



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U  
NOVOM SADU

---



Nemanja Deretić

**MODEL PRORAČUNA KAPACITETA  
MANEVRA LEVOG SKRETANJA SA  
PRIORITETNOG PRILAZA  
NESIGNALISANE RASKRSNICE**

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

Novi Sad, 2018.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА  
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР:</b>	
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>	
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска документација
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Текстуални штампани материјал
Врста рада, <b>ВР:</b>	Докторска дисертација
Аутор, <b>АУ:</b>	Немања Деретић
Ментор, <b>МН:</b>	Др Вук Богдановић, ванредни професор
Наслов рада, <b>НР:</b>	Модел прорачуна капацитета маневра левог скретања са приоритетног прилаза несигналисане раскрснице
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски
Земља публиковања, <b>ЗП:</b>	Република Србија
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	Војводина
Година, <b>ГО:</b>	2018
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Факултет техничких наука
Место и адреса, <b>МА:</b>	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	7 поглавља / 107 страна / 76 цитата / 25 табела / 52 слике / - / -
Научна област, <b>НО:</b>	Саобраћајно инжењерство
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Планирање, пројектовање и безбедност саобраћаја
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Капацитет друмских саобраћајница / Капацитет, приоритет, стандардна несигналисана раскрсница, интервал слеђења, конфликтни ток, ниво услуге
<b>УДК</b>	
Чува се, <b>ЧУ:</b>	Библиотека Факултета техничких наука у Новом Саду, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад
Важна напомена, <b>ВН:</b>	
Извод, <b>ИЗ:</b>	<p>Пре обављања левог маневра, са приоритетног прилаза <i>TWSC</i> несигналисане раскрснице, возач процењује интервал који се јавља у конфликтном току и бира онај интервал који му је највише прихватљив. Време које је потребно за процену прихватљивог интервала је представљено у виду времена чекања у опслузи возила на раскрсници. Са појавом прихватљивог интервала, време чекања у опслузи возила се завршава, и тада почиње време за извођење маневра левог скретања. Одлука о моменту почетка извођења маневра левог скретања је субјективна и заснива се на процени возача. Исправна субјективна процена увек резервише безбедносно време. У овој дисертацији је представљен развој детаљног математичког поступка за прорачун безбедносног времена. Мерења на несигналисаним раскрсницама су доказала примењивост предложеног модела, могућност прорачуна субјективног безбедносног времена и високо учешће безбедносног времена у критичном интервалу (око једне трећине). Добијени резултати су високо сагласни са <i>HCM</i>.</p>
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	
Датум одбране, <b>ДО:</b>	
Чланови комисије, <b>КО:</b>	Председник: др Илија Танацков, редовни професор
	Члан: др Драженко Главић, ванредни професор
	Члан: др Ненад Рушкић, доцент
	Члан: др Валентина Басарић, ванредни професор
	Члан, ментор: др Вук Богдановић, редовни професор
	Потпис ментора



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА  
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monographic publication
Type of record, <b>TR</b> :	Printed textual material
Contents code, <b>CC</b> :	Ph. D. thesis
Author, <b>AU</b> :	Nemanja Deretić
Mentor, <b>MN</b> :	Ph.D. Vuk Bogdanović, Associate Professor
Title, <b>TI</b> :	Model for capacity calculation of left turn manoeuvre from priority approach at unsignalized intersections
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	English
Country of publication, <b>CP</b> :	Republic of Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2018
Publisher, <b>PB</b> :	Faculty of Tehnical Sciences
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	7 chapters / 107 pages / 76 ref./ 25 tables / 52 pictures / - / -
Scientific field, <b>SF</b> :	Traffic engineering
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Planning, design and safety of traffic
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Capacity of road traffic / Capacity, priority, standard unsignalized intersection, headway, conflict flow, level of service
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	Library of the Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	<p>Before the left turn manoeuvre, from priority approach at <i>TWSC</i> unsignalized intersection, the driver estimates the interval occurring in the conflict flow and chooses the one which is most acceptable for him. The time required for evaluation of acceptable interval is presented by the service waiting time of vehicles at an intersection. With the appearance of an acceptable interval, service waiting time for vehicle ends, and then starts a time for performance of left turn manoeuvre. A decision about the moment of starting left turn manoeuvre is subjective and based on a driver's estimate. Correct subjective evaluation always reserves the safety time. This dissertation presents development of a detailed mathematical procedure for calculation form of safety time. Measurements at unsignalized intersections are proven applicability of the proposed model, possibility of calculation subjective safety time and high participation of safety time in critical gap (about one-third). The obtained results are highly consistent with <i>HCM</i>.</p>
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	
President:	Ilija Tanackov, PhD, full professor
Member:	Draženko Glavić, PhD, associate professor
Member:	Nenad Ruškić, PhD, assistant professor
Member:	Valentina Basarić, PhD, associate professor
Member, Mentor:	Vuk Bogdanović, PhD, full professor
	Menthor's sign

## Sadržaj

Spisak tabela.....	V
Spisak slika .....	VI
Spisak oznaka i skraćenica .....	VIII
Rezime .....	X
Abstract .....	XI
1. Uvod .....	1
1.1. Definisanje problema i cilja istraživanja.....	2
1.1.1. Cilj istraživanja .....	7
1.2. Postavljanje polazne hipoteze.....	12
1.3. Metode istraživanja .....	12
1.4. Prikaz strukture doktorske disertacije po poglavljima.....	13
2. Opšte karakteristike standardnih nesignalisanih raskrsnica.....	15
2.1. Standardne nesignalisane raskrsnice .....	16
2.1.1. Raskrsnice AWSC.....	17
2.1.2. Raskrsnice TWSC .....	17
2.1.3. Saobraćajni znakovi i označavanje prilaza standardnih nesignalisanih raskrsnica .....	19
2.1.4. Podela nesignalisanih raskrsnica prema geometriji.....	21
2.1.5. Podela nesignalisanih raskrsnica prema tipovima.....	21
2.1.6. Prilaz nesignalisane raskrsnice .....	23
2.2. Odvijanje saobraćaja na standardnoj nesignalisanoj raskrsnici .....	24
2.3. Proračun kapaciteta standardnih nesignalisanih raskrsnica prema <i>HCM</i> (2000) .....	26
3. Analiza postojećih istraživanja i postupaka proračuna kapaciteta i nivoa usluge standardnih nesignalisanih raskrsnica.....	34
3.1. Istorijski pregled najvažnijih metoda za procenu kritičnih intervala sleđenja i istraživanja standardnih nesignalisanih raskrsnica .....	34
3.2. Nesignalisane raskrsnice u priručniku <i>HCM</i> (1965) .....	37
3.2.1. Nesignalisane raskrsnice regulisane saobraćajnim znakom „YIELD“ ..	37
3.2.2. Nesignalisane raskrsnice regulisane saobraćajnim znakom „STOP“ ..	38
3.2.3. Nesignalisane raskrsnice koje na dva sporedna prilaza imaju saobraćajni znak „STOP“ .....	39
3.3. Nesignalisane raskrsnice u priručniku <i>HCM</i> (1985) .....	42
3.4. Nesignalisane raskrsnice u priručniku <i>HCM</i> (1994) .....	49
3.5. Nesignalisane raskrsnice u priručniku <i>HCM</i> (2000/2010) .....	54
3.6. Diskusija o postupcima za proračun kapaciteta nesignalisanih raskrsnica.....	55

4.	Model proračuna kapaciteta manevra levog skretanja sa prioritetnog prilaza standardne nesignalisane raskrsnice .....	57
4.1.	Opisivanje osnovnih parametara saobraćajnog toka pomoću raspodela verovatnoća slučajnih promenljivih .....	57
4.2.	Osnovne postavke novog modela .....	60
4.3.	Deklaracija elementarnih neprekidnih slučajnih promenljivih i njihove relacije .....	62
4.4.	Proračun elementarnih verovatnoća i vremena čekanja u opsluzi $t_{sw}$ na raskrsnici .....	68
4.5.	Provera normativnog uslova i obrazac za proračun srednjeg vremena čekanja .....	75
5.	Definisanje područja i metodologije istraživanja .....	79
5.1.	Područje istraživanja za merenje parametara saobraćajnog toka .....	79
5.2.	Metodologija istraživanja .....	80
5.3.	Merenje parametara saobraćajnog toka .....	81
6.	Prikaz rezultata istraživanja i testiranje modela .....	85
6.1.	Rezultati istraživanja .....	86
6.1.1.	Vrednosti tokova vozila na raskrsnicama .....	86
6.1.2.	Analiza vrednosti slučajne promenljive $T_a$ .....	87
6.1.3.	Analiza vrednosti slučajne promenljive $T_m$ .....	91
6.1.4.	Analiza vrednosti slučajne promenljive $T_h$ .....	93
6.2.	Validacija modela .....	95
7.	Zaključna razmatranja i pravci daljih istraživanja .....	101
	Literatura .....	103

## *POSVETA*

Doktorat posvećujem mojim roditeljima

## ZAHVALNICA

*Ovim putem bih hteo da se zahvalim svom mentoru, prof. dr Vuku Bogdanoviću i prof. dr Iliji Tanackovu za neizmernu pomoć, podršku, strpljenje i poverenje, koje su mi ukazali i koji su me na pravi način uputili i vodili kroz celi postupak istraživanja, postavljanja modela i njegove kasnije validacije u doktorskoj disertaciji.*

*Zahvaljujem se i svojoj porodici na velikoj podršci koju su mi pružali tokom studija.*

*Nemanja N. Deretić*

## Spisak tabela

Tabela 2.1 Bazne vrednosti kritičnog intervala sleđenja i intervala sleđenja na standardnoj TWSC raskrsnici.....	29
Tabela 2.2 Kriterijum nivoa usluge na TWSC raskrsnicama .....	33
Tabela 3.1 Primeri kapaciteta za raskrsnice sa četiri prilaza, regulisane saobraćajnim znakom „STOP“, sa ujednačenim tokovima (odnos saobraćaja na pravcima koji se ukrštaju je 50:50).....	39
Tabela 3.2 Primeri kapaciteta za četvorokrake raskrsnice (gde se ukrštaju 2 pravca sa po 2 trake), regulisane saobraćajnim znakom „STOP“, gde varira odnos veličine tokova koji se ukrštaju .....	40
Tabela 3.3 Ekvivalenti za pretvaranje realnog u uslovno homogen tok na nesignalisanim raskrsnicama .....	43
Tabela 3.4 Definicije i proračun konfliktnih saobraćajnih tokova .....	44
Tabela 3.5 Vrednosti kritičnog intervala sleđenja za putničke automobile u [s], na nesignalisanim raskrsnicama .....	45
Tabela 3.6 Kriterijumi za nivo usluge na nesignalisanim raskrsnicama.....	48
Tabela 3.7 Definicije i proračun konfliktnih tokova za dva sporedna prilaza.....	51
Tabela 3.8 Vrednosti kritičnog intervala $t_g$ i vremena sleđenja $t_f$ na TWSC raskrsnicama.....	52
Tabela 3.9 Kriterijumi za nivoe usluge TWSC raskrsnica.....	54
Tabela 5.1 Broj vozila u levom skretanju po raskrsnicama.....	80
Tabela 6.1 Broj vozila u levom skretanju po raskrsnicama.....	86
Tabela 6.2 Broj vozila u kretanju pravo na prioritetnom prilazu sa suprotnog prilaza u odnosu na prilaz sa koga vozila vrše manevar levog skretanja po raskrsnicama.....	87
Tabela 6.3 Broj PA koji su se zaustavili pre manevra levog skretanja.....	87
Tabela 6.4 Deskriptivne mere za vrednost parametra $t_a$ bez outliers .....	88
Tabela 6.5 Raspodele verovatnoća za vrednosti parametra $t_a$ .....	89
Tabela 6.6 Deskriptivne mere za vrednost parametra $t_m$ sa outliers.....	92
Tabela 6.7 Raspodele verovatnoća za vrednosti parametra $t_m$ .....	92
Tabela 6.8 Deskriptivne mere za vrednost parametra $t_h$ sa outliers .....	93
Tabela 6.9 Raspodele verovatnoća za vrednosti parametra $t_h$ .....	94
Tabela 6.10 Osnovni podaci o tokovima vozila na izabranim raskrsnicama.....	96
Tabela 6.11 Statističke srednje vrednosti objektivnih vremena i proračunato subjektivno vreme – safety time, za raskrsnice u validaciji modela .....	96
Tabela 6.12 Parametri verifikacije Weibulove raspodele sa rezultatima $\chi^2$ testa.....	97
Tabela 6.13 Statističke srednje vrednosti objektivnih vremena i proračunato subjektivno vreme – safety time, za raskrsnice pre validacije modela.....	100



## Spisak slika

Slika 1.1 Prikaz slučaja 1 .....	9
Slika 1.2 Prikaz slučaja 2 .....	9
Slika 1.3 Prikaz slučaja 3 (prva varijanta).....	9
Slika 1.4 Prikaz slučaja 4 (prva varijanta).....	10
Slika 2.1 Saobraćajni tokovi na tipičnoj četvorokrakoj AWSC raskrsnici .....	17
Slika 2.2 Saobraćajni tokovi i rangovi na standardnoj četvorokrakoj nesignalisanoj raskrsnici .....	18
Slika 2.3 Saobraćajni tokovi i rangovi na standardnoj trokrakoj nesignalisanoj raskrsnici .....	18
Slika 2.4 Saobraćajni znakovi na standardnim nesignalisanim raskrsnicama .....	19
Slika 2.5 Šematski prikaz raskrsnice čiji su sporedni prilazi regulisani znakom prioriteta .....	19
Slika 2.6 Šematski prikaz raskrsnica na kojima su svi prilazi regulisani znacima prioriteta .....	20
Slika 2.7 Šematski prikaz ukrštanja u nivou u zavisnosti od njihove geometrije.....	21
Slika 2.8 Prioritetna raskrsnica tipa A.....	22
Slika 2.9 Prioritetna raskrsnica tipa B.....	22
Slika 2.10 Prioritetna raskrsnica tipa C.....	22
Slika 2.11 Prilaz prioritetne raskrsnice .....	23
Slika 2.12 Konfiguracije ulivnih grla sa dve odnosno tri saobraćajne trake .....	23
Slika 2.13 Tokovi i rangovi na standardnoj četvorokrakoj nesignalisanoj raskrsnici ..	24
Slika 2.14 Tokovi i rangovi na standardnoj trokrakoj nesignalisanoj raskrsnici.....	24
Slika 2.15 Algoritam proračuna kapaciteta i nivoa usluge na prioritetnim raskrsnicama čiji su sporedni prilazi regulisani znacima obaveznog zaustavljanja.....	30
Slika 2.16 Definicija i izračunavanje konfliktnih tokova .....	31
Slika 3.1 Potencijalni kapacitet u zavisnosti od konfliktnog toka i kritičnog intervala ..	46
Slika 3.2 Ilustracija za proračune ometanja (Slučaj 1).....	46
Slika 3.3 Ilustracija za proračune ometanja (Slučajevi 2 i 3) .....	47
Slika 3.4 Faktori ometanja kao rezultat zagušenih manevara .....	47
Slika 3.5 Saobraćajni tokovi na nesignalisanoj raskrsnici.....	50
Slika 3.6 Potencijalni kapacitet zasnovan na konfliktnom toku i tipu manevra (dvotračni put) .....	53
Slika 3.7 Saobraćajni tokovi na nesignalisanoj raskrsnici.....	54
Slika 4.1 Standardna nesignalisana raskrsnica sa posebnom (izdvojenom) trakom za leva skretanja sa prioritetnih prilaza .....	61
Slika 4.2 Grafički prikaz slučajnih promenljivih $T_a$ i $T_b$ preko srednjih vrednosti .....	64
Slika 4.3 Dekompozicija kritičnog intervala na konvolutivne slučajne promenljive u idealnom teorijskom slučaju .....	65
Slika 4.4 Struktura $T_{sw}$ u slučaju $t_c < T_h < \infty$ .....	66
Slika 4.5 Struktura $T_{sw}$ u slučaju $0 < T_h < t_c$ .....	67
Slika 4.6 Grafički prikaz potpunog sistema događaja za slučaj prvog intervala prioriternog toka većeg od kritičnog intervala i pristupa prvog vozila sporednog toka u podintervalu $[t_h^+ - t_b, t_h^+]$ .....	71
Slika 4.7 Grafički prikaz potpunog sistema događaja za slučaj kada je prvi vremenski interval sleđenja u prioriternom toku manji od kritičnog intervala sleđenja .....	73
Slika 5.1 Kamera kojom je vršeno snimanje.....	82
Slika 5.2 Prikaz parametara izabranog frejma.....	82

Slika 5.3 Prikaz video zapisa lokacije raskrsnice u Doboju (program KMPlayer) .....	82
Slika 5.4 Trenuci koji su potrebni za određivanje vrednosti slučajne promenljive $T_a$	84
Slika 6.1 Opis vrednosti koje se nalaze na Box-plot-u.....	86
Slika 6.2 Box-plot za vrednosti $t_a$ sa outliers.....	88
Slika 6.3 Box-plot za vrednosti parametra $t_a$ bez outliers .....	89
Slika 6.4 Slaganje vrednosti parametra $t_a$ sa lognormalnom raspodelom za raskrsnicu NS-1 .....	90
Slika 6.5 Slaganje vrednosti parametra $t_a$ sa lognormalnom raspodelom za raskrsnicu PA-1 .....	90
Slika 6.6 Slaganje vrednosti parametra $t_a$ sa logističkom raspodelom za raskrsnicu DO-1.....	91
Slika 6.7 Box-plot za vrednosti parametra $t_m$ sa outliers.....	91
Slika 6.8 Slika 6.9 Slaganje vrednosti parametra $t_m$ sa lognormalnom raspodelom za raskrsnicu BG-B1 .....	93
Slika 6.10 Slaganje dolazaka vozila na raskrsnicu DO-1 sa Poasonovom raspodelom verovatnoća (Minitab 17).....	94
Slika 6.11 Slaganje dolazaka vozila na raskrsnicu NS-1 sa Poasonovom raspodelom verovatnoća (Statistica).....	95
Slika 6.12 Verifikacija Vejbulove raspodele za raskrsnicu BG-A .....	97
Slika 6.13 Verifikacija Vejbulove raspodele za raskrsnicu BG-B1 .....	97
Slika 6.14 Koeficijent korelacije i jednačina linearne regresije bezbednosnog vremena (safety time) i vremena čekanja u opsluzi vozila u skretanju levo (service waiting time) za 5 raskrsnica .....	98
Slika 6.15 Koeficijent korelacije i jednačina linearne regresije bezbednosnog vremena (safety time) i toka vozila u kretanju pravo sa suprotnog prilaza (intensity of vehicles from the main road moving through) za 5 raskrsnica.....	99

## Spisak oznaka i skraćenica

- SNR – standardna nesignalisana raskrsnica;  
NNR – nestandardna nesignalisana raskrsnica;  
HCM – Highway Capacity Manual;  
TWSC (engl. *Two way stop controlled*) – raskrsnice tipa TWSC predstavljaju prioritetne raskrsnice, a za regulisanje režima saobraćaja na sporednim prilazima prioritetnih raskrsnica, osim saobraćajnog znaka „obavezno zaustavljanje” (II-2), koristi se i saobraćajni znak „ustupanje prvenstva prolaza” (II-1);  
AWSC (engl. *All way stop controlled*) – Raskrsnice tipa AWSC predstavljaju prioritetne raskrsnice, a za regulisanje režima saobraćaja na sporednim prilazima prioritetnih raskrsnica, osim saobraćajnog znaka „obavezno zaustavljanje” (II-2), koristi se i saobraćajni znak „ustupanje prvenstva prolaza” (II-1);  
PSS – Pravilnik o saobraćajnoj signalizaciji;  
 $T_{sw}$  – Slučajna promenljiva koja predstavlja vreme čekanja u opsluzi vozila sporednog toka, koje obavlja manevar levog skretanja iz posebne trake za levo skretanje, sa prvog mesta u redu (engl. *service waiting time*);  
 $T_h$  – Slučajna promenljiva koja predstavlja vremenski interval sleđenja vozila prioritetnog toka (engl. *headway*);  
 $T_a$  – Slučajna promenljiva koja predstavlja vreme od prolaska prethodnog vozila prioritetnog toka, kroz posmatrani presek raskrsnice do prolaska vozila sporednog toka, koje obavlja manevar levog skretanja (engl. *time after vehicle*);  
 $T_b$  – Slučajna promenljiva koja predstavlja vreme od prolaska vozila sporednog toka, koje obavlja manevar levog skretanja, do prolaska sledećeg vozila prioritetnog toka, kroz posmatrani presek raskrsnice (engl. *time before vehicle*);  
 $t_{sw}$  – vrednost slučajne promenljive  $T_{sw}$ ;  
 $t_h$  – vrednost slučajne promenljive  $T_h$ ;  
 $t_a$  – vrednost slučajne promenljive  $T_a$ ;  
 $t_b$  – vrednost slučajne promenljive  $T_b$ ;  
 $t_c$  – kritični interval sleđenja vozila u prioritetnom toku;  
 $t_f$  – interval sleđenja vozila u sporednom toku;  
(T) raskrsnice – trokrake raskrsnice;  
(+) raskrsnice – četvorokrake raskrsnice;  
GP – glavni saobraćajni pravac;  
SP – sporedni saobraćajni pravac;  
L – dužina prilaza raskrsnici;  
 $V_{max}$  – maksimalna brzina na napojnoj deonici puta;  
LOS (engl. *Level of service*) – nivo usluge;  
 $V_{c,x}$  – veličina konfliktnog saobraćaja na posmatranom sporednom toku  $x$ ;  
 $c_{p,x}$  – potencijalni kapacitet sporednog manevra  $x$  [voz/h];  
 $v_{c,x}$  – konfliktni tok za sporedni manevar  $x$  [voz/h];  
 $t_{c,x}$  – kritični interval sleđenja za sporedni manevar  $x$  [s];  
 $t_{f,x}$  – interval sleđenja na sporednom pravcu za manevar  $x$  [s];  
 $t_{c,base}$  – bazni kritični interval sleđenja,  
 $t_{c,HV}$  – faktor prilagođavanja za teretna vozila;  
 $P_{HV}$  – procenat teretnih vozila u sporednom toku;

$t_{c,G}$  – faktor prilagođavanja za nagib na sporednom prilazu;  
 $G$  – procenat nagiba u apsolutnoj vrednosti;  
 $t_{c,T}$  – faktor prilagođavanja za dvofazno izvođenje sporednog manevra;  
 $t_{3,LT}$  – faktor prilagođavanja geometriji raskrsnice;  
 $t_{f,base}$  – bazni interval sleđenja vozila u sporednom toku,  
 $t_{f,HV}$  – faktor prilagođavanja za teretna vozila;  
 $d$  – prosečni vremenski gubici za manevar [s/voz];  
 $v_x$  – tok kretanja  $x$  [voz/h];  
 $c_{m,x}$  – (merodavni) kapacitet kretanja  $x$  [voz/h];  
 $T$  – analizirani period;  
 $c_{SH}$  – kapacitet zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];  
 $v_l$  – intenzitet levog skretanja iz zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];  
 $v_t$  – intenzitet kretanja pravo iz zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];  
 $v_r$  – intenzitet desnog skretanja iz zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];  
 $c_{ml}$  – kapacitet levog skretanja iz zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];  
 $c_{mt}$  – kapacitet kretanja pravo iz zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];  
 $c_{mr}$  – kapacitet desnog skretanja iz zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];  
 $c_R$  – rezerva ili nekorišćeni kapacitet saobraćajne trake [PA/h];  
 $v$  – ukupan intenzitet saobraćajnog toka koji koristi saobraćajnu traku [PA/h];  
 $V_{c,y}$  – veličina konfliktnog toka  $y$  [voz/h];  
 $t_g$  – kritični vremenski interval, koga mogu prihvatiti kretanja sa sporednog pravca [s];  
 $t_f$  – vremenski interval (kašnjenja) vozila pri startovanju iz reda na sporednom pravcu [s];  
 $D$  – prosečni vremenski gubici za celu raskrsnicu [s/voz];  
 $\lambda_h$  – Intenzitet prioritetnog toka;  
 $f(t)$  – funkcija gustine raspodele;  
 $F(t)$  – funkcija raspodele verovatnoća;  
 $E(X)$  – matematičko očekivanje slučajne promenljive  $X$ ;  
 $p=P(X<x)$  – verovatnoća da slučajna promenljiva  $X$  uzima vrednost manju od  $x$ ;  
 $p$  vrednost – vrednost koja se koristi u statističkom testiranju hipoteza;  
 $DF$  – broj stepeni slobode (engl. degrees of freedom);  
 $Chi-Sq$  – računaska vrednost *Hi kvadrat* testa;  
 $l_v$  – prosečna dužina vozila;  
 $v_v$  – prosečna brzina vozila;  
 $t_r$  – prosečno vreme reagovanja sistema vozač-vozilo;  
 $t_m$  – prosečno vreme manevra;  
 $t_s$  – bezbednosno vreme (engl. *safety time*);  
 $m$  – broj vozila u skretanju levo sa prioritetnog prilaza;  
 $m_l$  – broj putničkih automobila u skretanju levo sa prioritetnog prilaza;  
 $100 \cdot m_l / m$  – procenat putničkih automobila u toku vozila u skretanju levo sa prioritetnog prilaza;  
 $r$  – koeficijent korelacije;  
 $\lambda$  – broja vozila u kretanju pravo sa prioritetnog prilaza u sekundi.

