

UNIVERZITET U BEOGRADU

SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Jelena N. Kajalić

MODELIRANJE KRETANJA PLOTUNA VOZILA NA  
GRADSKIM ARTERIJAMA

doktorska disertacija

Beograd, 2020.

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC

ENGINEERING

Jelena N. Kajalić

VEHICLE PLATOON MODELLING ON ARTERIAL  
STREET

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2020.

**Mentor:**

Vanredni profesor **dr Nikola Čelar**, Univerzitet u Beogradu  
Saobraćajni fakultet

**Članovi komisije:**

Vanredni profesor **dr Nikola Čelar**, Univerzitet u Beogradu  
Saobraćajni fakultet

Redovni profesor **dr Katarina Vukadinović**, Univerzitet u  
Beogradu Saobraćajni fakultet

Vanredni profesor **dr Goran Mladenović**, Univerzitet u  
Beogradu Građevinski fakultet

**Datum odbrane:**

# MODELIRANJE KRETANJA PLOTUNA VOZILA NA GRADSKIM ARTERIJAMA

**Rezime:** Upravljanje saobraćajem na gradskim arterijama zasniva se na usaglašavanju rada svetlosnih signala na unapred definisanom nizu raskrsnica. Osnovni cilj procesa upravljanja je da plotun vozila formiran na početnoj raskrsnici prođe celokupnu arteriju bez zaustavljanja. Za projektovanje sistema upravljanja na gradskim arterijama neophodno je poznavanje karakteristika kretanja plotuna vozila kako bi se uspostavila funkcionalna veza između parametara rada signala i objekta upravljanja. Uzimajući u obzir nedostatak jedinstvene i precizne definicije plotuna vozila koji predstavlja osnovni objekat upravljanja, u doktorskoj disertaciji je formiran model za definisanje plotuna vozila, koji pripadnost vozila plotunu utvrđuje na osnovu dva parametra, intervala sleđenja i pozicije vozila.

Tokom kretanja duž arterije na svako pojedinačno vozilo u plotunu utiču spoljašnji i unutrašnji faktori. Pod uticajem navedenih faktora dolazi do modifikacije plotuna koja se manifestuje kroz fenomen skupljanja ili rasturanja plotuna. Osnovni nedostatak postojećih modela kretanja plotuna odnose se na činjenicu da opisuju isključivo fenomen rasturanja plotuna. Međutim, transformacija urbanog saobraćajnog sistema dovela je do promena u karakteristikama kretanja plotuna vozila, koje za posledicu imaju sve češću pojavu skupljanja plotuna, što je dokazano na osnovu rezultata istraživanja. U više od 52% registrovanih plotuna zabeležen je fenomen skupljanja, čime je dokazano da postojeći modeli (Robertson i HCM) odstupaju od realnih podataka. Istraživanjem je utvrđeno da su najznačajniji unutrašnji faktori koji dovode do modifikacije plotuna, veličina plotuna i brzina kretanja plotuna. U disertaciji je dokazano da veličina plotuna dominantno utiče na karakteristike kretanja plotuna. Na osnovu rezultata istraživanja formiran je model baziran na funkcionalnoj zavisnosti između veličine plotuna i karakteristika kretanja plotuna. Predloženi model, koji predstavlja osnovni cilj disertacije, opisuje oba fenomena i rasturanje i skupljanje plotuna, čime je eliminisan osnovni nedostatak postojećih modela. Primenom modela na deonicama gradskih arterija, dokazano je da je formirani model validan i jednostavan za primenu.

**Ključne reči:** Plotun vozila, rasturanje i skupljanje plotuna, gradska arterija, koordinisani rad svetlosnih signal

**Naučna oblast:** Saobraćajno inženjerstvo

**Uža naučna oblast:** Regulisanje i upravljanje saobraćajnim tokovima na mreži puteva i ulica

**UDK broj:**

# VEHICLE PLATOON MODELLING ON ARTERIAL STREET

**Abstract:** Urban arterial street traffic management is based on the defined number of consecutive traffic signals coordination. The main objective of coordination is to ensure that platoon of vehicles, formed at the initial intersection, pass arterial street without stopping. In order to determine a functional relationship between the traffic signal parameters and the control object, i.e. platoon of vehicles, it is necessary to know the platoon movement characteristics. This dissertation proposes the model for platoon definition, considering the lack of a unique and precise platoon definition in the literature. Proposed model for platoon definition is based on two parameters, the time headway and the vehicle position.

Platoon movement characteristics depend on external and on internal factors which affect each vehicle in the platoon. The influence of these factors results in the platoon modification, which can be manifested by the dispersion or compression phenomenon. Existing models of platoon movement characteristics can predict only platoon dispersion phenomenon, which is at the same time their main disadvantage. However, the urban transport system transformation has caused changes in the platoon movement characteristics, which, as a result, more often lead to platoon compression phenomenon. Based on the conducted research, the compression phenomenon is recorded in more than 52% of platoons. For this reason, relevant models such as Robertson and HCM model do not provide an accurate prediction of vehicle platoon movement characteristics. This research proves that platoon movement characteristics mostly depends on platoon size and platoon speed, but platoon size has a dominant effect. Proposed model of platoon movement characteristics, as a primary goal of this dissertation, can predict both, platoon dispersion and platoon compression, and overcome the main disadvantages of relevant models. By applying the proposed model at several arterial streets in Belgrade, it is proved that the model is valid and easy to use.

**Keywords:** Platoon vehicle, platoon dispersion and compression, arterial street, signal coordination

**Scientific Field:** Traffic engineering

**Field of Academic Expertise:** Traffic control and management

**UDC:**

---

## SADRŽAJ RADA

<b>1.</b>	<b>UVODNA RAZMATRANJA .....</b>	<b>1</b>
1.1	FORMULACIJA PROBLEMA .....	1
1.2	CILJEVI I HIPOTEZE U ISTRAŽIVANJU .....	3
1.3	OČEKIVANI DOPRINOS .....	3
1.4	SADRŽAJ RADA .....	4
<b>2.</b>	<b>OSNOVNI PREDMET ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>5</b>
2.1	POJAM PLOTUNA VOZILA .....	5
2.1.1	Veličina plotuna .....	5
2.1.2	Interval sleđenja vozila u plotunu .....	5
2.1.3	Rastojanje sleđenja vozila u plotunu .....	6
2.1.4	Brzina plotuna .....	6
2.1.5	Vreme prolaska plotuna kroz presek saobraćajnice .....	7
2.1.6	Kriterijumi utvrđivanja plotuna vozila .....	7
2.2	DEFINISANJE PLOTUNA U ZAVISNOSTI OD STANJA NA PRILAZU RASKRSNICI .....	9
2.3	KRETANJE PLOTUNA VOZILA NA GRADSKIM ARTERIJAMA .....	13
2.3.1	Rasturanje plotuna vozila .....	14
2.3.2	Skupljanje plotuna vozila .....	16
<b>3.</b>	<b>MODELI KRETANJA PLOTUNA VOZILA – PREGLED LITERATURE .....</b>	<b>18</b>
3.1	LIGHTHILL I WHITHAM MODEL .....	19
3.2	PACEY MODEL .....	22
3.3	ROBERTSONOV MODEL .....	24
3.3.1	Kalibracija parametara Robertsonovog modela .....	28
3.4	HCM MODEL .....	31
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA PARAMETARA PROCESA KRETANJA PLOTUNA VOZILA .....</b>	<b>34</b>
4.1	PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA .....	34
4.2	LOKACIJE ISTRAŽIVANJA .....	34
4.3	PERIOD ISTRAŽIVANJA .....	35
4.4	FORMIRANJE PROSTORA ISTRAŽIVANJA I METODA ISTRAŽIVANJA .....	36
4.5	MERNA OPREMA KORIŠĆENA U ISTRAŽIVANJU .....	36
4.6	FORMIRANJE BAZE PODATAKA .....	37
4.7	ORGANIZACIJA ISTRAŽIVANJA .....	39
4.8	UZORAK ISTRAŽIVANJA .....	41
<b>5.</b>	<b>REZULTATI ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>43</b>
5.1	ANALIZA INTERVALA SLEĐENJA VOZILA NA POČETNOJ RASKRSNICI .....	43

---

5.1.1	Analiza intervala sleđenja na nivou celokupnog uzorka .....	43
5.1.2	Analiza intervala sleđenja po lokacijama .....	45
5.1.3	Analiza intervala sleđenja vozila iz reda .....	47
5.1.4	Analiza intervala sleđenja vozila koja nisu deo reda.....	48
5.2	DEFINISANJE PLOTUNA VOZILA .....	52
5.2.1	Primena logističke regresije (LG) u definisanju plotuna .....	52
5.2.2	Formiranje modela logističke regresije u MatLab-u .....	53
5.2.3	Model utvrđivanja plotuna vozila na početnoj raskrsnici .....	57
5.3	ANALIZA KRETANJA PLOTUNA VOZILA .....	57
5.4	ANALIZA VREMENA PUTOVANJA.....	63
5.4.1	Uticao vremena putovanja na karakteristike kretanja plotuna .....	64
5.4.2	Uticao vremena putovanja prvog vozila na karakteristike kretanja plotuna .....	66
<b>6.</b>	<b>ANALIZA PRIMENJENIH MODELA .....</b>	<b>69</b>
6.1	ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA PRIMENOM ROBERTSONOVOG MODELA .....	69
6.2	ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA PRIMENOM HCM MODELA.....	71
<b>7.</b>	<b>MODELIRANJE KRETANJA PLOTUNA VOZILA NA GRADSKIM ARTERIJAMA .....</b>	<b>73</b>
7.1	ALGORITAM PREPOZNAVANJA PLOTUNA VOZILA.....	73
7.2	MODEL UTICAJA VELIČINE PLOTUNA NA KARAKTERISTIKE KRETANJA .....	75
7.3	ANALIZA REZULTATA PRIMENOM FORMIRANOG MODELA SA MODELOM ROBERTSONA .....	76
<b>8.</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>82</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>86</b>

---

## SPISAK TABELA

<i>Tabela 3-1– Definisane karakteristika deonice u TRANSYT korisničkom uputstvu kod kalibrisanja faktora rasturanja plotuna (McTrans, 2008).....</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 3-2 Sumarni prikaz dobijenih vrednosti kalibracionih parametara rasturanja plotuna na osnovu istraživanja vođenih na različitim lokacijama u svetu (Farzaneh, 2005) .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 3-3 vrednost RP u odnosu na tip dolaska vozila na raskrnicu (National Research Council, 2000).....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 3-4 Uslovi u kojima dolazi do realizacije određenog tipa dolaska (HCM, 2010). .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 4-1 Osnovni podaci o istraživanjima procesa kretanja plotuna, posmatrano po lokacijama .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 4-2 Osnovni podaci o istraživanju vremenu putovanja vozila iz plotuna, posmatrano po lokacijama.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 5-1 Analiza realizovanih intervala sleđenja na nultom preseku.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 5-2 Empirijska raspodela realizovanih intervala sleđenja na nultom preseku .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 5-3 Procentualno učešće vozila koja prošla raskrnicu nakon rasformiranja reda u ukupno realizovanim zahtevima posmatrano po lokacijama i nad ukupnim uzorkom.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 5-4 Analiza realizovanih intervala sleđenja po lokacijama.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 5-5 Analiza realizovanih intervala sleđenja na nultom preseku vozila iz reda po lokacijama.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 5-6 Funkcija raspodele (cumulative distribution function - CDF) intervala sleđenja vozila u redu po lokacijama .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 5-7 Analiza realizovanih intervala sleđenja vozila koja nisu deo reda po lokacijama .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 5-8 Funkcija raspodele (cumulative distribution function - CDF) intervala sleđenja između vozila koja nisu deo reda, po lokacijama istraživanja .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 5-9 Prikaz dobijenih preciznosti modela u zavisnosti od ulaznih podataka.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 5-10 Kvalitet razdvajanja u zavisnosti od vrednosti AUC.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 5-11 Vrednosti AUC, površina ispod ROC crive, za različite vrednosti kritičnog <math>t_h</math>.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 5-12 Parametri i ocena dobijenog modela.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 5-13 Karakteristike intervala sleđenja između vozila u plotunu u zavisnosti od posmatranog preseka.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 5-14 Učešće plotuna sa skupljanjem u ukupnom uzorku .....</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 5-15 Funkcionalna zavisnost između broja vozila u plotunu i razlike u vremenu prolaska plotuna na posmatranim presecima .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 5-16 Rezultati Shapiro-Wilk testa.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 5-17 Analiza realizovanih vremena putovanja po lokacijama.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 6-1 Vrednosti parametara <math>\alpha</math> i <math>\beta</math> u zavisnosti od lokacije, preseka i načina kalibrisanja.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 6-2 Srednje kvadratno odstupanje modela od realnih podataka.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 6-3 Kalibrisane vrednosti parametara <math>\alpha</math> u zavisnosti od lokacije i preseka .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 6-4 Rezultati primene Robertsonovog modela na nivou ciklusa .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 6-5 Vrednosti faktora prilagođavanja u zavisnosti od lokacije i preseka .....</i>	<i>72</i>



---

<i>Tabela 6-6 Srednje kvadratno odstupanje Robertsonovog i HCM modela od realnih podataka .....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 7-1 Vrednovanje nezavisne promenljive .....</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 7-2 Vrednovanje modela.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 7-3 Prosečno vreme prolaska plotuna na prvom preseku u zavisnosti od primenjenog modela, posmatrano po lokacijama .....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 7-4 Prosečno vreme prolaska plotuna na drugom preseku u zavisnosti od primenjenog modela, posmatrano po lokacijama .....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 7-5 Učešće plotuna u ukupnom uzorku po posmatranim klasama odnosa vremena prolaska plotuna na prvom u odnosu na nulti presek.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 7-6 Učešće plotuna u ukupnom uzorku po posmatranim klasama odnosa vremena prolaska plotuna na drugom u odnosu na nulti presek.....</i>	<i>81</i>

---

## SPISAK SLIKA I GRAFIKONA

<i>Slika 1-1 - Kretanje plotuna duž koridora: A) neusaglašen, B) usaglašen rad signala (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)</i> .....	1
<i>Slika 2-1 Definisiranje intervala sleđenja (između vozila u plotunu posmatrano u jednoj saobraćajnoj traci) i dužine plotuna</i> .....	7
<i>Slika 2-2 Dijagram realizacije nezasićenog stanja na nivou ciklusa (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)</i>	10
<i>Slika 2-3 Dijagram realizacije prezasićenog stanja na nivou ciklusa (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)</i>	11
<i>Slika 2-4 Različiti pristupi u posmatranju intervala sleđenja (na nivou trake ili na nivou plotuna)</i> .....	12
<i>Slika 2-5 Grafički prikaz povećanja dužine plotuna duž koridora u odnosu na dužinu inicijalnog plotuna sa R1 (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)</i> .....	15
<i>Slika 2-6- Deljenje plotuna na veći broj manjih plotuna, kada je plotun definisan preko kritičnog intervala sleđenja</i> .....	15
<i>Slika 3-1 Brzina šok talasa definisana nagibom vektora između tačaka A i B (Lighthill and Whitham, 1955)</i> .....	19
<i>Slika 3-2 Promena brzine talasa usled promene ulaznog potoka (Lighthill and Whitham, 1955)</i> .....	20
<i>Slika 3-3 Progresija talasa u prostor-vreme dijagramu (prilagođeno - Lighthill and Whitham, 1955)</i> .....	21
<i>Slika 3-4 Putanje talasa formirane na osnovu ulaznog potoka (Farzaneh, 2005)</i> .....	21
<i>Slika 3-5 Poređenje dobijenog oblika plotuna primenom L&amp;W modela sa realnim podacima (Farzaneh, 2005)</i> .....	22
<i>Slika 3-6 Poređenje rezultata dobijenih istraživanjem na rastojanju od 540m i Pacey modelom (Grace and Potts, 1964)</i> .....	24
<i>Slika 3-7 Grafički prikaz Robertsonovog modela</i> .....	26
<i>Slika 3-8 Procedura proračuna vremena nailaska plotuna i procenat vozila koji se pojavljuje tokom trajanja zelenog signalnog pojma (HCM, 2010)</i> .....	33
<i>Slika 4-1 Gopro kamera (Hero 4) korišćena u istraživanju [<a href="https://gopro.com">https://gopro.com</a>]</i> .....	37
<i>Slika 4-2 Izgled radnog okruženja u android aplikaciji</i> .....	38
<i>Slika 4-3 Primer očitanih neobrađenih podataka dobijenih aplikacijom</i> .....	38
<i>Slika 4-4 položaj lokacija istraživanja</i> .....	40
<i>Slika 5-1 Zavisnost između učešća vozila koja nisu deo reda i prosečnog realizovanog intervala sleđenja</i>	45
<i>Slika 5-2 Tip dolaska vozila koja nisu deo reda uslovljen radom signala na prethodnoj bliskoj raskrsnici</i>	46
<i>Slika 5-3 Slučajan tip dolaska vozila koja nisu deo reda</i> .....	46
<i>Slika 5-4 Neravnomerna raspodela korišćenja saobraćajnih traka</i> .....	47
<i>Slika 5-5 Funkcija raspodele (cumulative distribution function - CDF) intervala sleđenja vozila van reda</i>	50
<i>Slika 5-6 Zavisnost intervala sleđenja i pozicije vozila od realizacije priključivanja plotunu</i> .....	51
<i>Slika 5-7 ROC kriva za kritičan interval sleđenja od 3 s</i> .....	55
<i>Slika 5-8 ROC kriva za kritičan interval sleđenja od 2.5 s</i> .....	56
<i>Slika 5-9 ROC kriva za kritičan interval sleđenja od 2.1 s</i> .....	56

---

<i>Slika 5-10 Interval sleđenja vozila u zavisnosti od pozicije vozila u plotunu posmatrano na nultom preseku (0m).....</i>	<i>59</i>
<i>Slika 5-11 Interval sleđenja vozila u zavisnosti od pozicije vozila u plotunu posmatrano na prvom preseku (200m).....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 5-12 Interval sleđenja vozila u zavisnosti od pozicije vozila u plotunu posmatrano na drugom preseku (500m).....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 5-13 Kumulanta kretanja plotuna posmatrana po presecima na osnovu prosečne vrednosti intervala sleđenja vozila u zavisnosti od pozicije vozila u plotunu.....</i>	<i>61</i>
<i>Slika 5-14 Razlika u vremenu prolaska plotuna na dva posmatrana preseka u zavisnosti od broja vozila u plotunu.....</i>	<i>62</i>
<i>Slika 5-15 Zavisnost promene vremena prolaska plotuna u odnosu na standardno odstupanje brzina vozila u plotunu (drugi presek).....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 5-16 Zavisnost promene vremena prolaska plotuna u odnosu na vreme putovanja vozila u plotunu.....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 5-17 Uticaj brzine prvog vozila na brzinu drugog vozila u plotunu (prvi presek).....</i>	<i>67</i>
<i>Slika 5-18 Uticaj brzine prvog vozila na brzinu plotuna (prvi presek).....</i>	<i>67</i>
<i>Slika 5-19 Uticaj brzine prvog vozila na brzinu drugog vozila (drugi presek).....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 5-20 Uticaj brzine prvog vozila na brzinu plotuna (drugi presek).....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 7-1 Algoritam utvrđivanja plotuna vozila na početnoj raskrsnici.....</i>	<i>74</i>
<i>Slika 7-2 Prosečno procentualno odstupanje vremena prolaska plotuna na prvom preseku u zavisnosti od primenjenog modela i karakteristike kretanja plotuna.....</i>	<i>79</i>
<i>Slika 7-3 Prosečno procentualno odstupanje prognoziranog vremena prolaska plotuna na drugom preseku u zavisnosti od primenjenog modela i karakteristike kretanja plotuna.....</i>	<i>80</i>

## 1. UVODNA RAZMATRANJA

### 1.1 Formulacija problema

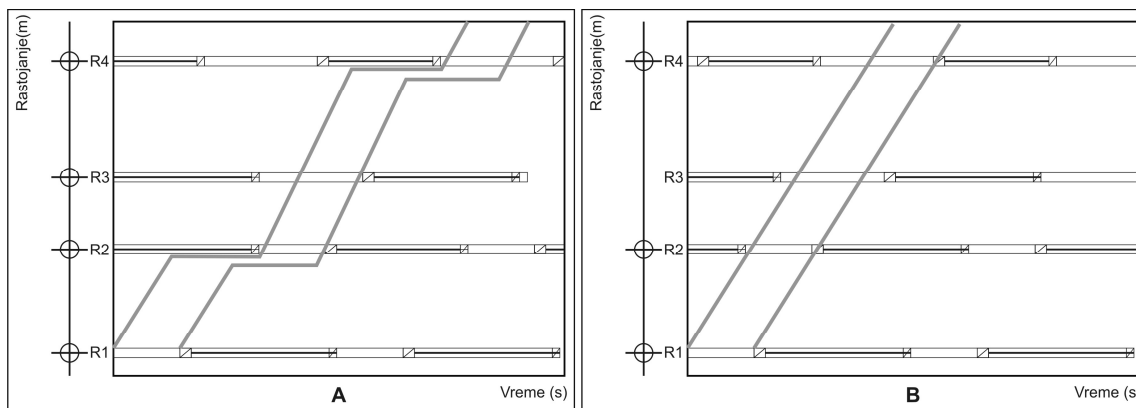
Upravljanje saobraćajem, kao jedna od baznih disciplina saobraćajnog inženjerstva, ima za cilj prostorno i vremensko usklađivanje raspoloživog kapaciteta saobraćajne mreže sa merodavnim saobraćajnim zahtevom. Upravljanje saobraćajnim procesom na gradskoj mreži dominantno se bazira na primeni svetlosnih signala. Funkcionisanje svetlosnih signala zasniva se na grupisanju saobraćajnih zahteva na prilazu i njihovom efikasnom opsluživanju u periodu vremena kada isti dobijaju pravo prolaska raskrsnicom. Efikasnost saobraćajnog procesa na raskrsnici rezultat je izbora odgovarajućeg načina upravljanja, primenjenih optimizacionih procedura i modela proračuna parametara rada svetlosnih signala.

Prostorna obuhvatnost upravljački jedinstvenog dela mreže uslovljava podelu sistema upravljanja saobraćajem na upravljanje individualnim raskrsnicama, gradskim arterijama i zonama. Svaki od navedenih pod sistema ima određene funkcionalne karakteristike, specifičnu problematiku projektovanja i odgovarajuću ulogu u okviru jedinstvenog sistema upravljanja saobraćajem.

Individualna, izolovana signalisana raskrsnica predstavlja raskrsnicu na kojoj ne postoji uticaj rada svetlosnih signala sa susednih raskrsnica, pa se nailazak jednog vozila na raskrsnicu može smatrati slučajnim događajem.

U urbanoj mreži raskrsnice se nalaze na relativno bliskim rastojanjima, tako da je nailazak jednog vozila na pojedinačnu raskrsnicu uslovljen načinom i parametrima rada signala na susednim raskrsnicama. Na slikama (Slika 1-1) prikazan je jednosmerna gradska arterija sa četiri signalisane raskrsnice. Na prostor-vreme dijagramu, grafički je prikazano kretanje grupe vozila duž arterije (koridora). Trajektorija kretanja formirane grupe predstavljena je putanjom prvog i poslednjeg vozila u grupi. U slučaju kada raskrsnice funkcionišu kao individualne (Slika 1-1 A), formirana grupa vozila koja ulazi na arteriju sa raskrsnice R1 može se zaustaviti na pojedinim raskrsnicama (u konkretnom primeru R2 i R4). (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)

Na pomenutim raskrsnicama dolazi do nastanka vremenskih gubitaka, čija veličina zavisi od odgovarajućih komponenti, usporenja, zaustavljanja i ubrzanja. (Čelar *et al.*, 2018)



Slika 1-1 - Kretanje plotuna duž koridora: A) neusaglašen, B) usaglašen rad signala (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)

U slučaju kada je nailazak jednog vozila na pojedinačnu raskrnicu uslovljen načinom i parametrima rada signala na susednim raskrnicama, pozitivni upravljački efekti mogu se ostvariti usaglašavanjem rada signala na svim raskrnicama duž arterije. Slučaj B (Slika 1-1) prikazuje dijagram kretanja formirane grupe vozila u uslovima usaglašenog rada signala na posmatranoj arteriji. (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)

Usaglašen ili koordinisan rad signala postiže se uspostavljanjem fiksnih vremenskih relacija između pojave signalnih pojmova na nizu susednih raskrznica.

Primenom usaglašenog rada svetlosnih signala ostvaruju se naredni efekti (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018):

- veći kapacitet saobraćajnice;
- smanjenje broja zaustavljanja;
- smanjenje negativnih ekoloških uticaja;
- povećanje bezbednosti;
- viši nivo usluge na arteriji (koridoru).

Ovakvim načinom upravljanja povećava se kapacitet raskrsnice povećanjem efektivnog zelenog vremena, kao posledica eliminisanja gubitaka na startu. Na koridoru sa usaglašenim radom signala postiže se harmonizacija brzina saobraćajnog toka sa minimalnim brojem zaustavljanja, što direktno utiče na smanjenje potrošnje goriva, nivoa buke, emisije izduvnih gasova, kao i povećanje bezbednosti saobraćaja. Takođe, smanjenje broja zaustavljanja direktno utiče na smanjenje vremena putovanja, odnosno na povećanje prosečne eksploatacione brzine, koja predstavlja primarni pokazatelj nivoa usluge na gradskim arterijama. (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)

Efikasnost saobraćajnog procesa na gradskim arterijama, koje po obimu transportnih zahteva predstavljaju okosnicu funkcionisanja urbanog saobraćajnog sistema, predstavlja primarni cilj upravljanja saobraćajem, a usaglašen rad signala, osnovnu strategiju realizacije tog cilja.

Upravljanje na nivou zone suštinski se svodi na multipliciran postupak usaglašavanja rada signala na koridoru, sa jasno definisanom hijerarhijom saobraćajnica unutar uspostavljenog sistema upravljanja.

Upravljanje saobraćajem na gradskim arterijama podrazumeva usaglašavanje rada signala na unapred definisanom nizu raskrznica. Na raskrnicama koje uvode vozila u jedinstven sistem upravljanja, nailazak jednog vozila je slučajan događaj ili je uslovljen radom signala na susednim raskrnicama koje nisu deo sistema. Na prilazu ulazne raskrsnice tokom trajanja crvenog signalnog pojma, dolazi do formiranja reda. Po pojavi zelenog signalnog pojma počinje proces rasformiranja reda nakon čega vozila ulaze u jedinstven sistem upravljanja na arteriji formirajući plotun vozila. (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)

Cilj procesa upravljanja, kao što je napomenuto, je da formirani plotun vozila prođe definisani prostor upravljanja bez zaustavljanja, odnosno da plotun koji započinje kretanje na početnoj raskrsnici, stigne na sve naredne raskrsnice tokom trajanja zelenog signala. Na kretanje svakog pojedinačnog vozila u plotunu utiču spoljašnji i unutrašnji faktori. Pod spoljašnjim faktorima podrazumeva se uticaj geometrijskih karakteristika i okruženja saobraćajnice (dužina, gustina raskrznica, broj i namena saobraćajnih traka, širina profila itd.). Pod unutrašnjim faktorima podrazumeva se uticaj karakteristika saobraćajnog toka i pojedinačnog vozila (protok, gustina struktura toka, ponašanje vozača i dr.). Tokom kretanja

plotuna pod uticajem navedenih faktora, dolazi do njegove modifikacije. Modifikacije plotuna se ogledaju u promenama prosečnih vrednosti intervala sleđenja vozila u plotunu. Za projektovanje sistema upravljanja na koridoru neophodno je poznavanje karakteristika kretanja plotuna vozila kako bi se uspostavila funkcionalna veza između parametara rada signala i objekta upravljanja, odnosno plotuna vozila.

U literaturi najpoznatiji modeli koji opisuju kretanje plotuna su modeli formirani od strane Lighthill & Whitham (1955), Pacey (1956) i Robertson (1969). Zajedničko za pomenute modele je da su nastali sredinom prošlog veka. U odnosu na period njihovog nastanka, došlo je do značajnih promena urbanog saobraćajnog sistema. Transformacije se odnose na promene u strukturi i veličini gradova, veličini saobraćajnih zahteva, karakteristikama vozila, ponašanju vozača, uslova u saobraćajnom toku i sistema upravljanja. Utvrđivanje promena u karakteristikama kretanja plotuna koje su nastale kao posledica transformacije urbanog saobraćajnog sistema predstavljaju neophodan korak za formiranje efikasnog sistema upravljanja na gradskim arterijama.

### **1.2 Ciljevi i hipoteze u istraživanju**

Predmet doktorske disertacije je analiza karakteristika kretanja plotuna vozila na gradskim arterijama. Osnovni zadatak istraživanja u okviru disertacije je utvrđivanje empirijske zavisnosti između izabranih parametara kretanja plotuna. Uspostavljene zavisnosti predstavljale su osnovu za modifikaciju postojećih, odnosno formiranje novog modela kretanja plotuna vozila. Formirani model predstavlja osnovni naučni cilj istraživanja u okviru doktorske disertacije.

Na osnovu formulacije problema proistekla je polazna hipoteza:

- Postojeći modeli se ne mogu apriori prihvatiti kao merodavni za opisivanje kretanja plotuna vozila na gradskim arterijama.

Osnova polazne hipoteza bazira se na činjenici da su transformacije urbanog saobraćajnog sistema posledično dovele i do promena u karakteristikama kretanja plotuna vozila.

Na osnovu sprovedenih istraživanja u postupku ispitivanja polazne hipoteze, formirane su naredne, dodatne hipoteze:

- Uticaj najznačajnijih unutrašnjih faktora na kretanje plotuna vozila može se kvantifikovati.
- Veličina plotuna, kao osnovni parametar, dominantno utiče na kretanje plotuna.

### **1.3 Očekivani doprinos**

Disertacija prikazuje rezultate naučnog istraživanja karakteristika kretanja plotuna vozila na gradskim arterijama. Rezultati istraživanja i formirani zaključci obezbedili su osnovu za dalju analitičku, metodološku i praktičnu primenu u domenu saobraćajnog inženjerstva. Kao osnovni doprinosi istraživanja u okviru teze, navedeni su naredni:

- Utvrđivanje relevantnih parametara i kvantifikacija njihovog uticaja na kretanje plotuna;
- Razvoj softvera i mernog instrumenta za prikupljanje podataka u postupku realizacije

- eksperimentalnih istraživanja;
- Sistematizacija i ocena postojećih modela kretanja plotuna vozila;
  - Formiranje i verifikacija modela kretanja plotuna na gradskim arterijama;
  - Formiranje preporuka za projektovanje sistema upravljanja na koridorima (koordinisanog rada signala na gradskim arterijama).

### **1.4 Sadržaj rada**

U uvodnom poglavlju prikazana je postavka naučnog problema, definisan je predmet istraživanja i formirana je polazna hipoteza u okviru disertacije. Takođe, navedeni su i osnovni ciljevi istraživanja, očekivani naučni doprinos i dat je prikaz sadržaja po poglavljima.

Poglavlje 2 prikazuje osnovni predmet istraživanja, kroz definisanje relevantnih pojmova i osnovnih parametara koji opisuju plotun vozila. U poglavlju su predstavljene moguće promene u karakteristikama kretanja do kojih može doći pod uticajem unutrašnjih i spoljašnjih faktora.

U trećem poglavlju dat je pregled literature i predstavljeni su relevantni modeli koji opisuju kretanje plotuna vozila. U okviru poglavlja, izvršena je analiza izabranih modela i data je ocena sa aspekta mogućnosti praktične primene.

U četvrtom poglavlju prikazana je metodologija istraživanja karakteristika kretanja plotuna vozila na gradskim arterijama. Metodologijom je definisan prostor i vreme istraživanja, postupak neposredne realizacije istraživanja, postupak prikupljanja podataka i formiranja uzorka. Na kraju poglavlja, prikazan je postupak obrade podataka.

U poglavlju 5 izvršena je analiza rezultata istraživanja. U prvom delu poglavlja vršena je analiza intervala sleđenja na nultom (referentnom) preseku na osnovu koje je definisan model utvrđivanja plotuna. U drugom delu je vršena analiza intervala sleđenja vozila u plotunu po presecima, na osnovu koje je utvrđena zavisnost uticaja veličine plotuna na karakteristike njegovog kretanja. I konačno, u poslednjem delu ovog poglavlja izvršena je analiza vremena putovanja vozila u plotunu, kao i uticaj ponašanja prvog vozila na kretanje plotuna.

U šestom poglavlju izvršena je praktična primena pojedinih postojećih modela (Robertson i HCM). U prvom delu poglavlja prikazani su rezultati kalibriranja i izvođenja analitičkih modela za modeliranje kretanja plotuna vozila na gradskim arterijama. U drugom delu izvršeno poređenje rezultata dobijenih primenom različitih modela i izvršen je odabir modela koji najbolje opisuje realne podatke.

U sedmom poglavlju predstavljen je formirani algoritam za utvrđivanje plotuna, kao i model uticaja veličine plotuna na karakteristike kretanja, a zatim je izvršena verifikacija formiranog modela kroz postupak upoređivanja dobijenih rezultata sa usvojenim postojećim modelom u istim uslovima realizacije kretanja plotuna vozila.

Poslednje osmo poglavlje sadrži zaključke disertacije uz definisanje pravaca daljih istraživanja.



## 2. OSNOVNI PREDMET ISTRAŽIVANJA

### 2.1 *Pojam plotuna vozila*

Na signalisanoj raskrsnici tokom trajanja crvenog signalnog pojma dolazi do formiranja inicijalnog reda vozila, koji maksimalnu dužinu dostiže u trenutku pojave zelenog signalnog pojma. Pojavom zelenog signalnog pojma, započinje proces pražnjenja reda. Pored vozila koja čine inicijalni red, redu se priključuju i vozila koja se pojavljuju tokom zelenog signala, odnosno tokom procesa pražnjenja reda. Posmatrana grupa vozila nakon napuštanja raskrsnice započinje kretanje duž deonice u formi plotuna.

Po HCM-u (Hihgway Capacity Manual), pojam plotuna se vezuje za dobrovoljno ili prinudno kretanje vozila u grupi, najčešće kao posledica rada svetlosnih signala, geometrije ili drugih faktora (National Research Council, 2000). Problem navedene definicije, ogleda se u činjenici da se kretanje svake grupe vozila može smatrati plotunom. S obzirom da osnovnu karakteristiku plotuna predstavlja prisustvo interakcije između vozila koja utiče na njihovo kretanje, neophodno je definisati kriterijume realizacije međusobno zavisnog kretanja. Kako bi se utvrdili navedeni kriterijumi, neophodno je prethodno definisati parametre plotuna vozila. U literaturi, koriste se naredni parametri:

- veličina plotuna;
- interval sleđenja vozila u plotunu;
- rastojanje sleđenja vozila u plotunu;
- brzina plotuna;
- vreme prolaska plotuna na preseku.

Navedeni parametri su detaljnije objašnjeni u narednom delu.

#### 2.1.1 *Veličina plotuna*

Veličina plotuna se utvrđuje na osnovu broja vozila koja čine plotun. Definisane minimalnog broja vozila u plotunu bazirano je na osnovnom preduslovu da između vozila u plotunu postoji međuzavisno kretanje. Da bi navedeni kriterijum bio ispunjen, plotun mora da čine najmanje dva vozila. Sa druge strane, maksimalan broj vozila u plotunu nije ograničen i zavisi od trajanja zelenog signala na početnoj raskrsnici, kao i od intenziteta ulaznog i izlaznog potoka vozila.

#### 2.1.2 *Interval sleđenja vozila u plotunu*

Interval sleđenja vozila u plotunu predstavlja vremenski interval između prolaska čela (ili repa) dva uzastopna vozila u plotunu kroz određeni presek saobraćajnice. Interval sleđenja, na preseku, može se posmatrati na dva načina, i to:

- Na makro nivou, kao prosečan interval sleđenja svih vozila u plotunu ili
- Na mikro nivou, kao svaki pojedinačno realizovan interval sleđenja između uzastopnih vozila u plotuna.

Lokacija preseka na kome će se registrovati interval sleđenja uslovljena je ciljem istraživanja. U istraživanjima se kao referentni preseki koriste linija zaustavljanja na početnoj raskrsnici



i/ili preseci na referentnim rastojanjima u odnosu na liniju zaustavljanja.

Realizovane vrednosti intervala sleđenja zavise od uticaja spoljašnjih i unutrašnjih faktora. Na početnoj raskrsnici interval sleđenja definisan je preko vrednosti zasićenog saobraćajnog toka  $S$ , koji uzima u obzir pomenute faktore. Tokom kretanja plotuna, pod uticajem navedenih faktora, dolazi do oscilacija u pojedinačnim intervalima sleđenja. Promene vrednosti pojedinačnih intervala sleđenja dovode do promene prosečnog intervala sleđenja. Povećanje vrednosti intervala sleđenja vozila u plotunu ukazuje na pojavu fenomena koji se naziva rasturanje plotuna vozila o kojem će u disertaciji biti više reči.

### 2.1.3 Rastojanje sleđenja vozila u plotunu

Rastojanje sleđenja vozila u plotunu predstavlja rastojanje između čela (ili repa) dva uzastopna vozila u plotunu. Rastojanje sleđenja na određenom preseku može se posmatrati na makro i mikro nivou, kao:

- Prosečno rastojanje sleđenja svih vozila u plotunu (makro nivou) ili
- Pojedinačno rastojanje sleđenja između uzastopnih vozila u plotunu (mikro nivo).

Rastojanje sleđenja je u direktnoj vezi sa intervalom sleđenja, te se sa aspekta analize kretanja plotuna posmatra samo jedan od navedenih. S obzirom na komplikovanu tehniku istraživanja rastojanja sleđenja navedeni parametar se retko koristi.

### 2.1.4 Brzina plotuna

Brzina plotuna definisana je srednjom prostornom brzinom svih vozila koja čine plotun. Srednja prostorna brzina se utvrđuje na osnovu prosečnog vremena putovanja svih vozila u plotunu između dva referentna preseka i data je narednim izrazom:

$$V_{sms} = \frac{d}{\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}} \quad (2-1)$$

Pri čemu je:

- $V_{sms}$  - srednja prostorna brzina [m/s]
- $d$  - rastojanje između dva preseka [m]
- $t_i$  - vreme putovanja između dva preseka  $i$ - tog vozila u plotunu [s]
- $n$  - broj vozila u plotunu [-]

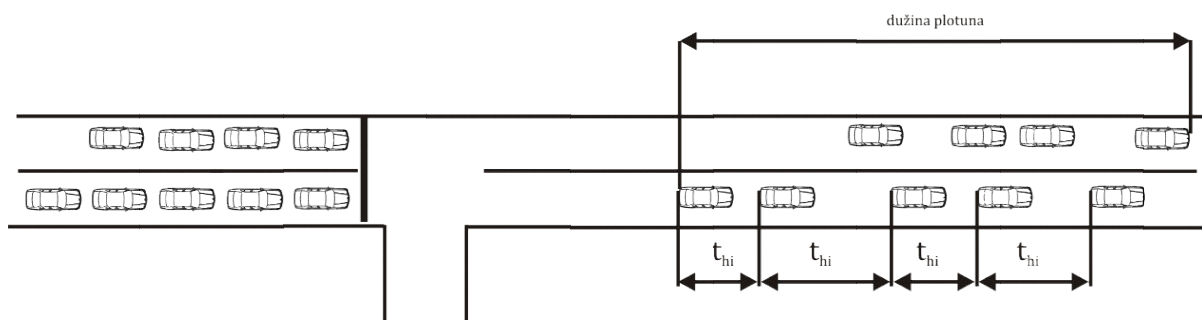
Brzina plotuna je ključna za usaglašavanja rada signala na koridoru. Na osnovu brzine plotuna, uz poznato rastojanje između raskrsnica, utvrđuje se pomak zelenog vremena, koji predstavlja vremensku razliku između pojave zelenog signalnog pojma na dve susedne raskrsnice.

