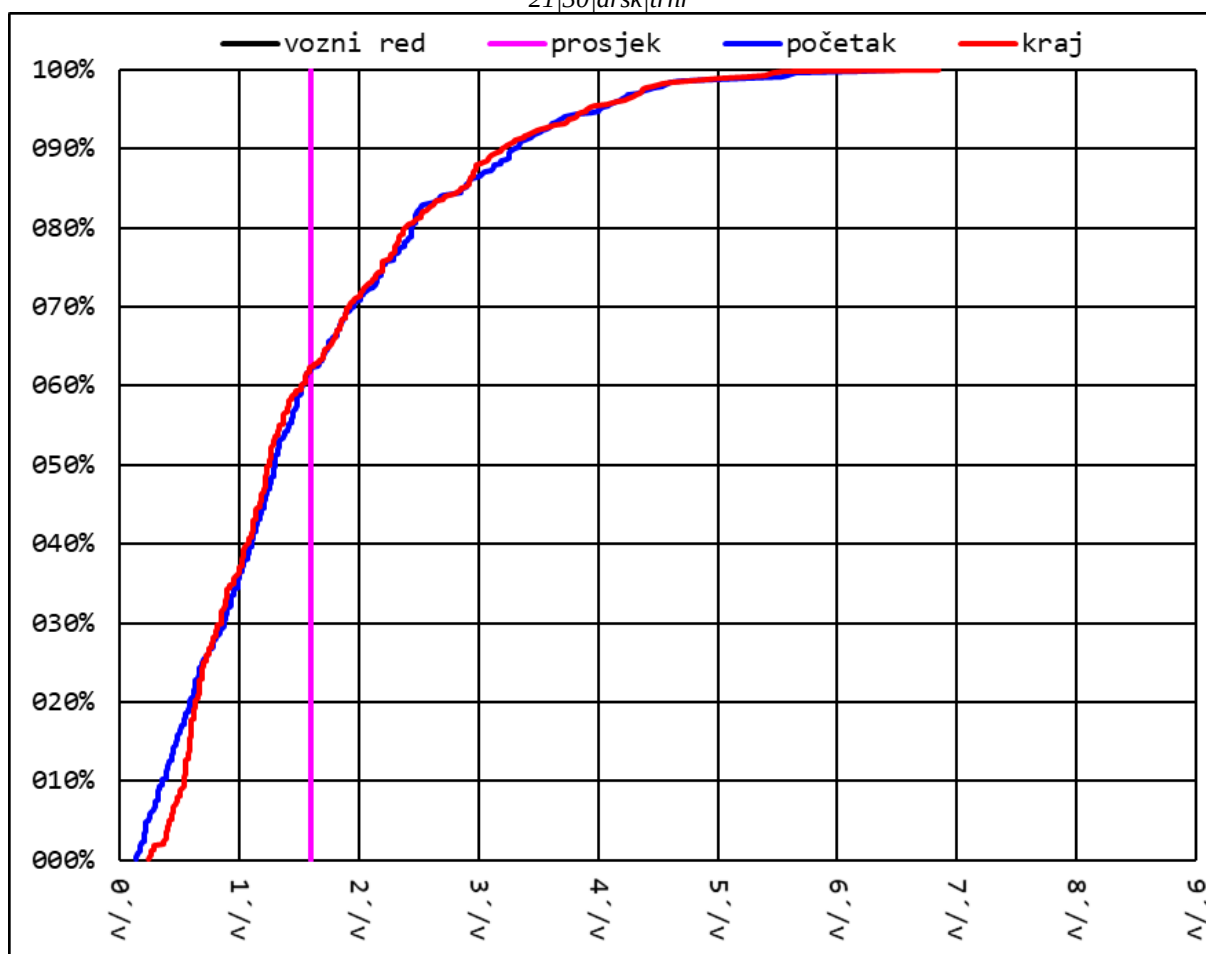
idealna brzina = 22km/h

frekvencija = 25v/h

broj uzoraka = 277



Prilog 51. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment
21|30|drsk|trhr



segment = 21|30|drsk|trhr

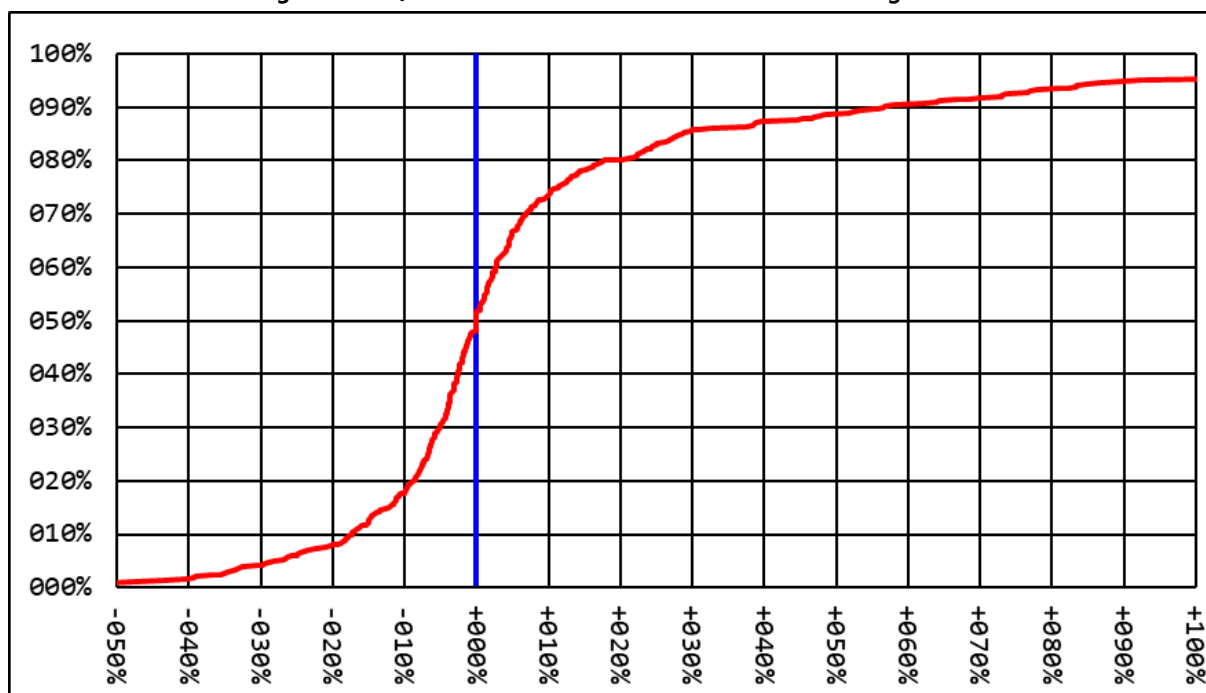
idealno vrijeme = 0'48"