## Rezime

Pre izvođenja levog manevra sa prioritetnog prilaza standardne nesignalisane raskrsnice, vozač procenjuje interval koji se javlja u konfliktnom toku i bira onaj koji je najviše prihvatljiv za njega. Okolnosti subjektivne procene intervala su evidentne u razlikama minimalno prihvaćenog i maksimalno odbačenog intervala. Vreme potrebno za procenu prihvatljivog intervala je predstavljeno vremenom čekanja vozila na raskrsnici. Sa pojavom prihvatljivog intervala, završava se vreme čekanja vozila  $t_{sw}$ , a počinje vreme za izvođenje manevra levog skretanja. Manevar levog skretanja podrazumeva prelazak vozila preko saobraćajne trake konfliktnog toka. U slučaju loše subjektivne procene, moguć je konflikt vozila na raskrsnici. Manevar levog skretanja se obavlja u intervalu između vozila konfliktnog toka, a odluka o početku izvođenja manevra levog skretanja je subjektivna i zasniva se na proceni vozača da će se manevar izvesti u intervalu pre dolaska narednog vozila konfliktnog toka. Ispravna subjektivna procena uvek rezerviše bezbednosno vreme  $t_s$ . Dosadašnji modeli su zasnovani na proceni  $t_s$ . U radu je data detaljna matematička procedura razvoja obrasca za proračun bezbednosnog vremena  $t_s$ . Matematička procedura je zasnovana na teoriji verovatnoće. Merenjima u praksi je dokazana primenljivost predloženog modela, mogućnost proračuna subjektivnog vremena (bezbednosnog vremena)  $t_s$ , visoko učešće bezbednosnog vremena  $t_s$  u kritičnom intervalu  $t_c$ . Dobijeni rezultati su visoko saglasni sa HCM. Srednja vrednost subjektivnog vremena potrebnog za bezbedno izvođenje manevra levog skretanja zavisi od mnogih faktora, ali najviše od strukture prioritetnog toka. Sa povećanjem intenziteta prioritetnog toka  $\lambda_h$ , uočena je adaptacija vozača vozila u levom skretanju. Sa povećanjem intenziteta vozila u prioritetnom toku smanjuje se srednja vrednost intervala sleđenja  $t_h=1/\lambda_h$ , a pojava povoljnih intervala za manevar levog skretanja se smanjuje. Zbog toga, vozači vozila u levom skretanju prihvataju kraće intervale na račun skraćivanja subjektivnog bezbednosnog vremena, a rizik saobraćajne nezgode se povećava. U ovim situacijama je verovatna kompenzacija usporavanjem vozila prioritetnog toka, što ima za posledicu smanjenje kapaciteta i nivoa usluge. Na osnovu merenja i proračuna bezbednosnog vremena, ustanovljeno je da subjektivno bezbednosno vreme prosečno participira sa jednom trećinom vremena u kritičnom intervalu. Predloženi model se uz određena prilagođavanja može primeniti i za sve druge sporedne manevre na svim tipovima TWSC nesignalisanih raskrsnica, bez obzira na geometrijske karakteristike, broj saobraćajnih traka na prilazima, itd. Osim za homogene tokove putničkih automobila, model se može primeniti i za heterogene saobraćajne tokove. U slučaju kada u strukturi saobraćajnog toka postoje komercijalna vozila, sporedni manevar će biti veći zbog dužeg vremena prolaska vozila  $t_v$ . Ukoliko komercijalna vozila vrše sporedni manevar njihovo srednje vreme reakcije  $t_r$  ili srednje vreme potrebno za izvođenje manevra  $t_m$  će se povećati, što će dovesti do veće vrednosti kritičnog intervala sleđenja  $t_c$ . Vrednost kritičnog intervala za iste strukture saobraćajnog toka i različite intenzitete prioritetnog toka treba da bude isti ili veoma sličan. Proračunom kritičnog intervala sleđenja prema predloženom modelu stvaraju se uslovi za precizniji proračun kapaciteta prioritetnih raskrsnica.

**Ključne reči:** levo skretanje, kritični interval, bezbednosno vreme, ponašanje vozača, model, nesignalisana raskrsnica

## Abstract

Before the left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersection, the driver estimates the interval occurring in the conflict flow and chooses the one which is most acceptable for him. The circumstances of subjective estimations of intervals are evident in differences between minimum accepted and maximum rejected interval. The time required for evaluation of acceptable interval is presented by the service waiting time of vehicles at an intersection. With the appearance of an acceptable interval, service waiting vehicle  $t_{sw}$  ends, and then starts a time for performance of the left turn manoeuvre. Left turn manoeuvre involves the crossing of turning vehicles across traffic lane of conflict traffic flow. In the case of bad subjective assessment, it is possible a conflict between vehicles at an unsignalized intersection. Left turn manoeuvre is performed in a interval between vehicles of conflict flow, and a decision about moment of starting left turn manoeuvre is subjective and based on an driver's estimate that manoeuvre will be conducted in the interval before the arrival of the next vehicle from conflict flow. Correct subjective evaluation always reserves the safety time  $t_s$ . The current models are based on the estimation of safety time  $t_s$ . This paper presents development of a detailed mathematical procedure for calculation form of safety time  $t_s$ . The mathematical procedure is based on the theory of probability. Measurements at unsignalized intersections has proven applicability of the proposed model, possibility of calculation subjective safety time and high participation of safety time  $t_s$  in critical gap  $t_c$ . The obtained results are highly consistent with HCM. The mean value of subjective time required for safely performing left turn manoeuvre depends on many factors, but most of the structure of the priority traffic stream. With the increasing intensity of the priority traffic stream  $\lambda_h$ , it is observed adaptation of drivers performing left turn manoeuvre. Also, with the increasing intensity of the priority traffic stream, mean interval between successive vehicles is decreasing  $t_h=1/\lambda_h$ , and in that manner negatively affects on the occurrence of acceptable intervals for left turn manoeuvre. Therefore, drivers of vehicles performing left turn manoeuvre accept shorter intervals at the expense of shortening subjective safety time, and the risk of traffic accident increases. In these situations, there is probably compensation in priority traffic stream by deceleration of vehicles, which results in a reduction in capacity and level of service. Based on the measurement at unsignalized intersections and calculation safety time, it is found that average participation of subjective safety time is one third of the critical interval. The proposed model, with certain adjustments, can be applied to all other minor manoeuvres at all types of TWSC unsignalized intersections, regardless of geometric characteristics, number of traffic lanes on approaches, etc. Apart from the homogeneous flows of passenger cars, the model can be applied to heterogeneous traffic flows. In case when in the structure of the traffic flow there are commercial vehicles, the minor will be burdened by longer mean time necessary for the vehicles passing  $t_v$ . If the commercial vehicles perform the minor manoeuvre, their mean reaction time  $t_r$  or the mean time necessary for performing the manoeuvre  $t_m$  will increase, which will bring to the higher value of the critical headway  $t_c$ . The value of the critical gap for the same structures of traffic flow and different intensities of the priority flow should be the same or very similar. Critical headway calculation, according to the proposed model, creates the conditions for a more precise calculation of unsignalized intersections capacity.

**Keywords:** left turn, critical interval, safety time, driver behaviour, model, unsignalized intersection

## 1. Uvod

Širom sveta, raskrsnice na kojima je saobraćaj regulisan opštim pravilima saobraćaja i raskrsnice na kojima se saobraćaj reguliše preko saobraćajnih znakova prioriteta se zajedničkim imenom nazivaju nesignalisane raskrsnice. U okviru rada neće biti analizirane raskrsnice na kojima je saobraćaj regulisan isključivo opštim pravilima saobraćaja. Iz tog razloga u disertaciji termin „nesignalisana raskrsnica“ se odnosi isključivo na raskrsnice na kojima je saobraćaj regulisan znacima kojima se određuje prioritet.

U disertaciji su analizirane standardne nesignalisane raskrsnice, koje se definišu kao raskrsnice, kod kojih se dva prioritetna prilaza nalaze jedan naspram drugog. Pored naziva nesignalisane raskrsnice, za raskrsnice na kojima je saobraćaj regulisan znacima prioriteta, koristi se i termin prioritetne raskrsnice, a koji se često koristi i u našoj zemlji. Na ovom tipu raskrsnica redosled prioriteta u redosledu izvođenja manevara je definisan saobraćajnim znacima i pravilom desne strane.

U skladu sa (Troutbeck & Brilon, 2001), nesignalisane raskrsnice su najčešći tip ukrštanja na mreži drumskih saobraćajnica. Prema Bogdanović i dr. (Bogdanović, Papić, Ruškić, & Leković, 2009), prioritetne raskrsnice su obično četvorokrake ili trokrake raskrsnice na kojima se saobraćajnim znacima određuje pravo prvenstva prolaza za vozila sa puteva, koji se ukrštaju u zajedničkom središtu raskrsnice. Po pravilu, na ovakvim raskrsnicama, jedan pravac se proglašava za glavni i saobraćajnim znacima se određuje za prioritetni, dok se vozila sa sporednih prilaza obavezuju na ustupanje prvenstva prolaza vozilima na glavnom (prioritetnom) pravcu. Ponašanje vozača u saobraćajnom toku, na prilazima nesignalisane raskrsnice razlikuje se u zavisnosti od mnogih faktora, kako objektivnih tako i subjektivnih.

Počevši od priručnika HCM (engl. *Highway Capacity Manual*) iz 1994. godine (HCM, 1994), na prioritetne raskrsnice se odnosi skraćena TWSC (engl. *Two way stop controlled*), a za regulisanje režima saobraćaja na sporednim prilazima prioritetnih raskrsnica, osim saobraćajnog znaka „obavezno zaustavljanje“ (II-2), koristi se i saobraćajni znak „ustupanje prvenstva prolaza“ (II-1)

## 1.1. Definisanje problema i cilja istraživanja

U skladu sa *Troutbeck* i *Brilon* ([Troutbeck & Brilon, 2001](#)), na nesignalisanim raskrsnicama postoji hijerarhija saobraćajnih tokova. Neki tokovi imaju apsolutni prioritet, dok drugi tokovi ustupaju prvenstvo prolaza tokovima višeg prioriteta. U analizi nesignalisanih raskrsnica se koristi teorija prihvatljivih intervala sleđenja. Prema istom izvoru, teorija prihvatljivih intervala sleđenja je zasnovana na konceptu definisanja mere po kojoj će vozači sporednog toka moći da iskoriste vremenski interval određene veličine ili trajanja, između vozila saobraćajnog toka višeg prioriteta, za obavljanje svog manevra.

Kako se dalje navodi u ([Troutbeck & Brilon, 2001](#)), minimalni vremenski interval, između vozila saobraćajnog toka višeg prioriteta, koji se pretpostavlja da je prihvatljiv za sve vozače u sporednom toku na sličnim lokacijama, je kritični interval. Prema modelu ponašanja vozača, koji se obično pretpostavlja, vozač sporednog toka neće ući u središte raskrsnice ako vremenski interval, između vozila saobraćajnog toka višeg prioriteta, nije jednak ili veći od kritičnog intervala. U teoriji prihvatljivih intervala, dalje je razmatran broj vozača iz sporednog toka, koji mogu da prođu kroz središte raskrsnice, u dugim intervalima između vozila saobraćajnog toka višeg prioriteta. Obično, vozači sporednog toka, koji ustupaju prvenstvo prolaza, ulaze u duge intervale između vozila saobraćajnog toka višeg prioriteta, u intervalima koji se nazivaju vremenima sleđenja vozila u sporednom toku.

Prema *Kuzović* i *Bogdanović* ([Kuzović & Bogdanović, 2010](#)), sa praktičnog aspekta, interval sleđenja vozila, kao pokazatelj (parametar) saobraćajnog toka, predstavlja vreme između prolaska čela dva uzastopna vozila, u jednom smeru za jednosmerne saobraćajnice, odnosno u oba smera za dvosmerne saobraćajnice, kroz zamišljeni presek posmatranog odseka puta. Prema istim autorima, rastojanje sleđenja vozila predstavlja prostorni razmak između čela dva uzastopna vozila u saobraćajnom toku, u jednom smeru za jednosmerne saobraćajnice, odnosno u oba smera za dvosmerne saobraćajnice.

Prema *Luttinen* ([Luttinen, 2003](#)), matematički gledano, dolazak vozila na raskrsnicu se može posmatrati kao tačkasti proces, pri čemu dolazak svakog vozila predstavlja tačku na vremenskoj osi. Međutim, ako se razmotre definicije za interval sleđenja vozila i rastojanje sleđenja vozila, date u ([Kuzović & Bogdanović, 2010](#)), onda se vidi da se posmatraju prolasci čela dva uzastopna vozila, pa se dužina prvog od dva uzastopna vozila prioritetnog toka mora uzeti u obzir.

Vozilo sporednog toka ne može u potpunosti da iskoristi vremenski interval, između vozila saobraćajnog toka višeg ranga prioriteta, za obavljanje svog manevra, ako dolazi na početak intervala. Razlog što ne može da u potpunosti iskoristi navedeni interval, ako na primer dolazi na početak intervala, jeste dužina prvog vozila, jer vozilo sporednog toka mora da propusti vozilo saobraćajnog toka višeg ranga prioriteta, što iziskuje određeno vreme. Iz datog objašnjenja, u modelu, koji je razvijen u disertaciji, napušten je koncept materijalne tačke za dužinu vozila.



Prema *Brilon, Koenig i Troutbeck* (Brilon, Koenig, & Troutbeck, 1999) i *Troutbeck i Brilon* (Troutbeck & Brilon, 2001), dva kritična intervala, koja je potrebno da se procenjuju su: kritični interval između vozila višeg ranga prioriteta i vreme sleđenja vozila u sporednom toku. Prema ovim izvorima, tehnike koje se koriste za procenu ovih parametara se suštinski mogu svrstati u dve grupe. Prva grupa tehnika se zasniva na regresionoj analizi, u kojoj se posmatra broj vozača koji prihvataju vremenski interval i veličina vremenskog intervala. Druga grupa tehnika se odnosi na procenu gustina raspodela verovatnoća vremena sleđenja vozila u sporednom toku i kritičnog intervala između vozila višeg ranga prioriteta, pri čemu se ova dva vremenska intervala nezavisno posmatraju. Ako postoji neprekidni red vozila na sporednom toku, onda tehnika koju je predložio *Siegloch* (Siegloch, 1973), daje prihvatljive rezultate, zbog toga što izlazni rezultati odgovaraju pretpostavkama koje se koriste u analizi kritičnih intervala. Za primenu ove tehnike, neophodno je da u redu vozila na sporednom toku postoji bar jedno vozilo u celom periodu posmatranja.

Kao prvi korak iz regresione analize, dobija se stepenasta linija gde su na apscisnoj osi date prosečne vrednosti vremenskih intervala između vozila višeg ranga prioriteta (zavisna promenljiva), a na ordinatnoj osi je dat broj vozila koji su obavili manevar u odgovarajućem vremenskom intervalu. Stepenasta linija je u skladu sa pretpostavkama datim u radovima *Tanner* (Tanner, 1962), *Harders* (Harders, 1976) i *Troutbeck* (Troutbeck, 1986). Kao sledeći korak, dobija se prava linija koja predstavlja linearni regresioni model. Jednačina linearnog regresionog modela odražava pretpostavke date u radovima *Siegloch* (Siegloch, 1973), i *McDonald* i *Armitage* (McDonald & Armitage, 1978). Ako u sporednom toku ne postoji neprekidni red vozila, onda pristup regresione analize ne može biti korišćen. Umesto pomenutog pristupa može biti korišćen pristup preko verovatnoća (probabilistički pristup). U modelu koji je razvijen u disertaciji je korišćen probabilistički pristup, da model ne bi ograničavala pretpostavka o neprekidnom redu vozila u sporednom toku.

Kako se dalje navodi u (Brilon, Koenig, & Troutbeck, 1999) i (Troutbeck & Brilon, 2001), procena kritičnih intervala predstavlja težak zadatak, jer ne može direktno da se odredi iz merenja, a sa tim se slaže *Wu* (Wu, 2006). Prema ovim autorima, predložene su brojne tehnike: (Miller, 1972); (Ramsey & Routledge, 1973); (Troutbeck, 1975); (Hewitt, 1983); (Hewitt, 1985). Prema izveštaju *Kyte i dr.* (Kyte, i drugi, 1996) metod maksimalne verodostojnosti (engl. *Maximum Likelihood Method*) i metod *Hewitt* (Hewitt, 1983) daju najbolje rezultate u širokom rasponu sporednih i glavnih tokova. Prema (Brilon, Koenig, & Troutbeck, 1999), metod maksimalne verodostojnosti su prvi primenili *Miller* i *Pretty* (Miller & Pretty, 1968), a sam metod u mnogo preciznijoj formi je opisao *Troutbeck* (Troutbeck, 1992). Metod maksimalne verodostojnosti je predložen za upotrebu u priručnicima *HCM*, a prema teoriji statističke analize pripada metodi tačkastih ocena. U svim navedenim metodama, vremenski intervali su opisani preko neprekidnih slučajnih promenljivih. Model, koji je predstavljen u okviru disertacije, je takođe opisan preko neprekidnih slučajnih promenljivih. Prema *Vukadinović* i *Popović* (Vukadinović & Popović, 2004), slučajna promenljiva je neprekidna, ako sa pozitivnom verovatnoćom može da uzme proizvoljnu brojnu vrednost na određenom intervalu.

Prema *Croarkin* i *Tobias* ([Croarkin & Tobias, 2002](#)), nedostaci metode maksimalne verodostojnosti su sledeće:

- 1) Jednačine raspodela verovatnoća trebaju da budu izvedene za traženu raspodelu verovatnoća i problem koji se procenjuje. Matematičke operacije u proračunu često nisu trivijalne, a naročito u slučajevima kada se traže intervali poverenja za parametre raspodele;
- 2) Proračuni procene parametara često nisu trivijalni. Osim za nekoliko slučajeva gde su formule za metodu maksimalne verodostojnosti relativno jednostavne, u opštem slučaju se treba osloniti na visoko kvalitetni statistički softver;
- 3) Procene parametara preko metode maksimalne verodostojnosti mogu biti jako pristrasne za male veličine uzorka. Prema *Vukadinović* i *Popović* ([Vukadinović & Popović, 2004](#)), ocena parametra je centrirana ili nepristrasna, ako je njeno matematičko očekivanje jednako parametru osnovne populacije koji procenjuje;
- 4) Metoda maksimalne verodostojnosti može biti osetljiva na izbor početnih vrednosti.

U preglednim radovima, kao što su radovi *Miller* ([Miller, 1972](#)), *Kyte* i dr. ([Kyte, i drugi, 1996](#)), *Brilon*, *Koenig* i *Troutbeck* ([Brilon, Koenig, & Troutbeck, 1999](#)) i *Troutbeck* i *Brilon* ([Troutbeck & Brilon, 2001](#)) nije pomenut i nije prikazan nijedan metod kojim se vrši dekompozicija kritičnog intervala na merljive delove i subjektivni (nemerljivi) deo. U modelu koji je razvijen u disertaciji prikazana je dekompozicija kritičnog intervala na merljive delove i subjektivni (nemerljivi) deo na način koji do sada nije razmatran u dostupnoj literaturi.

U skladu sa ([Troutbeck & Brilon, 2001](#)), različiti autori su došli do zaključka da se vreme opsluge vozila sporednog toka na nesignalisanoj raskrsnici može opisati sa dva tipa (vrste) vremena opsluge, od kojih svaki tip ima svoju specifičnu raspodelu verovatnoća. Prvi tip se odnosi na vreme opsluge za vozila sporednog toka, koja ne zatiču drugo vozilo sporednog toka u čekanju da obavi svoj manevar. Drugi tip se odnosi na vreme opsluge za vozila sporednog toka, koja na prilazu raskrsnice zatiču red vozila u čekanju da obave svoj manevar i pridružuju se redu. Prve ideje su date u radovima *Kremser* ([Kremser, 1962](#)); ([Kremser, 1964](#)), *Tanner* ([Tanner, 1962](#)) i *Yeo* i *Weesakul* ([Yeo & Weesakul, 1964](#)). Od važnijih radova, koji su se bavili ovim pitanjem, prema ([Troutbeck & Brilon, 2001](#)), treba pomenuti radove *Daganzo* ([Daganzo, 1977](#)) i *Poeschl* ([Poeschl, 1983](#)).

Model, koji je predstavljen u okviru disertacije, uključuje u razmatranje vreme opsluge vozila sporednog toka na prvom mestu u redu na prilazu nesignalisane raskrsnice, pri čemu se pravi razlika u odnosu na ukupno vreme u redu čekanja. Vreme opsluge vozila sporednog toka na prvom mestu u redu i ukupno vreme čekanja predstavljaju merljiva vremena.

U dostupnim preglednim radovima ([Miller, 1972](#)); ([Kyte, i drugi, 1996](#)); ([Brilon, Koenig, & Troutbeck, 1999](#)); ([Troutbeck & Brilon, 2001](#)) u nijednom slučaju nije postavljena funkcionalna veza između merljivih i nemerljivog dela kritičnog intervala i vremena opsluge vozila sporednog toka na prvom mestu u redu na prilazu nesignalisane raskrsnice.

Prvi problem, koji istraživao u disertaciji, se bavi pitanjem da li je moguće uspostaviti funkcionalnu vezu između merljivih i nemerljivog dela kritičnog intervala i vremena opsluge vozila sporednog toka na prvom mestu u redu na prilazu nesignalisane raskrsnice. Kao rezultat predloženog modela dobija se procena vrednosti nemerljivog (subjektivnog) dela kritičnog intervala, čime se stižu uslovi za dobijanje preciznije vrednosti kritičnog intervala u odnosu na postojeće modele. Kako se dobija preciznija vrednost kritičnog intervala, samim tim se u daljem proračunu, prema metodi *HCM*, dobija preciznija vrednost kapaciteta sporednog manevra. Drugi problem se odnosio na korisnost modela, odnosno da li predloženi model daje upotrebljive rezultate.