Sa aspekta analize kretanja plotuna pored brzine plotuna kao osnovnog parametra neophodno je poznavanje i standardnog odstupanja brzina pojedinačnih vozila unutar plotuna. Prisutne razlike u brzinama pojedinačnih vozila u plotunu utiču na nastanak rasturanja plotuna.

### 2.1.5 Vreme prolaska plotuna kroz presek saobraćajnice

Vreme prolaska plotuna, odnosno vreme potrebno za opsluživanje plotuna, predstavlja interval između prolaska prvog i poslednjeg vozila u plotunu kroz definisani presek saobraćajnice. Vreme opsluživanja plotuna direktno zavisi od prosečne vrednosti intervala sleđenja vozila.

Posmatrani parametar se ne koristi za definisanje plotuna, već ima isključivo ulogu u analizi kretanja plotuna na arteriji.



**Slika 2-1** Definisanje intervala sleđenja (između vozila u plotunu posmatrano u jednoj saobraćajnoj traci) i dužine plotuna

### 2.1.6 Kriterijumi utvrđivanja plotuna vozila

Dodeljivanje granične vrednosti svakom pojedinačnom parametru definišu se kriterijumi za utvrđivanje pripadnosti vozila plotunu. Pregledom literature utvrđeno je da ne postoji jedinstveni postupak za utvrđivanje plotuna. Razlike se sa jedne strane ogledaju u primeni različitih parametara ili kombinacije parametara, dok sa druge strane postoje značajne razlike u primenjenim graničnim vrednostima za isti parametar.

Na osnovu navedenog može se izvesti opšti zaključak da ne postoji jedinstveni kriterijumi, odnosno granične vrednosti parametara na osnovu kojih bi se definisao plotun vozila. Navedena tvrdnja je obrazložena u narednom delu poglavlja.

Pojam “plotun vozila” se u istraživanjima primenjuje često bez jasno definisanih kriterijuma. (Wang *et al.*, 2017), (Forde and Daniel, 2017), (Paul, Mitra and Maitra, 2016). U istraživanjima autora (Gaur and Mirchandani, 2001), (Jiang, Li and Shamo, 2002) plotun se definiše kriterijumom minimalne veličine plotuna. U tom smislu, plotun je definisan kao grupa od najmanje dva vozila koja se kreću zajedno. Preciznija definicija plotuna prisutna je kod autora Al-Kaisy i Durbin (Al-Kaisy and Durbin, 2011). Autori definišu plotun vozila kao dobrovoljno ili prinudno kretanje vozila sa karakteristikama sleđenja vođe, što podrazumeva realizaciju odgovarajućeg intervala sleđenja u odnosu na prethodno vozilo. Detaljnije, “odgovarajući” interval sleđenja je definisan kao jednak ili manji intervalu sleđenja koji obezbeđuje bezbedno rastojanje između vozila, pod uslovom da je brzina vozila manja od željene brzine. Pod željenom brzinom se podrazumeva brzina vozila u slobodnom toku, odnosno brzina koju vozač pokušava da realizuje, zavisno od ličnih preferenci, a sa osnovnim ciljem realizacije kretanja bez ometanja drugih vozila u toku (Hoogendoorn and Knoop, 2012). Osnovni problem definisanja plotuna preko intervala sleđenja i željene brzine, naglašavaju autori, je u činjenici da su interval sleđenja i željena brzina parametri stohastičke prirode koji zavise od karakteristika vozača i tehničko-eksploatacionih karakteristika vozila, zbog čega ih je teško utvrditi. Takođe, vozilo se može kretati željenom brzinom iako njegovo kretanje ima

karakteristike sleđenja vođe.

U najvećem broj istraživanja kritičan interval sleđenja, nezavisno od preseka na kom se posmatra, predstavlja dominantan kriterijum za definisanje plotuna vozila. Plotun vozila je definisan kao grupa vozila koja se kreće realizujući interval sleđenja manji od definisanog kritičnog intervala. (Athol, 1968), (Mashros *et al.*, 2014), (Praveen and Ashalatha, 2016), (Paul, Mitra and Maitra, 2016), (Missouri state, 1969), (El-Reedy, T. and Ashworth, 1978). U ovakvoj postavci, veličina plotuna (broj vozila u plotunu) će direktno zavisiti od definisane vrednosti kritičnog intervala. Primena strožijeg kriterijuma, u smislu niže vrednosti kritičnog intervala sleđenja, za posledicu ima smanjenje veličine plotuna i obrnuto. Autori koji za definisanje plotuna primenjuju kritičan interval sleđenja koriste različite granične vrednosti. Athol (Athol, 1968) u svojim istraživanjima ispituje različite vrednosti intervala sleđenja, izražene u sekundama (1.2; 1.5; 2.1 i 2.7) i kao kritičnu usvaja vrednost od 2.1 s, za vrednost protoka od 1500 voz/h po traci. Autori Jiang i ostali (Jiang, Li and Shamo, 2002), kao i Mashros i ostali (Mashros *et al.*, 2014) utvrđuju kritičan interval sleđenja u opsegu vrednosti intervala sleđenja od 1.5 s do 3.5 s, u koracima od 0.5 s i usvajaju jedinstvenu vrednost od 2.5 s, nezavisno od vrednosti protoka. Slično, autori Praveen & Ashalatha (Praveen and Ashalatha, 2016) su utvrđivali vrednost kritičnog intervala sleđenja u opsegu od 0.4 s do 4 s, sa korakom od 0.4 s, s tim da vrednost kritičnog intervala sleđenja utvrđuju posebno za svaki referentni presek. Grupa autora koja za definisanje plotuna koristi kritičan interval sleđenja na preseku, odnosno liniji zaustavljanja na početnoj raskrsnici, usvaja kritičnu vrednosti od 3 s (Missouri state, 1969), odnosno 4s (El-Reedy, T. and Ashworth, 1978). Prema navodima autora plotun čine sva vozila koja su prošla liniju zaustavljanja sa intervalom sleđenja manjim od navedenog.

Različite vrednosti kritičnog intervala sleđenja koje se primenjuju u istraživanjima ukazuju na to da ne postoji jasna procedura za njegovo utvrđivanje. (Gaur and Mirchandani, 2001). Jiang i ostali (Jiang, Li and Shamo, 2002) daju preporuku da je kritičan interval sleđenja potrebno utvrditi na osnovu realnih podataka. Definisana vrednost kritičnog intervala sleđenja mora da obezbedi dovoljan broj pouzdanih podataka. Autori svoj stav obrazlažu činjenicom da se usvajanjem niže vrednosti kritičnog intervala sleđenja smanjuje veličina plotuna, do ekstremne kada se plotun ne može registrovati, čime se smanjuje broj podataka na osnovu kojih se može analizirati njegovo kretanje. Sa druge strane, usvajanjem viših vrednosti kritičnog intervala sleđenja veličina plotuna se povećava, do ekstrema, da sva vozila čine plotun, čime se povećava standardno odstupanje pojedinih parametara, odnosno smanjuje pouzdanost dobijenih rezultata. Utvrđivanje kritičnog intervala sleđenja u istraživanjima (Jiang, Li and Shamo, 2002), (Praveen and Ashalatha, 2016) podrazumeva ispitivanje promene veličine plotuna (izražena preko učešća u časovnom protoku) i koeficijenta varijacije veličine plotuna za različite vrednosti intervala sleđenja. Navedeni autori su utvrdili da se povećanjem kritičnog intervala sleđenja povećavaju vrednosti oba parametra, do tačke kada postaju jednaki. Nakon ove tačke povećanje vrednosti oba parametra sporije raste. Ona vrednost intervala sleđenja za koju se postiže izjednačavanje parametara se usvaja kao kritična.

Iako se u istraživanjima češće kao kriterijum primenjuje interval sleđenja u literaturi se može pronaći primeri primene kritičnog rastojanja sleđenja za definisanju plotuna. Autori Rodriguez i ostali (Rodriguez *et al.*, 1977) smatraju da je vozilo deo plotuna ukoliko je rastojanje između posmatranog i prethodnog vozila manje od 61m.

Kriterijum za definisanje plotuna vozila najčešće se svodi na primenu kritičnog intervala sleđenja, ali se u literaturi pojavljuje i definisanje plotuna vozila preko prosečnog intervala

sleđenja (Chaudhary, Abbas and Charara, 2006), (Tiaprasert, 2015). Definisanje plotuna na ovaj način podrazumeva posmatranje uticaja pojedinačnog intervala sleđenja na prosečan interval sleđenja u plotunu. Nezavisno od veličine realizovanog intervala, vozilo se smatra delom plotuna ukoliko je prosečan interval sleđenja manji od kritičnog. Iako navedeni pristup na prvi pogled predstavlja dobro rešenje, problem može nastati u sledećim okolnostima:

- Uticaj realizacije većeg intervala sleđenja na prosečan interval direktno zavisi od pozicije konkretnog vozila. Njegov uticaj se smanjuje sa povećanjem rednog položaja vozila, odnosno sa povećanjem broja vozila povećava se tolerancija ka realizacijama većih intervala sleđenja.
- Realizacija iste vrednosti pojedinačnog intervala sleđenja u različitim plotunima može imati različite ishode zavisno od ostvarene vrednosti prosečnog intervala sleđenja od strane prethodnih vozila. Ukoliko se vozila u plotunu kreću agresivnije i realizuju manju prosečnu vrednost intervala sleđenja, dozvoljavaju realizacije većih vrednosti intervala sleđenja pojedinačnog vozila bez narušavanja granične vrednosti. Ukoliko ova vozila u plotunu realizuju graničnu prosečnu vrednost, neće se tolerisati ni minimalno prekoračenje intervala sleđenja.

### **2.2 Definisanje plotuna u zavisnosti od stanja na prilazu raskrsnici**

U postupku definisanja plotuna neophodno je poznavati stanja saobraćajnog procesa na prilazu raskrsnici. Na prilazu početne raskrsnice dolazi do formiranja inicijalnog reda, koji u trenutku pojave zelenog signalnog pojma započinje kretanje duž arterije. U procesu pražnjenja, inicijalni red može biti nadograđen vozilima koji se na raskrsnicu pojavljuju tokom zelenog i priključuju inicijalnom redu formirajući inicijalni plotun. Takođe, nakon pražnjenja reda, tokom preostalog zelenog vremena liniju zaustavljanja prolaze vozila koja se u određenim okolnostima mogu priključiti inicijalnom plotunu. Stoga je neophodno definisati uslove pod kojim se posmatrana vozila mogu smatrati delom plotuna.

U procesu pražnjenja reda moguće su naredne situacije (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018):

- red se isprazni pre završetka zelenog signalnog pojma ( $X < 1$ );
- red se isprazni na kraju zelenog signalnog pojma ( $X = 1$ , granični slučaj);
- red se ne isprazni tokom trajanja zelenog signalnog pojma ( $X > 1$ ).

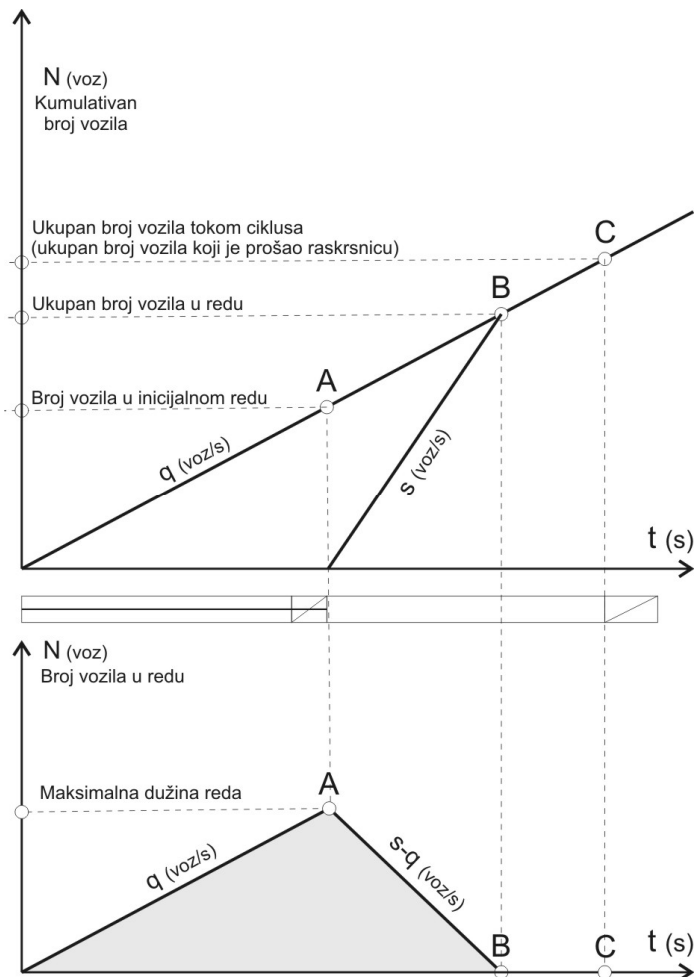
Veličina  $X$  (stepen zasićenja) predstavlja pokazatelj stanja saobraćajnog procesa na signalisanoj raskrsnici, njenom prilazu odnosno saobraćajnoj traci i definisan je odnosom intenziteta ulaznog potoka i kapaciteta posmatranog elementa mreže.

Prvi slučaj se odnosi na nezasićena stanja, dok su druga dva slučaja vezana za zasićena, odnosno prezasićena stanja.

Na narednim dijagramima (Slika 2-2, Slika 2-3) prikazani su teoretski slučajevi realizacije nezasićenog i zasićenog stanja na nivou pojedinačnog ciklusa.

Vozila na raskrsnicu nailaze tokom celog ciklusa, pretpostavljenim konstantnim intenzitetom ulaznog potoka  $q$ . Tokom crvenog signalnog pojma dolazi do formiranja inicijalnog reda, koji maksimalnu dužinu dostiže na početku zelenog signala (tačka A). Pojavom zelenog signalnog pojma, vozila u redu napuštaju raskrsnicu konstantnim intenzitetom izlaznog potoka  $s$ , odnosno intenzitetom zasićenog saobraćajnog toka. U periodu ciklusa između tačaka A i B,

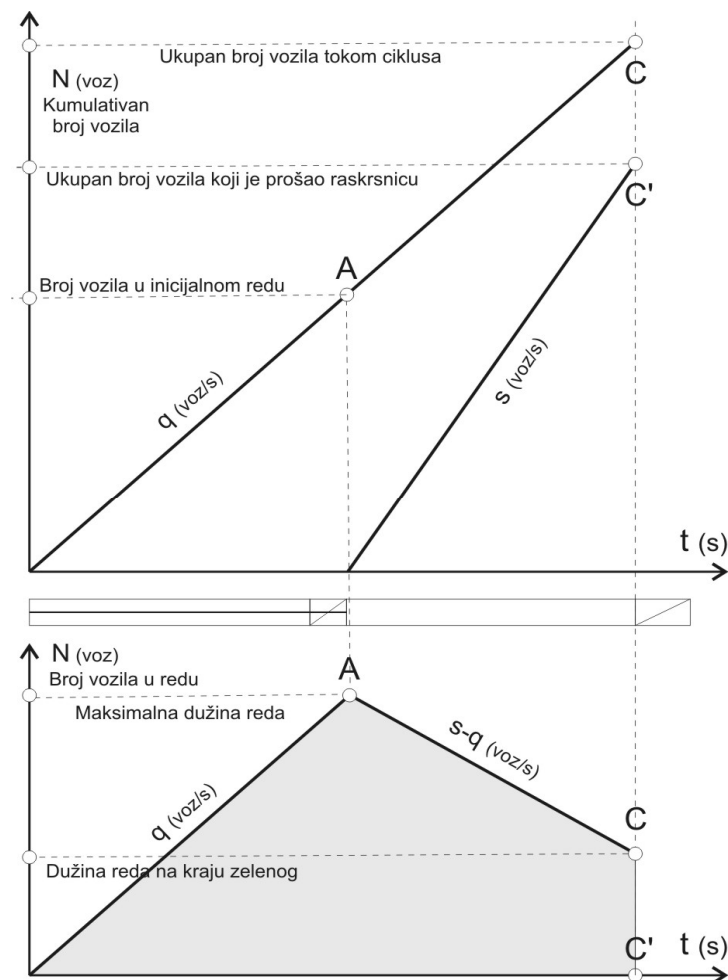
istovremeno se realizuje proces pridruživanja vozila na kraju reda i proces napuštanja raskrsnice od strane vozila na početku reda. Red se prazni intenzitetom koji je jednak razlici intenziteta izlaznog i ulaznog potoka ( $s-q$ ). U nezasićenom ciklusu intenzitet pražnjenja reda  $s-q$  i pripadajuće zeleno vreme su takvi da se red isprazni pre isteka zelenog vremena, u tački B. U periodu zelenog vremena između tačkaka B i C (kraj zelenog), na prilazu raskrsnice ne postoji red, tako da vozila koja se pojavljuju tokom preostalog dela zelenog vremena napuštaju raskrsnicu intenzitetom ulaznog potoka  $q$ . (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)



Slika 2-2 Dijagram realizacije nezasićenog stanja na nivou ciklusa (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)

U prezasićenom ciklusu (Slika 2-3) intenzitet pražnjenja reda  $s-q$  i pripadajuće zeleno su takvi da se red nije ispraznio do završetka zelenog signalnog pojma (tačka C). U ovom slučaju ukupan broj vozila koji se pojavio na prilazu raskrsnici je veći od broja vozila koja su napustila raskrsnicu. Dužina reda na kraju zelenog, odnosno broj neopsluženih vozila, jednak je razlici između tačkaka C i C'. (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)

U zasićenom ciklusu, koji predstavlja granični slučaj, broj vozila koji se pojavio na raskrsnici jednak je broju vozila koja su napustila raskrsnicu, a red se ispraznio na kraju zelenog signala, u tački C (dolazi do poklapanja tačkaka B i C - Slika 2-2 , odnosno C i C' - Slika 2-3). (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)



Slika 2-3 Dijagram realizacije prezasićenog stanja na nivou ciklusa (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)

Na osnovu izloženog, u zavisnosti od stanja u procesu pražnjenja reda, plotun se može definisati na jedan od narednih načina:

- Plotun čine sva vozila koja su prošla raskrnicu, odnosno referenti presek (liniju zaustavljanja) tokom trajanja zelenog signalnog pojma, nezavisno od stanja realizacije procesa pražnjenja reda.

Iako je primenjivano u istraživanjima (Missouri state, 1969), definisanje plotuna na ovaj način je sporno u nezasićenim stanjima kada plotun ima po gustini dva različita dela. Intervali sleđenja u prvom delu plotuna isključivo zavise od vrednosti zasićenog toka  $s$ , dok u drugom delu zavisi od intenziteta ulaznog potoka  $q$ . U realnim uslovima interval sleđenja drugog dela plotuna može značajno varirati. Minimalna vrednost odgovara vrednosti intervala sleđenja pri pražnjenju reda intenzitetom ZST-a, dok je maksimalna vrednost jednaka preostalom delu zelenog signala nakon pražnjenja reda.

Imajući u vidu da u nezasićenim stanjima nakon pražnjenja reda u najvećem broju slučajeva dolazi do realizacije većih intervala sleđenja, neophodno je definisati strožiji kriterijum pripadnosti vozila plotunu. Na osnovu navedenog stava plotun se može definisati i na naredni način:

- Plotun čine sva vozila iz reda, kao i vozila koja su prošla liniju zaustavljanja nakon pražnjenja reda uz realizaciju intervala sleđenja koji je manji od unapred definisane kritične vrednosti.



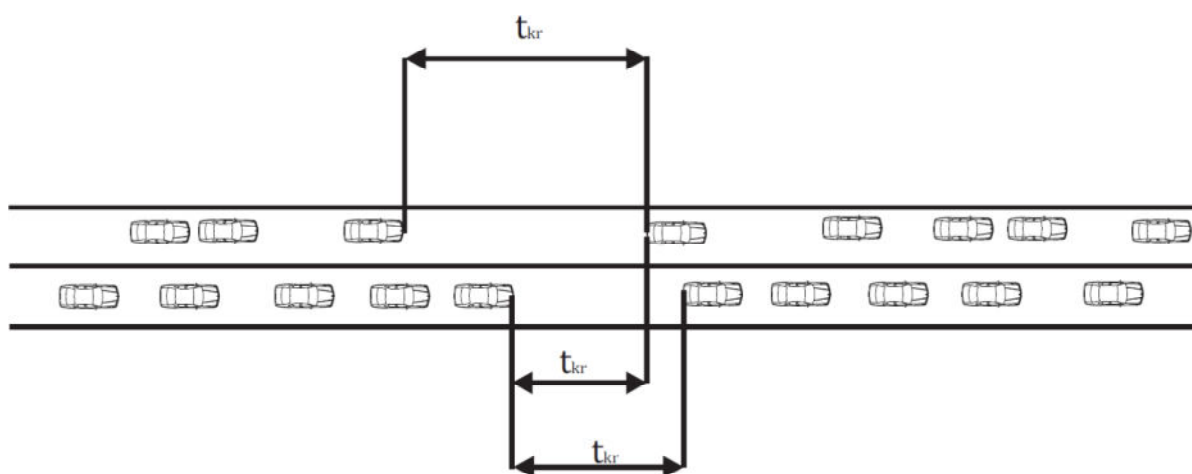
Na ovaj način bi se iz plotuna eliminisala vozila koja su prošla liniju zaustavljanja nakon pražnjenja reda, a koja su realizovala veći interval sleđenja u odnosu na kritičan.

Konačno, nezavisno od stanja na raskrsnici, u literaturi, plotun vozila se najčešće definiše na sledeći način:

- Plotun čine sva vozila koja su prošla liniju zaustavljanja tokom trajanja zelenog signalnog pojma uz realizaciju intervala sleđenja manjih od unapred definisane kritične vrednosti.

Drugim rečima, vozilo je deo plotuna dokle god je zadovoljen kriterijum da je realizovani interval sleđenja manji od kritičnog, nezavisno od toga da li je ono deo inicijalnog reda, priključeno redu ili je napustilo raskrsnicu (prošlo liniju zaustavljanja) u preostalom delu zelenog vremena, nakon pražnjenja reda.

Primena kriterijuma kritičnog intervala sleđenja pri definisanju plotuna, predstavlja izazov u slučajevima kada na prilazu raskrsnici postoji više saobraćajnih traka u posmatranom smeru kretanja. U većini istraživanja, prisutnih u literaturi, nigde se eksplicitno ne naglašava da li se kritičan interval sleđenja posmatra na preseku po saobraćajnoj traci ili na preseku deonice nezavisno od saobraćajne trake u kojoj se kreću dva uzastopna vozila. U okviru istraživanja autori (Athol, 1968), (Jiang, Li and Shamo, 2002), (Mashros *et al.*, 2014) kritičan interval sleđenja posmatraju po saobraćajnoj traci, pri čemu nije jasno definisano da li kriterijum ispunjen ako se kritičan interval sleđenja realizuje u bar jednoj saobraćajnoj traci ili je neophodna realizacija kritičnog intervala sleđenja u svim saobraćajnim trakama istovremeno (Slika 2-4).



**Slika 2-4 Različiti pristupi u posmatranju intervala sleđenja (na nivou trake ili na nivou plotuna)**

Definicija plotuna vozila preko kritičnog intervala sleđenja vozila u plotunu u jednoj saobraćajnoj traci (autora El-Reedy i Ashworth), autori Linl i ostali primenjuju na deonicama sa više saobraćajnih traka. Vrednost kritičnog intervala sleđenja na višetračnim deonicama zavisi od verovatnoće da se vozilo nađe u određenoj saobraćajnoj traci, kao i od vrednosti kritičnog intervala sleđenja u pojedinačnoj traci (Linl, Tsao and Su, 1993). Drugim rečima, kritičan interval sleđenja na saobraćajnicama sa npr. dve saobraćajne trake ne mora biti jednak polovini kritičnog intervala sleđenja, već zavisi od raspodele vozila po trakama. Kritičan interval sleđenja dva uzastopna vozila u plotunu na deonicama sa više saobraćajnih traka utvrđuje se primenom narednog izraza:

$$CH_g = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[ LD_i \cdot CH_s + \sum_{j=1, j \neq i}^n \left( LD_j \cdot \left( \frac{CH_s}{n} \right) \right) \right] \cdot LD_i \right\} \quad (2-2)$$

Gde je:

$CH_g$  - Kritičan interval sleđenja dva uzastopna vozila nezavisno od broja saobraćajnih traka [s]

$CH_s$  - Kritičan interval sleđenja vozila u plotunu u jednoj saobraćajnoj traci [s]

$LD_{i,j}$  - Verovatnoća da se vozilo nađe u i-toj, odnosno j-toj traci [-]

n - Broj saobraćajnih traka [-]

Dobijena vrednost kritičnog intervala sleđenja, dva uzastopna vozila u plotunu nezavisno od broja saobraćajnih traka, se kreće u opsegu između vrednosti kritičnog intervala sleđenja vozila u jednoj saobraćajnoj traci  $CH_s$  i prosečne kritične vrednosti po trakama  $CH_s/n$ .

Korišćenje kritične vrednosti intervala sleđenja kao kriterijuma za definisanje plotuna može predstavljati problem u narednim situacijama, koje su uočene tokom istraživanja:

- zbog različite reakcije vozača u procesu pražnjenja reda dolazi do realizacije intervala sleđenja koji su veći od kritičnog.

Analizom realnih procesa pražnjenja reda uočeno je da postoji realizacija većeg intervala sleđenja između pojedinih vozila u odnosu na kritičan, što posledično znači da se plotun deli na veći broj manjih plotuna. Međutim, u ovakvim situacijama vozači najčešće nakon ulaska na deonicu agresivnijom vožnjom nadoknađuju izgubljeno vreme na startu smanjenjem intervala sleđenja i priključuju se plotunu. S toga je potrebno definisati plotun na način koji bi uzeo u obzir i ovakve realizacije procesa pražnjenja reda.

- postoji realna mogućnost da se vozila, koja prođu referentnu liniju nakon pražnjenja reda, sa intervalom sleđenja koji je veći od kritičnog, priključe plotunu na deonici tokom njegovog kretanja.

U određenim okolnostima vozila koja nisu bila deo plotuna, na deonici sustižu i neretko prestižu vozila na začelju plotuna, čime se na narednom preseku (narednoj raskrsnici ili na deonici) njihov uticaj i prisustvo u plotunu ne može eliminisati. Stoga je neophodno analizirati uslove u kojima se vozila mogu priključiti plotunu i definisati metodologiju na osnovu koje će se kvantifikovati njihov uticaj na dalje kretanje plotuna.

### **2.3 Kretanje plotuna vozila na gradskim arterijama**

Tokom kretanja plotuna dolazi do promene parametara kretanja plotuna, čime dolazi do njegovih modifikacija. Promene u ponašanju plotuna vozila mogu se opisati kao promene vrednosti intervala sleđenja i brzine svakog pojedinačnog vozila, do kojih dolazi usled uticaja unutrašnjih i spoljašnjih faktora. Na kretanje plotuna vozila duž gradske arterije utiču geometrija saobraćajnice, parametri saobraćajnog toka i parametri rada svetlosnih signala. Autori Gartner i Deshpande (Gartner and Deshpande, 2010) izdvajaju dominantne faktore koji utiču na njegovo kretanje.



Geometrijske karakteristike arterije:

- dužina saobraćajnice;
- broj saobraćajnih traka;
- širina saobraćajnih traka;
- slobodna brzina po deonicama;
- prisustvo uličnog parkiranja;
- prisustvo autobuskih stajališta i njihov način realizacije;
- gustina priključaka;
- preglednost na deonici (rastojanje sa koga je moguće uočiti svetlosni signal na narednoj raskrsnici)

Parametri saobraćajnog toka:

- protok;
- brzina;
- struktura saobraćajnog toka;
- procenat vozila u skretanju.

Parametri rada svetlosnih signala na raskrsnicama duž arterije:

- dužina ciklusa;
- dužina zelenog signala;
- način opsluživanja tokova i plan faza;
- pomak zelenog vremena.

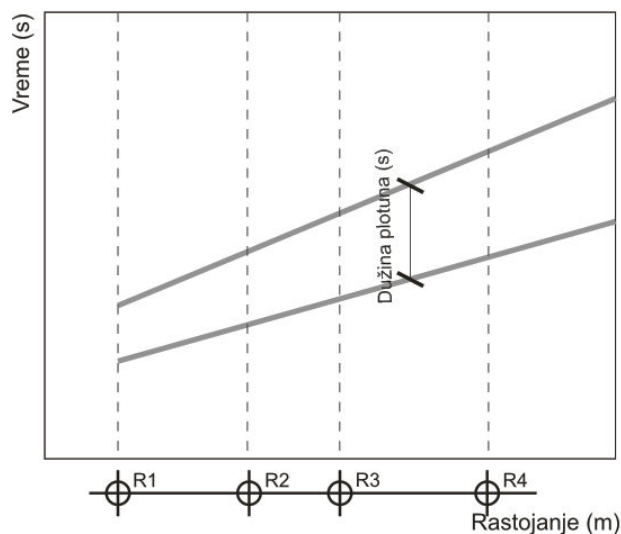
Kao što je rečeno, pod uticajem navedenih faktora dolazi do promene osnovnih parametara kretanja plotuna koje mogu dovesti do:

- rasturanja plotuna, ili
- skupljanja plotuna.

### 2.3.1 *Rasturanje plotuna vozila*

Udaljavanjem plotuna od početne raskrsnice, može doći do povećanja vremena opsluživanja plotuna kao posledica, u početku, razlike u ubrzanju pojedinačnog vozila, kasnije kao posledica razlike u brzini između pojedinačnih vozila u plotunu. Povećanje vremena prolaska plotuna predstavlja fenomen koji se naziva rasturanje plotuna (Slika 2-5).

Tokom kretanja svako pojedinačno vozilo u plotunu pokušava da realizuje svoju željenu brzinu. Usled razlika u željenim brzinama između vozila u plotunu i mogućnosti njihove realizacije dolazi do rasturanja plotuna. Rasturanje plotuna se može opisati na više načina, a zapravo predstavlja povećanje intervala sleđenja između vozila, što za posledicu ima povećanje vremena prolaska plotuna kroz presek saobraćajnice.

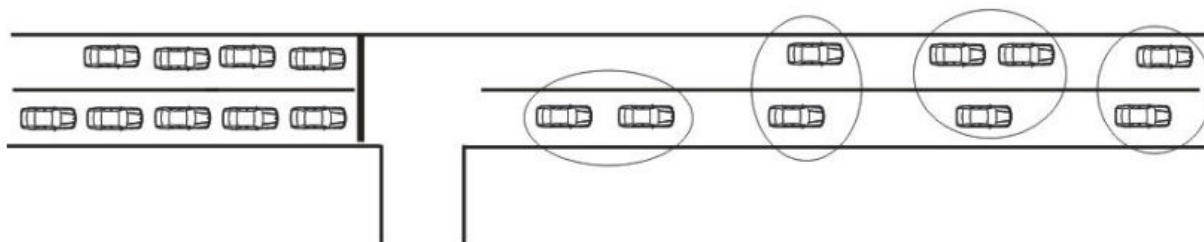


Slika 2-5 Grafički prikaz povećanja dužine plotuna duž koridora u odnosu na dužinu inicijalnog plotuna sa R1 (Čelar, Stanković and Kajalić, 2018)

Rasturanje plotuna vozila predstavlja promenu kompaktnosti plotuna u funkciji vremena. Promena kompaktnosti se može predstaviti i kvantifikovati kroz naredne pokazatelje (TRI, 1996) (Qiao, Li and Yu, 2017):

- promenu (povećanje) intervala između prolaska kraja prethodnog vozila i početka narednog vozila izraženog u sekundama;
- promene (povećanje) intervala sleđenja, odnosno promene vremena između prolaska prednje osovine dva uzastopna vozila, izraženog u sekundama;
- promene (smanjenje) protoka koje se realizuju u manjim vremenskim intervalima, od npr. 10 ili 15 s;
- promene (smanjenje) gustine (broja vozila koja se nalaze na posmatranoj dužini koridora izražena u voz/km).

Pored navedenih pokazatelja, rasturanje plotuna se može kvantifikovati kroz promenu broja vozila u plotunu. Broj vozila u plotunu utvrđuje se na referentnim presecima primenom kriterijuma kritičnog intervala sleđenja. Na ovaj način definisan plotun se registruje kako na početnoj raskrsnici, tako i na narednim presecima uz poštovanje kriterijuma realizacije kritičnog intervala sleđenja. Plotun formiran na početnoj raskrsnici se tokom kretanja može podeliti na veći broj manjih plotuna. Ovo posledično znači da dolazi do promene u broju vozila koja čine plotun u odnosu na veličinu plotuna formiranog na početnoj raskrsnici. (Slika 2-6)



Slika 2-6- Deljenje plotuna na veći broj manjih plotuna, kada je plotun definisan preko kritičnog intervala sleđenja

U ovom slučaju, stepen rasturanja plotuna utvrđuje se kao odnos veličine plotuna i koeficijenta varijacije veličine plotuna između posmatranih preseka.

Određeni autori rasturanje plotuna najčešće definišu u funkciji pređenog rastojanja od početne raskrsnice (Treiterer, Nemeth and Vesellio, 1973a). Dok autori Qiao i ostali navode da je rasturanje plotuna isključivo u funkciji vremena putovanja, odnosno da do rasturanja plotuna može doći i na kraćem rastojanju ukoliko je brzina kretanja plotuna niža. (Qiao, Li and Yu, 2017).

U ranijim istraživanjima osnovna ideja ispitivanja rasturanja plotuna odnosila se na utvrđivanje zavisnosti stepena rasturanja od dužine putovanja. U literaturi se dužina od 800-1000m pominje kao granična, odnosno autori smatraju da na većim dužinama dolazi do značajnog rasturanja plotuna vozila i smanjenja efekata primenjenog načina upravljanja. Autori Graham i Chenu su analizirali odnos između pređenog puta i broja vozila koja ostaju u plotunu. Rezultati pokazuju da 77% vozila iz inicijalnog plotuna ostaju u plotunu i nakon 1600m od početne raskrsnice. Autori ukazuju na to da se efekti usaglašenog rada signala mogu postići na rastojanjima većim od 1600m (Graham and Chenu, 1962). Autori Castle i Bonniville takođe ispituju uticaj dužine pređenog puta na rasturanja plotuna. Kretanje plotuna vozila je analizirano na arterijama na kojima su rastojanja između raskrsnica 2000m. Na osnovu istraživanja je zaključeno da plotun ostaje kompaktan ukoliko su u pitanju koridori sa minimalnim uticajem spoljašnjih faktora (Castle and Bonniville, 1984). Sa druge strane autori Wasson i ostali zaključuju da će, usled uticaja unutrašnjih i spoljašnjih faktora, doći do potpunog rasturanja plotuna već na rastojanju od 800m (Wasson *et al.*, 1999).

Analitički model rasturanja plotuna prikazan u HCM-u (National Research Council, 2000) pretpostavlja da rasturanje plotuna nastaje na rastojanjima od 152.4 m do 182.9 m od početne raskrsnice. Autori Skabardonis i Geroliminis smatraju da se rasturanje plotuna vezuje za rastojanja veća od 152.4 m od početne raskrsnice (Skabardonis and Geroliminis, 2005). Na osnovu istraživanja Transportation Research Institute, utvrđeno je da do značajnog rasturanja plotuna dolazi na rastojanjima većim od 402 m (TRI, 1996).

### 2.3.2 Skupljanje plotuna vozila

Skupljanje ili kompresija predstavlja proces suprotan rasturanju plotuna. Skupljanje plotuna je posledica smanjenja intervala sleđenja između vozila u plotunu, odnosno smanjenja vremena opsluge plotuna na referentnim presecima.

Skupljanje plotuna predstavlja fenomen koji se retko istražuje. Autor Smelt je tokom istraživanja registrovao skupljanje plotuna na kraćim rastojanjima u zanemarljivom procentu (Smelt, 1984). Najveći broj postojećih modela koji opisuju kretanje plotuna vozila isključivo analiziraju fenomen rasturanja plotuna.

Autori Michalopoulos i Pisharody skupljanje plotuna vezuju za uslove povećanih gustina. Uska grla, odnosno tačke na arterijama na kojima dolazi do naglog opadanja kapaciteta deonice (kao što su signalisane raskrsnice) mogu usloviti povećanje gustina (Michalopoulos and Pisharody, 1980). S druge strane nailazak plotuna na zonu smanjene gustine dovodi do rasturanja plotuna. Kritički posmatrano, u uslovima povećanih gustina može doći do značajnog opadanja brzina kretanja vozila, što za posledicu ima smanjenje rastojanja između vozila, ali ne i intervala sleđenja. Tako da se apriori ne može pretpostaviti da će u uslovima povećanih gustina uvek doći do skupljanja (kompresije) plotuna.

Do skupljanja plotuna može doći kao posledica ponašanja vozača, što podrazumeva da su

željene brzine svih vozila u plotunu slične. Ovo je posebno prisutno u situacijama gde su vozači familijarni sa karakteristikama i načinom upravljanja saobraćajem na arteriji.

S obzirom da se ponašanje plotuna vezuje za razlike u željenim brzinama vozila, kao i mogućnostima njihove realizacije, za očekivati je da će na kraćim rastojanjima između raskrsnica, u određenim uslovima doći do skupljanja plotuna. Uslove u kojima dolazi do skupljanja plotuna potrebno je detaljnije analizirati.

### 3. MODELI KRETANJA PLOTUNA VOZILA – PREGLED LITERATURE

Usled kompleksnosti odvijanja saobraćaja u uslovima povećanih gustina, modeliranje kretanja plotuna vozila je zauzelo značajno mesto u teoriji saobraćajnog toka. U literaturi su prisutna dva osnovna pristupa u modeliranju kretanja plotuna vozila:

- makroskopski;
- mikroskopski.

Makroskopski modeli opisivanja ponašanja saobraćajnog toka bazirani su na uspostavljenim relacijama između osnovnih parametara saobraćajnog toka (protok, gustina, brzina). Modeli su dobijeni iz analogije između toka vozila i toka kontinualnih materija (npr. fluidi ili gasovi), a dopunjeni su specifičnim relacijama. Navedene specifične relacije opisuju prosečne makroskopske osobine saobraćajnog toka, zasnovane na determinističkim relacijama između protoka, brzine i gustine saobraćajnog toka (Seldner, 1977).

Osnovni pristup mikroskopskih modela je posmatranje i opisivanje kretanja pojedinačnog vozila u odnosu na druga vozila u saobraćajnom toku (interakcija između vozila) i uticaja iz okruženja. Interakcije između vozila bazirane su na teorijama sleđenja vozila, promene saobraćajne trake i prihvatljivog intervala sleđenja (Tanner, Lighthill and Whitham, 1964).

Osnova za formiranje modela kojim se interpretira kretanje plotuna vozila, uslovljena je dalju podelu modela na:

- empirijske;
- teorijske

Empirijski modeli formirani su na osnovu vrednosti parametara plotuna utvrđenih istraživanjem u realnim uslovima. U drugu grupu spadaju modeli koji su bazirani na teorijskoj interpretaciji saobraćajnog procesa kojima se može opisati kretanje plotuna (Grace and Potts, 1964). Neka od istraživanja kretanja plotuna vozila kombinuju oba pristupa (Robertson, 1969).