duljina segmenta = 0,1km

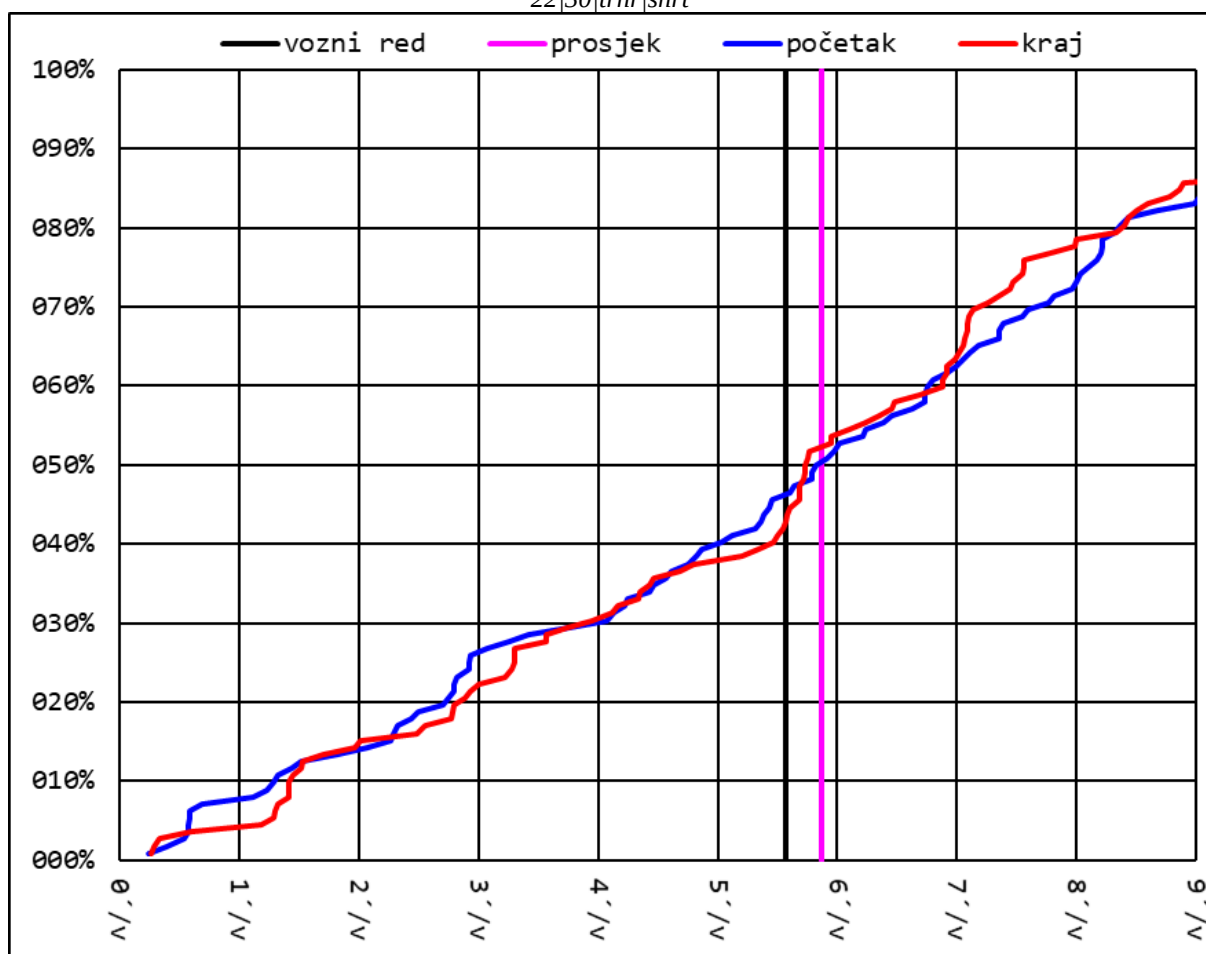
idealna brzina = 08km/h

frekvencija = 38v/h

broj uzoraka = 440



Prilog 52. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 22|30|trhr|shrt



segment = 22|30|trhr|shrt

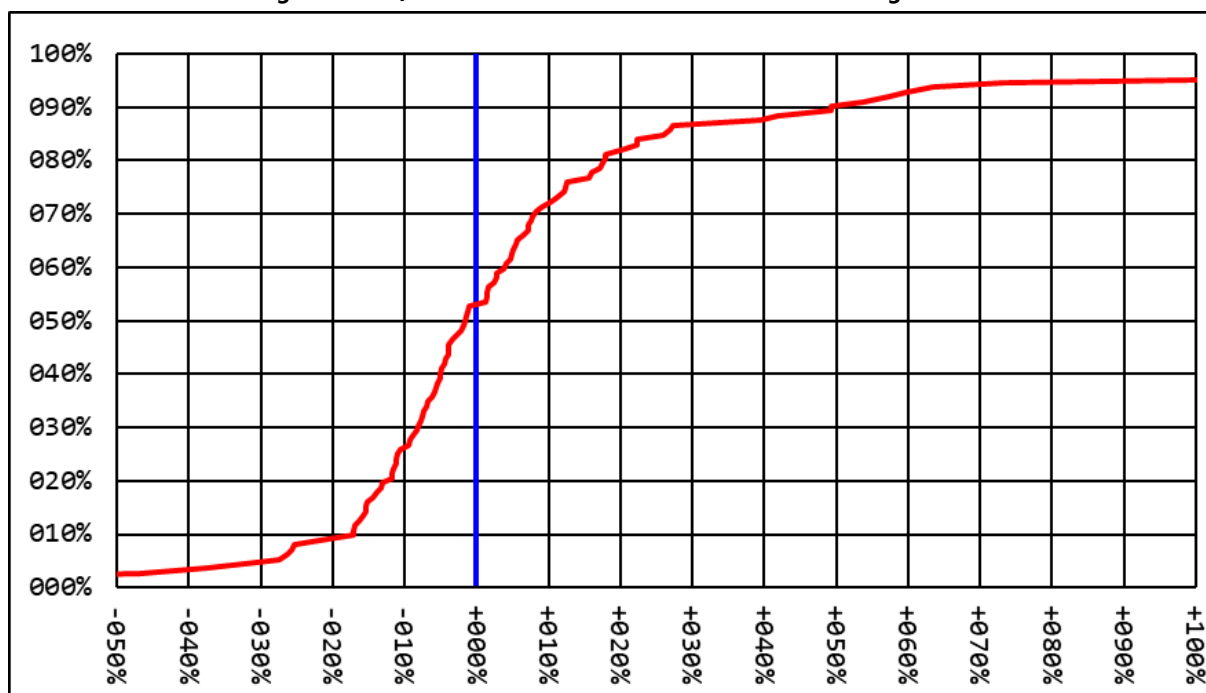
idealno vrijeme = 1'19"

duljina segmenta = 0,5km

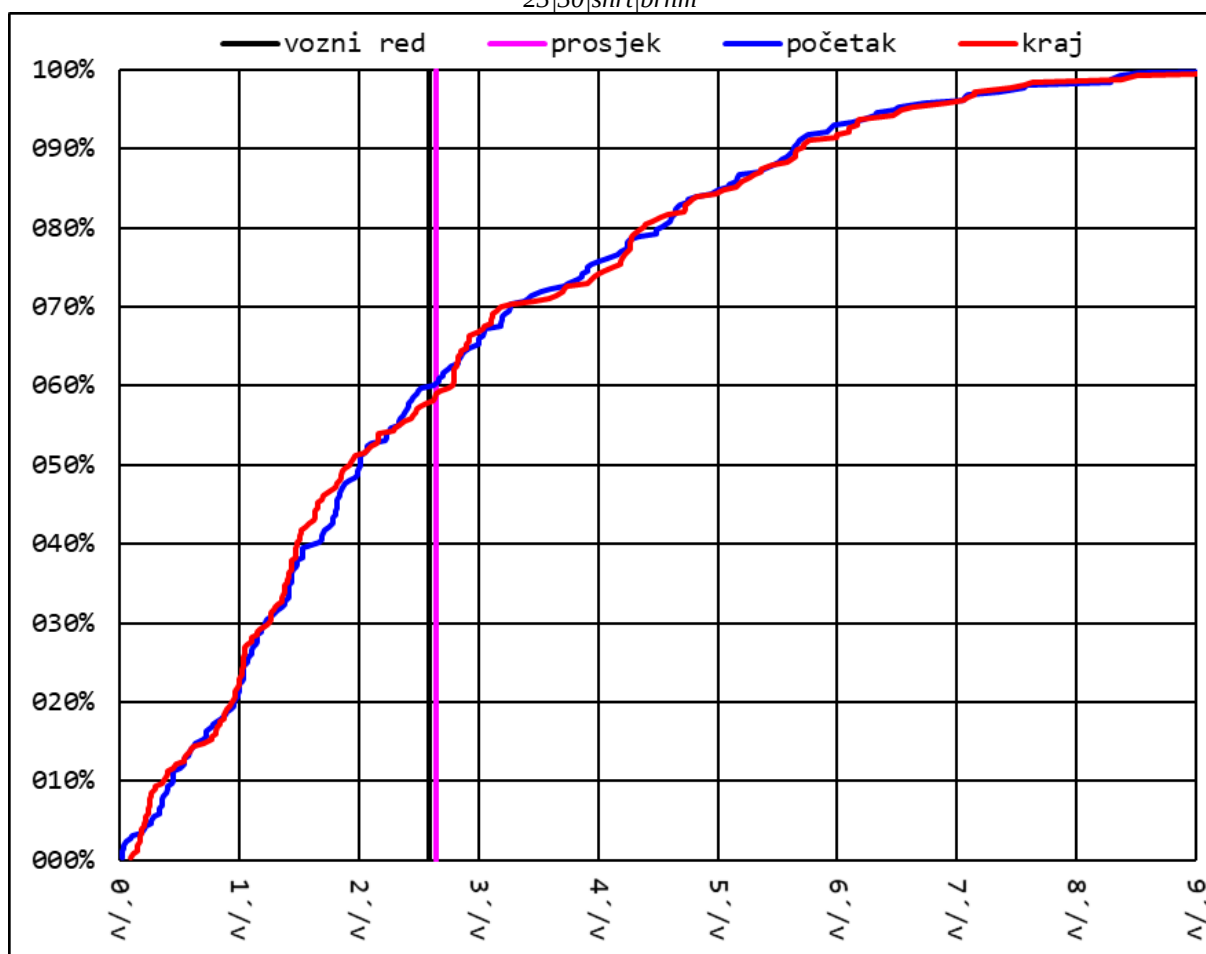
idealna brzina = 24km/h

frekvencija = 11v/h

broj uzoraka = 112



Prilog 53. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 23|30|shrt|brnm



segment = 23|30|shrt|brnm

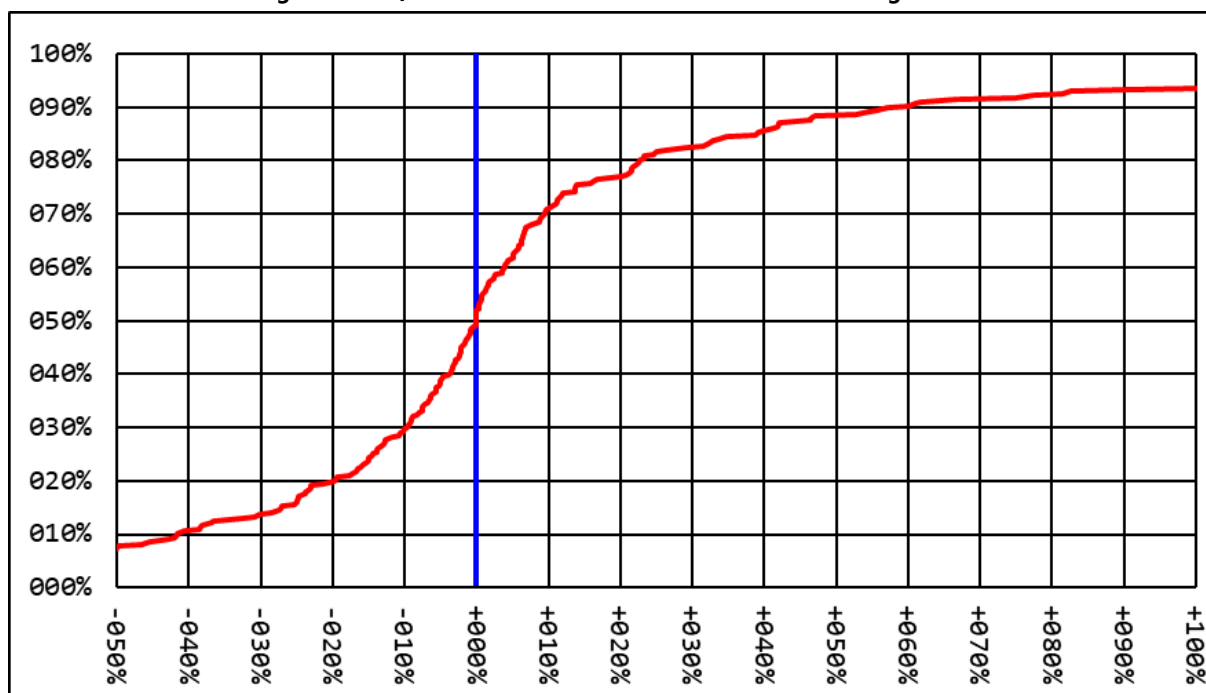
idealno vrijeme = 0'58"