Postupci za proračun kapaciteta na svim nesignalisanim raskrsnicama zasnovani su na modelima prihvatljivih intervala sleđenja, uz uvažavanje prava prvenstva prolaza kroz središte raskrsnice, koji je definisan sa četiri ranga, prema priručniku *Highway Capacity Manual*. ([HCM, 2000](#)); ([HCM, 2010](#)). Svako kretanje, odnosno manevar koji je moguće izvršiti na raskrsnici pripada odgovarajućem rangu (Slika 2.2 i Slika 2.3 u poglavlju 2). Prema navedenom priručniku, kapacitet nesignalisanih raskrsnica sa tri, odnosno četiri prilaza računa se prema modelu koji je razvio *Harders* ([Harders, 1968](#)). Svi manevri su označeni brojevima, po principu da dva naspramna prilaza, obično istočni i zapadni, predstavljaju glavni putni pravac, dok su južni i severni prilaz sporedni.

U skladu sa priručnikom *HCM*, zapadnom prilazu glavnog putnog pravca odgovaraju tokovi označeni sa brojevima: 1 (skretanje levo), 2 (kretanje pravo) i 3 (skretanje desno). Sa druge strane, istočnom prilazu glavnog putnog pravca odgovaraju tokovi označeni sa brojevima: 4 (skretanje levo), 5 (kretanje pravo) i 6 (skretanje desno). U daljem tekstu, istočni i zapadni prilaz glavnog putnog pravca se jednim imenom nazivaju glavni prilazi, dok se južni i severni prilaz nazivaju sporedni prilazi. Rangu I pripadaju kretanja pravo glavnim prilazima (tokovi 2 i 5) i skretanja desno sa glavnih prilaza (tokovi 3 i 6). Vozila koja pripadaju svim ostalim rangovima su u obavezi da ustupe pravo prvenstva prolaza vozilima koja vrše manevar koji pripada rangu I. Rangu II pripadaju leva skretanja sa glavnih prilaza (tokovi 1 i 4) i desna skretanja sa sporednih prilaza. Vozila koja vrše manevar koji pripada rangu II, su u obavezi da ustupe pravo prvenstva prolaza vozilima ranga I, dok sa druge strane imaju pravo prvenstva prolaza u odnosu na kretanja ranga III i IV. (Slika 2.2 i Slika 2.3 u poglavlju 2)

Prema priručniku *HCM*, na standardnoj nesignalisanoj raskrsnici, na kojoj su prilazi glavnog pravca jedan naspram drugog, postoje četiri sporedna manevra. U četiri sporedna manevra se ubrajaju: 1) levo skretanje sa glavnog prilaza, 2) desno skretanje sa sporednog prilaza, 3) kretanje pravo sa sporednog prilaza i 4) levo skretanje sa sporednog prilaza. Prema *Kuzović* ([Kuzović, 2000](#)), priroda konfliktnih tokova na nesemaforisanoj krstastoj raskrsnici je relativno kompleksna. Svakom kretanju nižeg ranga se suprotstavlja različiti set konfliktnih tokova.

Za pravljenje modela i kasniju validaciju je izabran manevar levog skretanja sa glavnog prilaza, pri čemu se ne odbacuje mogućnost pravljenja modela i validacije za ostala tri navedena manevra. Manevar levog skretanja sa glavnog prilaza je izabran iz dva razloga.

Prvi razlog za izbor navedenog manevra je što se ovaj manevar obavlja sa glavnog prilaza i što ima drugi rang prioriteta. Manevar desnog skretanja sa sporednog prilaza ima takođe rang drugog prioriteta, ali se ne obavlja sa glavnog prilaza. Kretanje pravo sa sporednog prilaza ima rang trećeg prioriteta, a levo skretanje sa sporednog prilaza ima rang četvrtog prioriteta.

Drugi razlog za izbor navedenog manevra je proračun konfliktnih tokova. Vozila koja obavljaju manevar levog skretanja sa glavnog prilaza trebaju da propuste vozila u kretanju pravo i u skretanju desno sa suprotnog glavnog prilaza, pa u zbiru konfliktnih tokova mogu da se pojave do dva sabirka. Prema HCM, ako je saobraćajni tok u skretanju desno sa glavnog pravca odvojen ostrvom (tzv. kanalisano desno skretanje) i mora da se povinuje saobraćajnom znaku „obavezno zaustavljanje“ (II-2) ili „ustupanje prvenstva prolaza“ (II-1), onda ovaj tok ne treba da se razmatra u proračunu konfliktnih tokova za ovaj manevar.

Vozila u desnom skretanju sa sporednog prilaza imaju takođe do dva sabirka u zbiru konfliktnih tokova, ali u kasnijem proračunu konfliktnih tokova za manevre nižeg ranga prioriteta, mogu da se pojave samo kod manevra četvrtog ranga prioriteta (leva skretanja sa sporednog prilaza). Sa druge strane, vozila u levom skretanju sa glavnog prilaza predstavljaju konfliktne tokove vozilima u kretanju pravo sa sporednog prilaza i vozilima u levom skretanju sa sporednog prilaza. Manevri kretanje pravo sa sporednog prilaza i levo skretanje sa sporednog prilaza imaju složeniji proračun konfliktnih tokova, jer imaju rang trećeg, odnosno četvrtog prioriteta.

U okviru rada, vršena su istraživanja na standardnim nesignalisanim raskrscima (TWSC). Na njima je sprovedeno istraživanje vozila ranga II sa glavnih prilaza, koja obavljaju levo skretanje iz posebne trake, pri čemu navedena vozila prilikom manevra prelaze preko jedne saobraćajne trake. U radu, neće posebno biti analizirana vozila ranga II sa sporednih prilaza.

Ukupni vremenski gubici vozila ranga II sa glavnih prilaza, koja čekaju da izvrše manevar levog skretanja iz posebne trake za levo skretanje, imaju dve komponente: 1) vreme čekanja u opsluzi (kada se vozilo nalazi na prvom mestu u redu) i 2) vreme čekanja u redu (kada se ispred posmatranog vozila nalazi barem jedno vozilo). Takođe, izvesno je da su ove dve komponente vremenskih gubitaka u direktnoj vezi i da dugo čekanje na prvom mestu u redu direktno utiče na ukupne vremenske gubitke.

Model manevra levog skretanja vozila sa glavnog prilaza je opisan preko sledećih slučajnih promenljivih:

$T_{sw}$  - Slučajna promenljiva koja predstavlja vreme čekanja u opsluzi vozila sporednog toka, koje obavlja manevar levog skretanja iz posebne trake za levo skretanje, sa prvog mesta u redu (engl. *service waiting time*);

$T_h$  - Slučajna promenljiva koja predstavlja vremenski interval sleđenja vozila prioritarnog toka (engl. *headway*);

$T_a$  - Slučajna promenljiva koja predstavlja vreme od prolaska prethodnog vozila prioritetnog toka, kroz posmatrani presek raskrsnice do prolaska vozila sporednog toka, koje obavlja manevar levog skretanja (engl. *time after vehicle*) i

$T_b$  - Slučajna promenljiva koja predstavlja vreme od prolaska vozila sporednog toka, koje obavlja manevar levog skretanja, do prolaska sledećeg vozila prioritetnog toka, kroz posmatrani presek raskrsnice (engl. *time before vehicle*).

Shodno teoriji matematičke statistike, vrednosti navedenih slučajnih promenljivih su označene sa  $t_{sw}$ ,  $t_h$ ,  $t_a$  i  $t_b$ . Model se zasniva na ideji da se kritični interval sleđenja u prioritetnom toku sastoji od dva vremena  $t_a$  i  $t_b$ . Osnovna pretpostavka je da vozilo sporednog toka ne može da obavi manevar levog skretanja, ukoliko je interval sleđenja u prioritetnom toku manji od zbira vremena  $t_a$  i  $t_b$ .

Prema (Troutbeck & Brilon, 2001), u teoriji koja se koristi u većini priručnika za nesignalisane raskrsnice, pretpostavlja se da su vozači konzistentni (postojani) i homogeni. Od konzistentnog vozača se očekuje da se ponaša na isti način, svakog puta, u svim sličnim situacijama. Od vozača se ne očekuje da odbije veći vremenski interval, između vozila saobraćajnog toka višeg ranga prioriteta, za obavljanje svog manevra, a zatim da prihvati manji vremenski interval. Od homogene populacije se očekuje da se svi vozači ponašaju na isti način. Očigledno je da pretpostavke o konzistentnim i homogenim vozačima na bilo kom prilazu nesignalisane raskrsnice nisu realne.

Prema prethodnom izvoru, Plank i Catchpole (Plank & Catchpole, 1984), Catchpole i Plank (Catchpole & Plank, 1986), Troutbeck (Troutbeck, 1988) i Wegmann (Wegmann, 1991) su pokazali da u slučaju heterogenih vozača opada ulazni kapacitet na prilazu raskrsnice. Kako se navodi u (Troutbeck & Brilon, 2001), ako se pretpostavi da su vozači konzistentni i homogeni, a ne što je realnije da su nekonzistentni i heterogeni, onda je razlika u predviđanjima svega u nekoliko procenata. Dakle, prema ovom izvoru, može da se zaključi da je ukupan efekat pretpostavljanja da su vozači konzistentni i homogeni minimalan, pa da se zbog uprošćavanja pretpostavlja da je ponašanje vozača konzistentno i da su vozači homogeni.

### **1.1.1. Cilj istraživanja**

Na sadašnjem nivou procene kritičnih intervala sleđenja koji su osnov za analizu nesignalisanih raskrsnica, svaki naučni doprinos po ovom stručnom pitanju biće prihvaćen na razmatranje sa posebnim interesom čitave zajednice saobraćajnih inženjera i stručnih i naučnih institucija koje se bave regulisanjem i upravljanjem saobraćaja na navedenom tipu raskrsnica.

Osnovni cilj istraživanja je da se proširi i unapredi postojeća metodologija za analizu kapaciteta nesignalisanih raskrsnica (navedena u (HCM, 2000); (HCM, 2010)).

Postojeće metodologije za proračun kapaciteta prioritetnih raskrsnica zasnivaju se na verovatnoći pojave slobodnih intervala u prioritetnom toku, u okviru kojih je objektivno moguće izvršiti sporedni manevar. Postoje mnoge metode za procenu ili merenje parametara ove slučajne promenljive, ali njena struktura i odnos sa drugim slučajnim promenljivama nije poznat. Slučajna promenljiva koja egzistira kao potpuno merljiva u praktičnim uslovima je srednje vreme čekanja u redu vozila koje izvodi manevar levog skretanja sa prioritetnog prilaza. U njoj je sadržana konvolucija slučajnih promenljivih procesa levog skretanja, a njenim rešenjem se pruža mogućnost implicitnog izražavanja subjektivnih stohastičkih vremena u okviru kritičnog intervala.

U teorijskoj osnovi predloženog modela, razmatra se događaj dolaska sporednog toka vozila ranga II, koje treba da obavi manevar levog skretanja iz posebne trake za levo skretanje. Radi razrade modela definisani su sledeći parametri:

$t_a$  - vrednost slučajne promenljive  $T_a$ , koja predstavlja vreme od prolaska prethodnog vozila prioritetnog toka, kroz posmatrani presek raskrsnice do prolaska vozila sporednog toka, koje obavlja manevar, pri čemu je  $t_a = t_v + t_r$ ,

$t_v$  - vrednost slučajne promenljive  $T_v$ , koja predstavlja vremenski interval koji je neophodan za mimoilaženje vozila iz prioritetnog toka sa vozilom sporednog toka, koje čeka da obavi manevar,

$t_r$  - vrednost slučajne promenljive  $T_r$ , koja predstavlja vreme reagovanja sistema vozač-vozilo za sporedni manevar. Vreme reagovanja sistema vozač-vozilo započinje u momentu prolaska zadnjeg dela vozila prioritetnog toka do momenta početka sporednog manevra,

$t_b$  - vrednost slučajne promenljive  $T_b$ , koja predstavlja vreme od prolaska vozila sporednog toka, koje obavlja manevar, do prolaska sledećeg vozila prioritetnog toka, kroz posmatrani presek raskrsnice, pri čemu je  $t_b = t_m + t_s$ ,

$t_m$  - vrednost slučajne promenljive  $T_m$ , koja predstavlja vreme sporednog manevra,

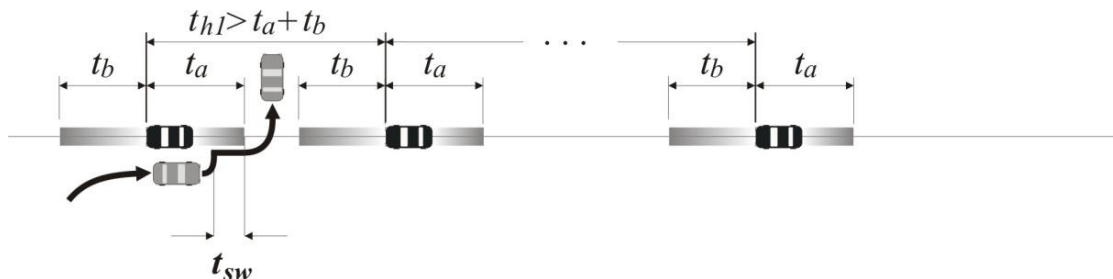
$t_s$  - vrednost slučajne promenljive  $T_s$ , koja predstavlja zaštitno vreme koje započinje u momentu kada vozilo koje vrši sporedni manevar izađe iz gabarita vozila prioritetnog toka do prolaska čela vozila prioritetnog toka kroz apstraktnu konfliktnu tačku,

$t_{sw}$  - vrednost slučajne promenljive  $T_{sw}$ , koja predstavlja vreme čekanja u opsluzi vozila sporednog toka, koje obavlja manevar iz posebne trake, sa prvog mesta u redu,

$t_h$  - vrednost slučajne promenljive  $T_h$ , koja predstavlja vremenski interval sleđenja vozila prioritetnog toka, a  $t_{h1}$  - predstavlja vrednost prvog intervala prioritetnog toka na koji nailazi vozilo sporednog toka.

Navedeni događaj može da se klasifikuje u četiri slučaja:

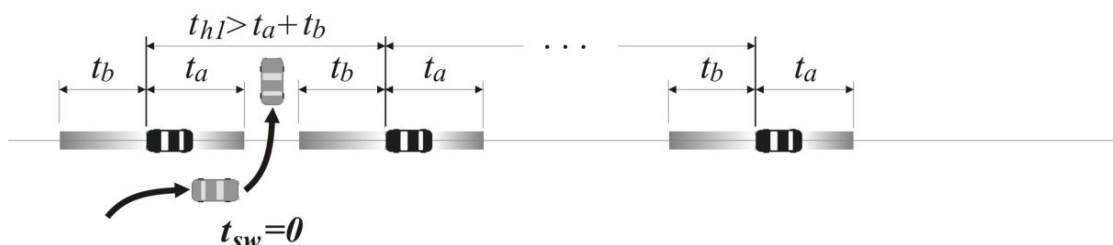
**Slučaj 1:** Vozilo sporednog toka pristupa na segment  $[0, t_a]$  prvog intervala prioritnog toka većeg od zbira vremena  $t_a$  i  $t_b$ , odnosno  $t_{h1} > t_a + t_b$ . (Slika 1.1)



Slika 1.1 Prikaz slučaja 1

U slučaju prikazanom na slici 1.1, vozilo sporednog toka se zaustavlja ili usporava, da bi propustilo vozilo prioritnog toka. U ovom slučaju vozilo prioritnog toka dolazi prvo do središta raskrsnice ili u istom trenutku kao vozilo sporednog toka, pa vozilo sporednog toka ne može odmah da obavi manevar. Kao rezultat ovog slučaja, vozilo sporednog toka ima vremenske gubitke, jer čeka istek vremena  $t_a$ , koje se odnosi na vreme posle vozila prioritnog toka. Kako je dolazak sporednog vozila ravnomerno raspoređen na vremenskom intervalu dužine  $t_a$ , onda je srednje vreme čekanja u opsluzi vozila u ovom slučaju jednako  $t_{sw} = t_a/2$ .

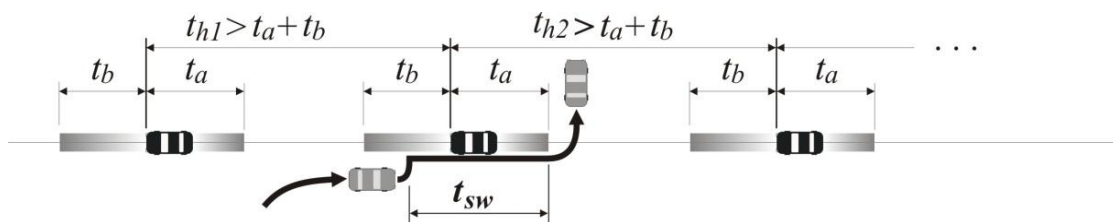
**Slučaj 2:** Vozilo sporednog toka pristupa na segment  $[t_a, t_h - t_b]$  prvog intervala prioritnog toka većeg od zbira vremena  $t_a$  i  $t_b$ , odnosno  $t_{h1} > t_a + t_b$ . (Slika 1.2)



Slika 1.2 Prikaz slučaja 2

U slučaju prikazanom na slici 1.2, vozilo sporednog toka se ne zaustavlja pre obavljanja manevara. Kao rezultat ovog slučaja, vozilo sporednog toka nema vremenske gubitke, pa je  $t_{sw} = 0$ . U ovom slučaju, vozilo sporednog toka nailazi na prazninu u prioritnom toku u okviru koje je moguće da izvrši sporedni manevar.

**Slučaj 3:** Vozilo sporednog toka pristupa na segment  $[t_h - t_b, t_h]$  prvog intervala prioritnog toka većeg od zbira vremena  $t_a$  i  $t_b$ , odnosno  $t_{h1} > t_a + t_b$ . (Slika 1.3)

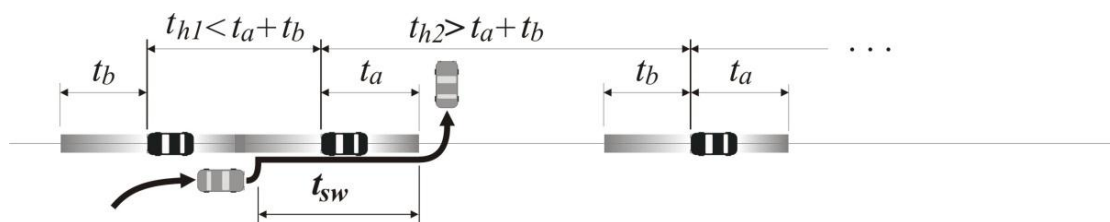


Slika 1.3 Prikaz slučaja 3 (prva varijanta)

U slučaju prikazanom na slici 1.3, vozilo sporednog toka se zaustavlja, da bi propustilo vozilo prioritetnog toka. Vozilo sporednog toka ne može da obavi manevar, jer mora da propusti vozilo prioritetnog toka. Kao rezultat ovog slučaja, vozilo sporednog toka ima vremenske gubitke, jer čeka istek vremena  $t_b$ , koje se odnosi na vreme pre vozila prioritetnog toka. Kako je dolazak sporednog vozila ravnomerno raspoređen na vremenskom intervalu dužine  $t_b$ , onda je prvi deo srednjeg vremena čekanja u opsluzi vozila u ovom slučaju jednako  $t_b/2$ . Nakon toga, ako je sledeći interval u prioritetnom toku veći od zbir vremena  $t_a$  i  $t_b$ , onda vozilo sporednog toka može da obavi manevar već u tom intervalu, ali po isteku vremena  $t_a$ .

Na slici (Slika 1.3) je prikazana prva varijanta, koja je najjednostavnija, jer srednje vreme čekanja u opsluzi vozila ima samo dva sabirka. Ako je naredni interval prioritetnog toka manji od zbir vremena  $t_a$  i  $t_b$ , onda vozilo sporednog toka mora da čeka povoljan interval, čime se povećava vreme čekanja u opsluzi vozila. U posebnoj tački (Tačka 4) su razmotrene sve varijante ovog slučaja.

**Slučaj 4:** Vozilo sporednog toka pristupa na prvi interval prioritetnog toka manjeg od zbir vremena  $t_a$  i  $t_b$ , odnosno  $t_{h1} < t_a + t_b$ . (Slika 1.4)



Slika 1.4 Prikaz slučaja 4 (prva varijanta)

U slučaju prikazanom na slici 1.4, vozilo sporednog toka se zaustavlja, jer nailazi na interval prioritetnog toka manji od zbir vremena  $t_a$  i  $t_b$ , pa ne može da obavi manevar. Kao rezultat ovog slučaja, vozilo sporednog toka ima vremenske gubitke, jer čeka istek vremena intervala prioritetnog toka, koji je manji od kritičnog intervala. Kako je dolazak sporednog vozila ravnomerno raspoređen na ovom vremenskom intervalu, onda je prvi deo srednjeg vremena čekanja u opsluzi vozila u ovom slučaju jednak polovini navedenog intervala. Nakon toga, ako je sledeći interval u prioritetnom toku veći od zbir vremena  $t_a$  i  $t_b$ , onda vozilo sporednog toka može da obavi manevar već u tom intervalu, ali po isteku vremena  $t_a$ .

Na slici (Slika 1.4) je prikazana prva varijanta, koja je najjednostavnija, jer srednje vreme čekanja u opsluzi vozila ima samo dva sabirka. Ako je naredni interval prioritetnog toka manji od zbir vremena  $t_a$  i  $t_b$ , onda vozilo sporednog toka mora da čeka povoljan interval, čime se povećava vreme čekanja u opsluzi vozila. U posebnoj tački (Tačka 4) su razmotrene sve varijante ovog slučaja.

Prvi cilj disertacije je da se na osnovu diferencijacije objektivnih i subjektivnih vremena, koji ulaze u sastav kritičnog intervala, definiše novi model za proračun njegove vrednosti.



Objektivna (merljiva) vremena su:

- 1)  $t_a$ , jer se sastoji od  $t_v$  i  $t_r$ . Vozilo prioritetnog toka prosečne dužine  $l_v$ , se kreće prosečnom brzinom  $v_v$ , pa se  $t_v$  može proračunati preko izraza:  $t_v=l_v/v_v$ . Vreme reagovanja sistema vozač-vozilo je u potpunosti merljiva veličina, koja se kreće u intervalu od 0,8-1,0 s. Vrednost  $t_a$  je računata kao vreme od prolaska prethodnog vozila prioritetnog toka, kroz posmatrani presek raskrsnice do prolaska vozila sporednog toka, koje obavlja manevar. U validaciji modela nije vršeno raščlanjivanje vrednosti  $t_a$  na vrednosti  $t_v$  i  $t_r$ , već je vrednost  $t_a$  razmatrana kao jedinstvena vrednost.
- 2)  $t_m$ , kao deo vrednosti  $t_b$ . Vreme manevra vozila sporednog toka je u potpunosti merljiva veličina i računa se kao razlika vremena napuštanja saobraćajne trake prioritetnog toka i vremena presecanja saobraćajne trake prioritetnog toka, od strane vozila sporednog toka.
- 3)  $t_h$ . Vreme sleđenja vozila je u prioritetnom toku je u potpunosti merljiva veličina.
- 4)  $t_{sw}$ . Vreme čekanja u opsluzi vozila sporednog toka je u prioritetnom toku je u potpunosti merljiva veličina.

Subjektivno vreme je:

- 1)  $t_s$ , kao deo vrednosti  $t_b$ . Zaštitno vreme, koje započinje u momentu kada vozilo koje vrši sporedni manevar izađe iz gabarita vozila prioritetnog toka do prolaska čela vozila prioritetnog toka kroz apstraktnu konfliktnu tačku, se razlikuje od vozača do vozača, pa predstavlja subjektivno vreme.

Drugi cilj je da se analizom slučajnih promenljivih definiše subjektivni deo kritičnog intervala sleđenja i njegova stohastičnost smanji na najmanju moguću meru.