Empirijsko modeliranje kretanja plotuna vozila uslovljeno je dalju podelu modela. Sa aspekta eliminisanja ili prisustva uticaja pojedinih faktora formirala su se dve grupe modela kretanja plotuna vozila:

- modeli koji opisuju kretanje plotuna uzimajući u obzir uticaj svetlosnih signala;
- modeli koji opisuju kretanje plotuna uz eliminisan uticaj rada svetlosnih signala.

Rad svetlosnih signala na narednoj raskrsnici može uticati na kretanje plotuna. Uticaj signala, sa jedne strane, može dovesti do usporavanja vozila što za posledicu ima skupljanje plotuna, dok sa druge strane, ranija pojava zelenog signalnog pojma, može uticati da pojedini vozači povećaju brzinu, čime može doći do rasturanja plotuna.

Treba istaći da su za analizu karakteristika kretanja plotuna od značaja obe vrste istraživanja.

U zavisnosti od primenjene metodologije prikupljanja parametara kretanja plotuna, razlikuju se dva pristupa:

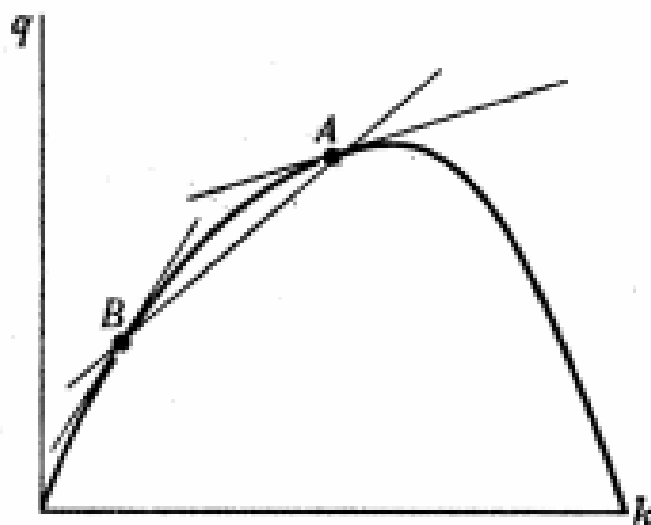
- na preseku;
- na deonici.

Najveću grupu istraživanja čini posmatranje parametara kretanja plotuna na preseku. Utvrđivanje parametara koji su predmet istraživanja prikupljaju se na određenim presecima duž arterije. Tehnika prikupljanja podataka može biti različita, a u zavisnosti od parametra koji je predmet istraživanja. Drugi tip istraživanja baziran je na posmatranju celokupnog koridora koji je predmet istraživanja. Ovaj tip istraživanja je manje prisutan jer zahteva poseban način neposredne realizacije istraživanja. Npr. autori Treiterer i ostali su ovaj tip istraživanja sprovedi snimajući deonicu iz helikoptera, odnosno fotografišući sa vremenskim razmakom od 1s (Treiterer, Nemeth and Vesellio, 1973a).

Potreba da se uoči zakonomernost u kretanju plotuna vozila duž koridora, uslovlila je nastanak različitih modela za opisivanje kretanja plotuna. Najznačajniji modeli koji opisuju kretanje plotuna obrađeni su u narednom delu disertacije.

### 3.1 *Lighthill i Whitham model*

Lighthillov i Whithamov (Lighthill and Whitham, 1955) makroskopski model baziran je na analogiji između kretanja saobraćajnog toka i toka fluda. Primenom kinematičke teorije kretanja talasa definisane su osnovne relacije između protoka i gustine. Talasi su definisani kao kontinualne promene, osnovnih parametara saobraćajnog toka (protok, brzina i gustina). Kontinualne promene mogu biti blage i ne moraju uvek izazvati nepovoljne poremećaje u kretanju toka. Međutim u saobraćajnom toku se mogu pojaviti i skokovite promene osnovnih parametara, što može dovesti do sustizanja (sudaranja) sukcesivnih talasa i pojave šok talasa. Formiranje šok talasa izazivaće nepovoljne poremećaje u kretanju saobraćajnog toka, a smer i brzina kretanja šok talasa zavisiće od karakteristika sudarenih talasa. Šok talasi se mogu kretati u smeru ili u suprotnom smeru kretanja saobraćajnog toka, dok je brzina šok talasa definisana kao nagib vektora između dve tačke na osnovnom protok-gustina dijagramu koje odgovaraju vrednostima parametara saobraćajnog toka na početku i kraju šok talasa (Slika 3-1).



Slika 3-1 Brzina šok talasa definisana nagibom vektora između tačaka A i B (Lighthill and Whitham, 1955)

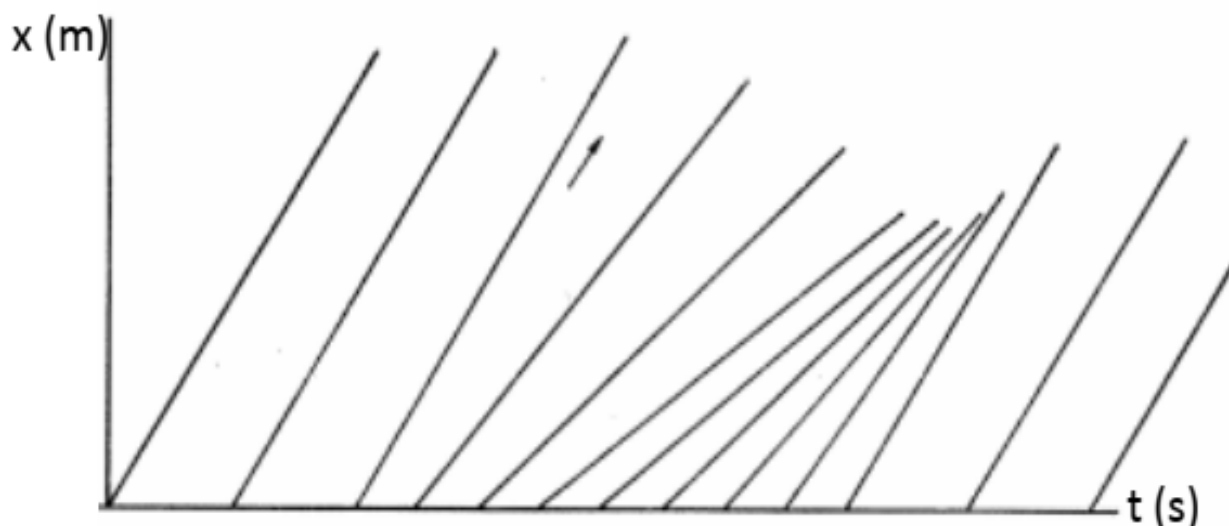
Brzina šok talasa može biti utvrđena i narednim izrazom (Bullock and Abbas, 2001):

$$v_w = \frac{q_B - q_A}{g_B - g_A} \quad (3-1)$$

Pri čemu je:

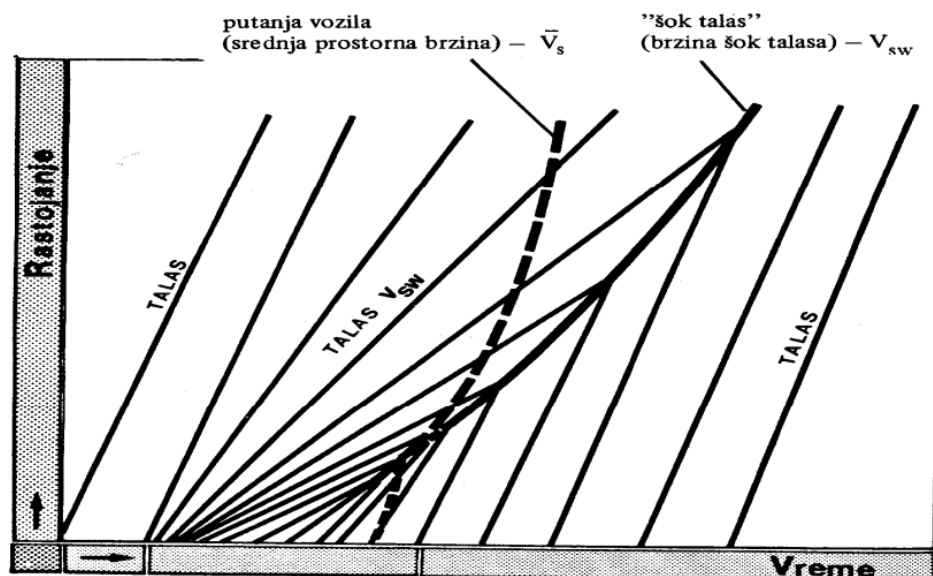
- $v_w$  - brzina šok talasa [km/h]
- $g$  - gustina u stanju A, odnosno stanju B [voz/km]
- $q$  - protok vozila u stanju A, odnosno stanju B [voz/h]

Primena teorije talasa u posmatranju karakteristika kretanja plotuna bazirana je na osnovnoj pretpostavci da deonica celom dužinom ima iste karakteristike, odnosno da jedinstveni fundamentalni dijagram odnosa protoka i gustine važi na čitavoj deonici. U pretpostavljenim uslovima na ovakvim deonicama ne dolazi do ulivanja i izlivanja vozila (protok je konstantan) što znači da je svaki talas nošen konstantnom brzinom.



**Slika 3-2 Promena brzine talasa usled promene ulaznog potoka** (Lighthill and Whitham, 1955)

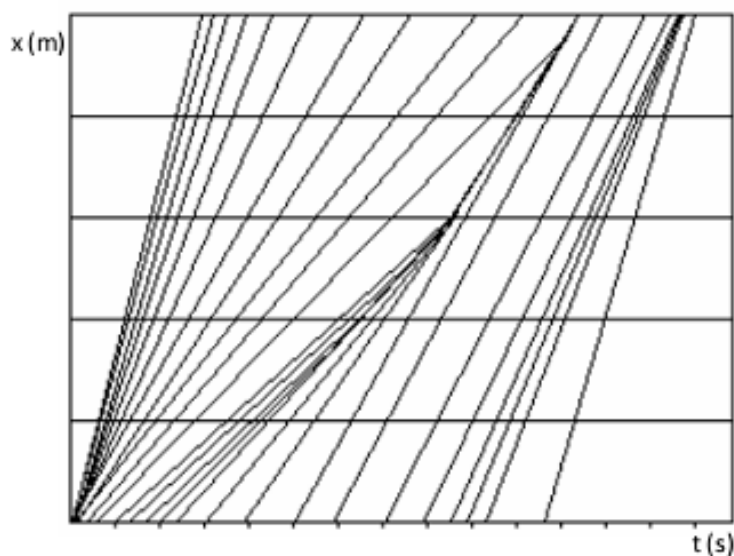
Na prvom preseku u posmatranom vremenskom intervalu definiše se talas kojeg karakteriše odgovarajući ulazni protok, gustina i brzina. Podaci o protoku se dobijaju merenjem, dok se gustina očitava sa protok-gustina dijagrama. Brzina talasa definisana je nagibom tangente osnovnog dijagrama u tački koja odgovara utvrđenom protoku, sa leve strane dijagrama (Lighthill and Whitham, 1955). Na osnovu navedenog na prostor-vreme dijagramu svaki talas se predstavlja ravnom linijom koja je paralelna sa tangentom krive protok – gustina za odgovarajuću vrednost protoka (Slika 3-2). Usled promene protoka između posmatranih vremenskih intervala, brzine talasa će se međusobno razlikovati. U ovakvim okolnostima može doći do sudaranja talasa i formiranja rezultujućeg šok talasa. Poznavanjem teorije šok talasa i njen uticaj na promenu kretanja talasa dobija se konačan izgled putanja talasa na prostor-vreme dijagramu kao što je prikazano na slici (Slika 3-3).



Slika 3-3 Progresija talasa u prostor-vreme dijagramu (prilagođeno - Lighthill and Whitham, 1955)

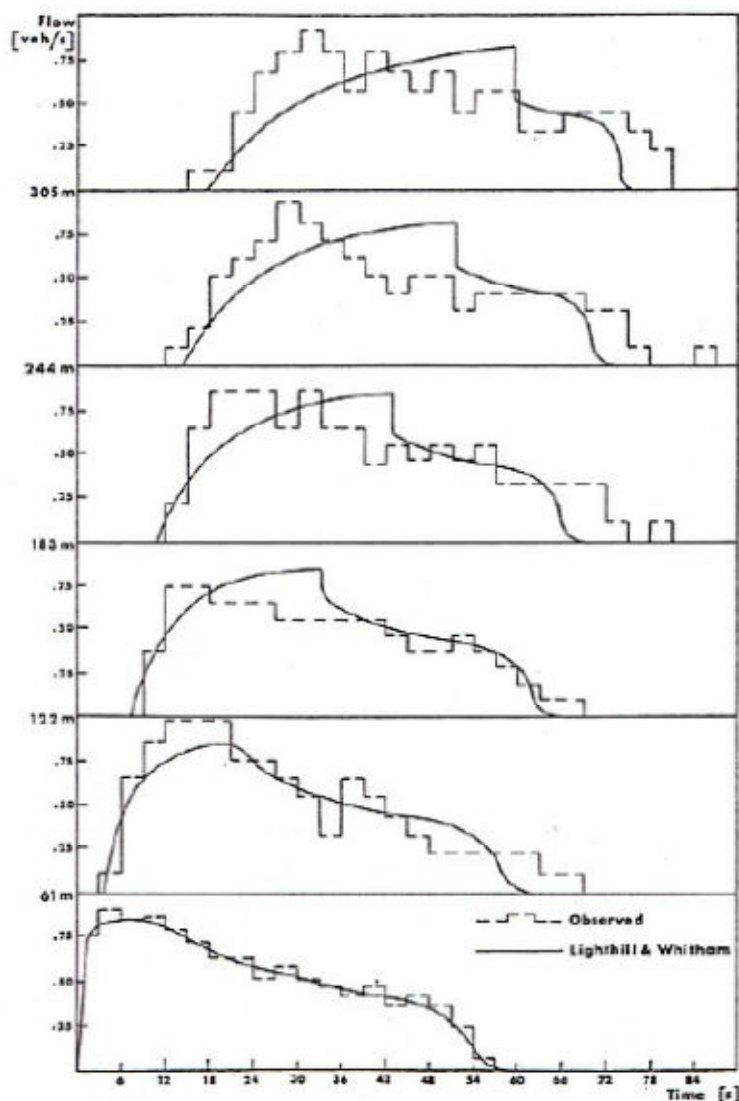
Na osnovu ovako definisanih putanja moguće je na određenom preseku utvrditi protok u posmatranim vremenskim intervalima, s obzirom da svaki talas nosi poznati konstantan broj vozila.

Autor Seddon je primenio Lighthill i Whitham teoriju za analizu kretanja plotuna vozila u Mančesteru i rezultate grafički prikazao (Farzaneh, 2005). Na histogramima (Slika 3-5) su prikazani oblici plotuna dobijeni snimanjem saobraćajnog toka na početnoj raskrsnici i na dodatnih pet preseka duž posmatrane deonice. Isprekidanom linijom je prikazan protok na posmatranoj lokaciji izražen u intervalima od 3s. Izlazne veličine, protok i vreme na presecima duž deonice, utvrđene su na osnovu putanja talasa sa pripadajućeg prostor-vreme dijagrama za poznatu vrednost ulaznog protoka, prikazano neisprekidanom linijom (Slika 3-4).



Slika 3-4 Putanje talasa formirane na osnovu ulaznog potoka (Farzaneh, 2005)





Slika 3-5 Poređenje dobijenog oblika plotuna primenom L&W modela sa realnim podacima (Farzaneh, 2005)

Primena teorije talasa u utvrđivanju načina pojavljivanja vozila na posmatranom preseku ponajviše zavisi od poznavanja osnovnog protok-gustina dijagrama i pretpostavke da se njihov odnos ne menja tokom vremena na posmatranom rastojanju (Farzaneh, 2005). Prema navodima autora ovo predstavlja jedan od osnovnih nedostataka primene Lighthill i Whitham modela. Kao dodatni nedostatak, navodi Seddon, je da je dužina posmatranog plotuna vozila na svakom preseku ista, što u praksi nije slučaj, jer obično dolazi do rasturanja plotuna. Činjenica da dužina plotuna, prema modelu ostaje ista objašnjava se time da su talasi na početku i kraju plotuna paralelni jer protok teži nuli. Na osnovu toga i brzina će biti ista, što znači da prvo i poslednje vozilo imaju prema modelu jednako vreme putovanja. Takođe, usled obimnog matematičkog proračuna i komplikovane grafičke interpretacije (Farzaneh, 2005) mogućnost praktične primena modela se dovodi u pitanje.

### 3.2 Pacey model

Pacey-ev (1956) model kretanje plotuna vozila oslanja se na kinematičku teoriju i bazira se na pretpostavci da do rasturanja plotuna dolazi kao posledica razlike u brzinama kretanja vozila.

(Grace and Potts, 1964)

Pacey je definisao rasturanje plotuna preko funkcije verovatnoće koja se zasniva na narednim pretpostavkama: (Treiterer, Nemeth and Vesellio, 1973)

- vozila se kreću konstantnom brzinom;
- brzina vozila je nezavisna u odnosu na njegov položaj;
- distribucija brzina vozila u plotunu ima normalnu raspodelu iz koje se izvodi raspodela vremena putovanja;
- prilikom kretanja vozila imaju mogućnost da izvrše preticanje vozila u plotunu.

Raspodela vremena putovanja u modelu predstavljena je narednim izrazom (Qiao, Li and Yu, 2017):

$$f(t) = \frac{D}{\tau^2 \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{\left(\frac{D}{\tau} - \frac{D}{\bar{\tau}}\right)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3-2)$$

Gde je:

$f(t)$  - raspodela vremena putovanja

$D$  - rastojanje preseka u odnosu na početnu raskrnicu [m]

$\tau$  - vreme putovanja pojedinačnog vozila na dužini D [s]

$\bar{\tau}$  - srednje vreme putovanja na dužini D [s]

$\sigma$  - Standardno odstupanje brzine [m/s]

Utvrđivanje intenziteta dolaska vozila na posmatranom preseku, na rastojanju D od početne raskrsnice, prikazana je sledećim izrazom (Farzaneh, 2005):

$$q_2(t_2)dt_2 = \int q_1(t_1)f(t_2 - t_1)dt_1dt_2 \quad (3-3)$$

Gde je:

$q_2(t_2)dt_2$  - ukupan broj vozila koji prelazi posmatrani presek na rastojanju D od početne raskrsnice tokom vremenskog intervala (t, t+dt)

$q_1(t_1)dt_1$  - ukupan broj vozila koji prelazi liniju zaustavljanja na početnoj raskrsnici tokom vremenskog intervala (t, t+dt)

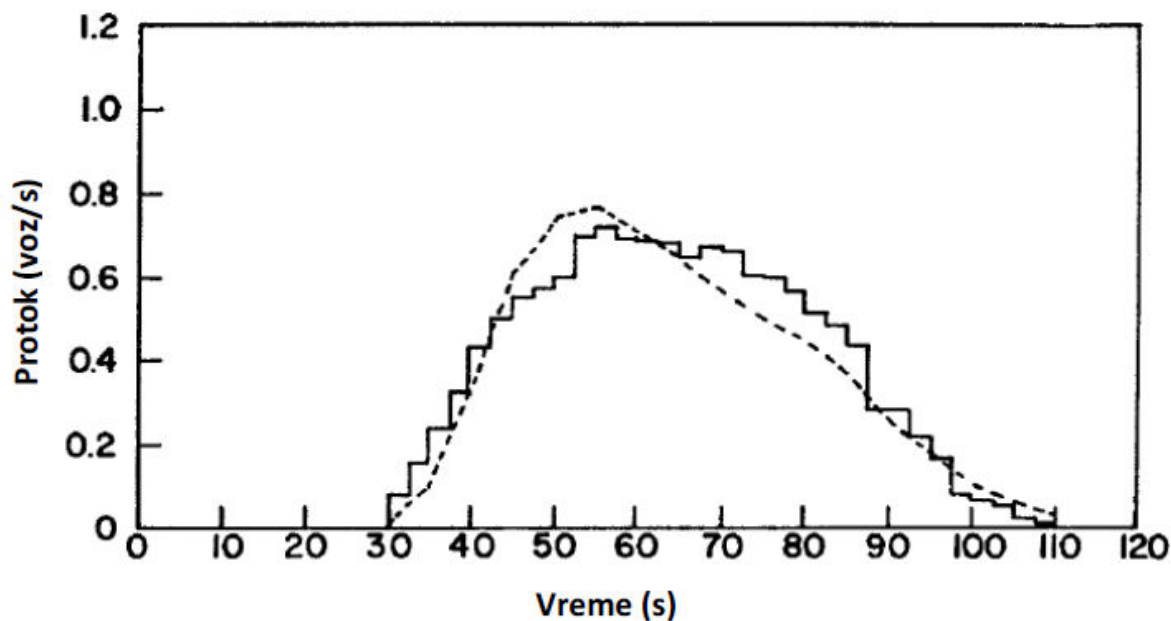
$f(t_2 - t_1)$  - verovatnoća vremena putovanja

Pacey model ima i diskretan oblik (Farzaneh, 2005):

$$q_2(j) = \sum q_1(i)g(j - i) \quad (3-4)$$

Model je testiran na dva koridora u Engleskoj. Serijom eksperimenata kretanja plotuna duž deonice model je pokazao dobre rezultate (Glomb, 1989). Tokom istraživanja mereno je vreme prolaska vozila u plotunu na prvom preseku, neposredno nakon svetlosnih signala i na

drugom preseku na rastojanju od  $\approx 540\text{m}$  od raskrsnice. Protok-vreme histogram formiran je na osnovu podataka sa prvog preseka, i predstavlja prosečnu vrednost protoka u vremenskim intervalima od po 2.5 s. Na isti način je formiran i dijagram na drugom preseku. Na osnovu formiranog, protok-vreme dijagrama sa prvog preseka i pretpostavljene normalne raspodele brzina vrši se estimacija protoka na narednom preseku. Karakteristike raspodele brzina dobijaju se istraživanjem distribucije brzina. U konkretnim istraživanjima dobijena je normalna raspodela sa srednjom vrednošću brzine od 55 km/h i standardnim odstupanjem od 11km/h (Grace and Potts, 1964).



Slika 3-6 Poređenje rezultata dobijenih istraživanjem na rastojanju od 540m i Pacey modelom (Grace and Potts, 1964)

Na osnovu poređenja dobijenih rezultata empirijskim i teorijskim putem, Pacey je zaključio da model daje precizne rezultate u narednim uslovima (Glomb, 1989):

- slab do umeren protok,
- neometan saobraćajni tok i
- relativno kratka rastojanja (do približno 650m).

### 3.3 Robertsonov model

Zbog jednostavnosti primene Robertsonov model je jedan od najčešće korišćenih modela rasturanja plotuna. Predstavlja empirijski model za estimaciju ponašanja plotuna vozila nastao 1969 godine (Farzaneh, 2005). Za formiranje modela korišćeni su rezultati istraživanja sa četiri lokacije u Londonu. Lokacije na kojima su vršena snimanja su po svojim karakteristikama različite, tako da su obuhvaćeni slučajevi od jednotračnih saobraćajnica sa ograničenim preticanjem i jakim uticajem uličnog parkiranja, do višetračnih saobraćajnica visokog ranga. Na osnovu rezultata formirana je rekurentna jednačina pomoću koje je moguće izvršiti estimaciju veličine protoka na određenom preseku duž saobraćajnice, u zavisnosti od veličine protoka na ulaznoj raskrsnici.

Model rasturanja plotuna dat je narednim izrazom (Denney, 1989):

$$q_t^d = F_n \cdot q_{t-T} + (1 - F_n) \cdot q_{t-n}^d \quad (3-5)$$

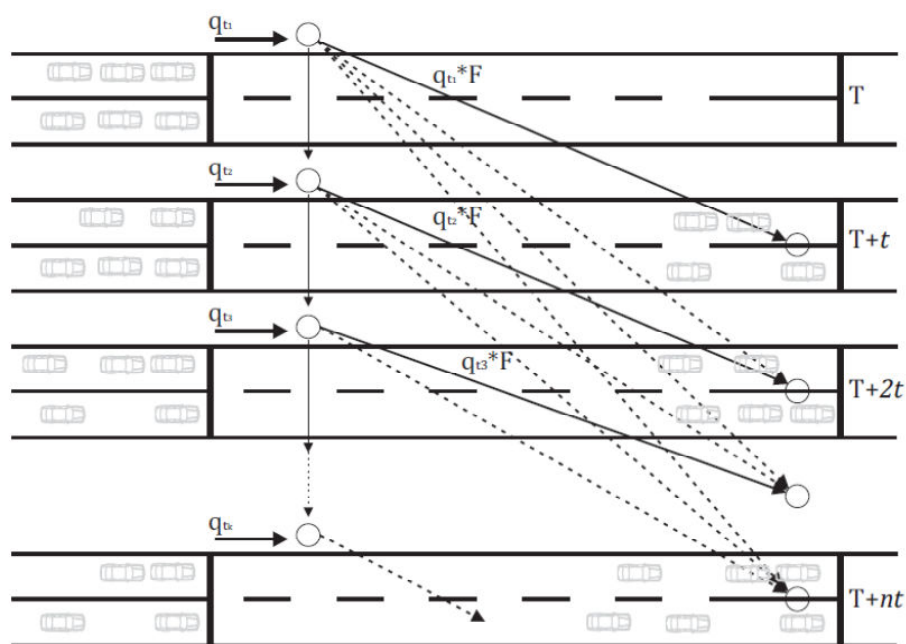
$$F_n = \frac{1}{1 + \alpha\beta T_a} \quad (3-6)$$

Pri čemu su:

- $q_t^d$  - protok u posmatranom vremenskom intervalu na narednoj raskrsnici u trenutku  $t$  [voz/n]
- $q_{t-T}$  - protok u posmatranom vremenskom intervalu na prethodnoj raskrsnici u trenutku  $t-T$  [voz/n]
- $n$  - dužina trajanja posmatranih vremenskih intervala [s]
- $T$  - minimalno vreme putovanja izraženo u broju vremenskih intervala [-]
- $\alpha$  - empirijski faktor rasturanja plotuna [-]
- $\beta$  - empirijski faktor vremena putovanja [-]
- $T_a$  - srednje vreme putovanja svih vozila u plotunu, mereno u broju vremenskih interval [-]
- $F_n$  - faktor prilagođavanja [-]

Osnovna logika Robertsonovog modela estimacije dolaska vozila na određeni presek zasniva se na intenzitetu prolaska vozila na početnoj raskrsnici. Intenzitet prolaska vozila preko referentne linije (linije zaustavljanja) na početnoj raskrsnici, posmatra se kroz manje vremenske interval i izražava u broju vozila po intervalu. Estimacija načina dolaska vozila na naredni presek bazira se na pretpostavci da će vozila koja su prošla liniju zaustavljanja u posmatranom intervalu ( $t_i$ ) na početnoj raskrsnici stići na naredni presek nakon minimalnog vremena putovanja ( $T$ ). Određeni broj vozila koja su napustila početnu raskrsnicu tokom posmatranog  $i$ -tog intervala, neće se pojaviti na narednom preseku tokom trajanja prvog nastupajućeg vremenskog intervala nakon vremena  $T$ , nego će njihov prolazak biti zabeležen u nekom od narednih intervala.

Na osnovu prikazanog izraza (3-4) se zaključuje da estimacija intenziteta pojavljivanja vozila na narednom preseku u posmatranom vremenskom intervalu zavisi od linearne kombinacije broja vozila na prethodnom preseku za posmatrani vremenski interval, kao i dela preostalih vozila iz prethodno posmatranih intervala, pri čemu je svaki pomenuti broj vozila po posmatranom intervalu umanjen za odgovarajuću modifikovanu vrednost faktora prilagođavanja.



Slika 3-7 Grafički prikaz Robertsonovog modela

Preciznost Robertsonovog modela u opisivanju modifikacije plotuna zavisiće direktno od faktora prilagođavanja  $F$ , odnosno indirektno od empirijskih faktora rasturanja plotuna ( $\alpha$ ) i vremena putovanja ( $\beta$ ).

Roberston preporučuje fiksnu vrednost za parametre  $\beta$  od 0.8, dok za  $\alpha$  definiše opseg vrednosti između od 0.2 do 0.5 u zavisnosti od uticajnih faktora (Farzaneh and Rakha, 2006). Veća vrednost faktora  $\alpha$  ukazuje na veće rasturanje plotuna. Međutim, na osnovu istraživanja je zaključeno da primena Robertsonovog modela zahteva kalibrisanje pomenutih faktora za konkretne karakteristike deonice kao što su protok, struktura saobraćajnog toka, širina saobraćajnog profila, nagib, uticaj bočnih prilaza, itd. (Seddon, 1972).

Na osnovu empirijskih istraživanja i računarske simulacije, Seddon je modifikovao Robertsonov model (Seddon, 1972) u sledeći oblik:

$$q_t = \sum_{i=T}^{\infty} F \cdot (1-F)^{i-T} \cdot q_{t-i} \quad (3-7)$$

Gde je:

- $q_t$  - protok u posmatranom vremenskom intervalu na narednoj raskrsnici u trenutku  $t$  [voz/n]
- $q_{t-i}$  - protok u prethodnom vremenskom intervalu na prethodnoj raskrsnici u trenutku  $t-i$  [voz/n]
- $n$  - dužina trajanja posmatranih vremenskih intervala [s]
- $T$  - minimalno vreme putovanja izraženo u broju vremenskih intervala [-]
- $i$  - redni broj intervala za koji se vrši estimacija dolaska vozila na narednoj raskrsnici [-]
- $F$  - faktor prilagođavanja [-]

Član  $F \cdot (1 - F)^{i-T}$  predstavlja funkciju verovatnoće geometrijske raspodele, odnosno predstavlja verovatnoću da će se vozilo koje je prošlo prvi presek u  $i$ -tom intervalu pojaviti na drugoj lokaciji u  $i+T$  intervalu. Na osnovu prikazane formule može se zaključiti da vreme putovanja na posmatranoj deonici ima pomešanu geometrijsku raspodelu, za interval  $T$ , odnosno za minimalno vreme putovanja između dva posmatrana preseka.

Seddon je na osnovu istraživanja takođe zaključio da se primenom različitih raspodela vremena putovanja (normalne raspodele koju je primenjivao Pacey i geometrijske raspodele Robertsona), dobijaju slični rezultati. (Seddon, 1972).

Autor Yu ispitivao je i druge raspodele verovatnoća uključujući i normalnu raspodelu vremena putovanja, normalnu raspodelu brzina i eksponencijalnu raspodelu vremena putovanja. Zaključio je da se korišćenjem navedenih raspodela dobija relativno sličan način i intenzitet dolaska vozila na naredni presek. Na osnovu ovoga je potvrđeno da izbor raspodela u modelu nije ključna u procesu estimacije dolaska vozila (Yu, 2000).

Izvorni Robertsonov model je implementiran u makroskopski simulacioni model TRANSYT. Kao što je napomenuto, model je baziran na pretpostavci da faktor vremena putovanja  $\beta$  ima fiksnu vrednost, zbog čega TRANSYT podleže velikim kritikama, jer ne ostavlja mogućnost promene njegove vrednosti. Vrednost faktora  $\alpha$  podešena je za srednji uticaj faktora ( $\alpha=0.35$ ), uz mogućnost njene izmene.

Imajući u vidu da vrednost faktora  $\alpha$  zavisi od geometrije deonice i uslova u saobraćajnom toku preporučuje se trostepena skala vrednosti faktora u zavisnosti od karakteristike deonice (slab, srednji i jak uticaj faktora), kao što je prikazano u tabeli (Tabela 3-1).

**Tabela 3-1- Definisane karakteristike deonice u TRANSYT korisničkom uputstvu kod kalibrisanja faktora rasturanja plotuna (McTrans, 2008)**

$\alpha$	Karakteristike deonice	Definisane uslova
0.5	Jak uticaj faktora	Prisutan uticaj parkiranja
		Srednji do jak protok vozila u skretanju
0.35	Srednji uticaj faktora	Srednji do jak protok pešaka
		Uže širine saobraćajnih traka
0.25	Slab uticaj faktora	Karakteristike saobraćajnog toka karakteristične za centralne gradske saobraćajnice
		Mali protok vozila u skretanju
0.25	Slab uticaj faktora	Mali protok pešaka
		Širina saobraćajnih traka od 3.3m do 3.6m
0.25	Slab uticaj faktora	Moguće fizičko razdvajanje smerova
		Centralna gradska saobraćajnica
0.25	Slab uticaj faktora	Zabranjeno parkiranje,
		fizički razdvojeni smerovi,
0.25	Slab uticaj faktora	3.6m širina saobraćajnih traka
		Vangradska saobraćajnica

Vrednosti faktora  $\alpha$  koje se odnose na karakteristike deonice (Tabela 3-1) primenjuju se u situacijama kada nedostaju realni podaci na osnovu kojih bi se moglo izvršiti kalibrisanje

pomenutog faktora. Međutim, kalibracija vrednosti faktora prilagođavanja za konkretne uslove je ključna za realno opisivanje karakteristika kretanja plotuna primenom modela.

### 3.3.1 Kalibracija parametara Robertsonovog modela

Realno opisivanje karakteristika kretanja plotuna vozila Robertsonovim modelom isključivo zavisi od pomenutih faktora - faktora rasturanja plotuna alfa i faktor vremena putovanja beta. Istraživanja su pokazala da neadekvatno definisanje faktora značajno utiče na kvalitet ulaznih podataka u postupku optimizacije parametara usaglašenog rada signala.

Procedura kalibrisanja faktora rasturanja plotuna podrazumeva utvrđivanje odgovarajuće vrednosti kojom se minimizira suma srednje kvadratne greške između vrednosti protoka dobijene na osnovu Robertsonovog modela u odnosu na realne vrednosti protoka dobijene istraživanjem na posmatranom preseku.

U postupku kalibracije modela prisutna su dva pristupa. Prvi se bavi kalibrisanjem samo faktora  $\alpha$ , dok faktor  $\beta$  zadržava fiksnu. Kod većine ovih istraživanja  $\alpha$  je kalibrisan u zavisnosti od uticaja spoljašnjih i/ili unutrašnjih faktora u lokalnim uslovima. Dok drugi pristup podrazumeva kalibrisanje oba faktora. Zbog kompleksne procedure manji broj radova se bavi problematikom kalibrisanja oba faktora istovremeno.

Značajan doprinos u proceduri kalibrisanja faktora  $\alpha$  i  $\beta$  ima autor Yu (Yu, 1999), koji je predstavio matematičku zavisnost između faktora  $\alpha$  i  $\beta$ , kao i faktora prilagođavanja koji je baziran na statističkim podacima vezanih za vreme putovanja pojedinačnih vozila, što je predstavljeno narednim izrazima:

$$\alpha = \frac{1 - \beta}{\beta} \quad (3-8)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot T_a + 1 - \sqrt{1 + 4 \cdot \sigma^2}}{2 \cdot T_a} \quad (3-9)$$

$$F = \frac{\sqrt{1 + 4 \cdot \sigma^2} - 1}{2 \cdot \sigma^2} \quad (3-10)$$

Gde je:

$\sigma$  - standardno odstupanje vremena putovanja

$T_a$  - prosečno vreme putovanja između dva posmatrana preseka

Na osnovu prikazanih formula moguće je utvrditi vrednosti faktora rasturanja plotuna ukoliko je poznato prosečna vrednost i standardno odstupanje vremena putovanja. Autor Farzaneh (Farzaneh, 2005) je utvrdio da su formirane relacije primenljive samo ukoliko se estimacija dolaska vozila po Robertsonovom modelu vrši za vremenske intervale od 1 sekunde. Povećanjem vremenskog intervala povećava se i greška estimacije. Autori Farzaneh i Rakha (Farzaneh and Rakha, 2005) ukazuju na tri moguća rešenja prevazilaženja ograničenja u pogledu povećanja posmatranog vremenskog interval. Jedan od rešenja podrazumeva modifikaciju izvornih formula (3-8), (3-9), (3-10) uzimanjem u obzir dužinu trajanja vremenskog interval.



$$\alpha_n = \frac{1 - \beta_n}{\beta_n} \quad (3-11)$$

$$\beta_n = \frac{2 \cdot T_a + n - \sqrt{n^2 + 4 \cdot \sigma^2}}{2 \cdot T_a} \quad (3-12)$$

$$F_n = n \cdot \frac{\sqrt{n^2 + 4 \cdot \sigma^2} - n}{2 \cdot \sigma^2} \quad (3-13)$$

Gde je:

- $n$  - veličina vremenskog intervala [s]
- $\sigma$  - standardno odstupanje vremena putovanja [s]
- $T_a$  - prosečno vreme putovanja između dva posmatrana preseka [s]

$F_n, \alpha_n, \beta_n$  - parametri modela za vremenski interval od  $n$  sekundi [-]

Autori (Wang *et al.*, 2017) su na isti način ispitivali mogućnost primene predstavljene procedure proračuna parametara rasturanja plotuna za posmatrane vremenske intervale veće od 1s. U istraživanjima su ispitivali rezultate estimacije za vremenske intervale u opsegu od 1 do 5 sekundi. I konstatovali da izbor dužine intervala posmatranja utiče na preciznost estimacije, kao što su pokazali autori Farzaneh i Rakha. Za razliku od dotadašnjih tvrdnji, autori zaključuju da povećanjem intervala sa jedne na tri sekunde model realnije opisuje rasturanje plotuna, a da se daljim povećavanjem vremenskog intervala povećava odstupanje od realnih vrednosti. Konačan zaključak autora, odnosi se na činjenicu da vremenski interval od 1s ne daje najbolje rezultate i da je model moguće primeniti za duže vremenske intervale, što je suprotno tvrdnjama autora Farzaneh i Rakha (Farzaneh and Rakha, 2005).

Na osnovu izloženog zaključuje se da odabir dužine posmatranog vremenskog intervala utiče na preciznost modela. Pri odabiru dužine posmatranog intervala trebalo bi, takođe voditi računa da se minimizira broj praznih intervala, odnosno intervala u kojima nema registrovanih prolaska vozila. Kada se plotun definiše preko kritičnog intervala sleđenja, odabir dužine posmatranog intervala će direktno zavisiti od veličine kritičnog intervala. Odnosno, ukoliko se plotun definiše za kritičan interval sleđenja od npr. 3 sekunde, odabirom vremenskog intervala koji je jednak ili veći od kritičnog u potpunosti se izbegava pojava praznih intervala. Autori Paul i ostali (Paul, Mitra and Maitra, 2016) ispituju uticaj veličine posmatranog vremenskog intervala na preciznost estimacije za vremenske intervale od 3, 4 i 6 sekundi. Na osnovu empirijskih podataka zaključuju da se povećanjem vremenskog intervala smanjuje srednja kvadratna greška, što dovode u direktnu vezu sa smanjenjem broja praznih intervala.

Na osnovu istraživanja obavljenih u Americi i Evropi, za različite uslove kretanja plotuna, vršena je kalibracija parametara Robertsonovog modela. Rezultati relevantnih istraživanja sumarno su prikazani u narednoj tabeli (Tabela 3-2).