duljina segmenta = 0,2km

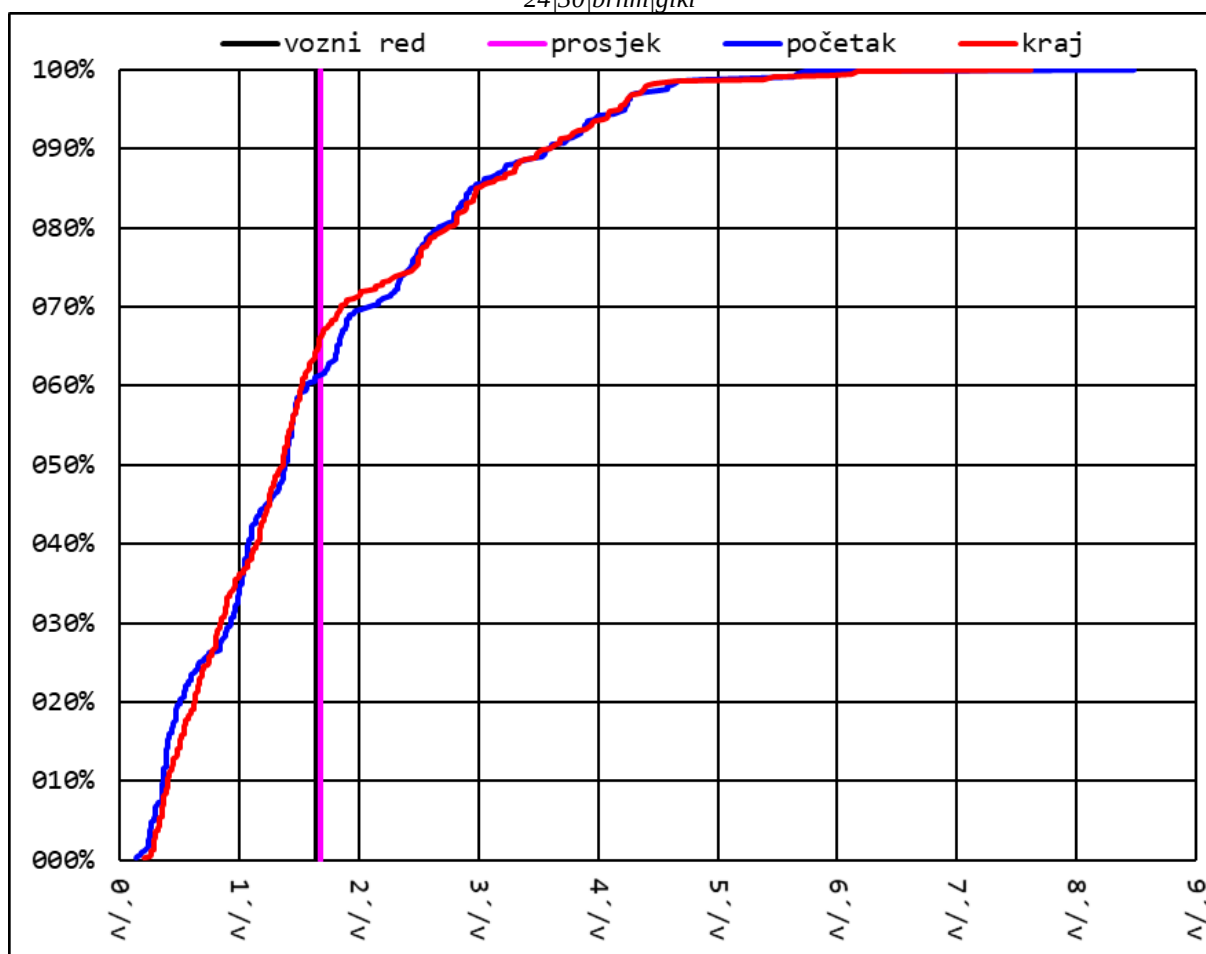
idealna brzina = 15km/h

frekvencija = 23v/h

broj uzoraka = 256



Prilog 54. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 24|30|brnm|glkl



segment = 24|30|brnm|glkl

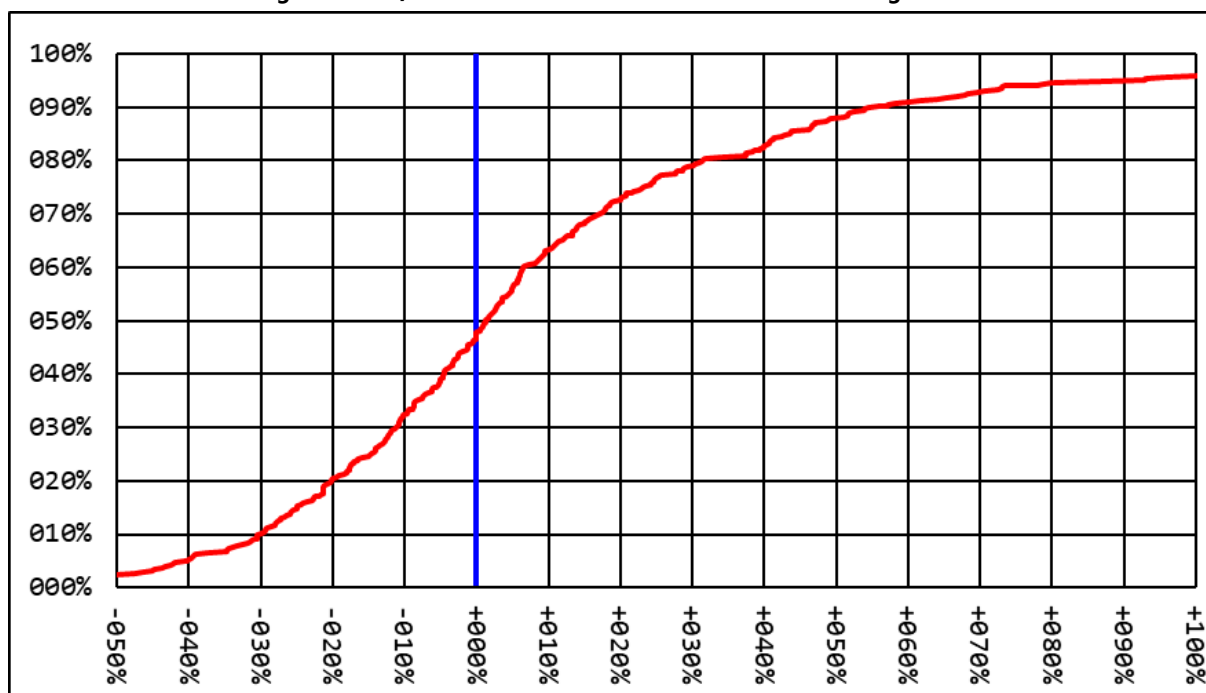
idealno vrijeme = 1'45"

duljina segmenta = 0,5km

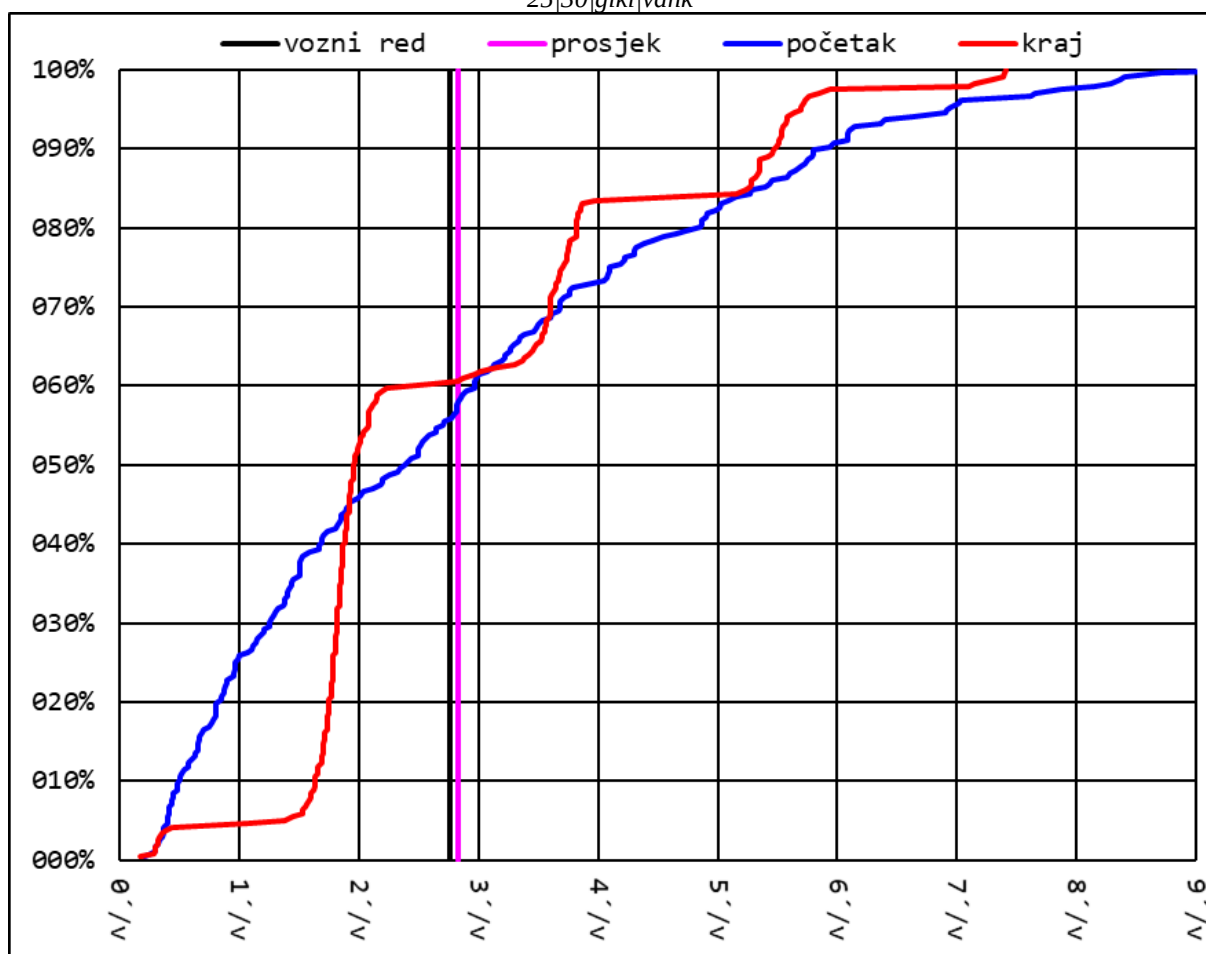
idealna brzina = 17km/h

frekvencija = 37v/h

broj uzoraka = 412



Prilog 55. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 25|30|glkl|vdk



segment = 25|30|glkl|vdk

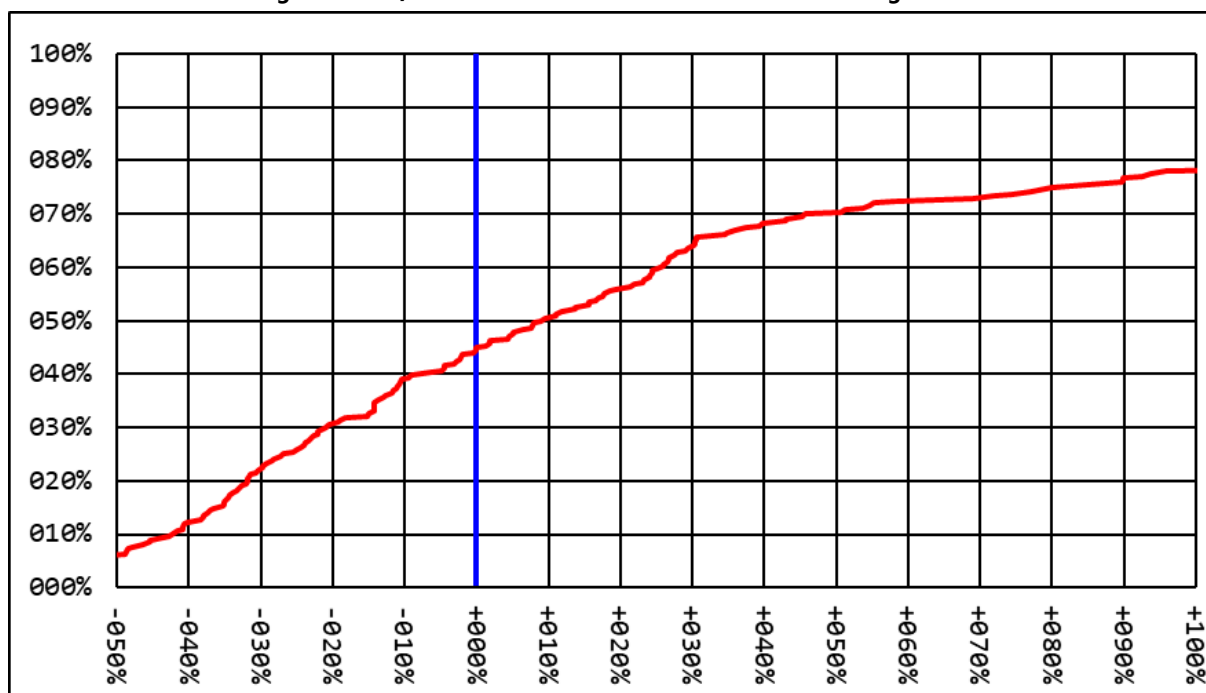
idealno vrijeme = 2'53"

