

UNIVERZITET U BEOGRADU  
SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Stamenka R. Stanković

MODELIRANJE ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG  
TOKA NEZAŠTIĆENOG LEVOG SKRETANJA

doktorska disertacija

Beograd, 2023.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Stamenka R. Stanković

SATURATION FLOW RATE MODELLING OF  
PERMITTED LEFT-TURN

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023.

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

**Članovi komisije:** Vanredni profesor **dr Nikola Čelar**,  
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Docent **dr Jelena Kajalić**,  
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Docent **dr Sanja Fric**,  
Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet

**Datum odbrane:**

# MODELIRANJE ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG TOKA NEZAŠTIĆENOG LEVOG SKRETANJA

**Rezime:** Zasićeni saobraćajni tok je ključan ulazni parametar u postupku optimizacije rada signala i definisan je kao maksimalan broj vozila koja bi mogla da prođu raskrslu ukoliko bi bilo obezbeđeno pravo prolaska tokom celog sata. Međutim, zasićeni saobraćajni tok je ključan i sa aspekta utvrđivanja pokazatelja efikasnosti rada svetlosnih signala, naročito za estimaciju vremenskih gubitaka kao osnovnog parametra za određivanje Nivoa Usluge na raskrslu. Na zasićeni saobraćajni tok levih skretanja dominantno utiče način njihovog tretmana u planu faza, kao zaštićena ili kao nezaštićena. Modeliranje zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja zasnovano je na teoriji prihvatljivog intervala sleđenja namenjenoj neprioritetnim tokovima na nesignalisanim raskrslu, uz apriori poznavanje parametara rada signala.

U ovoj doktorskoj disertaciji razvijena su dva tipa modela zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja, u zavisnosti od načina tretmana konfliktnog toka kao jedinog uticajnog faktora. Oba tipa modela su zasnovana na rezultatima eksperimentalnih terenskih istraživanja na signalisanim raskrslu, i prevazilaze osnovne nedostatke ostalih modela u literaturi. Sprovedena kalibracija baznog modela je pokazala da modeli razvijeni za nesignalisane raskrslu nisu odgovarajući za primenu na signalisanim ukoliko su nepoznati parametri rada signala, što je slučaj na početku procesa njihove optimizacije. Na bazi razvijenog modela predložen je metodološki okvir za donošenje odluke o tretmanu levog skretanja u planu faza, zasnovan na kapacitetu trake za levo skretanje. Metodološki okvir kao i razvijeni modeli su jednostavni i primenjivi u inženjerskoj praksi, odnosno u proceduri optimizacije rada svetlosnih signala.

- Ključne reči:** Signalisana raskrslu, nezaštićena leva skretanja, prihvatljiv interval sleđenja, zasićeni saobraćajni tok, vremenski gubici
- Naučna oblast:** Saobraćajno inženjerstvo
- Uža naučna oblast:** Regulisanje i upravljanje saobraćajnim tokovima na mreži puteva i ulica
- UDK broj:**

# **SATURATION FLOW RATE MODELLING OF PERMITTED LEFT-TURN**

**Abstract:** Saturation flow rate is a fundamental input parameter for signal timing procedure defined as the maximum number of vehicle per hour that can be accommodated per approach lane of an signalized intersection. However, saturation flow rate is also crucial considering estimation of performance measures of signal control, especially for control delay as a basic parameter for determining the Level of Service. Left-turn saturation flow rate is dominantly influenced by its treatment in the signal phase plan, as protected or permitted. Saturation flow rate modelling of permitted left-turn is based on the gap-acceptance theory proposed for lower-priority movements at unsignalized intersections, with a priori knowledge of the signal timing parameters.

In this PhD thesis, two types of permitted left-turn saturation flow models were developed, depending on the conflicting traffic flow treatment as an influencing factor. Both model types are based on the results of experimental field research at signalized intersections, and overcome the basic shortcomings of other models in the literature. The conducted calibration of the base model showed that the model developed for unsignalized intersections is not suitable for use at signalized intersections if the signal timing parameters are unknown, which is the case at the beginning of the process of their optimization. Based on the developed model, a methodological framework was proposed for making a decision on the left-turn treatment in the signal phase plan, based on the capacity of the left-turn lane. The methodological framework as well as the developed models are simple and applicable in engineering practice, i.e. in the procedure of signal timing optimization.

**Keywords:** Signalized intersection, permitted left-turn, critical headway, saturation flow rate, control delay

**Scientific Field:** Traffic engineering

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

**UDC:**

## SADRŽAJ

SPISAK TABELA.....	iii
SPISAK SLIKA .....	v
1. UVODNA RAZMATRANJA.....	1
1.1 FORMULACIJA PROBLEMA.....	1
1.2 CILJEVI I HIPOTEZE U ISTRAŽIVANJU .....	2
1.3 OČEKIVANI DOPRINOS .....	3
1.4 SADRŽAJ RADA.....	3
2. PREGLED RELEVANTNE LITERATURE .....	5
2.1 MODELI KAPACITETA NEPRIORITETNIH TOKOVA .....	6
2.1.1 Analitički modeli kapaciteta neprioritetnog toka.....	6
2.1.1.1 Metode utvrđivanja prihvatljivog intervala sleđenja.....	9
2.1.2 Eksperimentalni modeli kapaciteta neprioritetnog toka .....	14
2.2 PRAKTIČNE METODOLOGIJE PRORAČUNA ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG TOKA	15
2.2.1 Model HCM 6 <sup>th</sup> (Transportation Research Board, 2016).....	15
2.2.1.1 Model za nezaštićena leva skretanja (Transportation Research Board, 2016)	18
2.2.2 Websterov model (Webster & Cobbe, 1966).....	19
2.2.3 Australijski HCM (Akcelik, 1981).....	22
2.2.3.1 Model za nezaštićeno levo skretanje (Akcelik, 1981).....	23
2.2.4 HBS model (FGSV, 2015) .....	25
2.2.4.1 Kapacitet nezaštićenog levog skretanja po HBS-u.....	26
2.2.5 CCG model (Teply et al., 2008) .....	27
2.2.5.1 Model za nezaštićena leva skretanja po CCG priručniku.....	29
2.2.6 Ostali modeli .....	30
2.2.6.1 Finski LIVASU model.....	30
2.2.6.2 Danski DanKap model.....	30
2.2.6.3 Švedski Capcal 4 model.....	31
2.2.6.4 Domaće preporuke .....	32
3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA PARAMETARA OPSLUŽIVANJA NEZAŠTIĆENOG LEVOG SKRETANJA .....	35

3.1	PREDMET ISTRAŽIVANJA.....	36
3.2	IZBOR LOKACIJA ISTRAŽIVANJA .....	36
3.2.1	Opis lokacija istraživanja.....	41
3.3	DEFINISANJE PERIODA ISTRAŽIVANJA.....	42
3.4	METODA I TEHNIKA ISTRAŽIVANJA.....	43
3.5	OBRADA I KREIRANJE BAZE PODATAKA.....	45
4.	REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....	50
4.1	INTERVAL SLEĐENJA VOZILA U LEVOM SKRETANJU .....	50
4.1.1	Analiza intervala sleđenja na nivou celokupnog uzorka .....	53
4.1.2	Analiza intervala sleđenja po poziciji vozila u plotunu.....	54
4.1.3	Analiza intervala sleđenja po saobraćajnim trakama.....	56
4.2	ANALIZA PRIHVATLJIVOG INTERVALA SLEĐENJA .....	58
4.2.1	Siegloch metoda za utvrđivanje $t_c$ .....	61
4.2.2	Raff metoda za utvrđivanje $t_c$ .....	62
4.2.3	Harders metoda za utvrđivanje $t_c$ .....	64
4.2.4	MLM metoda za utvrđivanje $t_c$ .....	65
4.2.5	PEM metoda za utvrđivanje $t_c$ .....	66
4.2.6	Binarni logit model za utvrđivanje $t_c$ .....	68
4.2.7	Uporedna analiza rezultata modela za utvrđivanje $t_c$ .....	73
5.	RAZVOJ MODELA ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG TOKA .....	75
5.1	POREĐENJE i VERIFIKACIJA MODELA ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG TOKA.....	78
5.2	ALTERNATIVNI PRISTUP MODELIRANJU ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG TOKA..	82
6.	METODOLOŠKI OKVIR ZA DONOŠENJE ODLUKE O TRETMANU LEVOG SKRETANJA .....	88
7.	ZAKLJUČAK.....	92
	LITERATURA .....	95
	PRILOZI.....	101
	PRILOG 1: Primena Siegloch metode za utvrđivanje kritičnog prihvatljivog intervala sleđenja po trakama .....	101

PRILOG 2: Primena Raff metode za utvrđivanje kritičnog prihvatljivog intervala sleđenja po trakama ..... 106

Biografija autora..... 111

Izjava o autorstvu ..... 112

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada ..... 113

Izjava o korišćenju..... 114

## SPISAK TABELA

Tabela 2-1. Faktor uticaja širine trake.....16

Tabela 2-2. Ekvivalent  $E_L$  za konverziju zasićenog saobraćajnog toka trake pravo na tok u levom skretanju.....18

Tabela 2-3. Zasićen saobraćajni tok u zavisnosti od širine prilaza (Izvor: Webster & Cobbe, 1966).....20

Tabela 2-5. PAJ ekvivalenti po kategorijama vozila .....20

Tabela 2-6. Bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka po australijskom HCM-u u PAJ/h.....22

Tabela 2-7. Ekvivalent broja vozila pravo za vozilo-manevar .....23

Tabela 2-8. Faktor uticaja širine trake po CCG priručniku .....28

Tabela 2-9. Faktor uticaja dužine zelenog vremena u CCG priručniku.....29

Tabela 2-10. Uticaj broja traka u konfliktnom toku (Izvor: Richardson, 1982).....30

Tabela 2-11. Faktor uticaja širine trake po Capcal 4 modelu .....31

Tabela 2-12. Bazna vrednost ZST-a za ekskluzivnu traku za skretanje .....32

Tabela 2-13 Faktor uticaja intenziteta pešačkog toka na vozila u skretanju .....32

Tabela 2-14 Faktor uticaja intenziteta konfliktnog toka na vozila u levom skretanju .....33

Tabela 2-15 Faktor uticaja strukture saobraćajnog toka .....33

Tabela 2-16 Faktor uticaja veličine grada .....33

Tabela 2-17 Pregled metodologija za utvrđivanje zasićenog saobraćajnog toka za nezaštićeno levo skretanje .....34

Tabela 3-1. Pregled mogućih lokacija istraživanja .....39



Tabela 3-2. Rezultati odabira lokacija istraživanja.....	40
Tabela 4-1. Obim sprovedenih istraživanja.....	50
Tabela 4-2. Analiza realizovanih intervala sleđenja na celokupnom uzorku.....	53
Tabela 4-3. Empirijska raspodela realizovanih intervala sleđenja na celokupnom uzorku .....	53
Tabela 4-4. Analiza realizovanih intervala sleđenja po rednom broju vozila u plotunu.....	54
Tabela 4-5. Analiza realizovanih intervala sleđenja po lokacijama istraživanja.....	56
Tabela 4-6. Analiza intervala sleđenja po lokacijama istraživanja u odnosu na poziciju vozila u plotunu .....	57
Tabela 4-7. Intervali sleđenja po lokacijama istraživanja bez vozila koja ostvaruju gubitke na startu .....	58
Tabela 4-8. Analiza prihvaćenih intervala sleđenja na celokupnom uzorku.....	59
Tabela 4-9. Empirijska raspodela odbijenih intervala sleđenja na celokupnom uzorku u zavisnosti od načina tretmana $t_r$ .....	60
Tabela 4-10. Rezultati Siegloch metode za utvrđivanje $t_c$ po saobraćajnim trakama .....	62
Tabela 4-11. Rezultati Raff metode za utvrđivanje $t_c$ po saobraćajnim trakama.....	63
Tabela 4-12. Rezultati Harders metode za utvrđivanje $t_c$ po saobraćajnim trakama .....	65
Tabela 4-13. Primer Excel Solver procedure za primenu MLM metode za utvrđivanje $t_c$ .....	66
Tabela 4-14. Rezultati MLM metode za utvrđivanje $t_c$ po saobraćajnim trakama ..	66
Tabela 4-15. Primer Excel procedure za primenu PEM metode za utvrđivanje $t_c$ ...67	
Tabela 4-16. Rezultati PEM metode za utvrđivanje $t_c$ po saobraćajnim trakama na uzorku $t_{r\_all}$ .....	67
Tabela 4-17. Rezultati PEM metode za utvrđivanje $t_c$ po saobraćajnim trakama na uzorku $t_{r\_max}$ .....	68
Tabela 4-18. Rezultujuće vrednosti koeficijenata i Wald statistika Modela 1 .....	69
Tabela 4-19. Rezultati predikcije Modela 1 .....	69
Tabela 4-20. Rezultujuće vrednosti koeficijenata i Wald statistika Modela 2 .....	70
Tabela 4-21. Rezultati predikcije Modela 2 .....	70

Tabela 4-22. Površina ispod ROC krive za Model 2 .....	71
Tabela 4-23. Rezultujuće vrednosti koeficijenta i Wald statistika Modela 2 .....	72
Tabela 4-24. Preciznost modela po saobraćajnim trakama i rezultujuće vrednosti $t_c$ .....	73
Tabela 4-25. Poređenje vrednosti $t_c$ dobijenih različitim metodama .....	73
Tabela 5-1. Statistika dobijenog modela S u zavisnosti od $Q_0$ za jednu traku u konfliktnom toku .....	77
Tabela 5-2. Statistika dobijenog modela S u zavisnosti od $Q_0$ za dve trake u konfliktnom toku .....	78
Tabela 5-3. RMSE i MAPE za bazni model zasićenog saobraćajnog toka i predložene modele.....	80
Tabela 5-4. Statistika dobijenog modela S za jednu traku u konfliktnom toku u zavisnosti od $Q_0, ex$ .....	84
Tabela 5-5. Statistika dobijenog modela S za dve trake u konfliktnom toku u zavisnosti od $Q_0, ex$ .....	85
Tabela 5-6. RMSE i MAPE za predložene i CCG modele .....	86

## SPISAK SLIKA

Slika 2-1. Faktor modifikacije modela vremenskih gubitaka u zavisnosti od dužine crvenog i brzine na prilazu <i>Vapp</i> (Izvor: Stanković et al., 2020).....	6
Slika 2-2. Ilustracija Siegloch-ove metode (Izvor: Barchański & Zochowska, 2021) .....	10
Slika 2-3. Ilustracija metode raspodele prihvatljivih intervala sleđenja (Izvor: Brilon et al., 1997) .....	10
Slika 2-4. Ilustracija logit metode raspodele prihvatljivog intervala sleđenja (Izvor: Brilon et al., 1997) .....	12
Slika 2-5. Webster-ov model zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja (Izvor: Webster & Cobbe, 1966) .....	21
Slika 2-6. Zasićeni saobraćajni tok nezaštićenog levog skretanja u toku nezasićenog dela zelenog vremena konfliktnog toka (Izvor: Akcelik, 1981) .....	24
Slika 2-7. Vrednosti faktora radijusa skretanja, širine saobraćajne trake i uzdužnog nagiba (Izvor: Čelar, Stanković & Kajalić, 2020).....	25

Slika 2-8. Kapacitet nezaštićenog levog skretanja tokom zelenog vremena (Izvor: Čelar, Stanković, & Kajalić, 2020).....	26
Slika 2-9. Faktori uticaja na zasićeni saobraćajni tok i njihove kombinacije po CCG priručniku (Izvor: Teply, Allingham, Richardson, & Stephenson, 2008) .....	28
Slika 2-10. Faktor uticaja konfliktnog toka $F_L$ u odnosu na ekspanzirani protok ....	30
Slika 3-1. Razlika između „gap-a“ i intervala sleđenja između vozila.....	35
Slika 3-2. Mogući načini opsluživanja nezaštićenog levog skretanja.....	38
Slika 3-3. Pregledna mapa mogućih (plava) i odabranih (crvena) lokacija istraživanja .....	41
Slika 3-4. Isečak video zapisa na lokaciji R1 Pariske komune - Narodnih heroja - Otona Župančića.....	43
Slika 3-5. Isečak video zapisa na lokaciji R2 Vojislava Ilića - Rimska - Mis Irbijeva	44
Slika 3-6. Isečak video zapisa na lokaciji R3 Pariske komune – Tošin bunar.....	44
Slika 3-7. Isečak video zapisa na lokaciji R4 Tošin bunar - Studentska - Bul. dr Zorana Đinđića.....	44
Slika 3-8. Isečak video zapisa na lokaciji R5 Ugrinovačka – Ivićeva – Vrtlarska – Bežanijska ulica .....	45
Slika 3-9. Isečak video zapisa na lokaciji R6 Zemunska – Gandijeva – Vojvođanska ulica .....	45
Slika 3-10. Primenjena aplikacija za obradu video zapisa .....	46
Slika 3-11. Forma izlaznih podataka u Microsoft Excel-u .....	46
Slika 3-12. Definisane konfliktne površine.....	47
Slika 3-13. Izgled (a) izvorne i (b) prilagođene baze podataka .....	48
Slika 3-14. Prihvatljiv interval sleđenja u toku sa dve saobraćajne trake .....	49
Slika 4-1. Definisane rednog broja opsluženih vozila.....	52
Slika 4-2. Gubici na startu.....	52
Slika 4-3. Empirijska raspodela intervala sleđenja na celokupnom uzorku.....	54
Slika 4-4. Zavisnost prosečnog intervala sleđenja od pozicije vozila u redu .....	55
Slika 4-5. Frekvencija prihvaćenih intervala sleđenja na nivou celokupnog uzorka .....	59
Slika 4-6. Funkcije raspodele odbijenih intervala sleđenja $t_r$ na celokupnom uzorku u zavisnost od načina tretmana $t_r$ .....	60

Slika 4-7. Siegloch metoda za utvrđivanje $t_c$ na celokupnom uzorku.....	61
Slika 4-8. Siegloch metoda za utvrđivanje $t_c$ u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku .....	62
Slika 4-9. Raff metoda za utvrđivanje $t_c$ na celokupnom uzorku .....	63
Slika 4-10. Raff metoda za utvrđivanje $t_c$ u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku .....	64
Slika 4-11. Harders metoda za utvrđivanje $t_c$ na celokupnom uzorku.....	64
Slika 4-12. PEM metoda za utvrđivanje $t_c$ primenjena na uzorku $t_{r\_max}$ .....	67
Slika 4-13. PEM metoda za utvrđivanje $t_c$ primenjena na uzorku $t_{r\_max}$ u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku .....	68
Slika 4-14. ROC kriva za utvrđivanje validnosti Modela 2 .....	71
Slika 4-15. Poređenje vrednosti $t_c$ po saobraćajnim trakama dobijenih različitim metodama .....	74
Slika 5-1. Model zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja sa 1 trakom u konfliktnom toku u zavisnosti od $Q_0$ .....	76
Slika 5-2. Model zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja sa 2 trake u konfliktnom toku u zavisnosti od $Q_0$ .....	77
Slika 5-3. Poređenje modela zasićenog saobraćajnog toka zasnovanih na intenzitetu konfliktnog toka .....	79
Slika 5-4. Poređenje predloženog modela i kalibrisanog baznog modela u odnosu na broj traka u konfliktnom toku.....	81
Slika 5-5. Model zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja sa 1 trakom u konfliktnom toku u zavisnosti od $Q_0,ex$ .....	83
Slika 5-6. Odstupanja (residual) u odnosu na ekspanzirani konfliktni tok .....	84
Slika 5-7. Model zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja sa 2 trake u konfliktnom toku u zavisnosti od $Q_0,ex$ .....	85
Slika 5-8. Odstupanja (residual) u odnosu na ekspanzirani konfliktni tok .....	86
Slika 5-9. Poređenje predloženih i CCG modela.....	87
Slika 6-1. Granične vrednosti za primenu zaštićenog levog skretanja za jednu traku u konfliktnom toku.....	90
Slika 6-2. Granične vrednosti za primenu zaštićenog levog skretanja za dve trake u konfliktnom toku .....	90

## 1. UVODNA RAZMATRANJA

### 1.1 FORMULACIJA PROBLEMA

Urbani saobraćajni sistem, sa svim svojim elementima, ima jedan od presudnih značaja za funkcionisanje savremenih gradova i na kvalitet života u istim. Od kvaliteta urbanog saobraćajnog sistema zavise gotovo svi aspekti razvoja gradova, privredni, ekonomski, socijalni, itd.

Zbog ograničenog prostora za razvoj saobraćajne mreže u urbanom području, bilo proširenjem ili izgradnjom novih saobraćajnica, funkcionisanje savremenog saobraćajnog sistema se bazira na efikasnom upravljanju postojećom mrežom. Upravljanje saobraćajem, u svom najužem smislu, ima za osnovni cilj optimalno iskorišćenje postojećih kapaciteta mreže.

U urbanom saobraćajnom sistemu, sa aspekta upravljanja, ključne tačke predstavljaju raskrsnice, odnosno elementi mreže na kojima dolazi do ukrštanja saobraćajnih tokova, a gde je neophodno izvršiti preraspodelu kapaciteta na konfliktne saobraćajne tokove (Čelar, Kajalić, & Stanković, 2021). Upravljanje preraspodelom kapaciteta na raskrsnicama se realizuje primenom svetlosnih signala.

Primena svetlosnih signala podrazumeva optimizaciju njihovog rada, odnosno optimalnu preraspodelu kapaciteta na konfliktne saobraćajne tokove, na osnovu stepena iskorišćenja idealnog kapaciteta pojedinačnih tokova. Stepenn iskorišćenja idealnog kapaciteta predstavlja odnos merodavnog saobraćajnog zahteva i zasićenog saobraćajnog toka. Zasićeni saobraćajni tok je ključan ulazni upravljački, parametar u postupku optimizacije rada signala i definisan je kao maksimalan broj vozila koja bi mogla da prođu raskrsnicu ukoliko bi bilo obezbeđeno pravo prolaska tokom celog sata. Takođe, zasićeni saobraćajni tok je ključan i sa aspekta utvrđivanja pokazatelja efikasnosti rada svetlosnih signala, naročito za estimaciju vremenskih gubitaka kao osnovnog parametra za određivanje Nivoa Usluge na raskrsnicama. Vremenski gubici na raskrsnicama imaju najveći uticaj na ukupno vreme putovanja duž gradskih arterija, i njihova adekvatna procena je ključan korak u utvrđivanju Nivoa Usluge ovog elementa saobraćajne infrastrukture (Kajalić, Čelar, & Stanković, 2018). Takođe, vremenski gubici imaju značajnu ulogu u primeni inteligentnih transportnih sistema, posebno u oblasti upravljanja saobraćajem i informisanje korisnika pre ili u toku putovanja (Čelar, Stanković, Kajalić, & Stepanović, 2018).

Na vrednost zasićenog saobraćajnog toka utiče veliki broj faktora. Jedan od dominantnih faktora je način opsluživanja tokova u planu faza, naročito tokova u levom skretanju. Leva skretanja mogu biti opslužena kao zaštićena, odnosno vremenski odvojena od suprotnog toka pravo, i kao nezaštićena, odnosno istovremeno sa suprotnim tokom pravo. Realizacija levog skretanja kao zaštićenog za posledicu ima eliminaciju konflikta sa suprotnim tokom pravo i povećanje kapaciteta predmetnog toka. Međutim, ovakav tretman levog skretanja za posledicu ima neophodnost formiranja većeg broja faza, što utiče na povećanje izgubljenog vremena tokom ciklusa. Na ovaj način smanjuje se efikasnost opsluživanja ostalih saobraćajnih tokova, odnosno dolazi do povećanja prosečnih vremenskih gubitaka na raskrsnici, što može dovesti do pojave zagušenja. Ovaj problem je izražen na raskrsnicama koje funkcionišu na granici kapaciteta, na kojima i neznatne promene u preraspodeli kapaciteta dovode do nastanka zagušenja.

Za donošenje odluke o tretmanu levog skretanja (zaštićeno ili nezaštićeno) neophodno je precizno modeliranje kapaciteta levog skretanja, odnosno pripadajuće vrednosti zasićenog saobraćajnog toka. Dok je zasićeni saobraćajni tok zaštićenog levog skretanja jednostavniji za modeliranje, zasićeni saobraćajni tok nezaštićenog levog skretanja je kompleksniji zbog velikog broja parametara koji utiču na opsluživanje vozila u levom skretanju. Kompleksno modeliranje zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja dovelo je u praksi do trenda uvođenja zaštićenog levog skretanja, bez primene jasnih kriterijuma, a sa svim propratnim negativnim efektima za ostale saobraćajne tokove. Takođe, sve češća primena savremenih, adaptibilnih sistema upravljanja svetlosnim signalima u konceptu razvoja pametnih gradova, dovelo je do istog trenda po pitanju tretmana levih skretanja. Iako se u okviru adaptibilnih sistema mogu postavljati ograničenja kojim bi se limitirali negativni efekti na pešačke tokove, vozila sa sporednih saobraćajnica i leva skretanja sa glavnog pravca (Radivojević, Stanković, Čelar, & Vukanović, 2017), sve češći je neadekvatan pristup, kako inženjera tako i upravljača saobraćajnom infrastrukturom, u tretmanu levih skretanja.

Relevantni analitički modeli za proračun zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja dominantno su bazirani na teoriji prihvatljivog intervala sleđenja, kojom se opisuje ponašanje vozača na nesignalisanim raskrsnicama. U praktičnim metodologijama je ovaj pristup iskorišćen i za modeliranje zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja na signalisanim raskrsnicama. Modeli zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja koji se koriste u praksi sugerišu obaveznu kalibraciju određenih parametara na lokalne uslove, što zahteva kompleksna istraživanja. S druge strane ovi modeli, mogu biti prilagođeni semaforisanim raskrsnicama ali uz obavezno apriori poznavanje parametara rada signala. Pomenuti modeli u tom smislu nisu primenjivi u proceduri optimizacije rada signala, jer zasićeni saobraćajni tok predstavlja ulazni parametar u samu proceduru. Suštinski, navedeni modeli se mogu koristiti za utvrđivanje pokazatelja efikasnosti rada signala, poput vremenskih gubitaka, kapaciteta i stepena zasićenja. Postojeći empirijski modeli su uglavnom zasnovani na istraživanjima na nesignalisanim raskrsnicama i nisu primenjivi u praksi.

Promene urbanog saobraćajnog sistema koje se ogledaju u promeni saobraćajnih zahteva, uslova u saobraćajnom toku, karakteristika vozila i ponašanja vozača, dovele su do potrebe za modifikacijom i prilagođavanjem pomenutih modela. Osnovni motiv za izradu ove doktorske disertacije je formiranje modela za utvrđivanje zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja koji oslikava karakteristike ponašanja korisnika savremenog saobraćajnog sistema, i koji je zasnovan na analizi empirijski utvrđenih parametara ponašanja vozača na signalisanim raskrsnicama.

## **1.2 CILJEVI I HIPOTEZE U ISTRAŽIVANJU**

Predmet doktorske disertacije je analiza opsluživanja nezaštićenih levih skretanja na signalisanim raskrsnicama. Osnovni zadatak definisan u okviru disertacije je da se na osnovu eksperimentalno utvrđenih podataka u realnim uslovima istraži zavisnost parametara opsluživanja nezaštićenih levih skretanja. Uspostavljene zavisnosti predstavljale bi osnovu za formiranje modela zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja, ili modifikaciju nekog od postojećih analitičkih modela.

Formiranje modela zasićenog saobraćajnog toka za nezaštićena leva skretanja predstavlja osnovni naučni cilj istraživanja u okviru doktorske disertacije. Pregledom dosadašnjih istraživanja u datoj oblasti, uočeno je da istraživanje zasićenog saobraćajnog toka

nezaštićenog levog skretanja može sa naučnog aspekta doprineti sledećim ciljevima, koji su ujedno i ciljevi ove disertacije:

- Kvantifikovanje uticaja konfliktnog toka na zasićeni saobraćajni tok levog skretanja,
- Kvantifikovanje uticaja parametara rada svetlosnih signala na zasićeni saobraćajni tok levog skretanja,
- Kvantifikovanje uticaja geometrije raskrsnice na zasićeni saobraćajni tok levog skretanja.
- Formiranje metodološkog okvira za utvrđivanje potrebe za primenom zaštićenog levog skretanja.

Na osnovu predmeta i cilja istraživanja, doktorska disertacija zastupa polaznu hipotezu da se formiranjem novog ili modifikacijom postojećih modela zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja može doprineti efikasnijoj optimizaciji rada svetlosnih signala. Osnova za ovu hipotezu je u činjenici da su postojeći modeli zasnovani na karakteristikama opsluživanja tokova na nesignalisanim raskrscima i da se ne mogu apriori primeniti i na signalisanim raskrscima.

Pomoćne hipoteze:

- Uticaji karakteristika konfliktnog toka, parametara rada svetlosnih signala i elemenata geometrije raskrsnice na zasićeni saobraćajni tok nezaštićenog levog skretanja se mogu kvantifikovati.

### **1.3 OČEKIVANI DOPRINOS**

Očekivani rezultati predloženog istraživanja i naučni doprinos doktorske disertacije su:

- Definisane ključnih parametara i kvantifikacija njihovog uticaja na zasićeni saobraćajni tok nezaštićenog levog skretanja;
- Definisane metodologije istraživanja parametara opsluživanja levih skretanja;
- Sistematizacija i ocena postojećih modela na osnovu rezultata istraživanja;
- Kalibracija parametara postojećih modela za lokalne uslove;
- Formiranje i verifikacija originalnog modela zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja;
- Poređenje predloženog modela sa izabranim modelima iz literature;
- Formiranje metodološkog okvira za utvrđivanje potrebe za primenom zaštićenog levog skretanja.

Pored navedenih naučnih doprinosa, očekuje se da će doktorska disertacija imati i praktičan značaj u postupku optimizacije rada signala kao i prilikom donošenja odluke o tretmanu levog skretanja u planu faza. Takođe, kroz kalibraciju postojećih modela za lokalne uslove, omogućava se njihova adekvatnija primena u saobraćajnim sistemima sličnih karakteristika.

### **1.4 SADRŽAJ RADA**

Na osnovu predmeta disertacije, u skladu sa predmetom i ciljevima istraživanja, kao i postavljenim hipotezama, istraživanja će se sprovesti u narednim fazama:

### I Faza – Analiza literature

Pregledom literature u datoj naučnoj oblasti ustanoviće se dosadašnji rezultati istraživanja u domenu zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja. Kroz relevantnu literaturu steći će se uvid u trenutne pravce istraživanja i kritički će se sagledati metode kako u naučnom smislu tako i u njihovoj praktičnoj primeni. Poseban akcenat biće stavljen na modele zasnovane na teoriji prihvatljivog intervala sleđenja, odnosno na metode utvrđivanja kritičnog prihvatljivog intervala sleđenja, kao ključnog parametra u ovim modelima.

### II Faza – Prikupljanje podataka, analiza i obrada podataka

U prvom koraku ove faze biće definisana metodologija za izbor lokacija istraživanja. S obzirom na planirana terenska istraživanja, inicijalni podaci će biti prikupljeni snimanjem relevantnih saobraćajnih tokova na definisanim lokacijama. U narednom koraku će biti definisana metodologija obrade video snimaka i dat prikaz rezultata sprovedenih istraživanja. Na kraju ove faze biće definisani parametri koji će se koristiti kao ulazne veličine za sledeću fazu, odnosno formiranje modela zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja.

### III Faza – Razvoj modela zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja

U ovoj fazi će, na osnovu analize podataka iz prethodne faze, biti formiran model zasićenog saobraćajnog toka za nezaštićeno levo skretanje i obaviće se njegovo testiranje i verifikacija. Takođe, u okviru ove faze izvršiće se poređenje predloženog modela sa relevantnim modelima iz literature.

IV Faza – Razvoj metodološkog okvira donošenje odluke o primenu zaštićenog levog skretanja

Na osnovu razvijenog modela, u ovoj fazi istraživanja, biće predložen metodološki okvir za donošenje inženjerske odluke o tretmanu levog skretanja u okviru plana faza.

### V Faza – Zaključci, preporuke i pravci daljeg istraživanja

U ovoj fazi će se izvršiti sistematizacija zaključaka koji se odnose na predloženi model u odnosu na ostale modele u literaturi. Biće istaknute mogućnosti i osnovne koristi njegove primene. Biće navedeni njegovi osnovni nedostaci i ograničenja koji se odnose na njegovu primenu. Na kraju, biće date preporuke i pravci daljeg istraživanja.



## 2. PREGLED RELEVANTNE LITERATURE

Modeliranje zasićenog saobraćajnog toka, odnosno idealnog kapaciteta, nezaštićenog levog skretanja u najvećem broju istraživanja se zasniva na modelima kapaciteta neprioritetnih tokova na nesignalisanim raskrscima. Imajući u vidu da je na signalisanim raskrscima, za razliku od nesignalisanih, kapacitet saobraćajne trake dodatno ograničen trajanjem zelenog signalnog pojma, može se uspostaviti direktna veza između ova dva bazna parametra saobraćajnog toka na signalisanim raskrscima:

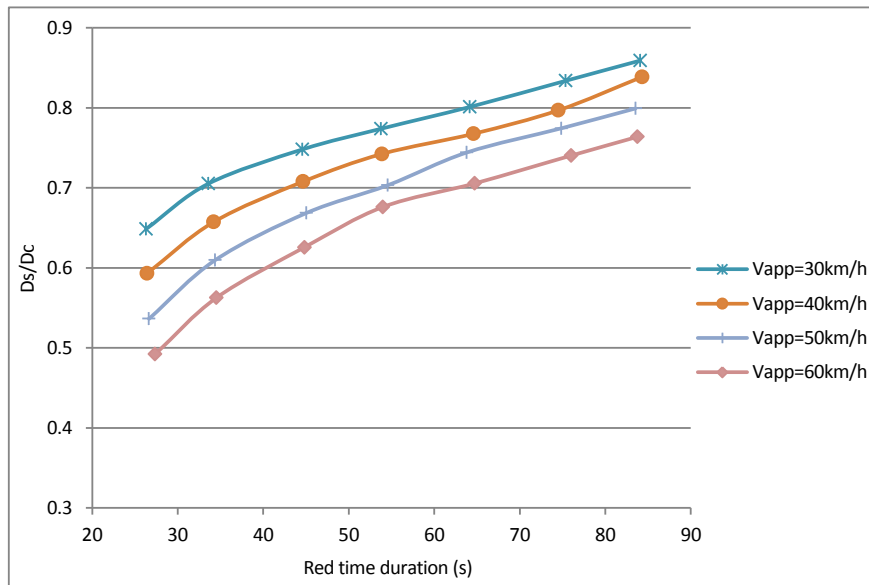
$$K = S \cdot \lambda \quad (2-1)$$

Gde je  $K$  kapacitet a  $S$  zasićeni saobraćajni tok saobraćajne trake na signalisanoj raskrsnici izražen u voz/h, dok  $\lambda$  predstavlja udeo zelenog vremena u ciklusu  $\lambda = g/C$ .

Na nesignalisanim raskrscima ne postoji kao takav parametar zasićenog saobraćajnog toka, ili idealnog kapaciteta, već je njegov pandan kapacitet neprioritetnog toka. Kapacitet, kao i idealni kapacitet, odnosno zasićeni saobraćajni tok, ključni su parametri sa aspekta utvrđivanja Nivoa Usluge semaforisane raskrsnice, zbog uticaja na vrednost vremenskih gubitaka kao direktnog pokazatelja Nivoa Usluge. U prethodnim istraživanjima, pokazano je da se analitički modeli vremenskih gubitaka mogu prilagoditi eksperimentalnim istraživanjima i da eksperimentalni podaci mogu doprineti poboljšanju teorijski formiranih modela (Stanković et al., 2020). Izvršena modifikacija analitičkog modela za utvrđivanje vremenskih gubitaka koja je sprovedena na bazi eksperimentalnih istraživanja primenom faktora  $\alpha$  (jednačina 2-2) ne može samostalno da prevaziđe nedostatke u utvrđivanju vrednosti zasićenog saobraćajnog toka.

$$d_{\text{mod}} = \frac{0,38C(1-\lambda)^2}{\alpha(1 - [\min(1, X)\lambda])} \quad (2-2)$$

Gde je  $\alpha = D_s/D_c$  faktor prilagođavanja analitičkog modela eksperimentalnim podacima dat narednom slikom (Slika 2-1),  $C$  dužina ciklusa, a  $X$  stepen zasićenja  $X = Q/K = Q/(S*\lambda)$ . Faktor prilagođavanja  $\alpha$  predstavlja odnos komponenti vremenskih gubitaka, vremenskih gubitaka zaustavljenih vozila  $D_s$  i ukupnih vremenskih gubitaka signalne grupe  $D_c$ . Istraživanjem je utvrđeno da ovaj odnos zavisi od dužine crvenog signalnog pojma i brzine na prilazu raskrsnici  $V_{app}$  (Stanković et al., 2020). Preko stepena zasićenja, zasićeni saobraćajni tok, pored parametara rada signala, ima dominantan uticaj na vremenske gubitke na signalisanoj raskrsnici, naročito u uslovima kada je stepen zasićenja visok.



Slika 2-1. Faktor modifikacije modela vremenskih gubitaka u zavisnosti od dužine crvenog i brzine na prilazu  $V_{app}$  (Izvor: Stanković et al., 2020)

U nastavku je u prvom delu poglavlja dat pregled relevantne literature koji se odnosi na utvrđivanja kapaciteta na nesignalisanim raskrsnicama, kao baze za modele za utvrđivanje zasićenog saobraćajnog toka na signalisanim raskrsnicama, koji su prikazani u drugom delu poglavlja.

## 2.1 MODELI KAPACITETA NEPRIORITETNIH TOKOVA

Modeli kapaciteta neprioritetnih tokova se primenjuju u analizi efikasnosti saobraćajnog procesa na nesignalisanim raskrsnicama. Generalno, postoje dva osnovna pristupa modeliranju kapaciteta neprioritetnih tokova: probabilistički i deterministički pristup (Khattak & Jovanis, 1990). Probabilistički pristup je zasnovan na analitičkim modelima prihvatljivog intervala sleđenja  $t_c$  i raspodelama intervala sleđenja u prioritetnom toku, dok je deterministički pristup zasnovan na empirijskim podacima.

### 2.1.1 Analitički modeli kapaciteta neprioritetnog toka

Većina analitičkih modela zasnovana je na opsluživanju neprioritetnih tokova na nesignalisanim raskrsnicama u koje spadaju i leva skretanja sa prioritetnog pravca koja su u obavezi da ustupe prioritet konfliktom toku pravo. Ovaj deo poglavlja posvećen je sistematizaciji modela prihvatljivog intervala sleđenja kao ključnog u gotovo svim metodologijama utvrđivanja zasićenog saobraćajnog toka  $S$ . Modeli prihvatljivog intervala sleđenja u slučaju nesignalisanih raskrsnica koriste se za direktno utvrđivanje kapaciteta predmetnog toka  $K$ , što je analogno idealnom kapacitetu, odnosno zasićenom saobraćajnom toku  $S$  na signalisanoj raskrsnici.

Analitički modeli kapaciteta neprioritetnih tokova se sastoje od dva osnovna podmodela, i to modela prihvatljivog intervala sleđenja i modela raspodele intervala u prioritetnom toku. Razumevanje ovih modela ključno je za shvatanje same prirode opsluživanja neprioritetnih tokova, nezavisno od načina upravljanja.

Ukoliko se sa  $g(t)$  predstavi broj vozila neprioritetnog toka koji može proći raskrsnicu u toku jednog intervala sleđenja u konfliktom toku,  $t$ , očekivani broj intervala sleđenja  $t$  u

prioritetnom konfliktnom toku može se predstaviti sa  $q_0 f(t)$  gde je  $f(t)$  funkcija gustine verovatnoće intervala sleđenja u konfliktnom toku. Kapacitet koji se ostvaruje u toku intervala sleđenja  $t$  na časovnom nivou može se izraziti kao  $q_0 f(t)g(t)$ . Kako bi se utvrdio kapacitet neprioritetnog toka za sve intervale sleđenja  $t$  neophodno je izraz integraliti za ceo rang intervala  $t$ . Stoga, kapacitet neprioritetnog toka je dat kao:

$$k = q_0 \int_{t=0}^{\infty} f(t)g(t)dt \quad (2-3)$$

$k$  – kapacitet neprioritetnog toka (voz/s)

$q_0$  – protok konfliktnog toka (voz/s)

$t$  – dostupan interval sleđenja u prioritetnom toku (s)

$f(t)$  – raspodela verovatnoće dostupnih intervala sleđenja

$g(t)$  – broj vozila u neprioritetnom toku koja mogu proći raskrnicu u intervalu sleđenja  $t$  (s), drugim rečima, kapacitet neprioritetnog toka tokom pojedinačnog dostupnog interval sleđenja u prioritetnom toku.

Gotovo svi modeli prihvatljivog intervala sleđenja se zasnivaju na ovom konceptu (Brilon, Koenig, & Troutbeck, 1997). U tom smislu, za formiranje modela prihvatljivog intervala sleđenja neophodno je poznavanje raspodele intervala sleđenja u prioritetnom toku  $f(t)$  i funkcije  $g(t)$ , odnosno broja vozila iz neprioritetnog toka koji mogu proći raskrnicu u intervalu  $t$ .

Jednu od prvih formulacija modela za utvrđivanje kapaciteta neprioritetnih tokova dali su Harders (1968) i Drew (1968) uzimajući u obzir naredne pretpostavke: da postoje jedinstvene vrednosti za parametre prihvatljiv interval sleđenja  $t_c$  i interval sleđenja u neprioritetnom toku  $t_{fh}$ , da postoji konstantan konfliktni tok  $q_0$ , da intervale sleđenja u konfliktnom toku imaju eksponencijalnu raspodelu  $f(t)$ , dok je funkcija  $g(t)$  stepenasta (Drew, 1968; Harders, 1968).

$$f(t) = q_0 \cdot e^{-q_0 t} \quad (2-4)$$

$$g(t) = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot p_n(t) \quad (2-5)$$

Gde je  $p_n(t)$  verovatnoća da  $n$  vozila iz neprioritetnog toka iskoristi interval sleđenja  $t$ .

$$p_n(t) = \begin{cases} 1, & \text{za } t_c + (n-1)t_{fh} \leq t < t_c + nt_{fh} \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (2-6)$$

Pod ovim pretpostavkama, bazni oblik modela za utvrđivanje kapaciteta neprioritetnog toka je:

$$k = \frac{q_o \cdot e^{-q_o t_c}}{1 - e^{-q_o t_{fh}}} \quad (2-7)$$

Siegloch (1973) je u svom radu zadržao pretpostavke prethodnih autora uz izmenu da  $g(t)$  ima linearnu funkciju (Siegloch, 1973):

$$g(t) = \begin{cases} 0, & \text{za } t < t_0 \\ \frac{t - t_0}{t_{fh}}, & \text{za } t \geq t_0 \end{cases} \quad (2-8)$$

Gde je  $t_0 = t_c - t_{fh}/2$ . Data raspodela opisuje situaciju da se u prioritetnom toku realizuje veliki broj kraćih intervala sleđenja, dok su duži intervali sleđenja sve ređi.

Na ovaj način kapacitet je definisan kao:

$$k = \frac{1}{t_f} \cdot e^{-q_o t_0} = \frac{1}{t_f} \cdot e^{-q_o \left( t_c - \frac{t_{fh}}{2} \right)} \quad (2-9)$$

Mnogi autori su pretpostavljali Cowan M3 raspodelu (Cowan, 1975) koja uzima u obzir formiranje plotuna vozila (Cowan, 1987; Tanner, 1967; Troutbeck, 1986). Dihotomna (dvostruka) raspodela (Cowan M3) – pretpostavlja da se varijabilan deo vozila u plotunu kreće sa minimalnim intervalom sleđenja  $t_m$ , a ostatak vozila se kreće sa većim intervalima sleđenja koji su sve ređi. Udeo vozila koji se kreću u slobodnom toku je definisan kao  $\alpha$ , i njihov interval sleđenja ima eksponencijalnu raspodelu. Vozila u plotunu  $(1-\alpha)$  imaju isti minimalan interval sleđenja  $t_m$ . Modeli zasnovani na ovoj raspodeli dati su od strane Tanner (1967), Troutbeck (1986) i Cowan (1987). Dobijen je sledeći model za utvrđivanje kapaciteta neprioritetnog toka:

$$k = \frac{\alpha \cdot q_o \cdot e^{-\lambda(t_c - t_m)}}{1 - e^{-\lambda t_{fh}}} \quad (2-10)$$

$$\lambda = \frac{\alpha \cdot q_o}{1 - t_m \cdot q_o} \quad (2-11)$$

Gde je:

$\alpha$  – udeo vozila u konfliktnom toku koji se kreću intervalom većim od minimalnog  $t_m$ ,

$t_m$  – minimalan interval sleđenja u konfliktnom toku (s),

$\lambda$  – konstanta.

### 2.1.1.1 Metode utvrđivanja prihvatljivog intervala sleđenja

Funkcija  $g(t)$  je uglavnom definisana sa dva parametra, prihvatljiv interval sleđenja  $t_c$  i interval sleđenja  $t_{fh}$ , koji oslikavaju uticaj različitih faktora koji utiču na vozačevu odluku da li će prihvatiti ili odbiti neki interval sleđenja u konfliktnom toku. Navedeni parametri, naročito prihvatljiv interval sleđenja  $t_c$  nije jednostavan za utvrđivanje na terenu i u literaturi postoje različite metode za njegovo utvrđivanje.

Prihvatljiv interval sleđenja  $t_c$  predstavlja interval sleđenja između vozila u konfliktnom toku koji vozila iz neprioritetnog toka prihvataju za realizaciju manevra. Interval sleđenja  $t_{fh}$  predstavlja interval sleđenja između vozila u neprioritetnom toku koja prihvataju isti prihvatljivi interval sleđenja u konfliktnom toku.

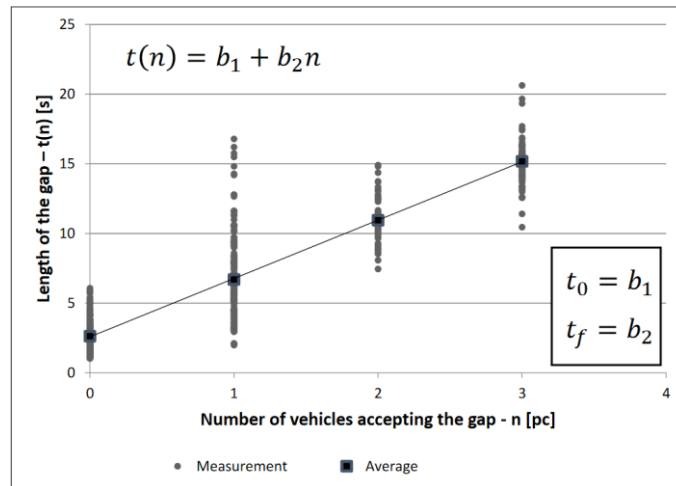
U teoriji, za formiranje modela kapaciteta neprioritetnog toka postoje dve osnovne pretpostavke koje se tiču ponašanja vozačka populacije: konzistentnost pojedinačnog vozača i homogenost vozača (Troutbeck & Brilon, 2002). Konzistentnost pojedinačnog vozača podrazumeva da se vozač ponaša na isti način u sličnim situacijama, dok homogenost podrazumeva da se svi vozači ponašaju na identičan način. Brojni autori (Catchpole & Plank, 1986; Troutbeck, 1988; Wegmann, 1991) su utvrdili da realna heterogenost vozača dovodi do smanjenja kapaciteta, dok realna nekonzistentnost dovodi do povećanja kapaciteta. U tom smislu, prethodne pretpostavke rezultuju malim razlikama u predikciji kapaciteta, i prihvatljive su naročito zbog činjenice da se njima postiže značajna jednostavnost modela (Troutbeck & Brilon, 2002).