**Tabela 3-2 Sumarni prikaz dobijenih vrednosti kalibracionih parametara rasturanja plotuna na osnovu istraživanja vođenih na različitim lokacijama u svetu (Farzaneh, 2005)**

Vrednosti parametara		Uticajni faktori	Izvor
$\alpha$	$\beta$		
0.20	0.80	Vangradska deonica, sa po tri saobraćajne trake po smeru, smerovi fizički razdvojeni	Collins & Gower (1974) (Collins and Gower, 1974)
0.24	0.80	Vangradska deonica, dve saobraćajne trake po smeru, zasebne saobraćajne trake za skretanja	Lam (1977)
0.40	0.80	Saobraćajnica sa po tri saobraćajne trake po smeru, smerovi fizički razdvojeni, 10-15 % komercijalnih vozila, moguće preticanje vozila	Seddon (1972) (Seddon, 1972)
0.63	0.80	Dvosmerna saobraćajnica, po dve uzane saobraćajne trake po smeru, 2-3% komercijalnih vozila, ograničeno preticanje	Seddon (1972) (Seddon, 1972)
0.60	0.63	Fizički razdvojeni smerovi, širine profila 10m, nagib 5%, ograničenje brzine na 48km/h, intenzitet prolaska vozila 12 voz/h, rastojanje između raskrsnica 420m	El-Reedy & Ashworth (1978)
0.70	0.59	Fizički razdvojeni smerovi, širine profila 10m, nagib 5%, ograničenje brzine na 48km/h, intenzitet prolaska vozila 12 voz/h, rastojanje između raskrsnica 560m	El-Reedy & Ashworth (1978)
0.50	0.80	Karakteristike deonice sa jednom saobraćajnom trakom po smeru, sa prisutnim uličnim parkiranjem i ograničenim mogućnostima za preticanje, do deonice sa više saobraćajnih traka, bez parkiranja i relativnim mogućnostima za preticanje.	Robertson (1969), Hillier & Rothery (1966) (Robertson, 1969)
0.50	0.80	Jak uticaj faktora	NCHRP 233
0.50	0.80	Jak uticaj faktora	TRANSYT-7F Manuel
0.37	0.80	Srednji uticaj faktora	NCHRP 233
0.35	0.80	Srednji uticaj faktora	TRANSYT-7F Manuel
0.24	0.80	Slab uticaj faktora	NCHRP 233
0.25	0.80	Slab uticaj faktora	TRANSYT-7F Manuel
0.21	0.97	Slab uticaj faktora	McCoy (1983) (McCoy et al., 1983)
0.15	0.97	Slab uticaj faktora	McCoy (1983) (McCoy et al., 1983)

U prikazanoj tabeli može se uočiti da parametri uzimaju različite vrednosti za istu ocenu uticaja faktora, na osnovu čega se zaključuje da moraju biti pažljivo kalibrisani za lokalne uslove.

Istraživanja koja se odnose na kalibrisanje parametara izvornog modela se mogu svrstati u dve grupe u zavisnosti od problema koji rešavaju:

- Kalibrisanje parametara rasturanja plotuna u zavisnosti od uticaja spoljašnjih faktora u lokalnim uslovima (Wang *et al.*, 2017), (Bie *et al.*, 2013), (Paul, Mitra and Maitra, 2016), (Mathew *et al.*, 2013);
- Kalibrisanje parametara rasturanja plotuna u zavisnosti od uticaja dinamičkih

parametara saobraćajnog toka (Baass and Lefebvre, 1988), (Bie *et al.*, 2015).

### 3.4 HCM model

Do 2010 godine HCM (HCM, 2010) se nije direktno bavio opisivanjem kretanja plotuna vozila. Uticaj kretanja plotuna se posmatrao samo pri proračunu vremenskih gubitaka ostvarenih na signalisanim raskrsnicama kroz faktor kvaliteta progresije (Smaglik, Bullock and Sharma, 2007). U HCM proceduri kvalitet progresije se kvalitativno i kvantifikativno definiše tipom dolaska vozila na raskrsnicu za koju se utvrđuju vremenski gubici (Stanković *et al.*, 2020), a tip dolaska se utvrđuje u odnosu na RP (Platoon ratio). Vrednost RP se kreće u opsegu između 0.33 i 2. (National Research Council, 2000)

**Tabela 3-3 vrednost RP u odnosu na tip dolaska vozila na raskrsnicu (National Research Council, 2000)**

RP	Tip dolaska	Kvalitet progresije
0.33	1	Veoma loša
0.67	2	Nepovoljan
1.00	3	Slučajan dolazak
1.33	4	Povoljan
1.67	5	Vrlo povoljan
2.00	6	Izrazito povoljan

Tip dolaska vozila definisan je u šest kategorija, u zavisnosti karakteristika deonice. Tip dolaska 1 podrazumeva najlošiju progresiju, dok tip dolaska 6 podrazumeva najbolju progresiju.

Uslovi u kojima najčešće dolazi do realizacije određenog tipa dolaska vozila prikazani su u tabeli (Tabela 3-4).

**Tabela 3-4 Uslovi u kojima dolazi do realizacije određenog tipa dolaska (HCM, 2010).**

Tip dolaska	Uslovi u kojima dolazi do realizacije određenog tipa dolaska vozila
1	Koordinisani potezi na dvosmernim saobraćajnicama na kojima jedan smer nema dobru progresiju. Karakteristično na deonicama na kojima je rastojanje između raskrsnica manje od 488 m
2	Blaži oblik tipa dolaska 1. Karakterističan na deonicama na kojima je rastojanje između raskrsnica u opsegu između 488 m i 975 m
3	Karakterističan na deonicama na kojima je rastojanje između raskrsnica veće od 975 m, nezavisno da li su u sistemu koordinacije ili ne.
4	Na dvosmernim saobraćajnicama na kojima je samo jedan smer u sistemu koordinacije. Karakteristično za rastojanja između raskrsnica u opsegu između 488 m i 975 m
5	Na koordinisanim potezima. Karakteristično na deonicama na kojima je rastojanje između raskrsnica manje od 488 m
6	Na jednosmernim saobraćajnicama. Karakteristično na deonicama na kojima je rastojanje između raskrsnica manje od 244 m

U HCM-u 2010 u proceduri analize koordinisanih poteza po prvi put se vrši estimacija protoka

na narednoj raskrsnici na osnovu protoka sa početne raskrsnice. HCM 2010 se u potpunosti oslanja na Robertsonov model proračuna broja vozila koja se pojavljuju na narednu raskrsnicu u posmatranim vremenskim koracima, a sve u odnosu na broj i način prolaska vozila na prethodnoj raskrsnici (HCM, 2010).

Preporučene vrednosti trajanja vremenskih intervala je 1 sekunda. Autori naglašavaju da vrednost od 1 sekunde po vremenskom intervala predstavlja optimum između preciznosti dobijenih podataka i potrebnog vremena za proračun (HCM, 2010).

Autori Bonneson i ostali definisali su faktor prilagođavanja (F) u zavisnosti od vremena putovanja između posmatranih raskrsnica (Bonneson, Pratt and Vandehey, 2010). Ovakav proračun faktora prilagođavanja usvojen je i u HCM-u 2010, a ima oblik:

$$F = \frac{1}{1 + 0.138t'_R + \frac{0.315}{d_t}} \quad (3-14)$$

Pri čemu je:

- $t'_R$  - Vreme prolaska između posmatranih raskrsnica izražen u vremenskim koracima,  $t'_R = \frac{t_R}{d_t}$
- $t_R$  - Vreme prolaska između posmatranih raskrsnica izražen u sekundama
- $d_t$  - Dužina trajanja vremenskih koraka izražena u sekundama po vremenskom koraku

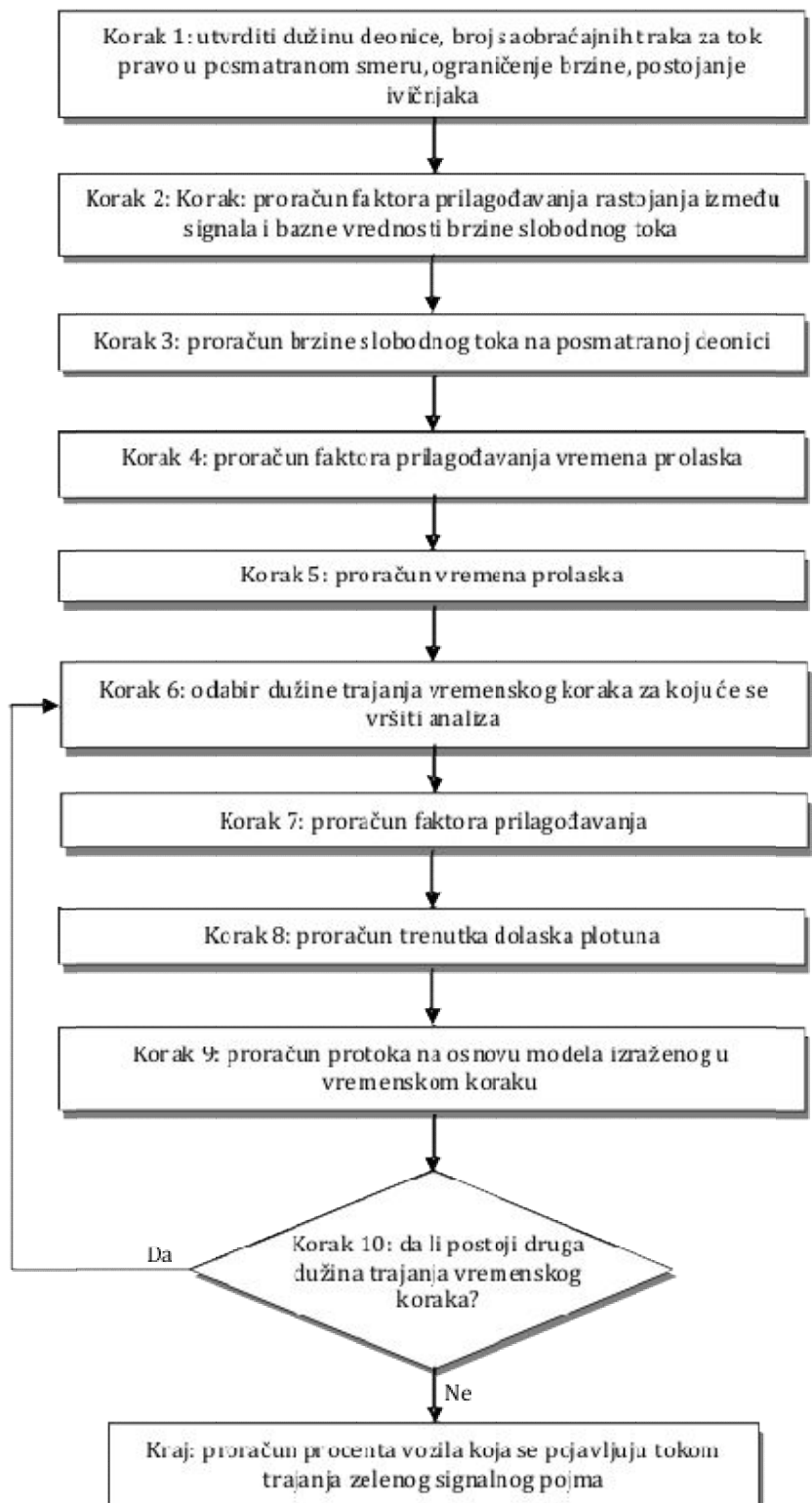
Proračun vremena prolaska vozila između posmatranih raskrsnica po HCM-u, zavisi od brzine slobodnog toka, načina upravljanja na raskrsnici, faktora koji zavise od deoničnog rastojanja i gustine saobraćajnog toka, kao i uticaja vozila u skretanju na ostvarivanje vremenskih gubitaka glavnog toka (Kajalić, Čelar and Stanković, 2018).

Na osnovu vremena prolaska između posmatranih raskrsnica, kao i faktora prilagođavanja utvrđuje se vreme dolaska vozila na narednoj raskrsnici (T iz Robertsonovog modela):

$$t' = t'_R - \frac{1}{F} + 1.25 \quad (3-15)$$

Na narednom algoritmu (Slika 3-8) prikazana je procedura utvrđivanja vremena dolaska vozila i procenat dolaska vozila na zeleni signalni pojam na narednoj raskrsnici.

Mogućnost primene i ograničenja HCM-ovog modela ispitivali su autori Forde i Daniel (Forde and Daniel, 2017). Autori su podatke o kretanju plotuna istraživali na četiri lokacije. Na pojedinim lokacijama postoje uticaji nekih od spoljnih faktora, kao što su postojanje pešačkih prelaza na posmatranim deonicama i veliko učešće komercijalnih vozila u toku. Poređenjem dobijenih rezultata sa vrednostima dobijenih modelom, zaključili su da u uslovima u kojima nije prisutan uticaj spoljašnjih faktora model daje dobre rezultate, dok u uslovima u kojima postoji bilo uticaj pešaka ili veći udeo komercijalnih vozila u plotunu rezultati modela imaju statistički značajnu razliku u odnosu na realne podatke.



Slika 3-8 Procedura proračuna vremena nailaska plotuna i procentat vozila koji se pojavljuje tokom trajanja zelenog signalnog pojma (HCM, 2010)

## **4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA PARAMETARA PROCESA KRETANJA PLOTUNA VOZILA**

Osnovni preduslov za postizanje ciljeva istraživanja je kvalitetno formirana metodologija, što se postiže jasnim definisanjem koraka u istraživanju koji se sprovode po utvrđenom redosledu (Ivanović, 2016).

Metodologija je formirana tako da isključiti ili minimizira uticaje spoljnih faktora koji bi mogli da utiču na kvalitet dobijenih rezultata. Utvrđivanju metodologije prethodila su pilot istraživanja koja su omogućila da se realnije sagleda problematika i jasno utvrde svi elementi metodologije.

### **4.1 Predmet i cilj istraživanja**

Osnovni predmet eksperimentalnih istraživanja su parametri kretanja plotuna vozila. Međutim, realizaciji navedenog prethodi definisanje plotuna vozila čije se kretanje dalje posmatra. S obzirom na iznete nedoumice koje se odnose na definisanja plotuna vozila (Poglavlje 2.) i činjenici da procesu kretanja plotuna prethodi njegovo formiranje, pored osnovnog, navedenog predmeta istraživanja se izdvaja dodatni koji podrazumeva istraživanje procesa formiranja plotuna. Istraživanje procesa formiranja plotuna će omogućiti da se jasno utvrde kriterijumi na osnovu kojih se definiše plotun vozila čije se parametri kretanja dalje posmatraju, a neophodne su za testiranje definisanih hipoteza u okviru ove doktorske disertacije, što ujedno predstavlja osnovni cilj istraživanja.

Na osnovu navedenog formirani su se naredni parcijalni zadaci u postupku istraživanja:

- definisanje plotuna vozila - utvrđivanje parametara i graničnih vrednosti;
- kvantifikacija uticaja parametara saobraćajnog toka na kretanje plotuna;
- utvrđivanje uslova u saobraćajnom toku u kojima dolazi do modifikacije u kretanju plotuna;
- utvrđivanje načina i stepena modifikacije plotuna;
- ocena postojećih analitičkih modela za opisivanje kretanja plotuna vozila.

### **4.2 Lokacije istraživanja**

U okviru disertacije istraživanje karakteristika kretanja plotuna se vrši na gradskim arterijama bez uticaja rada narednog signala na njegovo ponašanje. Odabir lokacija (prostora istraživanja) mora zadovoljiti dva osnovna kriterijuma:

- upravljanje početnom raskrsnicom putem svetlosnih signala;
- veća rastojanja između signalisanih raskrsnica, kako bi se eliminisao uticaj svetlosnog signala na ponašanje plotuna vozila;

Gradske arterije karakteriše velika gustina raskrsnica, sa dominantnim maksimalnim rastajanjem oko 500 m. Iz navedenog razloga, odabirom lokacija istraživanja se težilo da rastojanje između dve uzastopne signalisane raskrsnice bude značajno veće od navedenih 500 m, kako bi se izbegao uticaj signala na ponašanje plotuna. Ukoliko nije bilo moguće zadovoljiti

navedeni kriterijum, prihvatljive su bile lokacije na kojima je rastojanje između dve uzastopne signalisane raskrsnice i manje od 500 m, uz ispunjenje dodatnih kriterijuma:

- Svetlosni signali sa druge raskrsnice moraju biti vizuelno uočljivi sa početne raskrsnice;
- Istovremena pojava zelenog signalnog pojma na obe raskrsnice.

Takođe, lokacije moraju da zadovolje i naredne metodološki definisane uslove i ograničenja:

- minimum dve saobraćajne trake na deonici, kako bi se izbegao uticaj kretanja prvog vozila na kretanje plotuna, odnosno omogućilo obilaženje sporih vozila;
- individualni način rada svetlosnih signala ili slučajan nailazak jednog vozila na početnu raskrsnicu, što predstavlja preduslov za formiranje inicijalnog reda vozila;
- odgovarajuće saobraćajno opterećenje koje omogućava formiranje inicijalnog reda vozila;
- neometani proces pražnjenja reda, postojanje posebnih saobraćajnih traka namenjenih toku pravo na početnoj raskrsnici;
- uslovi realizacije neprekinutog saobraćajnog toka, eliminacija uticaja parkiranja, autobuskih stajališta i pešačkih prelaza duž prostora istraživanja;
- minimalni uticaj na promenu veličine saobraćajnog toka na deonici, nepostojanje ili minimalno ulivanje i odlivanje toka sa deonice. Na posmatranim deonicama na kojima postoje priključci, ciklusi u kojima dolazi do uticaja ulivanja ili odlivanja vozila na kretanje plotuna, izuzimaju se iz analize;
- fiksni parametri rada signala na početnoj raskrsnici;
- odgovarajuća struktura saobraćajnog toka, homogeni tok putničkih automobila, odnosno minimalno učešće komercijalnih vozila;
- konstantna vrednost kapaciteta saobraćajnice na deonici, isti broj ulaznih i izlaznih saobraćajnih traka, čime se eliminiše mogućnost nagle promene kapaciteta saobraćajnice koja bi dovela do promene gustine, a posledično i do modifikacije plotuna;
- neometana realizacija procesa kretanja plotuna na deonici - mala verovatnoća nastanka zagušenja, ometanja i prekidanja saobraćajnog toka na deonici koja je prouzrokovana manifestacijama u okruženju (neregularno zaustavljanje vozila, skretanja, prelazak pešaka, itd.).

### **4.3 Period istraživanja**

Period realizacije istraživanja je uslovljen definisanom metodologijom istraživanja, kao i ograničavajućim faktorima koji se odnose na primenjenu tehniku i opremu korišćenu u istraživanju (ograničena dužina jedinstvenog perioda istraživanja).

U uslovima fiksnih parametara rada svetlosnih signala, jedini uticaj na veličinu plotuna ima vrednost stepena zasićenja. Stoga, neposredna istraživanja treba sprovesti u periodima realizacije različitih vrednosti stepena zasićenja.

Dužina jedinstvenog perioda istraživanja, prema predloženoj metodi koja je definisana u daljem tekstu, je ograničena sa aspekta napajanja merne opreme. Dužina kontinualnog

snimanja je ograničena na 120 minuta.

Tokom perioda istraživanja moraju preovladavati uobičajeni meteo uslovi (dnevna svetlost, prosečna temperatura, dobra vidljivost, suv kolovoz i sl.)

#### **4.4 Formiranje prostora istraživanja i metoda istraživanja**

Istraživanje se zasniva na opservaciji karakteristika kretanja plotuna vozila kroz definisane preseke duž prostora istraživanja. Prostor istraživanja predstavlja deonicu koja je definisana početnim i krajnjim presekom na kojoj se vrši snimanje. Početni (nulti) presek predstavlja liniju zaustavljanja na raskrsnici na kojoj dolazi do formiranja plotuna. Pored nultog, karakteristike kretanja plotuna registruju se u još dva preseka. Položaj ovih preseka je jedinstveno uspostavljen na svim lokacijama istraživanja. Prvi presek na deonici se nalazi na rastojanju od 200m, dok se drugi presek nalazi na rastojanju od 500 m od linije zaustavljanja.

Osnovni period realizacije istraživanja je na nivou ciklusa. Realizacija snimanja na definisanim presecima obavlja se na sledeći način:

##### ***Nulti presek – Početna raskrsnica***

Na nultom preseku se vrši snimanje procesa pražnjenja reda, čime se beleži prolazak svih vozila preko linije zaustavljanja tokom trajanja zelenog signalnog pojma. Paralelno sa snimanjem, primenom odgovarajuće android aplikacije beleži se prolazak poslednjeg vozila iz inicijalnog reda ili poslednjeg vozila koje se tom redu priključilo (ukoliko postoji), nezavisno od trake u kojoj se nalazi.

##### ***Prvi i drugi presek***

Na prvom i drugom preseku na deonici, u kontinuitetu tokom celog jedinstvenog perioda istraživanja, vrši se snimanje prolaska svih vozila preko posmatranog preseka tokom celog perioda istraživanja.

#### **4.5 Merna oprema korišćena u istraživanju**

Izbor tehnike prikupljanja podataka i merni instrumenti, predstavljaju ključne elemente za ostvarivanje definisanih ciljeva i zadataka u eksperimentalnim istraživanjima. (Čelar, 2013) Evidentiranje prolaska plotuna obavljeno je tehnikom snimanja video zapisa. Ovakav način prikupljanja podataka omogućava snimak u kontinuitetu i prikupljanje većeg obima uzorka. Tehnika snimanja video zapisa realizacije saobraćajnog procesa radi njegove kasnije analize omogućava uslovno beskonačne reprodukcije obavljenog snimanja radi kasnijeg evidentiranja podataka i obrade rezultata.

Za snimanje procesa prolaska plotuna korišćeni su fotoaparati (Canon), i dve Gopro kamere (Hero 4). Uz nedostatak dovoljnog broja kamera fotoaparati, sa nižim performansama, se koristio za snimanje prolaska plotuna vozila preko linije zaustavljanja. Razlog ovome je što je prolazak plotuna na raskrsnici jasno definisan dužinom trajanja zelenog signalnog pojma. Ovo je omogućilo da se snimanje prekida nakon završetka zelenog signala, sve do početka narednog ciklusa kada se započinje novo snimanje. Zbog uže širine spektra snimka dobijenog fotoaparatom bilo je neophodno na drugi način zabeležiti prolazak poslednjeg vozila iz inicijalnog reda, jer ga nije bilo moguće uočiti na snimku.

Gopro kamere su korišćene za snimanje na presecima na deonici. Zbog visine rezolucije i



širine spektra snimka bilo je moguće jasno sagledati proces prolaska vozila. Osnovni problem primenjene opreme odnosi se na nedostatak vremenske baze na osnovu koje bi se snimci sa različitih preseka mogli ukrstiti. Jedan od mogućih načina prevazilaženja navedenog problema, a primenjenog u istraživanjima, je korišćenje aplikacije koja ima vremensku bazu paralelno sa snimanjem na svim presecima. Otuda je, primenom aplikacije potrebno registrovati trenutak započinjanja snimanja, kao i prolazak prvog vozila u posmatranom ciklusu. Ovo omogućava da se naknadnim ukrštanjem dobijenih podataka i snimaka formira jedinstvena vremenska baza prolaska svih vozila po presecima u definisanom prostoru istraživanja.



**Slika 4-1** GoPro kamera (Hero 4) korišćena u istraživanju [<https://gopro.com>]

Beleženje prolaska prvog vozila u plotunu, kao i poslednjeg vozila iz inicijalnog reda obavljeno je pomoću Android smart mobilnog telefona na kome je instalirana navedena aplikacije posebno pravljen za potrebe ovih istraživanja, koja je kasnije unapređena za potrebe Katedre za Planiranje i Regulisanje saobraćaja.

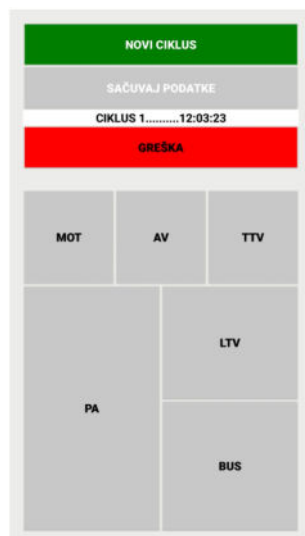
#### **4.6 Formiranje baze podataka**

Nakon obavljenih terenskih istraživanja, očitavanje podataka sa dobijenih snimaka se obavljalo u laboratorijskim uslovima. Očitavanje podataka se vršilo manuelnim putem, pregledanjem snimaka pojedinačno sa svakog preseka, registrovanjem prolaska svakog vozila kroz referentni presek. Ovaj način prikupljanja podataka omogućava minimiziranje greške, jer ostavlja mogućnost da se snimak naknadno pregleda ukoliko za to ima potrebe. Negativna strana ovakvog načina prikupljanja podataka odnosi se na veliki broj radnih sati potrebnih za obradu podataka, jer se snimak sa svakog pojedinačnog preseka mora pregledati onoliko puta koliko ima saobraćajnih traka.

Predmet posmatranja su sva vozila koja ulaze u prostor istraživanja prelaskom linije zaustavljanja na nultom preseku tokom trajanja zelenog signalnog pojma.

Prolazak vozila se posmatrao separatno po saobraćajnim trakama, tako što se primenom aplikacije registruje prolazak zadnje osovine vozila preko definisanog preseka u posmatranoj saobraćajnoj traci, pritiskom polja na ekranu telefona koje odgovara kategoriji tog vozila (Slika 4-2).





Slika 4-2 Izgled radnog okruženja u android aplikaciji

Osnovni set prikupljenih podataka prebacuju se u standardne programe namenjene za rad sa podacima (Microsoft Excel). Očitavanjem dobijaju su podaci o rednom broju ciklusa, rednom broju registrovanog vozila u tom ciklusu, kategoriji registrovanog vozila, datumu snimanja i vremenu početka ciklusa, intervalu sleđenja i kumulanti (Slika 4-3).

id	Kategorija	Red_Br_Voz	Datum	Vreme	Interval	Kumulanta
13	CIKLUS 2	0	26/09/2017	13:16:40	0	0
14	PA	1			1.86	1.86
15	PA	2			1.95	3.81
16	PA	3			1.34	5.15
17	PA	4			1.45	6.6
18	PA	5			3.42	10.02
19	PA	6			13.19	23.21

Slika 4-3 Primer očitanih neobrađenih podataka dobijenih aplikacijom

Postupkom dodatne obrade, na nivou preseka, vršilo se uvezivanje dobijenih podataka po trakama, posmatrano na nivou ciklusa. Povezivanje se vršilo u zavisnosti od trenutka prolaska prvog vozila, na osnovu čega su se mogli izvoditi naredni podaci:

- tačno vreme započinjanja pražnjenja reda, odnosno prolazak prvog vozila kroz posmatrani presek;
- interval sleđenja između vozila na preseku po traci u zavisnosti od prolaska prvog vozila (nezavisno u kojoj se traci nalazi);
- ukupan broj vozila koja su prošla liniju zaustavljanja, odnosno posmatrane preseke;
- ukupan broj vozila iz inicijalnog reda, odnosno reda (samo sa raskrsnice);
- interval sleđenja između vozila po presecima (nezavisno u kojoj traci se nalaze dva uzastopna vozila);
- kumulanta intervala sleđenja;
- ukupno vreme prolaska svih vozila kroz presek u okviru ciklusa;
- parametri rada svetlosnih signala (dužina trajanja ciklusa i zelenog svetlosnog signala).

Na osnovu definisanih ciljeva istraživanja bilo je neophodno obaviti specifična merenja utvrđivanja vremena putovanja svakog pojedinačnog vozila na posmatranoj lokaciji, po presecima. Uz pretpostavku da ne dolazi do preticanja vozila, kao ni do promene saobraćajne trake, u formiranoj bazi podataka nalaze se svi elementi koji omogućavaju da se utvrdi vreme putovanja svakog pojedinačnog vozila. S obzirom da ova pretpostavka najčešće nije ispunjena, jer tokom kretanja na deonici vozila vrše navedene manevre, bilo je neophodno posmatrati kretanje svakog pojedinačnog vozila. Na osnovu pregleda snimaka vršilo se registrovanje promene pozicije pojedinačnog vozila, nakon čega se proračunavalo vreme putovanja. Ovakav proces prikupljanja podataka je izrazito zahtevan (veliki broj radnih sati), te se podatak o vremenu putovanja svakog pojedinačnog vozila utvrđivan na samo tri lokacije.

Procedura utvrđivanje vremena putovanja je podrazumevala paralelno pregledanje snimaka sa početne raskrsnice i prvog, odnosno početne i drugog preseka, pri čemu se registrovala promena pozicije svakog vozila. Promena pozicije se odnosila na promenu saobraćajne trake, kao i na promenu rednog broja vozila u posmatranoj traci. Evidentiranje promene pozicije prethodilo je šifriranje svakog vozila na početnoj raskrsnici. Šifriranje je vršeno u zavisnosti od pozicije posmatranog vozila, npr. šifra 1a se odnosila na vozilo u krajnoj desnoj traci (slovna oznaka a), a cifra 1 je ukazivala da se ono nalazi na prvoj poziciji u posmatranoj traci. Utvrđivanjem pozicije svakog pojedinačnog vozila na narednim presecima zabeleženo je unošenje odgovarajuće šifre vozila u postojeću bazu. Dalje je primenom funkcija u Excelu utvrđeno vreme putovanja svakog pojedinačnog vozila, kao i naredni podaci:

- srednja prostorna brzina;
- standardno odstupanje vremena putovanja na nivou ciklusa;
- preraspodela vozila po saobraćajnim trakama;

Obrada podataka na predstavljen način omogućava da se pri formiranju uzorka selektuju ciklusi koji su zadovoljili metodološki definisane uslove realizacije istraživanja. Takođe, u slučaju greške i nedoumice u procesu obrade podataka, uvek postoji mogućnost vraćanja video snimka do kritičnog trenutka.

### **4.7 Organizacija istraživanja**

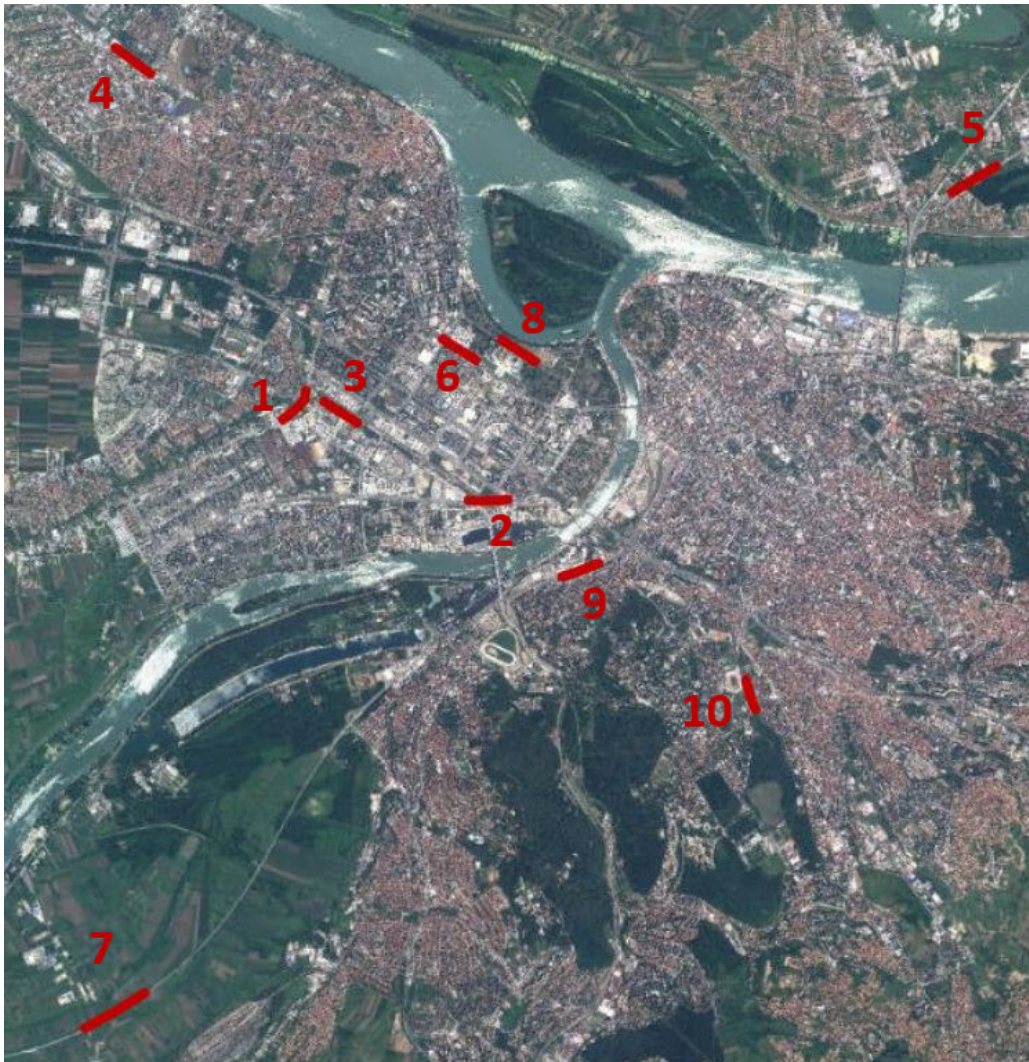
Za istraživanje predloženo je osam lokacija koje su zadovoljile osnovne kriterijume, a to su:

1. R1 Tošin Bunar, od ulice Nikole Dobrojevića, u smeru ka Bežaniji;
2. R2 Jurija Gagarina, od Bulevara Milutina Milankovića, u smeru ka Novobeogradskim blokovima;
3. R3 Bulevar Heroja sa Košara (UMP), od ulice Omladinskih brigada, u smeru ka Bežanijskoj kosi;
4. R4 Autoput za Novi Sad, od skretanja za Galeniku, u smeru ka Novom Sadu;
5. R5 Pančevački put, od Poljoprivredne škole, u smeru ka Pančevu;
6. R6 Bulevar Mihaila Pupina, od raskrsnice sa Bulevarom umetnosti, u smeru ka centru grada;
7. R7 Obrenovački put, od skretanja ka Železniku, u smeru ka Beogradu;
8. R8 Bulevar Nikole Tesle, od prvog pešačkog prelaza kod zgrade SIV-a, u smeru ka

centru grada;

9. R9 Bulevar Vojvode Mišića, od Ruske ulice, u smeru ka centru grada;

10. R10 Bulevar Oslobođenja, od ulice Veljka Lukića Kurjaka, u smeru ka kružnom toku Autokomanda.



Slika 4-4 položaj lokacija istraživanja

Terenska istraživanja se sprovede u dve faze i to (Čelar, 2013):

- Test ili pilot istraživanja;
- Glavna, osnovna istraživanja;

Pilot istraživanja se sprovede iz narednih razloga (Čelar, 2013):

- Provera praktične primenljivosti predložene metodologije eksperimentalnih istraživanja;
- Provera ispunjenosti metodoloških uslova za realizaciju istraživanja na konkretnim lokacijama;

Nakon realizacije pilot istraživanja poslednje dve lokacije, iako ispunjavaju osnovne kriterijume, eliminisane su iz daljih istraživanja usled neispunjavanja metodološki definisanih uslova i ograničenja.

Na lokaciji Bulevar Vojvode Mišića, ne postoje uslovi neometanog pražnjenja reda usled pojave zagušenja tokom perioda istraživanja, što utiče na kretanje plotuna vozila. Na lokaciji Bulevara Oslobođenja, ne dolazi do formiranja reda vozila tokom trajanja crvenog signalnog pojma, čak ni u vršnom času.

Nakon obavljenih glavnih istraživanja na izabranim lokacijama i formiranjem baze podataka dobijeni podaci se mogu grupisati i to na:

- podatke vezane za posmatranje procesa kretanja plotuna vozila, na svim lokacijama;
- podatke o vremenu putovanja svakog pojedinačnog vozila u posmatranom plotunu na tri lokacije (autoput za Novi Sad, Bulevar Mihaila Pupina, Bulevar Nikola Tesla)

### **4.8 Uzorak istraživanja**

Na karakteristike kretanja plotuna istovremeno utiče veći broj slučajno promenljivih. Uticaj slučajno promenljivih na kretanje plotuna, rezultira nizom različitih ishoda između kojih ne postoji značajna statistička razlika. Uzimajući u obzir ograničavajuće faktore odabranog načina istraživanja potrebno je, u jedinstvenom periodu realizacije istraživanja, obezbediti maksimalno moguću veličinu uzorka. Pri čemu veličina uzorka, sa aspekta definisane metodologije ima za cilj da obuhvati različite veličine plotuna.

Na osam lokacija snimljeno je 403 ciklusa. Posmatrano po presecima snimljeno je ukupno 1.209 plotuna, odnosno 25.881 intervala sleđenja.

Na tri lokacije se dodatno utvrđivalo vreme putovanja vozila iz plotuna. Uzorkom je obuhvaćeno 113 ciklusa, sa vremenima putovanja vozila iz plotuna između metodološki definisanih preseka.

Kroz pregled literature utvrđeno je da kroz većinu obavljenih istraživanja nije definisana veličina uzorka kako bi se izvršila adekvatna statistička analiza. Posebno u pojedinim istraživanjima (Treiterer, Nemeth and Vesellio, 1973a), (Praveen and Ashalatha, 2016) do zaključka se dolazi na osnovu veoma malog broja posmatranih plotuna.

U tabelama (Tabela 4-1; Tabela 4-2) predstavljeni su osnovni podaci vezani za realizaciju glavnih istraživanja.

**Tabela 4-1 Osnovni podaci o istraživanjima procesa kretanja plotuna, posmatrano po lokacijama**

Broj jedinstvenog perioda istraživanja	Ukupan broj ciklusa tokom jedinstvenog perioda istraživanja	Ukupan broj registrovanih intervala sleđenja vozila u plotunu po preseku
Autoput za Novi Sad	67	1131
Pančevački put	60	1065
Obrenovački put	27	572
Bulevar Mihaila Pupina	39	479
Bulevar Nikole Tesle	45	1220
Jurija Gagarina	101	2756
Bulevar Heroja sa Košara	14	159
Tošin Bunar	50	1245
UKUPNO (po preseku)	403	8627

**Tabela 4-2 Osnovni podaci o istraživanju vremenu putovanja vozila iz plotuna, posmatrano po lokacijama**

Broj jedinstvenog perioda istraživanja	Ukupan broj ciklusa tokom jedinstvenog perioda istraživanja	Ukupan broj izmerenog vremena putovanja vozila u plotunu
Autoput za Novi Sad	29	506
Bulevar Mihaila Pupina	39	479
Bulevar Nikole Tesle	45	1220
UKUPNO	113	2205



## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju su prikazani i analizirani rezultati istraživanja. Redosled prikaza rezultata uslovljen je definisanim predmetom istraživanja. Otuda se izdvajaju dve jasne celine obrade i analize rezultata istraživanja.

Prvi deo se odnosi na analizu intervala sleđenja svih vozila na početnoj raskrsnici. Na osnovu rezultata ove analize formiran je model utvrđivanja plotuna vozila, što predstavlja osnovni uslov za dalju analizu karakteristika kretanja plotuna.

U drugom delu poglavlja izvršen je prikaz i analiza rezultata istraživanja karakteristika kretanja plotuna. Posebna pažnja je posvećena ispitivanju uticaja veličine plotuna na karakteristike njegovog kretanja. U okviru analize karakteristika kretanja, analizirana su i vremena putovanja vozila u plotunu, uticaj standardnog odstupanja vremena putovanja na kretanje plotuna, kao i uticaj ponašanja prvog vozila u plotunu na kretanje ostatka plotuna.

### 5.1 Analiza intervala sleđenja vozila na početnoj raskrsnici

Pregledom literature zaključeno je da određivanje graničnih vrednosti parametara predstavlja preduslov za definisanje plotuna vozila. Iz navedenog razloga u ovom delu poglavlja izvršeno je ispitivanje intervala sleđenja između vozila na početnoj raskrsnici gde dolazi do formiranja plotuna. Analiza intervala sleđenja je u prvom koraku je izvršena na nivou svih registrovanih intervala, nezavisno od lokacije.