Treći cilj je da se uvažavanjem rezultata prethodnih modela, primenom metoda operacionih istraživanja definiše model za proračun kapaciteta sporednog manevra na nesignalisanoj raskrsnici. Model je zasnovan na pretpostavci, da se podelom kritičnog intervala sleđenja na subjektivno i objektivna vremena može dobiti precizniji rezultat.

Model je testiran za sporedni manevar levog skretanja sa prioritetnog prilaza nesignalisane raskrsnice, na osnovu rezultata istraživanja u realnom saobraćajnom toku. Snimanja su obavljena na četvorokrakim i trokrakim standardnim nesignalisanim raskrsnicama, čiji su sporedni prilazi (sporedni prilaz) regulisani saobraćajnim znacima prioriteta („obavezno zaustavljanje“ (II-2) ili „ustupanje prvenstva prolaza“ (II-1)). U stranim priručnicima, kao što je *HCM*, ove raskrsnice su označene sa skraćenicom *TWSC*.

## 1.2. Postavljanje polazne hipoteze

Prema prethodno definisanoj problematici i ciljevima istraživanja, izvedena je polazna hipoteza, koja za istraživanje sprovedeno u ovom radu glasi:

**Hipoteza: Podelom kritičnog intervala sleđenja na subjekivan i objektivne vremenske intervale i uspostavljanjem funkcionalnih veza između ovih parametara, moguće je definisati model za proračun kapaciteta sporednog manevra nesignalisanih raskrsnica.**

Prvi cilj istraživanja je da se navedena hipoteza, primenom metoda teorije verovatnoće, matematičke statistike i operacionih istraživanja dokaže. Nakon toga, drugi cilj je da se model proveri u realnim uslovima odvijanja saobraćaja analizom parametara saobraćajnog toka na osnovu video zapisa.

## 1.3. Metode istraživanja

U disertaciji, biće primenjen osnovni metod istraživanja, koji je korišćen da bi se na osnovu sakupljanja i proučavanja dostupne literature, njene analize i sistematizacije, pokazala opravdanost i korisnost razvoja pomenutog matematičko-statističkog modela.

Za verifikaciju postavljene hipoteze i analizu kritičnih intervala sleđenja na standardnim nesignalisanim raskrsnicama biće primenjene metode iz teorije verovatnoće, matematičke statistike i operacionih istraživanja.

Iz teorije verovatnoće biće korišćena poglavlja koja se tiču verovatnoće slučajnog događaja, slučajnih promenljivih, parametara ili brojnih karakteristika slučajnih promenljivih, raspodela slučajnih promenljivih i slučajnih procesa.

Iz matematičke statistike biće korišćena poglavlja koja se bave statističkom analizom, metodom uzoraka, teorijom ocena, verifikacijom statističkih hipoteza i teorijom korelacije.

Od metoda operacionih istraživanja biće korišćena teorija masovnog opsluživanja, odnosno redova čekanja.

Što se tiče snimanja saobraćaja na raskrsnicama, metod koji je primenjen u ovom radu zasnovan je na prikupljanju digitalnog video zapisa realnog saobraćajnog toka i naknadnoj obradi snimka primenom različitih softvera. Ovakav način prikupljanja i obrade podataka pokazao se kao veoma praktičan i efikasan i u drugim istraživanjima parametara saobraćajnog toka. (Bogdanović, Papić, Ruškić, & Jeftić, 2011); (Bogdanović, Ruškić, Kulović, & Han, 2013)

#### 1.4. Prikaz strukture doktorske disertacije po poglavljima

U okviru drugog poglavlja date su opšte karakteristike nesignalisanih raskrsnica. Osim toga, prikazan je način proračuna kapaciteta standardne nesignalisane raskrsnice prema metodi *HCM*-a.

U trećem poglavlju je prikazan je istorijski pregled najvažnijih istraživanja i modela za proračun kapaciteta i nivoa usluge standardnih nesignalisanih raskrsnica. Ovaj deo obuhvata teorijsku osnovu, kojom će biti izložen osnovni problem koji se obrađuje u okviru doktorske disertacije. Pored toga, biće dat osvrt na različita evropska i svetska iskustva, koja se bave ovom i sličnom problematikom.

U okviru četvrtog poglavlja je definisan model za proračun prosečnog vremena čekanja vozila koja vrše manevar levog skretanja sa prioritetnog prilaza, prema modelu koji je zasnovan na teoriji masovnog opsluživanja. (Tanackov, Deretić, Bogdanović, Ruškić, & Jović, 2018) Na osnovu ovako izračunatog vremena vršenja sporednog manevra može se utvrditi njegov kapacitet i odrediti nivo usluge.

Model je zasnovan na diferencijaciji i dekompoziciji vremena vršenja sporednog manevra, odnosno kritičnog intervala sleđenja. Za testiranje modela izabran je manevar levog skretanja sa glavnog putnog pravca, kao najjednostavniji sporedni manevar. Međutim, predloženi model se uz minimalna prilagođavanja može primeniti i za sve druge sporedne manevre na svim tipovima *TWSC* nesignalisanih raskrsnica, bez obzira na geometrijske karakteristike, broj saobraćajnih traka na prilazima, itd. Praktična primena postavljenog modela je pre svega u analizi kapaciteta i nivoa usluge na standardnim nesignalisanim raskrsnicama.

Model koji je razvijen u disertaciji mogao bi da predstavlja podršku u mnogim inženjerskim zadacima na ovom tipu raskrsnica, kao npr. regulisanje i upravljanje saobraćajnim tokovima, saobraćajno projektovanje i sl. Potrebno je da se naglasi da model nije zasnovan isključivo ni na teoriji matematičke statistike, ni na podacima sa snimanja saobraćaja, već upravo u kombinaciji ova dva navedena pristupa.

Peto poglavlje se bavi pripremom i izvođenjem eksperimentalnih istraživanja. Ovde je objašnjen način prikupljanja podataka za svaki istraživani parametar u okviru definisanog područja istraživanja, pa je zatim njihova sistematizacija i obrada data u narednom poglavlju. Na osnovu metodologije date u petom poglavlju, su posle u šestom poglavlju, dobijeni podaci prikazani u odgovarajućem obliku (tabelarno, grafički, itd.), a urađena je i statistička analiza.

Validacija modela kao i njegova preciznost u poređenju sa odabranim postojećim modelima je prikazana u šestom poglavlju rada. Vid funkcionalnosti nekog modela jeste njegova validacija sa nekim od već postojećih modela, pod uslovom da ta dva modela objašnjavaju istu problematiku događaja. Ovde je prikazano detaljno i opsežno istraživanje vrednosti osnovnih parametara neophodnih za testiranje i proveru navedenog modela, u realnim uslovima, na standardnim nesignalisanim raskrsnicama.

U sedmom poglavlju su nabrojani zaključci, preporuke i pravci daljih istraživanja. Ovde su izvedeni osnovni zaključci do kojih se došlo tokom izrade doktorske disertacije, vezani za hipotezu koja je postavljena na početku rada. Takođe, date su osnovne preporuke i smernice, kao i predlog daljih istraživanja, za sve one koji budu želeli da se bave ovom problematikom.

## 2. Opšte karakteristike standardnih nesignalisanih raskrsnica

Saobraćajne deonice puteva na područjima gradskih aglomeracija predstavljaju vezne elemente dveju mreža i to: 1) mreže vangradskih puteva i 2) mreže gradskih saobraćajnica. Sa gledišta uloge ovih deonica u propuštanju saobraćajnih tokova, one imaju dvojaku funkciju jer istovremeno služe lokalno-urbanim i tranzitnim saobraćajnim tokovima, kao i izvorno-ciljnim tokovima u odnosu na gradsku aglomeraciju. (Kuzović, 1994)

U skladu sa Kuzović (Kuzović, 2000), prema načinu regulisanja saobraćaja, raskrsnice mogu biti nesignalisane i signalisane. Nesignalisane raskrsnice su raskrsnice na kojima se regulisanje saobraćaja vrši davanjem prava prvenstva prolaza jednom putnom pravcu primenom horizontalne i vertikalne saobraćajne signalizacije. Signalisane raskrsnice su raskrsnice na kojima se regulisanje saobraćaja i kontrola prava prvenstva prolaza vrši primenom svetlosnih signala.

Prema Kuzović (Kuzović, 2000), sinonim za nesignalisanu četvorokraku raskrsnicu je nesemaforisana krstasta (+) raskrsnica. Prema istom izvoru, sinonim za nesignalisanu trokraku raskrsnicu je nesemaforisana (T) raskrsnica. Neke nesignalisane raskrsnice mogu imati netipičan režim rada, kao npr. kada vozila koja vrše manevar levog skretanja sa prioritnog prilaza imaju prvenstvo prolaza u odnosu na kretanje pravo ili skretanje desno sa suprotnog prioritnog prilaza. Takva raskrsnica predstavlja nestandardnu nesignalisanu raskrsnicu, a analiza kapaciteta i nivoa usluge za pomenute raskrsnice je data u disertaciji (Ruškić, 2013).

U disertaciji (Ruškić, 2013), kao „nestandardna nesignalisana raskrsnica“ definiše se raskrsnica kod koje se dva prioritna (glavna) prilaza nalaze jedan pored drugog. Model za proračun koji je dat u priručnicima (HCM, 2000); (HCM, 2010), odnosi se na raskrsnicu kod koje su prioritni prilazi jedan naspram drugog, a koja se prema istom izvoru definiše kao „standardna nesignalisana raskrsnica“.

Kako se navodi u (Kuzović, 2000), nesignalisane četvorokrake raskrsnice, regulisane znakom „obavezno zaustavljanje - STOP“ (II-2) na sporednim prilazima, predstavljaju najčešći tip raskrsnica na deonicama vangradskih dvotračnih puteva. Nesignalisane trokrake raskrsnice, se za razliku od nesignalisanih četvorokrakih raskrsnica, sastoje od samo jednog sporednog prilaza raskrsnici.

Prema načinu regulisanja saobraćaja, nesignalisane raskrsnice, odnosno raskrsnice na kojima je saobraćaj regulisan znacima prioriteta su najbrojniji tip raskrsnica. Najveći broj konflikata između učesnika u saobraćaju se dešava na površinskim raskrsnicama. Prema podacima CRS (Centre for Road Safety, 2011) i NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration, 2011), na površinskim raskrsnicama se događa oko 45% od ukupnog broja saobraćajnih nezgoda, odnosno preko 20% nezgoda sa fatalnim posledicama. Na nesignalisanim raskrsnicama, odnosno raskrsnicama na kojima je pravo prvenstva prolaza regulisano znacima prioritetima, dogodi se oko 10% od ukupnog broja saobraćajnih nezgoda, odnosno nešto ispod 10% saobraćajnih nezgoda sa fatalnim posledicama. (Bogdanović, Ruškić, Papić, & Saulić, 2013)

Širom sveta, uobičajeni termin koji se u stručnoj praksi koristi za sve raskrsnice na kojima saobraćaj nije regulisan uz pomoć svetlosne signalizacije je nesignalisana raskrsnica (engl. *unsignalized intersection*). U Republici Srbiji, a često i u nekim zemljama Evrope, za raskrsnice na kojima je saobraćaj regulisan vertikalnom signalizacijom često se koristi i termin prioriteta raskrsnica.

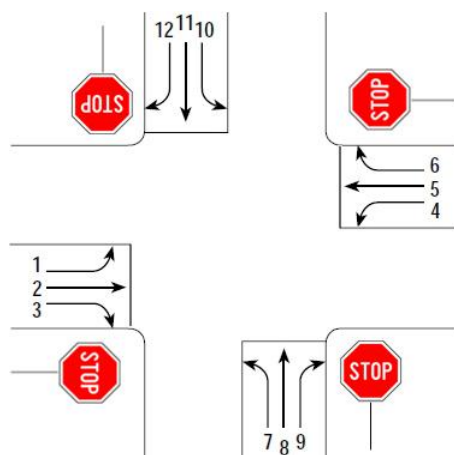
### 2.1. Standardne nesignalisane raskrsnice

Standardna nesignalisana raskrsnica (*SNR*) je ona raskrsnica kod koje se put sa pravom prvenstva prolaza pruža u pravcu, odnosno prioritetni prilazi su jedan naspram drugog, uz uslov da je saobraćaj regulisan pomoću saobraćajnih znakova prioriteta. Prema priručnicima iz engleskog govornog područja, (HCM, 2000); (HCM, 2010), *SNR* regulisane saobraćajnim znacima prioriteta su podeljene u dve osnovne grupe:

- a) *AWSC* (engl. *All Way Stop Controlled*), raskrsnice kod kojih nijedan saobraćajni pravac nije definisan kao glavni saobraćajni pravac, već na svim prilazima postoje saobraćajni znaci kojima se vozilima pred ulazak u raskrsnicu oduzima prioritet;
- b) *TWSC* (engl. *Two Way Stop Controlled*), raskrsnice kod kojih je jedan saobraćajni pravac definisan kao glavni saobraćajni pravac, a drugi kao sporedni saobraćajni pravac.

### 2.1.1. Raskrsnice AWSC

Raskrsnice AWSC (Slika 2.1) su raskrsnice na kojima na sva četiri prilaza postoji znak „Obavezno zaustavljanje - STOP” (II-2). Ove raskrsnice su po načinu funkcionisanja najbliže raskrsnicama koje su definisane opštim pravilima saobraćaja (pravilo desne strane). Bezbednost saobraćaja na pomenutom tipu raskrsnica je veća, jer se na prilazu raskrsnici sva vozila zaustavljaju, pa tek onda nastavljaju kretanje kroz središte raskrsnice.



Slika 2.1 Saobraćajni tokovi na tipičnoj četvorokrakoj AWSC raskrsnici  
\*Izvor: HCM (2000)

Prema Wu (Wu, 2006), AWSC raskrsnice su najčešće korišćeni tip raskrsnica u SAD i drugim državama severne Amerike. Prva istraživanja o kapacitetu ovog tipa raskrsnica je radio Hebert (Hebert, 1963), koji je koristio empirijske jednačine izvedene iz podataka koji su prikupljeni sa tri raskrsnice navedenog tipa iz grada Čikaga. Što se tiče Evrope, AWSC raskrsnice su manje zastupljene u prikazanom obliku, pa su često prisutne raskrsnice bez bilo kakve signalizacije, na kojima važe opšta pravila saobraćaja (pravilo desne strane). AWSC raskrsnice nisu posebno analizirane u okviru ove disertacije.

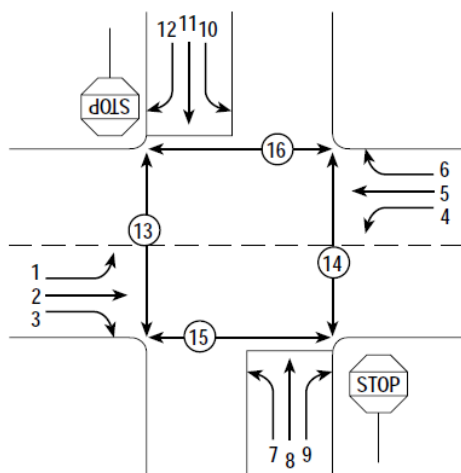
### 2.1.2. Raskrsnice TWSC

Raskrsnice TWSC su raskrsnice na kojima je jedan saobraćajni pravac definisan kao glavni (prioritetni), dok preostali prilazi (jedan ili dva), pripadaju sporednom saobraćajnom pravcu. Na TWSC raskrsnicama, pravo prvenstva prolaza je definisano znacima prioriteta, koji se postavljaju na prioritetnim i sporednim prilazima.

Na nesignalisanim raskrsnicama, regulisanje saobraćaja je zasnovano na principu prioriteta tokova i pravca kojim se oni kreću. Na ovom tipu raskrsnica, prema (HCM, 2010), definisano je ukupno četiri manevra (skretanje desno, kretanje pravo, skretanje levo i polukružno okretanje) i četiri hijerarhijska ranga u prioritetu kretanja vozila.

Prema Kittelson i Vandehey (Kittelson & Vandehey, 1991), raskrsnice TWSC su jedne od najučestalijih tipova raskrsnica u SAD i širom sveta. Takođe, one su među najkompleksnijim za analizu u pogledu kapaciteta i nivoa usluge (engl. LOS – Level of service).

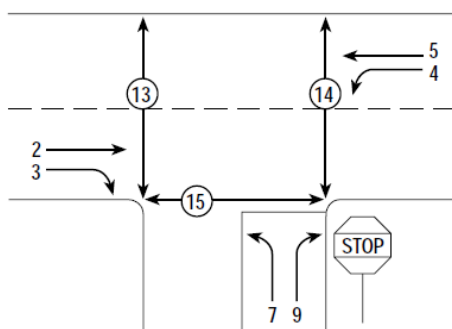
Rang (engl. Rank) za svaki saobraćajni tok (engl. Traffic stream) na standardnoj četvorokrakoj nesignalisanoj raskrsnici je dat na narednoj slici. (Slika 2.2)



Rank	Traffic stream
1	2, 3, 5, 6, 15, 16
2	1, 4, 13, 14, 9, 12
3	8, 11
4	7, 10

Slika 2.2 Saobraćajni tokovi i rangovi na standardnoj četvorokrakoj nesignalisanoj raskrsnici  
\*Izvor: HCM (2000)

Rang (engl. Rank) za svaki saobraćajni tok (engl. Traffic stream) na standardnoj trokrakoj nesignalisanoj raskrsnici je dat na narednoj slici. (Slika 2.3)



Rank	Traffic stream
1	2, 3, 5, 15
2	4, 13, 14, 9
3	7

Slika 2.3 Saobraćajni tokovi i rangovi na standardnoj trokrakoj nesignalisanoj raskrsnici  
\*Izvor: HCM (2000)



### 2.1.3. Saobraćajni znakovi i označavanje prilaza standardnih nesignalisanih raskrsnica

Nesignalisana raskrsnica predstavlja raskrsnicu na kojoj se dva putna pravca ukrštaju u istom nivou. Na nesignalisanoj raskrsnici se jedan pravac proglašava prioriternim pravcem, a drugi pravac se proglašava sporednim pravcem. Saobraćajnim znakovima prioriteta se određuju prioritetni i sporedni pravac na nesignalisanoj raskrsnici. Prema *Pravilniku o saobraćajnoj signalizaciji (PSS, 2016)*, saobraćajni znakovi, kojima se regulišu nesignalisane raskrsnice (Slika 2.4) su:

- 1) znak „ustupanje prvenstva prolaza” (II-1), označava naredbu vozaču da mora da ustupi prvenstvo prolaza vozilima koja se kreću putem na koji nailazi;
- 2) znak „obavezno zaustavljanje” (II-2), označava naredbu vozaču da mora da zaustavi vozilo i ustupi prvenstvo prolaza vozilima koja se kreću putem na koji nailazi;
- 3) znak „put sa prvenstvom prolaza” (III-3), označava put ili deo puta na kome vozila imaju prvenstvo prolaza u odnosu na vozila koja se kreću putevima koji se ukrštaju s tim putem, odnosno delom puta;

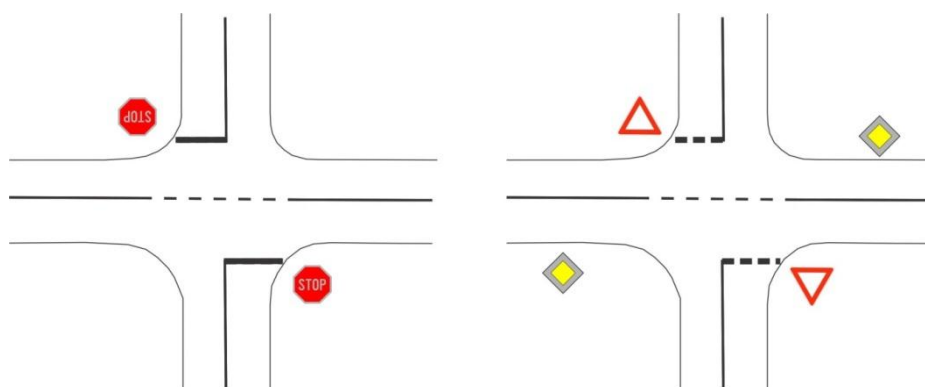
Saobraćajni znakovi (II-1) i (II-2) se ubrajaju u znakove izričitih naredbi, kao znakovi kojima je propisano prvenstvo prolaza. Saobraćajni znak (III-3) pripada znakovima obaveštenja, kao jedan od opštih znakova obaveštenja.



Slika 2.4 Saobraćajni znakovi na standardnim nesignalisanim raskrsnicama  
\*Izvor: Pravilnik o saobraćajnoj signalizaciji, 2017.

Prema *Katanić i dr. (Katanić, Anđus, & Maletin, 1983)*, prema načinu regulisanja saobraćaja na sporednim prilazima, nesignalisane raskrsnice se dele na:

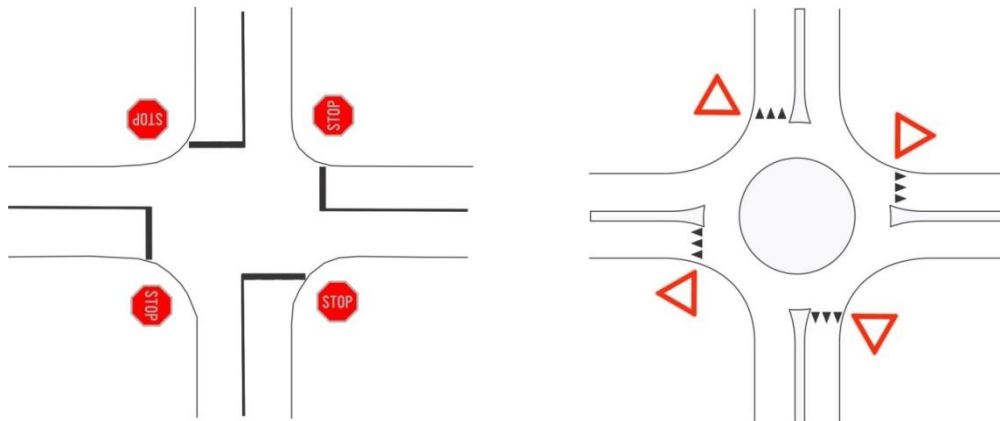
- 1) raskrsnice na kojima su sporedni prilazi regulisani znacima prioriteta (Slika 2.5) i one su najrasprostranjenije,



Slika 2.5 Šematski prikaz raskrsnice čiji su sporedni prilazi regulisani znakom prioriteta  
\*Izvor: HCM, 2000.

- 2) raskrsnice na kojima su svi prilazi regulisani znacima prioriteta (Slika 2.6). Ovakve raskrsnice, na čijim svim prilazima su postavljeni znaci obaveznog zaustavljanja, predstavljaju najrestriktivniju meru regulisanja.

Ovakav tip regulisanja je pogodan kao privremena mera, ako je broj saobraćajnih nezgoda na posmatranoj raskrsnici kritičan, a ne postoji detaljan projekat o opravdanosti uvođenja svetlosne signalizacije. Za razliku od prakse u svetu, kod nas je ovaj tip raskrsnice je vrlo redak. Raskrsnice kod nas na čijem svakom prilazu je postavljen znak „ustupanje prvenstva prolaza" (II-1) su kružne raskrsnice na kojima se saobraćaj odvija po pravilu desne strane, a prioritet imaju vozila u kružnom toku.