Preciznost modela kapaciteta neprioritetnih tokova dominantno zavisi od tačnosti procene prihvatljivog intervala sleđenja, koji ne može biti utvrđen direktnim istraživanjem (Tian et al., 1999). U literaturi su primenjene brojne metode za utvrđivanje prihvatljivog intervala sleđenja. U nastavku teksta date su metode koje su najčešće primenjivane u literaturi: Siegloch, Raff, Ashworth, Harders metoda, Logit model, Maximum Likelihood metoda (MLM), i Probability Equilibrium metoda (PEM).

**Siegloch metoda** pretpostavlja da postoji stalan zahtev na neprioritetnom toku (Siegloch, 1973), što je osnovna pretpostavka za utvrđivanje zasićenog saobraćajnog toka. Metoda podrazumeva da se za svaki interval sleđenja u prioritetnom toku  $t$  beleži broj vozila  $n$  koji je taj period prihvatio za opsluživanje. Za svakih  $n$  vozila utvrđuje se prosečan interval sleđenja i formira se njihova linearna zavisnost sa prosečnim intervalom sleđenja kao zavisnom promenljivom. Nagib prave predstavlja interval sleđenja  $t_{fh}$ , a odsečak  $t_0$ , stoga je prihvatljiv interval sleđenja dat kao:

$$t_c = t_0 + \frac{t_{fh}}{2} \quad (2-12)$$

Ova metoda često je primenjivana u literaturi, sa različitim pristupom odbijenim intervalima sleđenja. Neki autori uzimaju u obzir odbijene intervale sleđenja kao  $n=0$  (Barchański & Zochowska, 2021), dok drugi iste zanemaruju (Kyte et al., 1996) i kreiraju linearnu zavisnost bez utvrđene prosečne vrednosti za  $n=0$ . Prednost ove metode je što je direktno vezana za model kapaciteta neprioritetnog toka, i što se istovremeno utvrđuju oba parametra neophodna za model kapaciteta (Bargegol, Hosseini, & Samet, 2017), mada model i dalje trpi revizije zbog uspostavljenih pretpostavki (Krbálek et al., 2022).

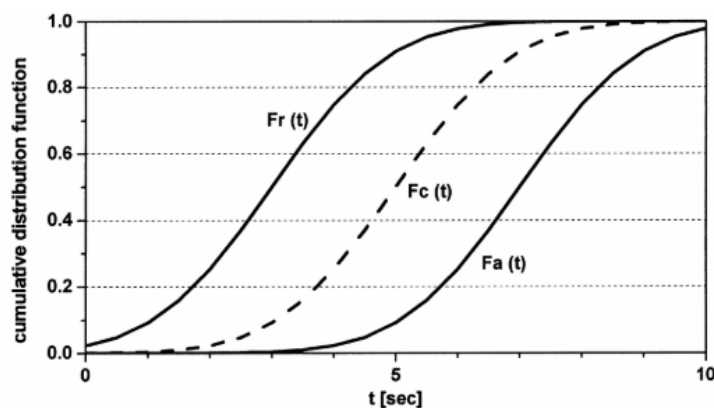


Slika 2-2. Ilustracija Siegloch-ove metode (Izvor: Barchański & Zochowska, 2021)

Većina ostalih metoda zasniva se na pretpostavci da je prihvatljiv interval sleđenja pojedinačnog vozača  $t_c$  veći od njegovog maksimalnog odbijenog intervala, a manji od intervala sleđenja koji je prihvatio. U tom smislu, vozač se smatra konzistentnim, odnosno da neće prihvatiti interval sleđenja koji je ranije odbijen. Ukoliko se registruju svi prihvaćeni intervali sleđenja nekog neprioritetnog saobraćajnog toka, isti se mogu opisati funkcijom raspodele  $Fa(t)$ . Takođe, može se utvrditi i raspodela odbijenih intervala sleđenja  $Fr(t)$ , pri čemu način posmatranja odbijenih intervala sleđenja može biti različit:

- Prvi pristup: razmatraju se samo maksimalni odbijeni intervali sleđenja, pri čemu vozila koja su prihvatila prvi interval sleđenja, koja nemaju odbijene intervale sleđenja, se ili eliminišu iz uzorka ili se usvajaju kao 0.
- Drugi pristup: razmatraju se svi intervali sleđenja, pri čemu vozila koja su prihvatila prvi interval sleđenja, se ili eliminišu iz uzorka ili se tretiraju kao 0.

U oba pristupa, raspodela prihvatljivih intervala sleđenja nalazi se između ove dve raspodele (Slika 2-3), odnosno za svakog konzistentnog vozača važi da je  $t_r < t_c < t_a$ .



Slika 2-3. Ilustracija metode raspodele prihvatljivih intervala sleđenja (Izvor: Brilon et al., 1997)

Obzirom da se raspodela prihvatljivih intervala sleđenja ne može utvrditi na terenu, neophodne su određene procedure kako bi se dobili parametri predmetne raspodele, odnosno srednja vrednost, standardno odstupanje i varijansa.

**Raff metoda** (Raff & Hart, 1950) je jedna od prvih grafičkih metoda koja pretpostavlja da  $t_c$  predstavlja tačku preseka funkcija  $Fa(t)$  i  $1-Fr(t)$ . Različiti autori su primenjivali ovu metodu

za utvrđivanje prihvatljivog intervala sleđenja (Guo, Wang, & Wang, 2014; Troutbeck, 2016). U ovoj metodi nije jasno definisano koji set podataka se koristi za odbijene intervale sleđenja, odnosno da li se posmatraju svi ili samo najveći odbijeni interval sleđenja, i na koji način se tretiraju vozila koja nisu odbila nijedan interval, odnosno koja su prihvatila prvi interval u konfliktnom toku.

**Ashworth metoda** (Ashworth, 1968) pretpostavlja da se za eksponencijalnu raspodelu intervala sleđenja u prioritetnom toku, i normalnu raspodelu  $t_a$  (kao i za gama ili log-normalnu raspodelu),  $t_c$  može proceniti u zavisnosti od srednje vrednosti prihvaćenih intervala sleđenja  $\mu_a$  i njegovog standardnog odstupanja  $\sigma$ :

$$t_c = \mu_a - q_o \sigma_a^2 \quad (2-13)$$

Nedostatak ove metode je da ne uzima u obzir odbijene intervale sleđenja, i pretpostavlja da vozila neće prihvatiti intervale sleđenja manje od onih koje su odbili, odnosno pretpostavlja konzistentnost svih vozača. Takođe, nedostatak ove metode je pretpostavka da je prihvatljiv interval sleđenja zavistan od intenziteta konfliktnog toka  $q_o$ . Na ovaj način, konfliktni tok ima dvostruki uticaj na vrednost zasićenog saobraćajnog toka, indirektno preko vrednosti  $t_c$  i direktno preko modela kapaciteta neprioritetnog saobraćajnog toka. Guo (2010) je u svom radu zasnovanom na istraživanjima na kružnim raskrscima našao da ova metoda daje veće vrednosti prihvatljivog intervala sleđenja u poređenju sa ostalima (Guo, 2010). Brilon (1999) je u svom poređenju metoda za utvrđivanje  $t_c$ , zbog zavisnosti od intenziteta konfliktnog toka, izbacio ovu metodu iz relevantnih (Amin & Maurya, 2015; Mohan & Chandra, 2016).

**Harders metoda** (Harders, 1968), široko primenjivana u Nemačkoj literaturi, analizira sve odbijene intervale sleđenja, eliminišući vozače koji su prihvatili prvi interval sleđenja (Amin & Maurya, 2015). Prilikom obrade rezultata istraživanja, vremenska osa se deli na intervale konstantne dužine  $\Delta t = 0,5$  s, a centar svakog intervala se obeležava sa  $t_i$ . Za svako vozilo koje čeka na prihvatljiv interval sleđenja beleže se svi odbijeni intervali sleđenja i konačno onaj koji je prihvaćen, nakon čega se utvrđuje:

$N_i$  – broj intervala sleđenja veličine  $i$ ,

$A_i$  – broj prihvaćenih intervala sleđenja veličine  $i$ ,  $i$

$$a_i = A_i / N_i$$

Dobijene  $a_i$  vrednosti se mogu predstaviti u zavisnosti od  $t_i$ , a dobijena kriva ima formu kumulativne raspodele  $F_c(t)$ . Estimacija  $t_c$  je data matematičkim očekivanjem formirane funkcije raspodele.

**Binarni logit model** podrazumeva nekoliko modela koje je objedinio i predstavio (Cassidy, Madanat, Wang, & Yang, 1995), a koji primenjuju istu proceduru. Logika modela ovog tipa zasnovana je na odluci vozača između dve alternative, prihvatanje ili obijanje intervala sleđenja.

U situaciji odlučivanja o prihvatanju ili odbijanju dostupnog intervala sleđenja, vaki vozač ostvaruje korist od svoje odluke. Ostvarena korist predstavlja kombinaciju različitih parametara poput bezbednosti, vremenskih gubitaka, i sl. I može se izraziti kao  $U_i$ .

Verovatnoća odabira alternative (prihvatanje/odbijanje) je u ovom modelu zasnovana na linearnoj funkciji:

$$U_i = \alpha_i + \beta_{i1}x_1 + \dots + \beta_{iK}x_K \quad (2-14)$$

Gde je:

$U_i$  – korist od izbora alternative  $i$ ,

$\alpha$  - konstanta,

$\beta_1 \dots \beta_K$  – koeficijenti odgovarajućih promenljivih,

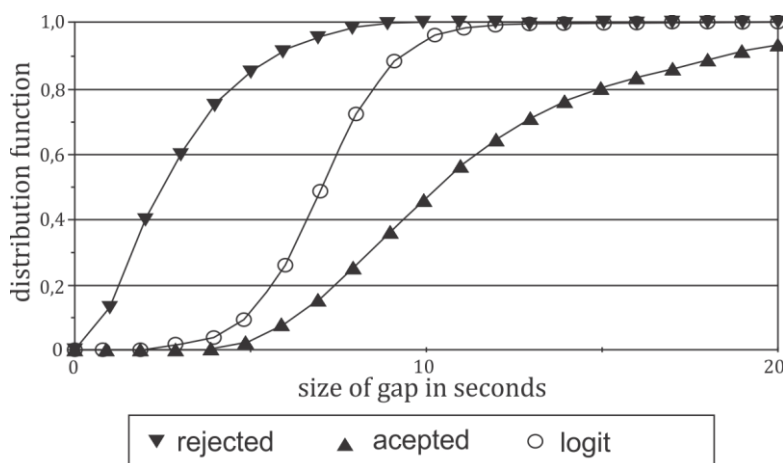
$x_1 \dots x_K$  – promenljive koje utiču na donošenje odluke.

Verovatnoća prihvatanja intervala sleđenja data je kao:

$$P(i) = \frac{1}{1 + e^{-U}} = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha_i + \beta_{i1}x_1 + \dots + \beta_{iK}x_K)}} \quad (2-15)$$

Konačno, kritičan prihvatljiv interval sleđenja je ona vrednost intervala sleđenja za koju je verovatnoća prihvatanja jednaka 0,50. Parametri  $\alpha$  i  $\beta$  se mogu proceniti nekom od tehnika maksimizacije, a najčešće je to metoda maksimalne verodostojnosti.

Ova metoda je u literaturi često korišćena kada autori žele da kvantifikuju brojne uticajne faktore (vreme čekanja na interval sleđenja, karakteristike vozila, broj traka, i sl.), na donošenje odluke o prihvatanju ili odbijanju ponuđenog intervala sleđenja (Patil & Pawar, 2014; Wang, Wu, Zheng, & McDonald, 2010).



Slika 2-4. Ilustracija logit metode raspodele prihvatljivog intervala sleđenja (Izvor: Brilon et al., 1997)

**Metoda maksimalne verodostojnosti** (eng. Maximum Likelihood Method, MLM) je metoda koju je predložio Troutbeck (1992), i predstavlja jednu od najkorišćenijih u literaturi (Tian et al., 1999). Brilon i dr. (1997) su zaključili u svom pregledu metoda za utvrđivanje  $t_c$  da ova metoda daje jednu od najboljih predikcija prihvatljivog intervala sleđenja (Brilon et al.,



1997). MLM metoda pretpostavlja da se prihvatljiv interval sleđenja pojedinačnog vozača nalazi između njegovog maksimalnog odbijenog i prihvaćenog intervala sleđenja. Funkcija raspodele prihvatljivih intervala sleđenja mora biti pretpostavljena, pri čemu se najčešće primenjuje izvorno predložena log-normalna raspodela (Troutbeck, 1992). Parametri ove funkcije, matematičko očekivanje  $\mu$  i varijansa  $\sigma^2$ , procenjuju se maksimizacijom funkcije verodostojnosti. Funkcija verodostojnosti je definisana verovatnoćom da se raspodela kritičnog prihvatljivog intervala sleđenja nalazi između snimljenih raspodela prihvaćenih intervala sleđenja i maksimalnih odbijenih:

$$\prod_{i=1}^n [F(a_i) - F(r_i)] \quad (2-16)$$

Stoga, logaritam od funkcije verodostojnosti:

$$L = \sum_{i=1}^n \ln [F(a_i) - F(r_i)] \quad (2-17)$$

Gde je:

$L$  - funkcija maksimalne verodostojnosti,

$a_i$  - logaritam od prihvaćenog intervala sleđenja vozača  $i$ ,

$r_i$  - logaritam od maksimalnog odbijenog intervala sleđenja vozača  $i$ ,

$F(\dots)$  - kumulativna funkcija raspodele za normalnu raspodelu.

Na ovaj način, maksimizacijom funkcije verodostojnosti primenom iterativnog postupka, i dobijanjem parametara funkcije,  $\mu$  i varijansa  $\sigma^2$ , kritičan prihvatljiv interval sleđenja se utvrđuje kao:

$$t_c = e^{\mu + 0,5\sigma^2} \quad (2-18)$$

U literaturi se iznose zamerke na ovu metodu u smislu neophodnosti pretpostavke funkcije raspodele verovatnoće kritičnog prihvatljivog intervala sleđenja (Hewitt, 1983), a različiti autori su koristili različite raspodele: log-normalna raspodela (Troutbeck, 1992), Erlang ili Weibull raspodelu (Weinert, 2000). Međutim, Weinert (2000) je poredeći primenu različitih pretpostavljenih raspodela došao do zaključka da one utiču na vrednost  $t_c$  na nivou hiljaditog dela sekunde (Weinert, 2000). Do istog zaključka je došao i Brilon (2016) testirajući pet različitih raspodela (Weibull, log-normalna, gama, log-logistička i logistička raspodela), gde su razlike bile na nivou stotog dela sekunde (Brilon, 2016).

**Metoda ekvilibrijuma verovatnoća** (eng. Probability Equilibrium Method, PEM) je predložio Wu (2006) za rešavanje nedoumica koje se odnose na pretpostavljenu raspodelu verovatnoća u okviru MLM metode (Wu, 2006). Takođe, ovaj metoda uzima u obzir sve odbijene, a ne samo maksimalne odbijene intervale sleđenja; iako su neki autori primenjivali i jednu i drugu varijantu (Troutbeck, 2014). Navedena metoda nije u širokoj upotrebi jer su dobijeni rezultati veoma slični rezultatima MLM metode (Vinayaraj, Arkatkar, Joshi, & Parida, 2020). Metodom se direktno generiše funkcija raspodele kritičnih prihvatljivih intervala sleđenja, i to:

$$F_{t_c}(t) = \frac{F_a(t)}{F_a(t) + 1 - F_r(t)} = 1 - \frac{1 - F_r(t)}{F_a(t) + 1 - F_r(t)} \quad (2-19)$$

Gde je:

$F_a(t)$  - funkcija raspodele prihvaćenih intervala sleđenja,

$F_r(t)$  - funkcija raspodele odbijenih intervala sleđenja.

Metoda PEM je primenjiva ukoliko je sveukupni minimalni prihvaćeni interval sleđenja  $t_{a,min}$  manji od sveukupnog maksimalnog odbijenog intervala sleđenja, što može izostati ukoliko je uzorak intervala sleđenja mali (Wu, 2006).

Kritična vrednost prihvatljivog intervala sleđenja data je kao:

$$t_c = \sum (f_{tcj} \cdot t_{dj}) \quad (2-20)$$

Gde je:

$t_{dj}$  – reprezent klase  $j$ , odnosno prosek dva uzastopna intervala sleđenja,

$f_{tcj}$  – frekvencija između dva uzastopna intervala sleđenja.

### **2.1.2 Eksperimentalni modeli kapaciteta neprioritetnog toka**

U literaturi su retki radovi koji se bave modelima kapaciteta neprioritetnih tokova koji su zasnovani na eksperimentalnim istraživanjima. Kao što je prethodno navedeno, najveći deo istraživanja u oblasti kapaciteta bavi se detaljnom analizom parametara analitičkih modela kao što su  $t_c$  i  $t_{fh}$ .

Kimber i Coombe (1980) su razvili model kapaciteta neprioritetnih tokova u zavisnosti od nekoliko parametara (konfliktni tok, širina trake, okruženje, preglednost) na osnovu istraživanja sprovedenih na 37 nesignalisanih raskrsnica (Kimber & Coombe, 1980).

Tracz (1988) je dao model kapaciteta neprioritetnog toka u zavisnosti isključivo od intenziteta konfliktnog toka (Tracz, 1988):

$$c = 887 - 0,547q_o \quad (2-21)$$

Takođe, Kimber (1989) je našao sličnu lineranu zavisnost kapaciteta neprioritetnog toka na nesignalisanim raskrsnicama i intenziteta konfliktnog toka (Kimber, 1989):

$$c = 675 - 0,400q_o \quad (2-22)$$

Kyte i dr. (1991) su razvili model kapaciteta neprioritetnog prilaza na nesignalisanoj raskrsnici primenom linearne regresije u zavisnosti od intenziteta konfliktnog toka. Rezultati su bazirani na ukupno 13 sati istraživanja na 9 raskrsnica (Kyte, Zegeer, & Lall, 1991):

$$c = 687 - 0,307q_o \quad (2-23)$$

Kyte i dr. (1992) su dali i poboljšanu varijantu modela baziranu na većem obimu istraživanja (12 raskrsnica, i ukupno 26,75 sati). Navedeni model je zasnovan na uticaju dva parametra, intenzitet konfliktnog toka  $q_o$  i brzina u glavnom toku  $V_o$  (Kyte, Lall, & Mahfood, 1992):

$$c = \begin{cases} 906 - 0,82q_o, & \text{za } 40 < V_o < 55 \text{ km/h i } q_o < 600 \text{ voz/h} \\ 623 - 0,28q_o, & \text{za } 40 < V_o < 55 \text{ km/h i } q_o > 600 \text{ voz/h} \\ 390 - 0,11q_o, & \text{za } 55 < V_o < 90 \end{cases} \quad (2-24)$$

Wong (1996) je na bazi sprovedenih istraživanja na nesignalisanim raskrsnicama utvrdio da kapacitet neprioritetnog toka zavisi od ukupne širine traka konfliktnog toka, širine trake za levo skretanje i preglednosti na raskrsnici (Wong, 1996).

$$c = F(745 - 0,364 \cdot Y \cdot q_o) \quad (2-25)$$

$$F = (1 + 0,094(W_L - 3,65))(1 + 0,0009(V_{RL} - 120)) \quad (2-26)$$

$$Y = 1 - 0,0345W \quad (2-27)$$

Gde je,

$q_o$  - intenzitet konfliktnog toka (voz/h),

$W$  - ukupna širina traka u konfliktnom toku (m),

$W_L$  - širina trake za levo skretanje (m), i

$V_{RL}$  - preglednost u levom skretanju (m).

## 2.2 PRAKTIČNE METODOLOGIJE PRORAČUNA ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG TOKA

U narednom delu prikazane su relevantne praktične metodologije za utvrđivanje zasićenog saobraćajnog toka.

### 2.2.1 Model HCM 6<sup>th</sup> (Transportation Research Board, 2016)

Bazni oblik modela u HCM 6<sup>th</sup> (Transportation Research Board, 2016) odnosi se na utvrđivanje zasićenog saobraćajnog toka ekskluzivnih traka sa bezkonfliktnim opsluživanjem.

$$S = S_0 f_w f_{HVg} f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT} \quad (2-28)$$

Gde je:

$S_0$  – bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka [voz/h],

$f_w$  - faktor uticaja širine saobraćajne trake,

$f_{HV}$  - faktor uticaja strukture saobraćajnog toka,

$f_g$  - faktor uticaja uzdužnog nagiba,

$f_p$  - faktor uticaja parkiranja,

$f_{bb}$  - faktor uticaja autobuskih stajališta,

$f_a$  - faktor uticaja lokacije raskrsnice,

$f_{LU}$  - faktor uticaja korišćenja saobraćajne trake,

$f_{LT}$  - faktor uticaja levih skretanja,

$f_{RT}$  - faktor uticaja desnih skretanja,

Prethodnoj jednačini su u poslednjoj verziji HCM-a (Transportation Research Board, 2016) uvedena i tri nova faktora za nestandardne uslove u saobraćajnom toku i to kroz faktor uticaja radova na putu, faktor uticaja zasićenja na prilazu raskrsnici i faktor uticaja zasićenja na izlaznom kraku raskrsnice. Ovi faktori nisu detaljno predstavljeni u Disertaciji jer se primenjuju samo u situacijama nestandardnih uslova u saobraćajnom toku.

Bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka predstavlja maksimalnu vrednost zasićenog toka trake pravo, standardne širine od 3,5 metara, u uslovima homogenog toka putničkih automobila, bez uzdužnog nagiba, parkiranja, stajališta javnog prevoza i sa ravnomernom raspodelom protoka po trakama. Preporučene vrednosti su u zavisnosti od veličine grada, 1.900 voz/h za gradove preko 250.000 stanovnika, u suprotnom 1.750 voz/h.

Faktor uticaja širine saobraćajne trake oslikava uticaj nestandardnih širina saobraćajnih traka na zasićen saobraćajni tok (Tabela 2-1).

**Tabela 2-1. Faktor uticaja širine trake**

Širina trake	Faktor uticaja širine saobraćajne, $f_w$
<3,0 m	0,96
≥3,0-4,0	1,00
>4,0	1,04

Faktor uticaja strukture saobraćajnog toka i uzdužnog nagiba uzima u obzir dodatni prostor koji zauzimaju teretna vozila kao i njihove tehničko-eksploatacione karakteristike u poređenju sa putničkim automobilima. Ovaj faktor je objedinio ova dva uticaja koja su u prethodnim izdanjima američkog priručnika bila tretirana odvojenim faktorima (Transportation Research Board, 2000, 2010).

$$f_{HVg} = \frac{100 - 0,79P_{HV} - 2,07P_g}{100} \quad \text{za } UN < 0$$

$$f_{HVg} = \frac{100 - 0,78P_{HV} - 0,31P_g^2}{100} \quad \text{za } UN \geq 0$$
(2-29)

Gde je,

$P_{HV}$  – procenat teretnih vozila (<50%),

$P_g$  – procenat uzdužnog nagiba (od -4% do +10%).

Faktor uticaja parkiranja u zoni raskrsnice kvantifikuje uticaj manevara parkiranja na susednu saobraćajnu traku:

$$f_p = \frac{N - 0,1 - \frac{18N_m}{3.600}}{N} \geq 0,05$$
(2-30)

Gde je,

$N_m$  – broj parking manevara (manevara/h),

$N$  – broj traka (traka).

Za pojedinačni manevar parkiranja ovim faktorom se pretpostavlja da dolazi do blokade susedne saobraćajne trake u trajanju od 18 s. Takođe, samo postojanje parkiranja i sa 0 manevara/h ima uticaj na zasićen saobraćajni tok.

Faktor uticaja autobuskih stajališta kvantifikuje uticaj zaustavljanja vozila javnog prevoza na stajalištu, bilo na prilaznom ili izlaznom kraku raskrsnice.

$$f_{bb} = \frac{N - \frac{14,4N_b}{3.600}}{N} \geq 0,05$$
(2-31)

Gde je  $N_b$  broj zaustavljanja vozila (bus/h). Predmetni faktor pretpostavlja zadržavanje vozila na stajalištu u trajanju od 14,4 s, a u obzir uzima samo ona zaustavljanja vozila javnog prevoza koja dovode do blokiranja saobraćajne trake.

Faktor uticaja lokacije raskrsnice kvantifikuje uticaj neefikasnosti saobraćajnog procesa na raskrsnicama u centralnim zonama gradova ( $f_a = 0,9$ ), kao i na raskrsnicama sa nepovoljnom geometrijom.

Faktor uticaja korišćenja saobraćajne trake kvantifikuje uticaj neravnomerne raspodele saobraćajnog toka na saobraćajne trake iste namene:

$$f_{LU} = \frac{v_g}{N_e v_{g1}}$$
(2-32)

Gde je,

$v_g$  – ukupni saobraćajni zahtev (voz/h),

$v_{g1}$  – saobraćajni zahtev trake sa najvećim zahtevom (voz/h),

$N_e$  – broj saobraćajnih traka.

Faktor uticaja levih skretanja kvantifikuje uticaj trajektorije levog skretanja na zasićen saobraćajni tok, i izračunava se kao:

$$f_{LT} = \frac{1}{E_L} \quad (2-33)$$

Gde je  $E_L$  ekvivalent za konverziju zasićenog saobraćajnog toka trake pravo na tok u zaštićenom levom skretanju, i iznosi 1,05. Ukoliko se radi o mešovitoj traci za levo skretanje ili o nezaštićenom levom skretanju ovaj faktor se ne primenjuje, već se primenjuje procedura za utvrđivanje uticaja konfliktnog toka koja je prikazana u narednom delu. Predložena procedura je detaljna i zahteva poznavanje parametara rada signala, dok se za planerski nivo, kada rad signala nije poznat, koriste veličine date u narednoj tabeli.

**Tabela 2-2. Ekvivalent  $E_L$  za konverziju zasićenog saobraćajnog toka trake pravo na tok u levom skretanju**

Način opsluživanja	Zahtev u konfliktnom toku $Q_o$ (voz/h)	$E_L$
Zaštićeno	-	1,05
	<200	1,1
	200-599	2,0
Nezaštićeno	600-799	3,0
	800-999	4,0
	≥1.000	5,0

### 2.2.1.1 Model za nezaštićena leva skretanja (Transportation Research Board, 2016)

**Prvi pristup** u modeliranju zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja koje se opslužuje iz ekskluzivne trake, pored standardnih prethodno navedenih faktora uticaja, uzima u obzir i uticaj vozačkog konfliktnog toka preko svoje bazne vrednosti  $S_p$  kao i faktora uticaja konfliktnog pešačkog i biciklističkog toka  $f_{Lpb}$ .

$$S_l = S_p f_w f_{HVg} f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{Lpb} \quad (2-34)$$

Bazna vrednost  $S_p$  zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja utvrđuje se na način da se levo skretanje tretira kao nesignalisano, odnosno primenjuje se model prihvatljivog intervala sleđenja čiji je izvorni oblik dao (Harders, 1968):

$$S_p = \frac{Q_o e^{-Q_o t_c / 3.600}}{1 - e^{-Q_o t_{fh} / 3.600}} \quad (2-35)$$

Gde je,

$Q_o$  – saobraćajni zahtev u konfliktnom toku (voz/h),

$t_c$  – prihvatljiv interval sleđenja = 4,5 (s),

$t_{fh}$  – interval sleđenja vozila u levom skretanju (4,5 s ako se levo opslužuje iz mešovite trake i 2,5 s ako se opslužuje iz ekskluzivne trake).

U slučaju ako je konfliktni tok jednak 0 voz/h u nekom periodu analize, u modelu je neophodno primeniti minimalnu pozitivnu vrednost od 0,1 voz/h. Na taj način maksimalna bazna vrednost nezaštićenog levog skretanja iz ekskluzivne trake iznosi 1.440 voz/h.

**Drugi pristup** modeliranju zasićenog saobraćajnog toka pretpostavlja da, tokom opsluživanja nezaštićenog levog skretanja figurišu dva zasićena saobraćajna toka u ekskluzivnoj traci,  $S_{l1}$  i  $S_{l2}$ .

Prvi zasićeni saobraćajni tok ostvaruje se u periodu od početka efektivnog zelenog do završetka pražnjenja reda konfliktnog saobraćajnog toka, odnosno traje u periodu  $gq$ . Ukoliko postoji više od jedne trake u konfliktnom toku ( $N_o \neq 1$ ) zasićeni tok u ovom periodu iznosi 0 voz/h. Međutim, ukoliko postoji samo jedna mešovita traka u konfliktnom toku pojava naspramnih levih skretanja veštački stvara prihvatljive intervale sleđenja u kojima se predmetno levo skretanje može opsluživati.

$$S_{l1} = \frac{S_l f_{Lpb}}{E_{L2}}, \text{ ako je } N_o = 1 \quad (2-36)$$

$$S_{l1} = 0, \quad \text{u suprotnom}$$

Ekvivalent  $E_{L2}$  utvrđuje se kao:

$$E_{L2} = \frac{1 - (1 - P_{lto})^{n_q}}{P_{lto}} \quad (2-37)$$

$$n_q = 0,278g_q \geq 0 \quad (2-38)$$

Gde je,

$P_{lto}$  – udeo levog skretanja u konfliktnom toku (decimalno),

$n_q$  – maksimalan broj vozila u konfliktnom toku koji mogu proći pre pojave  $g_u$  (voz).

0,278 – aproksimacija zasićenog saobraćajnog toka u konfliktnom toku (voz/s).

Drugi zasićeni saobraćajni tok se realizuje nakon pražnjenja reda konfliktnog toka, i traje  $g_u = g - g_q$  sekundi. Vrednost zasićenog saobraćajnog toka u ovom periodu se utvrđuje baznim modelom za nezaštićeno levo skretanje ( $S_{l2} = S_l$ ).

Primenjivost drugog pristupa u modeliranju zasićenog saobraćajnog toka podrazumeva detaljno poznavanje parametara rada signala, što je na početku procesa optimizacije rada signala nemoguće. U tom smislu, za taj nivo analize neophodno je koristiti planerski nivo modela.

### 2.2.2 Websterov model (Webster & Cobbe, 1966)

Bazni oblik modela zasićenog saobraćajnog toka u PAJ/h dat je za celokupan prilaz raskrsnici isključivo zavisi od širine prilaza:

$$S = 525w \quad (2-39)$$

Gde je  $w$  ukupna širina prilaza u metrima.

Modelom su obuhvaćene širine prilaza u rasponu od 5,5 do 18,3 m. Za širine manje od 5,5 m, vrednosti zasićenog saobraćajnog toka su prikazane u narednoj tabeli.

**Tabela 2-3. Zasićen saobraćajni tok u zavisnosti od širine prilaza (Izvor: Webster & Cobbe, 1966)**

$w$ (m)	3,0	3,4	3,7	4,0	4,3	4,6	4,9	5,2
$S$ (PAJ/h)	1.850	1.875	1.900	1.950	2.075	2.250	2.475	2.700

Uticaj uzdužnog nagiba UN je utvrđen na osnovu prethodnih radova (Dick, 1963) da za svaki 1% uspona zasićeni saobraćajni tok opada za 3%, dok u slučaju pada od 1% raste za 3%. Vrednosti važe za UN u rasponu od -5 do +10%. Uticaj strukture toka dat je preko odgovarajućih PAJ ekvivalenata (Tabela 2-4).

**Tabela 2-4. PAJ ekvivalenti po kategorijama vozila**

Kategorija vozila	TTV i STV	BUS	Tramvaj	LTV	Motocikl	Bicikl
<i>Epaj</i>	1,75	2,25	2,50	1	0,33	0,2

Uticaj vozila u levom skretanju razlikuje se od načina opsluživanja ovih tokova i modelom su obuhvaćena 4 različita slučaja:

1. Bez konfliktnog toka i bez ekskluzivne trake za levo –  $S$  (PAJ/h) prilaza se utvrđuje na osnovu prethodno datih uticaja.
2. Bez konfliktnog toka sa ekskluzivnom trakom za levo –  $S$  (PAJ/h) se utvrđuje posebno za ovu traku i zavisi od radijusa levog skretanja  $r$  u metrima:

$$S = \frac{1800}{1 + 1,524/r} \text{ za jednu traku za levo skretanje} \quad (2-40)$$

$$S = \frac{3000}{1 + 1,524/r} \text{ za dve trake za levo skretanje}$$

3. Sa konfliktnim tokom, bez ekskluzivne trake za levo – u ovom slučaju postoji uticaj koji je definisan na tri načina: uticaj konfliktnog toka na vozila u levom skretanju a posledično i na tokove pravo jer se realizuju iz mešovite trake; uticaj na raspodelu po trakama u toku pravo; i uticaj vozila koja su ostala u raskrsnici. Prva dva uticaja na tokove pravo se mogu pretpostaviti preko ekvivalenta da jedno vozilo u levom skretanju odgovara 1,75 vozila pravo. Treći uticaj je identičan nezavisno od toga dal postoji ili ne ekskluzivna traka za levo.
4. Sa konfliktnim tokom i sa ekskluzivnom trakom za levo – postoji samo treći uticaj iz prethodnog slučaja, odnosno ne postoji uticaj na tokove pravo. Ovaj uticaj je utvrđen na osnovu teorijskog maksimalnog zasićenog saobraćajnog toka koji je dao Tarner (Tanner, 1953, 1962) na osnovu eksponencijalne raspodele prihvatljivih intervala sleđenja sa pretpostavkama da prihvatljiv interval sleđenja iznosi 5 i 6 sekundi, u slučaju jedne i više traka u konfliktnom toku i sa preporučenim vrednostima i za ostale faktore (Slika 2-5) pod pretpostavkom kontinualnog



kretanja vozila u konfliktnom toku.  $S$  se u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku utvrđuje se na osnovu narednih izraza:

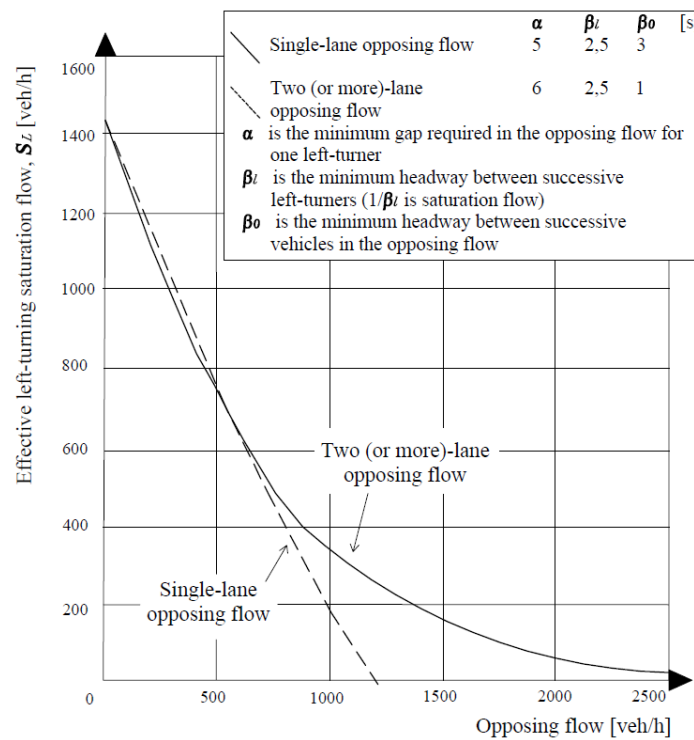
$$S_{l\_1kt} = \frac{Q_o (1 - \beta_o q_o)}{e^{q_o(\alpha - \beta_o)} (1 - e^{-\beta_l q_o})} \quad (2-41)$$

$$S_{l\_2kt} = \frac{2Q_o (1 - \beta_o q_o)}{e^{2q_o(\alpha - 1/2\beta_o)} (1 - e^{-2\beta_l q_o})}$$

Za utvrđivanje uticaja vozila koja ostaju u raskrsnici neophodno je utvrditi maksimalna broj vozila u levom skretanju po ciklusu:

$$n_l = s_l \frac{gs_o - q_o C}{s_o - q_o} \quad (2-42)$$

Gde su  $q$  i  $s$  protok i zasićen saobraćajni tok konfliktnog toka u voz/s a  $g$  i  $C$  zeleno vreme i ciklus u s.



Slika 2-5. Webster-ov model zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja (Izvor: Webster & Cobbe, 1966)

### 2.2.3 Australijski HCM (Akcelik, 1981)

Australijski HCM model koji je predložen od strane Akcelik (1981) definiše zasićeni saobraćajni tok kao (Akcelik, 1981):

$$S = S_b \frac{f_w f_g}{f_c} \quad (2-43)$$

Gde je,

$S$  – zasićeni saobraćajni tok (voz/h),

$S_b$  – bazna vrednost zasićenog toka (PAJ pravo/h),

$f_w$  – faktor uticaja širine trake,

$f_g$  – faktor uticaja uzdužnog nagiba,

$f_c$  – faktor uticaja strukture toka.

Bazne vrednosti po ovom modelu u zavisnosti su od dva faktora, uslova okruženja i tipa trake, koji su definisani opisno, što delimično otežava primenu samog modela. Takođe, bazna vrednost podrazumeva maksimalan broj putničkih vozila u toku pravo i izražava se u jedinici putničkih automobila pravo u jedinici vremena. Uslovi okruženja su grupisani u tri klase čime je obuhvaćen značajan broj mogućih uticajnih faktora:

- Klasa A obuhvata idealne odnosno približno idealne uslove za kretanje vozila, dobru preglednost, neznatan broj pešaka, bez prisustva parkiranja ili vozila za snabdevanje.
- Klasa B podrazumeva prosečne uslove, adekvatnu geometriju raskrsnice, mali do srednji broj pešaka i postojanje uticaja parkiranja i snabdevanja na odvijanje saobraćaja na raskrsnici.
- Klasa C podrazumeva loše uslove odvijanja saobraćaja, značajno prisustvo pešačkih tokova, lošu preglednost, i uticaj parkiranja, snabdevanja i autobuskih stajališta.

Za definisanje bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka definisana su tri tipa trake:

- Tip 1 – traka pravo,
- Tip 2 – taka namenjena skretanjima (ekskluzivna ili mešovita) sa adekvatnim radijusom i neznatnim uticajem pešaka na vozila u skretanju,
- Tip 3 –traka namenjena skretanjima (ekskluzivna ili mešovita), ali sa malim radijusom skretanja i/ili značajnijim uticajem pešačkih tokova.

**Tabela 2-5. Bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka po australijskom HCM-u u PAJ/h**

Klasa okruženja	Tip trake		
	1	2	3
A	1.850	1.810	1.700
B	1.700	1.670	1.570
C	1.580	1.550	1.270

Faktor uticaja širine trake utvrđuje se u zavisnosti od širine trake  $w$  na naredni način:

$$f_w = \begin{cases} 1,0 & \text{za } w = [3,0 - 3,7] \\ 0,55 + 0,14w & \text{za } 2,4 \leq w < 3,0 \\ 0,83 + 0,05w & \text{za } 4,6 \geq w > 3,7 \end{cases} \quad (2-44)$$

Faktor uticaja uzdužnog nagiba utvrđuje se narednom formulom pri čemu se  $-G_r$  koristi za uspon, a  $+G_r$  za pad:

$$f_g = 1 \pm 0,5 \frac{G_r}{100} \quad (2-45)$$

Faktor uticaja strukture toka koristi za prevođenje zasićenog saobraćajnog toka iz PAJ pravo/h u voz/h, čime se u obzir uzima uticaj kako kategorija vozila tako i tipa manevara.

$$f_c = \frac{\sum e_i q_i}{q} \quad (2-46)$$

Gde je,

$q_i$  – protok u vozilima za vozilo-manevar  $i$ ,

$q$  – ukupan protok ( $=\sum q_i$ ),

$e_i$  – ekvivalent broja vozila pravo za vozilo-manevar  $i$  (PAJ pravo/voz).

**Tabela 2-6. Ekvivalent broja vozila pravo za vozilo-manevar**

Klasa vozila	Tip manevara			
	Pravo	Skretanje	Restriktivno skretanje	Skretanje sa konfliktnim tokom
PA	1	1	1,25	$e_o$
TV	2	2	2,5	$e_o+1$

### 2.2.3.1 Model za nezaštićeno levo skretanje (Akcelik, 1981)

Model je namenjen utvrđivanju zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja i podrazumeva poznavanje parametara rada signala. Data su dva modela i to model koji tretira celu dužinu trajanja zelenog signalnog pojma i model koji uzima u obzir samo nezasićeni deo zelenog vremena konfliktnog toka.

Prvim modelom se utvrđuje zasićeni saobraćajni tok tokom celokupnog trajanja zelenog i dat je narednom jednakosti:

$$S_l = \frac{1800}{e_o} \quad (2-47)$$

Drugi model se koristi za utvrđivanje zasićenog saobraćajnog toka u toku nezasićenog dela zelenog vremena konfliktnog toka pretpostavljajući da je traka blokirana u toku pražnjenja reda konfliktnog toka:

$$S_o = 3.600s_u \quad (2-48)$$

Ekvivalent koji se koristi za konverziju toka putničkih automobila pravo u tok nezaštićenog levog skretanje utvrđuje se kao:

$$e_o = \frac{s_{pa\_pravo}}{s_{voz}} = \frac{0,5g}{s_u g_u + n_f} \quad (2-49)$$

Gde je,

$g$  – zeleno vreme toka u levom skretanju (s),

$g_u$  – nezasićeni deo zelenog vremena konfliktnog toka (s),

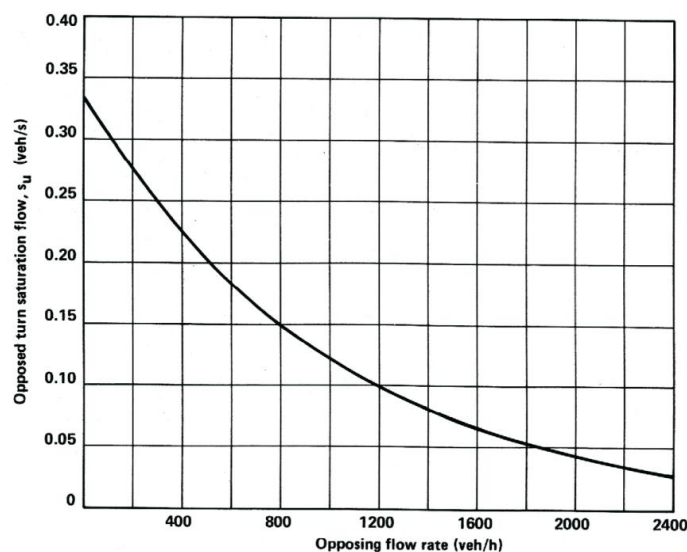
$n_f$  – broj vozila u levom skretanju nakon isteka zelenog vremena, posmatrano po ciklusu, (preporučena vrednost od 1,5 voz),

0,5 – aproksimacija baznog zasićenog saobraćajnog toka =1800 PA pravo/h, odnosno 0,5 PA pravo/s,

$s_u$  – zasićeni saobraćajni tok levog skretanja u toku nezasićenog dela zelenog vremena konfliktnog toka u voz/s (Slika 2-6), zasnovan na teoriji prihvatljivog intervala sleđenja:

$$s_u = \frac{q_o e^{-\alpha q_o}}{1 - e^{-\beta q_o}} \quad (2-50)$$

Gde je  $q_o$  – protok u konfliktnom toku (voz/s),  $\alpha$  prihvatljiv interval sleđenja =5 s, i  $\beta$  interval sleđenja vozila u levom skretanju =3 s.



Slika 2-6. Zasićeni saobraćajni tok nezaštićenog levog skretanja u toku nezasićenog dela zelenog vremena konfliktnog toka (Izvor: Akcelik, 1981)

Nezasićeni deo zelenog vremena konfliktnog toka može se utvrditi ukoliko su poznati parametri rada signala:

$$g_u = \frac{g - yC}{1 - y} \quad (2-51)$$

Gde je  $g$  zeleno vreme konfliktnog toka,  $C$  je dužina ciklusa, a  $y$  stepen iskorišćenja idealnog kapaciteta, tj. odnos protoka i zasićenog saobraćajnog toka.

Po predloženom modelu zasićeni saobraćajni tok nezaštićenog levog skretanja je u funkciji parametara rada signala i zahteva iterativan postupak koji ukoliko isti nisu poznati započinje

pretpostavljenim vrednostima i ponavlja se sve dok se iteracijama više ne dobijaju različite vrednosti. U tu svrhu preporučena je vrednost  $e_o=3$  (odnosno  $s_o=600$  voz/h) koja se može koristiti za prvu iteraciju.

### 2.2.4 HBS model (FGSV, 2015)

Bazni oblik HBS 2015 modela zasićenog saobraćajnog toka definisan je u odnosu na baznu vrednost intervala sleđenja koja iznosi  $t_{H,0} = 1,8$  s što odgovara baznoj vrednosti zasićenog toka od 2.000 voz/h (Čelar, Stanković, & Kajalić, 2020). Operativna vrednost se utvrđuje naredim izrazom (FGSV, 2015):

$$t_H = t_{H,0} f_{HV} f_1 f_2 \quad (2-52)$$

Gde je,

$t_H$  – operativna vrednost intervala sleđenja (s),

$t_{H,0}$  – bazna vrednost prosečnog intervala sleđenja (s),

$f_{HV}$  – faktor uticaja teretnih vozila,

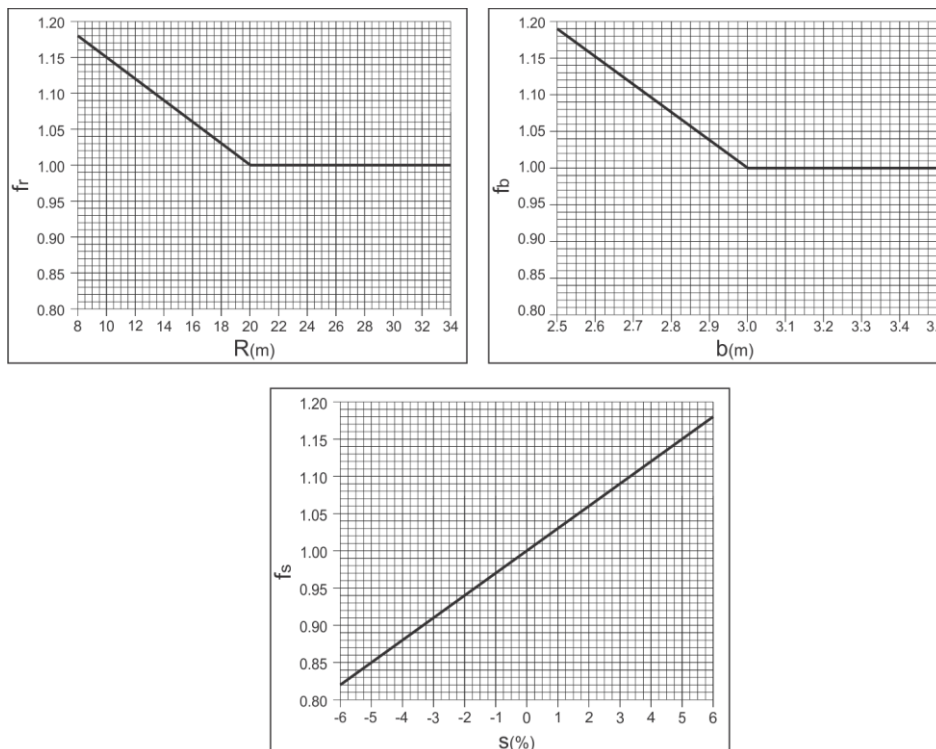
$f_1 = \max(f_b, f_r, f_s)$ , pri čemu je  $f_b$  faktor uticaja širine saobraćajne trake,  $f_r$  faktor uticaja radijusa skretanja a  $f_s$  faktor uticaja uzdužnog nagiba,

$f_2 = \max(1, f_s)$ .

Faktor uticaja teretnih vozila dat je narednim izrazom, dok se vrednosti ostalih faktora utvrđuju na osnovu priloženih dijagrama (Slika 2-7):

$$f_{HV} = \frac{Q_{PA} + 1,75Q_{TTV+BUS} + 2,5Q_{AV}}{Q} \quad (2-53)$$

Gde su  $Q_{PA}$ ,  $Q_{TTV+BUS}$  i  $Q_{AV}$  protoci po odgovarajućim kategorijama vozila, a  $Q$  ukupan protok (voz/h).