#### 5.1.1 Analiza intervala sleđenja na nivou celokupnog uzorka

Ukupan uzorak intervala sleđenja čine svi realizovani intervali sleđenja na nultom preseku, na svim lokacijama (R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7 i R8). Rezultati analize predstavljeni su u narednim tabelama.

**Tabela 5-1 Analiza realizovanih intervala sleđenja na nultom preseku**

<b>Analizirani parametri</b>	<b>Statistika</b>
Srednja vrednost [s]	3.24
Mediana [s]	2.21
Standardno odstupanje	3.25
Opseg [s]	43.88
Minimum [s]	0.54
Maksimum [s]	44.42
Obim uzorka	8335

Tabela 5-2 Empirijska raspodela realizovanih intervala sleđenja na nultom preseku

Klase [s]	Relativna frekvencije	Kumulativne frekvencije	Funkcija raspodele - cumulative distribution function (CDF)
<1	136	136	0.016
1-2	3307	3443	0.413
2-3	2444	5887	0.706
3-4	926	6813	0.817
4-5	425	7238	0.868
5-6	283	7521	0.902
6-7	159	7680	0.921
7-8	129	7809	0.937
8-9	78	7887	0.946
9-10	90	7977	0.957
10-11	64	8041	0.965
11-12	49	8090	0.971
12-13	33	8123	0.975
13-14	39	8162	0.979
14-15	35	8197	0.983
15-16	19	8216	0.986
16-17	21	8237	0.988
17-18	16	8253	0.990
18-19	13	8266	0.992
19-20	14	8280	0.993
>20	55	8335	1.000

Na osnovu predstavljenih podataka (Tabela 5-1) može se uočiti da je realizovan prosečan interval sleđenja veći od 3s, dok je verovatnoća realizacije intervala sleđenja manji od navedenog 0.71 (Tabela 5-2), odnosno verovatnoća realizacije intervala sleđenja manjih od prosečne utvrđene vrednosti (3.24 s) iznosi 0.74. Pretpostavka je da su razlog utvrđenog većeg prosečnog intervala sleđenja, vozila koja su raskrscopicu prošla nakon rasformiranja reda. Iako njihovo učešće (Tabela 5-3) čini petinu ukupnih realizovanih zahteva, njihov uticaj na prosečan interval sleđenja je značajan, s obzirom da su moguće realizacije većih vrednosti intervala sleđenja. S obzirom da učešće ovih vozila u ukupnom zahtevu varira u zavisnosti od lokacije, u opsegu od 0% do 45% (Tabela 5-3), izvršena je detaljnija analiza podataka separatno po lokacijama istraživanja.

Tabela 5-3 Procentualno učešće vozila koja su prošla raskrsnicu nakon rasformiranja reda u ukupno realizovanim zahtevima posmatrano po lokacijama i nad ukupnim uzorkom

Lokacija	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	Ukupan uzorak
Učešće (%)	0	26	45	32	23	31	23	10	21

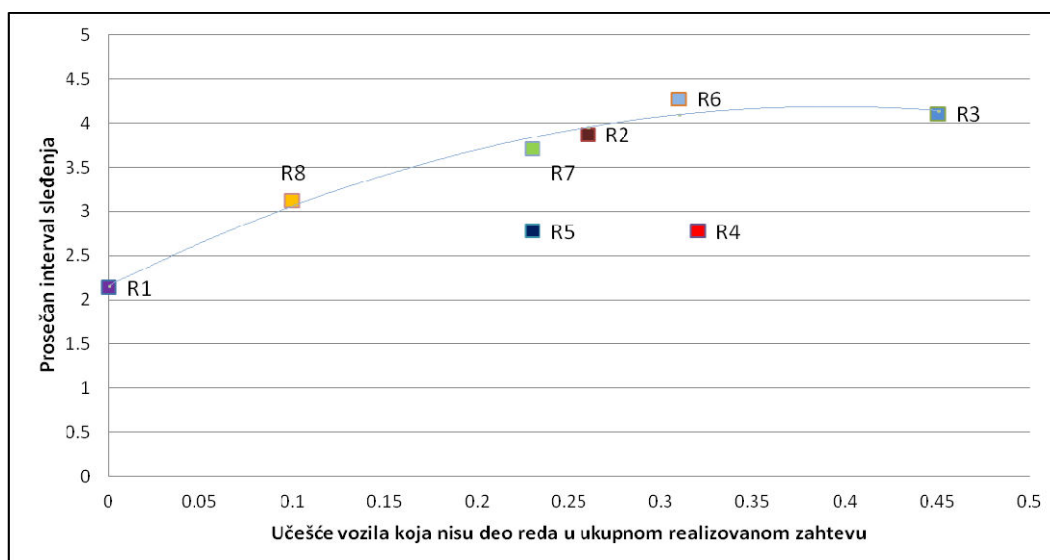
### 5.1.2 Analiza intervala sleđenja po lokacijama

Na osnovu analize realizovanih intervala sleđenja po lokacijama (Tabela 5-4) mogu se uočiti različite prosečne vrednosti intervala koje se kreću u opsegu od 2.14 s do 4.28 s.

Tabela 5-4 Analiza realizovanih intervala sleđenja po lokacijama

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
<b>Analizirani parametri</b>	<b>Statistika po lokacijama</b>							
Srednja vrednost [s]	2.14	3.87	4.11	2.78	2.78	4.28	3.71	3.13
Mediana [s]	1.91	2.54	2.55	2.07	2.10	2.67	2.43	2.09
Standardno odstupanje	0.94	3.90	3.70	2.34	2.12	4.39	3.70	3.56
Opseg [s]	8.2	43.78	19.69	23.01	21.52	31.65	28.18	36.16
Minimum [s]	0.55	0.64	1.10	0.73	0.54	1.08	0.71	0.64
Maksimum [s]	8.75	44.42	20.79	23.74	22.06	32.73	28.89	36.80
Obim uzorka	1141	2452	218	1203	1149	540	398	1234

Najmanja prosečna vrednost intervala sleđenja zabeležena je na lokaciji R1, na kojoj je tokom celog perioda istraživanja bilo prisutno stanje zasićenja. Sva evidentirana vozila, na pomenutoj lokaciji su bila deo reda, zbog čega ne dolazi do realizacije većih intervala sleđenja.

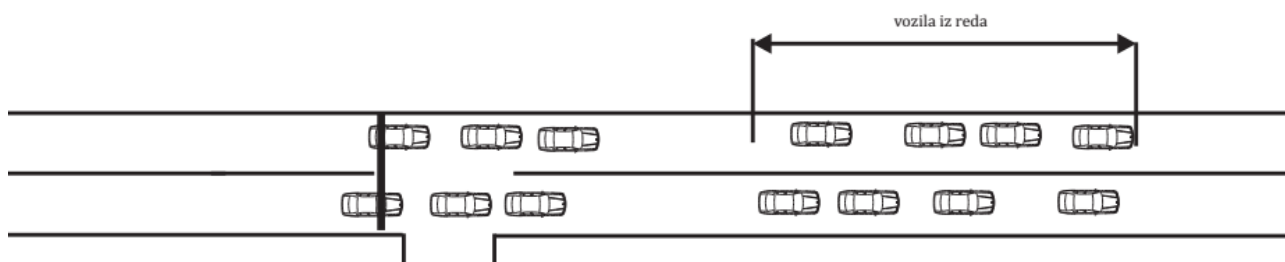


Slika 5-1 Zavisnost između učešća vozila koja nisu deo reda i prosečnog realizovanog intervala sleđenja

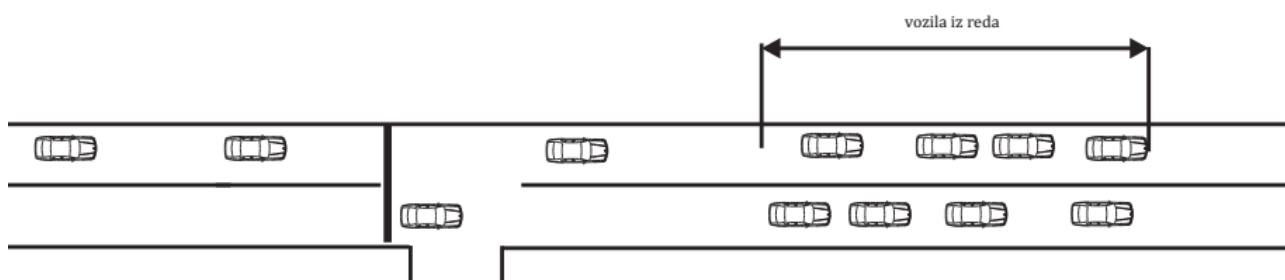
Polazeći od pretpostavke da prosečan interval sleđenja zavisi od procenta vozila koja nisu deo reda, formiran je dijagram (Slika 5-1) na kom se uočava zavisnost između pomenutih parametara. Sa dijagrama se može uočiti da rezultati sa lokacija R4 i R5 odstupaju od dobijenog trenda. Ukoliko se ove dve lokacije izuzmu, dobija se trend zavisnosti između



posmatranih parametra, sa visokim koeficijentom determinacije ( $R^2=0.9797$ ). Poređenjem rezultata dobijenih na lokacijama R4 i R6, kao i R5 i R7 uočava se da je učešće vozila koja su prošla raskrsnicu nakon pražnjenja reda približno isti, dok su dobijene veće razlike u prosečnim intervalima sleđenja. Ovo dovodi do zaključka da vozila koja su prošla raskrsnicu nakon pražnjenja reda mogu uticati na povećanje prosečnog intervala sleđenja, a jačina njihovog uticaja zavisice od načina dolaska jednog vozila koji može biti uslovljen radom svetlosnih signala na prethodnoj raskrsnici ili slučajan događaj (Slika 5-2, Slika 5-3).



**Slika 5-2 Tip dolaska vozila koja nisu deo reda uslovljen radom signala na prethodnoj bliskoj raskrsnici**

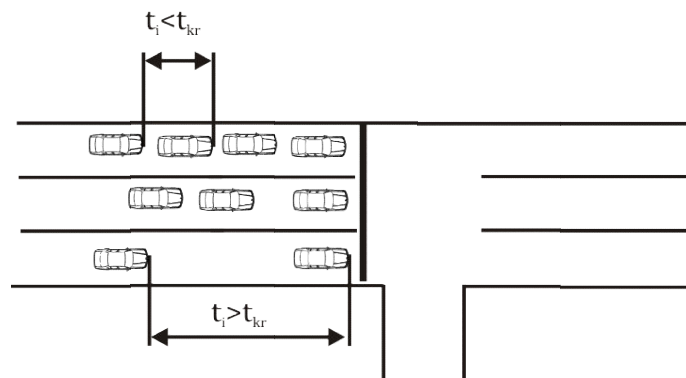


**Slika 5-3 Slučajan tip dolaska vozila koja nisu deo reda**

U prvom slučaju, realizacija većeg intervala sleđenja ostvaruje se samo između poslednjeg vozila iz reda i prvog vozila koji prolazi liniju zaustavljanja nakon pražnjenja reda, pri čemu su ostali realizovani intervali sleđenja vozila ove grupe manji od kritičnog. U drugom slučaju, kada je tip dolaska jednog vozila koje nije deo reda slučajan događaj, česta je realizacija većih intervala sleđenja i između vozila ove grupe, što je slučaj na lokacijama R2, R3, R6, R7, R8.

Takođe, razlog registrovanih većih prosečnih intervala sleđenja može biti neravnomerna raspodela vozila po saobraćajnim trakama. U slučajevima neravnomerne raspodele po saobraćajnim trakama dolazi do realizacije većih intervala sleđenja između vozila u saobraćajnoj traci koja se slabije koristi.

Kod neravnomerne raspodele saobraćaja po trakama, dolazi do dodatnog problema prilikom definisanja plotuna vozila preko kritičnog intervala sleđenja. Analiziranje realizovanih intervala sleđenja po saobraćajnim trakama može dovesti do oprečnih zaključaka. Naime, u saobraćajnoj traci koja se ređe koristi registruju se veći intervali sleđenja, na osnovu čega se zaključuje da ne dolazi do formiranja plotuna, dok je paralelno u susednim trakama prisutna realizacija intervala sleđenja manja od kritične, na osnovu čega se zaključuje da dolazi do formiranja plotuna (Slika 5-4). Vozila sa intervalom sleđenja većim od kritičnog se takođe mogu smatrati delom plotuna, s obzirom da svoj zahtev realizuju istovremeno sa vozilima iz formiranog plotuna. Na osnovu iznetog može se zaključiti da je dovoljna realizacija intervala sleđenja manja od kritičnog u samo jednoj saobraćajnoj traci kako bi se registrovao plotun.



Slika 5-4 Neravnomerna raspodela korišćenja saobraćajnih traka

Međutim, zbog komplikovane procedure uočavanja paralelnih događaja po saobraćajnim trakama u disertaciji se vrši svođenje realizovanih intervala sleđenja na nivo preseka. Posmatranje intervala sleđenja između dva uzastopna vozila vrši se nezavisno u kojoj se traci nalaze. Na ovaj način se izbegava pogrešna interpretacija pojave većih intervala sleđenja u traci koja se ređe koristi.

Posmatran na ovaj način, interval sleđenja bi trebalo da bude osetljiv na broj saobraćajnih traka. Na svim lokacijama prisutne su dve saobraćajne trake, osim na dve na kojima su postoje tri trake (R2 i R3). Međutim, iz krajnje desne trake na lokacijama R2 i R3 realizovano je samo 20% zahteva. Shodno navedenom, uticaj broja saobraćajnih traka je zanemaren u okviru dalje analize.

Na osnovu do sada predstavljenih rezultata analiza i uočenih nedostataka posmatranja intervala sleđenja po saobraćajnim trakama, u okviru disertacije se u svim daljim analizama interval sleđenja posmatra na nivou preseka.

### 5.1.3 Analiza intervala sleđenja vozila iz reda

U ovom delu izvršena je analiza intervala sleđenja između vozila koja čine inicijalni red ili su mu se priključila tokom praznjenja. U tabeli (Tabela 5-5) prikazani su rezultati dobijeni po lokacijama istraživanja.

Tabela 5-5 Analiza realizovanih intervala sleđenja na nultom preseku vozila iz reda po lokacijama

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
<b>Analizirani parametri</b>	<b>Statistika po lokacijama</b>							
Srednja vrednost [s]	1.12	1.35	0.65	0.84	1.11	1.27	1.40	1.11
Mediana [s]	1.07	1.06	0.69	0.82	1.06	1.25	1.38	1.04
Standardno odstupanje [s]	0.75	1.33	0.40	0.57	0.77	0.81	0.79	0.70
Opseg [s]	5.95	7.91	1.31	1.88	4.35	5.72	3.65	4.76
Minimum [s]	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Maksimum [s]	5.95	7.91	1.31	1.88	4.35	5.73	3.66	4.77
Učešće u uzorku (%)	100	90	55	68	77	69	77	90

Sve vrednosti dobijenih intervala sleđenja prikazanih u tabeli su značajno niže od prethodno

prikazanih rezultata, kao posledica promene načina posmatranja intervala sleđenja (na nivou preseka). Prosečna vrednost intervala sleđenja na delu uzorka (vozila koja su bila deo reda) kreće se u opsegu od 0.65 do 1.40 s. Verovatnoća realizacije intervala sleđenja manjeg od prosečnog realizovanog, posmatrano po lokacijama, se kreće u opsegu od 0.46 do 0.61. Neophodno je napomenuti da su minimalne vrednosti intervala sleđenja na svim lokacijama dobijene kao posledica realizacije paralelnog kretanja vozila u susednim trakama.

**Tabela 5-6 Funkcija raspodele (cumulative distribution function - CDF) intervala sleđenja vozila u redu po lokacijama**

Klase [s]	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
<1	0.465	0.483	0.786	0.576	0.480	0.404	0.322	0.474
1-2	0.890	0.767	1.000	1.000	0.892	0.843	0.785	0.907
2-3	0.982	0.894	1.000	1.000	0.983	0.975	0.967	0.990
3-4	0.997	0.948	1.000	1.000	0.997	0.995	1.000	0.997
4-5	0.999	0.976	1.000	1.000	1.000	0.998	1.000	1.000
5-6	1.000	0.987	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6-7	1.000	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
7-8	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
8-9	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
9-10	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10-11	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
11-12	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
12-13	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
13-14	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
>14	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Posmatranjem intervala sleđenja samo između uzastopnih vozila koja su deo reda, eliminisane su ekstremno velike vrednosti realizovanih intervala sleđenja, s obzirom da sada maksimalne zabeležene vrednosti intervala sleđenja vozila iz reda nisu u zavisnosti od dužine trajanja zelenog signalnog pojma. Pomenute vrednosti mogu zavisi od reakcije vozača odnosno tehničko-eksploatacionih karakteristika vozila. Posmatrano po lokacijama 95% zahteva se realizuje sa intervalom sleđenja od 2 do 4 sekunde (Tabela 5-6).

#### 5.1.4 Analiza intervala sleđenja vozila koja nisu deo reda

Analizom intervala sleđenja (između vozila koja su svoj zahtev realizovala nakon pražnjenja reda) dobijeni su naredni rezultati (Tabela 5-7). Iz ove analize je isključena lokacija R1, s obzirom da je na pomenutoj lokaciji tokom perioda istraživanja vladalo stanje zasićenja, odnosno sva vozila su predstavljala deo reda.

## REZULTATI ISTRAŽIVANJA

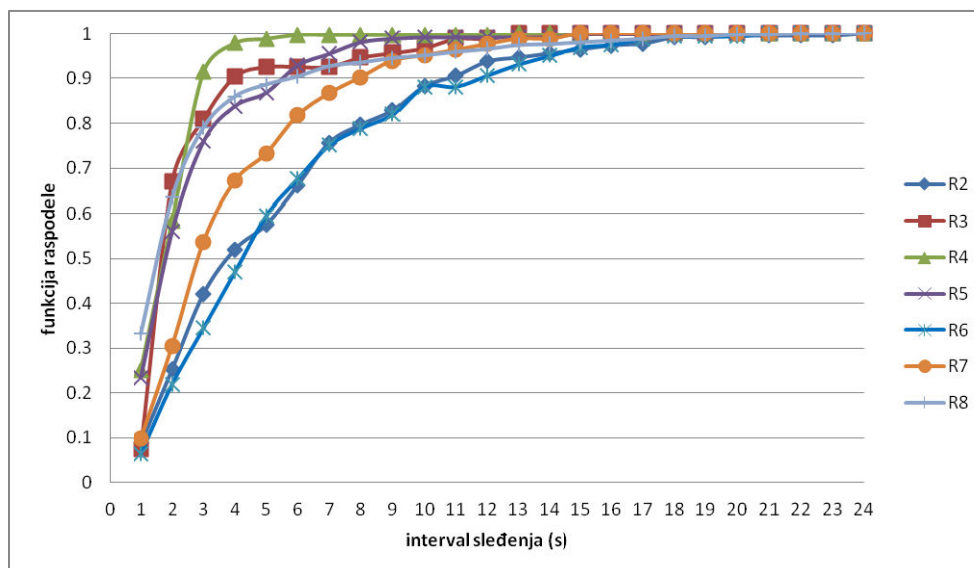
**Tabela 5-7 Analiza realizovanih intervala sleđenja vozila koja nisu deo reda po lokacijama**

	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
<b>Analizirani parametri</b>	<b>Statistika po lokacijama</b>						
Srednja vrednost [s]	5.05	2.45	1.80	2.43	5.26	3.80	2.50
Mediana [s]	3.71	1.78	1.92	1.87	4.14	2.81	1.45
Standardno odstupanje [s]	4.22	2.18	1.15	2.13	4.07	2.89	3.26
Opseg [s]	25.03	12.27	12.72	14.57	20.25	14.00	21.05
Minimum [s]	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.09	0.01
Maksimum [s]	25.03	12.27	12.72	14.58	20.30	14.09	21.06
Učešće u uzorku (%)	26	45	32	23	31	23	10

**Tabela 5-8 Funkcija raspodele (cumulative distribution function - CDF) intervala sleđenja između vozila koja nisu deo reda, po lokacijama istraživanja**

Klase [s]	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
<1	0.086	0.074	0.250	0.233	0.063	0.098	0.332
1-2	0.253	0.670	0.583	0.560	0.219	0.305	0.635
2-3	0.421	0.809	0.914	0.759	0.344	0.537	0.790
3-4	0.520	0.904	0.978	0.838	0.469	0.671	0.859
4-5	0.575	0.926	0.988	0.868	0.594	0.732	0.886
5-6	0.661	0.926	0.997	0.929	0.675	0.817	0.904
6-7	0.756	0.926	0.997	0.955	0.750	0.866	0.927
7-8	0.796	0.947	0.997	0.981	0.788	0.902	0.935
8-9	0.828	0.957	0.997	0.989	0.819	0.939	0.945
9-10	0.882	0.968	0.997	0.992	0.881	0.951	0.951
10-11	0.905	0.989	0.997	0.992	0.881	0.963	0.959
11-12	0.937	0.989	0.997	0.992	0.906	0.976	0.965
12-13	0.946	1.000	1.000	0.992	0.931	0.988	0.974
13-14	0.955	1.000	1.000	0.992	0.950	0.988	0.976
14-15	0.964	1.000	1.000	1.000	0.969	1.000	0.980
15-16	0.973	1.000	1.000	1.000	0.975	1.000	0.984
16-17	0.977	1.000	1.000	1.000	0.988	1.000	0.988
17-18	0.991	1.000	1.000	1.000	0.994	1.000	0.994
18-19	0.991	1.000	1.000	1.000	0.994	1.000	0.994
19-20	0.995	1.000	1.000	1.000	0.994	1.000	0.998
20-21	0.995	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998
21-22	0.995	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
22-23	0.995	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
>24	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli (Tabela 5-7) uočava se razlika u prosečnim vrednostima intervala sleđenja između lokacija. Poređenjem srednjih vrednosti intervala sleđenja sa lokacija sa najnižim vrednostima R4 i R5 i lokacijama R6 i R7, potvrđuju se dobijeni rezultati prethodnih analiza, na osnovu kojih je zaključeno da prosečna vrednost intervala sleđenja vozila van reda ne zavisi od njihovog učešća u ukupnom zahtevu, već dominantno od načina dolaska jednog vozila iz ove grupacije na raskrsnicu. (Slika 5-2).



**Slika 5-5 Funkcija raspodele (cumulative distribution function - CDF) intervala sleđenja vozila van reda**

Tumačenjem prikazanih rezultata (Slika 5-5, Tabela 5-7, Tabela 5-8) uočava se da značajan procenat vozila van reda (od 34% do 91% u zavisnosti od lokacije) realizuje interval sleđenja manji od 3s. Međutim ne može se apriori tvrditi da će sva ova vozila predstavljati deo plotuna, s obzirom da je za to neophodna realizacija kritičnog interval sleđenja u kontinuitetu.

Sa druge strane realizacija većih intervala sleđenja vozila iz ove grupacije, ne vodi direktno do zaključka da ona ne pripadaju plotunu, s obzirom na činjenicu da će i pored realizacije većeg intervala sleđenja u pojedinim slučajevima ova vozila priključiti plotunu, zbog čega je njihov uticaj na kretanje plotuna nemoguće izolovati. Pod priključivanjem plotunu se podrazumeva realizacija neke od sledećih situacija na prvom preseku:

- Vozilo je sustiglo plotun;
- Vozilo je prestiglo makar jedno vozilo iz plotuna.

Smatra se da je vozilo sustiglo plotun kada je njegovo kretanje uslovljeno kretanjem vozila iz plotuna. Po HCM-u kretanje vozila je uslovljeno kretanjem prethodnog vozila (vozilo iz iste saobraćajne trake) ukoliko je realizovana vrednost interval sleđenja manja ili jednaka 3 s (HCM, 2010).

Sa druge strane, nezavisno od realizovanog intervala sleđenja, smatra se da se vozilo priključilo plotunu ukoliko je prestiglo makar jedno vozilo iz plotuna. Verovatnoća priključivanja plotunu zavisice od intervala sleđenja i pozicije posmatranog vozila u odnosu na poslednje vozilo iz plotuna posmatrano na nultom preseku. Navedeno predstavlja dodatnu hipotezu koju je neophodno dokazati.

Realizacija priključivanja vozila plotunu analizirana je na tri lokacije R4, R6 i R8, s obzirom da je samo na ovim lokacijama rađeno specifično merenje.

U postupku analize, za svako pojedinačno vozilo koje nije deo reda, a nakon prve realizacije većeg intervala sleđenja od kritičnog, evidentirani su naredni parametri:

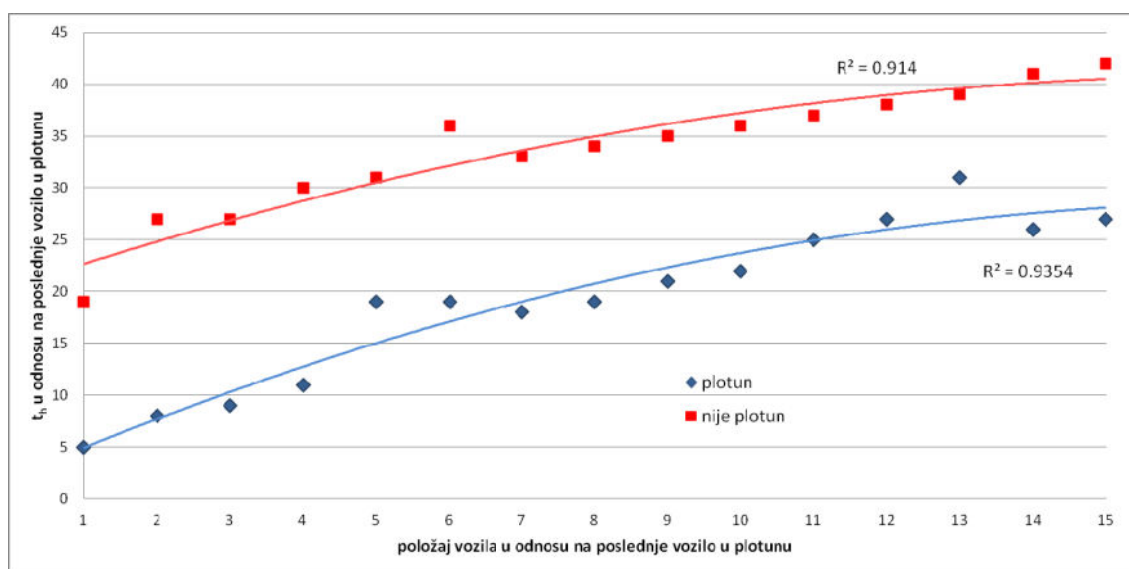
- Pozicija posmatranog vozila u odnosu na poslednje vozilo iz plotuna;
- Interval sleđenja posmatranog vozila u odnosu na poslednje vozilo iz plotuna.

Pod poslednjim vozilom iz plotuna smatra se poslednje vozilo sa kontinualnom realizacijom manjeg intervala sleđenja u odnosu na kritičan. Poslednje vozilo iz plotuna može biti i vozilo van reda.

Na osnovu definisanih kriterijuma priključivanja plotunu, svako posmatrano vozilo grupisano je u zavisnosti od realizacije događaja, na sledeći način:

- I grupa – čini je uređeni set parova (interval sleđenja, pozicija) za vozila koja se priključuju plotunu;
- II grupa - čini je uređeni set parova (interval sleđenja, pozicija) za vozila koja se ne priključuju plotunu.

Na osnovu svih dobijenih podataka, a za obe grupe vozila utvrđene su granične vrednosti intervala sleđenja za svaku poziciju, koje su predstavljene narednim grafikom (Slika 5-6).



**Slika 5-6 Zavisnost intervala sleđenja i pozicije vozila od realizacije priključivanja plotunu**

Posmatrajući sve intervale sleđenja za posmatranu poziciju vozila, koji su manji od granične vrednosti prve grupe, verovatnoća realizacije istog događaja (vozilo se priključilo plotunu) jednaka je jedinici. I obrnuto, za sve intervale sleđenja za posmatranu poziciju vozila, koji su veći od granične vrednosti druge grupe, verovatnoća realizacije istog događaja (vozilo se nije priključilo plotunu) jednaka je jedinici (Slika 5-6).

Pozicije vozila i granične vrednosti intervala sleđenja posmatrane po ishodima daju jake veze koje su opisane krivim (Slika 5-6). Vrednosti koeficijenata determinacije se kreću od 0.91 do 0.94. Na osnovu formiranih krivih se može zaključiti da se sva vozila koja realizuju kombinaciju parametara koji se nalaze iznad gornje krive mogu tretirati kao da nisu deo plotuna, odnosno za sve kombinacije parametara koje se nalaze ispod donje krive, smatra se da su vozila deo plotuna. Za preostale kombinacije parametara koje se nalaze između dve krive moguće su realizacije oba ishoda.

Za donošenje konačne odluke da li vozilo pripada plotunu neophodno je primeniti neku od metoda klasifikacije podataka. Metode klasifikacije podataka se primenjuju za uspostavljanje veze između nezavisnih i zavisnih promenljivih u situacijama kada izlazna zavisna promenljiva nije numerička vrednost, odnosno predstavljena je kao kvalitativna promenljiva, što je ovde slučaj. (James *et al.*, 2013)

Jedan od najčešće primenjivanih metoda u klasifikaciji podataka je logistička regresija, dok sa druge strane metoda čija je primena poslednjih godina u ekspanziji je metoda potpornih vektora (SVM - Support Vector Mashine). Obe navedene metode su korišćene u utvrđivanju zavisnosti između pozicije i intervala sleđenja posmatranog vozila u odnosu na realizovan ishod. Pri utvrđivanju navedene zavisnosti oba modela su trenirana, formirana i testirana nad istim skupom podataka u MatLab-u. S obzirom da su dobijene preciznosti primenom oba modela jednake, u daljoj proceduri usvaja se Logistička regresija kao deo modela definisanja plotuna.

## 5.2 Definisane plotuna vozila

### 5.2.1 Primena logističke regresije (LG) u definisanju plotuna

Metod logističke regresije proračunava verovatnoću da će za kombinaciju poznatih ulaznih podataka, doći do realizacije određenog događaja.

Ukoliko je  $X$  nezavisna slučajna promenljiva na osnovu koje treba predvideti  $Y$ , pri čemu  $Y$  može da ima samo dve vrednosti,  $Y = \{0, 1\}$ , u pitanju je binarna logistička regresija.

$$Y = \begin{cases} 1, & P(x) \geq q \\ 0, & P(x) < q \end{cases} \quad (5-1)$$

Pri čemu  $q$  predstavlja definisanu fiksnu vrednost koja je najčešće 0.5, ali može uzeti i drugu vrednost.

Kako bi izvršili predikciju pozitivnog ishoda ( $y=1$ ) primenjuje se logistička funkcija koja ima sledeći oblik (James *et al.*, 2013):

$$P(y = 1|x) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_k \cdot x_k)}} \quad (5-2)$$

Nezavisne promenljive su definisane kao  $x_1, x_2, \dots, x_k$  pri čemu  $k$  predstavlja broj posmatranih promenljivih u modelu.

Verovatnoća ishoda  $y=0$ , dobija se kao:

$$P(y = 0|x) = 1 - P(y = 1|x) \quad (5-3)$$

Daljom manipulacijom formula (5-2) i (5-3) dobija se (James *et al.*, 2013):

$$\frac{P(X)}{1 - P(X)} = e^{(\beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_k \cdot x_k)} \quad (5-4)$$

$$\log\left(\frac{P(X)}{1 - P(X)}\right) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_k \cdot x_k \quad (5-5)$$

Leva strana formule (5-5) naziva se logit i zavisi od linearne veze između koeficijenata  $\beta$  i vrednosti nezavisnih promenljivih. Koeficijenti  $\beta$  su nepoznati, i moraju biti procenjeni na osnovu dostupnog seta podataka koji se koristi za treniranje modela. Ovo ujedno predstavlja prvu fazu u formiranju modela logističke regresije.

Matematička formulacija koja se koristi u proceduri utvrđivanja vrednosti koeficijenata  $\beta$ , naziva se funkcija verodostojnosti i ima oblik (James *et al.*, 2013):

$$l(\beta) = \sum_{i=1}^n [y_i \cdot \log(P(X)) + (1 - y_i) \cdot \log(1 - P(X))] \quad (5-6)$$

Prikazana formula se definiše kao kriterijumska funkcija koja predstavlja sumu verodostojnosti za svaki pojedinačni ulazni set podataka. Maksimiziranjem kriterijumske funkcije težimo da odredimo vrednosti koeficijenata  $\beta$  tako da na osnovu proračuna verovatnoće (5-2) dobijemo tačan ishod za što veći broj ulaznih podataka. Ovo se najčešće radi Newton-ovim iterativnim postupkom. Definisane vrednosti koeficijenata nam omogućava da formiramo model što ujedno predstavlja drugu fazu u procesu formiranja modela logističke regresije. Formiranim modelom logističke regresije, sa utvrđenim vrednostima koeficijenata  $\beta$ , kao izlazni rezultat dobijamo verovatnoću realizacije pozitivnog ishoda, na osnovu koje se dalje vrši klasifikacija promenljive. Pozitivan ishod podrazumeva da je  $Y=1$ , odnosno vozilo pripada plotunu, dok se za  $Y=0$  smatra da vozilo ne pripada plotunu. Svaki novi podatak se na osnovu formiranog modela klasifikuje u klasu koja je za njega verovatnija.

Poslednja, treća faza podrazumeva testiranje modela koja se vrši nad poznatim skupom zavisno/nezavisnih promenljivih, nad kojima nije vršeno treniranje modela.

### 5.2.2 Formiranje modela logističke regresije u MatLab-u

Kao što je u prethodnom delu tekstu objašnjeno, procedura formiranja modela logističke regresije sastoji se od nekoliko faza:

- treniranje modela
- formiranje modela za utvrđene jedinstvene vrednosti koeficijenata  $\beta$
- testiranje modela

Primenom MatLab-a, treniranje modela se obavlja kroz više iteracija, pri čemu se kroz svaku iteraciju slučajnim odabirom formira skup nad kojim se vrši treniranje modela. Broj iteracija zavisi od veličine uzorka.

Nakon utvrđivanja vrednosti koeficijenata, vrši se testiranje formiranog modela nad preostalim skupom poznatih zavisno/nezavisnih podataka i vrši se ocena preciznosti modela, kao i brzina primene modela koja se ogleda u broju opservacija u jedinici vremena.



U konkretnom slučaju skup podataka koji je služio za formiranje modela, činili su podaci sa tri lokacije sa kojih je bilo moguće utvrditi neophodne parametre za formiranje modela (R4, R6 i R8). Podaci su obuhvatali informacije vezane za poziciju svakog vozila i interval sleđenja u odnosu na poslednje vozilo iz plotuna. Poslednje vozilo iz plotuna predstavlja vozilo do prve realizacije intervala sleđenja veće od definisane kritične vrednosti. Za razliku od rezultata prikazanih na grafiku (Slika 5-6) koji su obuhvatali samo vozila van reda, u Matlab-u su testirane dve varijante. U zavisnosti od varijante posmatrala su se:

- sva vozila od momenta prve realizacije intervala sleđenja veće od primenjene kritične vrednosti;
- samo vozila koja nisu deo reda od momenta prve realizacije intervala sleđenja većeg od kritičnog.

Za svako posmatrano vozilo poznat je ishod događaja (vozilo se priključilo plotunu ili ne). Realizacije mogućih ishoda kodirane su i to vrednostima 1 kada se vozilo priključilo plotunu, odnosno 0 u suprotnom slučaju.

Kako bi skup podataka bio formiran neophodne je odrediti vrednosti kritičnog intervala sleđenja. Model je testiran za tri vrednosti kritičnog intervala (3 s, 2.5 s i 2.1 s). Izbor vrednosti kritičnog intervala sleđenja izvršen je na osnovu pregleda literature detaljnije objašnjeno u Poglavlju 2.1.6.

**Tabela 5-9 Prikaz dobijenih preciznosti modela u zavisnosti od ulaznih podataka**

Preciznost modela		Kritičan interval sleđenja		
		3 s	2.5 s	2.1 s
I varijanta	N	763	1166	1634
(sva vozila)	za sve slučajeve	0.86	0.90	0.93
II varijanta	N	508	557	626
(van reda)	za sve slučajeve	0.82	0.82	0.83

Promenom veličine kritičnog intervala sleđenja menja se preciznost dobijenog modela. U tabeli su prikazani rezultati primenjenog modela u zavisnosti od usvojene veličine kritičnog intervala sleđenja za obe varijante. Potrebno je napomenuti da promenom kritičnog intervala sleđenja posledično dolazi do promene veličine uzorka (N), odnosno pooštavanjem kriterijuma, povećava se uzorak (Tabela 5-9). Preciznost modela zavisi od senzitivnosti i specifičnosti modela. Senzitivnost modela se odnosi na tačnost klasifikacije za  $y=1$ , dok specifičnost se odnosi na tačnost klasifikacije za  $y=0$ .

U daljoj analizi razmatraće se samo prva varijanta, s obzirom da za sve primenjene vrednosti kritičnog intervala sleđenja prve varijante daju bolje rezultate. Dodatni razlog odbacivanja druge varijante je što bi u realnim uslovima bilo gotovo nemoguće jasno utvrditi koja vozila pripadaju redu, a koja su svoj zahtev ispostavila nakon pražnjenja reda.

Konačan model za definisanje plotuna se bira između primenjenih vrednosti kritičnog intervala sleđenja u okviru prve varijante.

Poređenjem dobijenih rezultata prikazanih u tabeli (Tabela 5-9) može se uočiti da smanjenjem kritičnog intervala sleđenja dolazi do povećanja preciznosti modela. Međutim, pre odabira kritičnog intervala sleđenja neophodno je izvršiti dodatnu analizu. Jedna od mera za ocenu preciznosti klasifikacije je c-statistika ili AUC (area under curve) koja predstavlja

površinu ispod ROC (Receiver Operating Characteristic) krive. Vrednosti površine ispod krive se kreću u opsegu od 0.5 do 1. (Peng, Lee and Ingersoll, 2002)

**Tabela 5-10 Kvalitet razdvajanja u zavisnosti od vrednosti AUC**

AUC	
0.5	Nema razdvajanja
0.5-0.7	Loše razdvajanje
0.7-0.8	Prihvatljivo razdvajanje
0.8-0.9	Odlično razdvajanje
>0.9	Izvanredno razdvajanje

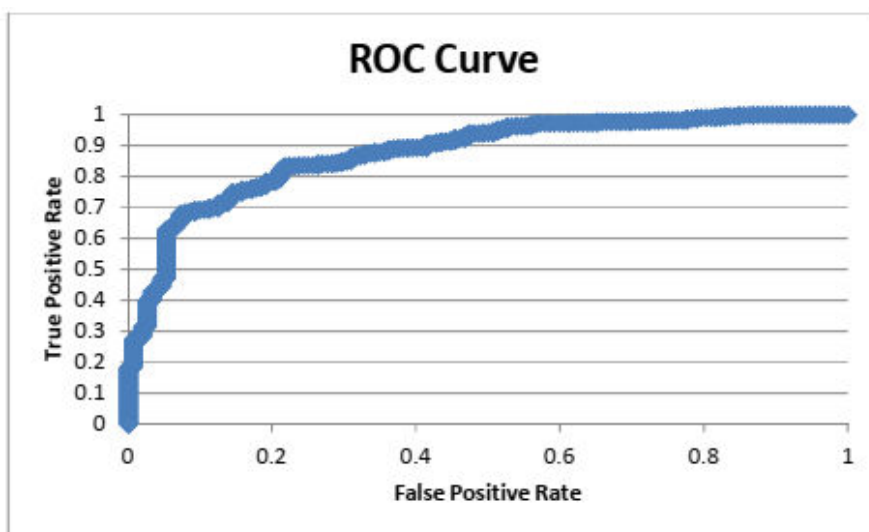
Svaka tačka krive predstavlja uređeni par (senzitivnost, specifičnost) koji odgovara pojedinačnom nivou odlučivanja. Ocena AUC od 0.5 odgovara teorijskoj krivi za test kod koga nema razdvajanja (identična raspodela rezultata dve grupe), a predstavlja liniju koja spaja uređeni par (0,0) i (1,1). Dok ocena AUC od 1 bi predstavljala liniju koja je paralelna sa x-osom, dok y-osu seče u jedinici. U realnim slučajevima ROC krive se nalaze između ovih graničnih vrednosti, a kvalitativno gledano ona koja je bliža gornjem levom uglu ukazuje na test sa većom preciznošću.