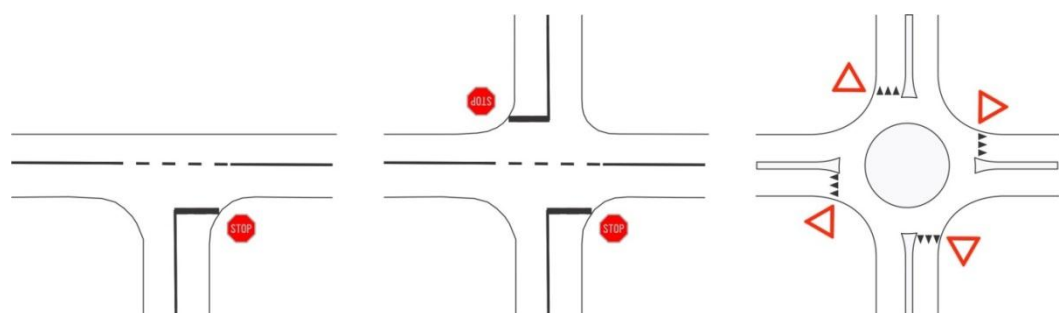


Slika 2.6 Šematski prikaz raskrsnica na kojima su svi prilazi regulisani znacima prioriteta  
\*Izvor: HCM, 2000.

### 2.1.4. Podela nesignalisanih raskrsnica prema geometriji

Posebna geometrijska struktura raskrsnica odnosi se na ugao pod kojim se prilazi ukrštaju u odnosu na zamišljenu osu koja prolazi kroz njen centar središnjeg dela. Ukoliko je ugao koji prilaz gradi sa zamišljenom osom oštar, vreme zadržavanja odnosno putovanja je duže, tj. vozila se duže vremena nalaze u konfliktnoj zoni raskrsnice. Osim toga preglednost je slabija, pa se smanjuje bezbednost. Zato, prilikom projektovanja (ukoliko je to moguće) treba težiti položaju prilaza koji su pod pravim uglom u odnosu na središnji deo raskrsnice, kako bi vreme putovanja kroz središnji(konfliktni) deo bio što kraći. (Katanić, Anđus, & Maletin, 1983)

Tipični primeri, odnosno najčešći pojavni tip nesignalisanih raskrsnica su one sa tri ili četiri prilaza, odnosno trokrake i četvorokrake raskrsnice, kao i kružne raskrsnice koje predstavljaju poseban tip ukrštanja u nivou. (Slika 2.7)



Trokraka raskrsnica

Četvorokraka raskrsnica

Kružna raskrsnica

Slika 2.7 Šematski prikaz ukrštanja u nivou u zavisnosti od njihove geometrije

\*Izvor: HCM, 2000.

Poseban tip nesignalisanih ukrštanja u nivou su **kružne raskrsnice**, one se razlikuju od klasičnih površinskih raskrsnica jer su urađene sa kombinacijom isprekidanog i neisprekidanog saobraćajnog toka. Kružne raskrsnice nisu obrađene u ovoj disertaciji.

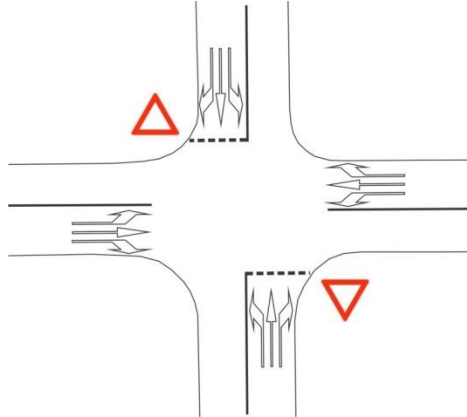
### 2.1.5. Podela nesignalisanih raskrsnica prema tipovima

Prema Katanić i dr. (Katanić, Anđus, & Maletin, 1983), podela prioriternih raskrsnica po tipovima odnosi se na razlike po građevinskom uređenju prilaza. Tipovi prioriternih raskrsnica su:

**Tip A:** Prioritetne raskrsnice opremljene elementarnom vertikalnom i horizontalnom signalizacijom, bez posebno uređenih prilaza. Njihova osnovna karakteristika je mali obim saobraćaja. (Slika 2.8)

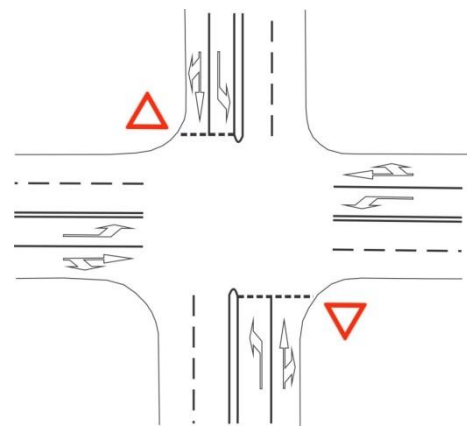
**Tip B:** Prioritetne raskrsnice na čijim su sporednim prilazima kolovozno površine odvojene klinastim ostrvom. Opterećenje raskrsnice je srednje, a obim levih skretanja na sporednom prilazu ne prelazi 10% od merodavnog protoka raskrsnice. (Slika 2.9)

**Tip C:** Raskrsnice sa kompletnim građevinskim uređenjem prilazima i posebnim saobraćajnim trakama za tokove na glavnom prilazu, dok su na sporednom prilazu tokovi desnih skretanja kanalisani. Ovakve prioritetne raskrsnice karakteristične su na magistralnim i regionalnim putnim ukrštanjima. (Slika 2.10)



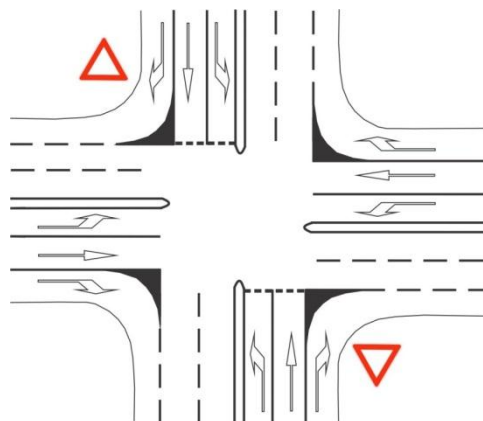
Slika 2.8 Prioritetna raskrsnica tipa A

\*Izvor: HCM, 2000.



Slika 2.9 Prioritetna raskrsnica tipa B

\*Izvor: HCM, 2000.



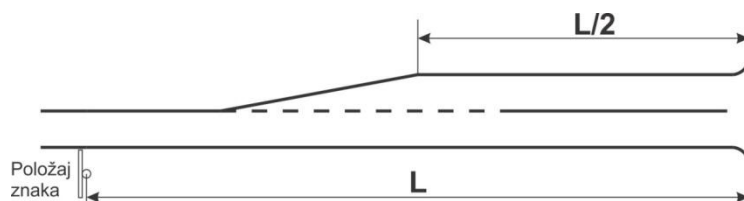
Slika 2.10 Prioritetna raskrsnica tipa C

\*Izvor: HCM, 2000.

### 2.1.6. Prilaz nesignalisane raskrsnice

Prilaz raskrsnici je deo kolovoza, koji se, posmatrano po uzdužnoj osovini puta, prostire od saobraćajnog znaka ispred raskrsnice za ograničenje brzine kretanja vozila pa sve do samog ulaza u raskrsnicu. Pre prilaza raskrsnici nalazi se napojna deonica puta. Unutar prilaza (obično od polovine prilaza pa sve do ulaska u raskrsnicu) nalazi se ulazno grlo. Prilaz raskrsnice služi blagovremenom prilagođavanju brzine kretanja vozila ograničenoj brzini kretanja na raskrsnici, a njegova dužina zavisi od maksimalne brzine kretanja na napojnoj deonici puta koja prethodi ulazu u raskrsnicu. Na raskrsnicama u naseljenim mestima, na kojima je ograničena brzina jednaka maksimalnoj brzini kretanja na deonici koja prethodi ulasku u raskrsnicu, prilaz izjednačava sa ulaznim grlom raskrsnice. (Katanić, Anđus, & Maletin, 1983)

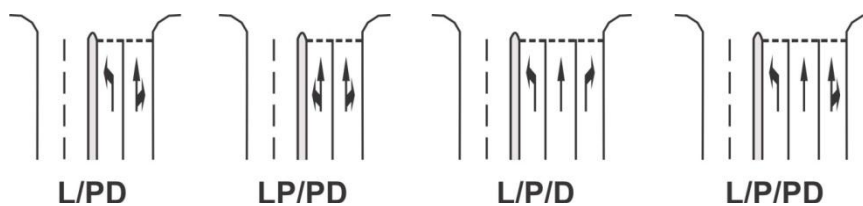
Kako se dalje navodi u (Katanić, Anđus, & Maletin, 1983), osnovna funkcija ulaznog grla je izjednačavanje kapaciteta između napojne deonice i prilaza raskrsnici, a osim toga ulazno grlo namenjeno je prestrojavanju vozila radi izvršenja željenog manevra prolaska kroz raskrsnicu. Nesignalisane raskrsnice najčešće se javljaju na ukrštanjima puteva čije napojne trake imaju dve ili četiri saobraćajne trake za kretanje u oba smera. Na sledećoj slici (Slika 2.11), oznaka  $L$  predstavlja dužinu prilaza raskrsnici, a deo koji prethodi prilazu je napojna deonica puta. Oznaka  $L/2$  je dužina ulaznog grla na prilazu. Dužina prilaza na raskrsnici zavisi od maksimalne brzine  $V_{max}$  na napojnoj deonici puta, a maksimalna brzina napojne deonice puta zavisi od kategorije puta, odnosno od projektovanog ili propisanog režima brzina.



Slika 2.11 Prilaz prioritetne raskrsnice

\*Izvor: Katanić, et al., 1983.

Na uslove odvijanja saobraćaja na nesignalisanim raskrsnicama, pored veličine obima saobraćaja i načina regulisanja, utiče: 1) dužina prilaza i 2) širina i konfiguracija ulaznog grla. Konfiguracija ulaznog grla predstavlja način raspodele i korišćenja saobraćajnih traka od strane tokova na prilazu. Moguće konfiguracije ulaznog grla predstavljene su na sledećoj slici (Slika 2.12). Ulazno grlo sa jednom saobraćajnom trakom ima jednu moguću konfiguraciju, odnosno jednu saobraćajnu traku dele sva tri toka. Proširenje ulaznog grla uvek znači povećanje kapaciteta prilaza a samim tim i cele raskrsnice.



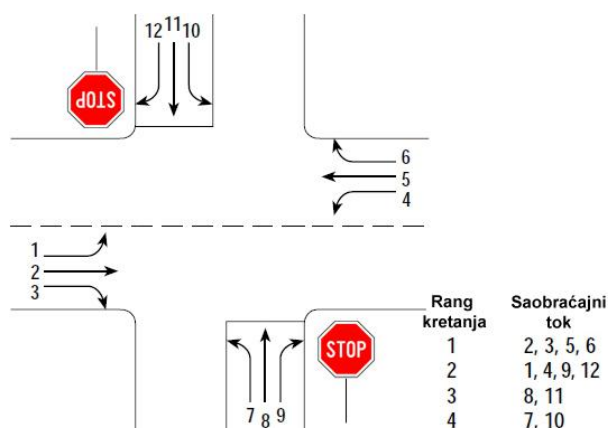
Slika 2.12 Konfiguracije ulivnih grla sa dve odnosno tri saobraćajne trake

\*Izvor: Katanić, et al., 1983.

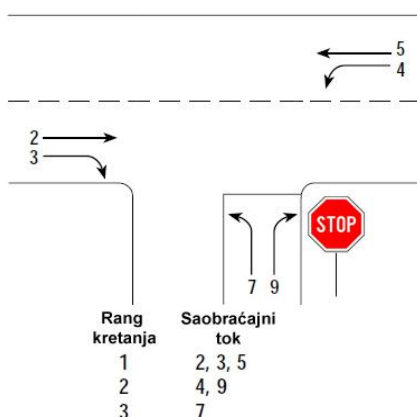
## 2.2. Odvijanje saobraćaja na standardnoj nesignalisanoj raskrsnici

U inženjerskoj praksi, za proračun kapaciteta nesignalisanih raskrsnica najčešće se koriste postupci HCM-a. (HCM, 2000); (HCM, 2010). Da bi se postupak proračuna kapaciteta mogao sprovesti, neophodno je za svaki manevar odrediti veličinu konfliktnog toka, koja predstavlja zbir svih tokova višeg prioriteta sa kojima je posmatrani sporedni manevar u potencijalnom konfliktu. Prema tome, veličina konfliktnog toka zavisi i od položaja - ranga posmatranog manevara u hijerarhiji prioriteta koja je definisana saobraćajnom signalizacijom i opštim pravilima saobraćaja. (HCM, 2000); (HCM, 2010)

Postupkom HCM-a je predviđeno da se kao konfliktni tokovi računaju i tokovi pešaka i biciklista (Slika 2.2 i Slika 2.3), ali se u okviru ove disertacije oni neće uzimati u obzir (Uslovi su bliže definisani u okviru tačke 4.2). Za SNR definisano je četiri ranga prioriteta. Na slikama (Slika 2.13 i Slika 2.14) prikazani su manevri na standardnim trokrakim i četvorokrakim TWSC raskrsnicama, a zatim i njihova pripadnost odgovarajućem rangu kretanja. Ukoliko se analizira trokraka TWSC raskrsnica, označavanje manevara je identično kao na četvorokrakoj raskrsnici. U slučaju trokrake TWSC raskrsnice izostaju manevri 1, 6, 8, 10, 11 i 12. (HCM, 2000); (HCM, 2010)



Slika 2.13 Tokovi i rangovi na standardnoj četvorokrakoj nesignalisanoj raskrsnici  
\*Izvor: HCM (1994).



Slika 2.14 Tokovi i rangovi na standardnoj trokrakoj nesignalisanoj raskrsnici  
\*Izvor: HCM (1994).

Raspodela manevara na rangove kretanja na *TWSC* raskrsnici zasnovana je na položaju saobraćajnih znakova kojima se određeni prilaz označava kao glavni ili sporedni. Metodologija data u izdanju priručnika *HCM* (HCM, 2010) se razlikuje od izdanja *HCM* (HCM, 2000), po dodatnom manevaru u prioritonom toku, na glavnom pravcu. Dodatni manevar se odnosi na polukružna okretanja, ali ovaj aspekt u disertaciji nije analiziran. Prema (HCM, 2000); (HCM, 2010), u skladu sa postavljanim saobraćajnom signalizacijom i opštim pravilima saobraćaja, na *TWSC* raskrsnici definisani su sledeći rangovi kretanja:

**Rang I** – kretanja pravo prioritonom prilazom i skretanje desno sa prioritonom prilaza (tokovi 2, 3, 5, 6). Vozila koja pripadaju svim ostalim rangovima kretanja u obavezi su da ustupe pravo prvenstva prolaza vozilima koja vrše manevar koji pripada rangu I.

**Rang II** – levo skretanje sa glavnog prilaza i desno skretanje sa sporednog prilaza (tokovi 1, 4, 9, 12). Vozila koja vrše manevar koji pripada rangu II su u obavezi da ustupe pravo prvenstva prolaza vozilima koja se kreću kretanjima ranga I, dok sa druge strane imaju pravo prvenstva prolaza u odnosu na kretanja ranga III i IV.

**Rang III** – kretanje pravo sa sporednog prilaza (tokovi 8, 11). Vozila koja vrše manevar koji pripada ovom rangu u obavezi su da ustupe pravo prvenstva prolaza vozilima koji pripadaju manevrima ranga I i ranga II, a imaju prioritet u odnosu na kretanja ranga IV.

**Rang IV** – levo sa sporednog prilaza je najsloženiji manevar na *TWSC* raskrsnicama (tokovi 7, 10). Vozila koja vrše ovaj manevar u obavezi su da propuste vozila koja pripadaju manevrima ranga I, ranga II i ranga III.

Poznavanje načina odvijanja saobraćaja i prioriteta među tokovima pri izvršenju manevara prolaska kroz raskrnicu, omogućava izračunavanje veličine konfliktnog toka u posmatranom sporednom toku. Konfliktni tok predstavlja neophodan podatak u proračunu potencijalnog kapaciteta sporednog manevara, odnosno prilaza. Postupak proračuna veličine konfliktnog saobraćaja ( $V_{c,x}$ ) na posmatranom sporednom toku  $x$  vrši se sumiranjem svih konfliktnih tokova, uz određena pravila koja pri tome važe, a koja zavise od: konfiguracije ulaznog grla, kanalisanja tokova desnog skretanja i broja saobraćajnih traka na napojnoj deonici glavnog prilaza. (HCM, 2000); (HCM, 2010)

### 2.3. Proračun kapaciteta standardnih nesignalisanih raskrsnica prema HCM (2000)

Proračun kapaciteta standardnih trokrakih i četvorokrakih nesignalisanih TWSC raskrsnica zasnovan je na teoriji verovatnoće. Osnovna pretpostavka na kojoj se temelji postupak proračuna kapaciteta je da će se u prioritetnom toku stvoriti dovoljno intervala u kojima mogu da se izvrše sporedni manevri. Pomenuti interval se u inženjerskim priručnicima i stručnoj literaturi, sa engleskog govornog područja, naziva *gap*, (HCM, 2000), odnosno *headway* (HCM, 2010). Navedeni interval predstavlja dovoljno veliki razmak između vozila u prioritetnom toku, koji će omogućiti vozilima sa sporednog prilaza da izvrše manevr.

Prema Ruškić (Ruškić, 2013), postupak koji je pokazao najbolje rezultate u praksi sa najvećom tačnošću za većinu SNR je onaj koji je dat u novijim verzijama HCM-a (2000, 2010). Postupak naveden u HCM (2000, 2010) je zasnovan na modelu *Harders* (Harders, 1968) prihvatljivih intervala sleđenja. U modelu *Harders* (Harders, 1968), se kao najvažniji ističu intervali sleđenja, koje će vozači prihvatiti za izvođenje određenih sporednih manevara i čija vrednost se nalazi između maksimalnih i minimalnih vrednosti koje se mogu izmeriti na terenu, u realnom saobraćajnom toku. Intervali koji se pojavljuju u formuli za proračun kapaciteta su: 1) interval sleđenja vozila u sporednom toku i 2) kritični interval sleđenja vozila u prioritetnom toku.

Definicije za dva navedena intervala, koji se javljaju u formuli za proračun kapaciteta, su preuzete iz priručnika HCM (2000, 2010) i od (Kuzović & Bogdanović, 2010).

**Interval sleđenja vozila u sporednom toku** (engl. *follow-up headway*) definiše se kao vreme koje protekne od momenta kada prvo vozilo iz reda čekanja sa sporednog prilaza pređe zaustavnu liniju ili liniju preglednosti i uđe u središte raskrsnice, do momenta kada sledeće vozilo pristigne i zaustavi se na zaustavnoj liniji ili liniji preglednosti. Prema tome, vreme sleđenja u sporednom toku predstavlja period između dva uzastopna ulaska vozila u središte raskrsnice iz reda čekanja, a sastoji se od: 1) vremena kretanja u redu čekanja i zauzimanja čone pozicije i 2) vremena osmatranja saobraćajne situacije i donošenja odluke od strane vozača o nastavku kretanja kroz središte raskrsnice. Ovaj parametar obeležava se sa  $t_f$  i njegova veličina značajno utiče na kapacitet nesignalisanih raskrsnica. Što je sporedni manevr komplikovaniji, to je vreme osmatranja i donošenja odluke od strane vozača duže, pa je i vremenski interval sleđenja veći.

**Kritični interval sleđenja vozila u prioritetnom toku** (engl. *critical headway*) je minimalno potrebna veličina intervala sleđenja u glavnom toku, koja omogućava jednom vozilu iz sporednog toka prolazak kroz središte raskrsnice. Vozači prosečnih vozačkih sposobnosti, koji svojim vozilima vrše sporedni manevr (npr. skreću levo sa sporednog prilaza na kome je postavljen saobraćajni znak II-2 „Obavezno zaustavljanje“) koriste svaki interval sleđenja koji je jednak ili veći od kritičnog da bi izvršili prolazak kroz središte raskrsnice. Kritični interval sleđenja obeležava se sa  $t_c$ .



*HCM* (HCM, 2000) je izdanje američkog priručnika za proračun kapaciteta na putevima, posle koga su izašla još dva izdanja (2010 i 2016). Detaljna procedura za analizu kapaciteta i nivoa usluge za svaku vrstu nesignalisanih raskrsnica je data u 17. poglavlju ovog priručnika. Dobijena vrednost kapaciteta u svim izdanjima priručnika *HCM* izražava se jedinicom [voz/h]. Poglavlje 17 priručnika *HCM* (HCM, 2000) sadrži detaljno opisane postupke za:

- 1) Nesignalisane raskrsnice, na kojima se za regulisanje režima saobraćaja na sporednim prilazima koriste saobraćajni znaci: „ustupanje prvenstva prolaza” (II-1) ili „obavezno zaustavljanje” (II-2);
- 2) Nesignalisane raskrsnice, na kojima se za regulisanje režima saobraćaja na svim prilazima koriste saobraćajni znaci: „ustupanje prvenstva prolaza” (II-1) ili „obavezno zaustavljanje” (II-2);
- 3) Kružne raskrsnice.

Opisana metodologija ne sadrži postupak za proračun kapaciteta i nivoa usluge na nesignalisanim raskrsnicama, koje su regulisane znacima „ustupanje prvenstva prolaza” (II-1), a koji ne predviđaju obavezno zaustavljanje. Međutim smatra se da se korigovanjem određenih ključnih parametara u proračunu kapaciteta (npr. korigovanjem veličine vremena sleđenja, koje se za slučaj regulisanja znakom obaveznog zaustavljanja, računa kao vreme između uzastopnih polazaka vozila sa linije zaustavljanja, pa bi za proračun kapaciteta za slučaj regulisanja znakom (II-1) ova vrednost bila manja), opisana metodologija može primenjivati i za slučaj raskrsnica regulisanih znakom (II-1).

Prema obrascu *Harders* (Harders, 1968), potencijalni kapacitet svakog sporednog manevra računa se prema sledećoj relaciji (2.1), odnosno relaciji (17-3, priručnika *HCM* 2000):

$$c_{p,x} = v_{c,x} \cdot \frac{e^{-v_{c,x} \cdot t_{c,x}/3600}}{1 - e^{-v_{c,x} \cdot t_{f,x}/3600}} \quad (2.1)$$

gde su:

$c_{p,x}$  – potencijalni kapacitet sporednog manevra  $x$  [voz/h];

$v_{c,x}$  – konfliktni tok za sporedni manevar  $x$  [voz/h];

$t_{c,x}$  – kritični interval sleđenja za sporedni manevar  $x$  [s];

$t_{f,x}$  – interval sleđenja na sporednom pravcu za manevar  $x$  [s].

Osim konfliktnog toka, ulazni parametri za proračun kapaciteta su kritični interval sleđenja vozila u glavnom toku (engl. *critical headway* ( $t_{c,x}$ )) i interval sleđenja vozila u sporednom toku (engl. *follow-up headway* ( $t_{f,x}$ )).

Kritični interval sleđenja ( $t_{c,x}$ ) računa se prema sledećem izrazu (2.2), odnosno relaciji (17-1, priručnika *HCM* (HCM, 2000)):

$$t_{c,x} = t_{c,base} + t_{c,HV} \cdot P_{HV} + t_{c,G} \cdot G - t_{c,T} - t_{3,LT} \quad (2.2)$$

gde su:

$t_{c,x}$  – kritični interval sleđenja za manevar  $x$ ,

$t_{c,base}$  – bazni kritični interval sleđenja,

$t_{c,HV}$  – faktor prilagođavanja za teretna vozila (1,0 [s] ukoliko je glavni prilaz dvotračni i 2,0 [s] ukoliko je glavni prilaz četvorotračni),

$P_{HV}$  – procenat teretnih vozila u sporednom toku,

$t_{c,G}$  – faktor prilagođavanja za nagib na sporednom prilazu (0,1 [s] za skretanje desno sa sporednog prilaza – tok 9 i 0,2 [s] za kretanje pravo i skretanje levo sa sporednog prilaza),

$G$  – procenat nagiba u apsolutnoj vrednosti,

$t_{c,T}$  – faktor prilagođavanja za dvofazno izvođenje sporednog manevra (1,0 za svaku od dve faze; 0,0 ukoliko se sporedni manevar izvodi u jednoj fazi),

$t_{3,LT}$  – faktor prilagođavanja geometriji raskrsnice (0,7 [s] za levo skretanje sa sporednog prilaza na trokrakoj raskrsnici; 0,0 [s] u ostalim slučajevima).