Slika 2-7. Vrednosti faktora radijusa skretanja, širine saobraćajne trake i uzdužnog nagiba (Izvor: Čelar, Stanković & Kajalić, 2020)

Vrednost zasićenog toka  $S$ , utvrđuje se narednim izrazom:

$$S = \frac{3600}{t_H} \quad (2-54)$$

### 2.2.4.1 Kapacitet nezaštićenog levog skretanja po HBS-u

HBS priručnik ne daje poseban model za nezaštićena leva skretanja, a uticaj konfliktnog toka na vozila u levom skretanju se kvantifikuje tek nakon proračuna parametara rada signala. Kapacitet se utvrđuje na osnovu detaljnog poznavanja parametara rada signala i sastoji se od nekoliko delova (FGSV, 2015):

$$K_L = \min \begin{cases} K_u + K_{\Delta t} + K_p \\ K_0 \end{cases} \quad (2-55)$$

$K_L$  – kapacitet trake za levo skretanje (voz/h),

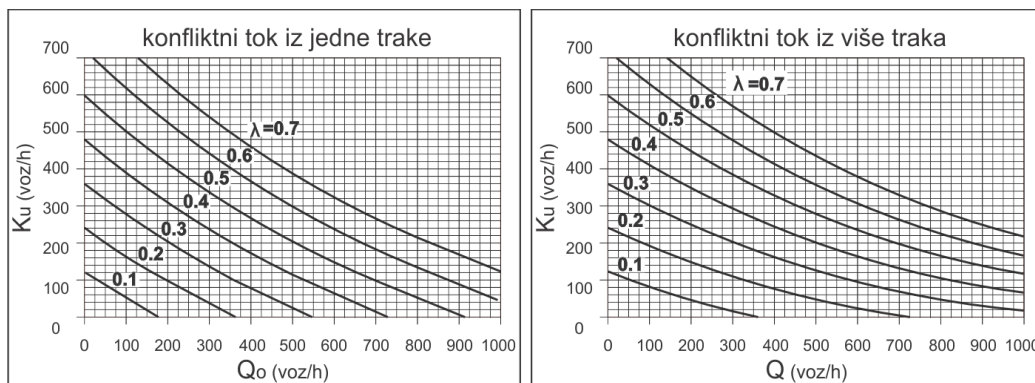
$K_u$  – kapacitet tokom nezaštićenog dela zelenog vremena (voz/h),

$K_{\Delta t}$  – kapacitet tokom zaštitnog vremena (voz/h),

$K_p$  – kapacitet tokom zaštićenog dela zelenog vremena,

$K_0$  – kapacitet na osnovu baznog modela zasićenog saobraćajnog toka  $K_0 = \lambda S$  (voz/h).

Deo kapaciteta u toku nezaštićenog dela zelenog vremena,  $K_u$ , zasniva se na teoriji prihvatljivog intervala sleđenja, kao i vrednost zasićenog saobraćajnog toka kod prethodnih modela (Slika 2-8).



Slika 2-8. Kapacitet nezaštićenog levog skretanja tokom zelenog vremena (Izvor: Čelar, Stanković, & Kajalić, 2020)

Kapacitet tokom zaštitnog vremena  $K_{\Delta t}$  utvrđuje se:

$$K_{\Delta t} = N_R \cdot \frac{3600}{C} \quad (2-56)$$

Gde je,

$C$  – dužina ciklusa (s),

$N_R$  – broj vozila koji može da prođe raskrnicu tokom zaštitnog vremena u okviru jednog ciklusa (voz/ciklusu).

Ukoliko se levo skretanje u nekom delu vremena opslužuje zaštićeno, kapacitet tog dela je:

$$K_p = S \frac{g_p}{C} \quad (2-57)$$

Gde je,

$S$  – zasićen saobraćajni tok zaštićenog levog skretanja (voz/h),

$g_p$  – zaštićeni deo zelenog vremena (s).

Konačno, nakon proračuna kapaciteta, povratno se može utvrditi zasićeni saobraćajni tok za nezaštićeno levo skretanje:

$$S_L = \frac{K_L}{\lambda} \quad (2-58)$$

### 2.2.5 CCG model (Teply, Allingham, Richardson, & Stephenson, 2008)

Metodologija utvrđivanja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka po CCG (*eng. Canadian Capacity Guide*) modelu slična je metodologiji datoj u HCM-u: uzima u obzir niz faktora koji se odnose na geometriju raskrsnice, saobraćajne uslove i karakteristike rada signala (Teply et al., 2008). Bazni oblik modela dat je narednom jednačinom:

$$S = S_b f(F_{adj}) \quad (2-59)$$

Gde je,

$S$  – operativna vrednost zasićenog saobraćajnog toka (PAJ/h),

$S_b$  – bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka (PAJ/h), koja je utvrđena u odnosu na baznu vrednost po HCM priručniku i to kao  $S_{HCM} = 1,05S_{CCG}$ ,

$F_{adj}$  – uticajni faktori.

Preporuka autora modela je da se ne uzimaju u obzir svi uticajni faktori, jer se njihovom multiplikacijom može značajno potceniti vrednost zasićenog toka. U tom smislu autori daju pregled mogućih kombinacija faktora i situacije kada je potrebno primeniti određenu kombinaciju faktora, kada je potrebno primeniti posebnu proceduru, a kada je potrebno doneti inženjersku odluku (Slika 2-9).

U nastavku su dati neki od osnovnih uticajnih faktora i preporuke za njihovu primenu.

Faktor uticaja širine trake  $F_w$  dat je tabelarno (Tabela 2-7), dok se faktor uticaja uzdužnog nagiba  $F_g$  utvrđuje narednom jednačinom:

$$F_g = 1 - (G + HV) \leq 1,1 \quad (2-60)$$

Gde je,

$G$  – uzdužni nagib prilaza (decimalno),

$HV$  – udeo teretnih vozila u toku (decimalno).

Tabela 2-7. Faktor uticaja širine trake po CCG priručniku

Širina trake $W_{lane}$ (m)	$F_w$
$W_{lane} \leq 3,0$ m	$0,5 W_{lane} - 0,5$
$3,0 < W_{lane} \leq 4,4$ m	1,0
$4,4 < W_{lane} \leq 6,0$ m	$0,385 W_{lane} - 0,695$
$6,0 < W_{lane} \leq 7,0$ m kao jedna traka	$0,385 W_{lane} - 0,695$
$6,0 < W_{lane} \leq 7,0$ m kao dve trake	2,0

		A. Geometrija				B. Saobraćaj			C. Upravljanje					
		a. širina trake	b. uzdužni nagib	c. radijus	d. prostor	a. stajalište JP	b. parkiranje	c. pešaci	a. trajanje zelenog	b. zaštićeno LS	c. nezaštićeno LS	d. nezaštićeno LS + pešaci	e. DS + pešaci	f. mešovite trake
A. Geometrija	a. širina trake	×	×	×	×	⊗	○	×	×	⊗	⊗	○	×	
	b. uzdužni nagib	×	×	×	×	×	○	×	×	⊗	⊗	○	⊗	
	c. radijus	×	×	○	⊗	×	○	×	○	○	○	●	○	
	d. prostor	×	×	○	○	⊗	○	⊗	○	○	○	○	○	
B. Saobraćaj	a. stajalište JP	×	×	⊗	○	○	○	⊗	○	○	○	○	○	
	b. parkiranje	⊗	×	⊗	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	c. pešaci	○	○	○	○	○	○	⊗	○	○	○	●	○	
C. Upravljanje	a. trajanje zelenog	×	×	×	⊗	⊗	○	⊗	○	●	○	○	○	
	b. zaštićeno LS	×	×	○	○	○	○	○	●	○	●	●	○	
	c. nezaštićeno LS	⊗	⊗	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	
	d. nezaštićeno LS + pešaci	⊗	⊗	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	e. DS + pešaci	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	f. mešovite trake	×	⊗	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

- Nije primenjivo
- Neophodna procena - dominantan uticaj
- × Množenje faktora
- ⊗ Moguće množenje faktora
- Posebna procedura ili preporuka

Slika 2-9. Faktori uticaja na zasićeni saobraćajni tok i njihove kombinacije po CCG priručniku (Izvor: Teply et al., 2008)

Faktor uticaja radijusa skretanja primenjuje se za desna skretanja i za leva skretanja kada ne postoji uticaj konfliktnog vozačkog toka. Ukoliko je uticaj pešaka veći od uticaja radijusa desnog skretanja, ovaj faktor se može zanemariti.

$$F_r = 0,5 + \frac{R}{30} \quad \text{ako je } R < 15,0 \text{ m} \quad (2-61)$$

$$F_r = 1,0 \quad \text{ako je } R \geq 15,0 \text{ m}$$



Faktor uticaja stajališta javnog prevoza je različit u slučaju kada se radi o stajalištu na prilazu ili na izlazu raskrsnice. Stajalište na prilazu utiče na zasićen saobraćajni tok u odnosu na koeficijent uticaja stajališta u toku zelenog vremena i zavisi od procenta zaustavljanja vozila javnog prevoza tokom zelenog, broja vozila javnog prevoza i prosečnog vremena zadržavanja na stajalištu. Stajalište na izlazu utiče na zasićen saobraćajni tok samo u slučaju kada je ukupno vreme zadržavanja vozila javnog prevoza na stajalištu veće od vremena potrebnog da se formira red između stajališta i raskrsnice.

Faktor uticaja parkiranja utvrđuje se u odnosu na broj parking manevara na sat na prilazu i izlazu raskrsnice  $N_m$ :

$$F_p = 0,9 - 0,005N_m \quad (2-62)$$

Faktor uticaja dužine zelenog vremena,  $F_{green}$ , koji se primenjuje za nezaštićena leva skretanja, uzima u obzir razlike u opsluživanju konfliktnog toka u zavisnosti od dužine zelenog. Ovaj faktor pretpostavlja da se na početku i na kraju pražnjenja reda u konfliktnom toku realizuju intervali sleđenja veća od onih u zasićenom toku. Faktor se utvrđuje u zavisnosti od dužine stvarnog zelenog vremena na osnovu jednačina datih u narednoj tabeli.

**Tabela 2-8. Faktor uticaja dužine zelenog vremena u CCG priručniku**

Zelena vreme $g$ (s)	$F_{green}$
$g \leq 20$ s	$0,833 + g/120$
$20 < g \leq 50$ s	1,0
$50 < g \leq 60$ s	$1,5 + g/100$
$g \geq 60$ s	0,9

### 2.2.5.1 Model za nezaštićena leva skretanja po CCG priručniku

Model za nezaštićeno levo skretanje iz ekskluzivne trake podrazumeva primenu tri faktora, širina trake, uzdužni nagib i uticaj konfliktnog toka. Uticaj radijusa na ovaj tip skretanja je zanemariv (Teply et al., 2008).

$$S = S_b F_w F_g F_L \quad (2-63)$$

Kako bi se utvrdio faktor uticaja konfliktnog toka, model se primenjuje kroz dva koraka. U prvom koraku utvrđuje se hipotetički, ekspandirani konfliktni tok tokom zelenog vremena  $Q'_o$ :

$$Q'_o = Q_o \frac{C}{g} \quad (2-64)$$

Gde je,

$Q_o$  – protok konfliktnog toka (PAJ/h),

$C$  – dužina ciklusa (s),

$g$  – zeleno vreme konfliktnog toka (s).

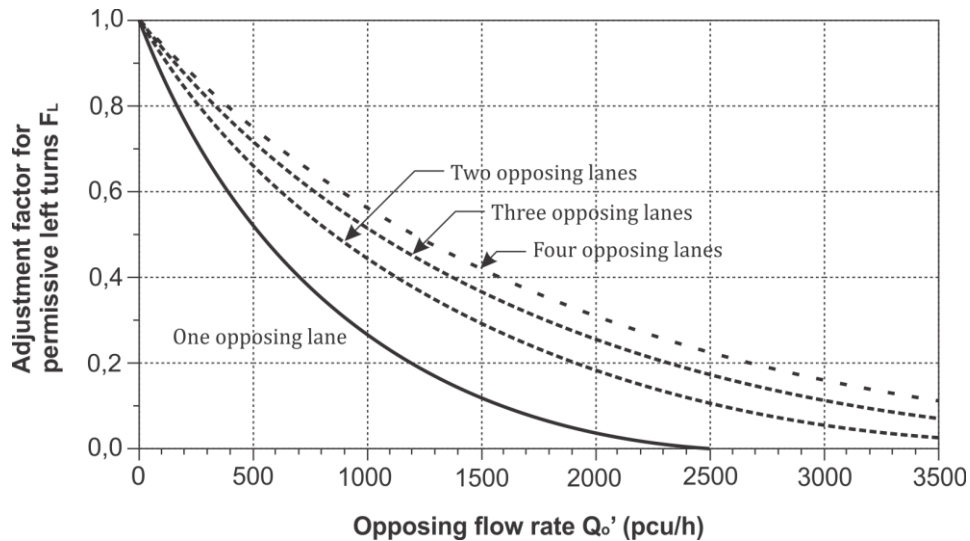
U drugom koraku, utvrđuje se faktor uticaja konfliktnog toka, i to u odnosu na hipotetički, ekspandirani konfliktni tok:

$$F_L = 1,05e^{(-0,00121f Q'_o)} - 0,05 \quad (2-65)$$

Koeficijent  $f$  kvantifikuje uticaj broja traka u konfliktnom toku za tokove pravo i tokove desno koji se opslužuju iz mešovite trake. Preporučene vrednosti date su u narednoj tabeli (Richardson, 1982). Rezultujuća zavisnost faktora uticaja konfliktnog toka prikazana je na narednom grafiku (Slika 2-10).

Tabela 2-9. Uticaj broja traka u konfliktnom toku (Izvor: Richardson, 1982)

Broj traka u konfliktnom toku	1	2	3	4
$f$	1	0,625	0,51	0,44



Slika 2-10. Faktor uticaja konfliktnog toka  $F_L$  u odnosu na ekspanzirani protok

## 2.2.6 Ostali modeli

### 2.2.6.1 Finski LIVASU model

Zasićeni saobraćajni tok po finskom “Liikennevalojen suunnittelu” LIVASU priručniku je definisan u zavisnosti od namene saobraćajne trake i načina opsluživanja (Finnish Road Administration, 2005; Luttinen & Nevala, 2002). Za ekskluzivnu traku za levo skretanje definisana su dva zasićena saobraćajna toka, u zavisnosti od vrste konflikta (vozački ili pešački tok). Model zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja u slučaju konflikta sa vozačkim tokom dat je jednostavnom linearnom zavisnošću:

$$S_L = 1.800 - 1,04Q_o \quad (2-66)$$

Gde je  $Q_o$  protok vozila u konfliktnom toku (voz/h).

### 2.2.6.2 Danski DanKap model

Danski DanKap model zasićenog saobraćajnog toka formulisan je preko intervala sleđenja za pojedinačne manevre kretanja na raskrsnici (Vejdirektoratet – Vejregelrådet, 2015):

$$S = \frac{3.600 f_{LT}}{h_d} \quad (2-67)$$

Gde je  $h_d$  prosečan interval sleđenja dat po manevru kretanja, i za pravo iznosi 1,8 s/PAJ, a 2,2 s/PAJ za skretanja. Faktor  $f_{LT}$  je faktor uticaja konfliktnog vozačkog toka na vozila u levom

skretanju i utvrđuje se po identičnom modelu kao i kod HCM modela, sa razlikom što je izražen preko faktora, pri čemu su preporučene vrednosti intervala sleđenja i prihvatljivog intervala sleđenja 3,0 i 5,5 s, respektivno:

$$f_{LT} = \frac{h_d q_o e^{-5,5q_o/3,600}}{3,600(1 - e^{-3,0q_o/3,600})} \quad (2-68)$$

Na ovaj način model zasićenog saobraćajnog toka za nezaštićena leva skretanja dat je narednom relacijom:

$$S_L = \frac{Q_o e^{-5,5Q_o/3,600}}{1 - e^{-3,0Q_o/3,600}} \quad (2-69)$$

### 2.2.6.3 Švedski Capcal 4 model

Ovaj model zasićenog saobraćajnog toka za nezaštićena leva skretanja ima dva oblika u zavisnosti od tipa konflikta, sa pešačkim ili sa vozačkim tokom (Bang, Wahlstedt, & Linse, 2016). Bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka se koriguje faktorima uticaja širine trake, teretnih vozila i uzdužnog nagiba (Trafikverket, 2014). Faktor uticaja širine trake dat je u narednoj tabeli.

**Tabela 2-10. Faktor uticaja širine trake po Capcal 4 modelu**

Širina trake (m)	2,75	3,00	3,25	3,50	4,00
$f_w$	0,94	0,97	0,99	1,00	1,01

Faktor uticaja teretnih vozila:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + 0,5p_{HV} + 2,5p_{HV}^2 + 0,1p_{HV}G} \quad (2-70)$$

Faktor uticaja uzdužnog nagiba ( $G < 3\%$ ):

$$f_g = \frac{1-G}{100} \quad (2-71)$$

Capcal 4 model za nezaštićena leva skretanja zahteva poznavanje parametara rada signala. Uticaj vozačkog toka na baznu vrednost dat je jedinstveno za mešovitu i za ekskluzivnu traku (Bang, 1978). Međutim, u nastavku su prikazani uticajni faktori koji postoje ukoliko se radi o ekskluzivnoj traci:

$$S_D = (N_g + N_{\Delta t}) \frac{3,600}{g} \quad (2-72)$$

Gde je,

$N_g$  – broj vozila koji se može opslužiti nakon pražnjenja konfliktnog toka,

$N_{\Delta t}$  – broj vozila koji se može opslužiti tokom zaštitnog vremena.

Broj vozila koji se može opslužiti nakon pražnjenja konfliktnog toka može se utvrditi kao:

$$N_g = g_u s_l \quad (2-73)$$

Gde je  $g_u$  deo zelenog nakon pražnjenja reda konfliktnog toka. Vreme potrebno za pražnjenje reda konfliktnog toka utvrđuje se na isti način kao kod prethodno objašnjenog HCM modela:

$$g_u = g - g_q = g - \frac{q_o r}{(s_o - q_o)} \quad (2-74)$$

$S_l$  je zasićen saobraćajni tok nakon pražnjenja konfliktnog toka i takođe se utvrđuje kao kod HCM modela:

$$S_l = \frac{Q_o e^{-Q_o t_c / 3.600}}{1 - e^{-Q_o t_{ph} / 3.600}} \quad (2-75)$$

#### 2.2.6.4 Domaće preporuke

Prema domaćim preporukama (Stanić, 1991; Stanić, Tubić, & Čelar, 2011) bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka definiše se u odnosu na namenu saobraćajne trake.

**Tabela 2-11. Bazna vrednost ZST-a za ekskluzivnu traku za skretanje**

Ekskluzivna saobraćajna traka za levo ili desno		
$S_o$ (voz/h)	max. vrednost 1.750-1.800	preporučena 1.500

Bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka se prilagođava sa 4 uticajna faktora od kojih prva dva direktno zavise od formiranog plana faza, treći od strukture saobraćajnog toka, dok četvrti, na makronivou, opisuje uticaj okruženja, strukture saobraćajne mreže i ponašanja vozača (Čelar et al., 2020). Operativna vrednost zasićenog saobraćajnog toka se utvrđuje narednim izrazom:

$$S = S_o \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \quad (2-76)$$

Gde je,

$f_1$  – faktor uticaja pešačkog toka na vozila u skretanju,

$f_2$  – faktor uticaja konfliktnog vozačkog toka na vozila u levom skretanju,

$f_3$  – faktor uticaja strukture saobraćajnog toka,

$f_4$  – faktor uticaja veličine grada.

Svi uticajni faktori su dati tabelarno (Tabela 2-12 -Tabela 2-15).

**Tabela 2-12 Faktor uticaja intenziteta pešačkog toka na vozila u skretanju**

Intenzitet konfliktnog pešačkog toka (peš/h)	
$f_1$	50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 0,97 0,95 0,92 0,87 0,82 0,76 0,69 0,62 0,57 0,53 0,50

**Tabela 2-13 Faktor uticaja intenziteta konfliktnog toka na vozila u levom skretanju**

	Intenzitet konfliktnog vozačkog toka (voz/h)										
$f_2$	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	>500
	0,97	0,94	0,90	0,83	0,75	0,67	0,60	0,56	0,53	0,51	0,51

**Tabela 2-14 Faktor uticaja strukture saobraćajnog toka**

	Procenat komercijalnih vozila (%)							
$f_3$	5	7	10	12	15	17	20	25
	0,97	0,95	0,92	0,90	0,87	0,85	0,83	0,79

**Tabela 2-15 Faktor uticaja veličine grada**

	Broj stanovnika		
$f_4$	< 40.000	40.000-300.000	>300.000
	0,85	0,90	1,00

U narednom delu teksta dato je poređenje prikazanih metodologija za utvrđivanje zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja u smislu njihove teorijske osnove i neophodnosti poznavanja parametara rada svetlosnih signala, kao dve osnovne karakteristike koje su izdvojile kao značajne na osnovu pregleda literature.

Zasićeni saobraćajni tok je, zbog svog fundamentalnog značaja, konstantan predmet istraživanja u oblasti saobraćajnog inženjerstva. Brojni autori su istraživali dodatne uticajne faktore na vrednost zasićenog toka poput vremenskih uslova (Asamer & Van Zuylen, 2011; Ivanović & Jović, 2018; Lu, Kwon, & Fu, 2019; Teply et al., 2008). Prethodna pilot istraživanja sprovedena za saobraćajne trake pravo ukazala su na indiciju da analitički modeli precenjuju vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u lokalnim uslovima (Stojkov et al., 2019). Međutim, najmanja odstupanja (do 10%) dobijena su primenom Webster-ovog i HCM-ovog modela, dok su odstupanja koja se dobijaju primenom domaćih preporuka preko 20% (Stojkov et al., 2019). S druge strane, zbog kompleksnosti istraživanja, zasićeni saobraćajni tok nezaštićenog levog skretanja retko je predmet eksperimentalnih, terenskih istraživanja već je uglavnom bio zasnovan na istraživanjima pomoću simulacionih modela (Kocić, Čelar, Kajalić, & Stanković, 2022).

Iako se prikazane praktične metodologije i analitički modeli značajno razlikuju, u osnovi gotovo svi modeli za utvrđivanje zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja primenjuju identičan model prihvatljivog intervala sleđenja, koji je zasnovan na teoriji prihvatljivog intervala sleđenja (Tabela 2-16). Teorija prihvatljivog intervala sleđenja prevashodno je namenjena analizi kapaciteta nesignalisanih raskrsnica i kao takva bazirana na procesima koji se realizuju na istim. Osnovni parametar koji utiče na vrednost zasićenog saobraćajnog toka je intenzitet konfliktnog vozačkog toka, kao i parametri opsluge levih skretanja, kao što su interval sleđenja i prihvatljiv interval sleđenja.

Većina praktičnih metodologija za utvrđivanje zasićenog saobraćajnog toka za nezaštićeno levo skretanje zahteva poznavanje parametara rada signala. Takve metodologije su HCM, australijski HCM, i Capcal 4, kao i nemački HBS koji je baziran na kapacitetu levog skretanja, a zasićeni saobraćajni tok se dobija inverznim proračunom u odnosu na parametre rada signala. Ove metodologije, pored poznavanja parametara rada signala, zelenog vremena i ciklusa, zahtevaju i detaljno utvrđivanje raspoloživog vremena za opsluživanje: zasićeni deo zelenog vremena kada su leva skretanja blokirana, nezasićeni deo zelenog, i zaštitno odnosno međuzeleno vreme. Ovi podaci su na početku procedure optimizacije parametara rada signala nepoznati, a zasićeni saobraćajni tok je neophodna ulazna veličina za proračun rada signala.

**Tabela 2-16 Pregled metodologija za utvrđivanje zasićenog saobraćajnog toka za nezaštićeno levo skretanje**

Metodologija za utvrđivanje $S_i$	Osnova modela	Poznavanje parametara rada signala	
	Planerski nivo	Eksperimentalna istraživanja	Ne
HCM 6th	Prvi pristup	Teorija prihvatljivog intervala sleđenja	Ne
	Drugi pristup	Teorija prihvatljivog intervala sleđenja	Da
Webster		Teorija prihvatljivog intervala sleđenja	Ne
	Planerski nivo	Preporučena vrednost	Ne
Australijski HCM	Prvi pristup	Teorija prihvatljivog intervala sleđenja	Da
	Drugi pristup	Teorija prihvatljivog intervala sleđenja	Da
HBS – utvrđivanje kapaciteta		Teorija prihvatljivog intervala sleđenja	Da
CCG		Eksperimentalna istraživanja	Indirektno
LIVASU		Eksperimentalna istraživanja	Ne
DanKap		Teorija prihvatljivog intervala sleđenja	Ne
Capcal 4		Teorija prihvatljivog intervala sleđenja	Da
Domaće preporuke		Eksperimentalna istraživanja	Ne

S druge strane, Webster-ov model, kao i DanKap i prvi pristup u HCM modelu koji je zasnovan na celokupnom zelenom, koriste direktno model prihvatljivog intervala sleđenja.

Takođe, HCM kao i australijski HCM pored baznog modela daju i opštu preporuku za utvrđivanje zasićenog saobraćajnog toka planerskom nivou, ukoliko nisu poznati parametri rada signala.

Kanadski CCG je jedini model koji ima delimično drugačiji pristup modeliranju zasićenog saobraćajnog toka koji nije baziran ni na teoriji prihvatljivog intervala sleđenja niti je eksplicitno potrebno poznavanje parametra rada signala. Takođe, dosta jednostavnu zavisnost zasićenog saobraćajnog toka od konfliktnog toka daju i finski LIVASU model kao i domaće preporuke, koji su zasnovani na eksperimentalno utvrđenim zavisnostima.

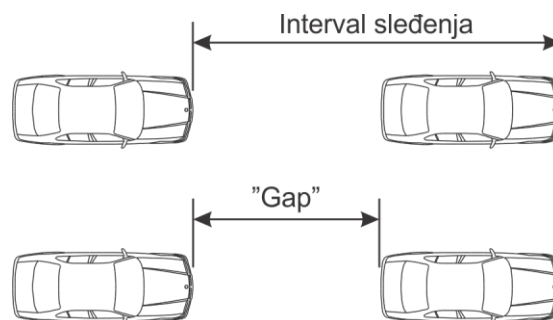
### 3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA PARAMETARA OPSLUŽIVANJA NEZAŠTIĆENOG LEVOG SKRETANJA

Istraživanje zasićenog saobraćajnog toka zasnovano je na istraživanjima intervala sleđenja vozila u saobraćajnom toku pod uslovima da postoji kontinualan saobraćajni zahtev u predmetnom toku kao i da postoji neometano pražnjenje reda formiranog pred svetlosnim signalom. Međutim, istraživanje zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja (i generalno tokova koji se opslužuju kao uslovno konfliktni odnosno kompatibilni) je značajno kompleksnije zbog nemogućnosti eliminacije uticaja konfliktnih tokova, kako vozačkih tako i pešačkih. Drugim rečima, zasićeni saobraćajni tok nezaštićenog levog skretanja mora oslikavati uticaj konfliktnih tokova, i kao takav njihov uticaj mora biti uzet u obzir i obuhvaćen metodologijom istraživanja.

Simultano sagledavanje konfliktnih tokova na raskrsnicama često predstavlja ograničavajući faktor za realizaciju eksperimentalnih istraživanja na terenu, što je nateralo brojne autore da se okrenu analitičkim metodama. Međutim, i analitičke metode, kako je prikazano u pregledu relevantne literature, zahtevaju kalibraciju različitih uticajnih faktora, prevashodno prihvatljivog intervala sleđenja i intervala sleđenja u levom skretanju, što bi opet zahtevalo kompleksna terenska istraživanja. Formirana metodologija istraživanja ima za cilj da obezbedi sprovođenje analize zasićenog saobraćajnog toka ali i sagledavanje brojnih uticajnih faktora na njegovu vrednost, kao i ostalih karakteristika opsluživanja nezaštićenog levog skretanja.

Osnovna dilema kod istraživanja parametara opsluživanja levog skretanja, odnosi se na način sagledavanja prihvatljivog intervala sleđenja. Ovaj parametar se u disertaciji tretira kao vremenski interval sleđenja, odnosno vreme između prolaska dva uzastopna čela vozila preko zamišljenog preseka saobraćajnice. Osnova teorije prihvatljivog intervala sleđenja bazirana je na intervalu između vozila, odnosno „gap-u“, vremenskom intervalu između repa prethodnog i čela vozila koje ga sledi. Slika 3-1 ilustruje razliku između ova dva načina posmatranja relevantna za teoriju prihvatljivog intervala sleđenja.

Ovu dilemu je razrešio HCM koji zbog jednostavnosti prikupljanja podataka preporučuje istraživanje intervala sleđenja umesto „gap-ova“, zbog smanjenja obima istraživanja i beleženja trenutka prolaska samo čela vozila (Transportation Research Board, 2016). U suprotnom bilo bi neophodno beleženje trenutka prolaska i čela i repa vozila, što bi dupliralo obim istraživanja.



Slika 3-1. Razlika između „gap-a“ i intervala sleđenja između vozila

### 3.1 PREDMET ISTRAŽIVANJA

Osnovni predmet eksperimentalnih istraživanja u okviru Disertacije su parametri opsluživanja saobraćajnog toka u levom skretanju na signalisanim raskrsnicama iz ekskluzivne saobraćajne trake, koji se opslužuju kao nezaštićeni. Kako bi se omogućila detaljna analiza neophodno je metodologijom obuhvatiti mogućnost utvrđivanja potpune dinamike opsluživanja međusobno konfliktnih tokova, što se postiže utvrđivanjem narednih parametara:

- interval sleđenja vozila u konfliktnom toku, prihvaćeni i odbijeni,
- interval sleđenja vozila u levom skretanju,
- intenzitet i struktura konfliktnog toka, i
- intenzitet i struktura toka u levom skretanju.

Za utvrđivanje navedenih parametara opsluživanja predmetnih tokova neophodno je beleženje narednih karakterističnih trenutaka tokom opsluživanja svih vozila:

- trenutak početka procesa opsluživanja nezaštićenog levog skretanja,
- trenutak opsluge svakog pojedinačnog vozila u levom skretanju,
- trenutak opsluge svakog pojedinačnog vozila u konfliktnom toku, po trakama (u slučaju postojanja više od jedne trake) i po manevrima kretanja (u slučaju postojanja mešovitih traka).

### 3.2 IZBOR LOKACIJA ISTRAŽIVANJA

U skladu sa prethodno definisanim predmetom istraživanja definisani su naredni faktori koji su od uticaja na izbor lokacije istraživanja:

- Namena saobraćajne trake - istraživanja je neophodno sprovesti na uzorku ekskluzivnih traka za levo skretanje i to u slučaju postojanja samo jedne trake. Dragim rečima, istraživanjem neće biti obuhvaćene mešovite trake za levo skretanje (npr. mešovita traka pravo-levo, levo-desno). Takođe, neće biti tretirane ni slučajevi sa dve trake u levom skretanju koje se opslužuju kao nezaštićene. Udvojene trake za levo skretanje su eliminisane iz istraživanja zbog ograničenog broja lokacija na kojima bi fenomen mogao biti istražen (Kocić, Čelar, Kajalić, & Stanković, 2018), kao i iz razloga što ukoliko postoji realna potreba za formiranjem dve trake za skretanje, one se uobičajeno opslužuju kao zaštićene.
- Preglednost - lokacije istraživanja moraju obuhvatiti samo ona leva skretanja sa zadovoljavajućom preglednosti za realizaciju manevra skretanja, kako bi se eliminisao uticaj nedovoljne preglednosti na proces pražnjenja reda (Yan & Radwan, 2008). Takođe, raskrsnice moraju biti sa standardnom geometrijom, naročito po pitanju radijusa levog skretanja.
- Broj traka u konfliktnom toku - istraživanjem je neophodno obuhvatiti najmanje dve situacije po pitanju broja traka u konfliktnom toku, odnosno postojanje jedne i dve trake, i to u jednakoj veličini uzorka po pitanju broja lokacija, kako bi dobijeni rezultati bili reprezentativni i uporedivi. Lokacije sa tri trake u konfliktnom toku nisu predmet istraživanja imajući u vidu da veći broj traka u konfliktnom toku,



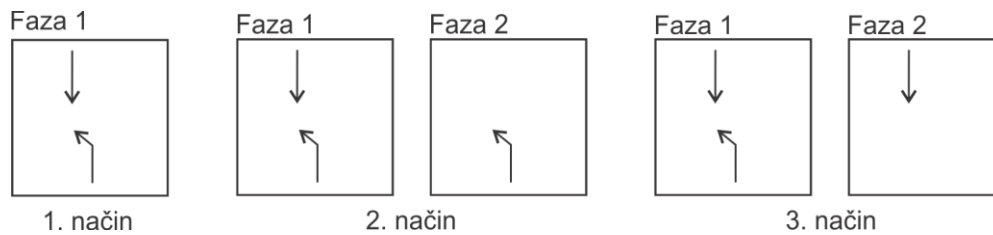
odnosno širina zone konflikta, predstavlja jedan od uslova za tretman levog skretanja kao zaštićeno (FHWA, 2009).

- Namena traka u konfliktnom toku - izborom lokacija istraživanja neophodno je obezbediti postojanje različitih namena traka u konfliktnom toku kako bi dobijeni rezultati bili reprezent različitih režima saobraćaja. Prvi preduslov je da se konfliktni tokovi (tokovi pravo i desno) opslužuju iz traka koje su odvojene od pripadajućeg levog skretanja, kako bi se izbegao efekat blokade konfliktnog toka. Na ovaj način, iz potencijalnih lokacija istraživanja su eliminisane situacije kada u konfliktnom toku postoje mešovite trake koje imaju komponentu levog skretanja. U tom smislu, lokacije istraživanja obuhvataju naredne kombinacije namene traka u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku:

- jedna traka u konfliktnom toku: dve varijante namene trake - traka pravo i traka pravo-desno;
- dve trake u konfliktnom toku: moguće su dve kombinacije namene trake - trake pravo i pravo-desno u jednom slučaju, i traka pravo i traka desno u drugom slučaju.

Takođe, iz lokacija istraživanja su eliminisane raskrsnice sa trakom rezervisanom za javni prevoz u konfliktnom toku.

- Broj traka na izlaznom kraku - izborom lokacija istraživanja neophodno je obezbediti da se obuhvate situacije sa jednom i sa više traka na izlaznom kraku, odnosno destinaciji levog skretanja.
- Eliminacija uticaja pešačkih tokova - odabir lokacija mora u što većoj meri obezbediti eliminaciju uticaja konfliktnog toka pešaka (Alhajyaseen, Asano, Nakamura, & Kang, 2011), koji se najčešće opslužuju zajedno sa nezaštićenim levim skretanjima. Kako u savremenim gradskim sistemima gotovo da ne postoje raskrsnice na kojima nisu obezbeđeni pešački prelazi, izbor lokacija nije sveden na apsolutnu eliminaciju uticaja pešačkog toka, već je izbor lokacija sveden na one na kojima je uticaj sveden na minimum da se isti može zanemariti i/ili naknadno eliminisati iz uzorka.
- Rad svetlosnih signala – Plan faza rada svetlosnih signala u kome se levo skretanje iz ekskluzivne trake opslužuje kao nezaštićeno. Teorijski posmatrano, postoje tri moguća načina opsluživanja levog skretanja kao nezaštićenog (Slika 3-2):
  - Prvi način - zeleno vreme za levo skretanje i za konfliktni tok počinje i završava se u istom trenutku, čime se levo opslužuje sve vreme kao nezaštićeno;
  - Drugi način - zeleno vreme za levo skretanje traje duže od zelenog za konfliktni tok, čime se obezbeđuje da se levo skretanje opslužuje kao delimično zaštićeno, tzv. „sečena“ faza;
  - Treći način - zeleno za levo skretanje traje kraće od zelenog za konfliktni tok, što je sa aspekta levog skretanja funkcionalno ista situacija kao i u prvom načinu opsluge, odnosno levo skretanje je sve vreme nezaštićeno.



Slika 3-2. Mogući načini opsluživanja nezaštićenog levog skretanja

- Saobraćajno opterećenje - izbor lokacija mora uzeti u obzir saobraćajno opterećenje u predmetnim tokovima. Oppluživanje levog skretanja kao nezaštićenog, u osnovi može da govori dve bazne stvari o predmetnim tokovima. Prva činjenica je da levo skretanje ima značajno manje merodavno saobraćajno opterećenje i da nije bila neophodna njegova zaštita. Ova situacija nije povoljna za sprovođenje istraživanja jer će dovesti do čestih situacija da u levom skretanju nema vozila čije bi se karakteristike opsluživanja istraživale. Druga činjenica je da levo skretanje ima dovoljno merodavno saobraćajno opterećenje za zaštitu istog, ali da nije moglo biti zaštićeno zbog merodavnog saobraćajnog opterećenja celokupne raskrsnice, što bi dovelo do prezasićenih stanja na raskrsnici. U ovakvim situacijama, levo skretanje funkcioniše na graničnim, malim kapacitetima, sa niskim Nivoom Usluge. U suštini, u takvim situacijama leva skretanja se opslužuju samo u toku zaštitnog vremena između faza. Ni ova situacija nije povoljna za sprovođenje istraživanja jer leva skretanja funkcionišu kao prezasićena, sa jako malim brojem opsluženih vozila koja su predmet istraživanja. Na osnovu prethodno iznesenog, preduslov za izbor lokacije jeste da u saobraćajnom toku levo postoji dovoljan broj vozila, i da opsluživanje mogu realizovati i tokom pripadajućeg zelenog vremena.
- Struktura toka – lokacije moraju biti definisane tako da se obezbedi približno homogen tok putničkih automobila, kako bi se eliminisao uticaj teretnih vozila na proces pražnjenja reda levog skretanja. Imajući u vidu da se istraživanje sprovodi na gradskim lokacijama, u gradskom sistemu u kom je javni masovni prevoz putnika baziran na autobuskom podsistemu, uticaj ovih vozila nije mogao biti apsolutno izbegnut pri definisanju lokacija ali je isti eliminisan naknadno u toku obrade podataka.

U prvom koraku definisanja lokacija istraživanja sagledane su skoro sve raskrsnice na kojima postoje nezaštićena leva skretanja koja se opslužuju iz ekskluzivnih saobraćajnih traka. Formirana je baza raskrsnica sa nezaštićenim levim skretanjem na teritoriji centralnih gradskih opština Grada Beograda sa 75 saobraćajnih traka na ukupno 39 raskrsnica. Obilaskom terena, sprovođenjem opservacionih i pilot istraživanja, kao i uvidom u baze podataka o karakteristikama saobraćajnih tokova, sagledani su svi ograničavajući uslovi definisani metodologijom za izbor lokacija istraživanja u Beogradu (Tabela 3-1).

MODELIRANJE ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG TOKA NEZAŠTIĆENOG LEVOG SKRETANJA

Tabela 3-1. Pregled mogućih lokacija istraživanja

Br. ras.	Raskrsnica	br. trake	Prilaz opis	br. traka levo	br. traka u konf. toku	namena traka u konf. toku	br. traka na izlazu	Pešački tok	Preglednost
1	Milentija Popovića - Bul. dr Zorana Đinđića	1	od autoputa	1	3	2P+PžDk	2	umeren	dobra
2	Antifašističke borbe - Bulevar Mihajla Pupina	2	od Z. Đinđića	1+0.5	-	nema	2	slab	-
3	Španskih boraca - Bulevar Mihajla Pupina	3	od Z. Đinđića	2	-	nema	2	jak	-
4	Bulevar umetnosti - Bulevar Mihajla Pupina - Trešnjinog cveta	4	od N. Tesle	1	3	L+2P+Dk	2	umeren	dobra
		5	od Z. Đinđića	1	3	L+2P+Dk	2	umeren	dobra
5	Bulevar Mihajla Pupina - Goce Delčeva	6	od Dunava	1	2	L+P+PDK	2	jak	dobra
		7	od Paviljona	1	2	L+P+PDK	2	jak	dobra
6	Tošin bunar - Pariske komune	8	od Opštine	1	-	nema	1	slab	-
		9	od Zemuna	1	2	P+D	2	slab	dobra
7	Tošin bunar - Studentska	10	od 11 aprila	1	1	L+PDK	2	slab	dobra
		11	od autoputa	1	2	P+PD	1	slab	dobra
		12	od Studentske	1	1	L+PD	2	slab	dobra
8	Studentska - Bulevar dr Zorana Đinđića	13	od Opštine	1	1	L+PD	1	slab	dobra
		14	od Studenjaka	1	2	PL+D	1	slab	dobra
		15	od T. bunara	1	1	L+PD	1	slab	dobra
9	Pariske komune - Narodnih heroja - Otona Župančića	16	od Opštine	1	2	L+P+PD	1	slab	dobra
		17	od T. bunara	1	2	L+P+PD	1	slab	dobra
10	Jurija Gagarina - Antifašističke borbe	18	od buvljaka	1+0.5	2	L+P+PDK	2	jak	dobra
		19	od Save	1	2	L+PLDK	2	slab	dobra
11	Jurija Gagarina - Agostina Neta	20	od Delta City	1+0.5	2	L+P+PDK	2+ž	jak	dobra
		21	od Save	1	2	L+PL+PDK	2+ž	jak	dobra
12	Jurija Gagarina - Dušana Vukasovića	22	od blokova	1+0.5	-	nema	2+ž	umeren	-
		23	od kružnog	2	2	L+P+PDK	2+ž	slab	dobra
13	Jurija Gagarina - Dr Ivana Ribara	24	od grada	1+0.5	2	PL+PD	2	slab	dobra
		25	od Save	1	2	2L+P+D	2	slab	dobra
		26	od Airport City	2	3	L+2P+Dk	3	slab	dobra
14	Omladinskih brigada - Đorđa Stanojevića	27	od Đ. Stanojevića	1	2	2L+P+PDK	3	slab	dobra
		28	Vrtlarska	1	2	P+D	1	slab	dobra
15	Ugrinovačka - Ivčeva - Vrtlarska	29	Ivčeva	1	1	L+PD	1	slab	dobra
		30	od stadiona	1	2	P+D	1	slab	dobra
16	Ugrinovačka - Gornjogradska	31	Gornjogradska	1	-	nema	1	slab	-
		32	od Cara Dušana	1	1	L+PD	1	slab	dobra
17	Ugrinovačka - Filipa Višnjića - Rada Končara	33	od stadiona	1	1	L+PD	1	slab	dobra
		34	od Prvomajske	1	1	L+PD	1	slab	dobra
		35	od T6	1	1	L+PD	1	slab	dobra
18	Ugrinovačka - T6	36	od Zemuna	2	2	PL+P	3	slab	dobra
19	Južni bulevar - Mihajla Gavrilovića	37	od autokomande	1	2	P+PD	1	slab	dobra
20	Južni bulevar - Maksima Gorkog	38	od autokomande	1	1	L+PD	1	umeren	dobra
		39	od G. Milenka	1	2	L+P+PžD	1	jak	dobra
21	Južni bulevar - Đerdapska	40	od autokomande	1	1	L+PD	1	slab	dobra
		41	od G. Milenka	1	1	L+PD	2	slab	dobra
22	Braće Jerković - Darvinova	42	od Vitanovačke	1	1	L+PD	1	slab	dobra
		43	od Stadiona	1	2	PL+D	1	slab	dobra
		44	od pijace	1	1	L+PD	2	slab	dobra
23	Vojislava Ilića - Svetozara Radojičića	45	od Braće Jerković	1+0.5	2	P+PžD	2	slab	dobra
24	Vojislava Ilića - Mokroluška	46	od autoputa	1	2	L+P+D	2	slab	dobra
25	Vojislava Ilića - Vladimira Tomanovića	47	od pumpe	1	2	PL+D	2	slab	dobra
26	Vojislava Ilića - Ustanička	48	od autoputa	1	3	L+2P+Dk	2	jak	delimična
		49	od Šumica	1	2	L+PL+PD	2	jak	dobra
		50	od Lidla	1	2	L+P+PDK	2	jak	dobra
		51	od okretnice 31	1+0.5	2	L+P+PD	2	jak	dobra
27	Vojislava Ilića - Rimska	52	od Ustaničke	1	2	L+P+PD	1	slab	dobra
		53	od Šumica	1	1	L+PDK	2	umeren	dobra
		54	od centra	1	2	L+P+PD	1	umeren	dobra
28	Vojislava Ilića - Strumička - Velikomoravska	55	od TC Beo	1	1	L+PD	2	umeren	dobra
		56	od Ustaničke	1	2	L+P+PD	1	slab	dobra
29	Vojislava Ilića - Strumička - Velikomoravska	57	od centra	1	2	L+P+PD	1	slab	dobra
		58	od Ustaničke	1	2	PL+PD	1	umeren	delimična
30	Vojislava Ilića - Gospodara Vučića	59	od Cvetka	1	1	PLD	2	umeren	dobra
31	Cara Nikolaja II - Čuburska	60	od Krsta	1	2	P+PžD	1	jak	delimična
32	Makenzijeve - Kataničeva	61	od Hrama	1	1	PLD	1	jak	delimična
		62	od Čubure	1	1	L+PD	1	jak	dobra
33	Kneginje Zorke - Mekenzijeve	63	od Slavije	1	1	L+PD	1	jak	dobra
		64	od Šumica	1	2	L+P+PD	1	umeren	dobra
34	Ustanička - Kruševačka	65	od autokomande	1	2	L+P+PD	1	jak	dobra
		66	od centra	1	2	PL+PD	1	umereni	loša
35	Bulevar kralja Aleksandra - Gospodara Vučića	67	od Vojislava Ilića	1+0.5	1	PLD	2	slab	dobra
		68	od Matice srpske	1	1	PLD	1	slab	dobra
36	Mite Ružiča - Milana Rakića - Matice srpske	69	od Mirijeve	1	3	2P+D	1	umeren	dobra
37	Zdravka Čelara - Čarlija Čaplina	70	od Ruzveltove	1	1	PLD	1	slab	dobra
		71	od Cvijićeve	1	2	P+D	1	slab	dobra
38	Bulevar despota Stefana - Cvijićeva	72	od Pančevca	2	2	L+P+PD	3	jak	dobra
		73	od centra	1	2	2L+P+PD	2	slab	dobra
39	Gandijeva - Zemunska - Vojvođanska	74	sa Bežanije	1	2	P+D	3	slab	dobra
		75	iz blokova	1	1	PD	3	slab	dobra

Od ukupnog broja analiziranih traka, njih 55 je zadovoljilo kriterijume po pitanju broja traka u levom skretanju i preglednosti na raskrsnici. U narednom koraku, od preostalog broja lokacija su eliminisane one koje ne zadovoljavaju definisani kriterijum namene traka u konfliktnom toku, odnosno sve one lokacije na kojima se levo skretanje u konfliktnom toku, opslužuje iz mešovite trake. Na ovaj način, ukupan broj mogućih lokacija sveden je na ukupno 46 traka.

U sledećem koraku iz preostalih lokacija eliminisane su one na kojima su konfliktni pešački tokovi procenjeni kao „jaki“, odnosno čiji uticaji ne bi mogao da se eliminiše na način da se obezbedi dovoljan uzorak. Nakon ove iteracije preostalo je 39 mogućih lokacija istraživanja.