Izgledi ROC krivi i površine dobijene ispod krivi za različite vrednosti kritičnog intervala sleđenja prikazane su na narednim slikama i tabeli. (Tabela 5-11, Slika 5-7, Slika 5-8, Slika 5-9)

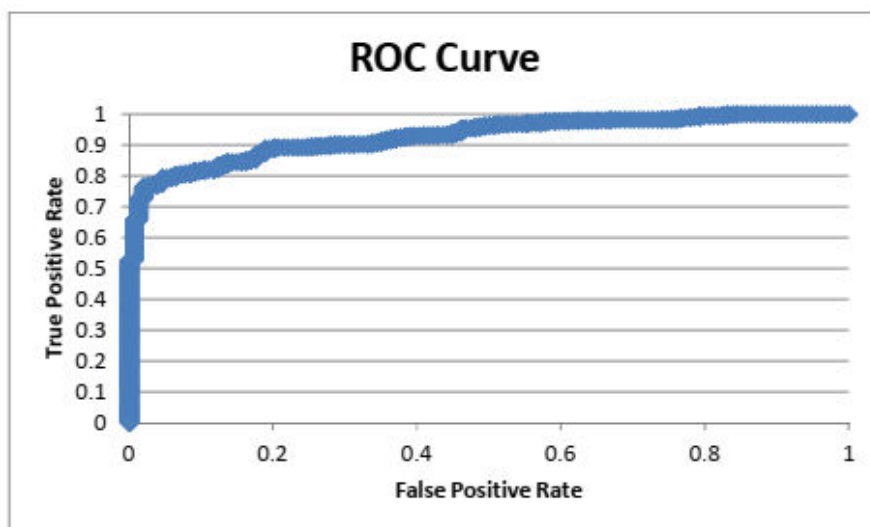
**Tabela 5-11 Vrednosti AUC, površina ispod ROC krive, za različite vrednosti kritičnog  $t_h$**

I varijanta	Preciznost modela	Kritičan interval sleđenja		
		3 s	2.5 s	2.1 s
	AUC	0.88	0.93	0.95

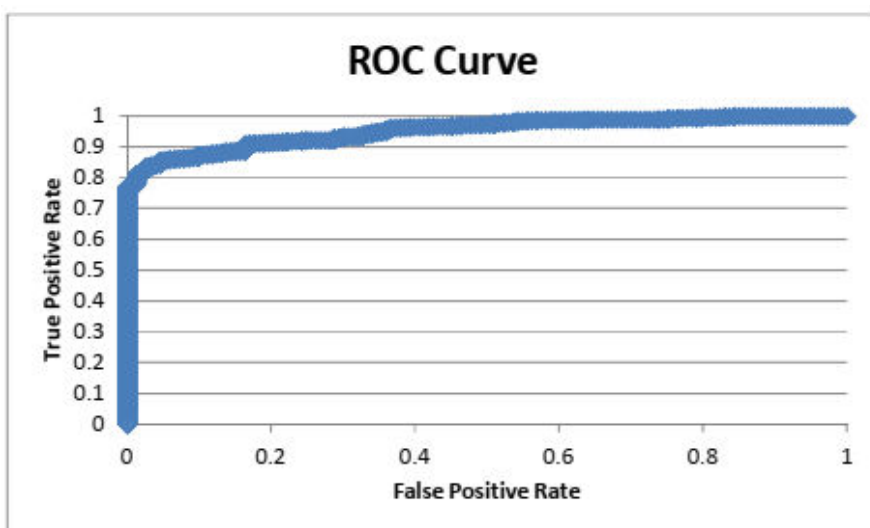
Poređenjem dobijenih ROC krivih za različite vrednosti kritičnog intervala sleđenja i površine dobijene ispod ROC krive za svaki od predloženih modela prikazane su u tabeli. Rezultati pokazuju odlično razdvajanje za vrednost kritičnog intervala sleđenja od 3s, dok za vrednosti kritičnog intervala od 2.5 i 2.1 sekundu se dobija izvanredno razdvajanje.



**Slika 5-7 ROC kriva za kritičan interval sleđenja od 3 s**



Slika 5-8 ROC kriva za kritičan interval sleđenja od 2.5 s



Slika 5-9 ROC kriva za kritičan interval sleđenja od 2.1 s

Na osnovu prikazane analize rezultata primenom logističke regresije za različite vrednosti kritičnog intervala sleđenja, može se doći do zaključka da model sa primenjenim intervalom sleđenja od 2.1 s daje najbolje poklapanje sa podacima, zbog čega se usvaja kao model pri definisanju plotuna, pri čemu je 2.1 s usvojena kao kritična vrednost.

Osnovne karakteristike modela prikazane su u narednoj tabeli (Tabela 5-12).

**Tabela 5-12 Parametri i ocena dobijenog modela**

	$\beta$	Standardna greška	Wald	p-vrednost
Slobodan član $\beta_0$	4.415883	0.264104	279.566	$9.34e^{-63}$
Pozicija $\beta_1$	0.317248	0.026171	146.9461	$8.06e^{-34}$
Interval sleđenja $\beta_2$	-0.25585	0.016004	255.5899	$1.57e^{-57}$

Prva kolona predstavlja dobijene vrednosti koeficijenata  $\beta$  koji figuriraju u proračunu verovatnoće realizacije pozitivnog ishoda. U koloni Wald prikazani su rezultati Waldovog testa koji ocenjuje doprinos i važnost svake nezavisne promenljive. P - vrednosti su u

zavisnosti od vrednosti dobijeni u koloni Wald, pri čemu vrednosti manje od 0,05 ukazuju na značajan uticaj nezavisnih promenljivih na realizaciju događaja. Ovim se potvrđuje početna hipoteza da od pozicije i intervala sleđenja zavisi da li vozilo pripada plotunu.

Usvojenim modelom logističke regresije za definisanje plotuna vozila proračunava se verovatnoća realizacije pozitivnog ishoda događaja. Usvojeni model ima konačan oblik:

$$P(x) = \frac{1}{1 + e^{-(4.415883+0.317248 \cdot x_1 - 0.25585 \cdot x_2)}} \quad (5-7)$$

Gde je:

- $P(x)$  - verovatnoća realizacije pozitivnog ishoda događaja [-]
- $x_1$  - interval sleđenja posmatranog vozila [s]
- $x_2$  - pozicija vozila u odnosu na poslednje vozilo iz plotuna [-]

### 5.2.3 Model utvrđivanja plotuna vozila na početnoj raskrsnici

Definisanje plotuna primenom modela obavlja se kroz faze. Prva faza započinje trenutkom pojave zelenog na početnoj raskrsnici, odnosno prolaskom prvog vozila, a traje sve dok postoji kontinualna realizacija intervala sleđenja vozila manja od kritičnog (2.1 s). Sva vozila registrovana u prvoj fazi predstavljaju deo plotuna. U momentu prve realizacije većeg intervala sleđenja od kritičnog započinje druga faza. Druga faza traje do završetka zelenog, odnosno prolaska poslednjeg vozila u posmatranom ciklusu. Tokom druge faze se za svaki pojedinačni registrovani prolazak vozila beleži njegova pozicija kao i interval sleđenja u odnosu na poslednje registrovano vozilo prve faze. Model logističke regresije se primenjuje na sva vozila druge faze, čime se utvrđuje verovatnoća pripadnosti vozila plotunu. Za sve vrednosti verovatnoće veće i jednake od 0.5, smatra se da je vozilo deo plotuna. Dalja analiza karakteristika kretanja plotuna vršena je samo za vozila, za koja je po predstavljenom modelu utvrđeno da pripadaju plotunu.

## 5.3 Analiza kretanja plotuna vozila

Nakon definisanog modela utvrđivanja plotuna, može se pristupiti analizi procesa njegovog kretanja. Analiza procesa kretanja posmatrana je kroz realizovane intervale sleđenja po presecima. Utvrđivanje promene intervala sleđenja u zavisnosti od lokacije preseka realizovano je u porednom analizom. U tabeli (Tabela 5-13) su prikazani dobijeni rezultati.

**Tabela 5-13 Karakteristike intervala sleđenja između vozila u plotunu u zavisnosti od posmatranog preseka**

Interval sleđenja [s]	Presek		
	0m	200m	500m
Prosečan	1.26	1.26	1.57
Mediana	1.22	1.25	1.47
Standardno odstupanje	0.35	0.25	0.41
Minimalan	0.62	0.89	1.18
Maksimalan	2.62	2.20	2.91

Iz tabele se može uočiti da su za analizirane preseke dobijene bliske vrednosti intervala sleđenja vozila u plotunu. Vrednosti intervala sleđenja se kreću od 1.26 s do 1.57 s. Najmanje odstupanje vrednosti intervala sleđenja od prosečne prisutno je na prvom preseku (200 m), dok na nultom (0 m) i drugom (500 m) preseku dolazi do većih odstupanja od prosečne vrednosti intervala sleđenja.

Pretpostavka je da su na nultom preseku prisutna veća odstupanja intervala sleđenja od prosečnih usled razlika u tehničko-eksploatacionim karakteristikama vozila i vozača s obzirom da započinju kretanje iz stanja mirovanja. Dodatno na veće odstupanje intervala sleđenja na nultom preseku imaju uticaj i vozila koja zahtev ispostavljaju nakon pražnjenja reda uz realizaciju većih intervala sleđenja, što je detaljnije objašnjeno u prethodnom poglavlju (Poglavlje 5.1). Uravnotežene vrednosti intervala sleđenja na 200m posledica su završetka procesa ubrzanja, kao i sustizanja plotuna od strane vozila koja su prošla raskrnicu nakon pražnjenja reda, a oscilacije u intervalu sleđenja na drugom preseku bi se mogle prepisati razlikama u željenim brzinama i mogućnosti njihove realizacije. Povećanje prosečnog intervala sleđenja na 500-tom metru se može tretirati kao posledica rasturanja plotuna, ali je neophodno izvršiti dodatne analize pre donošenja konačnih zaključaka.

Kao osnovni pokazatelj ponašanja plotuna koristi se odnos vremena opsluživanja plotuna kroz posmatrani presek u odnosu na nulti presek. Vreme opsluživanja plotuna predstavlja vremenski interval između prolaska prvog i poslednjeg vozila u plotunu. Za sve vrednosti odnosa koje su veće od 1, smatra se da je došlo do rasturanja plotuna, za sve vrednosti koje su manje od 1 skupljanja plotuna.

U narednoj tabeli prikazan je udeo plotuna u kojima je došlo do skupljanja, u ukupnom uzorku, posmatrano po lokacijama i presecima. (Tabela 5-14)

**Tabela 5-14 Učešće plotuna sa skupljanjem u ukupnom uzorku**

Lokacija	Presek	
	200m [%]	500m [%]
R1	/	16.00
R2	66.66	60.87
R3	/	50.00
R4	68.33	32.78
R5	68.63	46.66
R6	50.00	33.33
R7	70.37	40.90
R8	72.97	62.22

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli uočava se značajan udeo plotuna sa registrovanim skupljanjem. Na prvom preseku, na svim lokacijama došlo je do skupljanja plotuna, u više od 50% slučajeva. Na drugom preseku samo na lokacijama R2, R3 i R8 u više od 50% slučajeva dolazi do skupljanja, dok na preostalim lokacijama u većini slučajeva je registrovano rasturanje plotuna. S obzirom da svi prethodno predstavljeni modeli (Poglavlje 1), isključivo opisuju rasturanje plotuna, jasno je da će u situacijama gde prevladavaju slučajevi skupljanja plotuna doći do velikih odstupanja rezultata modela u odnosu na realne.

Kako bi se detaljnije analizirale karakteristike kretanja plotuna izvršeno je ispitivanje osetljivosti intervala sleđenja vozila u odnosu na poziciju vozila u plotunu. Osnovna

pretpostavka je da će interval sleđenja između vozila zavisiti od pozicije u plotunu.

Na osnovu podataka sa lokacija R1, R4, R5, R6 i R8 utvrđene su prosečne vrednosti intervala sleđenja u zavisnosti od njihove pozicije u plotunu. S obzirom da je veličina plotuna u funkciji saobraćajnog opterećenja i trajanja zelenog vremena prisutne su razlike u broju vozila u plotunu na nivou ciklusa. Potrebno je dokazati da interval sleđenja vozila na n-toj poziciji u plotunu sa n vozila, nema značajnu statističku razliku u odnosu interval sleđenja vozila na n-toj poziciji u redu u plotunu sa više od n vozila. (Athol, 1968)

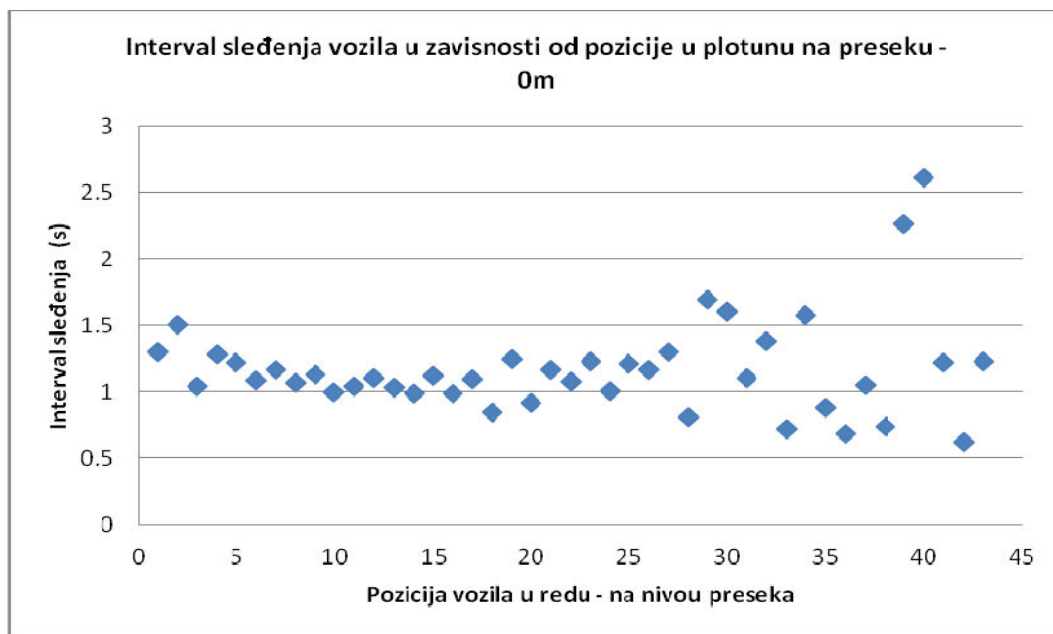
$$\frac{M_1 - M_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}}} \geq 1.96 \quad (5-8)$$

M1, M2 – srednja vrednost intervala sleđenja n-tog vozila u plotunu za posmatrane grupacije plotuna

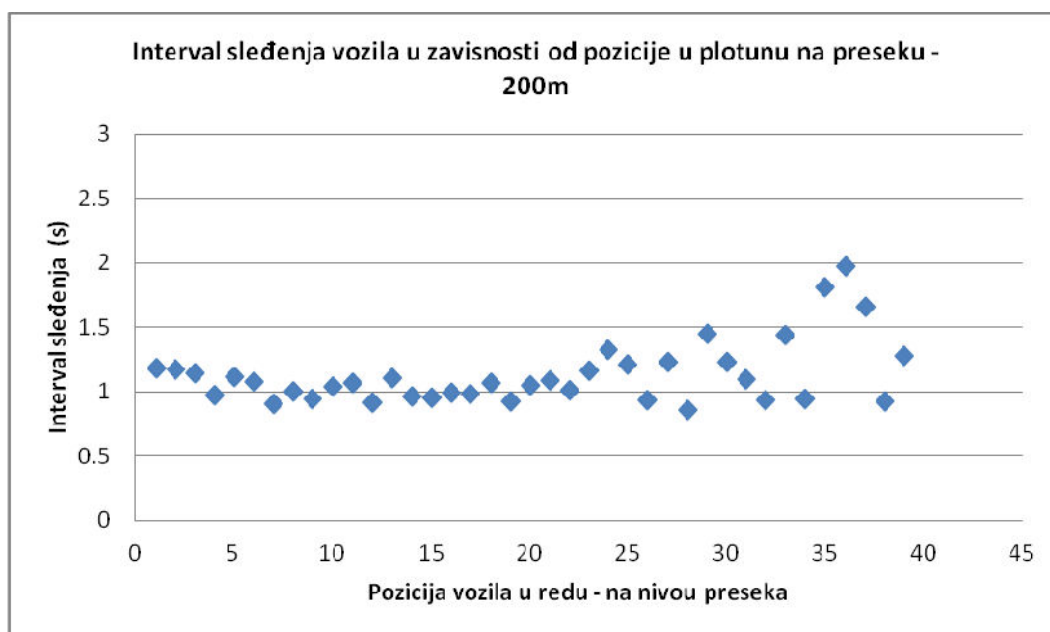
$\sigma^2$  – varijansa intervala sleđenja n-tog vozila u plotunu za posmatrane grupacije plotuna

N – veličine uzorka za posmatrane grupacije plotuna

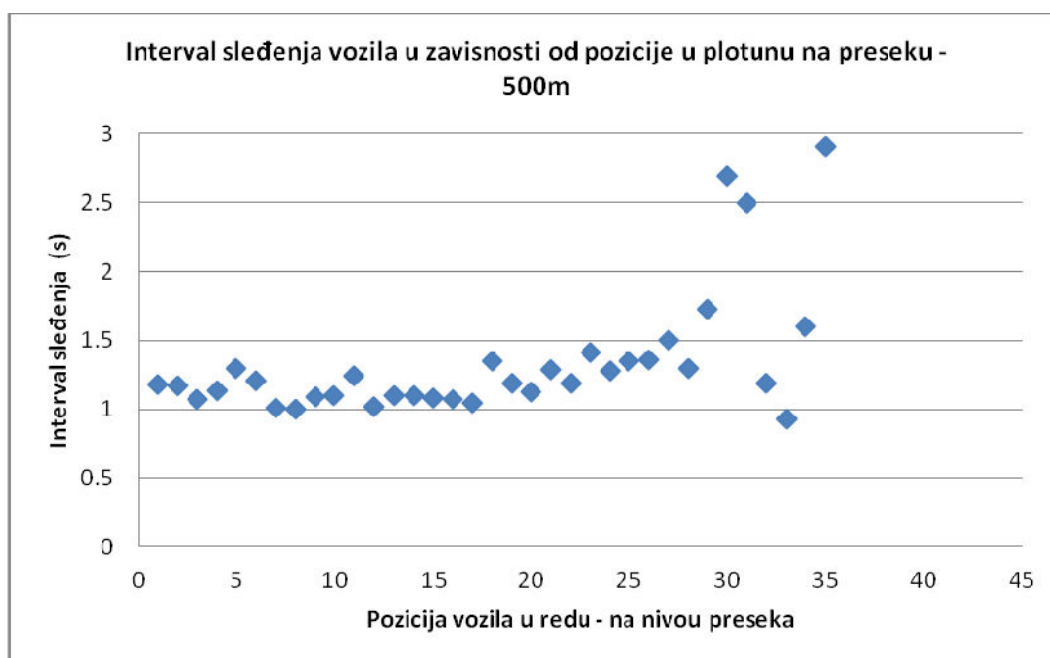
Npr za 25-u poziciju u plotunu poređene su srednje vrednosti intervala sleđenja dobijene na osnovu svih realizovanih intervala sleđenja 25-tog vozila u plotunu, kada je ovo vozilo poslednje u plotunu u odnosu na srednju vrednost intervala sleđenja 25-tog vozila kada je veličina plotuna veća od 25 vozila. Za ovu poziciju dobijena je vrednost statističkog testa od 0.2119, na osnovu čega možemo zaključiti da ne postoji statistički značajna razlika u srednjoj vrednosti intervala sleđenja 25-tog vozila u plotunu između posmatranih grupacija plotuna, za nivo značajnosti od 0.05.



Slika 5-10 Interval sleđenja vozila u zavisnosti od pozicije vozila u plotunu posmatrano na nultom preseku (0m)



Slika 5-11 Interval sleđenja vozila u zavisnosti od pozicije vozila u plotunu posmatrano na prvom preseku (200m)



Slika 5-12 Interval sleđenja vozila u zavisnosti od pozicije vozila u plotunu posmatrano na drugom preseku (500m)

Rezultati analize prosečnih vrednosti intervala sleđenja vozila za odgovarajuću poziciju u plotunu, posmatrana je separatno po presecima i prikazana je na narednim dijagramima (Slika 5-10, Slika 5-11, Slika 5-12).

Analizom rezultata utvrđenih prosečnih intervala sleđenja, može se zaključiti da je veće odstupanje, između dobijenih vrednosti, izraženije na početku i na kraju plotuna. Na svim presecima od sedme pozicije započinje realizacija prosečnog intervala sleđenja koja zadržava konstantnu vrednost od oko 1s, pri čemu je standardno odstupanje približno 0.06 s. Navedena stabilna vrednost prosečnog intervala sleđenja prisutna je na nultom preseku do 17. pozicije

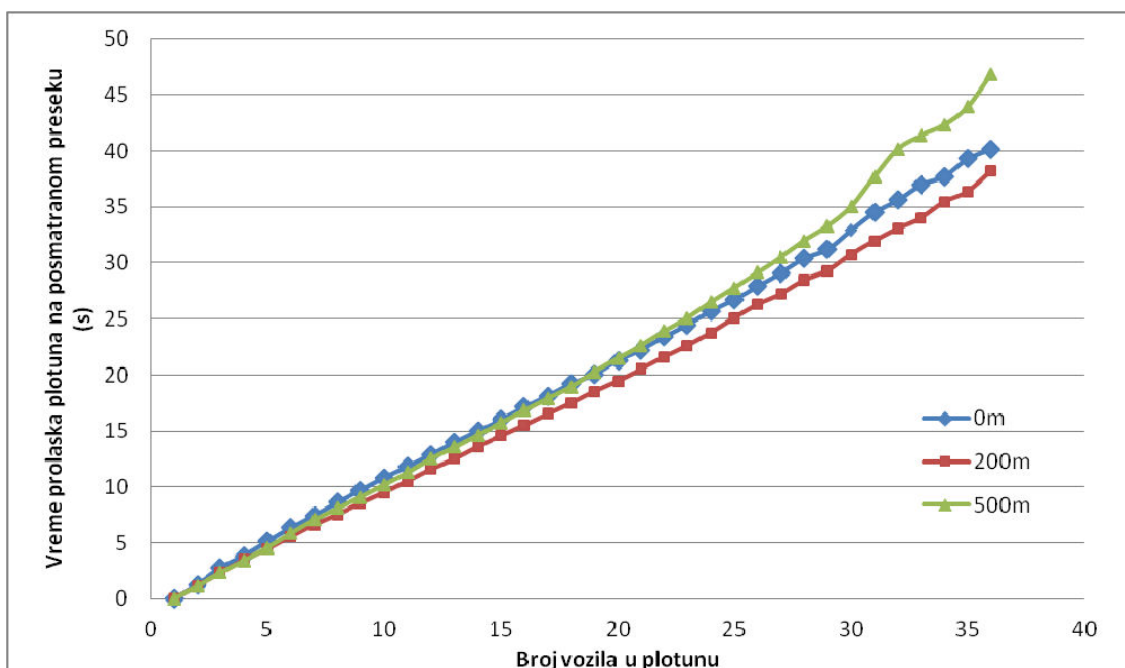


vozila u plotunu, na prvom preseku do 23. pozicije, a na drugom preseku do 18. pozicije. Nakon navedenih pozicija dolazi do većeg odstupanja intervala sleđenja u odnosu na prosečnu vrednost.

Ono što je karakteristično za svaki plotun je da se nezavisno od veličine ponaša isto. Veće oscilacije u intervalu sleđenja prisutne su na početku, a izražajnije su na kraju plotuna, dok u središnjem delu plotuna interval sleđenja je ujednačen.

Od prvog do sedmog vozila u plotunu standardno odstupanje se kreće u granicama od 0.07 - 0.17 s u zavisnosti od preseka, dok je na kraju plotuna zabeleženo veće odstupanje intervala sleđenja u opsegu 0.35 - 0.57 s. Izraženije razlike u prosečnim intervalima sleđenja prisutne su na repovima plotuna, pri čemu na nultom preseku one mogu biti posledica vozila koja se tretiraju kao deo plotuna, ali svoj zahtev realizuju nakon pražnjenja reda sa većim intervalima sleđenja. Na prvom preseku ove razlike u intervalima sleđenja između vozila na kraju plotuna su manje izražene, s obzirom da su se gore pomenuta vozila već priključila plotunu, dok na drugom preseku opet dolazi do rasipanja intervala sleđenja. Dodatno, veći opseg standardnog odstupanja kada je u pitanju rep plotuna može se hipotetički dovesti u vezu sa činjenicom da su analizirani plotuni vozila različite veličine, te da uzorak intervala sleđenja opada za vozila na višim pozicijama u plotunu.

Na osnovu prosečnih intervala sleđenja za odgovarajuću poziciju u plotunu, po presecima, pristupilo se proračunu kumulante intervala sleđenja koja predstavlja ukupno vreme potrebno za prolazak plotuna određene veličine, kroz referentne preseke.



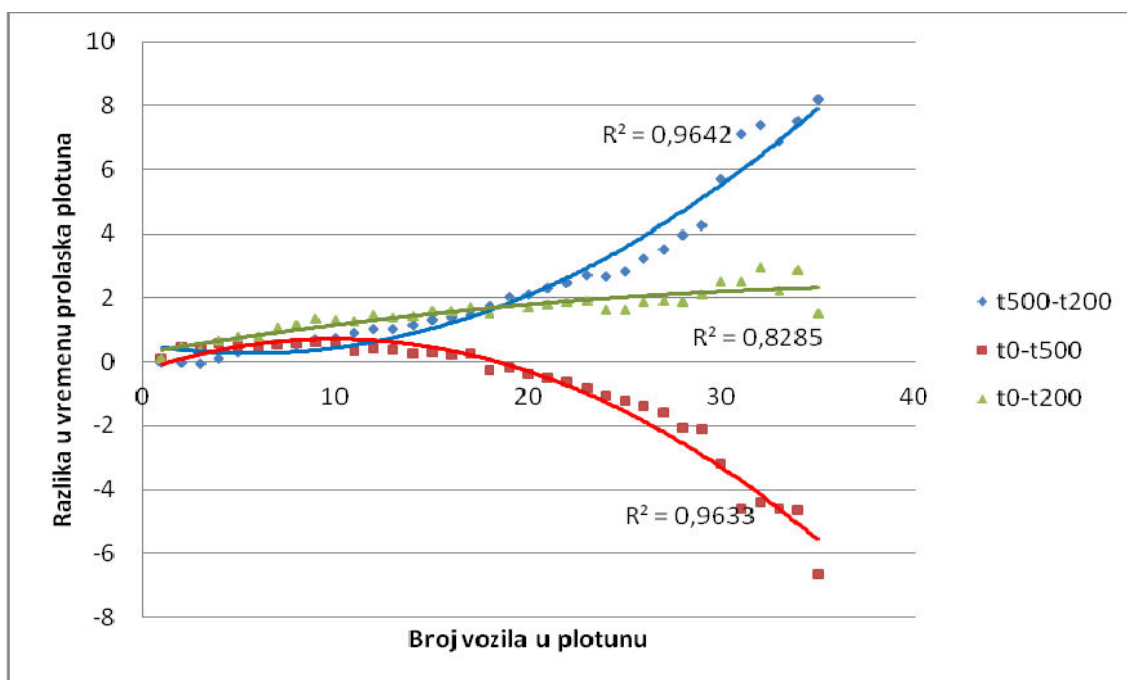
**Slika 5-13 Kumulanta kretanja plotuna posmatrana po presecima na osnovu prosečne vrednosti intervala sleđenja vozila u zavisnosti od pozicije vozila u plotunu**

Na osnovu slike (Slika 5-13) se može zaključiti da je vreme potrebno za prolazak plotuna na prvom preseku manje od vremena potrebnog za prolazak plotuna na nultom i drugom preseku, nezavisno od veličine plotuna. Poređenjem vremena potrebnog za prolazak plotuna na nultom i drugom preseku, uočava se da njihov odnos zavisi od broja vozila u plotunu. Kod veličine plotuna do 18 vozila vreme potrebno za prolazak plotuna je manje na drugom u odnosu na nulti presek, nakon čega se ovaj odnos menja. Na narednom dijagramu



predstavljena je razlika u vremenu opsluživanja plotuna na dva posmatrana referentna preseka, u zavisnosti od broja vozila (Slika 5-14). U konkretnom slučaju, analizirana je razlika u vremenu opsluživanja plotuna između:

- nultog i prvog preseka;
- nultog i drugog preseka;
- prvog i drugog preseka.



Slika 5-14 Razlika u vremenu prolaska plotuna na dva posmatrana preseka u zavisnosti od broja vozila u plotunu

Rezultati pokazuju da u sva tri slučaja postoji jaka korelacija između analiziranih veličina koja se može opisati polinomima drugog stepena, sa vrednostima koeficijenata determinacije koji se kreću u opsegu od 0.83 do 0.96.

Tabela 5-15 Funkcionalna zavisnost između broja vozila u plotunu i razlike u vremenu prolaska plotuna na posmatranim presecima

Razlika u vremenu prolaska plotuna između posmatranih preseka	Koeficijent determinacije	Funkcionalna zavisnost između broja vozila u plotunu (x) i razlike u vremenu prolaska plotuna na posmatranim presecima (y)
$t_0-t_{200}$	0.8285	$y = -0.0012 \cdot x^2 + 0.099 \cdot x + 0.28$
$t_0-t_{500}$	0.9633	$y = -0.01 \cdot x^2 + 0.1983 \cdot x - 0.27$
$t_{200}-t_{500}$	0.9642	$y = 0.0088 \cdot x^2 - 0.0993 \cdot x + 0.55$

Analizom dobijene razlike u vremenu između nultog i prvog preseka, može se zaključiti da je vreme prolaska plotuna na prvom preseku uvek kraće od vremena na nultom preseku, nezavisno od broja vozila u plotunu. Navedeno odgovara rezultatima prikazanim na dijagramu (Slika 5-13) na osnovu kojih je utvrđeno da će na svim lokacijama u većini slučajeva doći do skupljanja plotuna na prvom preseku.

Posmatranjem dobijene razlike u vremenu potrebnom za prolazak plotuna na nultom i

drugom preseku može se zaključiti da je za veličinu plotuna do 18 vozila vreme prolaska kraće na drugom preseku u odnosu na nulti, nakon čega dolazi do značajne promene trenda. Ova razlika se dalje povećava kako raste broj vozila u plotunu.

#### 5.4 Analiza vremena putovanja

Vreme putovanja plotuna predstavlja jedan od osnovnih ulaznih parametara u postojeće modele rasturanja plotuna (Poglavlje 1). Dodatno Pacey model baziran je na pretpostavci da vreme putovanja vozila u plotunu ima normalnu raspodelu. Zbog uslova primene navedenog modela testirana je hipoteza o normalnoj raspodeli vremena putovanja vozila u plotunu posmatrano po presecima. Zbog razlika u brzinama, analiza raspodele vremena putovanja je vršena separatno, za tri lokacije (R4, R6 i R8).

Prilikom testiranja normalnosti raspodele vremena putovanja vozila u plotunu primenjen je Shapiro-Wilk test. U tabeli (Tabela 5-16) prikazani su rezultati testiranja na ukupnom uzorku posmatrano po lokacijama i presecima.

**Tabela 5-16 Rezultati Shapiro-Wilk testa**

	R4	R6	R8	R4	R6	R8
	200m			500m		
Statistic	0.991	0.907	0.976	0.990	0.609	0.078
df	505	487	1192	306	540	887
Sig.	0.004	0.000	0.000	0.035	0.000	0.000

Shapiro-Wilk test je statistički značajan za vrednosti  $p < 0.05$ . Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli (Tabela 5-16) može se zaključiti da distribucija vremena putovanja na svim lokacijama, na oba posmatrana preseka statistički značajno odstupa od normalne raspodele. U okviru disertacije dodatno je testirana normalnost raspodele primenom Kolmogorov-Smirnov testa i analizom standardizovanih vrednosti asimetrije i spljoštenosti distribucije. Obavljena testiranja su potvrdila prethodno dobijene rezultate na osnovu kojih je odbačena hipoteza da vreme putovanja ima normalnu raspodelu. Dokazivanjem da vreme putovanja vozila u plotunu nema normalnu raspodelu, dovodi do zaključka da se Pacey model ne može primeniti.

Vreme putovanja direktno zavisi od brzine kretanja plotuna, čija promena može uticati na promenu rastojanja na kojem će započeti rasturanje plotuna. Na deonicama na kojima se plotun kreće brzinom 30 km/h, rasturanje će započeti već na 400 m, dok za brzine od 70 km/h, rasturanje započinje na 800 m (TRI, 1996). Na osnovu navedenog se može očekivati da će na deonicama sa većim brzinama kasnije započeti proces rasturanja plotuna.

Analiza vremena putovanja je neophodna za kompletno sagledavanje karakteristika kretanja plotuna. Ispitivanje vremena putovanja vozila u plotunu vršena je na osnovu rezultata istraživanja sa tri lokacije (R4, R6 i R8) na kojima je evidentirano vreme putovanja svakog pojedinačnog vozila u plotunu.

Vreme putovanja i-tog vozila u plotunu se računa na naredni način:

$$t_i = T_{pi} - T_{0i} \quad (5-9)$$

gde je:

$t_i$  - vreme putovanja i-tog vozila

$T_{pi}$  - trenutak prolaska i-tog vozila na posmatranom preseku

$T_{0i}$  - trenutak prolaska i-tog vozila u nultom preseku

Analizom rezultata po lokacijama dobijene su vrednosti prikazane u narednoj tabeli (Tabela 5-17).

**Tabela 5-17 Analiza realizovanih vremena putovanja po lokacijama**

	R4	R6	R8	R4	R6	R8
	200m			500m		
Srednja prostorna brzina (m/s)	11.17	13.16	7.20	14.96	14.16	10.77
Prosečno vreme putovanja (s)	17.90	15.02	27.75	33.43	35.30	46.41
Mediana (s)	17.70	14.78	28.06	33.02	34.06	46.29
Standardno odstupanje (s)	3.04	3.21	3.79	4.42	9.23	6.10
Minimum (s)	7.90	6.60	8.74	20.27	19.64	18.73
Maksimum (s)	27.13	36.18	42.70	45.03	96.80	77.82
Obim uzorka	505	487	1192	306	540	887

Na osnovu prikazanih prosečnih vrednosti vremena putovanja na prvom preseku, može se uočiti da je vreme putovanja najkraće na lokaciji R6, odnosno da se na pomenutoj lokaciji plotun kreće najvećom brzinom. Međutim, uzrok ovakvih rezultata na pomenutoj lokaciji, su vozila koja su deo plotuna, ali su zahtev ispostavila nakon pražnjenja reda. Učešće ovih vozila u ukupnom realizovanom zahtevu je izraženo, a s obzirom da se ne kreću iz stanja mirovanja, za razliku od vozila iz reda, njihov uticaj na prosečno vreme putovanja je značajno. Na narednom preseku njihov uticaj je oslabljen jer su nakon sustizanja plotuna nastavili da se kreću uslovljeno, brzinom kretanja plotuna. Posmatranjem opsega u kojem se kreću vrednosti, kao i veličinu standardnog odstupanja, posmatrano po lokacijama i presecima, može se uočiti da je na lokaciji R4 najmanje izraženo rasipanje brzina. Na ovoj lokaciji se može očekivati da će kasnije doći do rasturanja plotuna. Svakako, ovakva pretpostavka se mora dodatno ispitati.

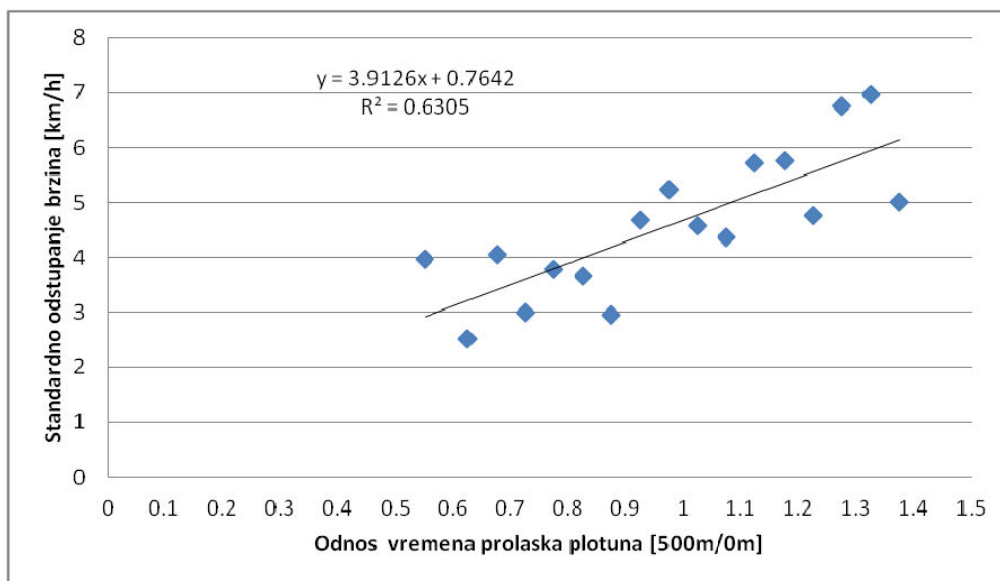
Različite brzine kretanja po lokacijama, predstavljaju dobru osnovu za ispitivanje uticaja vremena putovanja na trenutak započinjanja rasturanja plotuna, što će biti analizirano u nastavku.

#### 5.4.1 Uticaj vremena putovanja na karakteristike kretanja plotuna

U okviru disertacije naznačeno je da razlike u željenim brzinama i mogućnosti njihove realizacije utiču na rasturanje plotuna. Osnovna pretpostavka je da će povećanjem standardnog odstupanja brzina vozila u plotunu doći do povećanja vremena prolaska plotuna na preseku.