Interval sleđenja vozila u sporednom toku ( $t_{f,x}$ ) računa se prema izrazu (2.3), odnosno relaciji (17-2, priručnika *HCM* (HCM, 2000)):

$$t_{f,x} = t_{f,base} + t_{f,HV} \cdot P_{HV} \quad (2.3)$$

gde su:

$t_{f,x}$  – interval sleđenja vozila u sporednom toku za manevar  $x$ ,

$t_{f,base}$  – bazni interval sleđenja vozila u sporednom toku,

$t_{f,HV}$  – faktor prilagođavanja za teretna vozila (0,9 [s] ukoliko je glavni prilaz dvotračni i 1.0 [s] ukoliko je glavni prilaz četvorotračni).

Bazne vrednosti kritičnog intervala sleđenja ( $t_{c,x}$ ) i intervala sleđenja ( $t_{f,x}$ ), date su u sledećoj tabeli (Tabela 2.1). Preporučene vrednosti  $t_c$  i  $t_f$  predstavljaju bazične vrednosti kritičnog intervala sleđenja i intervala sleđenja na sporednom toku, koje važe za homogeni tok sastavljen od putničkih automobila, koje se prvo modifikuju različitim faktorima uticaja, gde spada i faktor učešća teretnih vozila. Na taj način se dobijaju vrednosti  $t_c$  i  $t_f$  za nehomogen tok, koje se tek onda uvrštavaju u formulu za proračun kapaciteta, a izlazni rezultat izražen je jedinicom vozila na čas [voz/h]. Date bazične vrednosti dobijene su merenjem na terenu u različitim uslovima odvijanja saobraćaja u SAD, na nesignalisanim raskrsnicama, čije napojne deonice imaju dve ili četiri saobraćajne trake. Za napojne deonice sa šest saobraćajnih traka koriste se iste vrednosti kao i za napojne deonice sa četiri saobraćajne trake. (HCM, 2000)

Tabela 2.1 Bazine vrednosti kritičnog intervala sleđenja i intervala sleđenja na standardnoj TWSC raskrsnici

Manevar	Bazni kritični interval sleđenja $t_{c,base}$ [s]		Bazni interval sleđenja $t_{f,base}$ [s]
	Dvotračni glavni pravac	Četvorotračni glavni pravac	
Levo skretanje sa glavnog prilaza	4,1	4,1	2,2
Desno skretanje sa sporednog prilaza	6,2	6,9	3,3
Pravo kretanje sa sporednog prilaza	6,5	6,5	4,0
Levo skretanje sa sporednog prilaza	7,1	7,5	3,5

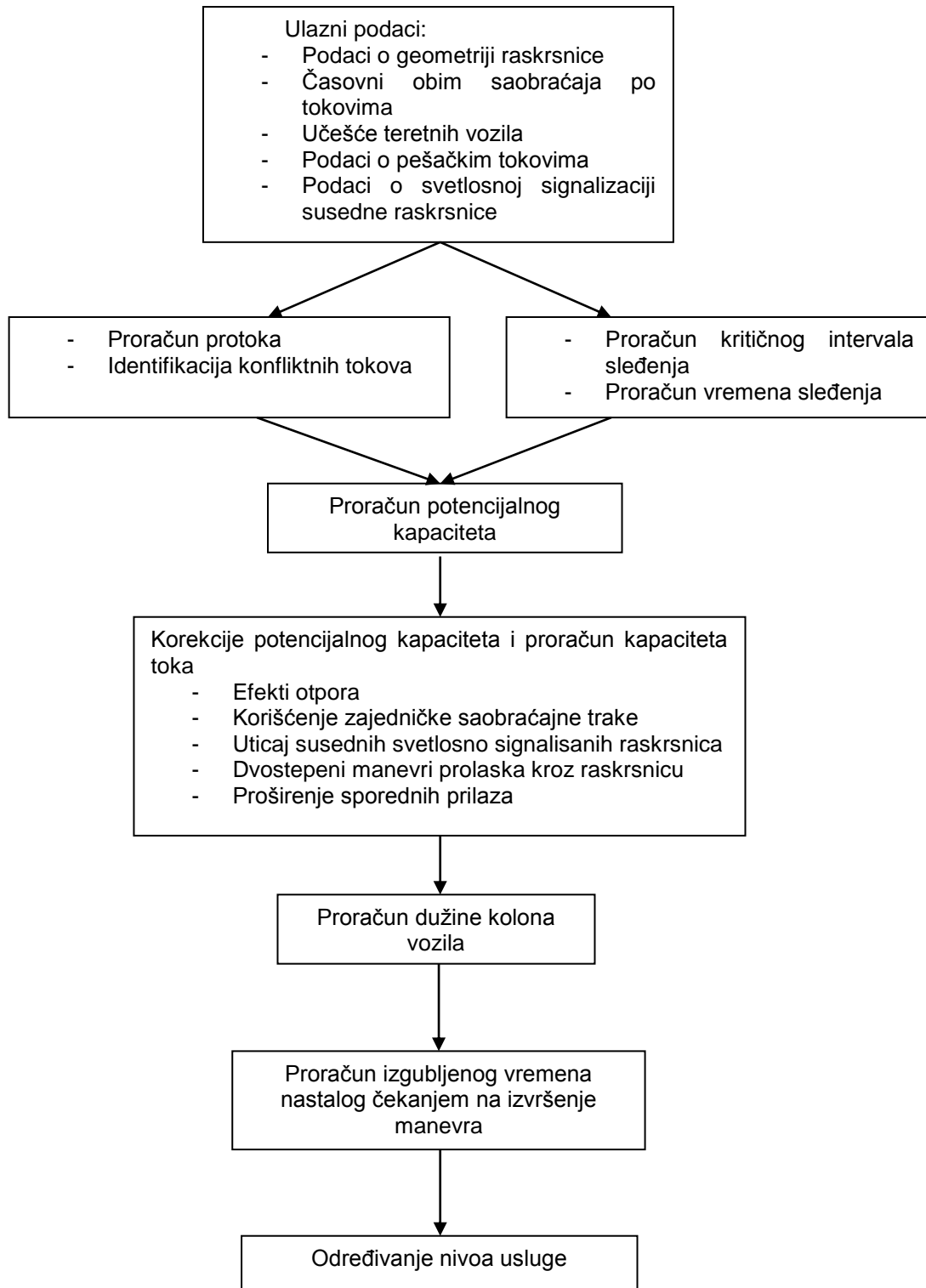
\*Izvor: Tabela preuzeta iz (HCM 2000, Exhibit 17-5).

Nakon proračuna potencijalnog kapaciteta sporednih manevara, standardnim postupkom koji je zasnovan na teoriji verovatnoće, proračunavaju se vrednosti praktičnog kapaciteta svakog sporednog manevara, a nakon toga i kapaciteta prilaza. Ovakav način definisanja tokova, konflikata i proračun kapaciteta, karakterističan je za sve nesignalisane trokrate i četvorokrate raskrsnice koje se mogu okarakterisati kao standardne, odnosno kod kojih se prioritetni prilazi nalaze jedan naspram drugog.

Prema HCM, kapacitet sporednog prilaza najviše zavisi od vrednosti kritičnog intervala sleđenja i vremena sleđenja, jer je obim konfliktnog saobraćaja konstantna veličina (za posmatrani slučaj). Što su vrednosti kritičnog intervala sleđenja i vremena sleđenja veće, kapacitet će biti manji i obrnuto. Prema većoj vrednosti kritičnog intervala sleđenja, a uz istu vrednost konfliktnog obima saobraćaja, dobija se manji kapacitet i veća vrednost izgubljenog vremena koja ujedno znači niži nivo usluge.

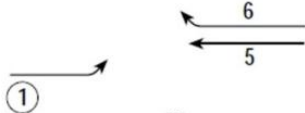
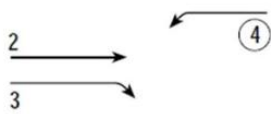
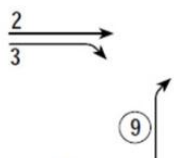
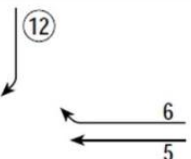
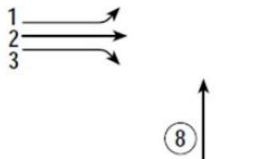
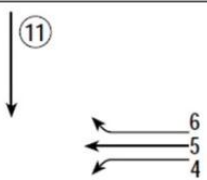
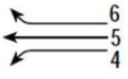
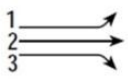
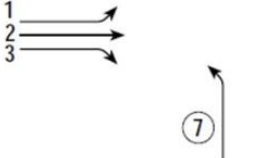
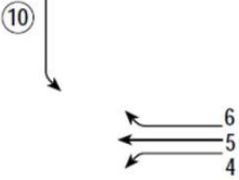
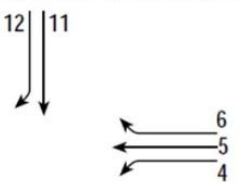
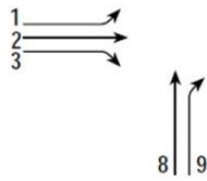
Na sledećem algoritmu (Slika 2.15), šematski je prikazan postupak proračuna kapaciteta i nivo usluge nesignalisanih raskrsnica na kojima su sporedni prilazi regulisani znakom obaveznog zaustavljanja. Nakon toga, na posebnoj strani (Slika 2.16) su date definicije i načini izračunavanja konfliktnih tokova na standardnoj nesignalisanoj raskrsnici. Sa slike (Slika 2.16) su izostavljeni pešački i biciklistički tokovi.

## Opšte karakteristike standardnih nesignalisanih raskrsnica



Slika 2.15 Algoritam proračuna kapaciteta i nivoa usluge na prioritetnim raskrsnicama čiji su sporedni prilazi regulisani znacima obaveznog zaustavljanja  
\*Izvor: Shema preuzeta iz (HCM 2000, Exhibit 17-1).

## Opšte karakteristike standardnih nesignalisanih raskrsnica

Tip manevra	Kretanja koja utiču na veličinu konfliktnog toka posmranog manevra Veličina konfliktnog toka, $V_{c,x}$	
Leva skretanja sa glavnog prilaza (1, 4)	 $V_{c,1} = v_5 + v_6^{[a]}$	 $V_{c,4} = v_2 + v_3^{[a]}$
Desna skretanja sa sporednog prilaza (9, 12)	 $V_{c,9} = \frac{v_2^{[b]}}{N} + 0.5v_3^{[c]}$	 $V_{c,12} = \frac{v_5^{[b]}}{N} + 0.5v_6^{[c]}$
Kretanja pravo sa sporednog prilaza (8, 11)	<p>Faza I</p>  $V_{c,I,8} = 2v_1 + v_2 + 0.5v_3^{[c]}$	 $V_{c,I,11} = 2v_4 + v_5 + 0.5v_6^{[c]}$
	<p>Faza II</p>  $V_{c,II,8} = 2v_4 + v_5 + v_6^{[a]}$	 $V_{c,II,11} = 2v_1 + v_2 + v_3^{[a]}$
Leva skretanja sa sporednog prilaza (7, 10)	<p>Faza I</p>  $V_{c,I,7} = 2v_1 + v_2 + 0.5v_3^{[c]}$	 $V_{c,I,10} = 2v_4 + v_5 + 0.5v_6^{[c]}$
	<p>Faza II</p>  $V_{c,II,7} = 2v_4 + \frac{v_5}{N} + 0.5v_6^{[d]} + 0.5v_{12}^{[e,f]} + 0.5v_{11}$	 $V_{c,II,10} = 2v_1 + \frac{v_2}{N} + 0.5v_3^{[d]} + 0.5v_9^{[e,f]} + 0.5v_8$

Slika 2.16 Definicija i izračunavanje konfliktnih tokova

\*Izvor: Shema preuzeta iz (HCM 2000, Exhibit 17-4).

Objašnjenja sa prethodne slike (Slika 2.16) su data u narednom delu teksta:

- 1) [a] Ako je saobraćajni tok u skretanju desno sa glavnog pravca odvojen ostrvom (tzv. kanalisano desno skretanje) i mora da se povinuje saobraćajnom znaku STOP/YIELD, onda tokovi  $v_3$  i  $v_6$  ne trebaju da se razmatraju.
- 2) [b] Ako postoji više od jedne saobraćajne trake na glavnom pravcu, onda se pretpostavlja da će tokovi u desnoj traci biti  $v_2/N$  i  $v_5/N$ , gde je  $N$  broj saobraćajnih traka u kretanju pravo.
- 3) [c] Ako postoji posebna saobraćajna traka za skretanje udesno na glavnom pravcu, onda tokovi  $v_3$  i  $v_6$  ne trebaju da se razmatraju.
- 4) [d] Ako glavni pravac ima više saobraćajnih traka, onda izostaviti tok desnog skretanja  $v_3$  prilikom proračuna konfliktnog toka za manevar 10, odnosno izostaviti tok desnog skretanja  $v_6$  prilikom proračuna konfliktnog toka za manevar 7.
- 5) [e] Ako je saobraćajni tok u skretanju desno sa sporednog pravca odvojen ostrvom (tzv. kanalisano desno skretanje) i mora da se povinuje saobraćajnom znaku STOP/YIELD, onda tokovi  $v_9$  i  $v_{12}$  ne trebaju da se razmatraju.
- 6) [f] Izostaviti tok  $v_9$  prilikom proračuna konfliktnog toka za manevar 10, odnosno izostaviti  $v_{12}$  iz proračuna konfliktnog toka za manevar 7, ako na glavnom pravcu ima više saobraćajnih traka. Koristiti polovine vrednosti za tokove  $v_9$  i  $v_{12}$ , ako sporedni prilaz ima proširenje za nekoliko mesta u redu, namenjenim za skretanje u desno (tzv. *flared approach*).

Merodavni kapacitet sporednog manevra se dobija redukcijom potencijalnog kapaciteta, brojnim faktorima, kao npr: 1) ometanjima vozila, 2) ometanjima pešaka, 3) korišćenjem zajedničke (deljene) saobraćajne trake. (Navedeno u izrazima od 17-4 do 17-16, (HCM, 2000))

HCM (HCM, 2000), u formuli prilikom računanja vremenskih gubitaka vozila, koja vrše sporedan manevar, dodaje 5 sekundi. Dodatnih 5 sekundi se odnose na: 1) vreme usporavanja vozila sa brzine slobodnog toka, kojom je išlo pre prilaza raskrsnici, do brzine kretanja vozila u koloni i 2) vreme ubrzavanja vozila od zaustavne linije do brzine slobodnog toka.

U izrazu (2.4), koji se koristi za proračun prosečnih vremenskih gubitaka vozila u toku, izraženih u [s/voz], može se zaključiti da navedena veličina zavisi od kapaciteta i protoka posmatranog toka. Navedeni izraz se upotrebljava, ako je za vreme perioda analize zahtev toka manji od kapaciteta. Ako je odnos toka i kapaciteta veći od 0,9, onda na prosečne vremenske gubitke značajno utiče dužina perioda analize. U većini slučajeva, preporuka je da period analize bude 15 minuta. Ako zahtevi toka prevazilaze kapacitet, tokom perioda analize od 15 minuta, onda prosečni vremenski gubici izračunati izrazom (2.4), neće biti tačni.

$$d = \frac{3600}{c_{m,x}} + 900T \left[ \frac{v_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_x}{c_{m,x}} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}}\right)\left(\frac{v_x}{c_{m,x}}\right)}{450T}} \right] + 5 \quad (2.4)$$

gde su:

$d$  – prosečni vremenski gubici [s/voz];

$v_x$  – tok kretanja  $x$  [voz/h];

$c_{m,x}$  – (merodavni) kapacitet kretanja  $x$  [voz/h];

$T$  – analizirani period (ako je 15 [min], onda je  $T=0,25$ ).

Vremenski gubici se računaju samo za vozila sporednih manevara, jer metodologija ne predviđa bilo kakvo ometanje tokova ranga 1. Metodologija pretpostavlja da se levo skretanje sa glavnog (prioritetnog) prilaza vrši iz posebne saobraćajne trake. Međutim, ako ne postoji posebna traka za levo skretanje, onda su u priručniku dati izrazi za proračun vremenskih gubitaka vozila ranga 1. (Izrazi 17-16 i 17-39, (HCM, 2000) )

Vrednosti prosečnih vremenskih gubitaka vozila, na osnovu kojih se određuje nivo usluge na TWSC raskrsnicama su date u narednoj tabeli (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 Kriterijum nivoa usluge na TWSC raskrsnicama

Nivo usluge	Vremenski gubici po vozilu [s/voz]
A	0 - 10
B	>10 - 15
C	>15 - 20
D	>25 - 35
E	>35 - 50
F	>50

\*Izvor: HCM 2000, Exhibit 17-2.

Ako se primenom metodologije HCM (HCM, 2000) dobije neprihvatljiv nivo usluge nekog sporednog manevara, onda se pri odlučivanju o merama regulisanja trebaju razmotriti i drugi priručnici, koji mogu sadržati pokazatelje opravdanosti sprovođenja određenih regulativnih mera.

### 3. Analiza postojećih istraživanja i postupaka proračuna kapaciteta i nivoa usluge standardnih nesignalisanih raskrsnica

#### 3.1. Istorijski pregled najvažnijih metoda za procenu kritičnih intervala sleđenja i istraživanja standardnih nesignalisanih raskrsnica

Radovima (Kinzer, 1933), (Greenshields, Thompson, Dickinson, & Swinton, 1934) i (Adams, 1936) su predstavljeni prvi rezultati istraživanja u realnom saobraćajnom toku. Već 1947. godine napravljena je jasna diferencijacija između kapaciteta deonice puteva, gde vladaju uslovi kontinualnog saobraćajnog toka i raskrsnica, gde vladaju uslovi povremeno prekinutih saobraćajnih tokova. (Greenshields, Schapiro, & Ericksen, 1947) U radu (Raff & Hart, 1950), prvi put se istražuje ponašanje vozača na nesignalisanim raskrsnicama i uticaj na uslove odvijanja saobraćaja. U istom radu su ustanovljeni i definisani pojmovi „*Accepted and Rejected Lags*” i ukazano je da se vrednosti prihvaćenih i odbačenih intervala značajno razlikuju u zavisnosti od geometrijskih karakteristika raskrsnice. Takođe, u istom radu je uobičen postupak za procenu kritičnog intervala sleđenja (engl. *critical gap*). Granice intervala potrebnog za izvođenje sporednog manevra su u granicama od najmanjeg prihvaćenog do najvećeg odbačenog intervala u konfliktnom toku.

Tokom 60-tih godina prošlog veka publikovano je više radova koji su se odnosili na kapacitet raskrsnica, od autora Hebert (Hebert, 1963) i Solberg i Oppenlander (Solberg & Oppenlander, 1964) i vremenskih gubitaka od autora Tanner (Tanner, 1962) i Hawkes (Hawkes, 1966). Yeo i Weesakul (Yeo & Weesakul, 1964), u svom radu, koji takođe razmatra vremenske gubitke na raskrsnicama, predstavlja prvi značajniji rad o kapacitetima raskrsnica sa australijskog kontinenta. U toku 1965. godine su realizovana dva značajna sistemska istraživanja kapaciteta raskrsnica. U istraživanju RRL (RRL, 1965) razmatraju se intervali sleđenja vozila na glavnim i sporednim prilazima raskrsnice, dok su u (HCM, 1965) definisane vrednosti kapaciteta prilaza nesignalisanih raskrsnica. U radu Ashwort (Ashwort, 1968), potvrđuje se pretpostavka o funkcionalnom značaju individualnih karakteristika i stohastički uticaj vozača na kapacitet raskrsnice.



Istovremeno, značajan model promoviše *Harders* ([Harders, 1968](#)), kojeg kasnije unapređuje *Siegloch* ([Siegloch, 1973](#)) sa novim preporukama za procenu veličina kritičnih intervala u zavisnosti od broja saobraćajnih traka. *Miller* ([Miller, 1972](#)), prvi sistematizuje devet različitih metoda za procenu kritičnih intervala. Kapacitet nesignalisanih raskrsnica na kojima je saobraćaj regulisan znacima prioriteta *TWSC* je zasnovan na modelu prihvatljivih intervala sleđenja, koji je razvijen u Nemačkoj. ([Harders, 1968](#)); ([Siegloch, 1973](#)). U principu ovaj model je zasnovan na uslovnim verovatnoćama pojave prihvatljivih intervala sleđenja u prioritetnom toku koji su dovoljni za izvođenje sporednih manevara.

Vozač pre izvođenja sporednog manevara procenjuje intervale koji se pojavljuju u konfliktnom toku i bira onaj koji je za njega prihvatljiv. Subjektivna procena prihvatljivog intervala sleđenja vrši se na osnovu objektivnih okolnosti: vrste i ranga sporednog manevara, geometrije raskrsnice, ograničenja brzine, broja prilaza, broja saobraćajnih traka koje preseca sporedni tok, nagiba prilaza, strukture sporednog toka, itd). U vezi kritičnog intervala (engl. *critical gap*) je objavljen veći broj radova, u kojima su analizirani postupci i procedure za njegovo utvrđivanje, kao npr. *Brilon i dr.* ([Brilon, Koenig, & Troutbeck, 1999](#)), u kojima se za praktičnu primenu favorizuju modeli *Hewit-a* koji su dati u radovima ([Hewitt, 1983](#)); ([Hewitt, 1985](#)) i ([Hewitt, 1993](#)). I pored toga, zaključak je da se kritični interval procenjuje, prema radu *Daganzo* ([Daganzo, 1981](#)), te da se zbog toga ne može meriti direktno na raskrsnici, prema radu *Tian i dr.* ([Tian, et al., 1999](#)).

Kritični interval sleđenja se prema postojećim metodologijama utvrđuje statističkom i matematičkom obradom rezultata merenja vremenskih intervala. Postupak merenja intervala sleđenja u konfliktnom toku je veoma složen i zahtevan. Metoda maksimalne verodostojnosti (engl. *Maximum Likelihood*, u radu *Troutbeck* ([Troutbeck, 1992](#))), preporučena je za procenu kritičnih intervala u više standardnih priručnika *HCM* (2000, 2010) i dr.

Maksimalna veličina protoka nekog sporednog manevara, pored intenziteta konfliktnog toka  $V_c$  i veličine minimalnog vremenskog intervala sleđenja vozila u sporednom toku (engl. *follow-up headway -  $t_f$* ), određena je i veličinom minimalnog prihvatljivog intervala u konfliktnom prioritetnom toku, koji je dovoljan za vršenje sporednog manevara. ([HCM, 2010](#)). Od veličine kritičnog intervala sleđenja zavisi broj, ali i verovatnoća pojave kritičnog intervala (engl. *critical gap*) u prioritetnom toku, pa samim tim i kapacitet svakog sporednog manevara.

Veličina kritičnih intervala sleđenja se utvrđuje na osnovu maksimalno odbačenog i minimalno prihvaćenog intervala sleđenja, kroz rešavanje kompleksnih jednačina i niz iterativnih postupaka, za šta su razvijeni i posebni softveri. Analitički postupak koji se primenjuje za obradu rezultata merenja podrazumeva i odbacivanje intervala koji po proceni obrađivača nisu bili dovoljni za bezbedno i pravilno izvođenje sporednog manevara. Rezultat toga su različite vrednosti kritičnog intervala sleđenja u sličnim uslovima, uz značajna odstupanja od srednje vrednosti.