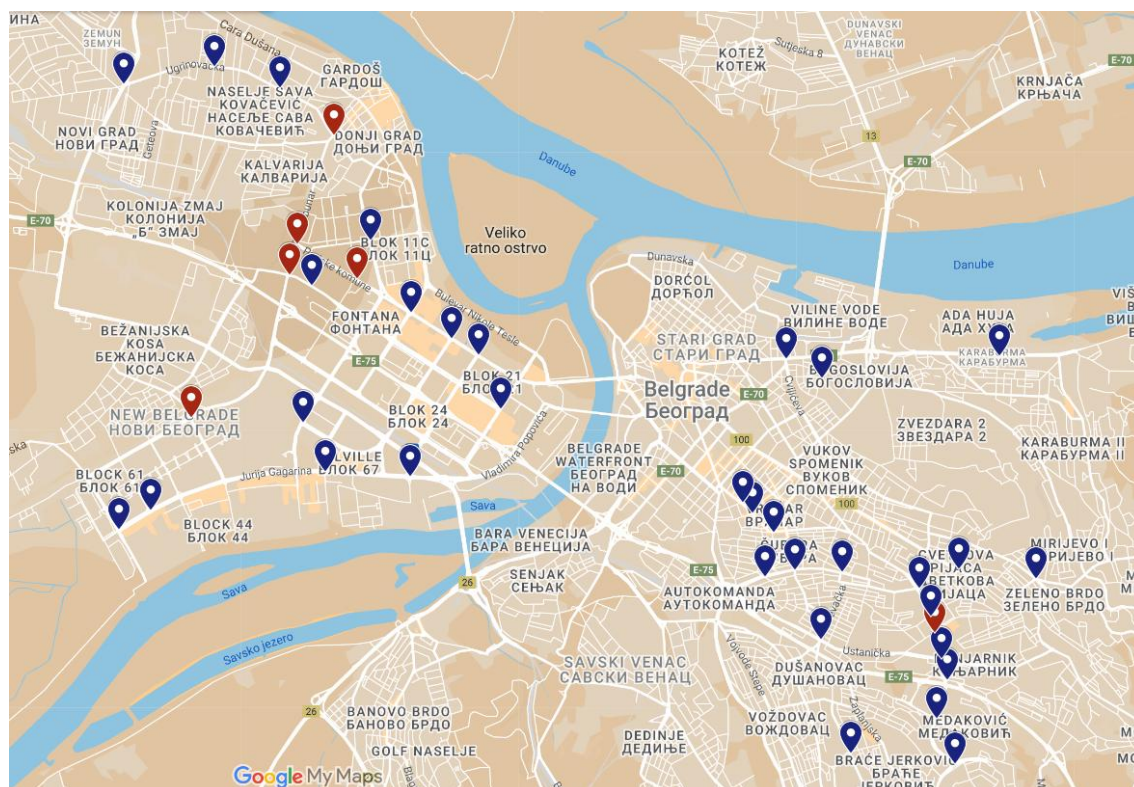
Dalji postupak analize obuhvatio je broj traka u konfliktnom toku i njihovu namenu. Eliminirana je samo jedna preostala lokacija koja u konfliktnom toku ima traku rezervisanu za vozila javnog prevoza. Od preostalih 38 traka njih 17 je sa jednom, dok je 18 sa dve trake u konfliktnom toku, a samo 3 lokacije su sa 3 trake u konfliktnom toku. Lokacije sa 3 trake u konfliktnom toku su eliminisane iz istraživanja po kriterijumu broja traka u konfliktnom toku.

Na bazi sprovedene procedure odabirane su raskrsnice sa trakama za levo skretanje koje obezbeđuju najveću reprezentativnost uzorka, i to na način da je formiran prostor istraživanja od 6 raskrsnica sa ukupno 13 saobraćajnih traka, od kojih njih 7 ima jednu, a 6 dve trake u konfliktnom toku. Takođe, prilikom izbora lokacija izvršena je provera načina rada svetlosnih signala, kako bi formiranim uzorkom bili obuhvaćeni različiti načini opsluživanja. U narednoj tabeli prikazani su rezultati sprovedene procedure izbora lokacija istraživanja.

**Tabela 3-2. Rezultati odabira lokacija istraživanja**

Br. ras.	Raskrsnica	br. trake	Prilaz opis	br. traka levo	br. traka u konf. toku	namena traka u konf. toku	br. traka na izlazu	Pešački tok	Preglednost
6	Tošin bunar - Pariske komune	9	od Zemuna	1	2	P+D	2	slab	dobra
7	Tošin bunar - Studentska	10	od 11 aprila	1	1	L+PDk	2	slab	dobra
		11	od autoputa	1	2	P+PD	1	slab	dobra
		12	od Studentske	1	1	L+PD	2	slab	dobra
9	Pariske komune - Narodnih heroja - Otona Župančića	16	od Opštine	1	2	L+P+PD	1	slab	dobra
		17	od T. bunara	1	2	L+P+PD	1	slab	dobra
15	Ugrinovačka - Ivićeva - Vrtlarska	28	Vrtlarska	1	2	P+D	1	slab	dobra
		29	Ivićeva	1	1	L+PD	1	slab	dobra
27	Vojislava Ilića - Rimska	53	od Šumica	1	1	L+PDk	2	umeren	dobra
		54	od centra	1	2	L+P+PD	1	umeren	dobra
		55	od TC Beo	1	1	L+PD	2	umeren	dobra
39	Gandijeva - Zemunska - Vojvođanska	74	sa Bežanije	1	2	P+D	3	slab	dobra
		75	iz blokova	1	1	PD	3	slab	dobra

Na narednoj slici dat je prikaz svih analiziranih lokacija istraživanja, sa posebno naznačenim izabranim lokacijama, odnosno raskrsnicama.



Slika 3-3. Pregledna mapa mogućih (plava) i odabranih (crvena) lokacija istraživanja

### 3.2.1 Opis lokacija istraživanja

U narednom delu detaljno su opisane odabrane lokacije istraživanja, koje su predmet analize.

Kao prva lokacija izabrana je raskrsnica R1 Pariske komune - Narodnih heroja - Otona Župančića sa dve trake koje su predmet istraživanja. Sa T1 označena je traka na istočnom prilazu raskrsnici, koja u konfliktnom toku ima dve saobraćajne trake namene pravo i pravo-desno. Druga traka, T2, je traka za levo skretanje u ulicu Otona Župančića. Takođe, i ova traka u konfliktnom toku ima isti broj i namenu traka kao i T1, pri čemu obe trake imaju po jednu saobraćajnu traku na izlaznom kraku raskrsnice.

Drugu lokaciju predstavlja raskrsnica R2, Ulica Vojislava Ilića - Rimska - Mis Irbijeva. Iako na ovoj raskrsnici, na svim prilazima postoje saobraćajne trake za levo skretanje, izabrane su tri trake i to:

- T3 - levo skretanje iz Mis Irbijeve ulice koje u konfliktnom toku ima jednu mešovitu traku pravo-desno a na izlaznom kraku raskrsnice dve saobraćajne trake;
- T4 - levo skretanje iz ulice Vojislava Ilića u Mis Irbijevu ulicu, sa dve trake u konfliktnom toku, namene pravo i pravo-desno, i sa jednom trakom na izlaznom kraku raskrsnice;
- T5 - levo skretanje iz Rimske ulice sa jednom trakom u konfliktnom toku, namene pravo-desno, i 2 trake na izlaznom kraku raskrsnice.

Četvrta traka na predmetnoj lokaciji, traka iz Vojislava Ilića u Rimsku ulicu eliminisana je iz preliminarnog uzorka, po kriterijumu saobraćajnog opterećenja u levom skretanju.

Na trećoj lokaciji, raskrsnica R3, ukrštanje ulica Pariske komune - Tošin bunar, za istraživanje je odabrana jedna traka T6 za levo skretanje iz ulice Tošin bunar u Pariske komune, koja ima dve trake u konfliktnom toku, namene pravo i desno, i dve trake na izlazu raskrsnice.

Na četvrtoj lokaciji, R4 raskrsnica Tošin bunar - Studentska - Bul. dr Zorana Đinđića, izvršeno je istraživanje na svim trakama za levo skretanje, i to:

- T7 – levo skretanje iz ulice Tošin bunar u Studentsku ulicu, sa dve trake u konfliktnom toku, trakom namene pravo i namene pravo-desno, i sa funkcionalnom jednom trakom na izlazu iz raskrsnice;
- T8 – levo skretanje iz Bul. dr Zorana Đinđića u Tošin bunar, sa jednom trakom pravo-desno u konfliktnom toku, i dve trake na izlazu iz raskrsnice;
- T9 – levo skretanje iz Studentske ulice u ulicu Tošin bunar, sa jednom trakom u konfliktnom toku, namene pravo-desno i dve trake na izlaznom kraku. Zbog postojanja razdelnog ostva i veoma malog broja desnih skretanja u konfliktnom toku, ova traka u konfliktnom toku je tretirana kao traka pravo.

Petu lokaciju istraživanja predstavljaju dve trake na raskrsnici R5 Ugrinovačka – Ivićeva – Vrtlarska – Bežanijska ulica, i to:

- T10 – levo skretanje iz Vrtlarske ulice u Ivićevu ulicu, sa dve trake u konfliktnom toku, namene pravo i desno, i jednom trakom na izlazu;
- T11 – levo skretanje iz Ivićeve u Ugrinovačku ulicu, sa jednom trakom pravo-desno u konfliktnom toku i jednom trakom na izlazu iz raskrsnice.

Na šestoj lokaciji, raskrsnici R6 Zemunska – Gandijeva – Vojvođanska ulica, izabrane su dve trake:

- T12 – levo skretanje iz Gandijeve ulice u Vojvođansku ulicu, sa jednom trakom u konfliktnom toku namene pravo-desno, i sa tri trake na izlazu iz raskrsnice;
- T13 – levo skretanje iz Gandijeve u Zemunsku ulicu, sa dve trake u konfliktnom toku, trakom pravo i trakom desno, i tri trake na izlazu iz raskrsnice.

### 3.3 DEFINISANJE PERIODA ISTRAŽIVANJA

Jedinstveni period istraživanja procesa realizacije opsluživanja vozila u levom skretanju definisan je na nivou pojedinačnog ciklusa, odnosno trajanja zelenog signalnog pojma za sve relevantne tokove.

Period istraživanja parametara opsluživanja nezaštićenih levih skretanja je definisan na način da obuhvati periode vršnog i vanvršnog saobraćajnog opterećenja, odnosno uslove realizacije različitih stanja saobraćajnog procesa na raskrsnici. U tom smislu, minimalan period istraživanja je definisan kao 6 kontinualnih časova. Istraživanja su sprovedena u toku merodavnog radnog dana (utorak-četvrtak) i merodavnog meseca (april, maj, oktobar i novembar) (Čelar, 2013).

Period istraživanja po lokacijama definisan je u skladu sa primenjenom tehnikom prikupljanja podataka. U prvom koraku sprovedeno je pripremno, pilot istraživanje na 2 lokacije (na raskrsnici R1 i R2, odnosno na trakama od T1-T5) u trajanju od po 6 h po lokaciji. Šestočasovni period obuhvata kontinualno vanvršni i popodnevni vršni sat, od 12:00 do 18:00

h. Vremenski period realizovanog pilot istraživanja ograničen je primenjenom tehnikom prikupljanja podataka. Na raskrsnici R1 istraživanje je sprovedeno u četvrtak 3. juna 2021. godine, dok je na R2 sprovedeno u četvrtak 27. maja 2021. godine.

Na ostalim lokacijama (R3-R6, odnosno trakama T6-T13), nakon provere definisane metodologije obrade podataka, istraživanja su sprovedena u trajanju od po 12 h, od 6:00 do 18:00 h, u četvrtak 14. oktobra 2021. godine. Na ostalim lokacijama, promenom tehnike prikupljanja podataka, eliminisan je ograničavajući faktor trajanja istraživanja u kontinuitetu 6 h u toku jednog dana.

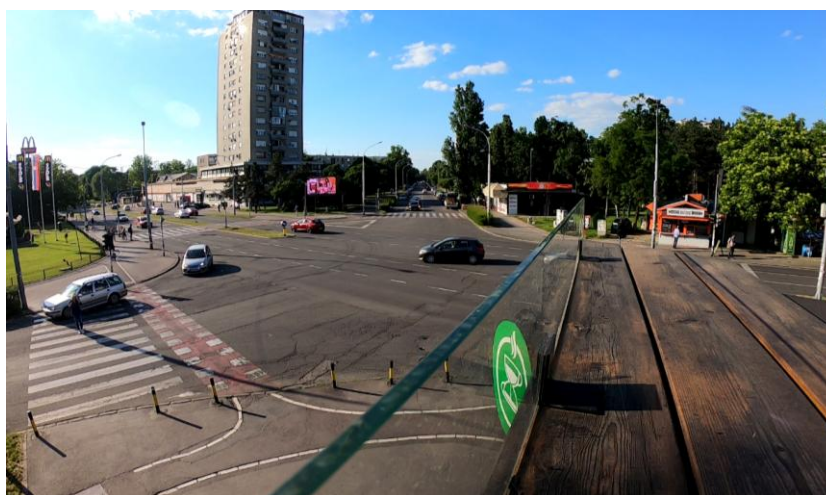
### 3.4 METODA I TEHNIKA ISTRAŽIVANJA

Parametri opsluživanja nezaštićenih levih skretanja prikupljeni su u okviru eksperimentalnog istraživanja tehnikom snimanja video zapisa.

Pripremna istraživanja su sprovedena sa dve GoPro HERO7 kamere sa dodatnom eksternom baterijom, čime je omogućen kontinualan video zapis u trajanju od 6 h po lokaciji. Primenjeno je podešavanje video zapisa na širokougaoni snimak.

Dalja istraživanju su sprovedena prikupljanjem video zapisa sa postojećih kamera za video nadzor na izabranim raskrsnicama, dobijenih od strane Ministarstva unutrašnjih poslova Republike Srbije, Sektora za analitiku, telekomunikacione i informacione tehnologije - Odeljenje za sisteme video nadzora i tehničke zaštite, samo u svrhu izrade ove doktorske disertacije.

Pozicija kamera je morala biti definisana na način da obezbeđuje uočavanja svih konfliktnih tačaka sa vozilima u levom skretanju, za sve trake na predmetnim lokacijama. Primeri pozicija kamera u sprovedenim istraživanjima i obuhvatnost video snimka prikazani su narednim slikama (Slika 3-4 - Slika 3-9).



Slika 3-4. Isečak video zapisa na lokaciji R1 Pariske komune - Narodnih heroja - Otona Župančića



Slika 3-5. Isečak video zapisa na lokaciji R2 Vojislava Ilića - Rimska - Mis Irbijeva



Slika 3-6. Isečak video zapisa na lokaciji R3 Pariske komune - Tošin bunar

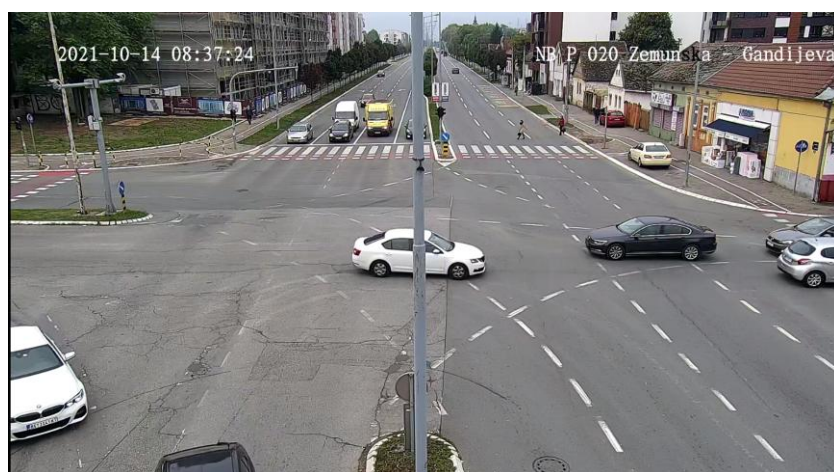


Slika 3-7. Isečak video zapisa na lokaciji R4 Tošin bunar - Studentska - Bul. dr Zorana Đinđića





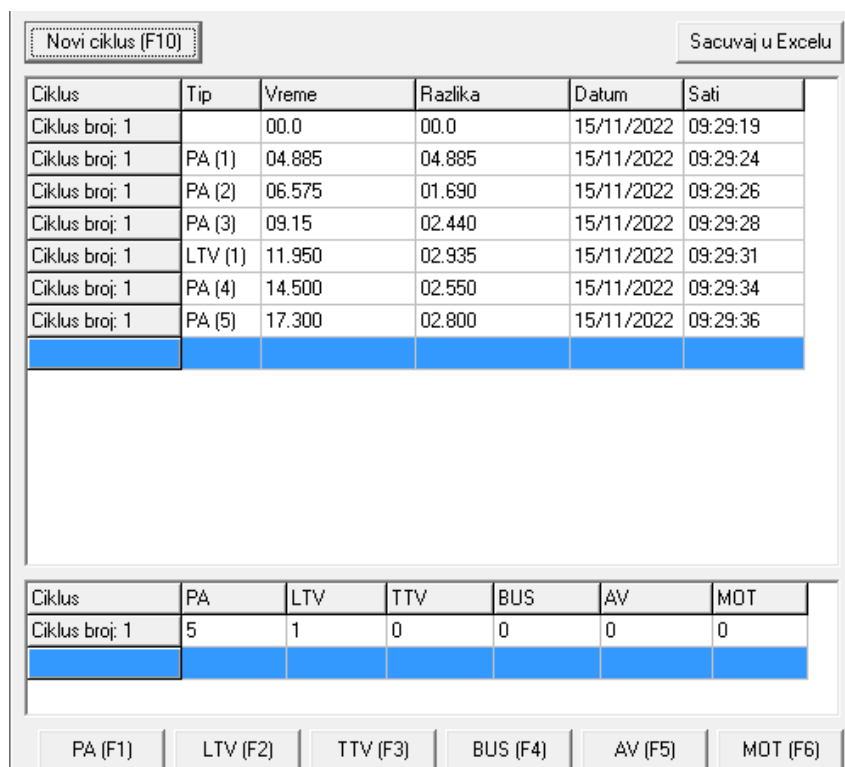
Slika 3-8. Isečak video zapisa na lokaciji R5 Ugrinovačka - Ivićeva - Vrtlarska - Bežanijska ulica



Slika 3-9. Isečak video zapisa na lokaciji R6 Zemunska - Gandijeva - Vojvođanska ulica

### 3.5 OBRADA I KREIRANJE BAZE PODATAKA

Za obradu video zapisa primenjena je manuelna tehnika, uz primenu softvera, aplikacije za desktop računare „Brojanje“, kreiranog za potrebe prethodnih istraživanja na Katedri za planiranje i regulisanje saobraćaja (Slika 3-10). Primenjena aplikacija omogućava automatsko kreiranje baze podataka sa trenucima prolaska posmatranih vozila, kategorijama (i to putnički automobil, lako teretno vozilo, teško teretno vozilo, autobus, autovoz i motocikl), kumulativnim vremenom prolaska u odnosu na početak ciklusa i intervalima sleđenja između vozila u posmatranom toku.



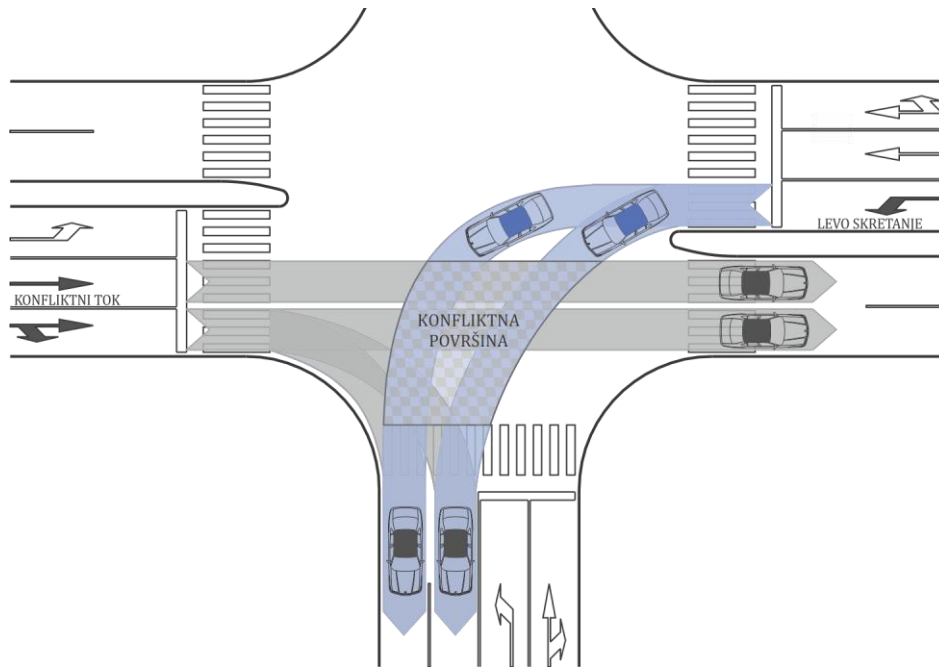
Slika 3-10. Primenjena aplikacija za obradu video zapisa

Primenjena aplikacija omogućava direktan izvoz podataka u formi Microsoft Excel fajla, pogodnog za dalju obradu (Slika 3-11).

Ciklus	Tip	Vreme	Razlika	Datum	Sati
Ciklus broj: 1		0	0	15/11/2022	09:29:19
Ciklus broj: 1	PA (1)	4.885	4.885	15/11/2022	09:29:24
Ciklus broj: 1	PA (2)	6.575	1.69	15/11/2022	09:29:26
Ciklus broj: 1	PA (3)	9.15	2.44	15/11/2022	09:29:28
Ciklus broj: 1	LTV (1)	11.95	2.935	15/11/2022	09:29:31
Ciklus broj: 1	PA (4)	14.5	2.55	15/11/2022	09:29:34
Ciklus broj: 1	PA (5)	17.3	2.8	15/11/2022	09:29:36
Ciklus broj: 2		0	0	15/11/2022	09:40:33
Ciklus broj: 2	PA (1)	3.16	3.16	15/11/2022	09:40:36

Slika 3-11. Forma izlaznih podataka u Microsoft Excel-u

Obradi video zapisa prethodi jasno definisanje konfliktne površine svakog levog skretanja i odgovarajućeg konfliktnog toka. Imajući u vidu da su analizirane različite situacije sa aspekta broja i namene traka u konfliktnom toku, kao i broja traka na izlaznom kraku raskrsnice, razlikuje se i posmatrana konfliktna površina raskrsnice. Na bazi posmatranja realnih trajektorija vozila u levom skretanju kroz raskrsnicu, za svako je definisana realna konfliktna površina. Definisanje konfliktne površine je od ključnog značaja za dobijanje realnih podataka o parametrima kretanja pojedinačnih vozila u konfliktnoj površini raskrsnice.



Slika 3-12. Definisane konfliktne površine

Obrada video zapisa sprovedena je uz primenu iterativnog postupka na nivou svakog jedinstvenog perioda posmatranja, odnosno svakog pojedinačnog ciklusa. Parametri koji su prikupljeni obradom video zapisa su sledeći:

- Početak opsluživanja tokova – trenutak u kome počinje period opsluživanja posmatranih tokova, koji je definisan početkom efektivnog zelenog vremena. Kao početak efektivnog zelenog vremena usvojen je momenat pojave prve reakcije u bilo kom od posmatranih tokova. Ovaj momenat je usvojen kao „nulta sekunda“ (početak ciklusa) za sve posmatrane tokove nezavisno od saobraćajnog toka u kom se pojavila prva reakcija na promenu signalnog pojma.
- Početak opsluge levog skretanja – trenutak zaustavljanja uslovno prvog vozila u levom skretanju na liniji preglednosti, odnosno ispred granice konfliktne površine. Ovaj momenat je posebno evidentiran tokom obrade video zapisa, jer je usvojena pretpostavka da vozilo tek nakon ovog momenta počinje da sagledava konfliktni tok u smislu traženja prihvatljivih intervala sleđenja (jer ima preglednost na skretanje). Svi intervali sleđenja u konfliktnom toku koji su realizovani pre ovog trenutka nisu tretirani kao odbijeni, već se smatra da ih vozač u levom skretanju nije ni sagledavao. U slučaju da prvo vozilo u levom skretanju (ili više njih) realizuje manevar pre prolaska prvog vozila u konfliktnom toku, odnosno ukoliko se isto ne zaustavlja na liniji preglednosti, vozila su tretirana kao „džamperi“ (eng. *jumpers*).
- Završetak opsluge vozila u levom skretanju – prolazak svakog pojedinačnog vozila u levom skretanju beleži se u trenutku kada vozilo prednjom osovinom napusti prethodno definisanu konfliktnu površinu. I ovaj, kao i prethodni trenutak, se beleži u odnosu na vreme početka ciklusa (nultu sekundu). Prilikom evidentiranja trenutka prolaska vozila u levom skretanju notira se i njegova kategorija.

- Opsluga konfliktnog toka – trenutak prolaska vozila u konfliktnom toku po trakama definisan je momentom u kom vozilo u konfliktnom toku prednjom osovinom izlazi iz konfliktnog zone. Procedura se iterativno ponavlja za svaku pojedinačnu traku u konfliktnom toku. Prilikom sprovođenja postupka notirana je i kategorija vozila, kao i manevar u kom se vozilo kreće u slučaju mešovityh saobraćajnih traka.

Obrada video zapisa za jedinstveni period posmatranja, ciklus, završava se u trenutku prolaska vozila u konfliktnom toku koje se opslužuje neposredno nakon poslednjeg vozila u levom skretanju, odnosno ukoliko takvo vozilo ne postoji (npr. zaustavljanje konfliktnog toka na crveno, ili nepostojanje zahteva u konfliktnom toku), trenutkom prolaska poslednjeg vozila u levom skretanju.

Na opisani način kreirana je baza podataka sa tačnim vremenima opsluge svih tokova koji su predmet istraživanja, kategorijama vozila i brojem vozila po trakama i manevrima. Na narednoj slici (Slika 3-13a) dat je prikaz izvorne baze podataka za jedan ciklus po trakama, kao i prilagođene baze u kojoj je konfliktni tok u obe trake posmatran jedinstveno na nivou prilaza (Slika 3-13b).

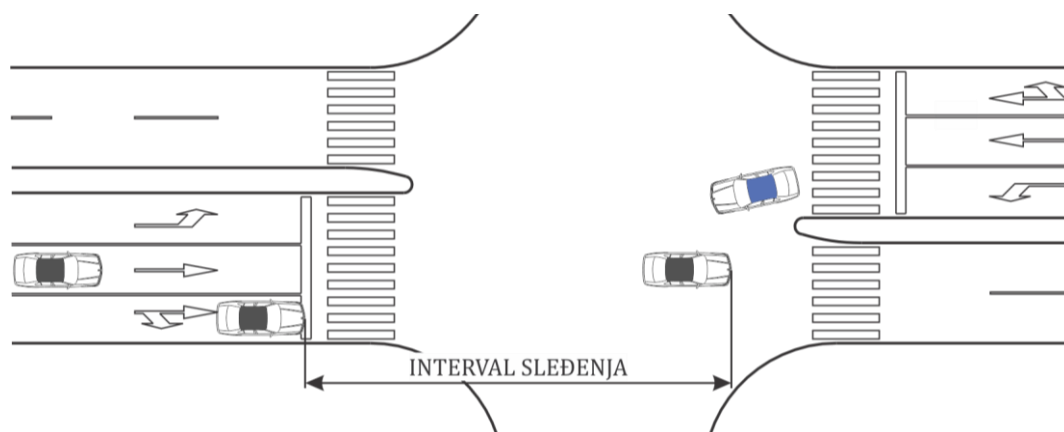
no. ciklusa	Traka	Vozila	Kumulativno vreme	Intervali pojedinačni
1	Pravo		0	0
1	Pravo	PA (1)	6.95	6.95
1	Pravo	PA (2)	8.42	2.32
1	Pravo	PA (3)	10.18	1.76
1	Pravo	PA (4)	11.74	1.56
1	Pravo	PA (5)	13.11	1.38
1	Pravo	PA (6)	15.49	2.38
1	Pravo	PA (7)	17.94	2.45
1	Pravo	PA (8)	20.50	2.12
1	Pravo	PA (9)	23.63	3.58
1	Pravo	PA (10)	25.61	1.98
1	Pravo	PA (11)	27.23	1.62
1	Desno		0	0
1	Desno	PA (1)desno	5.27	5.27
1	Desno	PA (2)desno	8.40	3.14
1	Desno	PA (3)desno	10.22	1.82
1	Desno	PA (4)desno	14.14	3.92
1	Desno	PA (5)desno	41.80	26.95
1	Levo		0	0
1	Levo		8.65	8.65
1	Levo	PA (1)	30.89	22.82
1	Levo	PA (2)	33.68	2.80
1	Levo	PA (3)	35.58	1.90
1	Levo	PA (4)	37.69	2.11

no. ciklusa	Traka	Vozila	Kumulativno vreme	Intervali pojedinačni
1	Desno		0	0
1	Pravo		0	0
1	Desno	PA (1)desno	5.27	5.27
1	Pravo	PA (1)	6.95	1.69
1	Desno	PA (2)desno	8.40	1.45
1	Pravo	PA (2)	8.42	0.01
1	Pravo	PA (3)	10.18	1.76
1	Desno	PA (3)desno	10.22	0.04
1	Pravo	PA (4)	11.74	1.52
1	Pravo	PA (5)	13.11	1.38
1	Desno	PA (4)desno	14.14	1.03
1	Pravo	PA (6)	15.49	1.36
1	Pravo	PA (7)	17.94	2.45
1	Pravo	PA (8)	20.50	2.57
1	Pravo	PA (9)	23.63	3.13
1	Pravo	PA (10)	25.61	1.98
1	Pravo	PA (11)	27.23	1.62
1	Desno	PA (5)desno	41.80	14.58
1	Levo		0	0
1	Levo		8.65	8.65
1	Levo	PA (1)	30.89	22.82
1	Levo	PA (2)	33.68	2.80
1	Levo	PA (3)	35.58	1.90
1	Levo	PA (4)	37.69	2.11

a) b)  
Slika 3-13. Izgled (a) izvorne i (b) prilagođene baze podataka

Primaran cilj transformacije konfliktnih saobraćajnih tokova koji su istraživani po trakama u jedinstven saobraćajni tok, jeste činjenica da vozači u levom skretanju prilikom ocene prihvatljivosti intervala sleđenja ne posmatraju intervale sleđenja u pojedinačnom toku, tj. saobraćajnoj traci, već isti sagledavaju jedinstveno, na nivou konfliktnog prilaza (Slika 3-14).



Slika 3-14. Prihvatljiv interval sleđenja u toku sa dve saobraćajne trake

## 4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati su po istraživanim parametrima, i to za svaki parametar, najpre na generalnom nivou, a zatim i selektivno po trakama i grupama traka.

U narednoj tabeli predočen je obim sprovedenih istraživanja po lokacijama, gde je prikazan broj snimljenih ciklusa koji su bili relevantni sa aspekta cilja istraživanja, i broj snimljenih vozila u konfliktnom toku i u levom skretanju na nivou celokupnog perioda istraživanja.

**Tabela 4-1. Obim sprovedenih istraživanja**

Traka	Lokacija	Naziv lokacije	Period istraživanja (h)	Broj traka u konfliktnom toku	Namena trake 1 u konf. toku	Namena trake 2 u konf. toku	Broj traka na izlazu	Broj snimljenih ciklusa	Br. vozila u konf. toku	Br. vozila u levom skretanju
T1	R1	Pariske komune - Narodnih heroja - Otona Župančića	6	2	P	PD	1	211	1723	777
T2			6	2	P	PD	1	124	1324	306
T3	R2	Vojislava Ilića - Rimska - Mis Irbijeja	6	1	PD	-	2	127	686	1087
T4			6	2	P	PD	1	105	4391	474
T5			6	1	PD	-	2	39	346	103
T6	R3	Tošin bunar - Pariske komune	12	2	P	D	2	429	8592	1954
T7	R4	Tošin bunar - Studentska - Bul. dr Zorana Đinđića	12	1	PD	-	1	297	6220	1218
T8			12	1	PD	-	2	223	2923	865
T9			12	1	P	-	2	302	3244	1874
T10	R5	Ugrinovačka - Ivičeva - Vrtlarska - Bežanijska	12	2	P	D	1	180	3173	1005
T11			12	1	PD	-	1	164	1087	1079
T12	R6	Gandijeva - Zemunska - Vojvođanska	12	1	PD	-	3	149	1887	608
T13			12	2	P	D	3	40	468	146
Ukupno			126					2390	36064	11496

\* Napomena: oznake namene trake u konfliktnom toku P – pravo, PD – pravo-desno, D – desno.

Na 6 lokacija istraživanja, odnosno 13 saobraćajnih traka obrađeno je ukupno 126 h video zapisa. Na ovaj način, formirana je baza od ukupno 2.390 relevantnih ciklusa, sa minimalnim uzorkom oko 40 ciklusa za trake T5 i T13, i sa maksimalnim uzorkom od 429 relevantnih ciklusa za traku T6. Broj relevantnih ciklusa u najvećoj meri zavisi od saobraćajnog zahteva u levom skretanju. Dve trake sa minimalnim brojem snimljenih ciklusa su trake koje imaju najmanji intenzitet saobraćajnog toka u levom skretanju. S druge strane, iz istraživanja su izbačeni i svi ciklusi u kojima je došlo do različitih ometanja u procesu pražnjenja reda, odnosno do blokade izlaznog kraka raskrsnice u slučaju pojave zagušenja ili zaustavljanja vozila javnog prevoza na stajalištu. Takođe, iz istraživanja su eliminisani i svi ciklusi u kojima je došlo do ometanja pražnjenja reda koje je izazvano konfliktnim pešačkim tokom, čiji uticaj nije predmet ovog istraživanja. Metodološkim postavkama izbora lokacija istraživanja broj ovih ciklusa u istraživanju je sveden na minimum.

### 4.1 INTERVAL SLEĐENJA VOZILA U LEVOM SKRETANJU

Interval sleđenja vozila u levom skretanju  $t_{fh}$  je parametar koji suštinski definiše baznu vrednost zasićenog saobraćajnog toka za nezaštićeno levo skretanje,  $S$  (voz/h). Bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka za analizirani tip kretanja se odnosi na hipotetičku situaciju kada u konfliktnom toku ne postoji nijedno vozilo, odnosno kada je  $Q_o \approx 0$ . Ovaj zaključak proizilazi iz bazne jednačine u teoriji saobraćajnog toka (Tubić, Vidas, & Stepanović, 2022):

$$S = \frac{3.600}{t_{fh}} \quad (4-1)$$

Takođe, isti rezultat bi se postigao i primenom bazne jednačine u teoriji prihvatljivog intervala sleđenja, sa pretpostavkom da je  $Q_o \approx 0$ , nezavisno od definisane ili usvojene vrednosti prihvatljivog intervala sleđenja  $t_c$ :

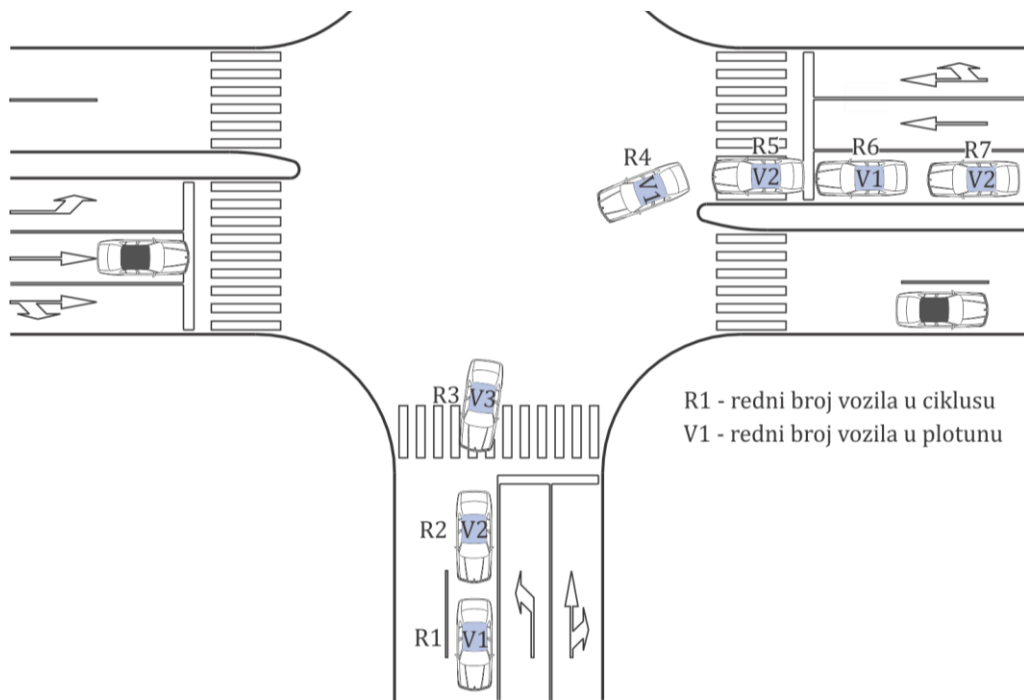
$$S_p = \frac{Q_o e^{-Q_o t_c / 3.600}}{1 - e^{-Q_o t_{fh} / 3.600}} \quad (4-2)$$

Interval sleđenja vozila u levom skretanju  $t_{fh}$  predstavlja merodavan interval kojim se vozila u toku slede, u uslovima nepostojanja uticaja konfliktnog toka, tj. ukoliko imaju slobodan prolaz raskrslom. Zbog karakteristika nezaštićenog levog skretanja, za analizu pomenutog parametra, tok je neophodno analizirati u zavisnosti od broja kontinualno opsluženih vozila. U tom smislu, prilikom pojave prihvatljivog intervala sleđenja u konfliktnom toku, razlikuju se sledeće situacije:

- Slučaj 1: Prihvatljiv interval sleđenja prihvata samo jedno vozilo u levom skretanju;
- Slučaj 2: Prihvatljiv interval sleđenja prihvata više od jednog vozila u levom skretanju.

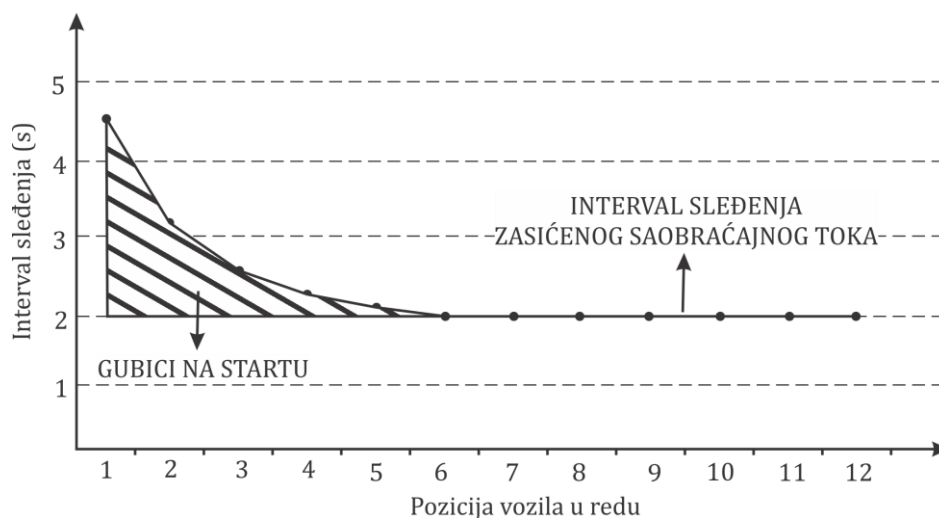
Sva vozila iz Slučaja 1 su eliminisana iz analize intervala sleđenja jer se ista ponašaju kao prvo vozilo u redu, odnosno uslovno ne slede vozilo ispred sebe. Princip koji bi važio u slučaju da se radi o bezkonfliktnom kretanju (npr. tok pravo, ili zaštićena leva skretanja) da se za interval sleđenja prvog vozila koristi vreme od početka zelenog do prolaska prednje osovine prvog vozila preko linije zaustavljanja, u ovom slučaju takođe nije primenjiv, jer vozilo ne reaguje isključivo na promenu signalnog pojma, već istovremeno i na prolazak vozila iz konfliktnog toka. Ukoliko bi se za reprezent usvojila promena signalnog pojma, interval sleđenja prvog vozila bi bio ekstremno veliki, i obuhvatio bi vreme čekanja na pojavu prihvatljivog intervala sleđenja. U suprotnom, ukoliko bi se za reprezent intervala sleđenja prvog vozila usvojio trenutak polaska vozila u konfliktnom toku, odnosno njegovo napuštanje konfliktno površine, izmereni interval sleđenja bi mogao da bude ekstremno malih vrednosti. Važno je napomenuti i da se ova vozila mogu pojaviti u bilo kom periodu zelenog, u zavisnosti od karakteristika i načina opsluge konfliktnog toka. Drugim rečima, ukoliko se sva vozila u levom skretanju opslužuju pojedinačno, svako vozilo se zaustavlja na definisanoj liniji preglednosti i čeka prihvatljiv interval sleđenja, u tom slučaju nijedno vozilo nije merodavno za utvrđivanje intervala sleđenja vozila u levom skretanju.

Ukoliko dođe do realizacije Slučaja 2, merodavna za utvrđivanje  $t_{fh}$  su sva vozila u levom skretanju nakon prvog. Kao i u prethodnom slučaju, i ova situacija se može pojaviti u bilo kom periodu tokom pripadajućeg zelenog vremena. Numeracija vozila, odnosno njihov redni broj je definisan u odnosu na prvo vozilo pripadajućeg plotuna, nezavisno od realnog rednog broja vozila u ciklusu (Slika 4-1). Razlog ovakve numeracije vozila pronalazi se u činjenici da se sa svakim prekidanjem saobraćajnog toka ostatak reda ponaša kao novi saobraćajni tok sa svojim zakonomernostima po pitanju ponašanja. Takođe, posmatrana su samo ona vozila koja su bila zaustavljena u redu ili su se istom pridružila u toku njegovog pražnjenja.



Slika 4-1. Definisane rednog broja opsluženih vozila

Tradicionalni modeli pražnjenja reda na raskrsnicama regulisanim svetlosnim signalima (Akcelik, 1981; Teply et al., 2008; Webster & Cobbe, 1966) pretpostavljaju konstantnu vrednost zasićenog saobraćajnog toka tokom pražnjenja reda, kao i postojanje gubitaka na startu i iskorišćenje žutog signalnog pojma (Akcelik, Besley, & Roper, 1999). Pražnjenje reda dostiže maksimalan, konstantan intenzitet (intenzitet zasićenog saobraćajnog toka) tek nakon prolaska prvih četiri do pet vozila u redu (Čelar et al., 2020). Imajući prethodno u vidu, gubici na startu se mogu definisati kao razlika između vremena opsluge (sume intervala sleđenja) prvih 4-5 vozila i idealnog vremena opsluge kada bi se isti broj vozila opsluživao sa intervalom sleđenja zasićenog saobraćajnog toka. Grafička reprezentacija gubitaka na startu data je na narednoj slici. Prethodnim istraživanjima sprovedenim u lokalnim uslovima utvrđeno je da vrednosti odgovaraju preporučenim u HCM 2010 (Stanković, Čelar, & Kajalić, 2016).



Slika 4-2. Gubici na startu



U slučaju nezaštićenog levog skretanja važi pretpostavka da će se gubici na startu pojavljivati ne samo na početku zelenog signalnog pojma (prilikom opsluge prvih 4-5 vozila u redu) već i u svakom narednom slučaju ponovnog prekidanja procesa pražnjenja reda u toku zelenog.

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

Celokupan uzorak prikupljenih intervala sleđenja vozila u levom skretanju formiran je od svih intervala sleđenja putničkih automobila, na svim raskrscima (R1-R6), svim saobraćajnim trakama (T1-T13) za sva relevantna vozila u procesu sleđenja (vozila numerisana kao V2-Vmax). Kao Vmax je definisan maksimalan broj vozila koji se pojavio u plotunu, bilo u okviru istog prihvatljivog intervala sleđenja ili na kraju zelenog signalnog pojma. Na nivou celokupnog uzorka zabeležen je Vmax od 13 vozila. U narednim tabelama predstavljena je osnovna statistika analiziranih podataka o intervalima sleđenja kao i njihova empirijska raspodela.

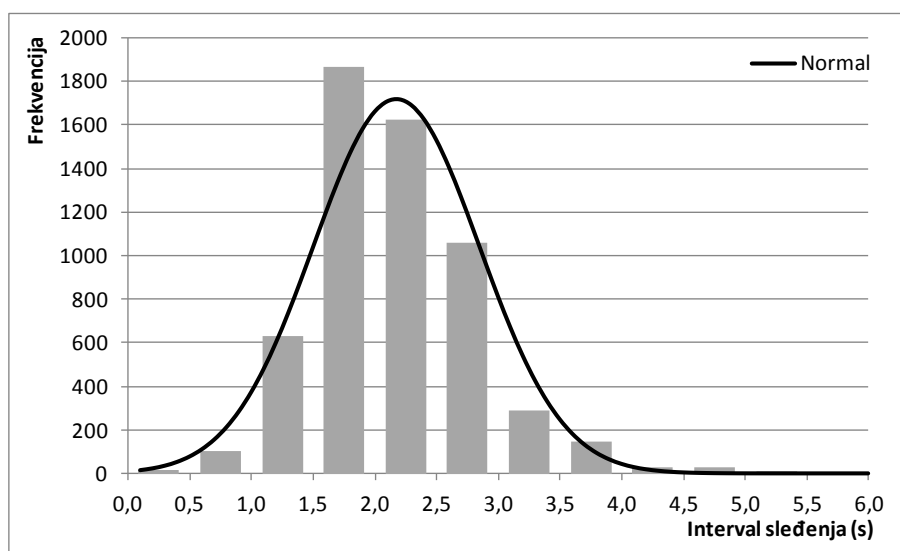
Tabela 4-2. Analiza realizovanih intervala sleđenja na celokupnom uzorku

Analizirani pokazatelj	Vrednost
Srednja vrednost (s)	2,18
Mediana (s)	2,14
Standardno odstupanje (s)	0,67
Koeficijent varijacije	0,31
Opseg (s)	5,76
Minimum (s)	0,22
Maksimum (s)	5,98
Asimetrija	0,89
Obim uzorka	5810

Tabela 4-3. Empirijska raspodela realizovanih intervala sleđenja na celokupnom uzorku

Klasa (s)	Frekvencija	Kumulativna frekvencija	Funkcija raspodele (CDF)
<0,5	18	18	0.003
0,5-1,0	105	123	0.021
1,0-1,5	633	756	0.130
1,5-2,0	1866	2622	0.451
2,0-2,5	1622	4244	0.730
2,5-3,0	1058	5302	0.913
3,0-3,5	290	5592	0.962
3,5-4,0	144	5736	0.987
4,0-4,5	29	5765	0.992
4,5-5,0	27	5792	0.997
5,0-5,5	12	5804	0.999
5,5-6,0	6	5810	1.000

Može se uočiti da srednja vrednost intervala sleđenja od 2,18 s na nivou celokupnog uzorka je vrednost intervala sleđenja do koje se u procesu pražnjenja reda sledi čak 73% vozila. Na narednom dijagramu predstavljena je empirijska raspodele intervala sleđenja, na kojoj se vidi da ista ima pozitivnu asimetriju, što je i očekivano imajući u vidu da su intervali sleđenja vozila po prirodi ograničeni minimalnom vrednošću. Takođe, prikazano je i poređenje sa odgovarajućom normalnom raspodelom  $N(2,18 \text{ s}; 0,67 \text{ s})$ .



Slika 4-3. Empirijska raspodela intervala sleđenja na celokupnom uzorku

U nastavku je sprovedena detaljnija analiza u nastojanju da se definiše vrednost merodavnog intervala sleđenja i uticajni faktori na istu.

#### 4.1.2 Analiza intervala sleđenja po poziciji vozila u plotunu

Prethodna analiza intervala sleđenja na celokupnom uzorku obuhvatila je sva vozila u procesu sleđenja, od V2 do Vmax, odnosno do V13. Kako bi se na celokupnom uzorku (na svim istraživanim lokacijama) utvrdio merodavni interval sleđenja za utvrđivanje bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka, analiza je sprovedena po pozicijama vozila u procesu sleđenja. Ovakva analiza je obavezna kako bi se eliminisao uticaj gubitaka na startu.

U narednoj tabeli prikazana je osnovna statistika raspodele intervala sleđenja za svaku poziciju vozila u plotunu.