Posmatrajući nulti i prvi presek nije utvrđena navedena zavisnost, a pretpostavka je da je posledica ovako dobijenih rezultata posmatrano po ciklusima, različito učešće vozila koja su deo plotuna, a koja su nulti presek prošla nakon rasformiranja reda. Ova vozila imaju značajno veće brzine od vozila iz reda, zbog čega se posledično povećava standardno odstupanje brzina

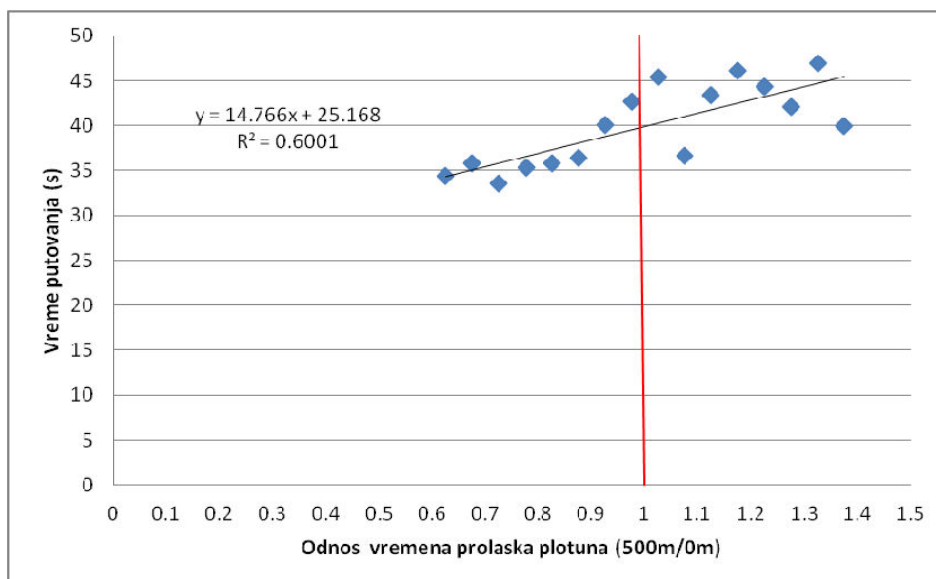
vozila u plotunu. Sa druge strane njihovo “agresivnije” kretanje dovodi do smanjivanja vremena prolaska plotuna, kako se udaljuju od raskrsnice.



Slika 5-15 Zavisnost promene vremena prolaska plotuna u odnosu na standardno odstupanje brzina vozila u plotunu (drugi presek)

Na drugom preseku se već može uočiti uticaj standardnog odstupanja brzina vozila u plotunu na promenu vremena prolaska plotuna (Slika 5-15), koji se može opisati linearnom regresijom, sa koeficijentom determinacije od 0.63.

Pregledom literature, zaključeno je da na nastajanje fenomena rasturanja plotuna veći uticaj ima vreme putovanja u odnosu na pređeno rastojanje. Navedena konstatacija je analizirana za fiksno rastojanje od 500m, na kojima su realizovana različita vremena putovanja posmatrano po lokacijama. Prisutno ograničenje brzine na R4 je na 60km/h, a na R6 i R8 je na 50km/h. Takođe, posmatrano na svakoj lokaciji zasebno, uočene su razlike u vremenu putovanja između ciklusa.



Slika 5-16 Zavisnost promene vremena prolaska plotuna u odnosu na vreme putovanja vozila u plotunu

Grafičkom interpretacijom dobijenih rezultata (Slika 5-16) može se zaključiti da postoji izvesna veza između vremena putovanja i odnosa vremena prolaska plotuna koja se može opisati linearnom regresijom, sa koeficijentom determinacije od 0.60. Povećanjem vremena putovanja dolazi do povećanja vremena prolaska plotuna na posmatranom preseku (500m). Za vreme putovanja plotuna manje od 40s, što odgovara brzini od 45 km/h vreme prolaska plotuna će biti isto ili manje u odnosu na nulti presek, dok će za manje brzine od navedene doći do rasturanja plotuna.

Analizom rezultata utvrđeno je da će promena vremena prolaska plotuna zavistiti od brzine kretanja, odnosno vremena putovanja plotuna, što navodi na zaključak da se uticajem na brzinu kretanja plotuna može odložiti početak rasturanja plotuna. Navedena konstatacija ne važi na kraćim deonicama.

### 5.4.2 *Uticaj vremena putovanja prvog vozila na karakteristike kretanja plotuna*

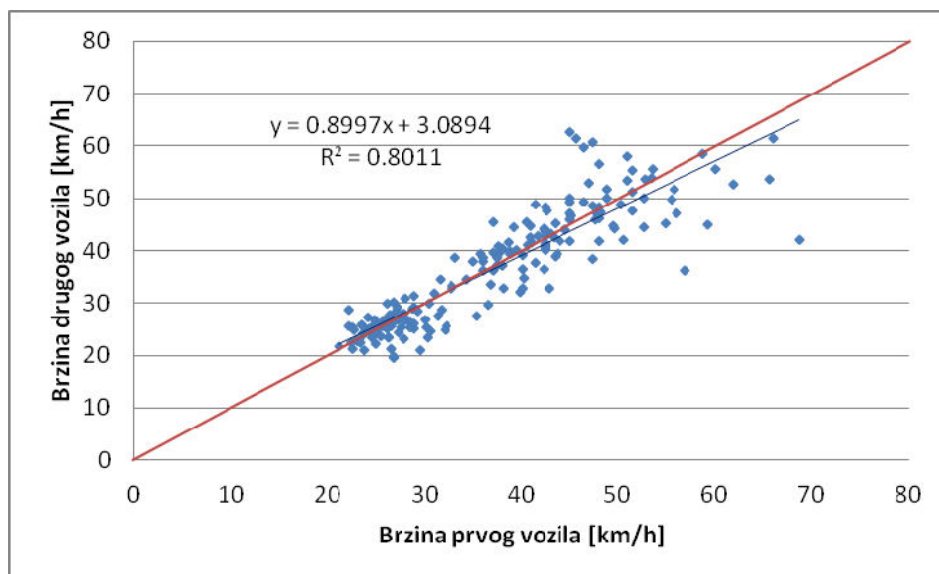
Za kretanja plotuna značajno je ponašanje "vođe", odnosno prvog vozila koje svojim kretanjem utiče na vozila iza sebe. Vođa predstavlja vozilo koje ima mogućnost realizacije željene brzine, odnosno čije kretanje nije uslovljeno drugim vozilom. Za sva ostala vozila u plotunu se smatra da su u režimu sleđenja od strane prethodnog vozila.

Za kvantifikovanje uticaja prvog vozila na kretanje plotuna potrebno je dodatno sagledati prisustvo određenih faktora. Jedan od faktora je mogućnost promene saobraćajne trake, koja zavisi od broja traka, intenziteta saobraćaja u susednoj traci i prihvatljivog intervala sleđenja.

Vozila koja se nalaze na čelu plotuna mogu povećavati brzinu, čime se povećava rastojanje sleđenja u odnosu na ostala vozila. Ukoliko je ovo rastojanje značajno veće od prosečnog rastojanja sleđenja vozila u plotunu može se pretpostaviti da će doći do rasturanja plotuna. S obzirom da prvo vozilo u plotuna nema uticaj vozila ispred sebe, može ubrzavati do dostizanja željene brzine, čime se može povećati rastojanje sleđenja u odnosu na drugo vozilo u plotunu. U određenim slučajevima drugo vozilo može biti stimulisano da ubrza, čime se sada povećava rastojanje sleđenja u odnosu na treće vozilo. Po ovoj pretpostavci, svako sledeće vozilo može povećanjem svoje brzine uticati na smanjenje rastojanja sleđenja. Ukoliko se ovaj proces ponavlja do poslednjeg vozila, može se pretpostaviti da neće doći do rasturanja plotuna. Ukoliko izostane reakcija vozila koja slede, odnosno ukoliko je brzina prvog vozila značajno veća od brzine ostatka plotuna može se očekivati pojava rasturanja plotuna (Qu *et al.*, 2013).

Na osnovu navedenog izvršena je analiza uticaja brzine prvog vozila u plotunu, na brzinu kretanja drugog vozila, a zatim i brzinu kretanja plotuna. Dobijeni rezultati predstavljeni su u nastavku.

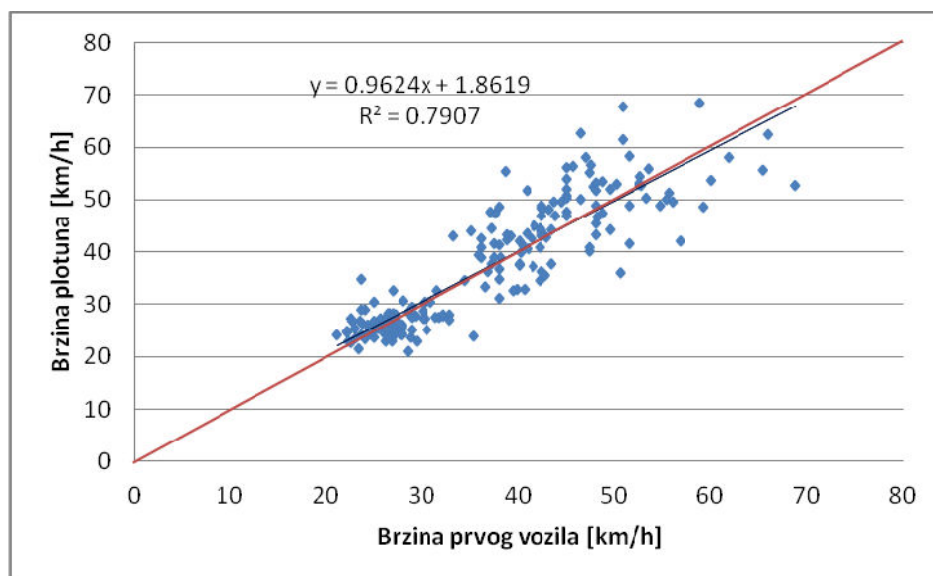
Na osnovu grafika (Slika 5-17) može se zaključiti da će se u većini slučajeva drugo vozilo kretati približno istom brzinom kao prvo vozilo. Na grafiku sve tačke koje leže na prikazanoj crvenoj liniji predstavljaju identičnu brzinu kretanja prvog i drugog vozila. Sve tačke ispod prave predstavljaju situacije u kojima je prvo vozilo brže od drugog, dok tačke iznad situacije u kojima je drugo vozilo brže. Za očekivati je da će prvo vozilo biti brže u odnosu na drugo, osim u slučajevima kada na raskrsnici dolazi do realizacije nešto većeg intervala sleđenja između posmatranih vozila, koji se povećanjem brzine drugog vozila smanjuje na narednom preseku, ili kada vozilo sa začelja plotuna kao posledica preticanja i prestrojavanja u momentu registrovanja zauzima drugu poziciju.



**Slika 5-17 Uticaj brzine prvog vozila na brzinu drugog vozila u plotunu (prvi presek)**

Pri nižim vrednostima brzina prvog vozila tačke su koncentrisane oko prave, povećanjem brzina dolazi do povećanja razlike između posmatranih vozila. Na osnovu ovoga se može zaključiti da se pri većim brzinama prvog vozila može očekivati rasturanje plotuna, naročito za brzine prvog vozila veće od 55 km/h, nakon koje je brzina prvog vozila veća od drugog.

Grafički prikaz rezultata dobijenih analizom uticaja brzine prvog vozila na prosečnu brzinu vozila u plotuna prikazano je na narednoj slici.

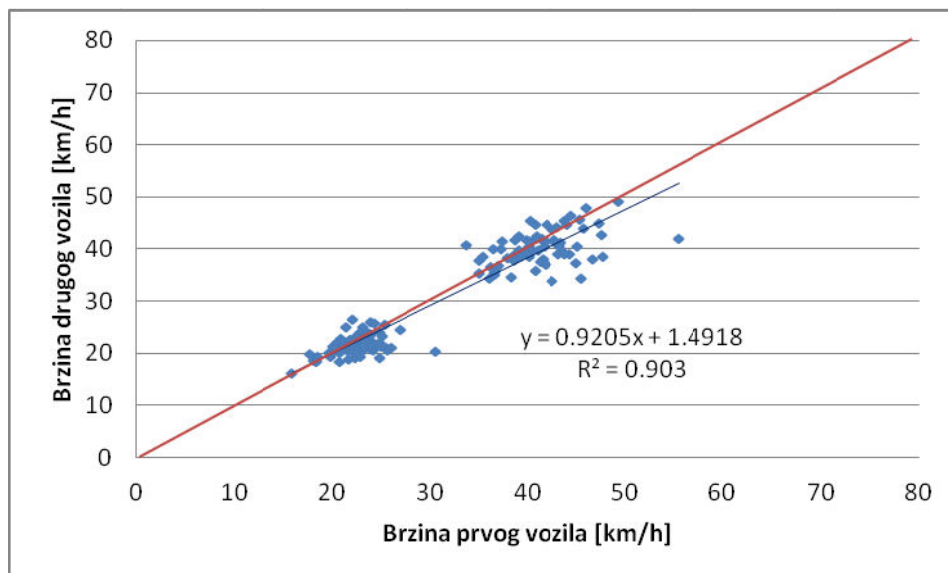


**Slika 5-18 Uticaj brzine prvog vozila na brzinu plotuna (prvi presek)**

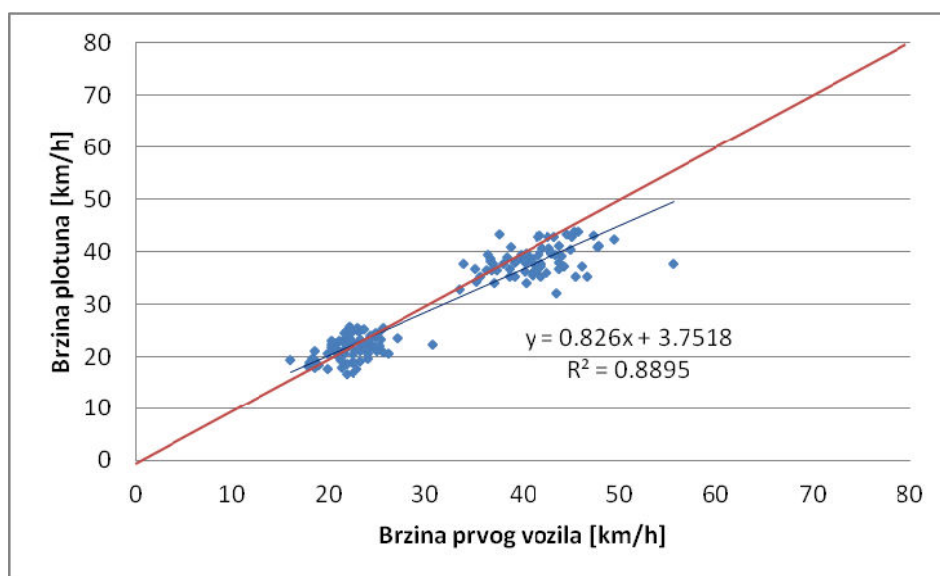
Ukoliko se podaci o brzini prvog vozila uporede sa brzinom plotuna (Slika 5-18), može se uočiti da dolazi do manjih promena uticaja prvog vozila na brzinu plotuna. Promena se ogleda u većem rasipanju tačaka na dijagramu, ali neznatno na smanjenje veličine koeficijenta determinacije primenjene linearne regresije od 0.79 ( $y = 0.9624x + 1.8619$ ). Kod uticaja prvog vozila na brzinu drugog dobijen je koeficijent determinacije od 0.80 ( $y = 0.8997x + 3.0894$ ). Primenom linearne regresije u drugom slučaju dobija se preklapanje sa dijagonalom na grafiku što ukazuje na identične brzine kretanja prvog vozila i drugog, odnosno plotuna.

Posmatranjem istih parametara na narednom preseku utvrđena je jača veza. Veličina

koeficijentima determinacije je 0.90 kod linearne funkcionalne zavisnosti između brzina prvog i drugog vozila, i 0.89 između brzina prvog vozila i plotuna. Na ovom preseku dobijena zavisnost ukazuje na nešto brži rast brzina prvog vozila u odnosu na drugo, odnosno na plotun (Slika 5-19), (Slika 5-20).



Slika 5-19 Uticaj brzine prvog vozila na brzinu drugog vozila (drugi presek)



Slika 5-20 Uticaj brzine prvog vozila na brzinu plotuna (drugi presek)

Neophodno je napomenuti da su podaci na drugom preseku grupisani, što je posledica različitih realizovanih brzina na posmatranim lokacijama. Kao što je već napomenuto na lokaciji R4 registrovane su veće prosečne brzine, nego što je to slučaj sa lokacijama R6 i R8.

Na osnovu analize i sinteze dobijenih rezultata zaključuje se da neće doći do izostanka reakcije vozila koji slede prvo vozilo u plotunu, odnosno da ponašanje prvog vozila neće uticati na rasturanje plotuna. Dobijeni rezultati su posledica agresivnosti vozača i činjenicu da se spora vozila na čelu plotuna ne tolerišu, zbog čega su zabeležene česte promene saobraćajnih traka, kao i pozicije vozila tokom kretanja, otuda "vođa" plotuna u momentu registrovanja njegovog prolaska na preseku, ne mora biti prvo vozilo u redu u momentu formiranja plotuna.



## 6. ANALIZA PRIMENJENIH MODELA

Postojeći modeli koji opisuju kretanje plotuna su detaljno opisani u poglavlju (Poglavlje 1). U ovom poglavlju, modeli Robertsona i HCM-a će biti testirani nad skupom realnih podataka. Dok modeli Pacey i Lighthill i Whitham nisu našli praktičnu primenu u okviru ove disertacije, na osnovu zaključaka donešenih u okviru pregleda literature (Poglavlje 1) i rezultata prethodnih analiza (Poglavlje 5.4).

### 6.1 Analiza dobijenih rezultata primenom Robertsonovog modela

Pre neposredne primene Robertsonovog modela neophodna je kalibracija parametara koji figuriraju u modelu. U disertaciji, kalibracija je obavljena na oba predstavljena načina, detaljnije objašnjena u disertaciji (Poglavlje 3.3.1):

- Prvi način podrazumeva minimiziranje korena srednje kvadratne greške (RMSE) između realnih i podataka dobijenih modelom;
- Drugi način podrazumeva proračun parametara  $\alpha$  i  $\beta$  na osnovu realizovanih vremena putovanja i njihove disperzije.

Na osnovu realnih podataka vršena je kalibracija parametara rasturanja plotuna ( $\alpha$ ) za fiksnu vrednost parametra vremena putovanja ( $\beta=0.8$ ). Protok na početnoj raskrsnici se posmatrao kroz vremenske intervale od dve sekunde, dok se parametar rasturanja plotuna posmatrao u koracima od po 0.01, u dozvoljenom opsegu ( $0 < \alpha < 1$ ). Usvojena vrednost  $\alpha$  daje minimalni RMSE u odnosu na realne podatke. Na naveden način vrednosti parametara modela  $\alpha$  utvrđene su za sve lokacije.

Proračun parametara  $\alpha$  i  $\beta$  na osnovu standardnog odstupanja vremena putovanja rađena samo za lokacije R4, R6 i R8, na kojima se ova vrednost i istraživala, po procedure definisanoj u Poglavlju 3.3.1.

Sa ciljem uporedne analize dobijenih rezultata kalibracije u narednoj tabeli predstavljene su vrednosti parametara samo za lokacije (R4, R6 i R8) (Tabela 6-1).

**Tabela 6-1 Vrednosti parametara  $\alpha$  i  $\beta$  u zavisnosti od lokacije, preseka i načina kalibrisanja**

		I način kalibracije			II način kalibracije		
		R4	R6	R8	R4	R6	R8
Prvi presek	$\alpha$	0.14	0.02	0.09	0.17	0.22	0.14
	$\beta$	0.8	0.8	0.8	0.86	0.82	0.88
	F	0.53	0.9	0.54	0.46	0.44	0.38
Drugi presek	$\alpha$	0.14	0.01	0.06	0.13	0.33	0.14
	$\beta$	0.8	0.8	0.8	0.88	0.75	0.88
	F	0.39	0.89	0.52	0.37	0.18	0.28

Na osnovu prikazanih vrednosti parametara može se uočiti da samo za lokaciju R4 se dobijaju bliske vrednosti faktora prilagođavanja (F) za oba primenjena načina kalibrisanja parametara. Na preostale dve lokacije uočena je značajna razlika između dobijenih vrednosti parametara.

Robertsonov model je primenjen za obe predstavljene vrednosti parametara po lokacijama i



presecima (Tabela 6-1), a zatim su dobijeni rezultati poređeni sa realnim. Dobijeni rezultati prikazani su u narednoj tabeli (Tabela 6-2).

**Tabela 6-2 Srednje kvadratno odstupanje modela od realnih podataka**

	RMSE					
	I način kalibracije			II način kalibracije		
	R4	R6	R8	R4	R6	R8
Prvi presek	0.98	0.87	0.92	1.06	1.06	0.93
Drugi presek	1.22	1.01	1.09	1.23	1.21	1.13

Na osnovu rezultata obavljenih analiza za sve tri lokacije i oba posmatrana preseka može se uočiti da prvi način kalibracije parametara daje bolje rezultate. Na osnovu navedenog u daljoj proceduri usvajaju se vrednosti parametara dobijene na prvi način, a predstavljene u tabeli (Tabela 6-1).

U narednoj tabeli (Tabela 6-3) predstavljene su kalibrisane vrednosti parametara za sve lokacije, posmatrane po presecima za koje su se utvrđivale. Predstavljene vrednosti korišćene su u daljoj analizi rezultata (Poglavlje 7.3).

**Tabela 6-3 Kalibrisane vrednosti parametara  $\alpha$  u zavisnosti od lokacije i preseka**

		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Prvi presek	$\alpha$	/	0.06	/	0.14	0.06	0.02	0.01	0.09
	$\beta$	/	0.8	/	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Drugi presek	$\alpha$	0.13	0.06	0.04	0.14	0.06	0.01	0.05	0.06
	$\beta$	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Testiranjem Roberstonovog modela uočeno je da smanjenjem faktora prilagođavanja dolazi do formiranja repa plotuna. Formiranje repa plotuna bi trebalo da ukaže na povećanje rasturanja plotuna, međutim osnovni problem se sastoji u činjenici da najčešće rep plotuna biva izražen kroz broj vozila u decimalnom zapisu i neretko manji od 1. Problem ovakvog tumačenja nailaska vozila je dvostruk:

- matematičkim zaokruživanjem dobijenih vrednosti na celobrojnu (kako bi se izrazio broj vozila u posmatranom intervalu) dešava se da dolazi do "smanjenja" ukupnog broja vozila u odnosu na posmatrani broj.
- posmatranjem dobijenih vrednosti kroz decimalni zapis predstavlja problem kod utvrđivanja RMSE, jer veće vrednosti parametara rasturanja plotuna daju bolje rezultate, kao posledica većeg učešća malog odstupanja.

U narednoj tabeli su predstavljeni rezultati primene Robertsonovog modela na nivou jednog ciklusa (Tabela 6-4) na osnovu kojih je moguće uočiti navedeno.

**Tabela 6-4 Rezultati primene Robertsonovog modela na nivou ciklusa**

Kraj intervala [s]	Br. vozila nulti presek	Br. vozila prvi presek	Br. vozila model prvi presek	Zaokružen br. vozila
2	2	1	1.24	1
4	2	2	1.71	2
6	1	2	1.27	1
8	3	3	2.34	2
10	2	2	2.13	2
12	1	1	1.43	1
14	0	1	0.54	1
16	2	1	1.45	1
18	0	1	0.55	1
20	1	0	0.83	1
22	0	0	0.32	0
24	0	0	0.12	0
26	0	0	0.05	0
28	0	0	0.02	0
30	0	0	0.01	0
$\Sigma$	14	14	14	13

Zaokruživanjem dobijenih vrednosti, nakon 20-te sekunde nema registrovanih vozila, zbog čega u sumi ima vozilo manje u odnosu na broj vozila sa nultog preseka.

## 6.2 Analiza dobijenih rezultata primenom HCM modela

Primenom HCM metodologije u utvrđivanju rasturanja plotuna podrazumeva opširnu proceduru utvrđivanja vremena putovanja na deonici. U modelu deonica je definisana kao rastojanje između dve susedne raskrsnice, dok su istraživanjima obuhvaćene deonice koje se posmatraju od početne raskrsnice do odgovarajućih referentnih preseka, što u manjoj meri može uticati na rezultate dobijene HCM-ovim modelom.

Primeni modifikovanog Robertsonovog modela prethode koraci proračuna ulaznih parametara sa ciljem proračuna vremena putovanja na deonici. (HCM, 2010)

Na osnovu utvrđenog vremena putovanja na deonici proračunavaju se naredni parametri iz modela (Tabela 6-5), a po proceduri koja je detaljnije objašnjena u Poglavlju 3.4.

**Tabela 6-5 Vrednosti faktora prilagođavanja u zavisnosti od lokacije i preseka**

Parametri		R4	R6	R8
Prvi presek	$t_r$	15.53	16.69	16.69
	$d_t$	2	2	2
	$t_r'$	8	9	9
	F	0.44	0.42	0.42
Drugi presek	$t_r$	33.71	36.60	36.60
	$d_t$	2	2	2
	$t_r'$	17	19	19
	F	0.29	0.26	0.26

Na osnovu utvrđenih vrednosti faktora prilagođavanja (Tabela 6-5), vršena je predikcija dolaska vozila posmatrana po presecima i lokacijama. Dobijene su upoređene sa realnim vrednostima i utvrđen je koren srednjeg kvadratnog odstupanja.

U narednoj tabeli prikazano je odstupanje HCM i Robertsonovog modela za usvojene vrednosti parametara (Tabela 6-6).

**Tabela 6-6 Srednje kvadratno odstupanje Robertsonovog i HCM modela od realnih podataka**

	RMSE					
	Robertsonov model			HCM model		
	R4	R6	R8	R4	R6	R8
Prvi presek	0.98	0.87	0.92	1.07	1.06	0.93
Drugi presek	1.22	1.01	1.09	1.25	1.09	1.09

Ocnom predikcije dolaska vozila na posmatrani presek, za posmatranu lokaciju, primenom predstavljenih modela, uočava se da su prisutne male razlike u dobijenim rezultatima, s tim da su vrednosti odstupanja Robertsonovog modela iste ili nešto niže od HCM modela. Oslanjajući se na navedeno u daljoj proceduri usvaja se Robertsonov model, kao model koje daje manje odstupanje u odnosu na realne podatke.

## 7. MODELIRANJE KRETANJA PLOTUNA VOZILA NA GRADSKIM ARTERIJAMA

### 7.1 *Algoritam prepoznavanja plotuna vozila*

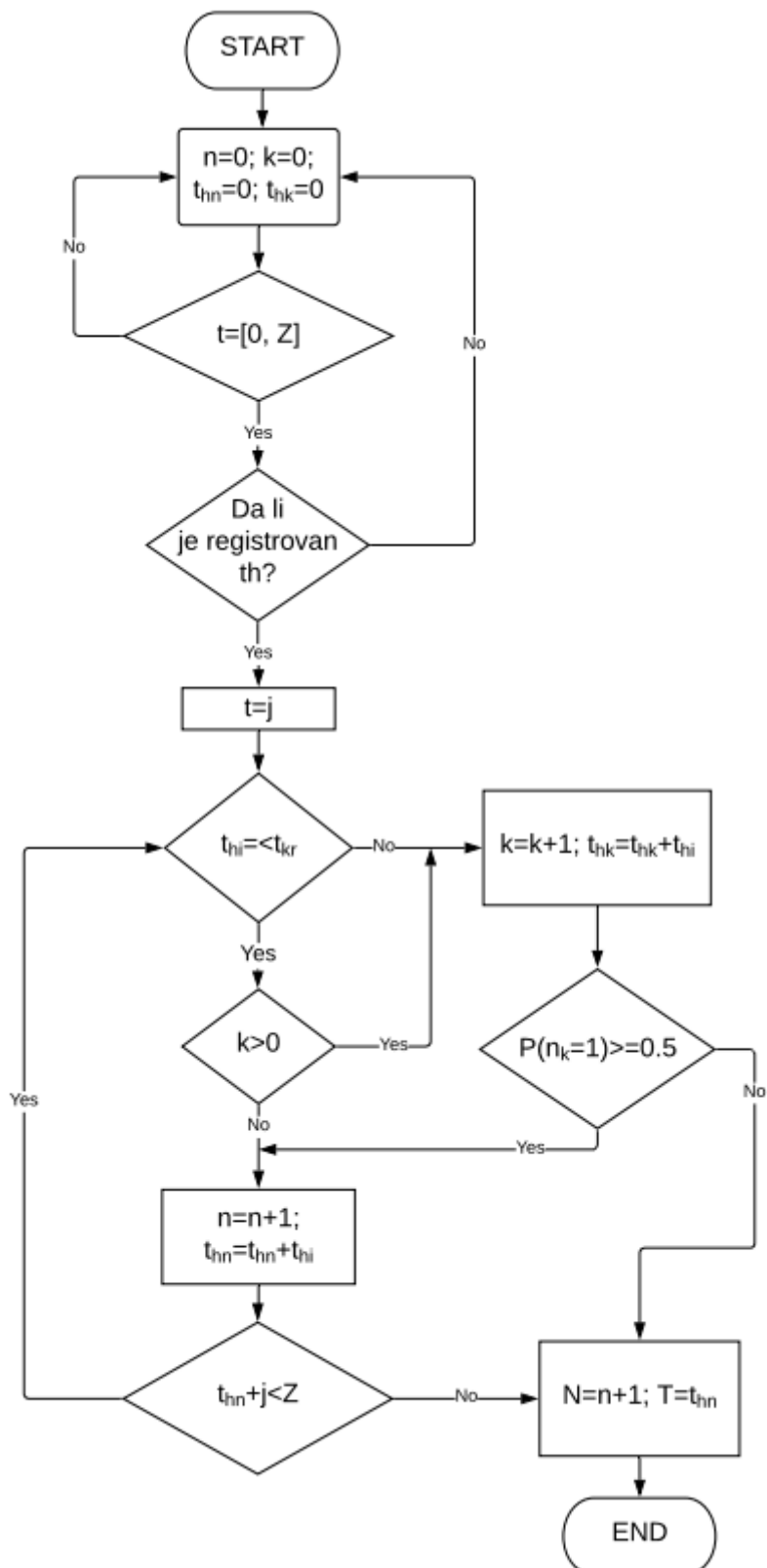
Model prepoznavanja plotuna u momentu njegovog formiranja baziran je na rezultatima sprovedenih istraživanja. Razvijeni model zasnovan je na zaključcima predstavljenim u Poglavlju 5.2.2. da sva vozila koja u kontinuitetu realizuju interval sleđenja manji od 2.1 s čine plotun, dok će sva vozila koja svoj zahtev realizuju nakon prve realizacije interval sleđenja veće od 2.1 s, biti deo plotuna sa određenom verovatnoćom. Verovatnoća da će vozila biti deo plotuna zavisi od pozicije vozila i interval sleđenja posmatranog vozila u odnosu na poslednje vozilo u plotunu. Izlazni rezultat modela, predstavlja veličinu plotuna kao i vreme opsluge plotuna na početnoj raskrsnici (nulti presek).

Na osnovu predstavljenog modela formiran je algoritam prepoznavanja plotuna. Intervali sleđenja koji figuriraju u algoritmu predstavljaju interval sleđenja između vozila na nivou preseka (svođenje na jednu saobraćajnu traku). Registrovanje intervala sleđenja u realnim uslovima bi zahtevali primenu detektora pojedinačno po saobraćajnim trakama, a za primenu predstavljenog algoritma bilo bi neophodno prvobitno svesti utvrđene intervale sleđenja na nivo preseka. Iako ne predstavlja komplikovanu proceduru algoritam svođenja interval sleđenja na nivo preseka nije predmet ove disertacije, te se neće prikazivati.

U prikazanom algoritmu (Slika 7-1) broj vozila u plotunu  $N$  i vreme opsluge plotuna na početnoj raskrsnici  $T$  se utvrđuje u dve faze.

Prva faza započinje u momentu započinjanja zelenog signalnog pojma na posmatranoj raskrsnici, odnosno prolaskom prvog vozila preko linije zaustavljanja u  $j$ -toj sekundi zelenog, a traje sve dok postoji kontinualna realizacija intervala sleđenja vozila manjeg ili jednakog od kritičnog ( $t_{kr}$ ), a najduže do trajanja zelenog signalnog pojma. Sva vozila registrovana u prvoj fazi predstavljaju deo plotuna. Druga faza započinje u trenutku registrovanja prve realizacije većeg intervala sleđenja od kritičnog ( $t_{hi} > t_{kr}$ ). I traje do završetka zelenog odnosno prolaska poslednjeg vozila u posmatranom ciklusu. Tokom druge faze se za svaki pojedinačni registrovani prolazak vozila beleži njegova pozicija ( $k$ ) kao i interval sleđenja u odnosu na poslednje registrovano vozilo prve faze ( $t_{hk}$ ). Za svako vozilo druge faze se na osnovu registrovanih vrednosti parametara ( $k$  i  $t_{hk}$ ) primenom modela logističke regresije (Poglavlje 5.2.2) utvrđuje verovatnoća da vozilo predstavlja deo plotuna  $P(n_k=1)$ . Za sve vrednosti verovatnoće veće i jednake od 0.5, smatra se da je vozilo deo plotuna. Za prvo vozilo za koje se utvrdi da nije deo plotuna  $P(n_k=1) < 0.5$ , algoritam se završava i kalkuliše se broj vozila u plotunu, kao i vreme opsluge. Algoritam startuje ponovo započinjanjem novog ciklusa.

Podaci dobijeni primenom modela (veličina plotuna i vreme opsluge plotuna na nultom preseku) predstavljaju ulaz za naredni korak, koji podrazumeva predikciju karakteristika kretanja plotuna, predstavljen u narednom delu poglavlja.



Slika 7-1 Algoritam utvrđivanja plotuna vozila na početnoj raskrsnici

## 7.2 Model uticaja veličine plotuna na karakteristike kretanja

Model uticaja veličine plotuna na karakteristike kretanja formiran je na osnovu rezultata istraživanja procesa kretanja plotuna vozila na gradskim arterijama.

Postupak formiranja modela baziran je na sledećim zaključcima:

- Broj vozila u plotunu utiče na karakteristike kretanja plotuna
- Pozicija preseka posmatranja u odnosu na nulti utiče na karakteristike kretanja plotuna
- Vreme opsluge plotuna na nultom preseku utiče na vreme opsluge na posmatranom preseku

Na osnovu predstavljenih zaključaka formirana je višestruka regresija na osnovu koje je moguće utvrditi odnos između vremena prolaska plotuna na posmatranom preseku i raskrsnici, u odnosu na naredne ulazne podatke:

- Broj vozila u plotunu utvrđen po predstavljenoj procedure u momentu formiranja plotuna  $n$  [-]
- Vreme opsluge plotuna na početnoj raskrsnici  $t_0$  [s]
- Položaj posmatranog preseka u odnosu na početnu raskrsnicu na kojoj dolazi do formiranja plotuna  $L$  [m]

Model na osnovu kojeg se utvrđuje odnos vremena prolaska plotuna na posmatranom i nultom preseku  $t_{presek/0}$  ima oblik:

$$t_{presek/0} = \beta_0 + \beta_1 \cdot n + \beta_2 \cdot L \quad (7-1)$$

Vreme opsluge plotuna na početnoj raskrsnici nije direktno ušao u model, s obzirom da je očekivano dao visok stepen korelacije u odnosu na prisutan broj vozila, ali se kao parametar koristi u utvrđivanju vremena opsluge na posmatranom preseku.

Odnos vremena prolaska plotuna na posmatranom preseku i raskrsnici koji predstavlja izlaz iz modela utvrđuje se na sledeći način:

$$t_{presek/0} = \frac{t_{presek}}{t_0} \quad (7-2)$$

Pri čemu  $t_0$  predstavlja vreme opsluge na početnoj raskrsnici, dok  $t_{presek}$  predstavlja izvedenu veličinu vremena prolaska plotuna na posmatranom preseku preko utvrđenog odnosa posmatranih veličina.

Na osnovu izračunatog vremena opsluživanja plotuna na posmatranom preseku moguće je utvrditi i prosečan interval sleđenja plotuna.

$$\overline{t_{npresek}} = \frac{t_{presek}}{n} \quad (7-3)$$

Rezultati primenjene višestruke linearne regresije su dobijeni primenom softverskog paketa SPSS i prikazani su u narednim tabelama.

Tabela 7-1 Vrednovanje nezavisne promenljive

	B	Standardna greška	Značajnost	Beta	Tolerancija	VIF
<b>Konstanta</b>	0.7600	0.012	<0.05			
<b>Broj vozila u plotunu</b>	0.0047	0.000	<0.05	0.645	1.000	1.0
<b>Položaj preseka</b>	0.0003	0.000	<0.05	0.641	1.000	1.0

I kolona *B* i *standardna greška* prikazuju nestandardizovane koeficijente. Kako bi rezultati mogli da se porede vrši se standardizacija koeficijenata prikazana u koloni *beta*. Standardizacija podrazumeva da su vrednosti promenljivih konvertovane na istu skalu kako bi moglo da se izvrši poređenje. Vrednosti date u pomenutoj koloni se koriste za utvrđivanje doprinosa nezavisnih promenljivih, na osnovu čega se zaključuje da obe promenljive približno jednako doprinose objašnjavanju zavisne promenljive.

Ispitivanje pojedinačnog značaja nezavisnih promenljivih uključenih u formiranje modela pokazalo je da sve nezavisne promenljive modela značajno doprinose predviđanju izlaza za  $p < 0.05$ , što se uočava u koloni *značajnosti*.

Kao deo procedure višestruke regresije vrši se ispitivanje kolinearnosti promenljivih. Rezultati pomenute analize dati su u kolonama *Tolerancija* i *VIF* (faktor povećanja varijanse). Vrednosti *Tolerancije* ne bi trebalo da uzimaju vrednost ispod 0.1, do *VIF* ne bi trebalo da bude preko 10.

Tabela 7-2 Vrednovanje modela

R	R <sup>2</sup>	Korigovan R <sup>2</sup>	Standardna greška
0.910	0.828	0.823	0.03109

Na osnovu prikazanih rezultata u tabeli (Tabela 7-2) uočava se visok stepen koeficijenta determinacije od 0.828. Iako korigovani koeficijent determinacije daje bolju procenu stvarne vrednosti koeficijenta u populaciji izračunatu na malom uzorku, u analizi su dobijene gotovo identične vrednosti.

U tabeli se očitavaju parametri koji figuriraju u modelu u koloni B na osnovu čega je formiran konačan oblik modela:

$$t_{presek/0} = 0.76 + 0.0047 \cdot n + 0.0003 \cdot L \quad (7-4)$$

### 7.3 Analiza rezultata primenom formiranog modela sa modelom Robertsona

Testiranje primene razvijenog modela vršeno je utvrđivanjem odstupanja vremena prolaska plotuna u odnosu na realne podatke i upoređivanjem sa dobijenim odstupanjem primenom usvojenog Robertsonovog modela.

Na osnovu broja vozila i vremena prolaska na nultom preseku utvrđena su vremena prolaska plotuna na posmatranom preseku po ranije definisanom izrazu (Formula 7-4). Na osnovu primenjenog Robertsonovog modela i izvršene kalibracije parametara (Tabela 6-3) utvrđena su vremena prolaska plotuna po ciklusu na posmatranom preseku. Ovako dobijeni rezultati za oba modelu su se poredili sa realnim podacima dobijenih istraživanjem.

Kao pokazatelj efikasnosti primenjenog modela primenjivala se srednja apsolutna greška na osnovu narednog izraza:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - w_i| \quad (7-5)$$

Pri čemu  $x_i$  predstavlja vrednost vremena prolaska plotuna dobijena modelom,  $w_i$  realno vreme prolaska plotuna na posmatranom preseku, a  $N$  ukupan broj posmatranih plotuna.

Dobijeni rezultati prikazani su u narednim tabelama posmatrano presecima (Tabela 7-3), (Tabela 7-4).