Prema dostupnoj literaturi može se zaključiti da se problemom prihvatljivih intervala sleđenja i kapacitetom na standardnim nesignalisanim raskrsnicama bavio veliki broj autora. Svojstva intervala sleđenja su osnova mnogih primena u saobraćajnim analizama, kao što je slučaj i kod studija kapaciteta i analize nivoa usluge standardnih nesignalisanih raskrsnica.

Prema *Haight* ([Haight, 1963](#)), još od rada *Adams* ([Adams, 1936](#)), saobraćajni tok je razmatran kao stohastički proces. On je formulisao ideju dolaska vozila na raskrsnicu kao slučajan, odnosno Poasonov proces i proverama potvrdio dobro slaganje teorije sa podacima sa terena. Takođe, *Normann* ([Normann, 1942](#)), prema ([Vukadinović & Popović, 2004](#)), je putem eksperimenata uočio slaganje empirijske raspodele intervala vremena između uzastopnih vozila i teorijske krive tih intervala i utvrdio da se broj vozila u uzastopnim intervalima iste širine (istog vremenskog trajanja) raspodeljuje po Poasonovom zakonu.

Od tada, predloženo je mnogo različitih složenijih modela. Međutim, ne postoji jedinstven standardizovani okvir za analizu intervala sleđenja vozila u teoriji saobraćajnog toka. Danas se širom sveta, prema ([Wu, 2006](#)), može naći više od 30 modela za procenu kritičnih intervala sleđenja. U teoriji nesignalisanih raskrsnica, uopšteno se pretpostavlja da je ponašanje vozača homogeno i konzistentno (vozači istih psihofizičkih karakteristika, koji reaguju na isti način u svakom trenutku u vožnji).

### 3.2. Nesignalisane raskrsnice u priručniku *HCM* (1965)

U poglavlju 6, priručnika ([HCM, 1965](#)), su obrađene raskrsnice u nivou (engl. *at-grade intersections*), a u okviru njih je jedan deo posvećen nesignalisanim raskrsnicama. Odvijanje saobraćaja na nesignalisanim raskrsnicama se može posmatrati i analizirati na više načina, u zavisnosti od prisustva ili odsustva saobraćajnih znakova i prirode ovih načina regulisanja. U navedenom poglavlju su pomenuta tri načina regulisanja nesignalisanih raskrsnica:

- 1) bez saobraćajnih znakova,
- 2) saobraćajnim znakom „*YIELD*“, koji prema Pravilniku o saobraćajnoj signalizaciji Republike Srbije odgovara saobraćajnom znaku „*ustupanje prvenstva prolaza*“, sa oznakom II-1, i
- 3) saobraćajnim znakom „*STOP*“, koji prema Pravilniku o saobraćajnoj signalizaciji Republike Srbije odgovara saobraćajnom znaku „*obavezno zaustavljanje*“, sa oznakom II-2.

U narednom delu poglavlja, pažnja će biti posvećena nesignalisanim raskrsnicama, na čijim su sporednim prilazima postavljeni saobraćajni znakovi „*YIELD*“ i „*STOP*“.

#### 3.2.1. Nesignalisane raskrsnice regulisane saobraćajnim znakom „*YIELD*“

Saobraćajni znak „*YIELD*“ se koristi za regulisanje saobraćaja na nesignalisanim raskrsnicama, u slučajevima kada zbog geometrije raskrsnice ili uslova saobraćaja, najveći deo saobraćajnog toka sa sporednog prilaza može da prođe kroz središte raskrsnice, bez neophodnog zaustavljanja. Da bi se saobraćajni znak „*YIELD*“ postavio na sporednom prilazu nesignalisane raskrsnice, potrebno je zadovoljiti nekoliko uslova: 1) potrebno je da saobraćajni tok na prioritetnom prilazu ne bude intenzivan i 2) neophodno je da postoji dobra preglednost na raskrsnici. U tom slučaju, vozila koja dolaze sa sporednog prilaza nemaju obavezu da se svaki put u potpunosti zaustave kada prilaze raskrsnici.

Saobraćajni znak „*STOP*“ se koristi za regulisanje saobraćaja na nesignalisanim raskrsnicama, kada vozila iz saobraćajnog toka sa sporednog prilaza moraju obavezno da se zaustave na prilazu raskrsnici. Iz navedenog se može zaključiti da postoji razlika u obavezama vozača koji dolaze na sporedne prilaze nesignalisane raskrsnice, regulisane saobraćajnim znakovima „*YIELD*“ i „*STOP*“. Međutim, prema ([HCM, 1965](#)), sa gledišta kapaciteta ne postoji veća razlika, (možda mala), u kapacitetu nesignalisanih raskrsnica, na kojima na dva sporedna prilaza postoje saobraćajni znakovi „*YIELD*“ i „*STOP*“.

Dalje se navodi, da u slučaju kada su u prioritetnom toku saobraćajni tokovi visokog intenziteta, i ako se na sporednom prilazu nesignalisane raskrsnice nalazi saobraćajni znak „*YIELD*“, onda će se praktično svako vozilo sa ovog sporednog prilaza zaustaviti, kao da je na sporednom prilazu nesignalisane raskrsnice postavljen saobraćajni znak „*STOP*“.

Dakle, za svrhu razmatranja kapaciteta nesignalisane raskrsnice, sporedni prilazi regulisani saobraćajnim znakom „*YIELD*“ mogu da se posmatraju, kao da se radi o sporednim prilazima regulisanim saobraćajnim znakom „*STOP*“.

### **3.2.2. Nesignalisane raskrsnice regulisane saobraćajnim znakom „*STOP*“**

Prema (HCM, 1965), postavljanje saobraćajnog znaka „*STOP*“ na sporednim prilazima nesignalisane raskrsnice ima dve svrhe: 1) bezbednost i 2) olakšavanje kretanja saobraćajnih tokova. U priručniku „*Manual on Uniform Traffic Control Devices*“ je nabrojano sedam osnovnih načina upotrebe saobraćajnog znaka „*STOP*“:

- 1) Ukrštanje puta nižeg ranga sa putem višeg ranga, gde je primena pravila desne strane previše rizična,
- 2) Ukrštanje nekategorisanog puta, gradske ulice ili prigradskog puta sa državnim putem višeg ranga,
- 3) Ukrštanje dva glavna vangradska puta na kojima ne postoji signalizacija,
- 4) Ukrštanje ulice sa vangradskim putem ili drugom ulicom,
- 5) Nesignalisana raskrsnica na signalisanom području,
- 6) Ukrštanje sa železničkom prugom, gde vozilo prema zakonu ima obavezu da se zaustavi,
- 7) Raskrsnice na kojima postoji kombinacija velike dozvoljene brzine u prioritonom toku, ograničene preglednosti i registrovanih ozbiljnih saobraćajnih nezgoda.

Prema (HCM, 1965), nijedan od navedenih kriterijuma se ne zasniva strogo na saobraćajnim tokovima, i samo par poslednje navedenih kriterijuma se na neki način odnose na poboljšanje odvijanja saobraćaja. Svi kriterijumi se prvenstveno odnose na bezbednost saobraćaja.

### 3.2.3. Nesignalisane raskrsnice koje na dva sporedna prilaza imaju saobraćajni znak „STOP“

Ove raskrsnice su, prema ranije definisanoj terminologiji, označene sa TWSC. Prema (HCM, 1965), kada se na nesignalisanoj raskrsnici ukrštaju dva saobraćajna pravca sa relativno malim protocima vozila, onda će raskrsnica funkcionisati na odgovarajući način i bez postavljanja saobraćajnih znakova „STOP“. Kako intenziteti saobraćajnih tokova rastu, broj konflikata između vozila saobraćajnih tokova koji se ukrštaju takođe raste, sa povezanim povećanjem vremenskih gubitaka, što dovodi do tačke kada raskrsnica treba da bude regulisana i sa gledišta saobraćajnog toka i sa gledišta bezbednosti saobraćaja.

Tačne vrednosti saobraćajnih tokova kada nesignalisana raskrsnica treba da bude regulisana, na dva sporedna prilaza saobraćajnim znakovima „STOP“, ne mogu biti identifikovane, ali se preporučuje da se na dva prilaza postave saobraćajni znakovi „STOP“ kada 50% vozila sa sporednog pravca čeka da prođe kroz središte raskrsnice, zbog veličine saobraćajnog toka u kretanju pravo na glavnom pravcu.

Veoma jednostavno, na izolovanoj nesignalisanoj raskrsnici, saobraćajni tokovi na glavnom pravcu imaju kompletni prioritet nad prilazima ulice (puta) regulisanim saobraćajnim znakovima „STOP“, što znači da je na glavnom pravcu moguće povećanje kapaciteta, dok će na sporednom pravcu protok vozila opadati i postepeno se smanjivati do nule. Jedino izvodljivo rešenje kriterijuma za sporedni pravac moglo bi da bude kada su protoci vozila sa sporednog pravca ispod kapaciteta. Ovi protoci vozila se odnose na broj vozila sa sporednog pravca, koja prolaze kroz središte raskrsnice u vremenskim intervalima između vozila u kretanju pravo na glavnom pravcu. U praktičnim uslovima, navedeni problem je značajno složeniji, jer uključuje elemente kao što su: broj saobraćajnih traka na glavnom i sporednom pravcu (koji je regulisan saobraćajnim znakom „STOP“), dostupnost vremenskih intervala sleđenja, koji su posledica rada svetlosnih signala na prethodnim raskrsnicama u oba smera (i verovatnoće istovremenih javljanja takvih vremenskih intervala sleđenja u oba smera) i razlike između dužine prihvaćenih vremenskih intervala sleđenja od strane vozača, zavisno od toga koliko su dugo čekali na prilazu raskrsnice. Ako postoji veliki intenzitet saobraćajnih tokova na sporednom pravcu, onda se može desiti da oni „preuzmu“ raskrnicu, čak i pri većim intenzitetu saobraćajnih tokova na glavnom pravcu, čime prouzrokuju vremenske gubitke vozilima u kretanju pravo na glavnom pravcu. Primeri kapaciteta za ovaj tip raskrsnicama je dat u sledećim tabelama ( ).

Tabela 3.1 Primeri kapaciteta za raskrsnice sa četiri prilaza, regulisane saobraćajnim znakom „STOP“, sa ujednačenim tokovima (odnos saobraćaja na pravcima koji se ukrštaju je 50:50)

Tip raskrsnice	Kapacitet (voz/h)*
2 trake sa 2 trake	1900
2 trake sa 4 trake	2800
4 trake sa 4 trake	3600

Napomena: \* Ukupan kapacitet na svim prilazima.

\*Izvor: HCM 1965, TABLE 6.7.

Analiza postojećih istraživanja i postupaka proračuna  
kapaciteta i nivoa usluge standardnih nesignalisanih raskrsnica

---

Tabela 3.2 Primeri kapaciteta za četvorokrake raskrsnice (gde se ukrštaju 2 pravca sa po 2 trake), regulisane saobraćajnim znakom „STOP“, gde varira odnos veličine tokova koji se ukrštaju

Odnos tokova koji se ukrštaju	Kapacitet (voz/h)*
50/50	1900
55/45	1800
60/40	1700
65/35	1600
70/30	1550

Napomena: \* Ukupan kapacitet na svim prilazima.

\*Izvor: HCM 1965, TABLE 6.8.

Prema (HCM, 1965), mada je veći broj studija sproveden na nesignalisanim raskrsnicama, gde su dva sporedna prilaza regulisana saobraćajnim znakom „STOP“, na osnovu nijedne od njih se ne može direktno izraziti kapacitet sporednog pravca u zavisnosti od variranja saobraćajnih tokova na glavnom pravcu. U studijama gde su dati primeri, oni ne mogu direktno da se primene na bilo koju drugu nesignalisanu raskrsnicu, gde su dva sporedna prilaza regulisana saobraćajnim znakom „STOP“, zbog toga što lokalni uslovi (broj saobraćajnih traka i posebno postojeći vremenski intervali sleđenja) variraju u širokom rasponu od raskrsnice do raskrsnice. Ukratko rečeno, činjenice, koje su dobijene iz postojećih istraživanja, se ne mogu upotrebiti za uopštavanje i uspostavljanje generalnog kapaciteta standardne nesignalisane raskrsnice, gde su dva sporedna prilaza regulisana saobraćajnim znakom „STOP“.

U praktičnim uslovima, obično se za proračune, koji uključuju više nivoa usluge (niži intenziteti saobraćajnih tokova) na oba pravca, gde većina vozila dolazi na sporedni prilaz regulisan saobraćajnim znakom „STOP“ i može da se uključi ili prođe kroz središte raskrsnice bez znatnih vremenskih gubitaka, koristi isti aproksimativni metod koji je opisan kod nesignalisanih raskrsnica, gde nema saobraćajnih znakova na sporednim prilazima (3.1). U odsustvu određenih kriterijuma kod nesignalisanih raskrsnica, gde nema saobraćajnih znakova na sporednim prilazima, saobraćajni tokovi i kapaciteti se procenjuju na osnovu kriterijuma za signalisane raskrsnice. Ovde postoji pretpostavka o uslovu signalizacije, u kome je odnos deljenja signala proporcionalno podeljen na osnovu saobraćajnih tokova ulica koje se ukrštaju (direktno proporcionalan) i relativnih širina ulica (obrnuto proporcionalan).

$$ODS = \frac{t_1}{t_2} = \frac{st_1}{st_2} \times \frac{\check{s}_2}{\check{s}_1} \quad (3.1)$$

gde su:

ODS – odnos deljenja signala;

$t_1$  – vreme prve ulice;

$t_2$  – vreme druge ulice;

$st_1$  – saobraćajni tok prve ulice;

$st_2$  – saobraćajni tok druge ulice;

$\check{s}_1$  – širina prve ulice;

$\check{s}_2$  – širina druge ulice.

Za izraz (3.1), je važna pretpostavka da signal postoji i da se određuje, pomoću normalnih metoda za kapacitet raskrsnice. Sposobnost pretpostavljene situacije za deljenje signala je proporcionalno podeljena kroz razmatranje relativnih saobraćajnih tokova dve ulice i širine dve ulice, koja je dostupna za odvijanje saobraćaja.

Gde vremenski gubici vozila na sporednim prilazima postanu značajni, onda ova proporcionalna podeljenost više ne važi, zbog toga što jedan saobraćajni tok ima legalni prioritet nad drugim saobraćajnim tokom (što nije bio slučaj kod nesignalisanih raskrsnica, gde nema saobraćajnih znakova na sporednim prilazima).

### 3.3. Nesignalisane raskrsnice u priručniku *HCM* (1985)

U poglavlju 10, priručnika ([HCM, 1985](#)), su obrađene nesignalisane raskrsnice (engl. *unsignalized intersections*). U okviru navedenog poglavlja je data metodologija za TWSC raskrsnice i za nesignalisane raskrsnice sa četiri prilaza, od kojih su dva regulisana saobraćajnim znakom „*YIELD*“. Ove procedure nisu namenjene za korišćenje na nesignalisanim raskrsnicama sa četiri prilaza, od kojih su sva četiri regulisana saobraćajnim znakom „*STOP*“, i na nesignalisanim raskrsnicama gde na sporednim prilazima nisu postavljeni saobraćajni znakovi regulisanja. Procedura je zasnovana na upotrebi vremenskih intervala sleđenja saobraćajnog toka na glavnom pravcu od strane vozila koja se ukrštaju ili su u kretanju pravo kroz navedeni tok. Dalje, procedura zahteva jasno dodeljeno pravilo desne strane i da tokovi koji traže vremenske intervale sleđenja saobraćajnog toka na glavnom pravcu ostanu nepromenjeni.

Nesignalisane raskrsnice čine većinu raskrsnica u nivou u bilo kom sistemu ulične mreže, pa se saobraćajni znakovi „*STOP*“ i „*YIELD*“ koriste za dodeljivanje pravila desne strane jednom pravcu (ulici) na takvim raskrsnicama. Saobraćajni znakovi primoravaju vozače na kontrolisanom (sporednom) pravcu (ulici) da odlučuju o biranju vremenskih intervala sleđenja saobraćajnog toka na glavnom pravcu, unutar kojih će izvršiti svoj manevar ukrštanja ili kretanja pravo. Dakle, kapacitet kontrolisanih prilaza se zasniva na dva faktora:

- 1) Raspodela vremenskih intervala sleđenja saobraćajnog toka na glavnom pravcu;
- 2) Procena vozača sa kontrolisanih prilaza u biranju vremenskih intervala sleđenja saobraćajnog toka na glavnom pravcu, unutar kojih će izvršiti željeni manevar.

Pretpostavlja se da su vremenski intervali sleđenja saobraćajnog toka na glavnom pravcu slučajno raspodeljeni. Opisana procedura će biti manje pouzdana u situacijama kada su konfliktni tokovi u vidu plotuna. Metod uopšteno pretpostavlja da saobraćajni tok na glavnom pravcu nije ometan od strane saobraćajnog toka na sporednom pravcu. Ova pretpostavka je uopšteno dobra za periode rada kada nema zagušenja. Da bi se ispravno proračunala međusobna ometanja, metod je zasnovan na režimu prioriteta korišćenja vremenskih intervala sleđenja saobraćajnog toka na glavnom pravcu. Vremenske intervale sleđenja saobraćajnog toka na glavnom pravcu mogu da koriste više konkurentnih tokova, a kada se iskoristi od strane jednog vozila iz ovih tokova, onda više nije dostupan za korišćenje od strane drugog vozila.

Vremenski intervali sleđenja saobraćajnog toka na glavnom pravcu se koriste prema sledećem redu prioriteta:

- 1) desna skretanja sa sporednog pravca,
- 2) leva skretanja sa glavnog pravca,
- 3) kretanja pravo sa sporednog pravca,
- 4) leva skretanja sa sporednog pravca.



Osnovna struktura procedure je sledeća:

- 1) definisanje postojećih geometrijskih karakteristika i obima saobraćajnih tokova na istraživanoj raskrsnici;
- 2) određivanje „konfliktnog toka“ u kretanju pravo za svaki manevar sa sporednih prilaza, i za levo skretanje sa glavnog prilaza,
- 3) određivanje veličine vremenskih intervala sleđenja konfliktnog toka, koji je potreban vozilima da izvrše svaki manevar koji se ukršta sa konfliktnim saobraćajnim tokom,
- 4) određivanje kapaciteta vremenskih intervala sleđenja saobraćajnog toka na glavnom pravcu za zadovoljavanje potreba svakog od posmatranih manevara, koji koriste ove vremenske intervale sleđenja,
- 5) prilagođavanje tako proračunatih kapaciteta faktorima ometanja i korišćenju deljenih saobraćajnih traka.

U pogledu geometrijskih karakteristika raskrsnice, potrebno je prikupiti podatke:

- 1) broju i korišćenju saobraćajnih traka,
- 2) kanalisanju saobraćajnih traka,
- 3) procentu uzdužnog nagiba,
- 4) radijusu horizontalnih krivina i uglu prilaza, i
- 5) rastojanjima preglednosti na raskrsnici.

Konvertovanje jedinice [voz/h] u jedinicu [PA/h] se radi preko ekvivalenata za putnički automobil (PA), koji su dati u narednoj tabeli (Tabela 3.3).

*Tabela 3.3 Ekvivalenti za pretvaranje realnog u uslovno homogen tok na nesignalisanim raskrsnicama*

Tip vozila	Nagib na ulivnom grlu [%]				
	-4%	-2%	0%	+2%	+4%
Motocikl	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Putnički automobil	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4
Teretna vozila	1,0	1,2	1,5	2,0	3,0
Autovoz	1,2	1,5	2,0	3,0	6,0
Srednja vrednost	0,9	1,0	1,1	1,4	1,7

*\*Izvor: HCM 1985, TABLE 10-1.*

Priroda konfliktnih tokova na nesignalisanoj raskrsnici je relativno složena. Svaki posmatrani manevar se susreće sa različitim skupom konfliktnih tokova, koji su direktno povezani sa prirodom posmatranog manevara. Konfliktni tok (Tabela 3.4), u oznaci  $V_{ci}$ , za manevar  $i$ , predstavlja ukupan saobraćajni tok koji je konfliktan posmatranom manevaru  $i$ , izražen u [voz/h].

Oznaka (\*, Tabela 3.4) – ako u 1. slučaju postoji više od jedne saobraćajne trake na prioritetnom prilazu, onda je  $V_t$  saobraćajni tok u krajnjoj desnoj traci.

Oznaka (\*\*, Tabela 3.4) – ako kod 1, 3, i 4. slučaja postoji posebna traka za skretanje u desno sa prioritetnog toka, onda se  $V_r$  ili  $V_{ra}$  može izostaviti.

Analiza postojećih istraživanja i postupaka proračuna  
kapaciteta i nivoa usluge standardnih nesignalisanih raskrsnica

Oznaka (\*\*\*,Tabela 3.4) – ako kod 2. i 3. slučaja, postoje trake za desna skretanja iz glavnog toka, sa velikim radijusom krivine i/ili kontrolom skretanja znakovima „STOP“, „YIELD“, mogu se izostaviti  $V_r$  (Slučaj 2),  $V_{ra}$  i/ili  $V_{rb}$  (Slučaj 4).  $V_{rb}$  se takođe može eliminisati na glavnim prilazima sa više saobraćajnih traka.

Veličina kritičnog intervala zavisi od brojnih faktora:

- 1) tipa manevra koji se izvršava,
- 2) tipa regulisanja prilaza sporedne ulice („STOP“ ili „YIELD“),
- 3) dozvoljene brzine kretanja vozila na glavnom pravcu,
- 4) broja saobraćajnih traka na prilazima glavnog pravca,
- 5) geometrijskih karakteristika i u uslova okoline na raskrsnici.

Tabela 3.4 Definicije i proračun konfliktnih saobraćajnih tokova

Posmatrani manevar	Konfliktni tok, $V_{ci}$	Ilustracija
1. Desno skretanje sa sporedne ulice (sporednog prilaza)	$1/2(V_r)^{**} + V_t^*$	
2. Levo skretanje sa glavne ulice (glavnog prilaza)	$V_r^{***} + V_t^*$	
3. Kretanje pravo iz sporedne ulice (sporednog prilaza)	$1/2(V_{ra})^{**} + V_{ta} + V_{la} + V_{rb} + V_{tb} + V_{lb}$	
4. Levo skretanje sa sporedne ulice (sporednog prilaza)	$1/2(V_{ra})^{**} + V_{ta} + V_{la} + V_{rb}^{***} + V_{tb} + V_{lb} + V_o + V_{or}$	

Napomena: r – desno, l – levo, t – pravo, o – suprotni prilaz.

\*Izvor: HCM 1985, Figure 10-2.

Analiza postojećih istraživanja i postupaka proračuna  
kapaciteta i nivoa usluge standardnih nesignalisanih raskrsnica

---

Vrednosti kritičnog intervala sleđenja se biraju iz sledeće tabele (Tabela 3.5), u procesu koji se sastoji od dva dela:

- 1) bazna vrednost kritičnog intervala se bira iz prve polovine tabele za određeni tip manevra, tip kontrole i dozvoljenu brzinu kretanja vozila na glavnom pravcu na istraživanoj raskrsnici;
- 2) prilagođavanja i izmene bazne vrednosti kritičnog intervala se rade na osnovu drugog dela tabele u zavisnosti od brojnih faktora.

U narednoj tabeli (Tabela 3.5) je prikazan samo prvi deo tabele iz *HCM* (HCM, 1985), koji se odnosi na bazne vrednosti kritičnog intervala.