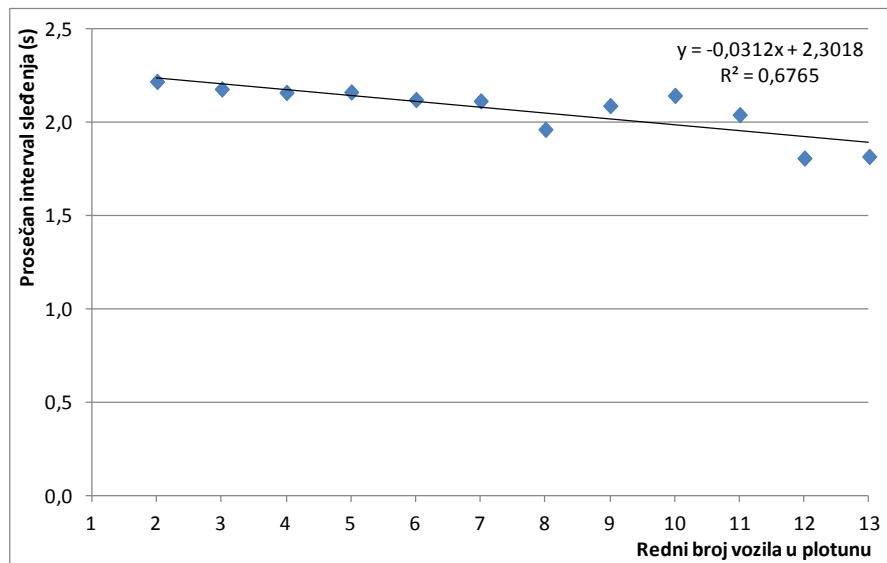
Tabela 4-4. Analiza realizovanih intervala sleđenja po rednom broju vozila u plotunu

Analizirani pokazatelj	Redni broj vozila u plotunu											
	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13
Srednja vrednost (s)	2,22	2,18	2,16	2,16	2,12	2,11	1,96	2,09	2,14	2,04	1,81	1,82
Standardno odstupanje (s)	0,72	0,65	0,62	0,68	0,64	0,65	0,51	0,64	0,58	0,62	0,44	0,80
Opseg (s)	5,70	5,70	4,83	5,70	4,39	4,16	2,60	2,76	2,21	2,10	1,49	1,59
Minimum (s)	0,22	0,27	0,54	0,26	0,33	0,98	0,79	0,77	0,95	1,22	1,24	0,97
Maksimum (s)	5,92	5,98	5,37	5,96	4,72	5,14	3,39	3,54	3,16	3,32	2,73	2,56
Obim uzorka	2246	1340	877	530	346	213	125	68	35	18	9	3

Pored prikazanih srednjih vrednosti, kao najznačajnijeg parametra, indikativan pokazatelj je opseg vrednosti intervala sleđenja koje vozila realizuju na različitim pozicijama u redu. Najveće opseg, od 5,7 s razlike između maksimalnog i minimalnog realizovanog intervala sleđenja ostvaruje se u slučaju pozicije vozila V2, V3 i V5, odnosno u slučaju prvih nekoliko vozila, kada je proces pražnjenja reda nestabilan. S druge strane, od vozila V8 pa na dalje, opseg realizovanih intervala sleđenja ne prelazi 3 s; a za vozila V12 i V13 ne prelazi ni 2 s,

napomenom da se radi o veoma malom uzorku. Takođe, vozila sa ovom pozicijom u plotunu su poslednja vozila u redu i može se pretpostaviti da svoje kretanje kroz raskrslu realizuju nakon zelenog signalnog pojma, odnosno u toku zaštitnog vremena, čime se dodatno mogu opravdati ove niske srednje vrednosti kao i mali opseg.

Na narednom dijagramu prikazane su dobijene srednje vrednosti, pri čemu je utvrđeno da postoji linerana zavisnost prosečnog intervala sleđenja i rednog broja vozila u plotunu. Primenom ANOVA jednofaktorske analize varijanse utvrđeno je da postoji statistički značajna razlika na nivou  $p = 0,001 < \alpha = 0,05$  između intervala sleđenja u odnosu na poziciju vozila u plotunu.



Slika 4-4. Zavisnost prosečnog intervala sleđenja od pozicije vozila u redu

Prateći tradicionalne teorije pražnjenja reda, prvih 3-5 vozila nisu reprezent maksimalnog intenziteta pražnjenja reda, i treba ih izuzeti iz dalje procedure utvrđivanja merodavnog intervala sleđenja,  $t_{fh}$ . U tom smislu sprovedena je analiza razlika između grupa vozila, prvih 3, 4 i 5 vozila u odnosu na ostatak vozila za koje se pretpostavlja da se kreću intenzitetom zasićenog saobraćajnog toka.

Imajući u vidu da je pronađena linearna veza između srednje vrednosti intervala sleđenja i pozicije vozila u plotunu, dobijeni su očekivani rezultati da se najveće razlike između srednjih vrednosti  $t_{fh}$  grupa ostvaruju ukoliko se usvoji da se tokom opsluge prvih 5 vozila ostvaruju gubici na startu. Dobijena je razlika od 7,7%, odnosno  $t_{fh2-5} = 2,18$  s, a  $t_{fh6-13} = 2,01$ . Takođe, minimalna razlika od 7,1% je ostvarena ako se pretpostavi da gubitke na startu ostvaruju samo vozila V2 i V3, što je opet jako sličan rezultat, imajući u vidu da je analiza sprovedena na celokupnom uzorku, nezavisno od lokacije. Iako razlika u intervalima sleđenja može biti protumačena kao neznačajna jer se radi o malim vrednostima, ali zanemarivanjem iste može doći do značajnijeg potcenjivanja bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka.

Takođe, može se uočiti i da je  $t_{fh2-5} = 2,18$  s identično prosečnoj vrednosti na nivou celokupnog uzorka, što se može objasniti činjenicom da je velika većina vozila u ukupnom uzorku upravo svoj manevar izvršila kao početna vozila u plotunu, odnosno da su plotuni sa većim brojem vozila u uzorku retki.

### 4.1.3 Analiza intervala sleđenja po saobraćajnim trakama

U početnoj analizi intervala sleđenja po trakama, data je osnovan statistika za sve snimljene intervale sleđenja za svaku traku pojedinačno (Tabela 4-5), bez eliminacije vozila za koje se pretpostavlja da ostvaruju gubitke na startu.

Može se primetiti da postoje značajne razlike u srednjim vrednostima intervala sleđenja po trakama, od minimalne 2,01 s za traku T3 do 2,52 za traku T2. U cilju potvrđivanja hipoteze sprovedena je jednofaktorska analiza varijanse ANOVA i potvrđeno je da postoji statistički značajna razlika na nivou  $p = 0,001 < \alpha = 0,05$  između intervala sleđenja vozila u levom skretanju u odnosu na lokaciju istraživanja. U tom smislu, u nastavku je izvršena detaljna analiza svake pojedinačne lokacije.

**Tabela 4-5. Analiza realizovanih intervala sleđenja po lokacijama istraživanja**

Analizirani pokazatelj	Saobraćajna traka												
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
Srednja vrednost (s)	2,42	2,52	2,01	2,12	2,25	2,04	2,23	2,31	2,03	2,36	2,37	2,41	2,33
Mediana (s)	2,31	2,46	1,97	1,97	2,25	1,91	2,18	2,28	1,95	2,26	2,33	2,38	2,32
Standardno odstupanje (s)	0,73	0,59	0,58	0,64	0,43	0,66	0,80	0,68	0,62	0,77	0,56	0,56	0,69
Koeficijent varijacije	0,30	0,24	0,29	0,30	0,19	0,32	0,36	0,30	0,31	0,33	0,23	0,23	0,29
Opseg (s)	4,58	3,23	4,82	4,09	1,64	5,20	5,22	4,33	5,74	5,61	3,72	4,53	3,10
Minimum (s)	0,86	0,94	0,33	0,67	1,25	0,22	0,22	0,79	0,24	0,31	0,85	0,78	1,29
Maksimum (s)	5,45	4,18	5,14	4,76	2,89	5,42	5,45	5,13	5,98	5,92	4,56	5,30	4,39
Asimetrija	1,10	0,15	0,57	1,48	-0,85	1,02	0,60	0,85	0,82	1,47	0,56	0,79	0,92
Obim uzorka	349	86	855	213	22	916	433	226	1238	517	688	221	46

U zavisnosti od lokacije istraživanja postoje razlike u maksimalnom broju vozila koja se opslužuju u plotunu  $V_{max}$ , što u velikoj meri može uticati na prosečan interval sleđenja. Na primer, ukoliko je na nekoj lokaciji  $V_{max}=2$  vozila, na takvoj lokaciji srednja vrednost intervala sleđenja svakako sadrži i gubitke na startu. Drugim rečima, na takvoj lokaciji ne dolazi do realizacije intervala sleđenja merodavnih za utvrđivanje zasićenog saobraćajnog toka, što se može desiti u dve dijametralno suprotne situacije: 1) mali intenzitet toka u levom skretanju, ili 2) veliki intenzitet konfliktnog toka. U tom smislu, za utvrđivanje merodavnog intervala sleđenja po trakama, izvršena je analiza svake pojedinačne saobraćajne trake po broju vozila u plotunu.

U narednoj tabeli dat je prosečan interval sleđenja vozila po trakama u odnosu na poziciju vozila u plotunu. Kao što se vidi u tabeli (Tabela 4-6), samo na dve lokacije (T3 i T9) se realizovao plotunu veličine  $V_{max}=13$  vozila, dok na tri lokacije (T2, T5 i T13) nije došlo do realizacije plotuna većih od 5 vozila. Ovakve razlike, dovode do izazova tretmana vozila sa gubicima na startu, i definisanja koja su vozila merodavna za utvrđivanje intervala sleđenja. Kako se može videti u prethodnom poglavlju, u analizi na nivou celokupnog uzorka, postoji linerana zavisnost prosečnog intervala sleđenja i pozicije vozila u plotunu. Međutim, isto se ne može zaključiti ako se posmatraju intervali sleđenja na nivou saobraćajne trake, ako se ima u vidu različit  $V_{max}$  po lokacijama.

**Tabela 4-6. Analiza intervala sleđenja po lokacijama istraživanja u odnosu na poziciju vozila u plotunu**

Pozicija vozila	Prosečni intervali sleđenja, $t_n$ (s)												
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
V2	2,56	2,60	2,06	2,21	2,22	2,06	2,23	2,30	2,00	2,33	2,33	2,52	2,28
V3	2,36	2,21	2,04	1,97	2,34	2,03	2,19	2,41	2,05	2,32	2,44	2,26	2,58
V4	2,33	2,26	2,02	1,95	2,63	2,01	2,28	2,27	2,01	2,44	2,37	2,35	2,10
V5	2,11		2,05	1,92		2,09	2,39	2,18	2,09	2,39	2,39	2,16	1,80
V6	2,30		2,03	3,16		2,08	2,04	1,95	1,96	2,42	2,31	2,46	
V7	2,44		1,94			1,84	2,48		2,11	2,46	2,48	1,86	
V8	1,85		1,92			1,63			1,92	1,86	2,20		
V9	2,55		1,93						2,13		2,68		
V10			2,16						2,06		2,20		
V11			1,91						2,19		2,89		
V12			1,73						1,96				
V13			1,76						1,92				
<b>Prosek</b>	<b>2,42</b>	<b>2,52</b>	<b>2,01</b>	<b>2,12</b>	<b>2,25</b>	<b>2,04</b>	<b>2,23</b>	<b>2,31</b>	<b>2,03</b>	<b>2,36</b>	<b>2,37</b>	<b>2,41</b>	<b>2,33</b>

S druge strane, iz prethodne tabele se može uočiti da dolazi i do značajnih odstupanja u intervalima sleđenja na kraju maksimalnog plotuna, što je posledica malog broja vozila koja se opslužuju kao poslednja u maksimalnom plotunu. Da bi umanjio uticaj ovih vozila merodavni intervali sleđenja po lokacijama (prosečna vrednost u Tabeli 4-6) su utvrđeni u odnosu na broj takvih realizacija u plotunu na predmetnoj lokaciji. Konačno, kako bi se zadržao isti pristup u analizi svih saobraćajnih traka, početni deo plotuna nije eliminisan iz naredne analize.

Opravdanje za ovakav pristup leži u činjenici da gubici na startu treba da budu sastavni deo efektivnog zelenog vremena, odnosno da će dovesti do njegovog umanjivanja u odnosu na stvarno zeleno. Međutim, kod nezaštićenih tokova, gubici na startu se mogu pojaviti više puta tokom zelenog signalnog pojma, odnosno pri svakom prekidanju saobraćajnog toka. U ekstremnim slučajevima, kao u slučaju T2, T5 i T13, intervali sleđenja bez gubitaka na startu se nikada ne realizuju. Kako bi se ova činjenica uzela u obzir, opravdano je ovaj uticaj oslikati u okviru bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka, odnosno izborom merodavne vrednosti u odnosu na sva vozila u plotunu.

Svaka saobraćajna traka okarakterisana je brojem traka u konfliktnom toku, kao i brojem traka na izlaznom kraku raskrsnice. Analizom prosečnih intervala sleđenja po grupama traka utvrđeno je sledeće:

- Postoji veoma mala, zanemariva razlika između merodavnog intervala sleđenja za trake sa jednom (T3, T5, T7, T8, T9, T11 i T12) i dve trake u konfliktnom toku (T1, T2, T4, T6, T10, T13), i to respektivno 2,23 s i 2,30 s, što odgovara razlici bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka koja je manja od 50 voz/h;
- Postoji značajnija razlika između merodavnih intervala sleđenja za trake sa jednom (T1, T2, T4, T7, T10 i T11) i više traka na izlaznom kraku raskrsnice (T3, T5, T6, T8, T9, T12 i T13), i to respektivno 2,34 i 2,20 s, što odgovara razlici bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka od skoro 100 voz/h.

Razlika u odnosu na broj traka na izlazu oslikava situaciju kada vozila u levom skretanju skreću paralelno jedno s drugim koristeći različite trake na izlaznom kraku raskrsnice, što je situacija koja je opservirana u toku obrade podataka, i dominantno utiče na minimalne vrednosti intervala sleđenja u toku.

Dobijene vrednosti po grupama traka su u svakom slučaju veće od prosečne vrednosti intervala sleđenja dobijenog na celokupnom uzorku. Analiza je urađena i nezavisno po trakama, eliminacijom prvih vozila u plotunu, i to u zavisnosti od realnog Vmax za svaku traku pojedinačno. Dobijeni rezultati po trakama su prikazani u narednoj tabeli (Tabela 4-7). Ukoliko se analiziraju dobijene vrednosti po grupama traka, dolazi se do istih zaključaka:

- Postoji veoma mala, zanemariva razlika između merodavnog intervala sleđenja za trake sa jednom i dve trake u konfliktom toku, što odgovara razlici bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka manjoj od 30 voz/h;
- Postoji značajnija razlika između merodavnih intervala sleđenja za trake sa jednom i više traka na izlaznom kraku raskrsnice, i to respektivno 2,24 i 2,12 s, što odgovara razlici bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka koja je identična kao i u prethodnom slučaju, i iznosi gotovo 100 voz/h.

**Tabela 4-7. Intervali sleđenja po lokacijama istraživanja bez vozila koja ostvaruju gubitke na startu**

$t_{fh}$ (s)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
<b>Prosek</b>	<b>2,28</b>	<b>2,23</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,25</b>	<b>2,03</b>	<b>2,23</b>	<b>2,20</b>	<b>2,02</b>	<b>2,36</b>	<b>2,37</b>	<b>2,28</b>	<b>2,05</b>

Imajući u vidu dobijene rezultate, da bez obzira na koji način se posmatraju intervali sleđenja vozila u toku, nezavisno od broja vozila (sva vozila) ili eliminacijom vozila sa gubicima na startu, može se ustanoviti jedinstvena vrednost uticajnog faktora većeg broja traka na izlaznom kraku raskrsnice na baznu vrednost zasićenog saobraćajnog toka. Ovaj faktor oslikava fenomen paralelne opsluge vozila u levom skretanju, u slučaju postojanja više od jedne trake na izlaznom kraku raskrsnice. Faktor se može utvrditi kao odnos merodavnog intervala sleđenja u slučaju kada postoji jedna traka na izlaznom kraku ( $t_{fh_{i1}}$ ) i merodavnog intervala sleđenja u slučaju kada postoji više traka na izlaznom kraku ( $t_{fh_{i2}}$ ) i:

$$\alpha = \frac{t_{fh_{i1}}}{t_{fh_{i2}}} \quad (4-3)$$

Istraživanjem je utvrđeno da bez obzira na koji način se posmatra merodavni interval sleđenja, parametar zadržava fiksni uticaj koji iznosi  $\alpha = 1,06$ . Drugim rečima, bazna vrednost zasićenog toka je za oko 6% veća u slučaju kada postoji više traka na izlaznom kraku raskrsnice.

## 4.2 ANALIZA PRIHVATLJIVOG INTERVALA SLEĐENJA

Za utvrđivanje kritične vrednosti prihvatljivog intervala sleđenja  $t_c$  u literaturi generalno postoje različiti pristupi. Osnovna razlika među metodama utvrđivanja kritičnog prihvatljivog intervala sleđenja jeste set podataka koji se koristi u metodama, i to:

- svi prihvaćeni intervali sleđenja;
- svi prihvaćeni i svi odbijeni intervali sleđenja;
- svi prihvaćeni i maksimalni odbijeni intervali sleđenja.

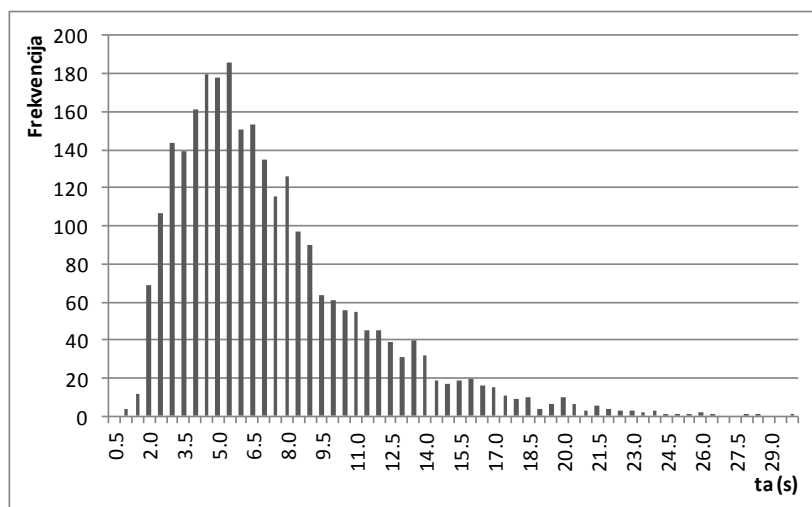
Takođe, dodatnu razliku predstavlja i tretman vozila koja su prihvatila prvi interval sleđenja koji im je bio na raspolaganju. U tom smislu, za takve realizacije se može ili usvojiti da je odbijeni interval sleđenja jednak nuli,  $t_r = 0$  s, ili se isti mogu zanemariti (isključiti iz seta podataka).

Na nivou celokupnog uzorka, na svim lokacijama istraživanja, registrovano je ukupno 2.713 prihvaćenih intervala sleđenja. U narednoj tabeli prikazana je osnovna statistika prihvaćenih intervala sleđenja,  $t_a$ , na celokupnom uzorku.

**Tabela 4-8. Analiza prihvaćenih intervala sleđenja na celokupnom uzorku**

Analizirani pokazatelj	Vrednost
Srednja vrednost (s)	7,11
Mediana (s)	6,10
Standardno odstupanje (s)	4,22
Opseg (s)	28,96
Minimum (s)	0,82
Maksimum (s)	29,78
Asimetrija	1,40
Obim uzorka	2713

Na ovaj način dobijena srednja vrednost od 7,11 s ne govori mnogo o kritičnoj vrednosti prihvatljivog intervala sleđenja, jer na istu u velikoj meri utiču i oni intervali sleđenja koji su bili prihvaćeni od plotuna vozila u levom skretanju. Na narednom dijagramu (Slika 4-5) prikazana je frekvencija prihvaćenih intervala sleđenja  $t_a$  (s) na nivou celokupnog uzorka. Iz prethodno navedenog razloga, posmatranja svih prihvaćenih intervala sleđenja, za različite trake, i za različit broj vozila koji prihvata interval sleđenja u konfliktnom toku, prikazana funkcija raspodele ne prati normalnu raspodelu.



**Slika 4-5. Frekvencija prihvaćenih intervala sleđenja na nivou celokupnog uzorka**

Međutim, tretman odbijenih intervala može biti različit, tako da su testirana tri različita slučaja:

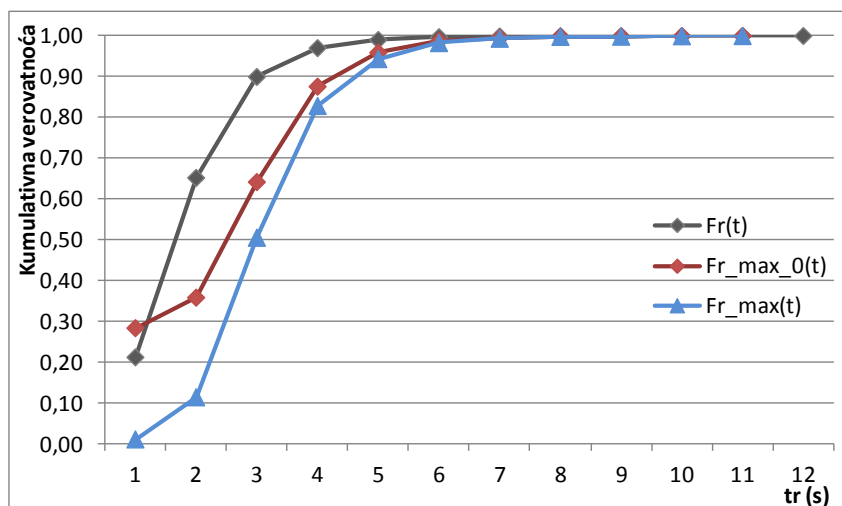
- Posmatranje svih realnih intervala sleđenja koji su bili odbijeni od strane vozača, pri čemu je za vozila koja prihvataju prvi interval sleđenja koji im je na raspolaganju, podrazumevano da nemaju odbijene intervale sleđenja. Takođe, u ovoj bazi odbijenih intervala sleđenja nalaze se i oni koji su odbijeni od strane vozila koja nisu prihvatila nijedan interval sleđenja, a opslužila su se na kraju zelenog signalnog pojma. Na ovaj način kreirana je baza od ukupno 23.934 odbijenih intervala sleđenja,  $t_r$  (s).

- Posmatranje maksimalnih odbijenih intervala sleđenja samo za ona vozila koja su u toku svoje opsluge prihvatila interval sleđenja određene veličine. Za vozila koja su prihvatila prvi interval sleđenja, odnosno koja nemaju odbijene intervale, usvojeno je da je njihov  $t_{r,max} = 0$ . Formirana baza sadrži ukupno 2.713 maksimalnih odbijenih intervala sleđenja,  $t_{r,max,0}$  (s).
- Posmatranje realnih maksimalnih odbijenih intervala sleđenja za ona vozila koja su u toku svoje opsluge prihvatila interval sleđenja određene veličine, a nisu prihvatila prvi interval koji im je bio na raspolaganju. Kreirana baza sadrži ukupno 1.965 realnih vrednosti maksimalnih odbijenih intervala sleđenja  $t_{r,max}$  (s). Drugim rečima, u odnosu na prethodnu bazu, izbačeno je 748 vozila koja su prihvatila prvi interval sleđenja i čiji je pretpostavljeni  $t_{r,max}$  bio jednak 0.

Empirijska raspodela odbijenih intervala sleđenja za sva tri načina posmatranja ovog parametra na nivou celokupnog uzorka (Tabela 4-9), prikazana je na narednom dijagramu.

**Tabela 4-9. Empirijska raspodela odbijenih intervala sleđenja na celokupnom uzorku u zavisnosti od načina tretmana  $t_r$**

Klasa (s)	Svi odbijni intervali $t_r$			Maksimalni odbijni intervali $t_{r,max,0}$			Maksimalni odbijni intervali $t_{r,max}$		
	Frekvencija	Kumulativna frekvencija	Funkcija raspodele (CDF)	Frekvencija	Kumulativna frekvencija	Funkcija raspodele (CDF)	Frekvencija	Kumulativna frekvencija	Funkcija raspodele (CDF)
<1,0	5071	5071	0,212	769	769	0,283	21	21	0,011
1,0-2,0	10534	15605	0,652	203	972	0,358	203	224	0,114
2,0-3,0	5924	21529	0,900	769	1741	0,642	769	993	0,505
3,0-4,0	1691	23220	0,970	635	2376	0,876	635	1628	0,828
4,0-5,0	481	23701	0,990	226	2602	0,959	226	1854	0,944
5,0-6,0	162	23863	0,997	77	2679	0,987	77	1931	0,983
6,0-7,0	41	23904	0,999	21	2700	0,995	21	1952	0,993
7,0-8,0	17	23921	0,999	9	2709	0,999	9	1961	0,998
8,0-9,0	5	23926	1,000	1	2710	0,999	1	1962	0,998
9,0-10,0	2	23928	1,000	2	2712	1,000	2	1964	0,999
10,0-11,0	5	23933	1,000	1	2713	1,000	1	1965	1,000
11,0-12,0	1	23934	1,000	0	2713	1,000	0	1965	1,000



**Slika 4-6. Funkcije raspodele odbijenih intervala sleđenja  $t_r$  na celokupnom uzorku u zavisnost od načina tretmana  $t_r$**

Uzimajući u obzir kreirane baze prihvaćenih i odbijenih intervala sleđenja, u nastavku je izvršeno utvrđivanje kritične vrednosti prihvatljivog intervala sleđenja primenom različitih metoda: Sieglach, Raff, Harders metoda, Logit model, MLM i PEM metode. Ashworth metoda

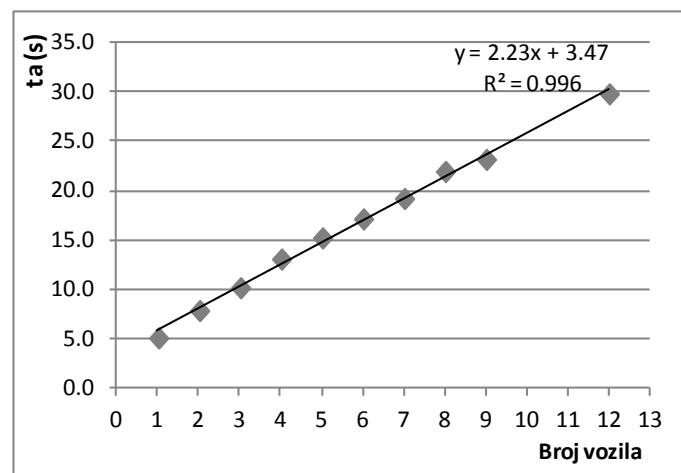


jedina nije primenjena za utvrđivanje kritičnog prihvatljivog intervala sleđenja jer ista ne daje jedinstvenu vrednost već je ista zavisna od intenziteta konfliktnog toka.

#### 4.2.1 Siegloch metoda za utvrđivanje $t_c$

U prvom koraku analize primenjena je Siegloch metoda (Siegloch, 1973) za utvrđivanje kritičnog prihvatljivog intervala sleđenja koja tretira isključivo prihvaćene intervale sleđenja. Prilikom primene metode intervale sleđenja koji su odbijeni nisu tretirani su kao prihvaćeni intervale sleđenja od strane 0 vozila. Razlog ovakvog pristupa je potencijalni uticaj takvih intervala sleđenja na dobijenu zavisnost, naročito ako se ima u vidu da je veliki broj odbijenih intervala sleđenja malih vrednosti. Na ovaj način prosečna vrednost intervala sleđenja za  $n = 0$  vozila ne bi odslikavala realnu zavisnost. Opravdanje za ovakav pristup je nađeno i u originalnom predlogu Siegloch metode (Siegloch, 1973).

Iako primenjena metoda ne uzima u obzir odbijene intervale sleđenja, ista predstavlja jedinu metodu koja u obzir uzima broj opsluženih vozila tokom intervala sleđenja koji je prihvaćen. Stoga, ova metoda je primenjiva na lokacijama na kojima ne postoji intenzivan konfliktni tok, odnosno gde su pojave intervala koje prihvata samo jedno vozilo retke. Dobijena zavisnost data je na narednom grafiku.



Slika 4-7. Siegloch metoda za utvrđivanje  $t_c$  na celokupnom uzorku

Na osnovu dobijene jake linearne zavisnosti ( $R^2=0,996$ ) kritičan interval sleđenja iznosi:

$$t_c = t_0 + \frac{t_{fh}}{2} = 3,47 + \frac{2,23}{2} = 4,6 \text{ (s)} \quad (4-4)$$

Prednost ove relativno jednostavne metode je da se analizom isključivo prihvaćenih intervala sleđenja može izvršiti i estimacija intervala sleđenja vozila u levom skretanju ( $t_{fh} = 2,23$  s). Vrednost  $t_{fh}$  dobijena ovom metodom delimično precenjuje interval sleđenja koji je dobijen detaljnom analizom intervala sleđenja vozila u levom skretanju, čime se posledično potcenjuje vrednost zasićenog saobraćajnog toka.

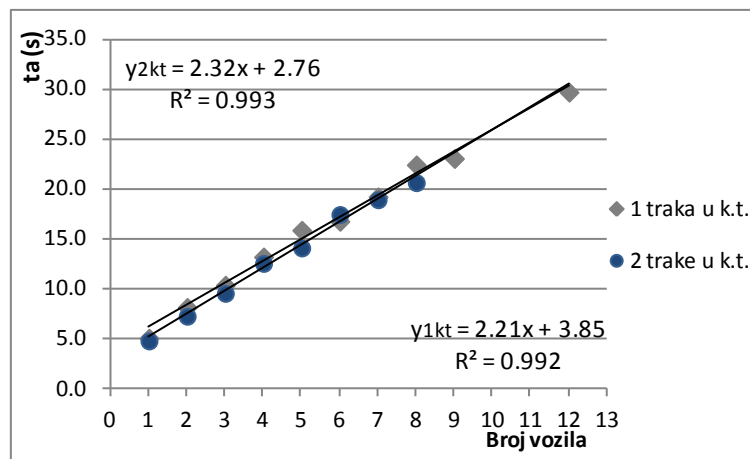
Primenom Siegloch metode (Siegloch, 1973) za analizu prihvatljivih intervala sleđenja po saobraćajnim trakama, dobijene vrednosti kritičnog intervala se značajno razlikuju. Dobijene linearne zavisnosti za svaku pojedinačnu traku kao i utvrđene vrednosti  $t_c$  prikazane su u narednoj tabeli (Tabela 4-10). Pripadajući grafici dati su u Prilogu 1.

**Tabela 4-10. Rezultati Siegloch metode za utvrđivanje  $t_c$  po saobraćajnim trakama**

Traka	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
Slope	2,51	2,65	2,31	2,40	2,56	1,97	1,80	2,80	2,18	2,52	2,50	2,84	2,29
Intercept	4,65	5,37	1,63	3,68	2,27	2,44	5,73	2,09	3,89	2,54	2,52	1,52	1,20
$R^2$	0,876	0,468	0,993	0,992	0,969	0,875	0,918	0,986	0,991	0,960	0,990	0,993	0,954
$t_{c,siegloch}$ (s)	5,91	6,70	2,79	4,89	3,55	3,43	6,63	3,49	4,99	3,80	3,77	2,94	2,35

Na narednom grafiku (Slika 4-8) prosečne vrednosti prihvaćenih intervala sleđenja su prikazane odvojeno u odnosu na broj traka u konfliktnom toku. Iako su linearnom regresijom dobijene male razlike, rezultujuće vrednosti  $t_c$  se razlikuju za više od 1,0 sekunde. Dobijene linearne zavisnosti date su na grafiku, a rezultujuće vrednosti  $t_c$  iznose:

- u slučaju jedne trake u konfliktnom toku:  $t_{c,1kt} = 5,0$  s;
- u slučaju dve trake u konfliktnom toku:  $t_{c,2kt} = 3,9$  s.


**Slika 4-8. Siegloch metoda za utvrđivanje  $t_c$  u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku**

Dobijeni rezultati ukazuju da vozači prihvataju manje intervale sleđenja u slučaju većeg broja traka u konfliktnom toku, što se može objasniti percepcijom veličine intervala sleđenja između vozila koja se kreću u različitim trakama.

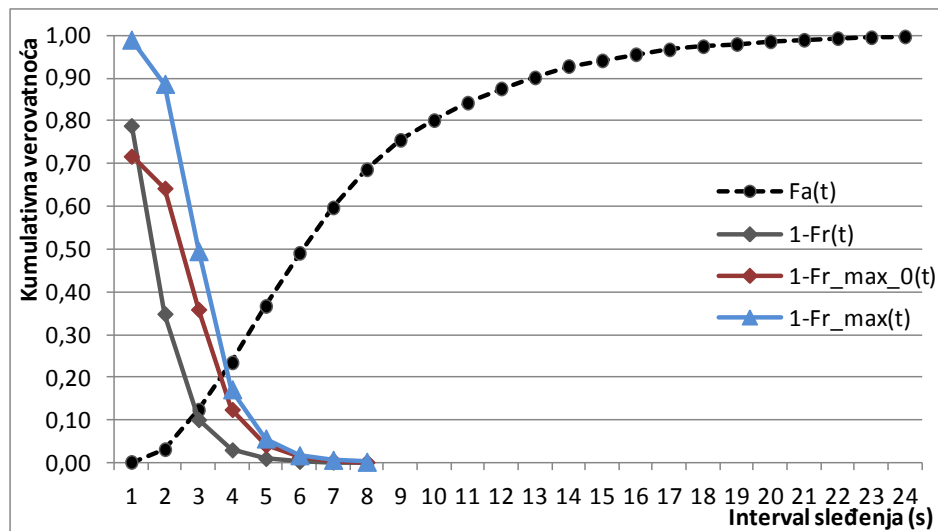
#### 4.2.2 Raff metoda za utvrđivanje $t_c$

Primena Raff metode (Raff & Hart, 1950) zahteva sagledavanje ne samo prihvaćenih, već i odbijenih intervala sleđenja. Za empirijsku funkciju raspodele prihvaćenih i tri tipa empirijske funkcije raspodele odbijenih intervala sleđenja, u zavisnosti od opisanog načina tretmana odbijenih intervala, primenom Raff metode za utvrđivanje kritične vrednosti prihvatljivog intervala sleđenja dobijeni su naredni rezultati (Slika 4-9):

- Slučaj 1 - posmatranje svih odbijenih intervala sleđenja:  $t_c = 2,9$  s;
- Slučaj 2 - posmatranje maksimalnih odbijenih intervala sa  $t_{r,max} = 0$  za prihvatanje prvog intervala sleđenja:  $t_c = 3,7$  s;
- Slučaj 3 - posmatranje realnih maksimalnih odbijenih intervala:  $t_c = 3,9$  s.

Može se uočiti da način tretmana odbijenih intervala sleđenja utiče na rezultujuće vrednosti kritičnog intervala sleđenja, i to prevashodno u odnosu na posmatranje svih

odbijenih ili samo maksimalnih odbijenih. S druge strane, tretman vozila koja nisu imala odbijeni interval sleđenja (dodeljivanje vrednosti  $t_r=0$  ili njihovo izbacivanje iz uzorka) nema značajan uticaj na dobijenu vrednost kritičnog intervala sleđenja,  $t_c$  od 3,7 i 3,9 s.



Slika 4-9. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  na celokupnom uzorku

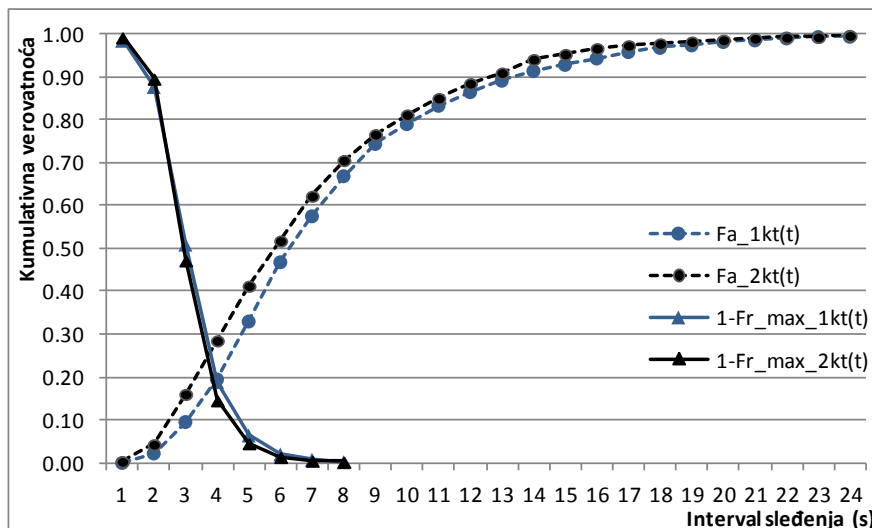
Generalno, dobijene vrednosti kritičnog intervala sleđenja su niske, tako da je maksimalno 20% vozila prihvatilo dobijene vrednosti  $t_c$ , bez obzira na tretman odbijenih intervala sleđenja. Razlog ovakvih rezultata je činjenica da je najveći broj intervala sleđenja koji je odbijen (preko 50%, Slika 4-6) manji od 3 s. Ovo je prvenstveno karakteristika konfliktnog toka na semaforisanim raskrsnicama, gde se najveći broj vozila iz konfliktnog toka opslužuje u plotunu, sa malim intervalima sleđenja.

U nastavku analize, za utvrđivanje  $t_c$  po saobraćajnim trakama, korišćen je pristup sa posmatranjem samo maksimalnih odbijenih intervala sleđenja. Rezultujuće vrednosti  $t_c$  po ovoj metodi prikazane su u narednoj tabeli (Tabela 4-11), dok su pojedinačni grafici po saobraćajnim trakama dati u Prilogu.

Tabela 4-11. Rezultati Raff metode za utvrđivanje  $t_c$  po saobraćajnim trakama

Traka	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
$t_{c,Raff}$ (s)	4,48	4,21	3,18	4,01	3,52	3,31	4,45	3,58	4,63	3,84	3,96	3,50	3,18

Analizirajući raspodele prihvaćenih i maksimalnih odbijenih intervala sleđenja u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku, dobijene su veoma male razlike, što je posledica raspodele prihvaćenih intervala sleđenja, dok je raspodela maksimalnih odbijenih intervala sleđenja gotovo identična u oba slučaja (Slika 4-10).



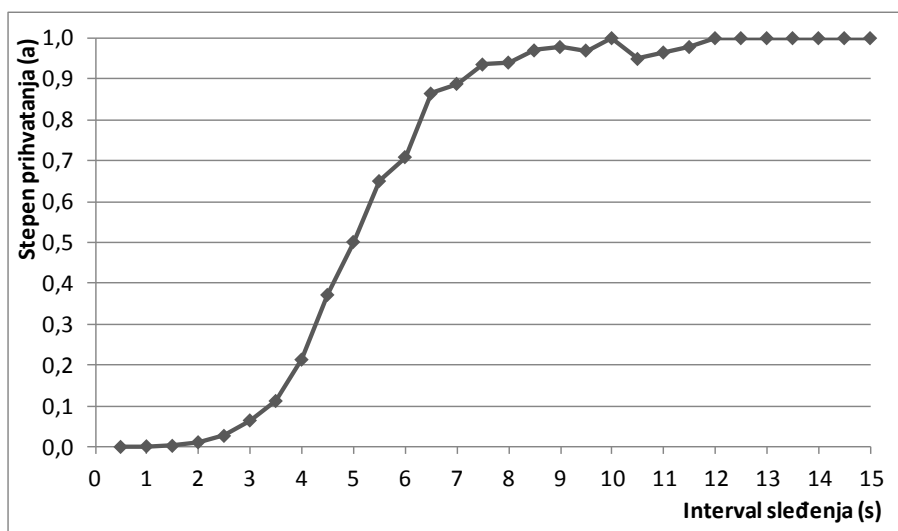
Slika 4-10. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku

Rezultujuće vrednosti  $t_c$  u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku primenom Raff metode su:

- u slučaju jedne trake u konfliktnom toku:  $t_{c\_1kt} = 4,0$  s;
- u slučaju dve trake u konfliktnom toku:  $t_{c\_2kt} = 3,7$  s.

#### 4.2.3 Harders metoda za utvrđivanje $t_c$

Za primenu Harders metode, koja je zasnovana na posmatranju svih odbijenih intervala sleđenja, za klasu intervala sleđenja dužine  $\Delta t = 0,5$  s, utvrđen je broj intervala sleđenja vozila koji se pojavio u uzorku  $N_i$ , kao i broj takvih intervala koji su prihvaćeni. Konačno, za svaku klasu je utvrđen stepen prihvatanja intervala sleđenja  $a_i = A_i/N_i$ .



Slika 4-11. Harders metoda za utvrđivanje  $t_c$  na celokupnom uzorku

Na dijagramu se može videti da je za stepen prihvatanja  $a = 0,5$  dobijena vrednost  $t_c = 5,0$  s, dok su vrednosti dobijene po saobraćajnim trakama prikazane u narednoj tabeli.

Tabela 4-12. Rezultati Harders metode za utvrđivanje  $t_c$  po saobraćajnim trakama

Traka	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
$t_{c,Harders}$ (s)	5,95	5,80	4,29	5,41	4,16	4,35	5,10	4,01	5,36	4,93	4,88	4,50	4,07

Primenjena metoda nije pokazala osetljivost vrednosti  $t_c$  u odnosu na broj traka u konfliktnom toku, tako da je u oba slučaja dobijena je vrednost od 5,0 s.

#### 4.2.4 MLM metoda za utvrđivanje $t_c$

MLM metoda tretira maksimalne odbijene intervale sleđenja sa pretpostavkom da je za vozila koja su prihvatila prvi dostupan interval sleđenja  $t_r \approx 0$ . Metode ima jasan ograničavajući faktor da za svako pojedinačno vozilo prihvaćeni interval sleđenja mora biti veći od njegovog maksimalnog odbijenog, što na celokupnom uzorku nije bio slučaj za ukupno 233 vozila odnosno oko 8% vozila. Za ova vozila izvršena je korekcija odbijenih intervala sleđenja na način da je pretpostavljeno da je njihov  $t_r$  približno jednak i manji od  $t_a$  ( $t_r = t_a - 0,1$ ). Ova korekcija je izvršena zbog smanjenja uticaja na raspodelu odbijenih intervala sleđenja, a kako bi metoda bila primenjena na istom uzorku prihvaćenih intervala sleđenja kao i ostale metode.

Za rešavanje funkcije maksimalne verodostojnosti, tj. traženje parametara funkcije koji daju maksimalnu verodostojnost korišćen je Excel Solver. U narednoj tabeli (Tabela 4-13) prikazan je primer seta podataka koji je korišćen za estimaciju matematičkog očekivanja  $m$  i varijanse  $s^2$  kritičnog prihvatljivog intervala sleđenja, maksimizacijom sume (logaritma funkcije verodostojnost uz pretpostavljenu log-normalnu raspodelu). Početne vrednosti  $m$  i  $s^2$  raspodele kritičnog intervala sleđenja su bile podešene na 5 s i 2 s; dok su odgovarajuće  $\mu$  i  $\sigma^2$  log-normalne raspodele  $t_c$  utvrđene na osnovu sledećih jednačina:

$$\sigma^2 = \ln\left(\frac{s^2}{m^2} + 1\right) \quad (4-5)$$

$$\mu = \ln(m) - 0,5\sigma^2 \quad (4-6)$$

U iterativnom postupku, menjajući početne vrednosti  $m$  i  $s^2$ , a posledično i  $\mu$  i  $\sigma^2$  log-normalne raspodele, dobijena vrednost kritičnog intervala sleđenja, na nivou celokupnog uzorka iznosi 4,3 s.

**Tabela 4-13. Primer Excel Solver procedure za primenu MLM metode za utvrđivanje  $t_c$**

Vozilo	$t_a$ (s)	$t_{r\_max}$ (s)	$t_{r\_max\_corr}$ (s)	$\ln(F(t_a)-F(t_{r\_max\_corr}))$
1	6,94	4,55	4,55	-0,9950
2	9,53	0,10	0,10	-0,0000
3	3,74	4,15	3,64	-3,2024
4	11,84	2,97	2,97	-0,0411
5	8,71	2,82	2,82	-0,0234
6	10,39	0,10	0,10	-0,0000
7	13,88	0,10	0,10	-0,0000
8	12,02	4,93	4,93	-1,4042
...	...	...	...	...
2713	6,39	0,61	0,61	-0,0267
Suma				-23,464

Istovetna procedura je primenjena na pojedinačne setove podataka po saobraćajnim trakama, a rezultati su prikazani u narednoj tabeli (Tabela 4-14).

**Tabela 4-14. Rezultati MLM metode za utvrđivanje  $t_c$  po saobraćajnim trakama**

Traka	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
$t_{c\_MLM}$ (s)	4,74	4,60	3,19	4,89	3,42	3,56	4,97	3,88	4,88	4,48	4,37	4,00	3,34

Takođe, ista metoda je primenjena na setovima podataka u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku, kao i kod prethodnih metoda, a rezultujuće vrednosti  $t_c$  su:

- u slučaju jedne trake u konfliktnom toku:  $t_{c\_1kt} = 4,4$  s;
- u slučaju dve trake u konfliktnom toku:  $t_{c\_2kt} = 4,1$  s.

#### 4.2.5 PEM metoda za utvrđivanje $t_c$

PEM metoda je teorijski zasnovana na analizi svih odbijenih intervala sleđenja. Za kritične vrednosti prihvatljivog intervala sleđenja po ovoj metodi korišćena je Excel procedura koju je dao Wu (2006). Primer procedure za proračun prikazan je u narednoj tabeli (Tabela 4-15). Ova metoda se smatra makroskopskom jer posmatra celokupan uzorak svih intervala sleđenja, prihvaćenih (označenih u tabeli sa „a“) i odbijenih (označenih u tabeli sa „r“).

Primenom opisane metode dobijena kritična vrednost prihvatljivog intervala sleđenja na celokupnom uzorku iznosi  $t_c = 3,0$  s, dok su vrednosti po saobraćajnim trakama date u narednoj tabeli (Tabela 4-16). Očekivano, dobijene vrednosti su nešto niže, što je posledica posmatranja svih odbijenih intervala sleđenja, od kojih je njih 20% manje od 1,0 s (Slika 4-6).