duljina segmenta = 0,9km

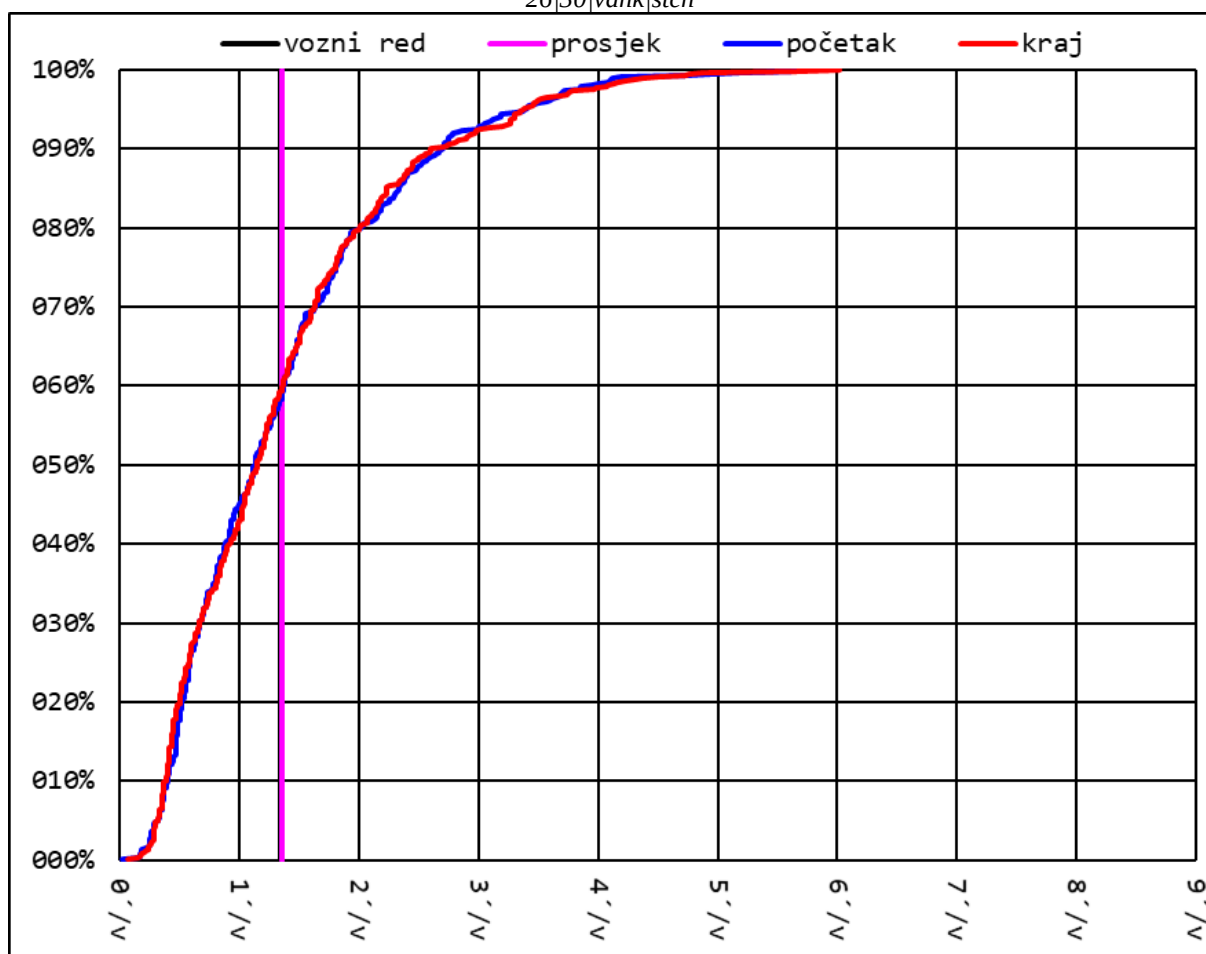
idealna brzina = 19km/h

frekvencija = 22v/h

broj uzoraka = 236



Prilog 56. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 26|30|vdk|stcn



segment = 26|30|vdk|stcn

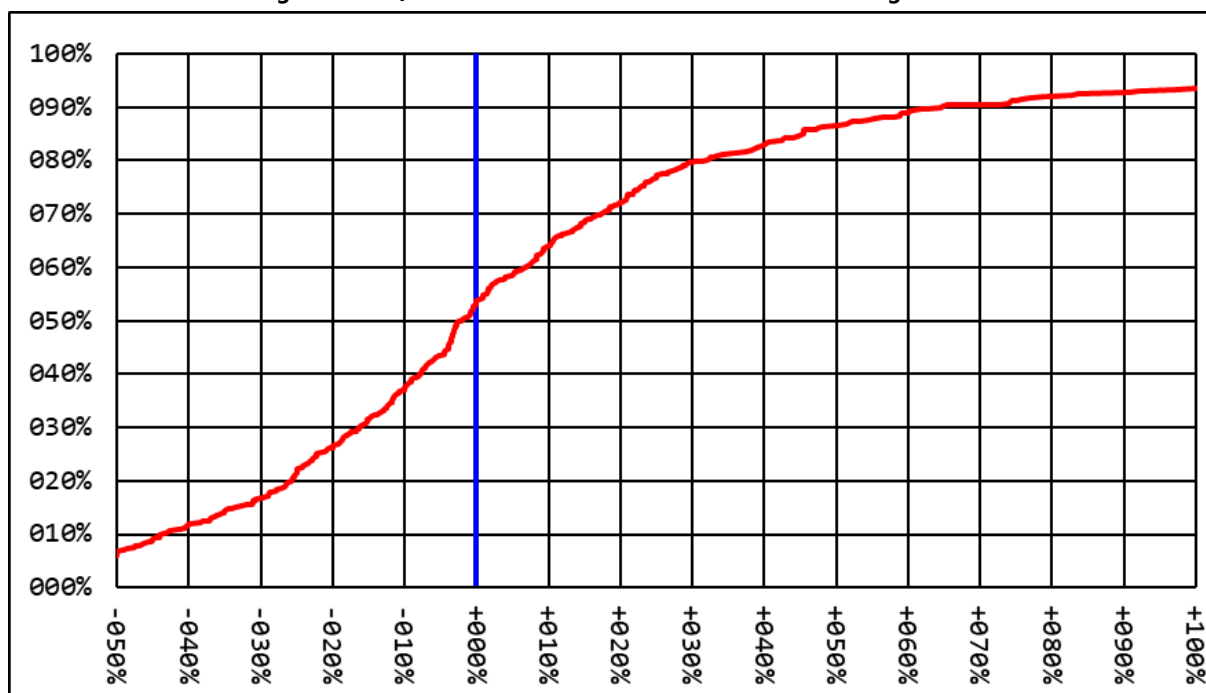
idealno vrijeme = 0'53"