**Tabela 7-3 Prosečno vreme prolaska plotuna na prvom preseku u zavisnosti od primenjenog modela, posmatrano po lokacijama**

Vreme prolaska plotuna	R2	R4	R5	R6	R7	R8
Prosečno vreme prolaska plotuna (realni podaci)	37.76	17.26	27.38	15.23	31.91	43.46
Prosečno vreme prolaska plotuna (model)	36.80	17.43	29.84	14.25	32.67	44.41
MSE (model)	4.35	1.18	4.77	2.54	4.75	5.40
Učešće MSE u vremenu prolaska plotuna (model)	0.12	0.07	0.17	0.17	0.15	0.12
Prosečno vreme prolaska plotuna (Robertson)	36.25	24.40	32.05	18.44	32.86	49.00
MSE (Robertson)	5.78	6.98	6.28	3.43	6.86	6.73
Učešće MSE u vremenu prolaska plotuna (Robertson)	0.15	0.40	0.23	0.23	0.21	0.15



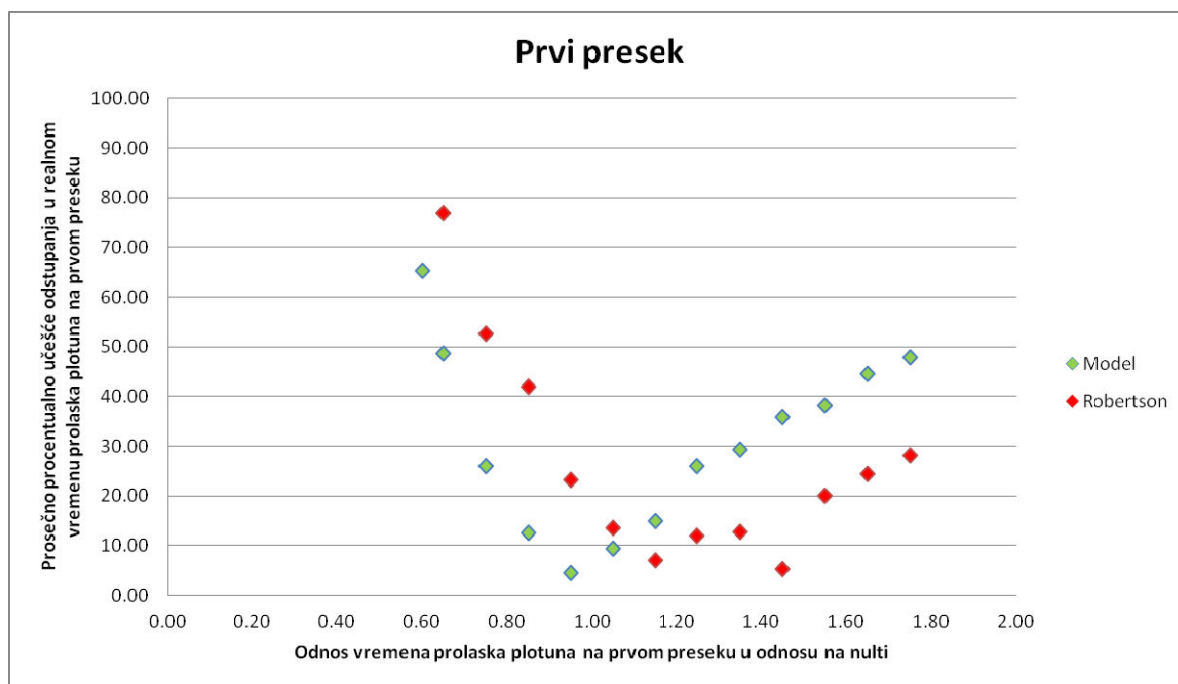
Tabela 7-4 Prosečno vreme prolaska plotuna na drugom preseku u zavisnosti od primenjenog modela, posmatrano po lokacijama

Vreme prolaska plotuna	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Prosečno vreme prolaska plotuna (realni podaci)	28.23	38.39	21.05	20.41	30.05	17.50	37.83	38.23
Prosečno vreme prolaska plotuna (model)	28.16	40.71	21.22	18.79	30.17	17.92	37.07	45.53
MSE (model)	1.95	7.74	2.23	3.82	5.46	3.49	4.78	9.66
Učešće MSE u vremenu prolaska plotuna (model)	0.07	0.20	0.11	0.19	0.18	0.20	0.13	0.25
Prosečno vreme prolaska plotuna (Robertson)	29.03	43.33	24.71	27.80	32.36	18.41	39.30	49.20
MSE (Robertson)	2.29	13.37	3.66	7.63	5.91	3.61	6.98	11.70
Učešće MSE u vremenu prolaska plotuna (Robertson)	0.08	0.35	0.17	0.37	0.20	0.21	0.18	0.31

Primenom proračuna srednje apsolutne greške (MSE) izvršena je ocena primenjenih modela. Kako bi adekvatno moglo da se isprati odstupanje rezultata modela u odnosu na realne podatke u tabelama je prikazano i učešće odstupanja u odnosu na realno vreme prolaska plotuna na posmatranom preseku i lokaciji. Na osnovu dobijenih podataka zaključuje se da se za prvi presek dobija rezultat sa manjom greškom u odnosu na drugi presek. Kod drugog preseka greška se povećava sa porastom vremena prolaska plotuna. Za oba preseka i sve lokacije prosečno odstupanje svih vrednosti dobijenih primenom modela razvijenog u disertaciji je manje u odnosu na rezultate dobijene Robertsonovim modelom. Značajne razlike između dobijenih vrednosti MSE-a, po lokacijama i presecima koja je prisutna na R4, posledica su značajnog učešća ciklusa u kojima dolazi do minimalne promene vremena prolaska plotuna između nultog i prvog preseka, za koje razvijeni model daje najpreciznije rezultate.

Prikazane vrednosti u tabeli se odnose na sve rezultate nezavisno od karakteristike plotuna. Međutim separatnim posmatranjem ciklusa, uočeno je da se preciznost modela značajno povećava za manje promene vremena prolaska plotuna na posmatranom preseku u odnosu na nulti nezavisno da li je došlo do skupljanja ili rasturanja plotuna.

Zbog navedenog, pristupa se detaljnijoj analizi dobijenih rezultata. Za svaki posmatrani plotun utvrđuje se odstupanje dobijenih vrednosti vremena prolaska u odnosu na realne podatke za oba primenjena modela, a zatim se proračunavalo učešće odstupanja u realnom vremenu prolaska plotuna na posmatranom preseku. Na osnovu karakteristika kretanja, koje su izražene kao odnos vremena prolaska plotuna na posmatranom u odnosu na nulti presek, formirane su klase u koracima od 0.1. Na nivou svake klase utvrđen je broj plotuna, kao i prosečno učešće odstupanja primenjenog modela. Na osnovu obavljenih analiza formirani su naredni grafici (Slika 7-2), (Slika 7-3).

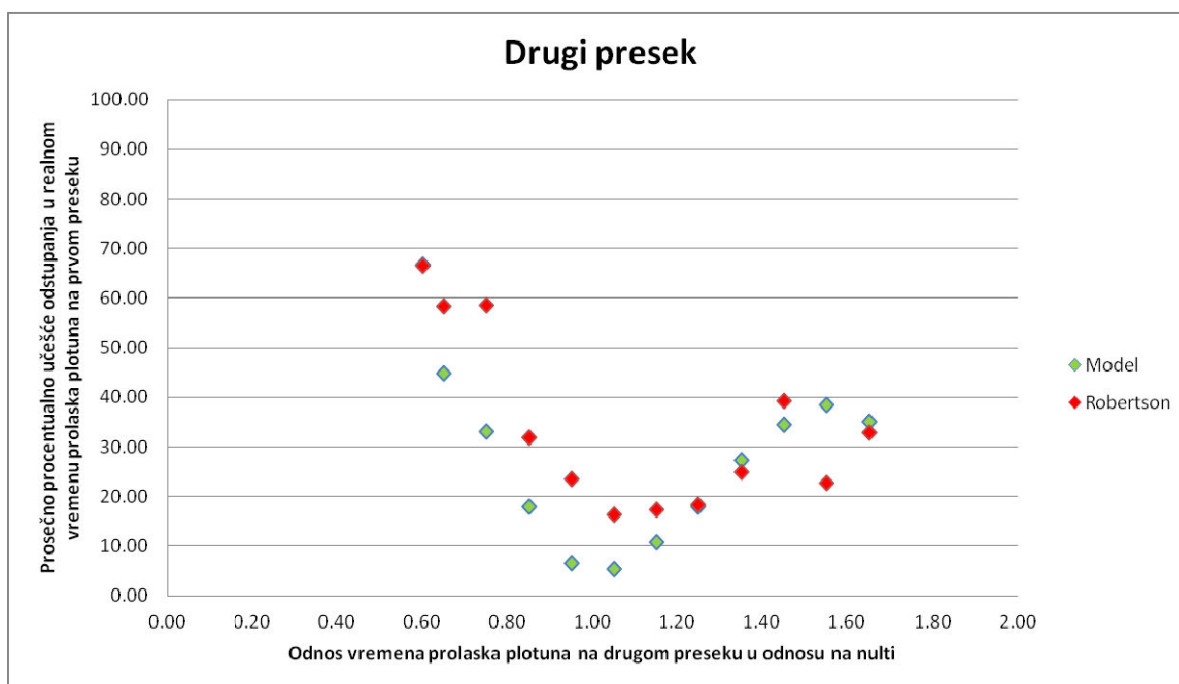


Slika 7-2 Prosečno procentualno odstupanje vremena prolaska plotuna na prvom preseku u zavisnosti od primenjenog modela i karakteristike kretanja plotuna

Na grafiku (Slika 7-2) su predstavljene prosečne vrednosti procentualnog učešća odstupanja vremena prolaska plotuna na prvom preseku u odnosu na realno vreme prolaska za oba primenjena modela, a za odgovarajuću klasu karakteristika kretanja plotuna. Sa grafika se može uočiti manje odstupanje razvijenog modela u odnosu na Robertsonov model, za sve klase manje od 1.1. Za klase manje od 1.1 razvijeni model u proseku odstupa za 27%, dok Robertsonov model u proseku odstupa za 54% u odnosu na realne podatke. Za sve vrednosti odnosa vremena prolaska veće od 1.1 odstupanje razvijenog modela je veća u odnosu na Robertsonov model, i to za razvijeni model 34%, dok je za Robertsonov model odstupanje od realnog vremena prolaska plotuna na prvom preseku jednako 16%. Uzimanje u obzir broj plotuna po klasama, predstavljen u tabeli (Tabela 7-5) uočava se da 82% plotuna realizuju vreme prolaska na prvi u odnosu na nulti presek manji od 1.1. Na osnovu ovoga se može zaključiti da će u 82% slučajeva razvijeni model dati bolje rezultate u odnosu na Robertsonov.

Tabela 7-5 Učešće plotuna u ukupnom uzorku po posmatranim klasama odnosa vremena prolaska plotuna na prvom u odnosu na nulti presek.

Odnos vremena prolaska plotuna	Učešće plotuna u ukupnom uzorku
<0.6	0.01
0.6 - 0.7	0.03
0.7 - 0.8	0.14
0.8 - 0.9	0.21
0.9 - 1	0.25
1 - 1.1	0.19
1.1 - 1.2	0.10
1.2 - 1.3	0.02
1.3 - 1.4	0.03
1.4 - 1.5	0.00
1.5 - 1.6	0.01
1.6 - 1.7	0.00
>1.7	0.01



Slika 7-3 Prosečno procentualno odstupanje prognoziranog vremena prolaska plotuna na drugom preseku u zavisnosti od primenjenog modela i karakteristike kretanja plotuna

Posmatranjem dobijenih rezultata na drugom preseku (Slika 7-3) uočava se da za sve vrednosti klase manje od 1.4 razvijeni model ima isto ili manje odstupanje u odnosu na rezultate dobijene Robertsonovim modelom. Za klase manje od 1.4 razvijeni model u proseku odstupa za 25%, dok Robertsonov model u proseku odstupa za 36% u odnosu na realne podatke. Za vrednosti veće od 1.4 Robertsonov model daje bolji rezultat, i to za razvijeni model 34%, dok je za Robertsonov model odstupanje od realnog vremena prolaska plotuna na

drugom preseku jednako 30%.

**Tabela 7-6 Učešće plotuna u ukupnom uzorku po posmatranim klasama odnosa vremena prolaska plotuna na drugom u odnosu na nulti presek.**

Odnos vremena prolaska plotuna	Učešće plotuna u ukupnom uzorku
<0.6	0.01
0.6 - 0.7	0.05
0.7 - 0.8	0.14
0.8 - 0.9	0.14
0.9 - 1	0.10
1 - 1.1	0.22
1.1 - 1.2	0.12
1.2 - 1.3	0.12
1.3 - 1.4	0.04
1.4 - 1.5	0.02
1.5 - 1.6	0.01
1.6 - 1.7	0.01
>1.7	0.01

Za ekstremne varijante bilo rasturanja ili skupljanja plotuna, odstupanje oba modela se značajno povećava. Dodatno Robertsonov model je osetljiv na skupljanje plotuna, kada daje značajno veće odstupanje od realnih podataka. Ako se prethodna konstatacija posmatra kroz činjenicu da se karakteristike kretanja najvećeg broja plotuna (rasturanja ili skupljanja) kreće u granicama 0.7-1.2 (88%) na prvom preseku, odnosno 0.7-1.3 (83%) na drugom preseku jasno je da će primena modela razvijenog u disertaciji dati bolje rezultate. Dodatno u prilog razvijenog modela ide i činjenica da su parametri Robertsonovog modela kalibrisani pojedinačno za svaku lokaciju i svaki posmatrani presek, za razliku od razvijenog modela koji podrazumeva primenu odgovarajuće funkcije u zavisnosti od preseka, što značajno uprošćava predikciju vremena prolaska plotuna.

## 8. ZAKLJUČAK

Upravljanje saobraćajem na gradskim arterijama zahteva usaglašavanje rada svetlosnih signala na unapred definisanom nizu raskrsnica. Usaglašenim ili koordinisanim radom signala ostvaruje se kraće vreme putovanja, kao primarnog pokazatelja nivoa usluge duž arterije. Smanjenjem broja zaustavljanja na raskrnicama postiže se harmonizacija brzina saobraćajnog toka, što utiče na povećanje bezbednosti saobraćaja, smanjenje potrošnje goriva, nivoa buke i emisije izduvnih gasova. Cilj procesa upravljanja je da plotun vozila formiran na početnoj raskrsnici prođe celokupnu arteriju bez zaustavljanja. S obzirom da na svako pojedinačno vozila u plotunu utiču spoljašnji i unutrašnji faktori, tokom kretanja dolazi do modifikacije plotuna, koja se manifestuje kroz fenomen skupljanja ili rasturanja plotuna.

Osnovni nedostatak postojećih modela kretanja plotuna odnose se na činjenicu da opisuju isključivo fenomen rasturanja plotuna. Međutim, transformacija urbanog saobraćajnog sistema dovela je do promena u karakteristikama kretanja plotuna vozila, koje za posledicu imaju sve češću pojavu skupljanja plotuna. Na ovoj pretpostavci bazirana je polazna hipoteza da se postojeći modeli ne mogu apriori prihvatiti kao merodavni za opisivanje kretanja plotuna vozila na gradskim arterijama, što je dokazano na osnovu rezultata istraživanja i praktične primene odabranih postojećih modela. U više od 52% istraženih plotuna registrovan je fenomen skupljanja, a time i značajno odstupanje postojećih modela (Robertson i HCM) od realnih podataka. Formirani model, koji predstavlja osnovni doprinos disertacije, opisuje fenomen i rasturanja i skupljanja plotuna, čime je eliminisan osnovni nedostatak postojećih modela.

Hipoteza o kvantifikovanju uticaja najznačajnijih unutrašnjih faktora na kretanje plotuna vozila se ne može u potpunosti prihvatiti, a ni odbaciti. Kao najznačajniji unutrašnji faktori izdvojeni su veličina plotuna i brzina kretanja plotuna. Istraživanjem je utvrđeno da brzina kretanja plotuna nije u dovoljno jakoj funkcionalnoj zavisnosti sa karakteristikama kretanja plotuna vozila ( $R^2 < 0.8$ ). Sa druge strane, dokazana je jaka funkcionalna zavisnost ( $R^2 > 0.8$ ) između veličine plotuna i karakteristika kretanja plotuna, čime je potvrđena hipoteza o dominantnom uticaju veličine plotuna na karakteristike kretanja plotuna.

Kao osnovni naučni doprinosi istraživanja u okviru disertacije, izdvajaju se naredni:

- Definisane plotuna vozila;

Predmet doktorske disertacije je analiza karakteristika kretanja plotuna vozila na gradskim arterijama. Oprečni stavovi u literaturi i odsustvo jedinstvene definicije plotuna vozila, nametnuli su dodatni zadatak jasnog definisanja plotuna vozila u disertaciji, s obzirom da isti predstavlja neophodan korak za realizaciju osnovnog cilja istraživanja.

U literaturi, kritičan interval sleđenja se dominantno koristi kao kriterijum za definisanje plotuna. Primena kritičnog intervala sleđenja za sobom povlači niz nedoumica, koje se pre svega odnose na utvrđivanje njegove vrednosti. Primena različitih vrednosti kritičnog intervala sleđenja ukazuje na to da ne postoji jasna procedura za njegovo utvrđivanje.

Naredna nedoumica odnosi se na primenu kritičnog intervala sleđenja u slučaju postojanja većeg broja saobraćajnih traka. Postojeća literatura ne naglašava eksplicitno da li se kritičan interval sleđenja posmatra na preseku po saobraćajnoj traci ili na preseku deonice nezavisno od saobraćajne trake. U disertaciji je na osnovu istraživanja zaključeno da se kritičan interval sleđenja mora posmatrati nezavisno od saobraćajne trake, kako bi se eliminisao uticaj neravnomerne raspodele vozila po saobraćajnim trakama.

Primena isključivo kritičnog intervala sleđenja za definisanje plotuna predstavlja izazov u specifičnim situacijama uočenim tokom istraživanja. Analizom realnih procesa pražnjenja reda, između pojedinih vozila iz reda registrovana je realizacija intervala sleđenja većeg od kritičnog, što posledično znači da se plotun deli na veći broj manjih plotuna. Međutim, u ovakvim slučajevima vozači najčešće nakon ulaska na deonicu agresivnijom vožnjom smanjuju interval sleđenja i priključuju se plotunu. Takođe, u određenim situacijama, uočeno je da vozila koja nisu bila deo reda i koja su ostvarila interval sleđenja veći od kritičnog, kasnije na deonici sustižu i neretko prestižu vozila na začelju plotuna, čime se na narednom preseku (narednoj raskrsnici ili na deonici) njihov uticaj i prisustvo u plotunu ne može eliminisati.

Na osnovu rezultata istraživanja, uzimajući u obzir i navedene specifične situacije, formiran je model za definisanje plotuna vozila. Razvijeni model baziran je na zaključku da sva vozila koja u kontinuitetu realizuju interval sleđenja manji od 2.1 s čine plotun, dok će nakon prve realizacije intervala sleđenja veće od 2.1 s sva ostala vozila biti deo plotuna sa određenom verovatnoćom. Verovatnoća da će vozila biti deo plotuna zavisi od pozicije vozila i intervala sleđenja posmatranog u odnosu na poslednje vozilo u plotunu. Na ovaj način je dokazano da za definisanje plotuna vozila nije dovoljna primena samo kritičnog intervala sleđenja.

- kvantifikacija uticaja brzine plotuna na karakteristike kretanja plotuna;

Analiza uticaja brzine plotuna na karakteristike kretanja plotuna izvršena je na osnovu rezultata istraživanja dobijenih na drugom preseku, odnosno na 500-tom metru deonice. Zaključeno je da postoji izvesna funkcionalna zavisnost između vremena putovanja i karakteristika kretanja plotuna. Povećanjem vremena putovanja, odnosno smanjenjem brzine dolazi do povećanja vremena prolaska plotuna na posmatranom preseku. Za vreme putovanja plotuna manje od 40 s, što odgovara brzini od 45 km/h, vreme prolaska plotuna je isto ili manje u odnosu na nulti presek, odnosno dolazi do sakupljanja plotuna. Za brzine manje od navedene dolazi do suprotnog fenomena, rasturanja plotuna. Na osnovu rezultata formiran je opšti zaključak da se uticajem na brzinu kretanja plotuna može odložiti rasturanje plotuna.

Dodatno, analizom ponašanja prvog vozila iz reda, zaključeno je da njegovo ekstremno ponašanje (pasivno ili agresivno) ne utiče na karakteristike kretanja plotuna.

- kvantifikacija uticaja veličina plotuna na kretanje plotuna;

Na osnovu rezultata istraživanja zaključeno je da je vreme potrebno za prolazak plotuna na prvom preseku manje od vremena na nultom i drugom preseku, nezavisno od veličine plotuna. Takođe, odnos vremena potrebnog za prolazak plotuna na nultom i drugom preseku zavisi od broja vozila u plotunu. Vreme potrebno za prolazak plotuna veličine do 18 vozila je manje na drugom preseku u odnosu na nulti. Na osnovu navedenog se može zaključiti da se upravljanjem veličinom plotuna može uticati na karakteristike kretanja plotuna. Maksimalni mogući broj vozila u plotunu zavisi od kapaciteta prilaza, odnosno broja saobraćajnih traka, vrednosti zasićenog saobraćajnog toka i udela efektivnog zelenog signalnog pojma u ciklusu, pri čemu su za konkretan prilaz prva dva navedena parametra fiksna. S tim u vezi, veličinom plotuna se može isključivo upravljati pomoću udela efektivnog zelenog signala u ciklusu.

- Sistematizacija i ocena postojećih modela kretanja plotuna vozila;

Pregledom literature i analizom rezultata istraživanja izvršena je ocena postojećih modela sa aspekta praktične primene. Model formiran od strane Lighthill i Whitham je ocenjen kao teorijski, a mogućnost praktične primena modela se značajno umanjuje zbog obimnog proračuna i komplikovane grafičke interpretacije. Pacey model je baziran na pretpostavci da

vreme putovanja vozila u plotunu ima normalnu raspodelu. Analizom rezultata zaključeno je da distribucija vremena putovanja na svim lokacijama i presecima statistički značajno odstupa od normalne raspodele. Robertsonov i HCM-ov model su testirani na realnim podacima, a ocena modela je izvršena na osnovu kriterijuma podudarnosti. Zaključeno je da Robertsonov model bolje opisuje realne podatke. Takođe, Robertsonov model je kalibrisan na dva moguća načina i zaključeno je da prvi način kalibracije, minimiziranje RMSE, daje bolje rezultate u odnosu na drugi, proračun parametara  $\alpha$  i  $\beta$ .

- Formiranje i verifikacija modela kretanja plotuna na gradskim arterijama;

Formiranim modelom koji opisuje kretanje plotuna vozila postignut je osnovni cilj disertacije i ujedno prevaziđen osnovni nedostatak postojećih modela. Originalnost formiranog modela se ogleda u mogućnosti da opiše oba fenomena, rasturanje i skupljanje plotuna. Primenom modela u realnim uslovima, zaključeno je da je model proceduralno jednostavan i praktičan za primenu.

Ograničenje primene modela postoji u situacijama kada dolazi do značajne promene u intervalima sleđenja na uzastopnim presecima, to jest kada odnos vremena prolaska plotuna kroz posmatrane preseke izlazi iz opsega 0.7 - 1.3. U ovakvim slučajevima se greška modela značajno povećava. Za vrednosti odnosa vremena prolaska plotuna preko 1.3, Robertsonov model daje bolje rezultate, ali uzimajući u obzir da je ovakva situacija registrovana u samo 7% snimljenih plotuna, može se smatrati da će u velikoj većini slučajeva formirani model dati bolje rezultate.

Verifikacija modela izvršena je utvrđivanjem odstupanja vremena prolaska plotuna u odnosu na realne podatke i poređenjem sa dobijenim odstupanjem kalibrisanog Robertsonovog modela.

- Preporuke za projektovanje linijske koordinacije

Dosadašnje preporuke za projektovanje koordinisanog rada svetlosnih signala baziraju se na teorijskim saznanjima o fenomenu rasturanja plotuna, što posledično iziskuje potrebu za kontinualnim povećanjem dužine zelenog signalnog pojma duž arterije. Na osnovu rezultata dobijenih u disertaciji formirane su naredne preporuke:

- vreme opsluge plotuna na izabranom preseku, odnosno dužinu trajanja zelenog signalnog pojma na narednim raskrsnicama potrebno je utvrditi primenom formiranog modela;
- vreme opsluge na izabranom preseku, odnosno dužina trajanja zelenog signalnog pojma može se prilagoditi upravljanjem veličinom plotuna, odnosno udelom efektivnog zelenog vremena u ciklusu na početnoj raskrsnici;
- minimalna preporučena brzina pri projektovanju pomaka zelenog vremena između susednih raskrsnica je 45 km/h, jer se za niže vrednosti ostvaruje veće rasturanje plotuna.

### ***Pravci budućih istraživanja***

U disertaciji su analizirane karakteristike kretanja plotuna u delimično izolovanim uslovima, odnosno uz minimizaciju uticaja spoljnih faktora. Pod spoljnim faktorima se pre svega misli na uticaj rada narednog signala na ponašanje plotuna. Osnovni pravci budućih istraživanja bi se odnosili na utvrđivanje uticaja parametara koordinisanog rada svetlosnih signala na karakteristike kretanja plotuna.

Formiranim modelom moguće je utvrditi karakteristike kretanja plotuna i na većim rastojanjima, s obzirom da je prostorna obuhvatnost istraživanja sprovedenih u okviru disertacije na rastojanja do 500 m, neophodno je da se u budućim istraživanjima verifikuje preciznost modela za veća rastojanja.



**LITERATURA**

- Al-Kaisy, A. and Durbin, C. (2011) 'Platooning on two-lane two-way highways: An empirical investigation', in *In Procedia - Social and Behavioral Sciences, 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service*, pp. 329–339. doi: 10.1016/j.sbspro.2011.04.454.
- Athol, P. (1968) 'Headway groupings', *Highway Research Record, Highway Research Board*, (72), pp. 137–155.
- Baass, K. and Lefebvre, S. (1988) 'Analysis of platoon dispersion with respect to traffic volume', *Transportation Research Record: Traffic Flow Theory and Highway Capacity*, 1194, pp. 64–76.
- Bie, Y. *et al.* (2013) 'Calibration of platoon dispersion parameter considering the impact of the number of lanes', in *Transportation Research Board, 91st Annual Meeting, Washington D.C.* doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000443.
- Bie, Y. *et al.* (2015) 'Development of a new platoon dispersion model considering turning vehicles in urban road environment', *Advances in Mechanical Engineering*, 6, p. 8. doi: 10.1155/2014/279570.
- Bonneson, J., Pratt, M. and Vandehey, M. (2010) 'Predicting arrival flow profiles and platoon dispersion for urban street segments', *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2173, pp. 28–35. doi: 10.3141/2173-04.
- Bullock, D. and Abbas, M. (2001) *Real-time offset transitioning algorithm for coordinating traffic signals, Report no. FHWA/IN/JTRP-2001/05. Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation.* doi: 10.3141/1748-04.
- Castle, D. E. and Bonnivelle, J. W. (1984) 'Platoon dispersion over long road links', *Transportation Research Board, 64th Annual Meeting, Washington D.C.* Transportation Research Record 1021, 1021, pp. 36–44.
- Čelar, N. (2013) *Prilog analizi saobraćajnog procesa na signalisanoj raskrsnici, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.*
- Čelar, N. *et al.* (2018) 'Methodology for control delay estimation using new algorithm for critical points identification', *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, 144(2), pp. 1–8. doi: 10.1061/JTEPBS.0000110.
- Čelar, N., Stanković, S. and Kajalić, J. (2018) *Osnove upravljanja svetlosnim signalima. Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet.*
- Chaudhary, N., Abbas, M. and Charara, H. (2006) 'Development and Field Testing of Platoon Identification and Accommodation System', *Transportation Research Record*, 1978(1), pp. 141–148. doi: 10.3141/1978-19.
- Collins, J. F. and Gower, P. (1974) *Dispersion of Traffic Platoons on A4 in Hounslow, TRRL Rept. SR 29UC, Berkshire, England.*
- Denney, R. W. (1989) 'Traffic platoon dispersion modeling', *Journal of the Transportation Engineering*, 115(2), pp. 193–207. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1989\)115:2\(193\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1989)115:2(193)).
- El-Reedy, T., Y. and Ashworth, R. (1978) 'Platoon Dispersion Along a Major Road in Sheffield', *Traffic Engineering and Control*, 19(4), p. 1978.

- Farzaneh, M. (2005) *Modeling traffic dispersion, PhD disertation*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- Farzaneh, M. and Rakha, H. (2005) 'Macroscopic modeling of traffic dispersion: Issues and proposed solutions', *Transportation Research Board, 84th Annual Meeting, Washington D.C.*
- Farzaneh, M. and Rakha, H. (2006) 'Procedures for calibrating TRANSYT platoon dispersion model', *Journal of Transportation Engineering*, 132(7). doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:7(548).
- Forde, A. and Daniel, J. (2017) 'Performance evaluation of the HCM 2010 platoon dispersion model under midblock pedestrian and truck traffic friction conditions', *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. Elsevier Ltd, 4(6), pp. 522–534. doi: 10.1016/j.jtte.2017.04.003.
- Gartner, N. H. and Deshpande, R. (2010) 'Traffic flow characteristics in coordinated signal systems', in *Summer 2010 Meeting of Traffic Flow Theory and Characteristics Committee*. France.
- Gaur, A. and Mirchandani, P. (2001) 'Method for Real-Time Recognition of Vehicle Platoons', *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1748(1), pp. 8–17. doi: 10.3141/1748-02.
- Glomb, A. J. (1989) *Dispersion of traffic platoons, MsC Thesis, The University of Arizona*.
- Grace, M. J. and Potts, R. B. (1964) 'a Theory of the diffusion of traffic platoons', *Operations Research*, 12(2), pp. 255–275. doi: 10.1287/opre.12.2.255.
- Graham, F. E. and Chenu, C. D. (1962) 'A Study of Unrestricted Platoon Movement of Traffic', in *Traffic Engineering*, pp. 11–13.
- HCM (2010) 'Highway Capacity Manual', in. Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Hoogendoorn, S. P. and Knoop, V. (2012) 'Traffic flow theory and modelling', *The Transport System and Transport Policy: An Introduction*, pp. 125–159.
- Ivanović, I. (2016) *Modeliranje opterećenja ulične mreže za različite vremenske prilike, Doktorska disertacija*. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.
- James, G. et al. (2013) *An Introduction to Statistical Learning*. Springer, New York. doi: 10.1007/978-1-4614-7138-7.
- Jiang, Y., Li, S. and Shamo, D. (2002) 'Development of vehicle platoon distribution models and simulation of platoon movements on Indian rural corridors', *Report no. FHWA/IN/JTRP-2002/23, Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation*.
- Kajalić, J., Čelar, N. and Stanković, S. (2018) 'Travel time estimation on urban street segment', *Promet - Traffic&Transportation*, 30(1), pp. 115–120. doi: 10.7307/ptt.v30i1.2473.
- Lighthill, M. J. and Whitham, G. B. (1955) 'On kinematic waves. I Flow movement in long rivers. II A theory of traffic flow on long crowded roads.', *Proceedings of The Royal Society*, 229((A)), pp. 281–345. doi: 10.1098/rspa.1955.0088.
- Linl, L., Tsao, S. and Su, J. (1993) 'A platoon dispersion concept for critical block length for coordinated traffic signal design', in *Compendium of Technical Papers, ITE, 63rd Annual Meeting, Netherlands*, pp. 478–482.
- Mashros, N. et al. (2014) 'Exploring the pattern of platoon dispersion caused by traffic signal',

*Jurnal Teknologi*, 71(3), pp. 7–13. doi: 10.11113/jt.v71.3751.

Mathew, J. *et al.* (2013) 'Studying platoon dispersion characteristics under heterogeneous traffic in India', *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2nd Conference of Transportation Research Group of India. Elsevier B.V., 104, pp. 422–429. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.11.135.

Mccooy, P. T. *et al.* (1983) 'Calibration of TRANSYT Platoon Dispersion Model for Passenger Cars Under Low-Friction Traffic Flow Conditions', *Transportation Research Record 905*, TRB, National Research Council, Washington D.C, (position C), pp. 48–52.

McTrans (2008) 'TRANSYT - 7F'. University of Florida.

Michalopoulos, P. and Pisharody, V. (1980) 'Platoon dynamics on signal controlled arterials', *Transportation Science*, 14(4), pp. 365–396. doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.14.4.365>.

Missouri state, H. highway department P. (1969) *Platoon dispersion at selected distances from signalized intersections*, Report no. 68-6 Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation.

National Research Council (2000) *Highway Capacity Manual*, Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

Paul, B., Mitra, S. and Maitra, B. (2016) 'Calibration of Robertson's platoon dispersion model in non-lane based mixed traffic operation', *Transportation in Developing Economies*. Springer International Publishing, 2(2), p. 11. doi: 10.1007/s40890-016-0016-7.

Peng, C. J., Lee, K. L. and Ingersoll, G. M. (2002) 'An Introduction to Logistic Regression Analysis and Reporting; The Journal of Educational Research, Vol. 96(1)', *The Journal of Educational Research*, 96(1), pp. 3–14.

Praveen, P. S. and Ashalatha, R. (2016) 'Platoon diffusion along signalized corridors', *Procedia Technology*. The Author(s), 25(Raerest), pp. 154–161. doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.092.

Qiao, F., Li, Q. and Yu, L. (2017) 'Updated traffic flow dispersion model considering effects of in-vehicle advisory messages', *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 4(3), pp. 3–6. doi: 10.4172/21.

Qu, Z. *et al.* (2013) 'The departure characteristics of traffic flow at the signalized intersection', *Mathematical Problems in Engineering*, 2013. doi: 10.1155/2013/671428.

Robertson, D. (1969) *TRANSYT: A Traffic Network Study Tool*. RRL Report LR 253, Road Research Laboratory, U.K.

Rodriguez, L. *et al.* (1977) 'Vehicle Platoon Parameters : Methodology for Traffic Control', in *56th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington District of Columbia, United States, pp. 62–64.

Seddon, P. A. (1972) 'The prediction of platoon dispersion in the combination methods of linking traffic signals', *Transportation Research*, 6(2), pp. 125–130. doi: 10.1016/0041-1647(72)90046-9.

Seldner, K. (1977) *A computerized traffic control algorithm to determine optimal traffic signal settings*, PhD thesis, Toledo University.

Skabardonis, A. and Geroliminis, N. (2005) 'Real-Time Estimation of Travel Times on Signalized Arterials', in *Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. Elsevier, p. pp 387-406. doi: 10.1016/B978-008044680-6/50022-2.

- Smaglik, E. J., Bullock, D. and Sharma, A. (2007) 'Pilot study on real-time calculation of arrival type for assessment of arterial performance', *Journal of Transportation Engineering*, 133(7), pp. 415–422. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:7(415).
- Smelt, J. M. (1984) 'Platoon dispersion data collection and analysis', in *12th Australian Road Research Board Conference, Hobart, Tasmania, 27-31 August 1984*, pp. 71–87.
- Stanković, S. *et al.* (2020) 'Micro and macro approach to modeling relationship between control and stopped delay at signalized intersections', *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, 146(1), pp. 1–19. doi: 10.1061/JTEPBS.0000288.
- Tanner, J. C., Lighthill, M. J. and Whitham, G. B. (1964) *An Introduction to Traffic Flow Theory*, Operational Research Society. doi: 10.2307/3006702.
- Tiapraser, K. (2015) *QUEUE LENGTH ESTIMATION AND PLATOON RECOGNITION USING CONNECTED VEHICLE TECHNOLOGY FOR ADAPTIVE*. Texas A&M University.
- Treiterer, J., Nemeth, Z. and Vesellio, R. (1973a) 'Effect of signal spacing on platoon dispersion', *Finale Report No. EES 311, Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation*.
- Treiterer, J., Nemeth, Z. and Vesellio, R. (1973b) *Effect of signal spacing on platoon dispersion*.
- TRI (1996) *Background Paper No. 9: Signalized intersection spacing*, Transportation Research Institute, Oregon State University.
- Wang, Y. *et al.* (2017) 'Calibration of platoon dispersion model by considering the impact of the percentage of buses at signalized intersections', *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2647, pp. 93–99. doi: <https://doi.org/10.3141/2647-11>.
- Wasson, J. *et al.* (1999) 'Reconciled platoon accommodations at traffic signals', *Report no. FHWA/IN/JTRP-99/1. Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation*, 22(4), pp. 269–280. doi: 10.5703/1288284313301.
- Yu, L. (1999) *Real time calibration of platoon dispersion model to optimize the coordinated traffic signal timing in ATMS networks*, Report no. SWUTC/99/472840-00044-1, Center for Transportation Training and Research, Texas Southern University.
- Yu, L. (2000) 'Calibration of Platoon Dispersion Parameters on the Basis of Link Travel Time Statistics', *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1727(1), pp. 89–94. doi: 10.3141/1727-11.

## Biografija autora

Jelena Kajalić, dipl. inž. saobraćaja, rođena je 12.8.1981. godine u Beogradu, gde je i završila školu. Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu je upisala 2000. godine. Diplomirala je na Katedri za saobraćajno inženjerstvo, na predmetu "Regulisanje i upravljanje saobraćajnim tokovima" 2008. godine, na temu „Zagušenja na gradskoj mreži i kako ih rešavati”.

U martu 2009. godine izabrana je u zvanje saradnika u nastavi, a marta 2010. godine u zvanje asistenta za istu užu naučnu oblast „Regulisanje i upravljanje saobraćajnim tokovima na mreži puteva i ulica“. Angažovana je na sledećim obaveznim predmetima Osnovnih akademskih studija: GIS u saobraćaju, Regulisanje i upravljanje saobraćajnim tokovima – Regulisanje saobraćaja, Regulisanje i upravljanje saobraćajnim tokovima – Upravljanje saobraćajem, Regulisanje i upravljanje saobraćajnim tokovima – Inteligentni transportni sistemi, i na izbornom predmetu Praktikum laboratorijskih vežbi b i Praktikum laboratorijskih vežbi c.

Kao član autorskog tima je učestvovala u 11 studija i projekata od strateškog značaja i 2 naučna projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja. Bila je član komisije za odbranu 33 završna rada. Koautor je pomoćnog udžbenika na predmetima Upravljanja saobraćajem. Kandidat je 2010 godine položila stručni ispit Inženjerske komore Srbije i poseduje licencu propisanu za diplomiranog saobraćajnog inženjera "odgovorni projektant" od 2019 godine. Od 2010 godine član je organizacionog odbora savetovanja sa međunarodnim učešćem TES. Član je komisije za standarde pri Institutu za standardizaciju Srbije u oblasti saobraćajne signalizacije i opreme (KS Z226).

Udata je i majka je dvoje dece.

## Izjava o autorstvu

Ime i prezime  
autora Jelena Kajalić

---

Broj indeksa D10-007

---

### Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

MODELIRANJE KRETANJA PLOTUNA VOZILA NA GRADSKIM ARTERIJAMA

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis autora

U Beogradu, 5. februara 2020.

---

## Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora	Jelena Kajalić
Broj indeksa	D10-006
Studijski program	Saobraćaj
Naslov rada	MODELIRANJE KRETANJA PLOTUNA VOZILA NA GRADSKIM ARTERIJAMA
Mentor	Prof. dr Nikola Čelar

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la radi pohranjena u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis autora

U Beogradu, 5. februara 2020.

---

## Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

### **MODELIRANJE KRETANJA PLOTUNA VOZILA NA GRADSKIM ARTERIJAMA**

---

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo

2. Autorstvo – nekomercijalno

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada

4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima

5. Autorstvo – bez prerada

6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.

Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

Potpis autora

U Beogradu, 5. februara 2020.

---



1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.

4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.

5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.