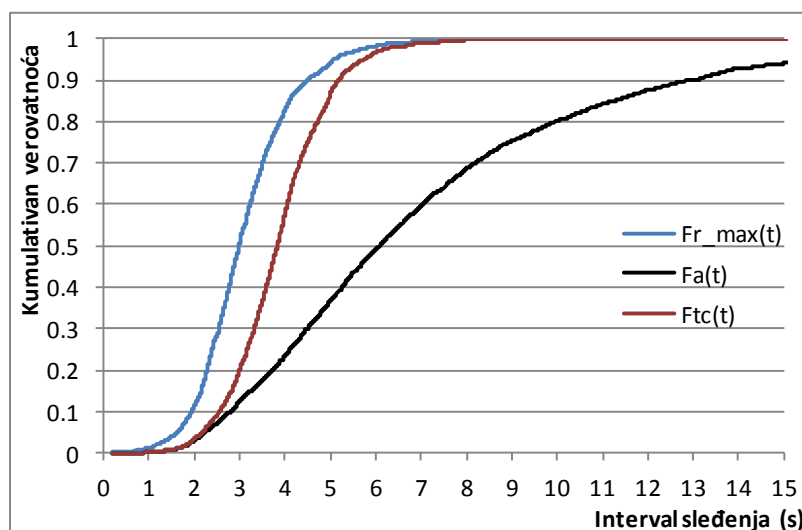
**Tabela 4-15. Primer Excel procedure za primenu PEM metode za utvrđivanje  $t_c$** 

Index $j$	$t_j$ (s)	"a" prihvaćen; "r" odbijen	$nr_j$	$na_j$	$Fr(t_j) =$ $nr_j/nr_{max}$	$Fa(t_j) =$ $na_j/na_{max}$	$Ftc(t_j) = Fa(t_j) /$ $(Fa(t_j) + 1 - Fr(t_j))$	$ptc(t_j) = Ftc(t_j) -$ $Ftc(t_j - 1)$	$tdj = (t_j + t_{j-1}) / 2$	$ftc(t_j) * tdj$
1	0,00	r	1	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,0000
2	0,00	r	2	0	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,0000
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
5873	1,11	r	5866	7	0,2451	0,0026	0,0034	0,0000	1,11	0,0000
5874	1,11	r	5867	7	0,2451	0,0026	0,0034	0,0000	1,11	0,0000
5875	1,11	r	5868	7	0,2452	0,0026	0,0034	0,0000	1,11	0,0000
5876	1,11	r	5869	7	0,2452	0,0026	0,0034	0,0000	1,11	0,0000
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24580	4,85	r	23642	936	0,9878	0,3450	0,9658	0,0001	4,85	0,0005
24581	4,85	a	23642	937	0,9878	0,3454	0,9659	0,0000	4,85	0,0002
24582	4,86	a	23642	938	0,9878	0,3457	0,9659	0,0000	4,86	0,0002
24583	4,86	a	23642	939	0,9878	0,3461	0,9660	0,0000	4,86	0,0002
24584	4,86	r	23643	939	0,9878	0,3461	0,9661	0,0001	4,86	0,0005
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
26645	27,62	a	23934	2711	1,0000	0,9993	1,0000	0,0000	26,94	0,0000
26646	28,21	a	23934	2712	1,0000	0,9996	1,0000	0,0000	27,91	0,0000
26647	29,78	a	23934	2713	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000	28,99	0,0000
Suma			23934	2713					$t_c$ (s) =	3,02

**Tabela 4-16. Rezultati PEM metode za utvrđivanje  $t_c$  po saobraćajnim trakama na uzorku  $t_{r,all}$** 

Traka	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
$t_{c,PEM,all}$ (s)	4,22	3,87	3,07	3,20	2,91	2,47	3,92	3,00	4,25	3,18	3,60	2,82	2,76

Primenom iste metode na uzorak maksimalnih odbijenih intervala sleđenja, bez pretpostavke da je  $t_{r,max} = 0$  u slučaju prihvatanja prvog intervala sleđenja, dobijena je nešto veća vrednost  $t_c = 3,9$  s. Slika 4-12 prikazuje dobijenu raspodelu kritičnih intervala sleđenja zajedno sa empirijskom raspodelama maksimalnih odbijenih i prihvaćenih intervala sleđenja. Metoda je primenjena na ovom tipu uzorka odbijenih intervala sleđenja iz razloga uporedivosti sa ostalim metodama.


**Slika 4-12. PEM metoda za utvrđivanje  $t_c$  primenjena na uzorku  $t_{r,max}$**

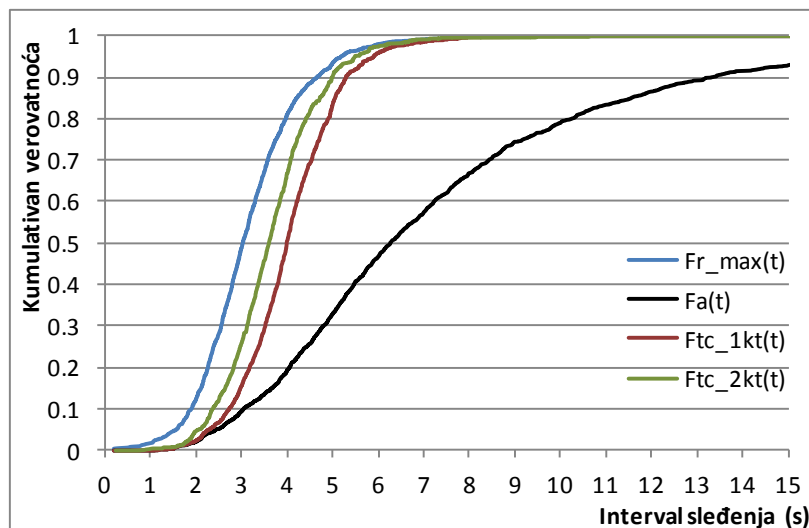
**Tabela 4-17. Rezultati PEM metode za utvrđivanje  $t_c$  po saobraćajnim trakama na uzorku  $t_{r,max}$** 

Traka	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
$t_{c,PEM,max}$ (s)	4,53	4,29	3,15	4,38	3,38	3,45	4,73	3,69	4,65	3,88	4,17	3,56	3,08

Na ovaj način, posmatranjem samo maksimalnih odbijenih intervala sleđenja dobijene vrednosti  $t_c$  su u proseku veće za 0,6 s, i to od 0,08 s do 1,18 s u zavisnosti od lokacije istraživanja.

Posmatranjem samo maksimalnih odbijenih intervala sleđenja, ista metoda je primenjena na setovima podataka u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku. Slika 4-13 prikazuje rezultujuće funkcije raspodele prihvatljivog intervala sleđenja, a dobijene vrednosti  $t_c$  su:

- u slučaju jedne trake u konfliktnom toku:  $t_{c,1kt} = 4,4$  s;
- u slučaju dve trake u konfliktnom toku:  $t_{c,2kt} = 3,7$  s.



Slika 4-13. PEM metoda za utvrđivanje  $t_c$  primenjena na uzorku  $t_{r,max}$  u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku

#### 4.2.6 Binarni logit model za utvrđivanje $t_c$

Koristeći logit model, kritični prihvatljiv interval sleđenja je utvrđen korišćenjem interval sleđenja u konfliktnom toku kao nezavisne promenljive, dok je zavisna promenljiva odluka vozača da u datoj situaciji prihvati „1“ ili odbije „0“ interval sleđenja. Ovim modelom je procenjena verovatnoća prihvatanja ili odbijanja intervala sleđenja. Konačno, kritičan prihvatljiv interval sleđenja je procenjen kao interval koji ima verovatnoću prihvatanja od 0,50. Za razvoj logit modela prihvatljivog intervala sleđenja korišćen je IBM SPSS softver, koji za definisanje koeficijenata funkcije koristi ML proceduru. Bitno je napomenuti da je ovaj model ograničen za primenu na uzorku sa svim odbijenim intervalima sleđenja.

Za definisanje kritične vrednosti prihvatljivog intervala sleđenja, u prvom koraku, kreiran je najjednostavniji model u kom je interval sleđenja  $t_h$  (s) jedina nezavisna promenljiva. Verovatnoća izbora odgovarajuće alternative  $i$  (prihvatanje ili odbijanje) definisana je kao:



$$Pa(i) = \frac{1}{1 + e^{-U_i}} = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha_i + \beta_1 t_h)}} \quad (4-7)$$

Razvijeni Model 1, zasnovan na celokupnom uzorku, predstavljan je narednom jednačinom:

$$U_i = -6,594 + 1,364t_h \quad (4-8)$$

Za testiranje značajnosti koeficijenata logističke regresije korišćen je Wald-ov test. Izračunata je Wald statistika, a rezultati Wald-Hi-kvadrat testa su prikazani u narednoj tabeli (Tabela 4-18). Pošto je značajnost  $p$  promenljive manja od kritične ( $p=0,05$ ) može se zaključiti da je koeficijent promenljive različit od 0, što znači da promenljiva značajno utiče na prognoziranu, zavisnu promenljivu. Dobijena pozitivna vrednosti koeficijenta logično ukazuje da se povećanjem intervala sleđenja povećava verovatnoća njegovog prihvatanja.

**Tabela 4-18. Rezultujuće vrednosti koeficijenata i Wald statistika Modela 1**

Promenljive	B	Standardna greška	Wald	Stepeni slobode	$p$	Količnik verovatnoće
$t_h$ (s)	<b>1,364</b>	0,024	3351,465	1	0,000	3,914
Constant	<b>-6,594</b>	0,089	5490,719	1	0,000	0,001

Model 1 prihvatljivog intervala sleđenja pokazao je zavidnu preciznost sa Nagelkerke pseudo  $R^2=0,676$  i sa 95,4% tačnosti u predikciji ishoda. Tabela 4-19 prikazuje rezultate predikcije.

**Tabela 4-19. Rezultati predikcije Modela 1**

Posmatranje	Predikcija		Tačnost estimacije Modela 1 (%)
	Odbijanje intervala sleđenja	Prihvatanje intervala sleđenja	
Odbijanje intervala sleđenja	23635	298	98,8
Prihvatanje intervala sleđenja	929	1784	65,8
Ukupna tačnost Modela 1 (%)			<b>95,4</b>

Pored Modela 1, sa jednom nezavisnom promenljivom, razvijeni Model 2 je pored intervala sleđenja kao nezavisne promenljive, uključio i broj traka u konfliktnom toku:

$$Pa(i) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha_i + \beta_1 t_h + \beta_2 N_{kt})}} \quad (4-9)$$

Gde je  $N_{kt}$  kategorijska promenljiva definisana u odnosu na postojanje više traka u konfliktnom toku; „0“ ne postoji i „1“ postoji više od jedne trake u konfliktnom toku. Rezultujući model dat je narednom jednačinom:

$$U_i = -6,715 + 1,373t_h + 0,202N_{kt} \quad (4-10)$$

Za testiranje značajnosti koeficijenta logističke regresije korišćen je Wald-ov test. Izračunata je Wald statistika a rezultati Wald-Hi-kvadrat testa su prikazani u narednoj tabeli (Tabela 4-20). Pošto je značajnost ( $p$ ) obe promenljive manja od kritične ( $p=0,05$ ) može se zaključiti da obe promenljive značajno utiču na prognoziranu, zavisnu promenljivu. Može se primetiti da su oba dobijena koeficijenta pozitivna, odnosno da obe nezavisne promenljive pozitivno utiču na verovatnoću prihvatanja intervala sleđenja. Dobijeni model odgovara prethodnim modelima naročito u smislu postojanja više traka u konfliktnom toku. Drugim rečima, model je konzistentan po pitanju povećanja kritičnog prihvatljivog intervala sleđenja i u mogućnosti je da kvantifikuje veću verovatnoću prihvatanja određenog intervala sleđenja ukoliko postoji više traka u konfliktnom toku.

**Tabela 4-20. Rezultujuće vrednosti koeficijenta i Wald statistika Modela 2**

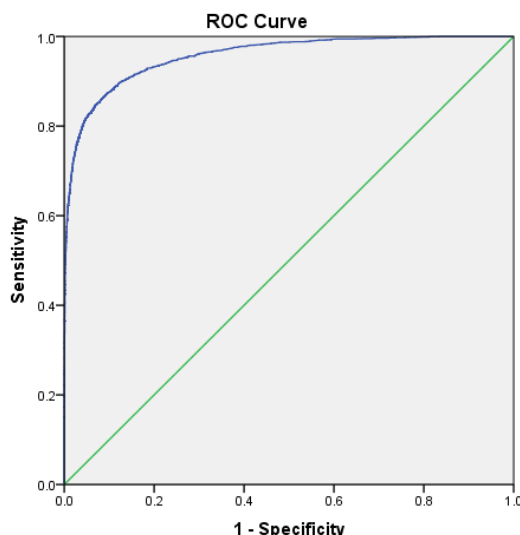
Promenljive	B	Standardna greška	Wald	Stepeni slobode	$p$	Količnik verovatnoće
$t_h$ (s)	<b>1,373</b>	0,024	3320,972	1	0,000	3,947
$N_{kt}$	<b>0,202</b>	0,067	9,100	1	0,003	1,224
Constant	<b>-6,715</b>	0,099	4629,496	1	0,000	0,001

Model 2 prihvatljivog intervala sleđenja pokazao je preciznost sa Nagelkerke pseudo  $R^2=0,677$  i sa identičnom tačnosti u predikciji ishoda kao i Model 1, 95,4%. Tabela 4-21 prikazuje rezultate predikcije.

**Tabela 4-21. Rezultati predikcije Modela 2**

Posmatranje	Predikcija		Tačnost estimacije Modela 2 (%)
	Odbijanje intervala sleđenja	Prihvatanje intervala sleđenja	
Odbijanje intervala sleđenja	23640	293	98,8
Prihvatanje intervala sleđenja	931	1782	65,7
Ukupna tačnost Modela 2 (%)			95,4

Oba razvijena modela pokazuju veliku ukupnu preciznost predikcije odbijenih intervala sleđenja, dok je preciznost predikcije prihvaćenih intervala oko 66%. U cilju sagledavanja validnosti razvijenih modela (Model 1 i Model 2) korišćena je ROC (eng. *receiver operating characteristic*) kriva. Svaka tačka krive predstavlja uređeni par (senzitivnost, specifičnost) koji odgovara pojedinačnom nivou odlučivanja (Kajalić, 2020). Senzitivnost predstavlja potencijal testa da otkrije stvarno prihvaćene intervale sleđenja, dok je specifičnost potencijal modela da otkrije odbijene intervale sleđenja. Takođe, bitno je napomenuti da „1-specifičnost“ (Slika 4-14) daje informaciju o delu lažno prihvaćenih intervala sleđenja među onima koji su realno odbijeni.



Slika 4-14. ROC kriva za utvrđivanje validnosti Modela 2

Kriva daje vrednosti između 0,5 i 1,0, gde 0,5 ukazuje da su predikcije modela slučajne a 1,0 pokazuje da model pokazuje veću verovatnoću za tačan nego za netačan ishod (Boroujerdian & Nemati, 2016). Slika 4-14 i Tabela 4-22 prikazuju ROC i AUC (površina pod ROC krivom) za razvijeni Model 2. Rezultujući AUC = 0,957, čime se potvrđuje validnost razvijenog Modela 2.

Tabela 4-22. Površina ispod ROC krive za Model 2

AUC	Standardna greška	Asimptotska značajnost	95% Interval poverenja	
			Donja granica	Gornja granica
0,957	0,002	0,000	0,953	0,961

Konačno, na bazi razvijenog modela, kritičan interval sleđenja je moguće utvrditi kao onaj čija je verovatnoća prihvatanja jednaka 0,50, odnosno:

$$t_c = \frac{\alpha}{\beta} \quad (4-11)$$

Rezultujuće vrednosti  $t_c$  u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku primenom Logit metode na Model 2 su:

- u slučaju jedne trake u konfliktnom toku:  $t_{c,1kt} = 4,9$  s;
- u slučaju dve trake u konfliktnom toku:  $t_{c,2kt} = 4,7$  s.

Logično, ukoliko se primeni formirani Model 1, dobija se jedinstvena vrednosti  $t_c = 4,8$  s.

Zasnovano na istim promenljivim kao i Model 1, odnosno odluci kao zavisnoj i intervalu sleđenja kao nezavisnoj promenljivoj, razvijeni su modeli za svaku lokaciju istraživanja. Za testiranje značajnosti koeficijenata logističke regresije za svaku lokaciju korišćen je Wald-ov test, a rezultati Wald-Hi-kvadrat testa su prikazani u narednoj tabeli. Pošto je značajnost  $p$  promenljive manja od kritične ( $p=0,05$ ) može se zaključiti da je koeficijent promenljive različit od 0, što znači da promenljiva značajno utiče na prognoziranu, zavisnu promenljivu za sve lokacije.

**Tabela 4-23. Rezultujuće vrednosti koeficijenata i Wald statistika Modela 2**

Traka	Promenljive	B	Standardna greška	Wald	<i>p</i>
T1	$t_h$ (s)	1,354	0,124	119,271	0,000
	Constant	-6,716	0,622	153,999	0,000
T2	$t_h$ (s)	1,346	0,125	116,955	0,000
	Constant	-7,345	0,593	153,646	0,000
T3	$t_h$ (s)	2,018	0,284	50,616	0,000
	Constant	-8,319	0,989	70,807	0,000
T4	$t_h$ (s)	1,428	0,102	194,109	0,000
	Constant	-7,301	0,426	293,604	0,000
T5	$t_h$ (s)	1,233	0,199	38,454	0,000
	Constant	-4,795	0,649	54,509	0,000
T6	$t_h$ (s)	1,467	0,055	714,247	0,000
	Constant	-6,240	0,168	1357,261	0,000
T7	$t_h$ (s)	1,548	0,073	453,773	0,000
	Constant	-8,137	0,324	630,101	0,000
T8	$t_h$ (s)	1,169	0,056	432,226	0,000
	Constant	-5,272	0,201	691,410	0,000
T9	$t_h$ (s)	2,345	0,179	171,446	0,000
	Constant	-12,059	0,849	201,907	0,000
T10	$t_h$ (s)	1,911	0,127	227,309	0,000
	Constant	-9,077	0,501	327,691	0,000
T11	$t_h$ (s)	1,418	0,123	132,271	0,000
	Constant	-6,912	0,492	197,016	0,000
T12	$t_h$ (s)	1,555	0,104	223,183	0,000
	Constant	-6,590	0,357	341,505	0,000
T13	$t_h$ (s)	1,720	0,217	62,791	0,000
	Constant	-6,431	0,663	94,096	0,000

Svaki od razvijenih modela za pojedinačnu lokaciju pokazao je veliku preciznost i tačnost u predikciji ishoda. Rezultati sprovedenog testiranja (Nagelkerke pseudo  $R^2$ ) kao i ukupna tačnost modela prikazana je u narednoj tabeli. Takođe, u tabeli su date u rezultujuće vrednosti kritičnog intervala sledenja. Može se uočiti da i pojedinačni modeli daju visoku ukupnu tačnost, preko 90%.

**Tabela 4-24. Preciznost modela po saobraćajnim trakama i rezultujuće vrednosti  $t_c$** 

Traka	Model	Nagelkerke pseudo $R^2$	Ukupna tačnost modela (%)	AUC	$t_c$ (s)
T1	$U_i = -6,716 + 1,354t_h$	0,790	96,8	0,988	<b>4,96</b>
T2	$U_i = -7,345 + 1,346t_h$	0,745	95,6	0,970	<b>5,46</b>
T3	$U_i = -8,319 + 2,018t_h$	0,675	94,7	0,959	<b>4,12</b>
T4	$U_i = -7,301 + 1,428t_h$	0,792	97,8	0,987	<b>5,11</b>
T5	$U_i = -4,795 + 1,233t_h$	0,612	87,4	0,899	<b>3,89</b>
T6	$U_i = -6,240 + 1,467t_h$	0,572	95,5	0,943	<b>4,25</b>
T7	$U_i = -8,137 + 1,548t_h$	0,794	97,1	0,992	<b>5,26</b>
T8	$U_i = -5,272 + 1,169t_h$	0,581	90,3	0,915	<b>4,51</b>
T9	$U_i = -12,059 + 2,345t_h$	0,871	97,9	0,994	<b>5,14</b>
T10	$U_i = -9,077 + 1,911t_h$	0,788	97,8	0,979	<b>4,75</b>
T11	$U_i = -6,912 + 1,418t_h$	0,668	92,7	0,950	<b>4,87</b>
T12	$U_i = -6,590 + 1,555t_h$	0,709	94,7	0,948	<b>4,24</b>
T13	$U_i = -6,431 + 1,720t_h$	0,551	90,1	0,914	<b>3,74</b>

Pristup sa dve nezavisne promenljive nije primenjivan pojedinačno po saobraćajnim trakama, jer je broj traka u konfliktnom toku jasno determinisan za svaku lokaciju istraživanja.

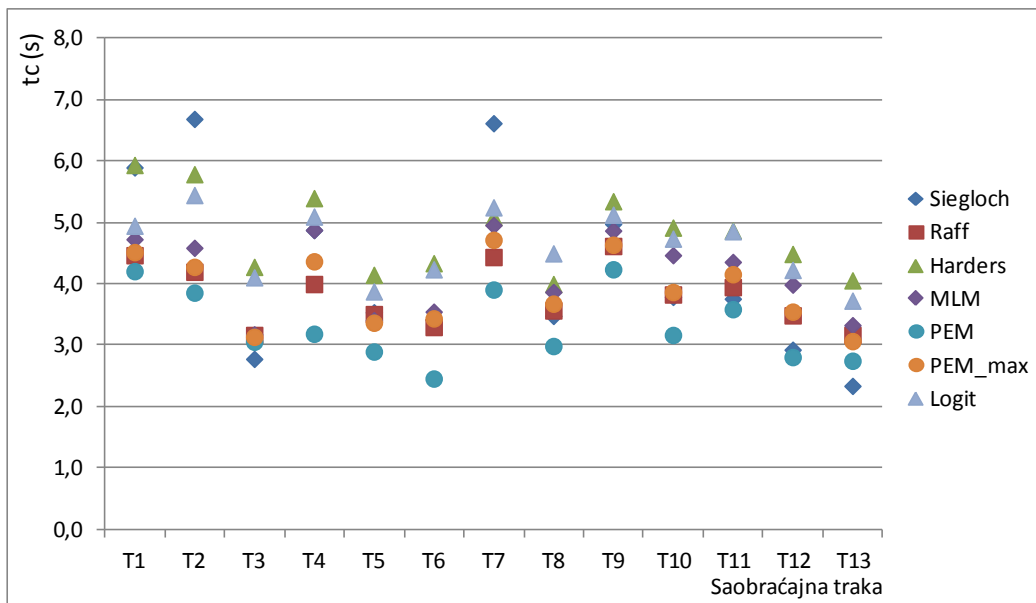
#### 4.2.7 Uporedna analiza rezultata modela za utvrđivanje $t_c$

Na dobijene vrednosti kritičnog prihvatljivog intervala sleđenja značajno utiče način posmatranja odbijenih intervala sleđenja. Dok je primenom Raff i PEM metode način posmatranja uzrokovao niže vrednosti u poređenju sa ostalim metodama, kod Harders i Logit metode je uticaj bio suprotan.

**Tabela 4-25. Poređenje vrednosti  $t_c$  dobijenih različitim metodama**

Set podataka	Samo prihvaćeni					
	Prihvaćeni i odbijeni					
Metoda	Siegloch	Raff	Harders	MLM	PEM	Logit
$t_c/tc\_all$ (s)	4,6	2,9	5,0		3,0	4,8
$t_{c\_max\_0}$ (s)		3,7		4,3	3,9	
$t_{c\_max}$ (s)		3,9				
$t_{c\_1kt}$ (s)	4,96	4,0	5,0	4,4	4,4	4,9
$t_{c\_2kt}$ (s)	3,92	3,7	5,0	4,1	3,7	4,7

S druge strane, Raff metoda daje najmanje vrednosti bez obzira na način posmatranja odbijenih intervala sleđenja, što je uzrokovano posmatranjem tačke ukrštanja raspodele prihvaćenih  $Pa$  i odbijenih  $1-Pr$  jer je ista na niskoj verovatnoći prihvatanja, značajno nižoj od 0,5 što je pretpostavka većine ostalih metoda. PEM\_max, MLM i Raff\_max metoda daju delimično slične vrednosti, što je posledica posmatranja samo maksimalnih odbijenih intervala sleđenja.



Slika 4-15. Poređenje vrednosti  $t_c$  po saobraćajnim trakama dobijenih različitim metodama

Kad se posmatraju rezultati primene pojedinačnih metoda za utvrđivanje  $t_c$ , po trakama, Siegloch metoda ima najveće standardno odstupanje (oko 1,45 s), što se oslikava i u odnosu na dobijene vrednosti u odnosu na broj traka u konfliktnom toku. Takođe, ista metoda daje maksimalne vrednosti po trakama (T2 i T7) a istovremeno i minimalne vrednosti za lokacije T3 i T13. Razlog ovome je što ova metoda direktno uzima u obzir broj opsluženih vozila u toku prihvaćenog intervala sleđenja, što značajno utiče na nagib krive na osnovu koje su vrednosti utvrđene. Harders i Logit metoda takođe daju nešto više vrednosti posmatrano po svim lokacijama u poređenju sa drugim metodama, sa standardnim odstupanjem 0,66 i 0,55 s, respektivno.

S druge strane, PEM metoda primenjena na svim odbijenim intervalima daje značajno niže vrednosti od drugih metoda i na gotovo svim lokacijama istraživanja. Ovi rezultati su posledica posmatranja raspodele svih odbijenih intervala sleđenja. Revidirana PEM metoda, primenjena samo na maksimalnim odbijenim intervalima sleđenja, daje generalno srednji rang vrednosti  $t_c$ , veoma bliske MLM metodi.

## 5. RAZVOJ MODELA ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG TOKA

Zasićeni saobraćajni tok nezaštićenog levog skretanja predstavlja maksimalan broj vozila koji bi mogao da prođe raskrslu ukoliko bi za isto bilo obezbeđeno trajanje zelenog signalnog pojma od sat vremena. Najznačajniji uticajni faktor na ovu hipotetičku veličinu, koju je nemoguće utvrditi direktno na terenu, je intenzitet konfliktnog toka.

U svrhu razvoja modela zasićenog saobraćajnog toka, na bazi sprovedenih istraživanja, za svaki snimljeni ciklus, na svim lokacijama istraživanja, utvrđene su naredne veličine:

- $N_{kt}$  - broj vozila u konfliktnom toku po ciklusu (voz/ciklusu);
- $N_l$  - broj vozila u levom skretanju po ciklusu (voz/ciklusu);
- $Z$  - dužina zelenog vremena (s);
- $C$  - dužina ciklusa (s).

Od ukupno 2.390 relevantnih ciklusa na celokupnom uzorku, njih 1.301 je na lokacijama sa jednom, dok je 1.089 na lokacijama sa dve trake u konfliktnom toku. Ovim je obezbeđen dovoljan uzorak za obe razmatrane situacije, što je omogućilo kreiranje različitih modela u odnosu na broj traka u konfliktnom toku.

Konfliktni tok realizovan u svakom ciklusu  $N_{kt}$  je ekspaniran na časovni nivo (voz/h) u odnosu na realnu dužinu ciklusa u periodu istraživanja. Na taj način je utvrđen merodavni konfliktni tok:

$$Q_o = N_{kt} \frac{3.600}{C} \quad (5-1)$$

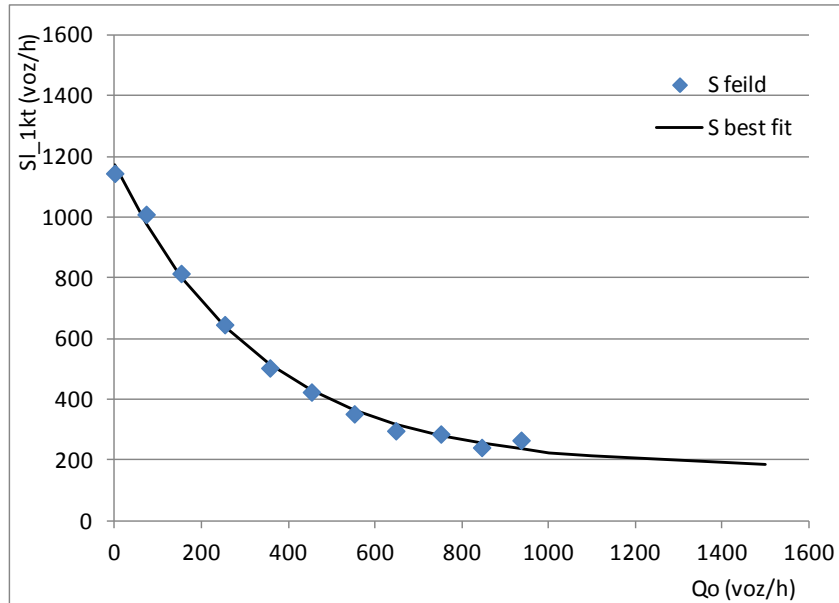
Zasićeni saobraćajni tok je utvrđen u odnosu na kapacitet levog skretanja po ciklusu, što je ekvivalentno broju vozila u levom skretanju imajući u vidu da su posmatrani samo ciklusi ili deo ciklusa u kojem je postojao konstantan saobraćajni zahtev vozila u levom skretanju. Na ovaj način, za svaki snimljeni ciklus dobijena je vrednost zasićenog saobraćajnog toka na bazi eksperimentalnih istraživanja:

$$S_l = N_l \frac{3.600}{C} \cdot \frac{C}{Z} = N_l \frac{3.600}{Z} \quad (5-2)$$

Za svaku klasu konfliktnog toka (u rasponu od 0 do 1.000 voz/h) utvrđena je prosečna vrednost zasićenog saobraćajnog toka, i to posebno za slučaj sa jednom, odnosno sa dve trake u konfliktnom toku. Za pronalaženje modela koji najbolje opisuje podatke dobijene terenskim istraživanjem korišćen je OriginLab softver namenjen statističkoj analizi podataka, fitovanju krivih, itd. Za pronalaženje parametara modela koji najbolje opisuju podatke (eng. best fit) softver koristi nelinearnu metodu najmanjih kvadrata zasnovanu na Levenberg - Marquardt-ov metodi koja je zasnovana na Gaus-Njutnovoj metodi (Gavin, 2019).

Na narednoj slici prikazani su podaci dobijeni na osnovu terenskih istraživanja za jednu saobraćajnu traku u konfliktnom toku. Kako se može primetiti, zasićeni saobraćajni tok eksponencijalno opada od maksimalne vrednosti od 1.200 voz/h ukoliko je konfliktni tok minimalnog intenziteta, na 200 voz/h u slučaju maksimalnog intenziteta konfliktnog toka. Vrednosti intenziteta konfliktnog toka veće od 1.000 voz/h nisu zabeležene tokom

istraživanja, imajući u vidu da se isti realizuje iz jedne trake. Nakon dostizanja minimalne vrednosti zasićeni saobraćajnog tok, zadržava približno konstantnu vrednost sa daljim povećanjem intenziteta konfliktnog toka. Drugim rečima, zasićeni saobraćajni tok nikada ne dostiže vrednost 0 voz/h, što je posledica realizacije opsluživanja vozila na početku zelenog kao tzv. džamperi ili u delu zaštitnog vremena kao tzv. snikersi.



**Slika 5-1. Model zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja sa 1 trakom u konfliktnom toku u zavisnosti od  $Q_o$**

Dobijeni model sa zasićenim saobraćajnim tokom kao zavisnom i intenzitetom konfliktnog toka kao jedinom nezavisnom promenljivom, koji najbolje opisuje date podatke za jednu traku u konfliktnom toku dat je narednom jednačinom, a rezultujuća zavisnost data je na prethodnoj slici (Slika 5-1) kao *S best fit*:

$$S_{l\_1kt} = 1.172 - 2,99 \left( \frac{e^{-0,003Q_o} - 1}{-0,003} \right) \quad (5-3)$$

Gde je,

$S_{l\_1kt}$  - zasićeni saobraćajni tok nezaštićenog levog skretanja sa jednom trakom u konfliktnom toku (voz/h),

$Q_o$  - intenzitet konfliktnog toka (voz/h).

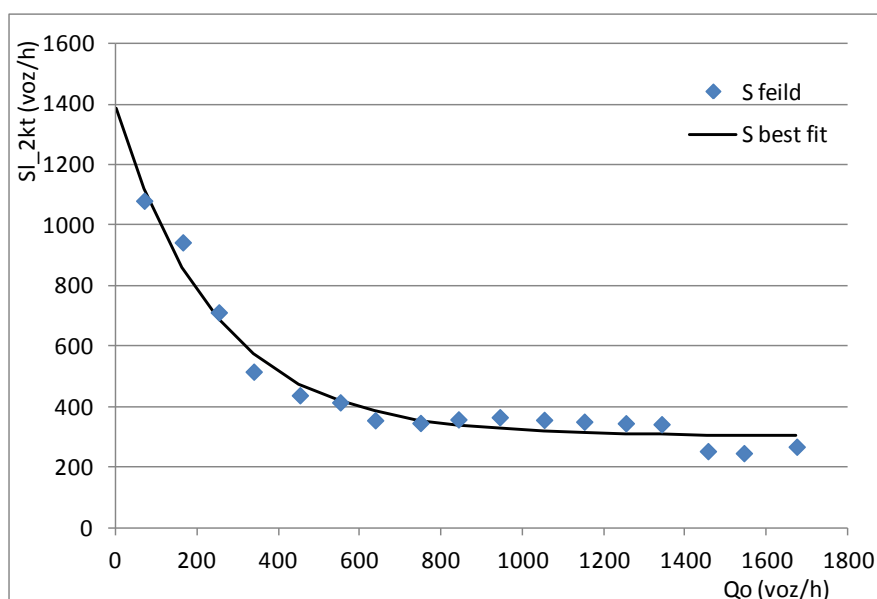
U narednoj tabeli prikazana je osnovna statistika formiranog modela. Sprovedeni t-test pokazuje da su svi koeficijenti statistički značajni i različiti od 0. Takođe, dobijen je vrlo visok koeficijent determinacije  $R^2$  od 0,996. Pošto je značajnost  $p < 0,0001$  modela manja od kritične ( $p = 0,05$ ) može se zaključiti da je funkcija značajno bolja u predikciji od alternative  $S = \text{const}$ .



**Tabela 5-1. Statistika dobijenog modela S u zavisnosti od  $Q_0$  za jednu traku u konfliktnom toku**

Koeficijent	Vrednost	Standardna greška	t-value	Prob> t	Zavisnost
A	1172,022	18,546	63,1947	0,0000	0,874
b	-2,996	0,192	-15,6204	0,0000	0,978
k	-0,003	0,000	-14,0042	0,0000	0,961

Prateći identičnu proceduru, formiran je drugi model zasićenog saobraćajnog toka za nezaštićeno levo skretanje, za slučaj dve trake u konfliktnom toku. Na narednoj slici (Slika 5-2) prikazani su podaci dobijeni terenskim istraživanjem na lokacijama sa dve saobraćajne trake u konfliktnom toku. Kako se može primetiti, zasićeni saobraćajni tok eksponencijalno opada od maksimalne vrednosti 1.150 voz/h za minimalan intenzitet konfliktnog toka od 70 voz/h. Za slučaj dve saobraćajne trake u toku istraživanja nisu zabeleženi ciklusi bez ijednog vozila u konfliktnom toku, tako da se početna tačka nalazi nešto niže nego u slučaju sa jednom trakom u konfliktnom toku (Slika 5-1). Zasićeni saobraćajni tok opada do vrednosti od oko 300 voz/h i daljim povećanjem intenziteta konfliktnog toka (do 1.700 voz/h) ostaje približno konstantan. Razlog održanja konstantne vrednosti identičan je kao i u prethodnom slučaju.


**Slika 5-2. Model zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja sa 2 trake u konfliktnom toku u zavisnosti od  $Q_0$** 

Rezultati fitovanja modela, odnosno traženja koeficijenata koji najbolje opisuju podatke dobijene istraživanjem dati su narednom jednačinom:

$$S_{l\_2kt} = 1.385 - 4,41 \left( \frac{e^{-0,004Q_0} - 1}{-0,004} \right) \quad (5-4)$$

Sprovedeni t-test pokazuje da su i u modelu za dve trake svi koeficijenti statistički značajni i različiti od 0. Takođe, dobijen je visok koeficijent determinacije  $R^2$  od 0,967. Pošto je značajnost  $p < 0,0001$  modela manja od kritične ( $p = 0,05$ ) može se zaključiti da je funkcija značajno bolja u predikciji od alternative  $S = \text{const}$ .

Tabela 5-2. Statistika dobijenog modela S u zavisnosti od  $Q_0$  za dve trake u konfliktnom toku

Koeficijent	Vrednost	Standardna greška	t-value	Prob> t	Zavisnost
A	1385,823	76,820	18,0397	0,0000	0,978
b	-4,407	0,726	-6,0655	0,0000	0,994
k	-0,004	0,000	-8,9519	0,0000	0,986

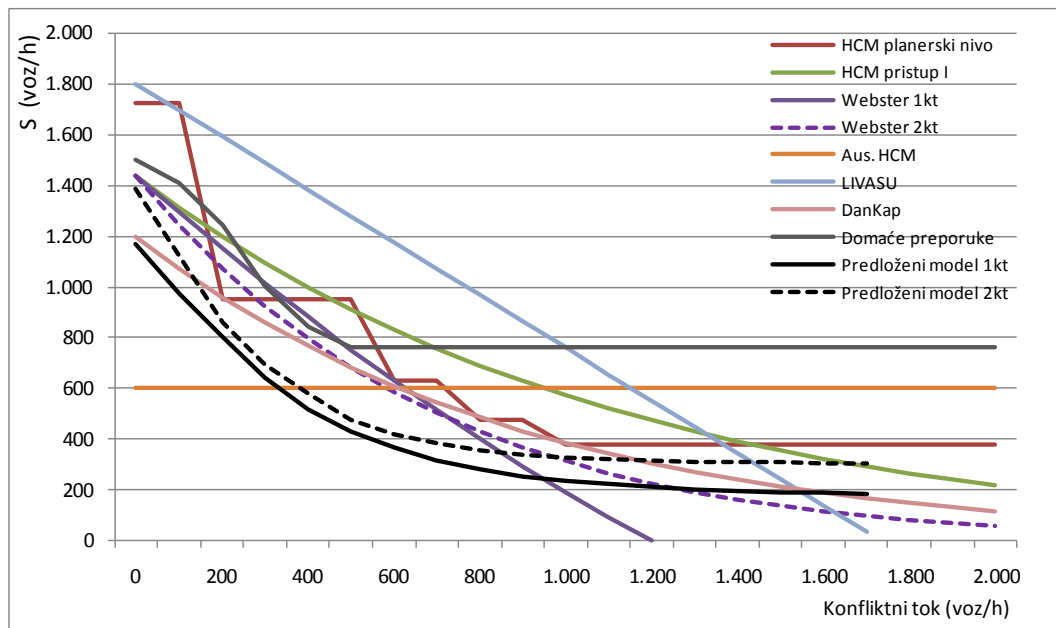
Formirani modeli obuhvataju i dodatne delove kapaciteta levog skretanja koji se odnose na opsluživanje pre početka opsluge konfliktnog toka i u zaštitnom vremenu. Drugim rečima, u formiranom, originalnom modelu svi elementi zasićenog saobraćajnog toka su obuhvaćen direktno i ne moraju se naknadno procenjivati.

## 5.1 POREĐENJE I VERIFIKACIJA MODELA ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG TOKA

U ovom delu prikazano je poređenje formiranih modela sa svim ostalim modelima zasićenog saobraćajnog toka za nezaštićeno levo skretanje, a za čiju primenu nije potrebno poznavanje parametara rada signala. Iz literature su izabrani oni modeli čija je primena moguća u proceduri optimizacije rada signala i nisu namenjeni naknadnoj proveri kapaciteta.

Slika 5-3 prikazuje poređenje dva predložena modela (za jednu i za dve trake u konfliktnom toku) sa ostalim modelima koji su dati u Poglavlju 2.2. HCM model je prikazan u dve varijante, na planerskom nivou (nivou bez poznavanja rada signala) i sa modelom koji je zasnovan na teoriji prihvatljivog intervala sleđenja. Takođe, i DanKap model je zasnovan na modelu prihvatljivog intervala sleđenja, ali koristi različite vrednosti parametara u odnosi na HCM. Webster-ov model je jedini koji daje različite zavisnosti u odnosu na broj traka u konfliktnom toku, pri čemu u slučaju jedne trake u konfliktnom toku daje gotovo linearnu zavisnost. Linearnu zavisnost daje i LIVASU model, dok australijski HCM na planerskom nivou daje jednu konstantnu vrednost kao ulaznu veličinu u proceduru optimizacije.

Imajući u vidu da predloženi modeli vrlo dobro opisuju realne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka realizovane na terenu ( $R^2$  od 0,996 i 0,967, za jednu u dve trake u konfliktnom toku, respektivno), može se zaključiti da modeli iz literature značajno odstupaju od predloženih, odnosno od realnih podataka. Najpribližnije rezultate onima koji su utvrđeni istraživanjem daje danski DanKap model, što odgovara i prethodnim istraživanjima sprovedenim u lokalnim uslovima na ograničenom setu podataka (Kocić, Stanković, & Čelar, 2018), kao i Webster model za dve trake u konfliktnom toku.



Slika 5-3. Poređenje modela zasićenog saobraćajnog toka zasnovanih na intenzitetu konfliktnog toka

Kako je većina modela iz literature zasnovana na modelu prihvatljivog intervala sleđenja, isti je izabran za kalibraciju na bazi dobijenih rezultata istraživanja (Poglavlje 4.1 i 4.2). Kalibracija je sprovedena na osnovu rezultata istraživanja intervala sleđenja vozila u levom skretanju kao i prihvatljivog intervala sleđenja dobijenih različitim metodama. U prvom koraku izvršen je odabir vrednosti intervala sleđenja vozila u levom skretanju. Obzirom da po ovom modelu, vrednost  $t_{fh}$  definiše maksimalnu vrednost zasićenog saobraćajnog toka, kada je intenzitet konfliktnog toka jednak 0, ista je izabrana na bazi rezultata istraživanja na način da daje najpribližniji početak krive zavisnosti  $S_l$  od  $Q_o$ . Odabrane vrednosti za  $t_{fh}$  u slučaju sa jednom i dve konfliktne trake koji daje najmanje odstupanje od realnih podataka su 3,0 s i 2,6 s, respektivno. Ove vrednosti delimično su veće od onih dobijenih istraživanjem, i oslikavaju suprotan uticaj broja traka u konfliktnom toku na interval sleđenja, iako se isti pokazao zanemariv i na bazi rezultata istraživanja.

Dobijene vrednosti  $t_{fh}$  iz istraživanja se vrlo malo razlikuju u odnosu broj traka u konfliktnom toku, ali je njihova razlika veća u smislu načina posmatranja merodavnih intervala sleđenja (ceo tok ili bez vozila koja ostvaruju gubitke na startu). Obzirom da su podaci pokazali da je maksimalna vrednost zasićenog saobraćajnog toka na generalno nižem nivou (1.200-1.400 voz/h u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku), opravdano je posmatranje celokupnog toka koji obuhvata i ona vozila koja imaju gubitke na startu. Opravdanje za ovakav pristup leži u činjenici da velika većina opsluženih vozila u levom skretanju ostvaruje gubitke na startu jer su reke situacije da se u okviru istog prihvatljivog intervala sleđenja opsluži više od 3-5 vozila. Na taj način, izbegava se precenjivanje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka.

Kalibracija modela prihvatljivog intervala sleđenja sprovedena je uz fiksnu vrednost  $t_{fh}$ , za raspon vrednosti  $t_c$  koji je dobijen primenom različitih metoda, od 3s (Raff metoda) do 5 s (Harders i Logit metoda), sa koracima od po 0,5 s. Za ocenu kvaliteta modela, uz odgovarajuću kombinaciju parametara, korišćen je koren srednje kvadratne greške RMSE i srednja apsolutna greška u procentima MAPE utvrđeni na osnovu narednog izraza:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (y_{i,pred} - y_{i,obs})^2}{N}} \quad (5-5)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{N} \sum_i \left( \frac{y_{i,pred} - y_{i,obs}}{y_{i,obs}} \right) \quad (5-6)$$

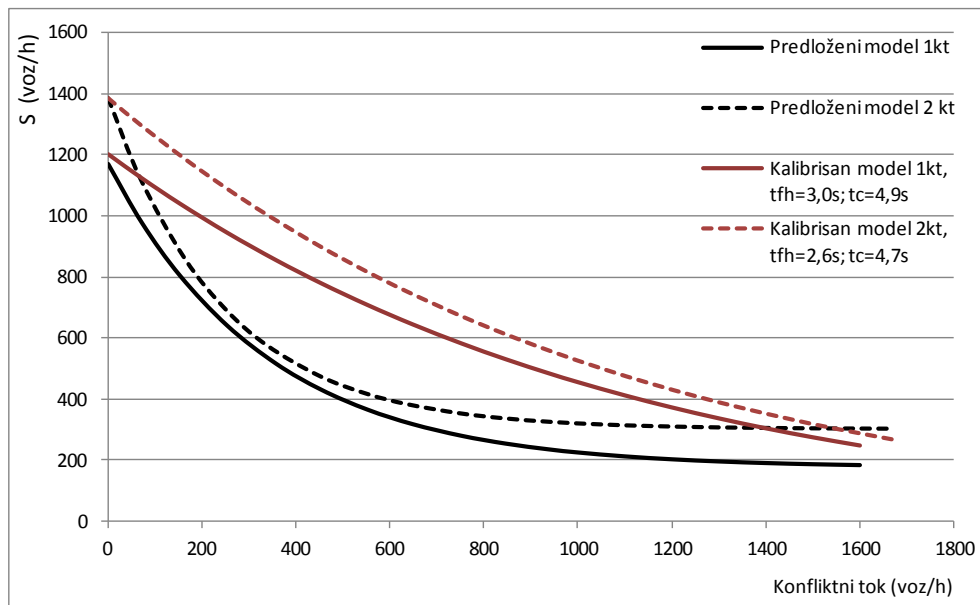
Gde je  $y_{i,pred}$  vrednost zasićenog saobraćajnog toka dobijena modelom, a  $y_{i,obs}$  vrednost dobijena istraživanjima, za svaku kategoriju konfliktnog toka  $i$ .  $N$  predstavlja ukupan broj kategorija konfliktnog toka čije su vrednosti utvrđene na terenu. Vrednost RMSE i MAPE je utvrđena za svaku kombinaciju parametara modela koji se kalibriše, ali je istovremeno utvrđen i za formirane modele kako bi se kalibrisani model mogao uporediti sa predloženim modelom. Rezultujuće vrednosti RMSE i MAPE su prikazane u narednoj tabeli. Na ovaj način ujedno je sprovedena verifikacija razvijenih modela zasićenog saobraćajnog toka. Vrednosti RMSE i MAPE su u tabeli za razvijene modele prikazane nezavisno od vrednosti  $t_c$  jer ista nije uticajni parametar u predloženom modelu.

**Tabela 5-3. RMSE i MAPE za bazni model zasićenog saobraćajnog toka i predložene modele**

Pokazatelj	Model	$t_c$ (s)				
		3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
RMSE	Bazni model 1 kt	484,2	422,8	367,2	316,8	271,1
	Bazni model 2 kt	545,5	470,3	408,2	357,2	315,9
	Predloženi model 1 kt			18,6		
	Predloženi model 2 kt			112,6		
MAPE (%)	Bazni model 1 kt	125	108	93	79	66
	Bazni model 2 kt	137	112	91	73	57
	Predloženi model 1 kt			4		
	Predloženi model 2 kt			17		

Tabela prikazuje da za fiksnu optimalnu vrednost  $t_{fn}$ , bolje rezultate daju bazni modeli sa većim vrednostima  $t_c$ . Međutim, obe greške pokazuju da kalibracija baznog modela ne može dovoljno da doprinese kvalitetu modela, kao i da predloženi model daje mnogo bolje rezultate u predikciji vrednosti zasićenog saobraćajnog toka. U tom smislu, usvojene su vrednosti  $t_c$  dobijene po razvijenom Logit modelu (Poglavlje 4.2.6) u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku koje su maksimalne od svih primenjenih metoda, a rezultujuće zavisnosti su prikazane na narednom dijagramu.

Može se zaključiti da kalibracija baznog modela zasićenog saobraćajnog toka ne može dovoljno da doprinese kvalitetu predikcije zasićenog saobraćajnog toka u zavisnosti od intenziteta konfliktnog toka. Razlog ovome jeste zasnovanost modela na teoriji prihvatljivog intervala sleđenja razvijenoj za nesemaforisane i kružne raskrsnice, koja ne može biti primenjena direktno na semaforisanim raskrsnicama.



**Slika 5-4. Poređenje predloženog modela i kalibrisanog baznog modela u odnosu na broj traka u konfliktnom toku**

Razlog nezadovoljavajućeg stepena predikcije zasićenog saobraćajnog toka od strane baznog modela leži u činjenici da konfliktni tok na nesemaforisanim i semaforisanim raskrsnicama nema isti uticaj na levo skretanje, jer vozila u na nesignalisanim raskrsnicama na raspolaganju imaju ceo period vremena za opsluživanje, što nije slučaj na semaforisanim raskrsnicama. Ilustracija navedenog može se sagledati na narednom primeru:

- Konfliktni tok iznosi 10 vozila/ciklusu, dok ciklus traje 60 s. Časovni intenzitet konfliktnog toka  $Q_o = 10 \cdot 3.600 / 60 = 600$  voz/h. Međutim, na semaforisanim raskrsnicama, maksimalan broj vozila koji može da prođe raskrsnicu u levom skretanju, odnosno  $S_l$  može se značajno razlikovati u zavisnosti od dužine zelenog vremena. Ukoliko je zeleno vreme npr.  $Z = 20$  s, zeleno koje preostaje za levo skretanje je minimalno i obuhvata samo deo koji se odnosi na džampere i iskorišćenje zaštitnog vremena; U navedenom slučaju, realno se može opslužiti 2 voz/ciklusu, odnosno očekivani  $S_l = 2 \cdot 3.600 / 20 = 360$  voz/h. S druge strane, ukoliko je zeleno vreme npr.  $Z = 40$  s, levom skretanju bi ostalo na raspolaganju 20 s pa bi moglo realno da prođe npr. još 8 vozila/ciklusu odnosno očekivani  $S_l = 10 \cdot 3.600 / 40 = 900$  voz/h.