duljina segmenta = 0,3km

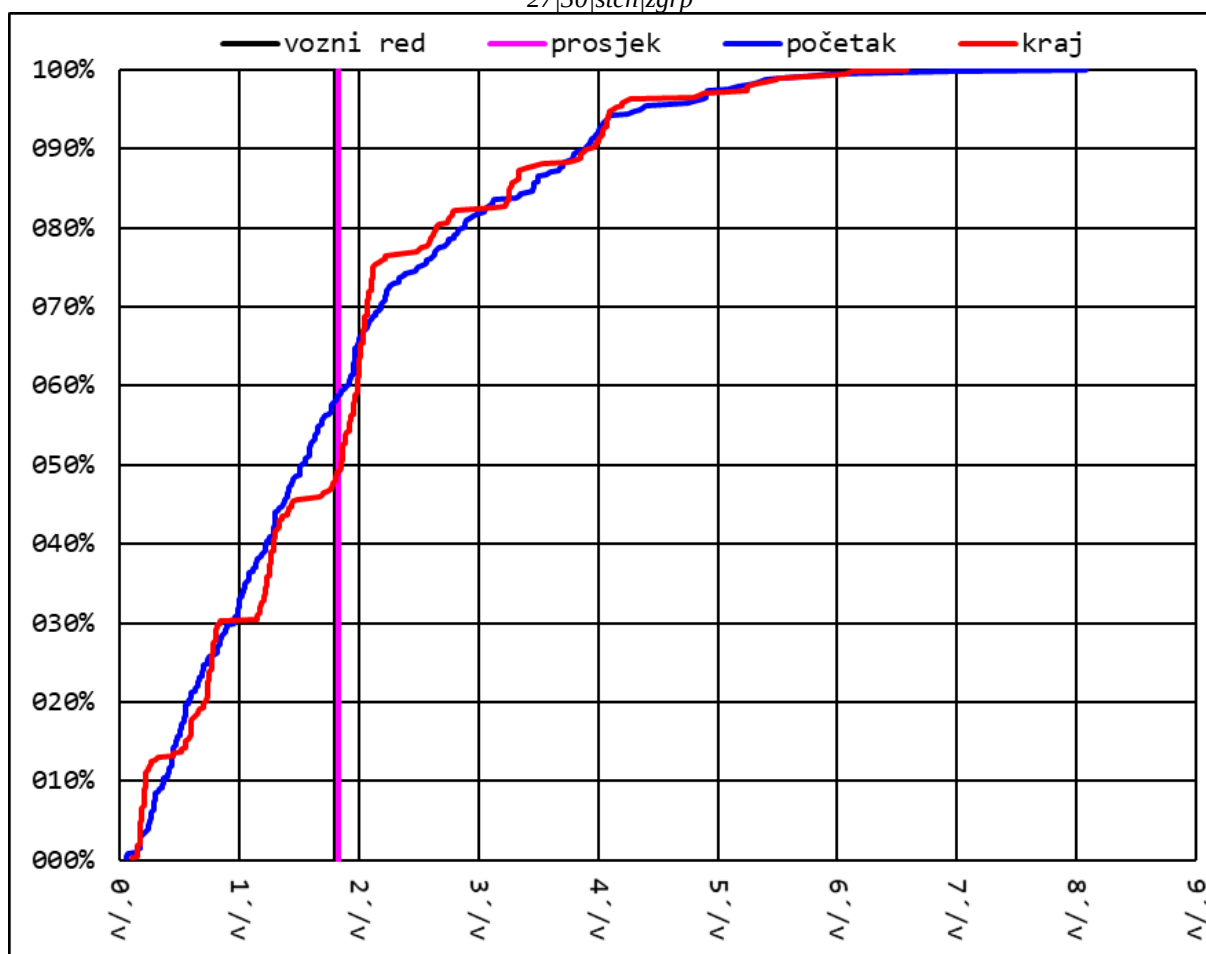
idealna brzina = 18km/h

frekvencija = 45v/h

broj uzoraka = 518



Prilog 57. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 27|30|stcn|zgrp



segment = 27|30|stcn|zgrp

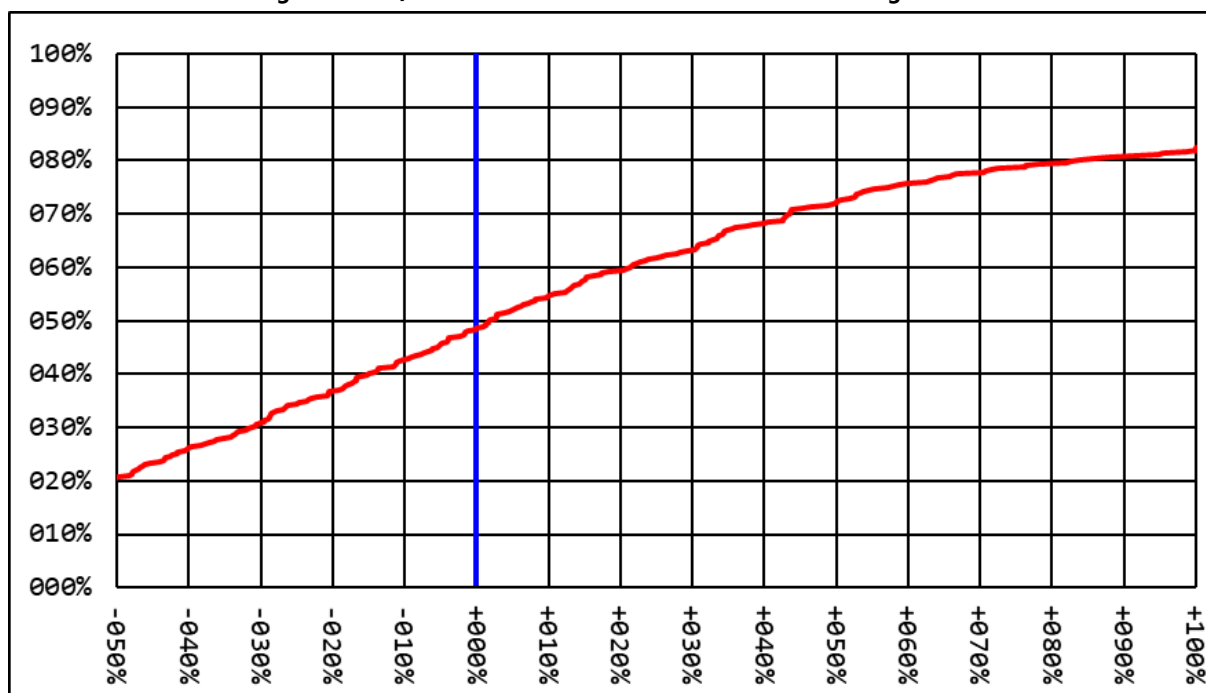
idealno vrijeme = 1'28"

duljina segmenta = 0,5km

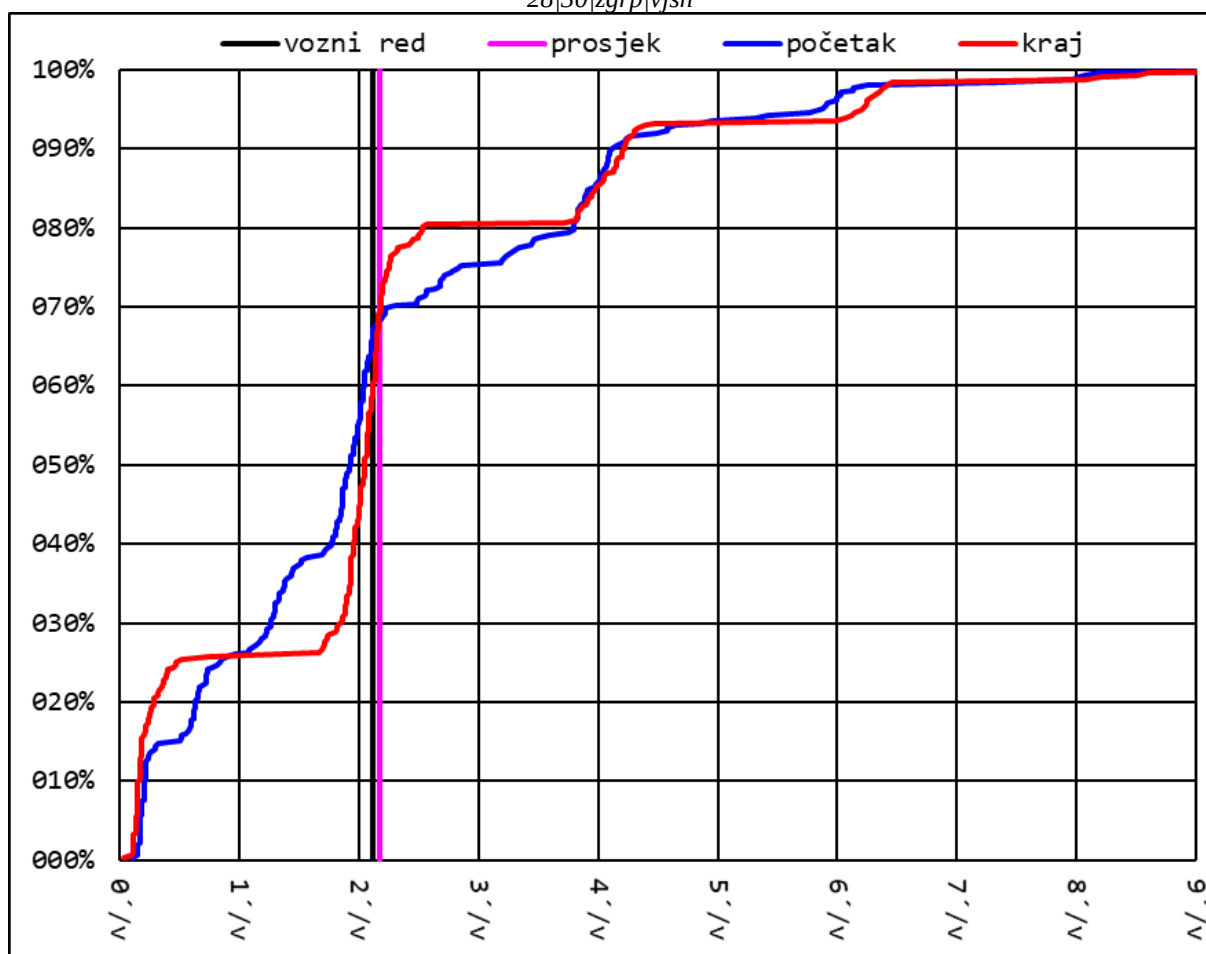
idealna brzina = 20km/h

frekvencija = 33v/h

broj uzoraka = 377



Prilog 58. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 28|30|zgrp|vjsn



segment = 28|30|zgrp|vjsn

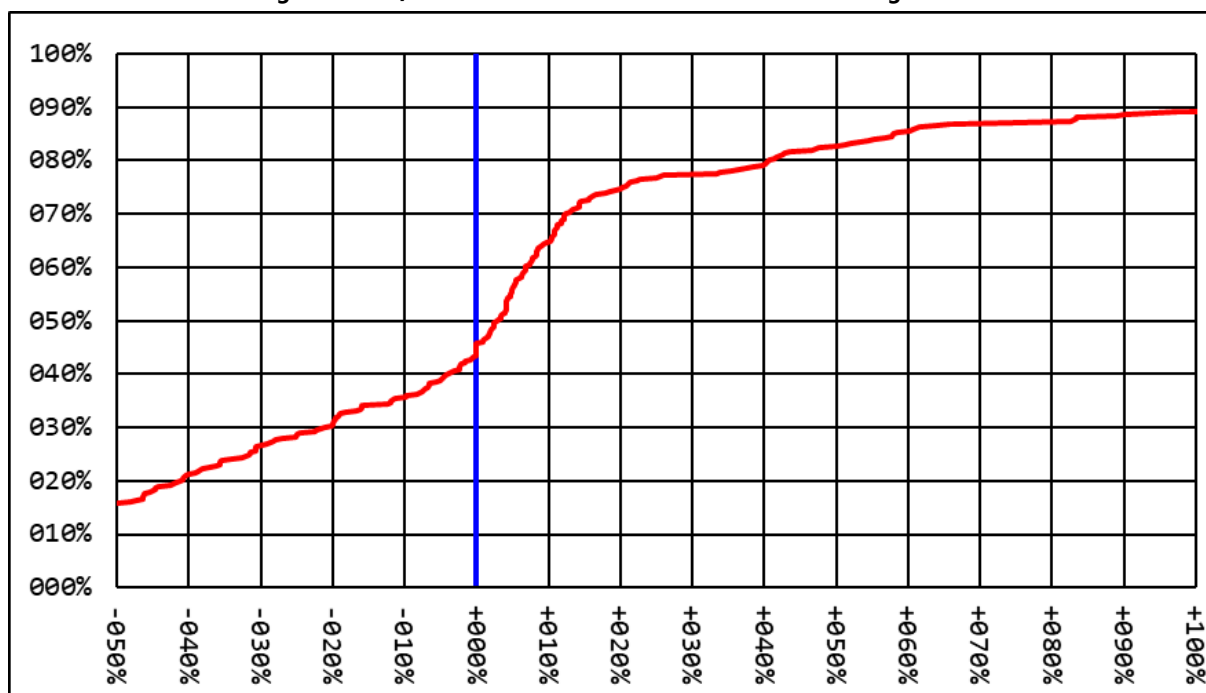
idealno vrijeme = 1'58"