Na bazi ilustrativnog primera jasno je naglašeno da zasićeni saobraćajni tok zavisi od parametara rada signala, ali takođe, i da parametri rada signala nisu poznati pre procesa optimizacija rada signala, niti se isti može započeti bez definisanja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka. Iz ovog razloga, formirani modeli koji ne uključuju rad signala mogu se tumačiti kao modeli zasićenog saobraćajnog toka za preovlađujuće vrednosti parametara rada signala. Formirani modeli mogu predstavljati dobru alternativu ostalima modelima koji ne koriste parametre rada signala, a za koje je utvrđeno da precenjuju vrednost zasićenog saobraćajnog toka jer posmatraju opsluživanje levog skretanje kao da se radi o nesignalisanoj raskrsnici.

Sagledavajući ove nedostatke, u nastavku je razvijen alternativni način modeliranja zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja na semaforisanim raskrsnicama.

## 5.2 ALTERNATIVNI PRISTUP MODELIRANJU ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG TOKA

Alternativnim pristupom modeliranju zasićenog saobraćajnog toka, izvršeno je ponderisanje konfliktnog toka kako bi se oslikale razlike u vremenu koje ostaje na raspolaganju za opsluživanje vozilima u levom skretanju. Drugim rečima, intenzitet konfliktnog toka sa kojim se suočavaju vozila u levom skretanju je ekspanđiran na časovni nivo (voz/h) na drugačiji način. Umesto ekspanđiranja u odnosu na dužinu ciklusa (nezavisno od dužine zelenog vremena) konfliktni tok je ekspanđiran u odnosu na dužinu zelenog vremena. Na ovaj način dobijen je ekspanđirani konfliktni tok dat narednom jednačinom:

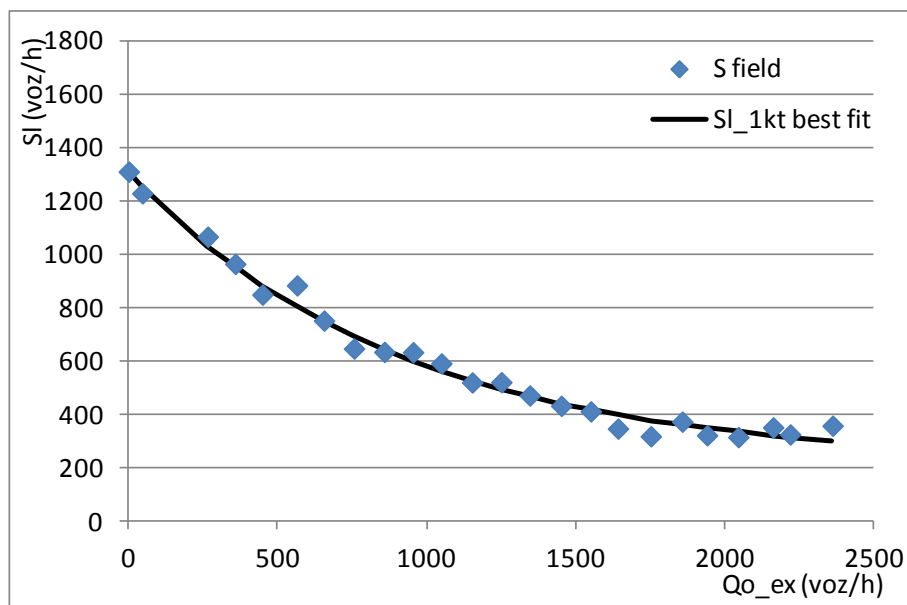
$$Q_{o,ex} = N_{kt} \frac{3.600}{Z} = \frac{Q_o}{\lambda} \quad (5-7)$$

Ovako utvrđena vrednost konfliktnog toka ne predstavlja realno realizovani protok konfliktnog toka  $Q_o$ , već protok tokom zelenog vremena ekspanđiran na časovni nivo, uz hipotetičku pretpostavku konstantnog ponavljanja zelenog tokom sata, što je osnovna teorijska postavka zasićenog saobraćajnog tok.

Zasićeni saobraćajni tok je utvrđen na isti način kao i kod osnovnog modela, u odnosu na kapacitet levog skretanja po ciklusu. Za svaki snimljeni ciklus dobijena je vrednost zasićenog saobraćajnog toka na osnovu eksperimentalnih istraživanja koja je data jednačinom (5-2).

Za svaku klasu ekspanđiranog konfliktnog toka  $Q_{o,ex}$  (od 0 do 2.400 voz/h) utvrđena je prosečna vrednost zasićenog saobraćajnog toka, posebno za slučaj jedne i dve trake u konfliktnom toku. Za pronalaženje modela koji najbolje opisuje ovako dobijene podatke korišćen je, kao i prethodnom slučaju, OriginLab softver.

Na narednom dijagramu prikazani su podaci dobijeni za jednu saobraćajnu traku u konfliktnom toku. Kako se može primetiti, zasićeni saobraćajni tok eksponencijalno opada, od maksimalne vrednosti 1.300 voz/h, ukoliko je u ekspanđiranom konfliktnom toku minimalan broj vozila, do oko 300 voz/h u slučaju maksimalne vrednosti ekspanđiranog konfliktnog toka. Nakon vrednosti ekspanđiranog konfliktnog toka od 1.600-1.700 voz/h, zasićeni saobraćajni tok zadržava približno konstantnu vrednost. Navedeni fenomen je već objašnjen postojanjem vozila u levom skretanju koja će se opsluživati u zaštitnom vremenu ili pre konfliktnog toka kao džamperi. Vrednost ekspanđiranog konfliktnog toka u kome zasićeni saobraćajni tok levog skretanja dostiže minimalnu vrednost predstavlja ujedno vrednost zasićenog saobraćajnog toka konfliktnog toka. U situaciji kada je ekspanđirani protok konfliktnog toka približno jednak njegovoj vrednosti zasićenog saobraćajnog toka, celokupno zeleno vreme se koristi za opsluživanje konfliktnog toka, dok levo skretanje može da realizuje minimalnu vrednost zasićenog saobraćajnog toka.



**Slika 5-5. Model zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja sa 1 trakom u konfliktnom toku u zavisnosti od  $Q_{o,ex}$**

Formirani model sa zasićenim saobraćajnim tokom kao zavisnom i ekspanziranom konfliktnim tokom kao jedinom nezavisnom promenljivom, koji najbolje opisuju date podatke, za jednu traku u konfliktnom toku, dat je narednom jednačinom. Rezultujuća zavisnost prikazana je na prethodnom dijagramu (Slika 5-5).

$$S_{l\_1kt} = 1087,26 \cdot e^{-0,00111 \cdot Q_{o,ex}} + 222,75 \quad (5-8)$$

Gde je,

$S_{l\_1kt}$  - zasićeni saobraćajni tok nezaštićenog levog skretanja sa jednom trakom u konfliktnom toku (voz/h),

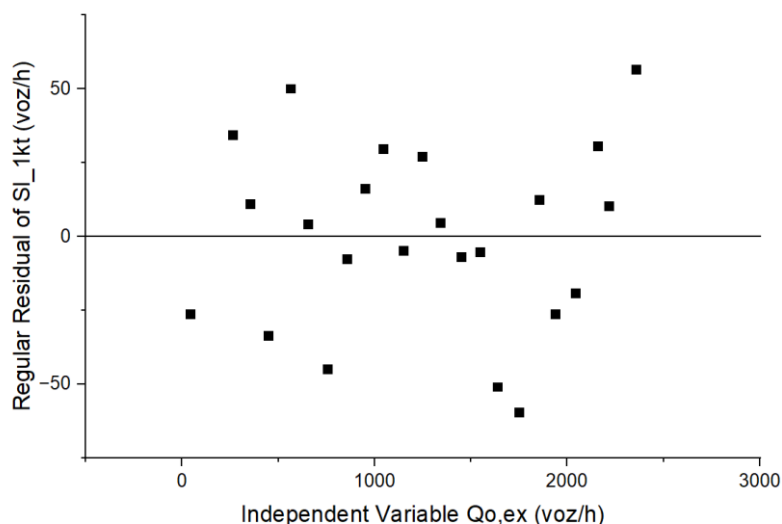
$Q_{o,ex}$  - ekspanzirana vrednost konfliktnog toka (voz/h).

U narednoj tabeli prikazana je osnovna statistika formiranog modela, odnosno utvrđene eksponencijalne zavisnosti. Sprovedeni t-test pokazuje da su svi koeficijenti statistički značajni i različiti od 0. Imajući u vidu da je koeficijent determinacije, koji ukazuje na kvalitet pretpostavljene funkcionalne zavisnosti,  $R^2 = 0,986$ , može se zaključiti da se eksponencijalna kriva može uspešno koristiti za aproksimaciju zavisnosti promenljivih. Do istog zaključka se dolazi i analizom varijanse (ANOVA). Pošto je vrednost F statistike 706,395 a odgovarajuća  $p$  vrednost manja od 0,0001, eksponencijalna veza između zasićenog saobraćajnog toka i ekspanziranog konfliktnog toka je statistički značajna.

Takođe, grafičari prikaz odstupanja (Residual) u odnosu na ekspanzirani konfliktni tok ukazuje da pretpostavljeni regresioni model adekvatno prikazuje vezu između zavisne i nezavisne promenljive.

Tabela 5-4. Statistika dobijenog modela S za jednu traku u konfliktnom toku u zavisnosti od  $Q_{0,ex}$

Koeficijent	Vrednost	Standardna greška	t-value	Prob> t	Zavisnost
y0	222,75	30,786	7,2356	0,0000	0,951
A	1087,26	29,558	36,7839	0,0000	0,672
R0	-0,00111	0,000	-11,7539	0,0000	0,938

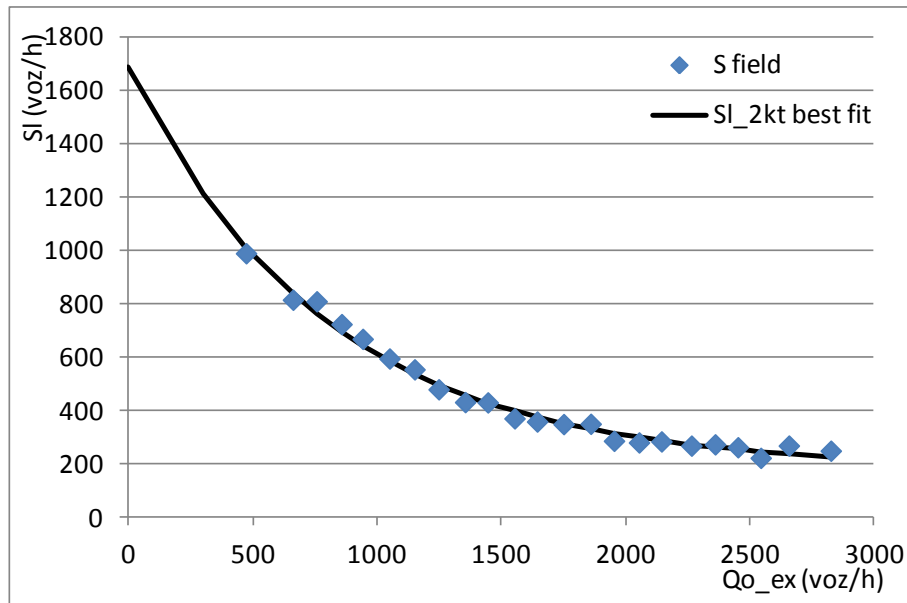


Slika 5-6. Odstupanja (residual) u odnosu na ekspanzirani konfliktni tok

Na narednoj slici (Slika 5-7) prikazani su podaci dobijeni za dve saobraćajne trake u konfliktnom toku. Sa dijagrama se može uočiti da je minimalna vrednost ekspaniranog konfliktnog toka u istraživanjima iznosila oko 400 voz/h, pa je posledično maksimalna vrednost zasićenog saobraćajnog toka oko 1.000 voz/h. Povećanjem ekspaniranog konfliktnog toka zasićeni saobraćajni tok opada do vrednosti oko 250 voz/h i dalje zadržava konstantnu vrednost, čak i pri maksimalnoj vrednosti ekspaniranog konfliktnog toka od 2.900 voz/h. Razlog održanja konstantne vrednosti je identičan kao i u prethodnom slučaju. Dostignuta konstantna vrednost zasićenog saobraćajnog toka je nešto niža u odnosu na slučaj sa jednom trakom u konfliktnom toku, što ukazuje na manju spremnost vozača da koriste vreme pre početka opsluge konfliktnog toka ukoliko se suočavaju sa više traka u konfliktnom toku. Navedeno predstavlja posledicu veće konfliktne površine koja se ostvaruje između predmetnih tokova.

U svrhu potvrde prethodne konstatacije izvršena je analiza uticaja broja traka u konfliktnom toku na ponašanje vozača u levom skretanju na početku zelenog signalnog pojma. Za svaku lokaciju istraživanja utvrđen je udeo ciklusa u kojima su vozila u levom skretanju realizovala opslugu i pre pokretanja konfliktnog toka. Na osnovu dobijenih rezultata potvrđeno je da do ovakvih realizacija dolazi u 25% ciklusa u slučaju jedne, nasuprot 12% ciklusa u slučaju dve trake u konfliktnom toku.





Slika 5-7. Model zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja sa 2 trake u konfliktnom toku u zavisnosti od  $Q_{o,ex}$

Rezultati fitovanja modela, odnosno traženja koeficijenata koji najbolje opisuju podatke dobijene istraživanjem dati su narednom jednačinom:

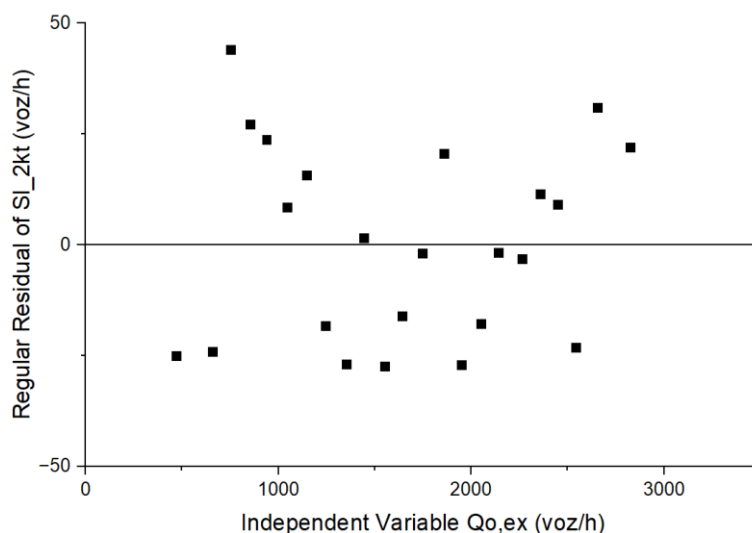
$$S_{l\_2kt} = 1502,49 \cdot e^{-0,00126 \cdot Q_{o,ex}} + 184,8 \quad (5-9)$$

Sprovedeni t-test pokazuje da su svi koeficijenti u modelu za dve trake u konfliktnom toku statistički značajni i različiti od 0. Budući da je koeficijent determinacije  $R^2 = 0,990$ , može se zaključiti da se eksponencijalna kriva može uspešno koristiti za aproksimaciju zavisnosti promenljivih. Do istog zaključka se dolazi i analizom varijanse (ANOVA). Vrednost F statistike je 990,035 a odgovarajuća  $p$  vrednost manja od 0,0001, što potvrđuje da je eksponencijalna veza između zasićenog saobraćajnog toka i ekspaniranog konfliktnog toka statistički značajna.

Tabela 5-5. Statistika dobijenog modela S za dve trake u konfliktnom toku u zavisnosti od  $Q_{o,ex}$

Koeficijent	Vrednost	Standardna greška	t-value	Prob> t	Zavisnost
y0	184,80	17,803	10,3804	0,0000	0,928
A	1502,49	62,811	23,9207	0,0000	0,886
R0	-0,00126	0,000	-14,9742	0,0000	0,968

Takođe, grafički prikaz odstupanja (Residual) u odnosu na ekspanirani konfliktni tok ukazuje da pretpostavljeni regresioni model adekvatno prikazuje vezu zasićenog saobraćajnog toka i ekspaniranog konfliktnog toka.



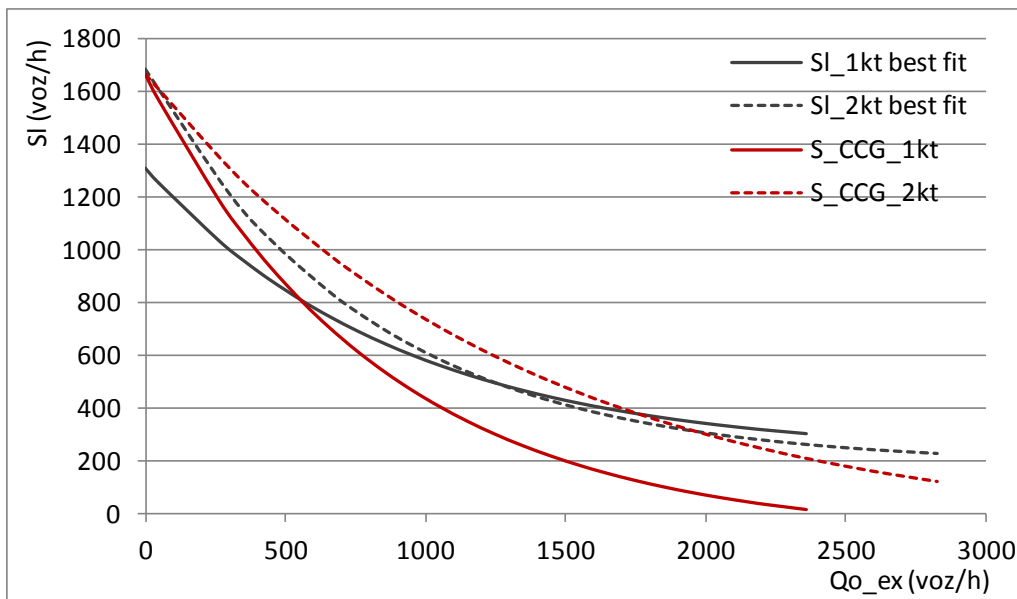
**Slika 5-8. Odstupanja (residual) u odnosu na ekspanzirani konfliktni tok**

Za verifikaciju kvaliteta alternativnog modela korišćen je koren srednje kvadratne greške RMSE i srednja apsolutna greška u procentima MAPE. Pored verifikacije alternativnog pristupa modeliranju zasićenog saobraćajnog toka izvršeno je poređenje predloženog modela sa jedinim modelom u literaturi (CCG model), koji faktor uticaja konfliktnog toka na vozila u levom skretanju definiše na bazi ekspaniranog konfliktnog toka. Dobijeni rezultati su prikazani u narednoj tabeli, dok je prikaz zavisnosti zasićenog saobraćajnog toka od ekspaniranog konfliktnog toka dat na narednoj slici.

**Tabela 5-6. RMSE i MAPE za predložene i CCG modele**

Model	RMSE	MAPE (%)
CCG model 1 kt	217,53	42,3
CCG model 2 kt	91,31	18,9
Predloženi model 1 kt	33,07	5,3
Predloženi model 2 kt	21,45	4,6

Rezultati pokazuju da predloženi modeli mnogo bolje odgovaraju realnim podacima prikupljenim u terenskim istraživanjima, naročito u slučaju jedne trake u konfliktnom toku. Kanadski CCG za jednu traku u konfliktnom toku značajno precenjuje vrednost zasićenog saobraćajnog toka za minimalne vrednosti konfliktnog toka. Suprotno, povećanjem intenziteta konfliktnog toka CCG model potcenjuje vrednost  $S_i$ , dostižući nivo nultog zasićenog saobraćajnog toka, na šta ukazuje i velika vrednost MAPE od 42,3%. U slučaju dve trake u konfliktnom toku, oba modela imaju zadovoljavajući nivo MAPE, pri čemu je formirani model značajno bolji, sa srednjom relativnom apsolutnom greškom od samo 4,6%.



Slika 5-9. Poređenje predloženih i CCG modela

Poređenjem formiranih alternativnih modela može se uočiti da isti broj vozila u konfliktnom toku neće imati isti uticaj ukoliko se realizuje iz jedne ili dve saobraćajne trake. Interesantno je da je ovaj uticaj najizraženiji kod minimalnih vrednosti intenziteta konfliktnog toka. Ukoliko se razmotre rezultati istraživanja prihvatljivog intervala sleđenja, po svim metodama su dobijene manje vrednosti prihvatljivog intervala sleđenja za leva skretanja sa dve trake u konfliktnom toku. Logično je zaključiti da će manji prihvatljiv interval sleđenja imati najveći uticaj na  $S_l$  u rasponu vrednost konfliktnog toka u kome su takvi intervali sleđenja realno i dostupni, odnosno u zoni manjih intenziteta konfliktnog toka. Povećanjem intenziteta konfliktnog toka prihvatljivi intervali sleđenja su sve ređi, čime se smanjuje uticaj broja traka u konfliktnom toku. U zoni maksimalnih intenziteta konfliktnog toka dolazi do inverznog uticaja, koji je posledica ponašanja vozača na početku procesa opsluge.

## 6. METODOLOŠKI OKVIR ZA DONOŠENJE ODLUKE O TRETMANU LEVOG SKRETANJA

Tretman levog skretanja u okviru plana faza ima značajan uticaj na efikasnost rada svetlosnih signala. S jedne strane, zaštićeno levo skretanje doprinosi bezbednijem i efikasnijem opsluživanju vozila u levom skretanju, dok s druge strane dovodi do povećanja vremenskih gubitaka ostalih tokova na raskrsnici, odnosno smanjuje njihovu efikasnost.

Za donošenje odluke o primeni zaštićenog levog skretanja u literaturi se koriste različiti kriterijumi koji se mogu grupisati u naredne kategorije:

- Kriterijumi intenziteta saobraćajnih tokova,
- Kriterijumi geometrije raskrsnice,
- Kriterijumi efikasnosti raskrsnice,
- Kriterijumi bezbednosti,
- Ostali kriterijumi.

Kriterijumi intenziteta saobraćajnih tokova uglavnom su definisani jedinstvenom graničnom vrednosti proizvoda intenziteta toka u levom skretanju i konfliktnog toka. U literaturi su prisutne različite preporučene vrednosti. Agent i Deen (1979) u svom radu preporučuju graničnu vrednost  $Q_l * Q_o$  od 50.000 i 100.000 voz<sup>2</sup>/h u slučaju jedne i dve trake u konfliktnom toku, respektivno (Agent & Deen, 1979). MTSD preporučuje iste vrednosti (ITE, 1991), dok MUTCD za dve trake u konfliktnom toku preporučuje graničnu vrednost od 90.000 (FHWA, 2009).

S druge strane, Lin i Machemehl (1983) daju različite granične vrednosti u zavisnosti od udela zelenog u ciklusu, faktora konverzije konfliktnog toka u tok levog skretanja i faktora iskorišćenja zelenog (Lin & Machemehl, 1983). Takođe, Roupail (1986) je granične vrednosti intenziteta predmetnih tokova definisao na bazi pretpostavke o jednakim vrednostima stepena zasićenja toka levo i konfliktnog toka. Autor je sugerisao da je zaštićeno levo skretanje neophodno primeniti u svim situacijama kada je  $X_l > X_o$  (Roupail, 1986). Delimični nedostatak ovako definisanih graničnih vrednosti predstavlja činjenica da je za njihovu primenu neophodno detaljno poznavanje parametara rada signala.

Kriterijumi geometrije raskrsnice najčešće podrazumevaju granične vrednosti preglednosti u levom skretanju uzavisnosti od brzine i broja traka u konfliktnom toku (AASHTO, 2001; Upchurch, 1986). U ovu grupu spada i kriterijum broja traka u konfliktnom toku ( $\geq 3$  trake), kao i broj traka u levom skretanju ( $\geq 2$  trake), koji se primenjuju u različitim pravilnicima i preporučeni su od strane brojnih autora (Agent & Deen, 1979; FHWA, 2009; ITE, 1991). Ređe se u okviru ove grupe, kao kriterijum, primenjuje i dužina trake za levo (Lalani et al., 1986).

Kriterijumi efikasnosti raskrsnice odnose se prevashodno na vremenske gubitke vozila u levom skretanju, bilo da se radi o ukupnim vremenskim gubicima,  $D \geq 2$  h, ili prosečnim,  $d \geq 35$  s/voz (Agent & Deen, 1979; FHWA, 2009; Lalani et al., 1986).

Kriterijumi bezbednosti definisani su graničnim vrednostima broja saobraćajnih nezgoda vozila u levom skretanju,  $SN$ . Agent i Deen (1979) su predložili granične vrednosti  $SN$  u zavisnosti od vremenskog perioda eksploatacije raskrsnice, i to 4, 6 i 8 saobraćajnih nezgoda u periodu od 1, 2 i 3 godine, respektivno (Agent & Deen, 1979). Predloženi način definisanja

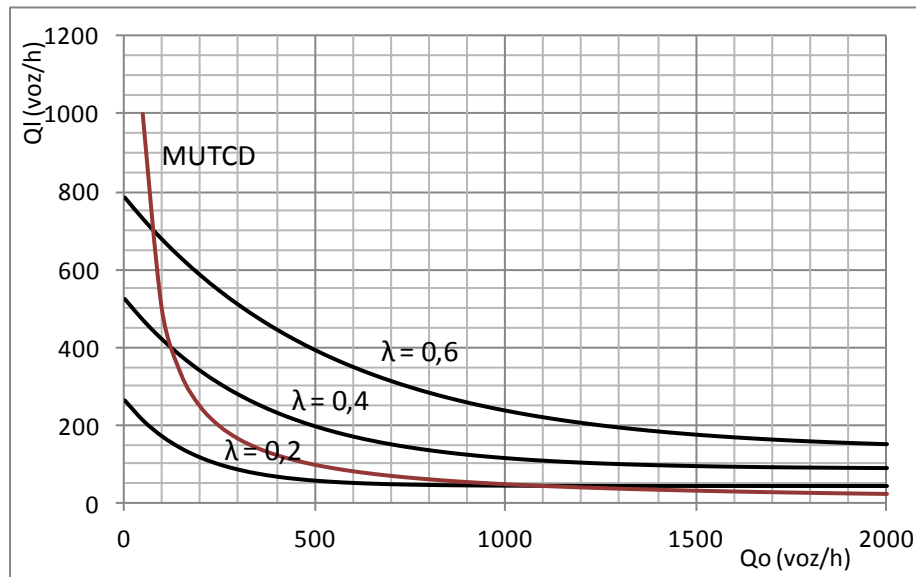
graničnih vrednosti primenjen je u američkom pravilniku MUTCD, sa revidovanim vrednostima  $SN$  uvodeći i zavisnost istih od broja traka u konfliktnom toku (FHWA, 2009).

Dodatno, različiti autori su predlagali i kriterijume poput broja vozila u levom skretanju nezavisno od intenziteta konfliktnog toka. Raspon ovih graničnih vrednosti se u literaturi kreće od  $Q_l \geq 50$  voz/h, odnosno  $\geq 2$  voz/ciklusu (Agent & Deen, 1979; ITE, 1991; Lalani et al., 1986; Upchurch, 1986) do  $Q_o > 320$  voz/h (Asante, Ardekani, & Williams, 1993). Takođe, kao jedan od kriterijuma često se koristi i intenzitet konfliktnog toka, nezavisno od broja vozila u levom skretanju, i to  $Q_o > 1.100$  voz/h (Asante et al., 1993), odnosno  $Q_o > 1.000$  voz/h (Agent, 1981). Kao dodatni kriterijumi često se koristi i granična vrednost brzine u konfliktnom toku  $\geq 70$  km/h (Agent, 1981; FHWA, 2009; ITE, 1991; Upchurch, 1986), kao i procenat teretnih vozila, intenzitet konfliktnog pešačkog toka i zahtevi hijerarhijski višeg nivoa upravljanja (FHWA, 2009; Lalani et al., 1986).

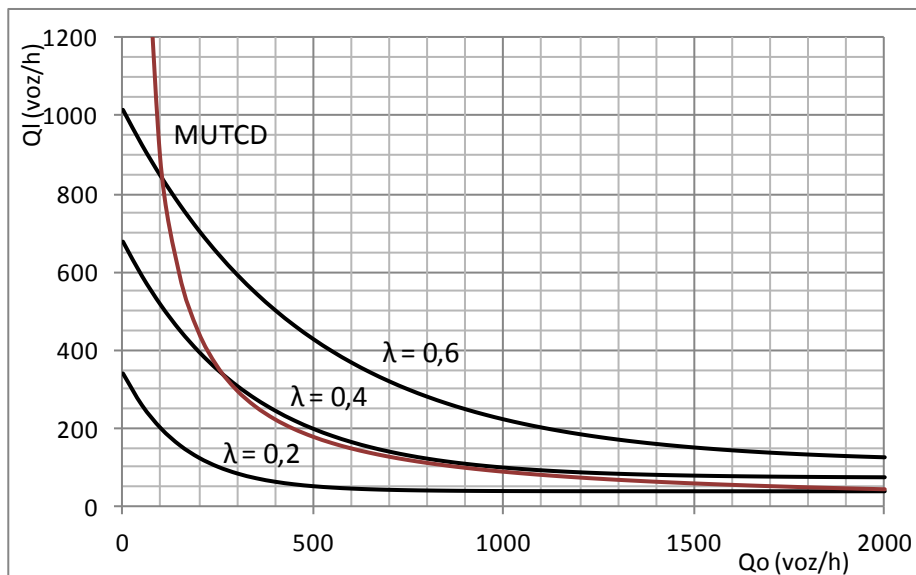
Imajući u vidu navedene kriterijume za tretman levog skretanja kao zaštićenog, jasno je da se pri donošenju odluke moraju sagledati svi aspekti funkcionisanja semaforisane raskrsnice, od njene geometrije, preko intenziteta svih uticajnih tokova, pešačkih i vozačkih, do samih pokazatelja efikasnosti i bezbednosti saobraćaja. Međutim, ukoliko se na raskrsnici pretpostave standardni uslovi geometrije, efikasnost i bezbednost saobraćajnog procesa posledica su odnosa intenziteta konfliktnih tokova. Stoga je kriterijum intenziteta saobraćajnih tokova ključan za donošenje odluke o tretmanu levog skretanja u okviru plana faza.

Na bazi razvijenog alternativnog modela zasićenog saobraćajnog toka, predložene su granične vrednosti saobraćajnih zahteva konfliktnog toka i toka u levom skretanju za uvođenje zaštićenog ili delimično zaštićenog levog skretanja. Granične vrednosti su date u zavisnosti od broja traka u konfliktnom toku za različit udeo zelenog u ciklusu  $\lambda$  (0,20; 0,40 i 0,60). Granične vrednosti intenziteta toka u levom skretanju  $Q_l$  u zavisnosti od intenziteta konfliktnog toka  $Q_o$ , utvrđene su na bazi kapaciteta predmetnog levog skretanja pri odgovarajućem  $\lambda$ . Drugim rečima, definisane granične vrednosti predstavljaju kapacitet levog skretanja, odnosno situaciju u kojoj je stepen zasićenja  $X = 1$ . Na ovaj način definisana granična vrednost primenjena je zbog lakše interpretacije samih preporuka, i predstavlja situaciju u kojoj će predmetno levo skretanje funkcionisati na granici kapaciteta. Imajući u vidu da se nijedan sistem ne projektuje da funkcioniše na granici kapaciteta, preporuka je da se pri donošenju odluke, ista posmatra sa tolerancijom od -5% ( $X = 0,95$ ).

Na narednim dijagramima prikazane su granične vrednosti intenziteta tokova u slučaju jedne (Slika 6-1) i dve trake u konfliktnom toku (Slika 6-2), u zavisnosti od planirane ili postojeće vrednosti  $\lambda$ . Paralelno sa dobijenim graničnim vrednostima prikazana je granica koju definiše MUTCD primenom jedinstvene vrednosti proizvoda intenziteta tokova,  $Q_l * Q_o$ , od 50.000 i 90.000.



Slika 6-1. Granične vrednosti za primenu zaštićenog levog skretanja za jednu traku u konfliktnom toku



Slika 6-2. Granične vrednosti za primenu zaštićenog levog skretanja za dve trake u konfliktnom toku

U slučaju jedne trake u konfliktnom toku preporučene granične vrednosti delimično odgovaraju MUTCD preporukama, za slučaj  $\lambda \approx 0,30$ , dok se za slučaj dve trake delimično preklapaju za  $\lambda \approx 0,40$ . Predloženi kriterijumi za donošenje odluke o tretmanu levog skretanja su osetljivi na parametre rada signala i kao takvi značajno su precizniji. Takođe, predloženi pristup ukazuje na činjenicu da se može doneti odluka o primeni nezaštićenog levog skretanja, uz povećanje udela zelenog u ciklusu ukoliko je isto moguće sa aspekta ostalih tokova na raskrsnici. Jedinstvena vrednost proizvoda  $Q_l \cdot Q_o$ , primenjena u MUTCD pravilniku i predložena od strane brojnih autora, zanemaruje značajan uticaj parametara rada signala na mogućnost efikasne opsluge levog skretanja.

U zoni većih intenziteta konfliktnog toka, formirane granične vrednosti odgovaraju MUTCD preporukama, dok u zoni nižih vrednosti MUTCD prepoznaje potrebu za zaštićenim levim skretanjem samo pri značajno većem intenzitetu levog skretanja. Ovo je naročito

izraženo u uslovima niskih vrednosti  $\lambda$ . Predložene granične vrednosti prepoznaju potrebu za uvođenjem zaštićenog levog skretanja i u slučaju ekstremno niskih vrednosti konfliktnog toka, što odgovara preporuci koju je dao Roupail (1986) da je zaštićeno levo skretanje neophodno primeniti u svim situacijama kada je njegov stepen zasićenja veći od stepena zasićenja konfliktnog toka. Može se zaključiti da formirane granične vrednosti, u situaciji kada je  $Q_l$  značajno veće od  $Q_o$  ukazuju na potrebu za zaštićenim levim skretanjem bez obzira na ekstremno nizak intenzitet konfliktnog toka. Na ovaj način, omogućava se adekvatan tretman levog skretanja kao prioritarnog u odnosu na konfliktni tok imajući u vidu odnose njihovog intenziteta. Takođe, osetljivost predloženih graničnih vrednosti na planirane ili postojeće parametre rada signala može značajno doprineti procesu odlučivanja o tretmanu levog skretanja.

## 7. ZAKLJUČAK

Upravljanje saobraćajem u gradovima za osnovni cilj ima optimalno iskorišćenje postojećih kapaciteta saobraćajne mreže. Raskrsnice, kao ključni elementi urbane mreže predstavljaju tačke u kojima dolazi do ukrštanja konkurentnih saobraćajnih tokova. Zbog konfliktnih zahteva saobraćajnih tokova na raskrsnicama, neophodno je izvršiti preraspodelu kapaciteta. Primena svetlosnih signala, u fiksnom, automatskom ili adaptibilnom režimu rada, predstavlja jedini operativni način preraspodele kapaciteta na raskrsnicama, za razliku od nesignalisanih raskrsnica, bilo direktnih ili indirektnih (kružnih). Dok je na nesignalisanim, površinskim, direktnim raskrsnicama celokupan kapacitet prioritarno dodeljen jednoj grupi saobraćajnih tokova (glavnom pravcu), ostali tokovi su u upravljačkom smislu potpuno zanemareni. S druge strane, na kružnim raskrsnicama, svi saobraćajni tokovi imaju istovetan tretman, bez obzira na razlike u ispostavljenim saobraćajnim zahtevima, i bez mogućnosti upravljačkih akcija po pitanju preraspodele kapaciteta. S tim u vezi je i sve češća primena svetlosnih signala na kružnim raskrsnicama.

Primena svetlosnih signala podrazumeva optimizaciju njihovog rada, odnosno optimalnu preraspodelu kapaciteta raskrsnice. Ključni parametar koji definiše i dužinu ciklusa, i preraspodelu zelenog vremena je stepen iskorišćenja idealnog kapaciteta pojedinačnih tokova. Ovaj parametar predstavlja odnos merodavnog saobraćajnog zahteva i zasićenog saobraćajnog toka.

Zasićeni saobraćajni tok predstavlja ključan upravljački, ulazni parametar u postupak optimizacije rada signala. S druge strane, zasićeni saobraćajni tok je osnovni parametar za utvrđivanje pokazatelja efikasnosti rada svetlosnih signala, naročito u modelima vremenskih gubitaka, a time i za utvrđivanje Nivoa Usluge na raskrsnicama. Na vrednost zasićenog saobraćajnog toka levih skretanja, dominantno utiče način njihovog tretmana u planu faza, kao zaštićena ili kao nezaštićena. Prednost tretmana levih skretanja kao zaštićenih je povećanje kapaciteta predmetnog toka, ali uz negativan uticaj na efikasnost ostalih saobraćajnih tokova.

Da bi se donela odluka o primeni zaštićenog ili nezaštićenog levog skretanja neophodno je izvršiti precizno modeliranje kapaciteta levog skretanja, odnosno zasićenog saobraćajnog toka. Relevantni analitički modeli za proračun zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja koji se koriste i u praktičnim metodologijama, većinski su zasnovani na teoriji prihvatljivog intervala sleđenja, kojom se opisuje ponašanje vozača na nesignalisanim raskrsnicama. U praktičnim metodologijama je ovaj pristup iskorišćen i za modeliranje zasićenog saobraćajnog toka nezaštićenog levog skretanja na signalisanim raskrsnicama. Ovi modeli mogu biti prilagođeni primeni na semaforisanim raskrsnicama, ali uz obavezno apriori poznavanje parametara rada signala. Navedeni modeli, s druge strane, sugerišu obaveznu kalibraciju parametara modela, naročito prihvatljivog intervala sleđenja, kao najkompleksnijeg parametra koji se ne može utvrditi direktnim terenskim istraživanjima.

U doktorskoj disertaciji je potvrđena polazna hipoteza, da postojeći modeli koji su zasnovani na karakteristikama opsluživanja tokova na nesignalisanim raskrsnicama, ne mogu biti apriori primenjeni na signalisanim raskrsnicama. Formirani modeli zasićenog saobraćajnog toka za nezaštićena leva skretanja predstavljaju osnovni naučni cilj istraživanja u okviru doktorske disertacije. Formirana su dva tipa modela, u zavisnosti od načina tretmana konfliktnog toka kao uticajnog faktora. Oba tipa modela su pokazala jak koeficijent



determinacije od minimum  $R^2 = 0,986$ . Takođe, u oba tipa modela zasićeni saobraćajni tok je moguće utvrditi bez prethodne optimizacije rada signala.

Prvi formirani model kao nezavisnu promenljivu tretira realizovani protok u konfliktom toku, a njegova praktična primena se preporučuje ukoliko se planira uvođenje svetlosnih signala na postojećoj nesignalisanoj raskrsnici. Drugim rečima, model je preporučen za primenu na planerskom nivou. Formirani model daje niže vrednosti zasićenog saobraćajnog toka od onih u literaturi koji se baziraju na nesignalisanim raskrsnicama. Na ovaj način je dokazano da se, ni uz kalibraciju ovih modela, isti ne mogu primeniti na semaforisanim raskrsnicama bez poznavanja parametara rada signala. Ova hipoteza je potvrđena i u smislu sagledavanja razlika u intenzitetu konfliktnog toka na nesignalisanim i signalisanim raskrsnicama. Identična vrednost konfliktnog toka na nesignalisanoj raskrsnicama će na signalisanoj raskrsnici biti komprimovana, realizujući svoju opslugu u samo jednom delu ciklusa, tokom zelenog vremena. Takav, komprimovan tok ima jači uticaj na levo skretanje i ogleda se u smanjenju vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u odnosu na nesignalisane raskrsnice. Step en komprimovanja koji je oslikan razvijenim modelom predstavlja uticaj prosečnih parametara rada signala na uzorku istraživanja koji je obuhvatio 13 saobraćajnih traka na 6 raskrsnica u 12-časovnom periodu istraživanja. U tom smislu, model je namenjen početnoj, planerskoj proceni vrednosti zasićenog saobraćajnog toka na početku procedure optimizacije rada signala.

Drugi model, koji je baziran na ekspaniranim vrednostima konfliktnog toka, oslikava intenzitet komprimacije koji se događa na semaforisanim raskrsnicama, u zavisnosti od dužine zelenog vremena i ciklusa. Primena ovog modela je preporučena za optimizaciju rada signala ukoliko je raskrsnica već semaforisana. Model bolje opisuje realne podatke u odnosu na sličan model u literaturi, CCG model. Modelom je kroz jedinstveni faktor, ekspanirani konfliktni tok, obuhvaćen uticaj i konfliktnog toka i postojećeg rada signala. Precizno modeliranje zasićenog saobraćajnog toka na ovaj način, pored primene u optimizaciji rada signala, kao ulaznog parametra, omogućava i primenu u upravljanju u realnom vremenu. Generalno, raskrsnice sa nezaštićenim levim skretanjima nisu pogodne za upravljanje radom svetlosnih signala u realnom vremenu. Međutim, precizno definisanje zasićenog saobraćajnog toka, posledično i kapaciteta, u zavisnosti od intenziteta i trenutne dužine zelenog vremena konfliktnog toka, omogućava donošenje odluke o potrebi za produženjem zelenog u svrhu opsluge levih skretanja (bilo produženjem zelenog za oba toka ili primenu tzv. sečene faze). Na ovaj način, može se izbeći nepotrebna zaštita levih skretanja u svrhu omogućavanja da se istim upravlja u realnom vremenu.

Oba formirana modela uključuju deo zasićenog saobraćajnog toka koji se realizuje pre konfliktnog toka i tokom zaštitnog vremena, čime se olakšava njihova inženjerska primena. U ostalim modelima ovaj deo zasićenog saobraćajnog toka se naknadno uključuje u proračun kapaciteta, dok je u predloženom modelu ovaj deo zasićenog toka uključen direktno.

Za oba razvijena modela izvršena je verifikacija i poređenje sa odabranim, odgovarajućim modelima iz literature, odnosno onim modelima koji su formirani u odnosu na isti uticajni faktor. Oba modela su prepoznala uticaj konfliktnog toka, definisanog na različite načine, na vrednost zasićenog saobraćajnog toka.

Doprinos disertacije predstavlja činjenica da oba razvijena modela kvantifikuju uticaj geometrije raskrsnice, u smislu broja saobraćajnih traka u konfliktom toku, na zasićeni saobraćajni tok levog skretanja.

U okviru disertacije razvijena je metodologija istraživanja parametara opsluge nezaštićenih tokova. Primena metodologije je moguća ne samo za nezaštićena leva skretanja, već i za sve tipove konfliktnih tokova, poput desnih skretanja, konflikta sa pešacima, itd. Takođe, razvijena je i metodologija za obradu empirijskih podataka velikog obima.

Kao jedan od doprinosa disertacije izdvaja se kalibracija postojećih modela u smislu utvrđivanja kritične vrednosti prihvatljivog intervala sleđenja. Ovaj parametar je u većini slučajeva u literaturi utvrđen na nesignalisanim raskrscima i kao takav primenjivan i na semaforisanim. Poređenjem šest različitih metoda za utvrđivanje prihvatljivog intervala sleđenja data je njihova uporedna analiza sa aspekta mogućnosti primene na semaforisanim raskrscima. Međutim, bez obzira na kalibraciju modela zasnovanog na nesignalisanim raskrscima, dokazano je da isti ne može biti primenjen na semaforisanim raskrscima bez detaljnog poznavanja rada signala.

Pored navedenih naučnih doprinosa, doktorska disertacija ima i praktičan značaj kroz primenu u inženjerskoj praksi u postupku optimizacije rada signala. Takođe, kroz kalibraciju postojećih modela na lokalne uslove, omogućava se njihova adekvatnija primena u saobraćajnim sistemima sličnih karakteristika. Bez obzira što su vrednosti prihvatljivog intervala sleđenja utvrđene na semaforisanim raskrscima, može se pretpostaviti da se vozači ponašaju konzistentno i na nesignalisanim raskrscima. U tom smislu, rezultati ove disertacije mogu se primeniti i na nesignalisanim raskrscima u proceduri utvrđivanja potencijalnog kapaciteta, odnosno nivoa usluge.

Konačno, razvijeni metodološki okvir za donošenje odluke o tretmanu levog skretanja u planu faza na bazi kapaciteta levog skretanja, prevazilazi nedostatke jedinstvene granične vrednosti  $Q_T^*Q_0$ . Definisani granični uslovi za uvođenje zaštićenog levog skretanja, sa aspekta intenziteta tokova, osetljivi su na planirane ili postojeće parametre rada signala i značajno su precizniji. Formirani okvir prepoznaje potrebu za zaštićenim levim skretanjem bez obzira na ekstremno niske vrednosti konfliktnog toka, čime se omogućava adekvatan tretman levog skretanja kao prioritarnog u odnosu na konfliktni tok, imajući u vidu odnos njihovih intenziteta.

U disertaciji je model zasićenog saobraćajnog toka zasnovan na istraživanjima ekskluzivnih traka za levo skretanje, sa eliminisanim uticajem pešačkog toka. Pravci daljih istraživanja trebalo bi da obuhvate modeliranje zasićenog saobraćajnog toka u slučaju mešovityh traka, kao i simultani uticaj konfliktnih pešačkih i vozačkih tokova. Takođe, istraživanja u okviru disertacije su ograničena na lokacije sa dovoljnom preglednosti. Dalja istraživanja bi trebalo da obuhvate uticaj smanjene preglednosti na zasićeni saobraćajni tok levog skretanja.

Primenom mikro-simulacionih softvera poput VISSIM-a, uz prethodnu kalibraciju na osnovu rezultata disertacije, mogao bi se formirati algoritam za donošenje odluke o primeni zaštićenog ili nezaštićenog levog skretanja. Primena simulacionih softvera u ovom tipu istraživanja omogućila bi sagledavanje svih mogućih kombinacija intenziteta međusobno konfliktnih tokova, ali uz analizu i ostalih tokova na raskrsnici koji nisu bili predmet ove disertacije. Na taj način omogućilo bi se kreiranje okvira za donošenje odluke ne samo sa aspekta intenziteta tokova već i sa aspekta efikasnosti svih tokova na raskrsnici, odnosno prosečnih vremenskih gubitaka.