duljina segmenta = 0,6km

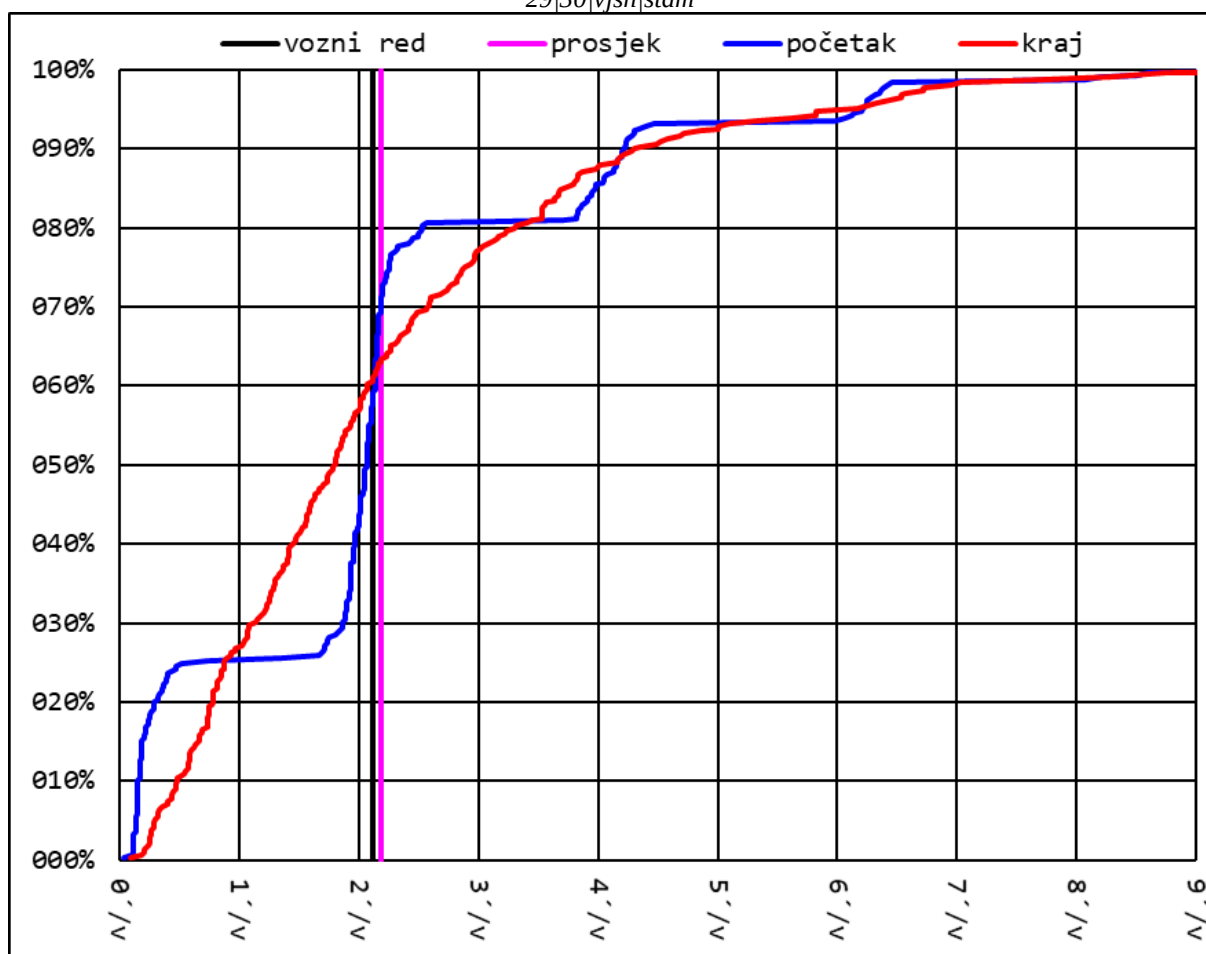
idealna brzina = 19km/h

frekvencija = 28v/h

broj uzoraka = 311



Prilog 59. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 29|30|vjsn|stdm



segment = 29|30|vjsn|stdm

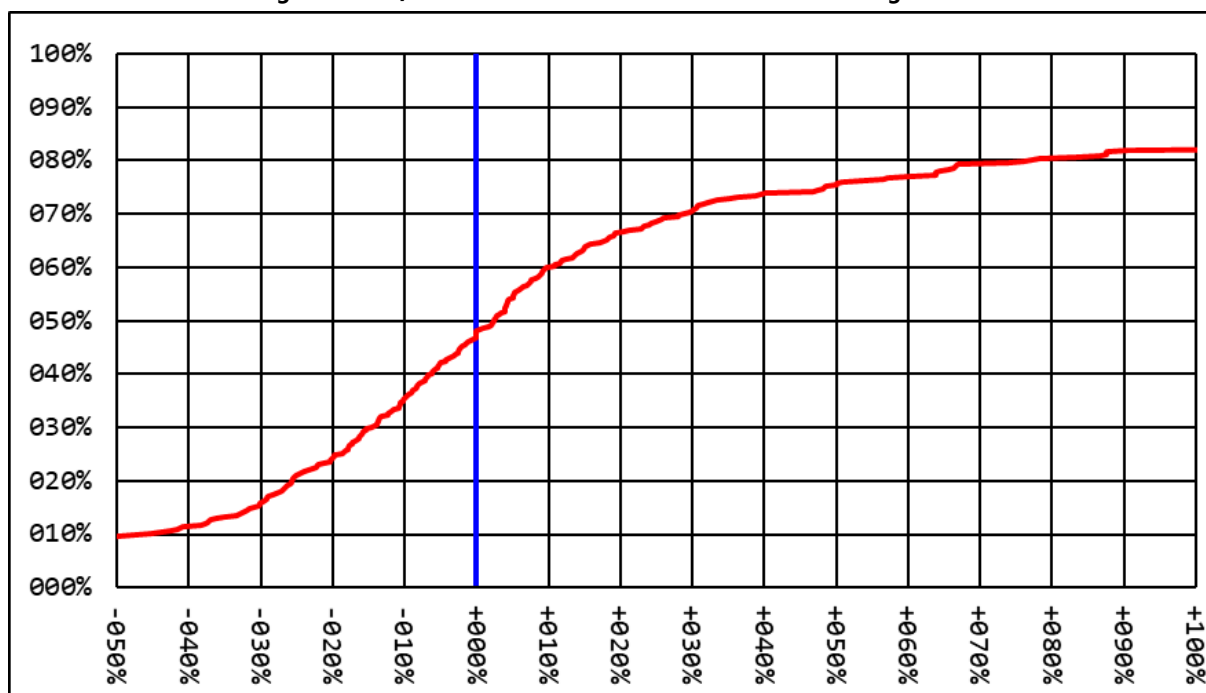
idealno vrijeme = 2'46"

duljina segmenta = 0,9km

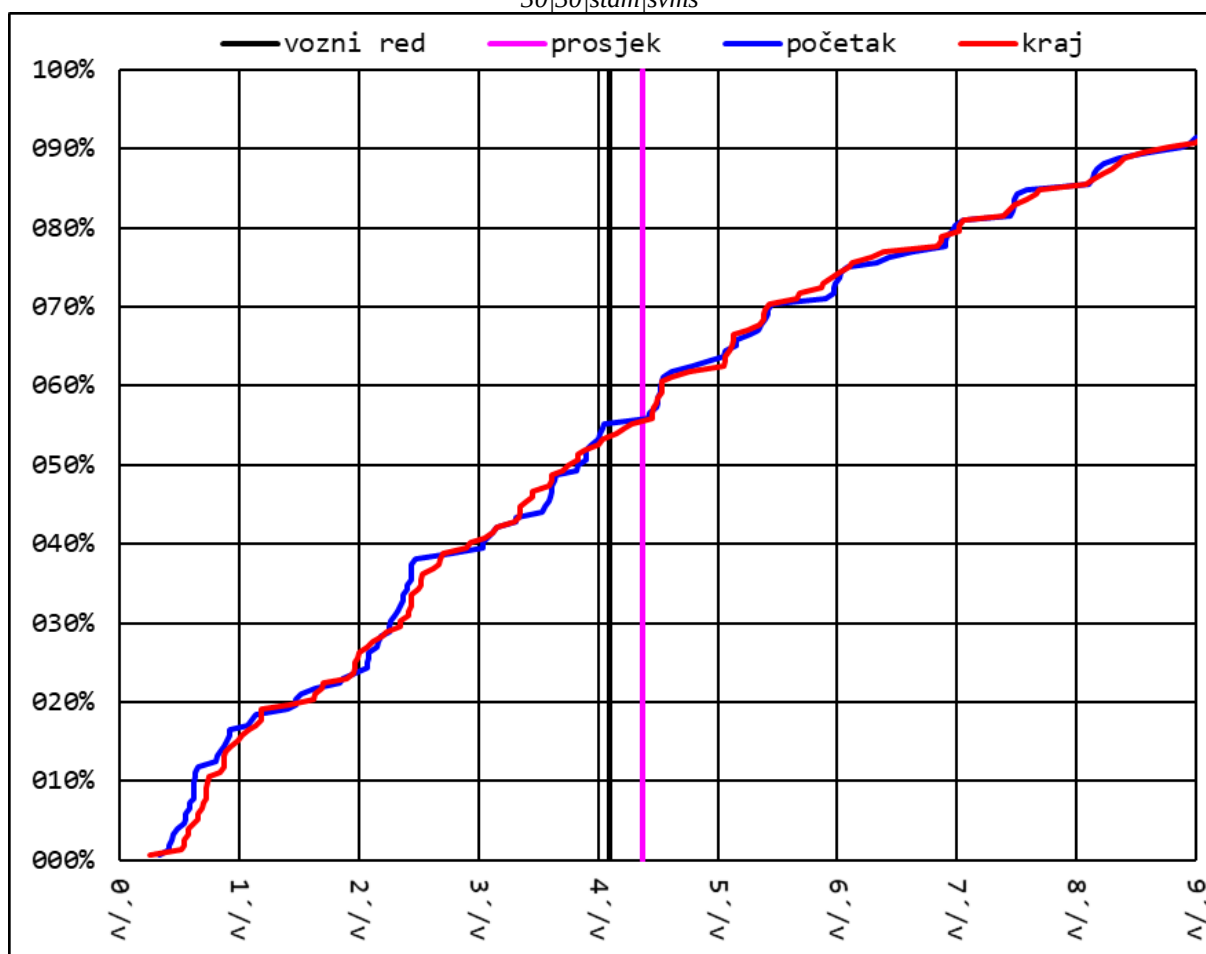
idealna brzina = 20km/h

frekvencija = 28v/h

broj uzoraka = 309



Prilog 60. Kumulativna razdioba sljedova vozila i kumulativni odnos krajnjeg i početnog slijeda, segment 30|30|stdm|svms



segment = 30|30|stdm|svms

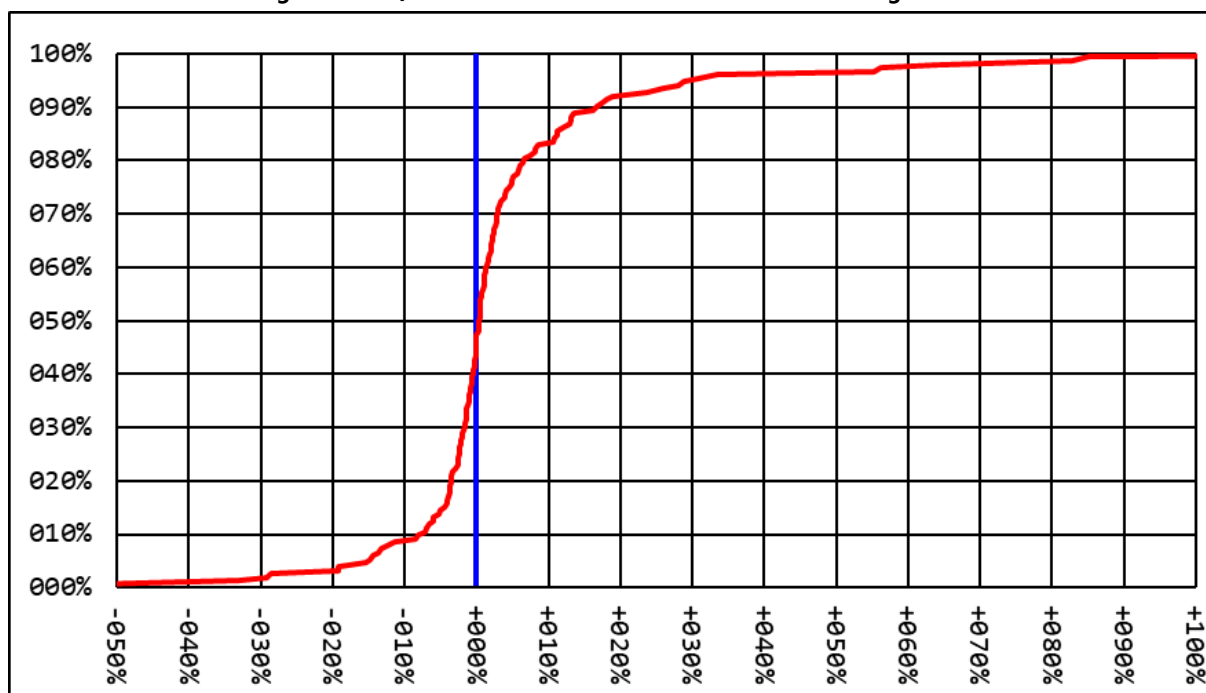
idealno vrijeme = 0'34"