## LITERATURA

- [1] AASHTO. (2001). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. American Association of State Highway and Transportation Officials. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. Retrieved from [www.transportation.org](http://www.transportation.org)
- [2] Agent, K. R. (1981). An Evaluation of Permissive Left-Turn Phasing. *ITE Journal*, 51, 16–20.
- [3] Agent, K. R., & Deen, R. C. (1979). Warrants for left-turn signal phasing. *Transportation Research Record, TRB, National Research Council, Washington, D.C.*, (737), 1–10.
- [4] Akcelik, R. (1981). *Traffic signals: Capacity and Timing Analysis*. Australian Road Research Board. Research Report ARR No. 123 (7th reprint:1998).
- [5] Akcelik, R., Besley, M., & Roper, R. (1999). *Fundamental Relationships for Traffic Flows at Signalised Intersections*. Vermont South, Australia: Research Report ARR 340. ARRB Transport Research Ltd.,
- [6] Alhajyaseen, W. K. M., Asano, M., Nakamura, H., & Kang, N. (2011). Gap Acceptance Models for Left-Turning Vehicles Facing Pedestrians At Signalized Crosswalks. In *3rd International Conference on Road Safety and Simulation* (pp. 1–17). Indianapolis, USA.
- [7] Amin, H. J., & Maurya, A. K. (2015). A review of critical gap estimation approaches at uncontrolled intersection in case of heterogeneous traffic conditions. *Journal of Transport Literature*, 9(3), 5–9. <https://doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v9n3a1>
- [8] Asamer, J., & Van Zuylen, H. J. (2011). Saturation flow under adverse weather conditions. *Transportation Research Record*, (2258), 103–109. <https://doi.org/10.3141/2258-13>
- [9] Asante, S. A., Ardekani, S. A., & Williams, J. C. (1993). Selection Criteria for Left-Turn Phasing and Indication Sequence. *Transportation Research Record*, 1421(9), 11–20.
- [10] Ashworth, R. (1968). A note on the selection of gap acceptance criteria for traffic simulation studies. *Transportation Research*, 2(2), 171–175. [https://doi.org/10.1016/0041-1647\(68\)90060-9](https://doi.org/10.1016/0041-1647(68)90060-9)
- [11] Bang, K. L. (1978). *Swedish Capacity Manual Part 3: Capacity of Signalized Intersections. Highway capacity, measures of effectiveness, and flow theory*. Washington, DC: Transportation Research Board.
- [12] Bang, K., Wahlstedt, J., & Linse, L. (2016). Methodology for Timing and Impact Analysis of Signalized Intersections. *Transportation Research Procedia*, 15, 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.007>
- [13] Barchański, A., & Zochowska, R. (2021). Estimation of Critical Gaps and Follow-Up Times At Median Uncontrolled T-Intersection. *Archives of Transport*, 60(4), 105–124. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.6030>
- [14] Bargegol, I., Hosseini, S. H., & Samet, M. J. (2017). Determining the Capacity Model of Urban Roundabouts, Considering the Drivers' Behaviour in Accepting and Rejecting of Gaps. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245(4). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/4/042015>
- [15] Boroujerdian, A. M., & Nemati, M. (2016). Pedestrian Gap Acceptance Logit Model in Unsignalized Crosswalks Conflict Zone. *International Journal of Transportation Engineering*, 4(2), 87–96. Retrieved from [http://www.ijte.ir/article\\_40534.html](http://www.ijte.ir/article_40534.html)
- [16] Brilon, W. (2016). Some remarks regarding the estimation of critical gaps. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2553(1), 10–19. <https://doi.org/10.3141/2553-02>

- [17] Brilon, W., Koenig, R., & Troutbeck, R. J. (1997). Useful Estimation Procedures for Critical Gaps. In *Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals* (pp. 71–87). Portland Oregon.
- [18] Cassidy, M. J., Madanat, S. M., Wang, M. H., & Yang, F. (1995). Unsignalized intersection capacity and level of service: Revisiting critical gap. *Transportation Research Record*, (1484), 16–23.
- [19] Catchpole, E. A., & Plank, A. W. (1986). The capacity of a priority intersection. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20B(6), 441–456. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(86\)90024-X](https://doi.org/10.1016/0191-2615(86)90024-X)
- [20] Čelar, N. (2013). *Prilog analizi saobraćajnog procesa na signalisanoj raskrsnici*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.
- [21] Čelar, N., Kajalić, J., & Stanković, S. (2021). *Regulisanje saobraćajnih tokova* (I izdanje). Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet.
- [22] Čelar, N., Stanković, S., & Kajalić, J. (2020). *Osnove upravljanja svetlosnim signalima* (II izdanje). Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, Beograd.
- [23] Čelar, N., Stanković, S., Kajalić, J., & Stepanović, N. (2018). Methodology for control delay estimation using new algorithm for critical points identification. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, 144(2). <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000110>
- [24] Cowan, R. (1987). An extension of Tanner's results on uncontrolled intersections. *Queueing Systems*, 1, 249–263.
- [25] Cowan, R. J. (1975). Useful headway models. *Transportation Research*, 9(6), 371–375. [https://doi.org/10.1016/0041-1647\(75\)90008-8](https://doi.org/10.1016/0041-1647(75)90008-8)
- [26] Dick, A. C. (1963). Effect of Gradients on Saturation Flow at Traffic Signals. *Traffic Engineering and Control*, 5, 293–294.
- [27] Drew, D. R. (1968). *Traffic Flow Theory and Control*. McGraw-Hill, New York.
- [28] FGSV. (2015). *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2015)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV Verlag GmbH.
- [29] FHWA. (2009). *Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD)*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- [30] Finnish Road Administration. (2005). *Liikennevalojen suunnittelu, LIVASU (in Finnish)*. Helsinki: Tiehallinto.
- [31] Gavin, H. P. (2019). The Levenberg-Marquardt Algorithm For Nonlinear Least Squares Curve-Fitting Problems. *Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University*, 1–19.
- [32] Guo, R. J. (2010). Estimating critical gap of roundabouts by different methods. *IET Conference Publications, 2010*(573 CP), 84–89. <https://doi.org/10.1049/cp.2010.1107>
- [33] Guo, R. J., Wang, X. J., & Wang, W. X. (2014). Estimation of critical gap based on Raff's definition. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/236072>
- [34] Harders, J. (1968). *Die Leistungsfähigkeit nicht signalgeregelter städtischer Verkehrsknoten. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*. Bonn.
- [35] Hewitt, R. H. (1983). Measuring Critical Gap. *Transportation Science*, 17(1), 87–109. <https://doi.org/10.1287/trsc.17.1.87>
- [36] ITE. (1991). *Manual of Traffic Signal Design*. Institute of Transportation Engineers, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [37] Ivanović, I., & Jović, J. (2018). Sensitivity of street network capacity under the rain impact: Case study of Belgrade. *Transport*, 33(2), 470–477. <https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1283532>

- [38] Kajalić, J. (2020). *Modeliranje kretanja plotuna vozila na gradskim arterijama*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.
- [39] Kajalić, J., Čelar, N., & Stanković, S. (2018). Travel time estimation on urban street segment. *Promet - Traffic&Transportation*, 30(1), 115–120. <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i1.2473>
- [40] Khattak, A. J., & Jovanis, P. P. (1990). Capacity and Delay Estimation for Priority Unsignalized Intersections: Conceptual and Empirical Issues. *Transportation Research Record*, (1287), 129–137.
- [41] Kimber, R. M. (1989). Gap-acceptance and empiricism in capacity prediction. *Transportation Science*, 23(2), 100–111. <https://doi.org/10.1287/trsc.23.2.100>
- [42] Kimber, R. M., & Coombe, R. D. (1980). *The Traffic Capacity of Major/Minor Priority Junctions*. Transport and Road Research Laboratory, Traffic Systems Division.
- [43] Kocić, A., Čelar, N., Kajalić, J., & Stanković, S. (2018). Estimation of saturation flow rates on dual left-turn lanes. *Tehnika*, 73(2), 254–261. <https://doi.org/10.5937/tehnika1802254k>
- [44] Kocić, A., Čelar, N., Kajalić, J., & Stanković, S. (2022). Simulation Modelling of Permitted Left-Turn Saturation Flow Rate Based on Opposing Through-Flow Degree of Saturation. *Promet - Traffic&Transportation*, 34(3), 475–485. <https://doi.org/https://doi.org/10.7307/ptt.v34i3.3890>
- [45] Kocić, A., Stanković, S., & Čelar, N. (2018). Analiza modela za proračun zasićenog saobraćajnog toka za nezaštićena leva skretanja iz ekskluzivne trake. In *Treći Srpski kongres o putevima* (p. 85). Beograd.
- [46] Krbálek, M., Hobza, T., Patočka, M., Krbálková, M., Apeltauer, J., & Groverová, N. (2022). Statistical aspects of gap-acceptance theory for unsignalized intersection capacity. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 594, 127043. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.127043>
- [47] Kyte, M., Lall, B. K., & Mahfood, N. (1992). An empirical method to estimate capacity and delay on the minor street approach of a two-way stop-controlled intersection. *Transportation Research Record*, 1365, 1–11. Retrieved from <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1365/1365-001.pdf>
- [48] Kyte, M., Tian, Z., Mir, Z., Hameedmansoor, Z., Kittelson, W., Vandehey, M., ... Troutbeck, R. J. (1996). *Capacity and Level of Service at Unsignalized Intersections*. Washington, D.C.: National Cooperative Highway Research Program Project 3-46. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C.
- [49] Kyte, M., Zegeer, J., & Lall, B. K. (1991). Empirical Models For Estimating Capacity and Delay at Stop-Controlled Intersections in the United States. In W. Brilon (Ed.), *Intersections without Traffic Signals II* (pp. 335–361). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [50] Lalani, N., Cronin, D. S., Hattan, D. E., & Searls, T. (1986). A Summary of the Use of Warrants for the Installation of Left-Turn Phasing at Signalized Intersections. *ITE Journal-Institute of Transportation Engineers*, 56, 57–59.
- [51] Lin, H. J., & Machemehl, R. B. (1983). Developmental Study of Implementation Guidelines for Left-Turn Treatments. *Transportation Research Record* 905, 96–105.
- [52] Lu, Z., Kwon, T. J., & Fu, L. (2019). Effects of winter weather on traffic operations and optimization of signalized intersections. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(2), 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.02.002>
- [53] Luttinen, R. T., & Nevala, R. (2002). *Capacity and Level of Service of Finnish Signalized Intersections*. Helsinki: Finnish Road Administration.

- [54] Mohan, M., & Chandra, S. (2016). Review and Assessment of Techniques for Estimating Critical Gap at Two-way Stop-controlled Intersections. *European Transport \ Trasporti Europei*, (61), 1–18.
- [55] Patil, G. R., & Pawar, D. S. (2014). Temporal and spatial gap acceptance for minor road at uncontrolled intersections in India. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2461, 129–136. <https://doi.org/10.3141/2461-16>
- [56] Radivojević, D., Stanković, S., Čelar, N., & Vukanović, S. (2017). Adaptive traffic control systems for urban networks. *Tehnika*, 72(1), 98–106. <https://doi.org/10.5937/tehnika1701098r>
- [57] Raff, M. S., & Hart, J. W. (1950). *A volume warrant for urban stop signs*. Eno Foundation for Highway Traffic Control. Saugatuck, USA.
- [58] Richardson, D. B. (1982). *Intersection Capacity Guide, Fourth Edition*. Municipality of Metropolitan Toronto, Roads and Traffic Department, Traffic Control Centre, Toronto, Ontario.
- [59] Roupail, N. M. (1986). Analytical Warrant for Separate Left-Turn Phasing. *Transportation Research Record*, 20–24.
- [60] Sieglöcher, W. (1973). *Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik. Report 154*. Bundesminister fuer Verkehr, Bonn, Germany.
- [61] Stanić, B. (1991). *Istraživanja efekata signalnog plana pri zasićenom toku*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.
- [62] Stanić, B., Tubić, V., & Čelar, N. (2011). Straight lane saturation flow and its rate in Serbian cities. *Transport*, 26(3), 329–334. <https://doi.org/10.3846/16484142.2011.623762>
- [63] Stanković, S., Čelar, N., & Kajalić, J. (2016). Estimation of start-up lost time and amber time utilization for signal timing. In *International Conference on Traffic and Transport Engineering - Belgrade* (pp. 670–674).
- [64] Stanković, S., Čelar, N., Kajalić, J., & Vukićević-Biševac, I. (2020). Micro- And Macroapproach to Modeling Relationship between Control and Stopped Delays at Signalized Intersections. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, 146(1), 1–6. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000288>
- [65] Stojkov, M., Čelar, N., Kajalić, J., Stanković, S., & Kocić, A. (2019). Comparison of real and theoretical capacity at signalized intersections. *Tehnika*, 74(5), 704–708. <https://doi.org/10.5937/tehnika1905704s>
- [66] Tanner, J. C. (1953). A Problem of Interference Between Two Queues. *Biometrika*, 40(1/2), 58. <https://doi.org/10.2307/2333097>
- [67] Tanner, J. C. (1962). A theoretical analysis of delays at an uncontrolled intersection. *Biometrika*, 49(1–2), 163–170. <https://doi.org/10.1093/biomet/49.1-2.163>
- [68] Tanner, J. C. (1967). The capacity of uncontrolled intersection. *Biometrika*, 54(3), 657–658.
- [69] Teply, S., Allingham, D. ., Richardson, D. ., & Stephenson, B. . (2008). *Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections* (Third Edit). Institute of Transportation Engineers District 7.
- [70] Tian, Z., Vandehey, M., Robinson, B. W., Kittelson, W., Kyte, M., Troutbeck, R., ... Wu, N. (1999). Implementing the maximum likelihood methodology to measure a driver's critical gap. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(3–4), 187–197. [https://doi.org/10.1016/s0965-8564\(98\)00044-5](https://doi.org/10.1016/s0965-8564(98)00044-5)
- [71] Tracz, M. (1988). Research of traffic performance of major/minor priority intersections. In *Intersections Without Traffic Signals: Proceedings of an International*

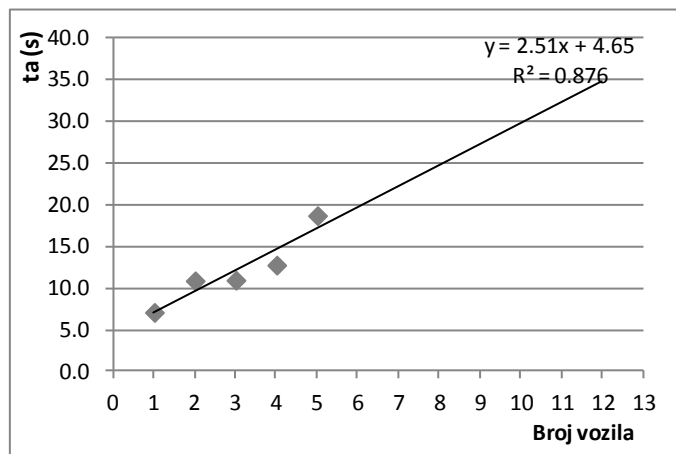
- Workshop (pp. 62–79). Springer-Verlag, Berlin.
- [72] Trafikverket. (2014). *TRVMB Kapacitet och framkomlighetseffekter Trafikverkets metodbeskrivning för beräkning av kapacitet och framkomlighetseffekter i vägtrafikanläggningar*. Trafikverket.
- [73] Transportation Research Board. (2000). *Highway Capacity Manual*. National Research Council, Washington, D.C.
- [74] Transportation Research Board. (2010). *HCM 2010: Highway Capacity Manual (5th ed.)*. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [75] Transportation Research Board. (2016). *Highway Capacity Manual 6th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. Washington, DC. The National Academies Press.
- [76] Troutbeck, R. J. (1986). Average Delay At an Unsignalized Intersection With Two Major Streams Each Having a Dichotomized Headway Distribution. *Transportation Science*, 20(4), 272–286. <https://doi.org/10.1287/trsc.20.4.272>
- [77] Troutbeck, R. J. (1988). Current and Future Australian Practices for the Design of Unsignalized Intersections. In W. Brilon (Ed.), *Intersections without Traffic Signals* (pp. 1–19). Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-83373-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-83373-1_1)
- [78] Troutbeck, R. J. (1992). *Estimating the critical acceptance gap from traffic movements*. Physical Infrastructure Centre Queensland University of Technology.
- [79] Troutbeck, R. J. (2014). Estimating the mean critical gap. *Transportation Research Record*, 2461(2), 76–84. <https://doi.org/10.3141/2461-10>
- [80] Troutbeck, R. J. (2016). Revised Raff's method for estimating critical gaps. *Transportation Research Record*, 2553(1), 1–9. <https://doi.org/10.3141/2553-01>
- [81] Troutbeck, R. J., & Brilon, W. (2002). Chapter 8: Unsignalized Intersection Theory. In *Revised Monograph on Traffic Flow Theory*. Turner-Fairbank Highway Research Center.
- [82] Tubić, V., Vidas, M., & Stepanović, N. (2022). *Osnove teorije saobraćajnog toka*. Beograd: Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet.
- [83] Upchurch, J. E. (1986). Guidelines for Selecting Type of Left-Turn Phasing. *Transportation Research Record*, 1069, 30–38.
- [84] Vejdirektoratet – Vejregelrådet. (2015). *Håndbog for Kapacitet og serviceniveau (Danish Highway Capacity Manual)*. Vejdirektoratet – Vejregelrådet.
- [85] Vinayaraj, S., Arkatkar, S., Joshi, G., & Parida, M. (2020). Examining Pedestrian Critical Gap Analysis at Un-Signalized Midblock Crosswalk Sections in India. *Transportation Research Procedia*, 48(2019), 2230–2250. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.280>
- [86] Wang, T., Wu, J., Zheng, P., & McDonald, M. (2010). Study of pedestrians' gap acceptance behavior when they jaywalk outside crossing facilities. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 1295–1300. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2010.5625157>
- [87] Webster, F. W., & Cobbe, B. M. (1966). *Traffic Signals*. Road Research Laboratory Technical Paper 56, H.M. Stationery Office.
- [88] Wegmann, H. (1991). A General Capacity Formula for Unsignalized Intersections. In W. Brilon (Ed.), *Intersections without Traffic Signals II* (Vol. 21, pp. 177–191). Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-84537-6\\_13](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-84537-6_13)
- [89] Weinert, A. (2000). Estimation of critical gaps and follow-up times at rural unsignalized intersections in Germany. *Fourth International Symposium on Highway Capacity*, 409–421.
- [90] Wong, S. C. (1996). On the reserve capacities of priority junctions and roundabouts. *Transportation Research Part B: Methodological*, 30(6), 441–453. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(96\)00008-2](https://doi.org/10.1016/0191-2615(96)00008-2)

- [91] Wu, N. (2006). A new model for estimating critical gap and its distribution at unsignalized intersections based on the equilibrium of probabilities. In *Proceeding of the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service*. Yokohama, Japan.
- [92] Yan, X., & Radwan, E. (2008). Influence of restricted sight distances on permitted left-turn operation at signalized intersections. *Journal of Transportation Engineering*, 134(2), 68–76. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2008\)134:2\(68\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:2(68))

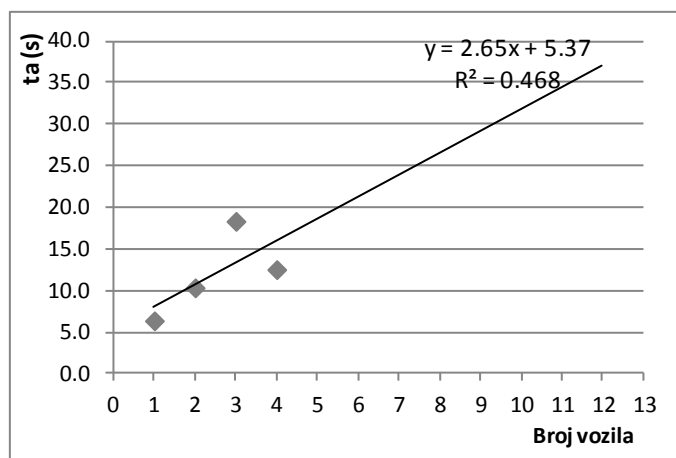


**PRILOZI**

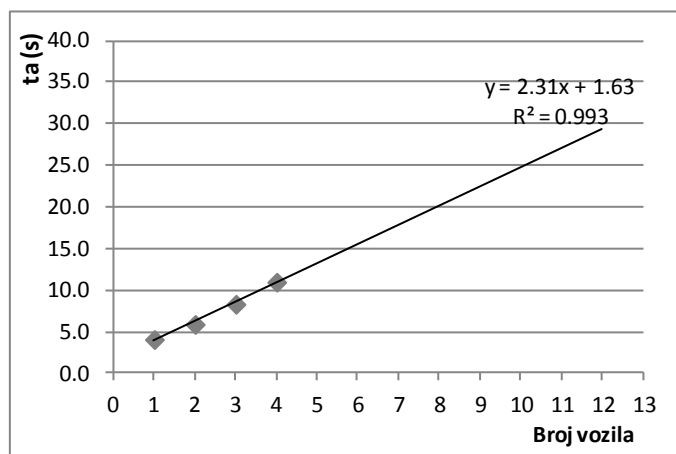
**PRILOG 1: Primena Siegloch metode za utvrđivanje kritičnog prihvatljivog intervala sleđenja po trakama**



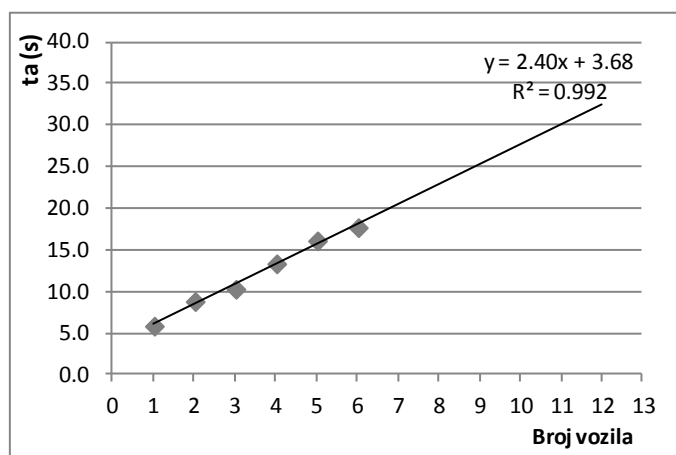
**Slika P 1. Siegloch metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T1**



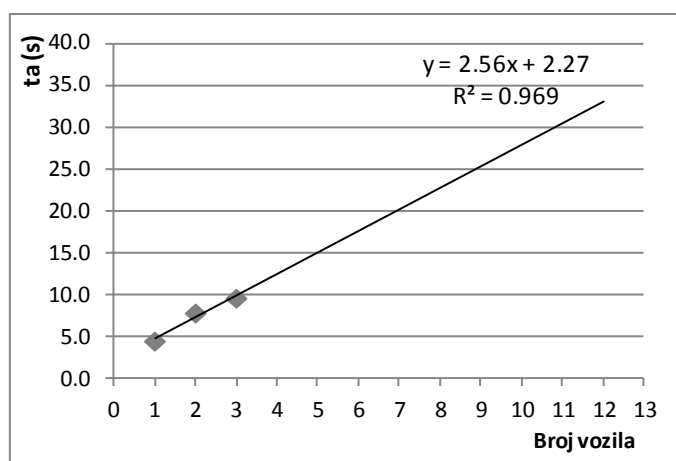
**Slika P 2. Siegloch metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T2**



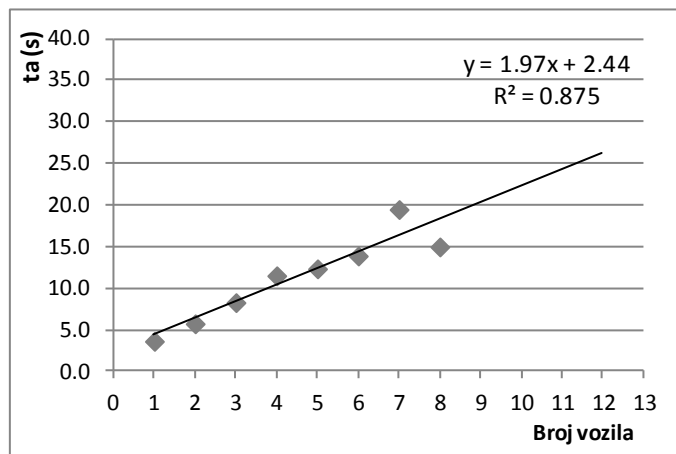
Slika P 3. Sieglach metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T3



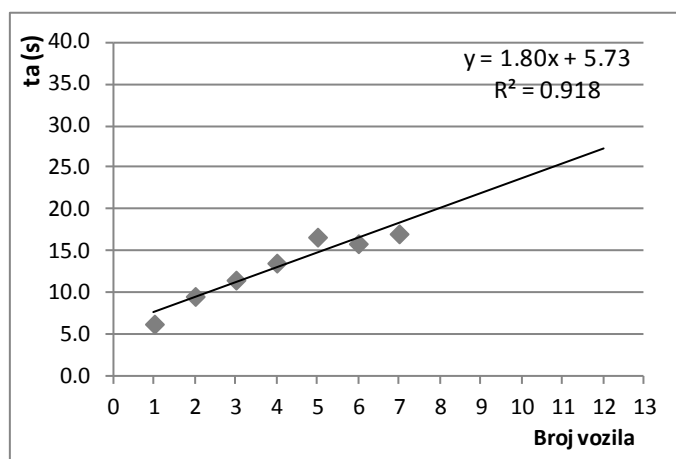
Slika P 4. Sieglach metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T4



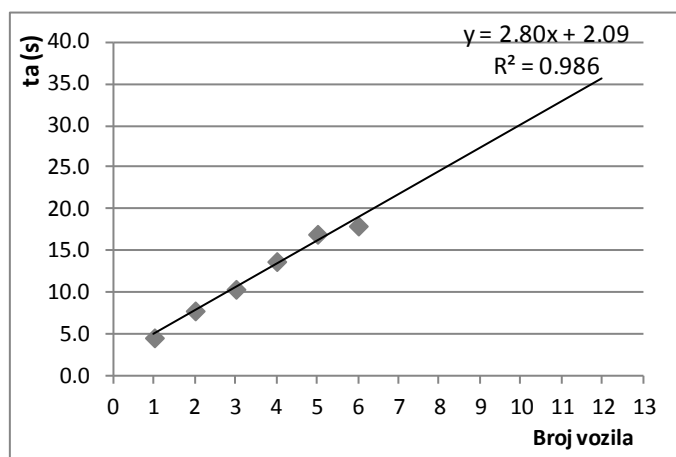
Slika P 5. Sieglach metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T5



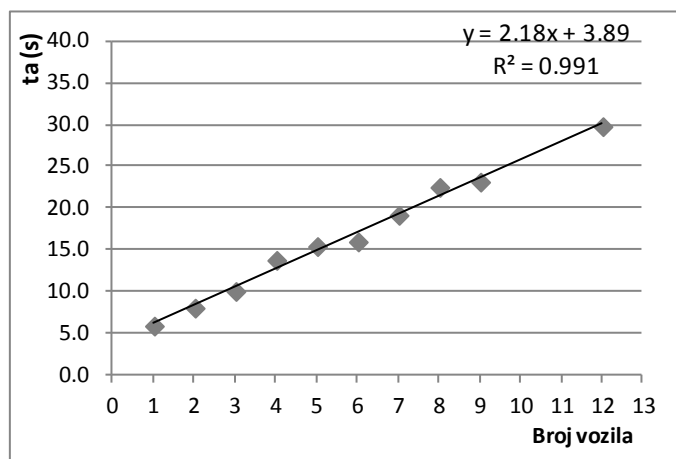
Slika P 6. Sieglach metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T6



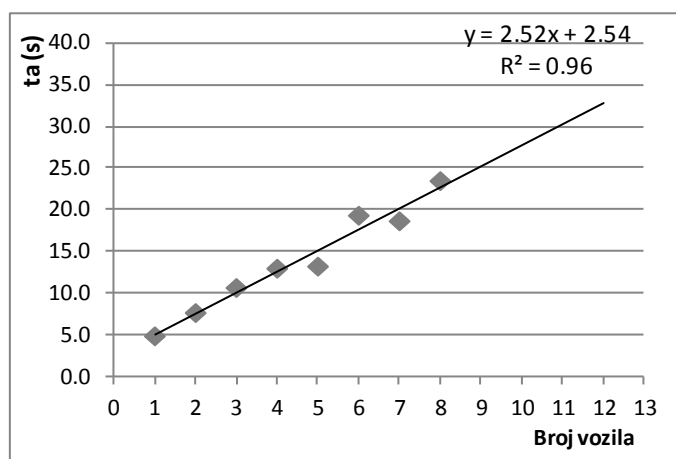
Slika P 7. Sieglach metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T7



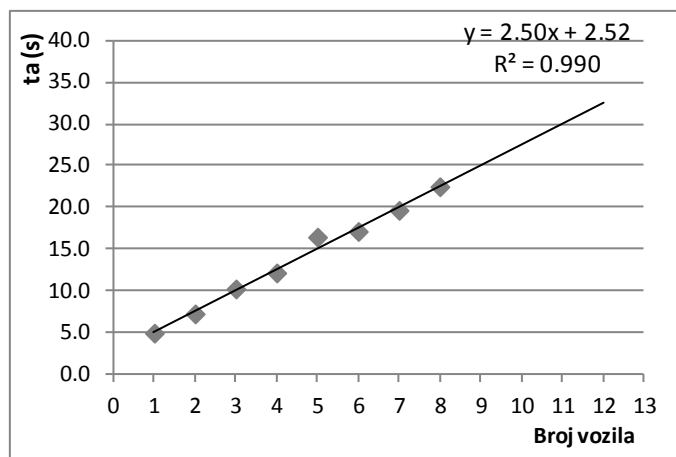
Slika P 8. Sieglach metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T8



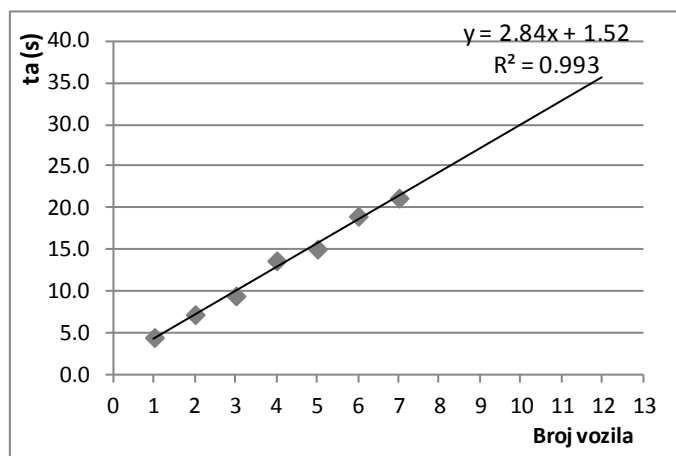
Slika P 9. Sieglach metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T9



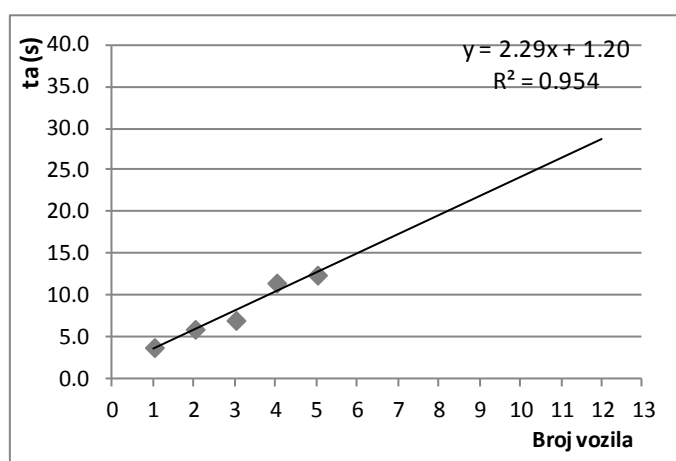
Slika P 10. Sieglach metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T10



Slika P 11. Sieglach metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T11

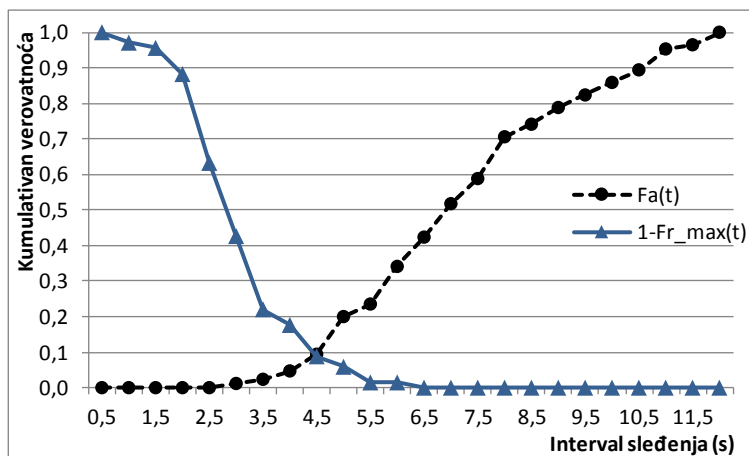


Slika P 12. Siegloch metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T12

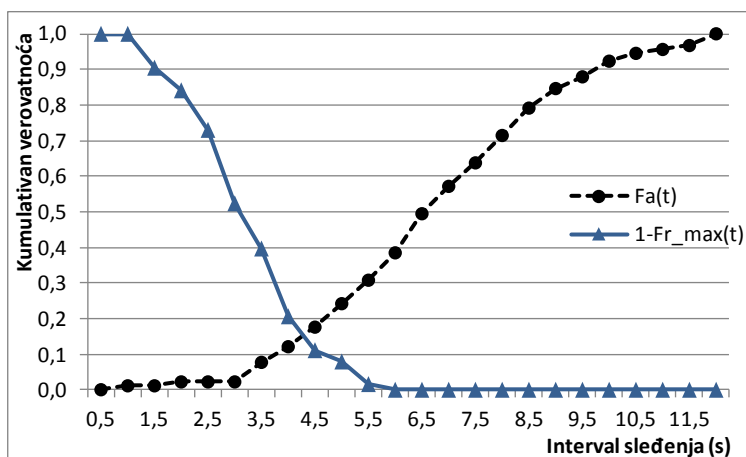


Slika P 13. Siegloch metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T13

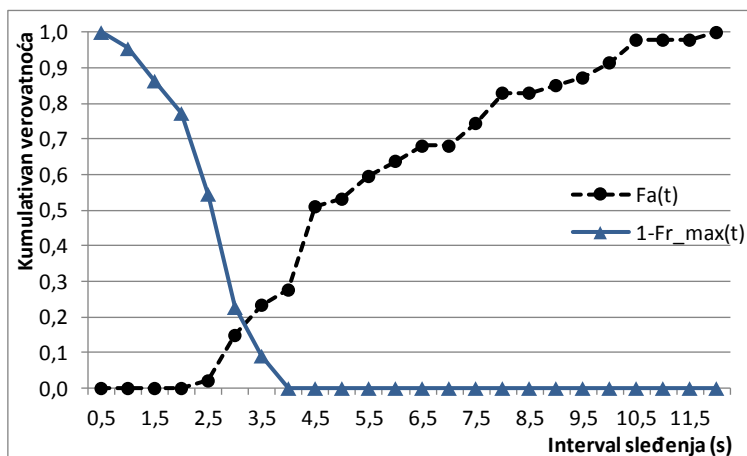
**PRILOG 2: Primena Raff metode za utvrđivanje kritičnog prihvatljivog intervala sleđenja po trakama**



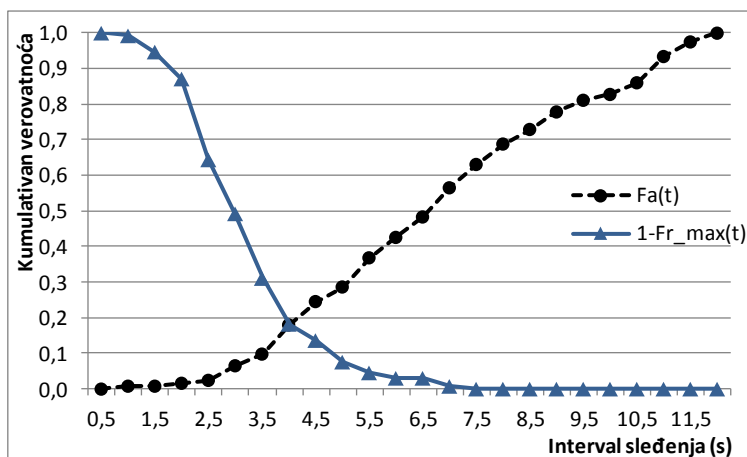
Slika P 14. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T1



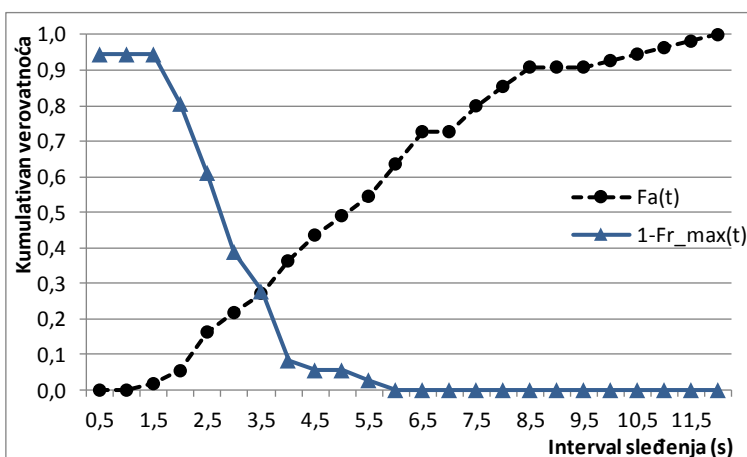
Slika P 15. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T2



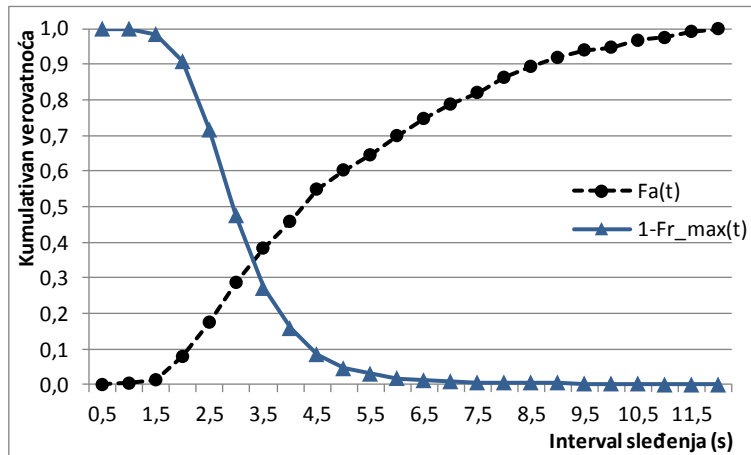
Slika P 16. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T3



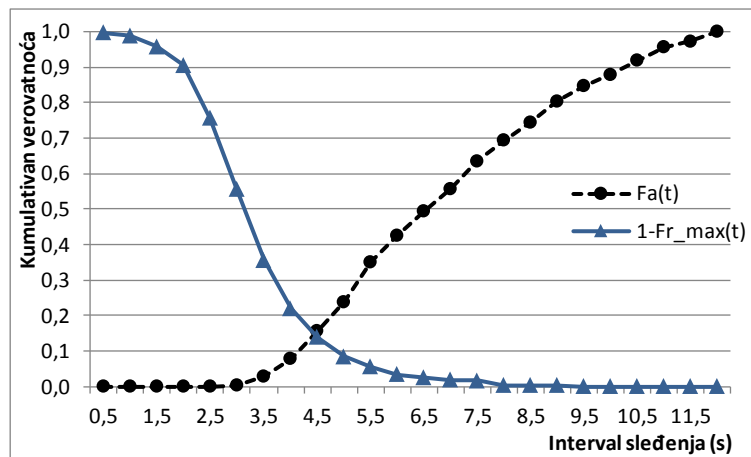
Slika P 17. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T4



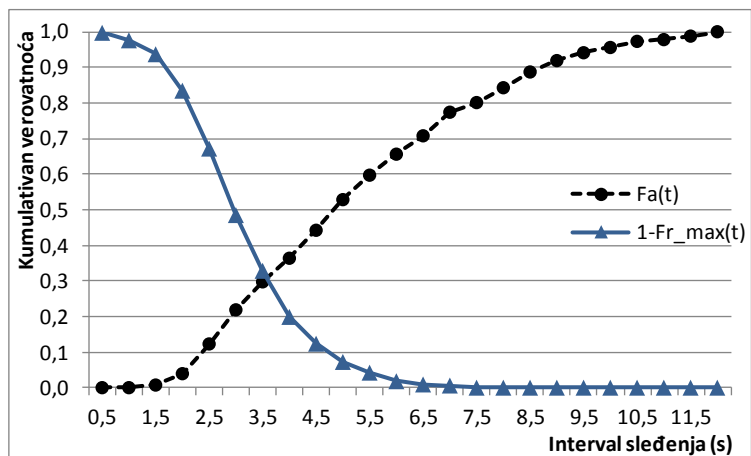
Slika P 18. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T5



Slika P 19. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T6

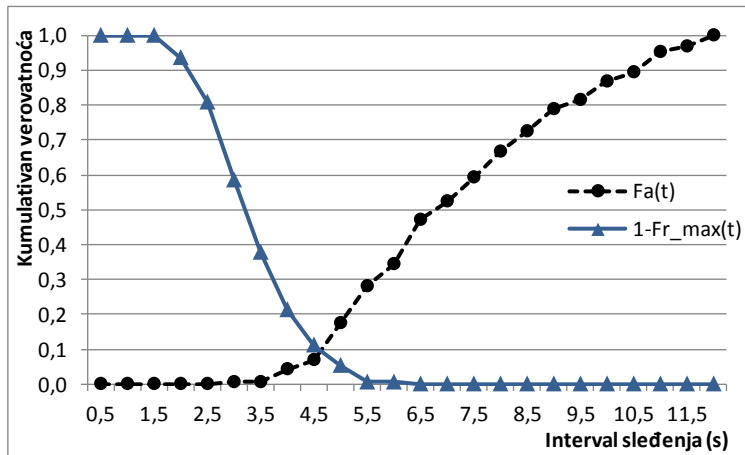


Slika P 20. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T7

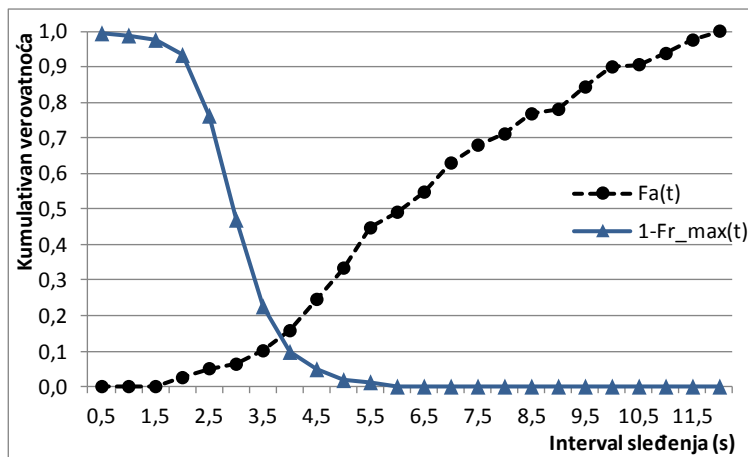


Slika P 21. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T8

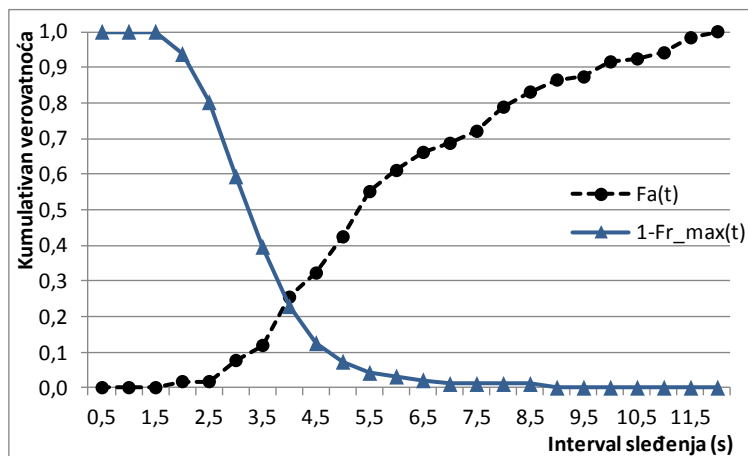




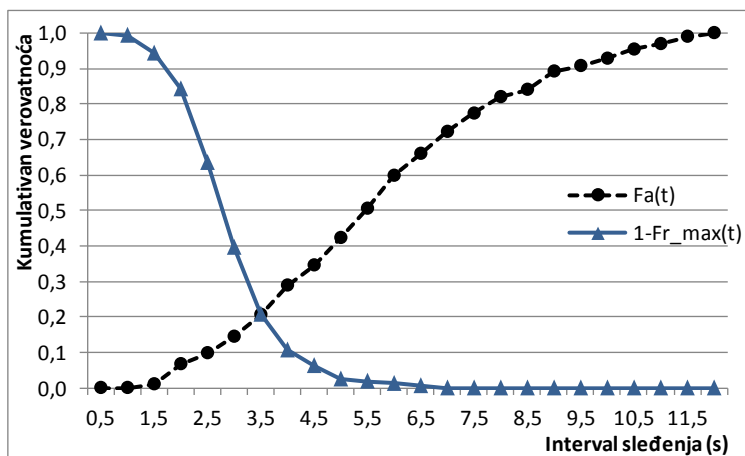
Slika P 22. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T9



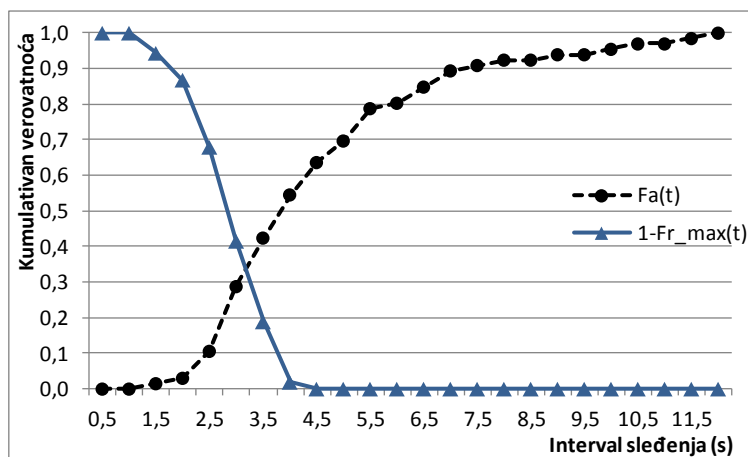
Slika P 23. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T10



Slika P 24. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T11



Slika P 25. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T12



Slika P 26. Raff metoda za utvrđivanje  $t_c$  za traku T13

## Biografija autora

Stamenka Stanković, master inž. saobraćaja, rođena je 12. marta 1985. godine u Priboju, gde je i završila osnovnu i srednju školu. Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu je upisala 2004. godine. Diplomirala je na Katedri za saobraćajno inženjerstvo, na predmetu "Regulisanje i upravljanje saobraćajnim tokovima" 2009. godine. Mester akademske studije je završila 2014. godine odbranivši master rad na temu „Mikroskopski modeli saobraćajnog toka u ITS-u“, na Katedri za planiranje i regulisanje saobraćaja.

U oktobru 2013. godine izabrana je u zvanje saradnika u nastavi, a 2015. 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: Regulisanje i upravljanje saobraćajnim tokovima – Regulisanje saobraćaja, Regulisanje i upravljanje saobraćajnim tokovima – Upravljanje saobraćajem, Regulisanje i upravljanje saobraćajnim tokovima – Inteligentni transportni sistemi, i na izbornim predmetima Praktikum laboratorijskih vežbi b i Praktikum laboratorijskih vežbi c. Takođe, angažovana je i na sledećim predmetima master akademskih studija, na Modulu za saobraćajno inženjerstvo: Inteligentni sistemi u upravljanju saobraćajem i Metode istraživanja u saobraćaju.

Kao član autorskog tima je učestvovala u realizaciji velikog broja studija i projekata od strateškog značaja i na naučnom projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja. Bila je član komisije za odbranu 25 završnih radova. Koautor je dva pomoćna udžbenika za užu naučnu oblast „Regulisanje i upravljanje saobraćajnim tokovima na mreži puteva i ulica“. Položila je stručni ispit Inženjerske komore Srbije. Od 2015. godine član je Organizacionog odbora Konferencije o tehnikama saobraćajnog inženjerstva, TESi.

## Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora                     Stamenka Stanković                    

Broj indeksa                     15D-010                    

### Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

MODELIRANJE ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG TOKA NEZAŠTIĆENOG LEVOG SKRETANJA

- 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, 14. februara 2023.

\_\_\_\_\_

## Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora	Stamenka Stanković
Broj indeksa	15D-010
Studijski program	Saobraćaj
Naslov rada	MODELIRANJE ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG TOKA NEZAŠTIĆENOG LEVOG SKRETANJA
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, 14. februara 2023.

---

## Izjava o korišćenju

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

### **MODELIRANJE ZASIĆENOG SAOBRAĆAJNOG TOKA NEZAŠTIĆENOG LEVOG SKRETANJA**

---

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima 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, 14. februara 2023.

---

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.