duljina segmenta = 0,2km

idealna brzina = 24km/h

frekvencija = 15v/h

broj uzoraka = 152



POJMOVNIK

ciklus raskrižja	vrijeme potrebno za jednu izmjenu svih faza raskrižja
domena	interval raspona vrijednosti veličine
faktor smetnji	pojava u sustavu javnoga gradskoga prijevoza koja uzrokuje veće vrijeme putovanja u odnosu na idealno vrijeme putovanja
faza raskrižja	razdoblje u kojemu je dozvoljen prolaz vozila na određenim privozima kroz raskrižje, a zabranjen prolaz vozila preostalih privoza raskrižja
frekvencija	za bilo koje mjesto na mreži linija javnoga gradskoga prijevoza, omjer broja vozila od interesa koja su prošla kroz promatrano mjesto i proteklog vremena promatranja
idealna brzina putovanja	brzina koja se dobije iz duljine promatranog segmenta i idealnog vremena putovanja na segmentu
idealno vrijeme putovanja	vrijeme putovanja između bilo koje dvije točke na liniji javnog prijevoza (najviše između izvorišnog i odredišnog terminala) u slučaju kada ne bi postojale prepreke, već bi bilo samo pod utjecajem ponašanja vozača i karakteristika vozila
inteligentni transportni sustav	holistička, upravljačka i informacijsko-komunikacijska nadgradnja klasičnog prometnog sustava kojom se postiže poboljšanje performansi, bolje odvijanje prometa, učinkovitiji prijevoz, poboljšanje prometne sigurnosti, veća udobnost i zaštita putnika i manje onečišćenje okoliša
kontinuirana varijabla	varijabla kojoj je raspon vrijednosti neprekinuta (glatka) funkcija
koordinirani signalni planovi	signalni planovi dvaju susjednih raskrižja najčešće na maloj udaljenosti, s istim ciklusima i namjerno podešenim fazama da bi vozilo moglo proći na sljedbenom raskrižju u zelenoj fazi
korelacijska analiza	analiza u kojoj se utvrđuje značajnost odnosa između zavisnih i nezavisnih varijabli
kumulativni efekt	pojava u kojoj je zajednički utjecaj više faktora smetnji u javnom prijevozu koji su se našli na istom mjestu u mreži veći nego što bi bio zbroj pojedinačnih utjecaja svakog od faktora
kvaliteta usluge javnoga gradskoga prijevoza	mjera uspješnosti odvijanja prijevoznog procesa u javnom gradskom prijevozu
masovni javni gradski prijevoz	bilo koji prijevoz putnika u gradovima koji može kroz bilo koje mjesto prevesti velik broj putnika u jedinici vremena
modalna razdioba	raspored udjela putovanja prema svakom modalitetu putovanja u svim gradskim putovanjima
nagomilavanje vozila	prometovanje sljedbenog vozila (najčešće premale zauzetosti) iza prethodnog (najčešće prevelike zauzetosti) koje nastaje u javnom prijevozu zbog neravnomjernosti prijevoznog procesa, te najčešće nestaje pri razdvajanju ruta vozila ili na terminalima
nepoštivanje žutih trakova	neovlašteno korištenje žutih trakova namijenjenih vozilima javnoga gradskoga prijevoza od strane ostalih vozila
neravnomjernost prijevozne ponude	karakteristika prijevozne ponude u obliku slijeda, kapaciteta vozila ili transportnog rada, u kojoj navedeno nije ravnomjerno u istoj promatranoj točki mreže linija u određenom razdoblju promatranja
nestabilan tok	tok vozila gustoće veće od gustoće maksimalnog protoka
odsječak	dio segmenta na kojemu su istovremeno konstantni tip traka, ubrzanje, brzina ili usporenje vozila
odstupanje	postotna razlika promatrane veličine u odnosu na referentnu
odudaranje vremena putovanja	svojstvo vremena putovanja koje se najčešće opisuje prosječnim odstupanjem vremena putovanja od idealnog za isti segment, isto razdoblje promatranja ili isti vremenski raspon promatranja
operativna brzina	brzina putovanja, odnosno brzina koja uključuje vožnje između stajališta i zadržavanja na stajalištima, a isključuje zadržavanja na terminalima ili procese vezane za spremišta
peron	površina za stajanje jednog vozila na stajalištu ili terminusu

pouzdanost usluge javnog prijevoza	mjera uspješnosti približavanja stvarne usluge javnog prijevoza zadanom voznom redu
prioritet javnoga gradskoga prijevoza	skup mjera koje rezultiraju povlaštenim položajem javnoga gradskoga prijevoza u odnosu na ostale sudionike u prometu, s povećanjem brzine vožnje u odnosu na prethodno stanje
prognostički model	model koji ima sposobnost predvidjeti vrijednosti zavisnih varijabli s promjenom mjesta i/ili vremena
rezolucija promatranja	razina detaljnosti promatranja koja se najčešće opisuje brojem pouzdanih znamenki vrijednosti veličina
segment	dionica linije javnog prijevoza između bilo koje dvije točke promatranja, maksimalno od terminala do terminala
sinkronizirani signalni planovi	signalni planovi dvaju susjednih raskrižja s jednakim trajanjem ciklusa i sličnim fazama, gdje vozilo dolazi na sljedbeno raskrižje gotovo uvijek u istom dijelu ciklusa
slijed	za bilo koje mjesto na mreži linija javnoga gradskoga prijevoza, omjer proteklog vremena promatranja i broja vozila od interesa koja su prošla kroz promatrano mjesto
terminus	mjesto na terminalu na kojem se zadržava vozilo radi odmora vozača, te s kojeg se polazi u sljedeće putovanje prema voznom redu; može i ne mora biti stajalište
ulični masovni javni gradski prijevoz	masovni javni gradski prijevoz, koji nije izdvojen, pa je ograničen smetnjama koje se pojavljuju u uličnoj mreži
varijabilnost vremena putovanja	svojstvo rasipanja vremena putovanja od središnje (medijalne, prosječne) prema manjoj ili većoj vrijednosti za isti segment, isto razdoblje promatranja ili isti vremenski raspon promatranja
višestruka linearna regresija	postupak u kojemu se zavisna varijabla prikazuje pomoću dvije ili više nezavisnih varijabli kao linearna funkcija
vremenska gustoća	omjer pojavljivanja proizvoljne varijable na promatranom segmentu i idealnog vremena putovanja segmentom
vrijeme čekanja na dolazak vozila	vrijeme koje putnici provedu na stajalištu od trenutka dolaska na stajalište do trenutka ukrcaja u vozilo javnoga gradskoga prijevoza
vrijeme poluobrt	vrijeme koje bi proteklo između susjednih polazaka istog vozila s izvorišnog i odredišnog terminala prema voznom redu
vrijeme provedeno u vozilu	vrijeme koje putnici provedu od ukrcaja u vozilo na stajalištu do iskrcaja iz vozila na drugom stajalištu
vrijeme putovanja	vrijeme koje protekne između prolaska istog vozila javnog prijevoza bilo kojim dvjema promatranim točkama na liniji na kojoj to vozilo prometuje, a najviše između izvorišnog i odredišnog terminala
zagušenje terminala	situacija u kojoj se vozilo ne može zaustaviti na terminalu jer su svi peroni za zaustavljanje zauzeti prethodnim vozilima
zauzetost praznog vozila	zauzetost vozila u slučaju kada u vozilu nema putnika koja se dobije dijeljenjem negativnog broja sjedećih mjesta sa stajaćom površinom
zauzetost vozila	mjera za opisivanje odnosa broja putnika u vozilu i kapaciteta vozila u obliku gustoće stajaćih putnika

TUMAČ KRATICA

ANN	umjetna neuronska mreža artificial neural network
ANPR	automatsko prepoznavanje registracijskih oznaka automatic number plate recognition
APC	automatizirano brojenje putnika automated passenger counting
AR	autoregresivna tehnika autoregressive
ARIMA	autoregresivni integrirani kretajući prosjek autoregressive integrated moving average
ARMA	autoregresivni kretajući prosjek autoregressive moving average
AVL	automatsko lociranje vozila automatic vehicle location
BRT	brzi autobusni sustav bus rapid transit
CCTV	sustav videonadzora closed-circuit television
GIS	geografski informacijski sustav geographic information system
GPRS	opća paketna radijska usluga general packet radio service
GPS	globalni pozicijski sustav global positioning system
GSM	globalni sustav pokretnih komunikacija global system for mobile communications
IPTS	inteligentni transportni sustavi javnog prijevoza intelligent public transport systems
ITS	inteligentni transportni sustav intelligent transport system
KRT	spljoštenost kurtosis
LRT	laka gradska željeznica light rail transit
MA	kretajući prosjek moving average
MAPE	srednja apsolutna postotna pogreška mean absolute percentage error
NRMSE	normirana srednja kvadratna pogreška normalized root mean square error
OCR	optičko prepoznavanje simbola optical character recognition
RBT	dodatno zaštitno vrijeme reliability buffer time
RMSE	srednji kvadratni korijen pogreške root mean square error
SKW	asimetričnost skewness
SMAPE	simetrična srednja apsolutna postotna pogreška symmetric mean absolute percentage error
STARIMA	prostorno-vremenski autoregresivni integrirani pomični prosjek space-time autoregressive integrated moving average
STDNN	prostorno-vremenska neuronska mreža space-time-delay neural network
WMAPE	srednja težinska apsolutna postotna pogreška weighted mean absolute percentage error
WSMAPE	simetrična srednja težinska apsolutna postotna pogreška weighted symmetric mean absolute percentage error
ZET	Zagrebački električni tramvaj Zagreb Electric Tram

TUMAČ MJERNIH JEDINICA

2 ' 01 "	proteklo vrijeme od dvije minute i jedne sekunde
18:30	vremenski trenutak od osamnaest sati i trideset minuta
1 h 40 '	proteklo vrijeme od jednog sata i četrdeset minuta
-112 %	minus sto i dvanaest posto
8,5 km	osam i pol kilometara
-2,0 p/m ²	minus dva putnika po metru kvadratnom
15 km/h	petnaest kilometara na sat
11 ' 50 "/v	jedanaest minuta i pedeset sekundi po vozilu
9 v/h	devet vozila na sat
30 m ²	trideset metara kvadratnih
28 m	dvadeset i osam metara
-1 m/s ²	minus jedan metar u sekundi na kvadrat
3 m/s	tri metra u sekundi
+45 °	plus četrdeset i pet stupnjeva
+016 °	plus šesnaest stupnjeva
1,0 v/'	jedno vozilo u minuti
2 %/%	dva posto po postotku
3 /'	tri po minuti
13 %	trinaest minuta posto
100 %/'	sto posto u minuti
18 "	osamnaest sekundi
2 '	dvije minute
5 '/v	pet minuta po vozilu
2 v	dva vozila

ŽIVOTOPIS AUTORA I POPIS OBJAVLJENIH DJELA



Dino Šojat rođen je 01.03.1985. u Zagrebu. Osnovnu školu i gimnaziju završio je u Zagrebu. Zvanje sveučilišnog prvostupnika inženjera prometa stekao je 2010., a zvanje magistra inženjera prometa 2012. na Fakultetu prometnih znanosti na temi „Analiza prioriteta tramvajskog podsustava u Gradu Zagrebu“.

Od 2012. radi na Fakultetu prometnih znanosti kao stručni suradnik na znanstveno-istraživačkim projektima te projektima za gospodarstvo Zavoda za gradski promet većinom u području planiranja, organizacije i sigurnosti gradskog prometa. Također sudjeluje na izradi znanstvenih članaka za časopise i kongrese, te pomaže u izvođenju nastave na Zavodu za gradski promet.

Osim postojećih aktivnosti, od 2015. zaposlen je na Fakultetu prometnih znanosti kao asistent na Zavodu za gradski promet, te sudjeluje u nastavi na kolegijima *Osnove tehnologije prometa*, *Tehnologija gradskog prometa I*, *Tehnologija gradskog prometa II*, *Urbana mobilnost*, *Upravljanje prijevoznom potražnjom u gradovima* i *Tehnološki modeli prijevoza putnika u gradovima*.

Autor je triju članaka objavljenih u časopisima, te preko 15 članaka u zbornicima skupova s domaćom i međunarodnom recenzijom. Mentor je na 10 završnih radova iz područja javnoga gradskoga prijevoza putnika, te član povjerenstva na preko 20 završnih i diplomskih radova iz područja cestovnog i gradskog prometa. Sudionik je na preko 30 znanstveno-istraživačkih projekata i projekata za gospodarstvo iz područja planiranja i organizacije gradskog prometa.

U području tehnologije prometa i transporta, šire područje interesa mu je gradski promet, a uže područje interesa planiranje i organizacija masovnoga javnoga gradskoga prijevoza putnika u uličnoj mreži.

Vještine koje je stekao uključuju aktivno korištenje engleskog jezika u govoru i pismu, te pismenost u programskim alatima *Microsoft Office*, *AutoCAD*, *IBM SPSS Statistics*, *PTV Visum* i *QGIS*.

Popis objavljenih djela je prikazan u nastavku kao radovi u časopisima (Č) i radovi u zbornicima skupova (Z).

- Č|1 Slavulj, Marko; Tomašić, Dubravko; Ćosić, Mario; **Šojat, Dino**. *State of Developing Mobility as a Service in the City of Zagreb* // Tehnički vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku, 27 (2020), 4; 1345-1350 doi:10.17559/tv-20190605125916 (međunarodna recenzija, pregledni rad, znanstveni)
- Č|2 **Šojat, Dino**; Brčić, Davor; Slavulj, Marko. *Analysis of Transit Service Improvements in the City of Zagreb* // Tehnički vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku, 24 (2017), 1; 217-223 doi:10.17559/TV-20151123143049 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
- Č|3 Brčić, Davor; Slavulj, Marko; **Šojat, Dino**. *Analiza funkcije autobusnog podsustava u održivoj urbanoj mobilnosti* // Suvremeni promet : časopis za pitanja teorije i prakse prometa, 35 (2015), 1-2; 99-103 (podatak o recenziji nije dostupan, pregledni rad, znanstveni)
- Z|01 Slavulj, Marko; **Šojat, Dino**; Radulović, Božo; Sirovica, Filip. *Possibilities to introduce a tourist tram line in the City of Zagreb* // Road and Rail Infrastructure V / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2018. str. 1587-1593 doi:10.5592/CO/CETRA.2018.769 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Z|02 Brčić, Davor; Slavulj, Marko; **Šojat, Dino**; Jurak, Julijan. *The role of Smart Mobility in Smart Cities* // Road and Rail Infrastructure V / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2018. str. 1601-1606 doi:10.5592/CO/CETRA.2018.812 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Z|03 Šimunović, Ljupko; Ćosić, Mario; **Šojat, Dino**; Radulović, Božo; Dijanić, Domagoj. *Simulating pedestrian behaviour in school zones - possibilities and challenges* // Keeping up with technologies to adapt cities for future challenges / Krstić-Furundžić, Aleksandra ; Vukmirović, Milena ; Vaništa-Lazarević, Eva ; Đukić, Aleksandra (ur.). Belgrade: University of Belgrade - Faculty of Architecture, 2018. str. 586-592 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Z|04 Šimunović, Ljupko; **Šojat, Dino**; Radulović, Božo; Plivelić, Zvonimir. *An estimation of operating speed increase by tram signal priority* // Proceedings of the International Scientific Conference "Science and Traffic Development" (ZIRP 2018): Transport and Logistics Industry in Digital Age / Bajor, I. ; Vidović, A. (ur.). Zagreb: Faculty of Transport and Traffic Sciences University of Zagreb, 2018. str. 293-299 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Z|05 Ćosić, Mario; Šimunović, Ljupko; **Šojat, Dino**. *Price elasticity in public transport - A case study of the City of Zagreb* // New solutions and innovations in logistics and transportation / Mlinarić, Tomislav J. ; Šafran, M. ; Kramberger, Tomaž ; Ipavec, Vesna M. (ur.). Zagreb: Faculty of Transport and Traffic Sciences University of Zagreb, 2017. str. 71-79 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Z|06 Brčić, Davor; Slavulj, Marko; **Šojat, Dino**; Jurak, Julijan. *The role of public transport in sustainable urban mobility plans* // Smart Mobility – Synergy Between Sustainable Mobility and New Technologies / Bogdanović, Vuk ; Basarić, Valentina (ur.). Novi Sad: University of Novi Sad Faculty of Technical Sciences Department of Traffic Engineering, 2017. str. 71-77 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Z|07 Šimunović, Ljupko; **Šojat, Dino**; Krijan, Ivana. *Carsharing - using instead of owning* // KEEPING UP WITH TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF URBAN AND

- RURAL SYNERGY / Bijedić, Dženana ; Krstić-Furundžić, Aleksandra ; Zečević, Mevludin (ur.). Sarajevo: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Sarajevu, 2017. str. 461-469 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Z|08 Brčić, Davor; Šošarić, Marko; **Šojat, Dino**. *Sustainable Urban Mobility Plans // Road and Rail Infrastructure IV*, Proceedings of the Conference CETRA 2016 / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Department of Transportation Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2016. str. 373-377 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Z|09 Slavulj, Marko; Brčić, Davor; Rogić, Kristijan; **Šojat, Dino**. *Analysis of Energy Efficient and Environmentally Sustainable Public Transport Vehicles in the City of Šibenik // 5th INTERNATIONAL CONFERENCE "TOWARDS A HUMANE CITY" / Bogdanović, Vuk (ur.). Novi Sad: University of Novi Sad Faculty of Technical Sciences Department of Traffic Engineering, 2015. str. 135-140 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)*
- Z|10 **Šojat, Dino**; Brčić, Davor; Slavulj, Marko. *The Role of Public Transport Priority in Sustainable Urban Mobility // BOOK OF CONFERENCE PROCEEDINGS - KEEPING UP WITH TECHNOLOGIES TO MAKE HEALTHY PLACES / Fikfak, A. et al. (ur.). Ljubljana: University of Ljubljana, Faculty of Architecture, 2015. str. 492-497 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)*
- Z|11 Slavulj, Marko; Brčić, Davor; **Šojat, Dino**. *Carpooling in municipality of Gornja Stubica // Proceedings of the Second International Conference on Traffic and Transport Engineering / Čokorilo, Olja (ur.). Belgrade: Scientific Research Center et al, 2014. str. 947-953 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)*
- Z|12 Brčić, Davor; Tepeš, Krunoslav; **Šojat, Dino**. *Accident Prediction Models in the Scope of Road Safety Improvements // International Conference "Road safety strategic management" / Lipovac, Krsto ; Vešović, Vujadin (ur.). Berane: Faculty for Traffic, Communications and Logistics Berane, 2014. str. 41-53 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)*
- Z|13 Tepeš, Krunoslav; Brčić, Davor; **Šojat, Dino**. *Comparative Analysis of Road Accident Databases For Creating a High-Quality Accident Prediction Model // Road Safety in Local Community / Lipovac, Krsto ; Nešić, Miladin (ur.). Zaječar: Academy of Criminalistic and Police Studies, 2014. str. 57-64 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)*
- Z|14 Brčić, Davor; Slavulj, Marko; **Šojat, Dino**. *The impact of public transport performance improvements on sustainable urban mobility – an example of the City of Zagreb // Road and Rail Infrastructure III*, Proceedings of the Conference CETRA 2014 / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2014. str. 889-895 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Z|15 Brčić, Davor; Šimunović, Ljupko; **Šojat, Dino**. *Safety performance indicators of Public surface Transport in Urban areas // International Conference Transport Safety Performance Indicators : proceedings / Vujanić, Milan (ur.). Beograd: Road Traffic Safety Agency of the Republic of Serbia, 2014. str. 119-128 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)*
- Z|16 Mandžuka, Sadko; Novačko, Luka; **Šojat, Dino**; Brandt, Jelena. *Optimizacija upravljanja prometnim procesima tijekom masovnih evakuacija // Zbornik radova: Hrvatska platforma za smanjenje rizika od katastrofa. Valbandon, 2013. (predavanje, domaća recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)*

- Z|17 Slavulj, Marko; **Šojat, Dino**; Katić, Stipan. *Company mobility management: A case study of Business Center International in the City of Zagreb* // IV INTERNATIONAL CONFERENCE "TOWARDS A HUMANE CITY" Transport in cities of Southeastern Europe / Bogdanović, Vuk (ur.). Novi Sad: University of Novi Sad Faculty of Technical Sciences Department of Traffic Engineering, 2013. str. 147-152 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Z|18 Brčić, Davor; Slavulj, Marko; **Šojat, Dino**; Bolčević Turčić, Daniela. *Traffic safety indicators for urban public transport* // Road safety in local community / Lipovac, Krsto (ur.). Beograd: Kriminalističko-policijska akademija, 2013. str. 143-148 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Z|19 Brčić, Davor; Slavulj, Marko; **Šojat, Dino**. *Analysis of tram priority in the City of Zagreb* // Proceedings. Zagreb: KOREMA, 2012. str. 173-176 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)