*Tabela 3.5 Vrednosti kritičnog intervala sleđenja za putničke automobile u [s], na nesignalisanim raskrsnicama*

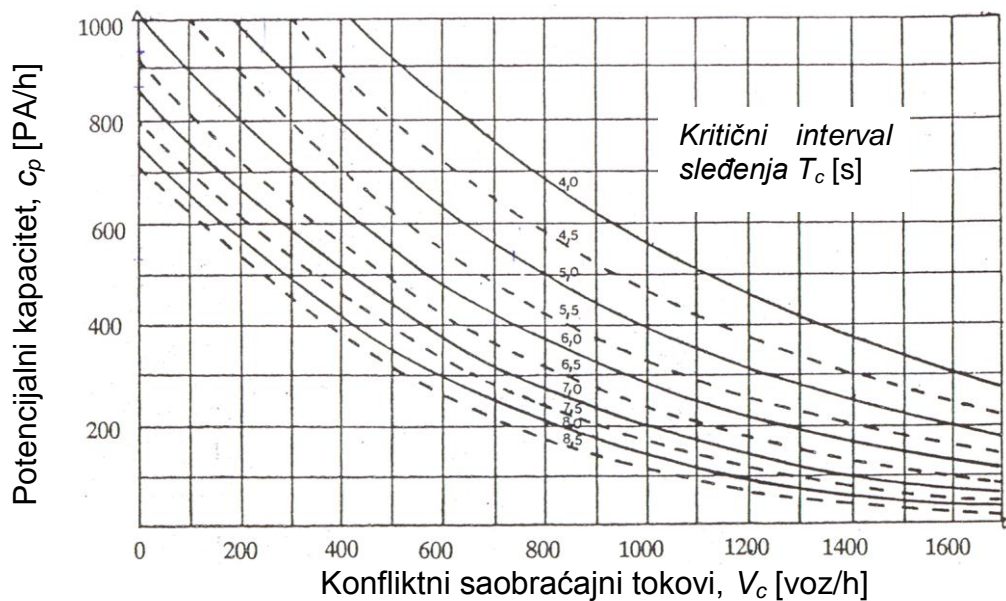
Manevar vozila i vrsta kontrole		Brzina na glavnom pravcu			
		30 mph ( $\approx 50$ km/h)		55 mph ( $\approx 90$ km/h)	
		Broj saobraćajnih traka na glavnom pravcu			
		2	4	2	4
Desno skretanje sa sporednog prilaza	YIELD	5,0	5,0	5,5	5,5
	STOP	5,5	5,5	6,5	6,5
Levo skretanje sa prioritetnog prilaza	Bez saobraćajnih znakova	5,0	5,5	5,5	6,0
Pravo kretanje sa sporednog prilaza	YIELD	5,5	6,0	6,5	7,0
	STOP	6,0	6,5	7,5	8,0
Levo skretanje sa sporednog prilaza	YIELD	6,0	6,5	7,0	7,5
	STOP	6,5	7,0	8,0	8,5

*Napomena: Prikazan je samo prvi deo tabele.*

*\*Izvor: HCM 1985, TABLE 10-2.*

Potencijalni kapacitet manevra se označava sa  $c_{p,i}$  (za manevar  $i$ ), i definiše se kao „idealni“ kapacitet za određeni posmatrani manevar, podrazumevajući sledeće uslove: 1) saobraćajni tok na glavnom pravcu ne blokira sporedni pravac, 2) saobraćajni tokovi sa raskrsnica u blizini ne ometaju rad posmatrane raskrsnice, 3) na prilazu raskrsnice postoji odvojena traka za ekskluzivno korišćenje svakog manevra sa sporednih prilaza (sporednog pravca) posmatrane raskrsnice, 4) drugi manevri ne ometaju posmatrani manevar.

Potencijalni kapacitet izražen u [PA/h] je prikazan na narednoj slici (Slika 3.1), i zasniva se na konfliktnom saobraćajnom toku, u oznaci  $V_c$  izražen u [voz/h], i kritičnom intervalu sleđenja, u oznaci  $T_c$  izražen u [s].



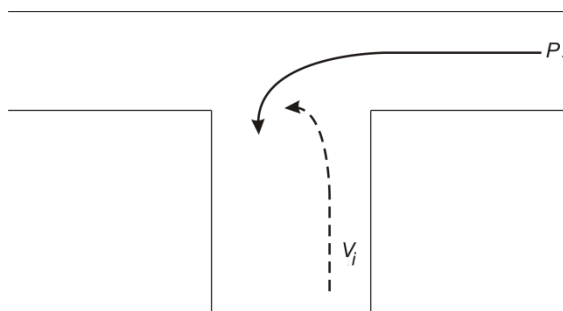
Slika 3.1 Potencijalni kapacitet u zavisnosti od konfliktnog toka i kritičnog intervala  
\*Izvor: HCM 1985, Figure 10-3.

Na nesignalisanim raskrsnicama, primećeno je da vozila koriste vremenske intervale sleđenja po načelu prioriteta. Kada saobraćajni tok postane zagušen u manevru višeg prioriteta, on može da ometa manevre nižeg prioriteta u korišćenju intervala sleđenja saobraćajnog toka, i samim tim da utiče na smanjenje potencijalnog kapaciteta manevra.

Uopšteno, uticaj ometanja se izražava množenjem potencijalnog kapaciteta manevra  $c_{p,i}$  sa nizom faktora ometanja (redukcionih faktora koji su dati na slici (Slika 3.4),  $P_j$ , za svaki ometani manevar  $j$ .

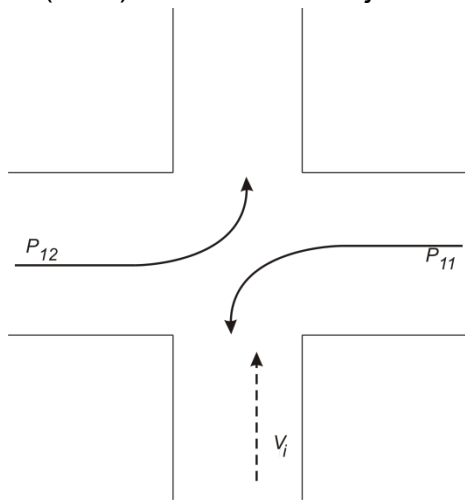
Ovi proračuni su prikazani na sledećim slikama (Slika 3.2 i Slika 3.3), i rezultuju nalaženjem kapaciteta manevra,  $c_{m,i}$ , koji predstavlja prilagođeni kapacitet manevra. Kapacitet manevra još uvek pretpostavlja da manevar ima posebnu traku na prilazu raskrsnice.

1. Leva skretanja sa sporednog prilaza (ulice) na trokrakoj (T) raskrsnici

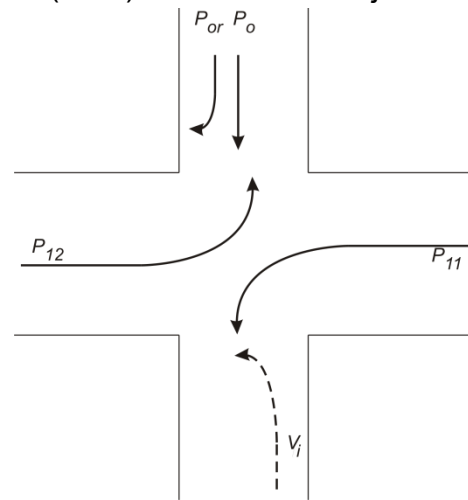


Slika 3.2 Ilustracija za proračune ometanja (Slučaj 1)  
\*Izvor: HCM 1985, Figure 10-4.

2. Kretanje pravo sa sporednog prilaza (ulice) na četvorokrakoj raskrsnici



3. Leva skretanja sa sporednog prilaza (ulice) na četvorokrakoj raskrsnici



Slika 3.3 Ilustracija za proračune ometanja (Slučajevi 2 i 3)

\*Izvor: HCM 1985, Figure 10-4.

Proračun faktora ometanja (redukcionih faktora) za slučajeve 1, 2 i 3 sa prethodne slike su date sledećim izrazima:

Slučaj 1. Leva skretanja sa sporednog prilaza (ulice) na trokrakoj (T) raskrsnici (3.2):

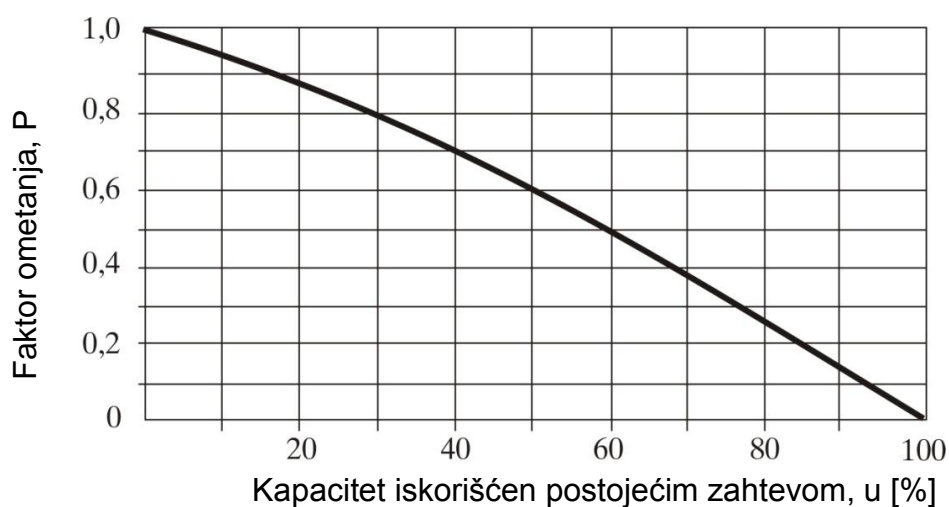
$$c_{mi} = c_{pi} \times P_1 \quad (3.2)$$

Slučaj 2. Kretanje pravo sa sporednog prilaza (ulice) na četvorokrakoj raskrsnici (3.3):

$$c_{mi} = c_{pi} \times P_{11} \times P_{12} \quad (3.3)$$

Slučaj 3. Leva skretanja sa sporednog prilaza (ulice) na četvorokrakoj raskrsnici (3.4):

$$c_{mi} = c_{pi} \times P_{11} \times P_{12} \times P_o \times P_{or} \quad (3.4)$$



Slika 3.4 Faktori ometanja kao rezultat zagušenih manevara

\*Izvor: HCM 1985, Figure 10-5.

Do sada, metodologija je pretpostavljala da svaki manevar sa sporednog prilaza (ulice) ima posebnu saobraćajnu traku. Ovo često nije slučaj, i često se dešava da dva ili tri manevara dele jednu saobraćajnu traku na sporednom prilazu. Kada nekoliko manevara dele jednu saobraćajnu traku koristi se sledeća jednačina (3.5) da bi se odredio kapacitet deljenje trake u [PA/h] (jednačina 10-1, (HCM, 1985)):

$$c_{SH} = \frac{v_l + v_t + v_r}{\left[ \frac{v_l}{c_{ml}} \right] + \left[ \frac{v_t}{c_{mt}} \right] + \left[ \frac{v_r}{c_{mr}} \right]} \quad (3.5)$$

gde su:

- $c_{SH}$  – kapacitet zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];
- $v_l$  – intenzitet levog skretanja iz zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];
- $v_t$  – intenzitet kretanja pravo iz zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];
- $v_r$  – intenzitet desnog skretanja iz zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];
- $c_{ml}$  – kapacitet levog skretanja iz zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];
- $c_{mt}$  – kapacitet kretanja pravo iz zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];
- $c_{mr}$  – kapacitet desnog skretanja iz zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h].

Samo oni manevari koji dele saobraćajnu traku se uključuju u jednačinu (3.5). Proračuni koji su opisani u metodologiji imaju za rezultat kapacitet svake saobraćajne trake na sporednim prilazima nesignalisane raskrsnice, regulisane saobraćajnim znakovima „STOP“ ili „YIELD“. Kriterijumi za nivo usluge ove metodologije su utvrđeni u opštim uslovima i vezani su sa opšte granice vremenskih gubitaka. Kriterijumi su dati u narednoj tabeli (Tabela 3.6), a zasnivaju se na rezervi, ili nekorišćenom, kapacitetu posmatrane saobraćajne trake. Vrednost se računa preko izraza (3.6), (jednačina 10-2, (HCM, 1985)):

$$c_R = c_{SH} - v \quad (3.6)$$

gde su:

- $c_R$  – rezerva ili nekorišćeni kapacitet saobraćajne trake [PA/h];
- $c_{SH}$  – kapacitet zajedničke (deljene) saobraćajne trake [PA/h];
- $v$  – ukupan intenzitet saobraćajnog toka koji koristi saobraćajnu traku [PA/h].

*Tabela 3.6 Kriterijumi za nivo usluge na nesignalisanim raskrsnicama*

Rezerva kapaciteta [PA/h]	Nivo usluge	Očekivani gubitak vremena na sporednom prilazu (ulici)
≥ 400	A	Mali gubici ili nema gubitaka
300 – 399	B	Kraći gubici
200 – 299	C	Srednji gubici
100 – 199	D	Duži gubici
0 – 99	E	Vrlo dugi gubici
*	F	*

*Napomena: \*Kada zahtevi saobraćaja prevazilaze kapacitet saobraćajne trake, onda dolazi do ekstremnih vremenskih gubitaka i pojave redova čekanja vozila, koji utiču na ostale maneuvre na raskrsnici.*

*\*Izvor: HCM 1985, TABLE 10-3.*

### 3.4. Nesignalisane raskrsnice u priručniku HCM (1994)

U poglavlju 10, priručnika (HCM, 1994), su obrađene nesignalisane raskrsnice (engl. *unsignalized intersections*) i u ovom izdanju priručnika se prvi put sreću skraćenice TWSC i AWSC. U ovom izdanju priručnika su date dve odvojene metodologije. Prvi deo poglavlja se odnosi na preporučenu metodologiju za analizu TWSC raskrsnica, a drugi deo poglavlja se odnosi na preporučenu metodologiju za analizu AWSC raskrsnica.

U poglavlju nisu navedene procedure za analizu nesignalisanih raskrsnica, koje na sporednim prilazima nemaju postavljene saobraćajne znakove kontrole (regulisanja), i za kružne raskrsnice.

Analiza kapaciteta TWSC raskrsnica zavisi od jasnog opisa i razumevanja interakcije vozača sa sporednog prilaza sa vozačima ili vozilima sa glavnog pravca. Modeli prihvatanja intervala sleđenja i empirijski modeli su razvijani kako bi opisali ovu interakciju. Procedure opisane u poglavlju se temelje na modelu prihvatanja intervala sleđenja razvijenim u Nemačkoj. (Harders, 1968); (Siegloch, 1973)

Teorija prihvatljivih intervala sleđenja se zasniva na tri osnovna elementa:

- 1) veličini i raspodeli (dostupnosti) vremenskih intervala sleđenja na glavnom pravcu,
- 2) korisnosti navedenih intervala sleđenja za vozače sa sporednog pravca, i
- 3) relativnog prioriteta različitih saobraćajnih tokova na raskrsnici (Slika 3.5).

Prema navedenim modelima koji su razvijeni u Nemačkoj, potencijalni kapacitet svakog sporednog manevra se računa prema sledećem izrazu (3.7), a prevod je preuzet iz Kuzović (Kuzović, 2000):

$$c_{p,x} = \frac{3600}{t_f} e^{-\frac{\left[ \sum_y V_{c,y} \right] t_0}{3600}} \quad (3.7)$$

gde su:

$c_{p,x}$  – potencijalni kapacitet sporednog manevra (kretanja) x [PA/h];

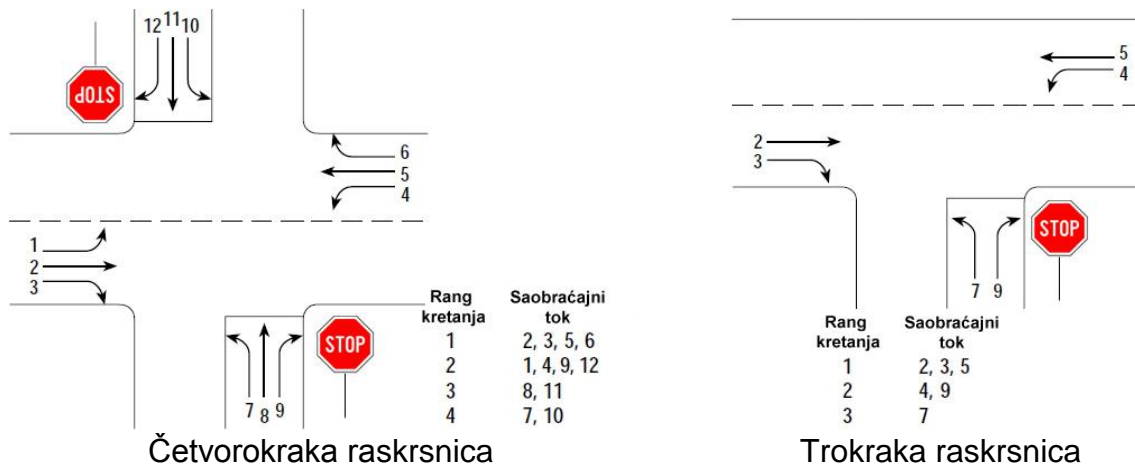
$V_{c,y}$  – veličina konfliktnog toka y [voz/h];

$t_0 = t_g - (t_f / 2)$ ;

$t_g$  – kritični interval (minimalni vremenski interval sleđenja između vozila, koji omogućuje obavljanje manevra (kretanja) nižeg ranga kroz raskrsnicu) [s].

$t_f$  – vremenski interval (kašnjenja) pri startovanju [s].

## Analiza postojećih istraživanja i postupaka proračuna kapaciteta i nivoa usluge standardnih nesignalisanih raskrsnica



Slika 3.5 Saobraćajni tokovi na nesignalisanoj raskrsnici  
\*Izvor: HCM (1994).

Primena metodologije analize kapaciteta i nivoa usluge nesignalisanih raskrsnica se zasniva na sledećim postupcima, iz (HCM, 1994), a prevod iz (Kuzović, 2000):

- 1) Utvrđivanju postojećih geometrijskih i saobraćajnih uslova za raskrsnicu u razmatranju,
- 2) Utvrđivanju konfliktnih tokova, kroz koje vozila moraju proći (leva skretanja sa glavnog pravca i sva kretanja sa sporednog pravca),
- 3) Utvrđivanju veličine intervala sleđenja u konfliktnom saobraćajnom toku (potrebnog za vozila sa nižim rangom kretanja),
- 4) Utvrđivanju potencijalnog kapaciteta na bazi intervala sleđenja u glavnom toku,
- 5) Prilagođavanju izračunatog potencijalnog kapaciteta u otežanim uslovima i upotrebi zajedničke trake,
- 6) Utvrđivanju prosečnih vremenskih gubitaka za sva kretanja i na osnovu toga utvrđivanju nivoa usluge za svako kretanje pojedinačno.

U (HCM, 1994), konvertovanje jedinice [voz/h] u jedinicu [PA/h] se radi preko ekvivalenata za putnički automobil (PA), koji su dati u tabeli (Tabela 3.3), koja je identična tabeli iz (HCM, 1985).

Prema HCM (HCM, 1994), a u skladu sa prevodom Kuzović (Kuzović, 2000), kritična veličina intervala sleđenja definiše se kao minimalna veličina vremenskog intervala koja dopušta vozilima sa sporednog pravca izvršenje manevra kretanja kroz raskrsnicu, uz relaciju (3.8). Navedena relacija ne mora uvek u potpunosti da bude tačna, jer se svi vozači ne ponašaju isto u istim situacijama.

$$\text{Maksimalni odbačeni interval sleđenja} < \text{Vozačev kritični interval sleđenja} \leq \frac{\text{Prihvatljiv interval sleđenja}}{\text{Prihvatljiv interval sleđenja}} \quad (3.8)$$

Priroda konfliktnih tokova na nesignalisanoj raskrsnici je relativno složena. Svaki posmatrani manevar se susreće sa različitim skupom konfliktnih tokova, koji su direktno povezani sa prirodom posmatranog manevra.



Analiza postojećih istraživanja i postupaka proračuna  
kapaciteta i nivoa usluge standardnih nesignalisanih raskrsnica

Konfliktni tok (Tabela 3.7), u oznaci  $V_{c,x}$  za manevar  $x$ , predstavlja ukupan saobraćajni tok koji je konfliktan posmatranom manevaru  $x$ , izražen u [voz/h]. Tokovi označeni brojevima od 1 do 6 pripadaju glavnom pravcu, a tokovi označeni brojevima od 7 do 12 pripadaju sporednom pravcu.

Tabela 3.7 Definicije i proračun konfliktnih tokova za dva sporedna prilaza

Posmatrani manevar	Konfliktni tok, $V_{c,x}$	Ilustracija
1. Desno skretanje sa sporednog prilaza (ulice) ( $V_{c,9}$ ) i ( $V_{c,12}$ )	$V_{c,9} = 1/2(V_3)^{(1)} + V_2^{(2)}$ $V_{c,12} = 1/2(V_6)^{(6)} + V_5^{(7)}$	
2. Levo skretanje sa glavnog prilaza (ulice) ( $V_{c,4}$ ) i ( $V_{c,1}$ )	$V_{c,4} = V_2 + V_3^{(3)}$ $V_{c,1} = V_5 + V_6^{(8)}$	
3. Kretanje pravo sa sporednog prilaza (ulice) ( $V_{c,8}$ ) i ( $V_{c,11}$ )	$V_{c,8} = 1/2(V_3)^{(1)} + V_2 + V_1 + V_6^{(3)} + V_5 + V_4$	
	$V_{c,11} = 1/2(V_6)^{(6)} + V_5 + V_4 + V_3^{(8)} + V_2 + V_1$	
4. Levo skretanje sa sporednog prilaza (ulice) ( $V_{c,7}$ ) i ( $V_{c,10}$ )	$V_{c,7} = 1/2(V_3)^{(1)} + V_2 + V_1 + 1/2(V_6)^{(5)} + V_5 + V_4 + 1/2(V_{11} + V_{12}^{(4)})$	
	$V_{c,10} = 1/2(V_6)^{(8)} + V_5 + V_4 + 1/2(V_3)^{(10)} + V_2 + V_1 + 1/2(V_8 + V_9^{(9)})$	

\*Izvor: HCM 1994, Figure 10-3 (a) i (b).

Oznake iz prethodne tabele (Tabela 3.7), od (1) do (10) su date u narednom delu:

- 1) (1) i (6), ako na glavnom pravcu postoji posebna traka za desna skretanja, i/ili  $V_3$  ( $V_6$ ) je regulisano saobraćajnim znakom STOP/YIELD, onda se  $V_3$  ( $V_6$ ) može eliminisati,
- 2) (2) i (7),  $V_2$  ( $V_5$ ) uključuje samo tokove u desnoj traci,
- 3) (3) i (8), ako je desno skretanje regulisano saobraćajnim znakom STOP/YIELD, onda se  $V_3$  ( $V_6$ ) može eliminisati,
- 4) (4) i (9), ako glavni pravac ima više saobraćajnih traka, onda se  $V_{12}$  ( $V_9$ ) može eliminisati,
- 5) (5) i (10), ako na glavnom pravcu postoji posebna traka za desna skretanja, i/ili  $V_6$  ( $V_3$ ) je regulisano saobraćajnim znakom STOP/YIELD, i/ili glavni pravac ima više saobraćajnih traka, onda se  $V_6$  ( $V_3$ ) može eliminisati.

U narednoj tabeli (Tabela 3.8), su date vrednosti kritičnog intervala  $t_g$  i vremena sleđenja  $t_f$  na TWSC raskrsnicama, koje su dobijene na osnovu istraživanja, u kojima je dozvoljena brzina 30 [mph] ( $\approx 50$  [km/h]). Ovi podaci se mogu primeniti u slučaju nepostojanja dostupnih podataka i za brzine različite od 50 [km/h].

Tabela 3.8 Vrednosti kritičnog intervala  $t_g$  i vremena sleđenja  $t_f$  na TWSC raskrsnicama

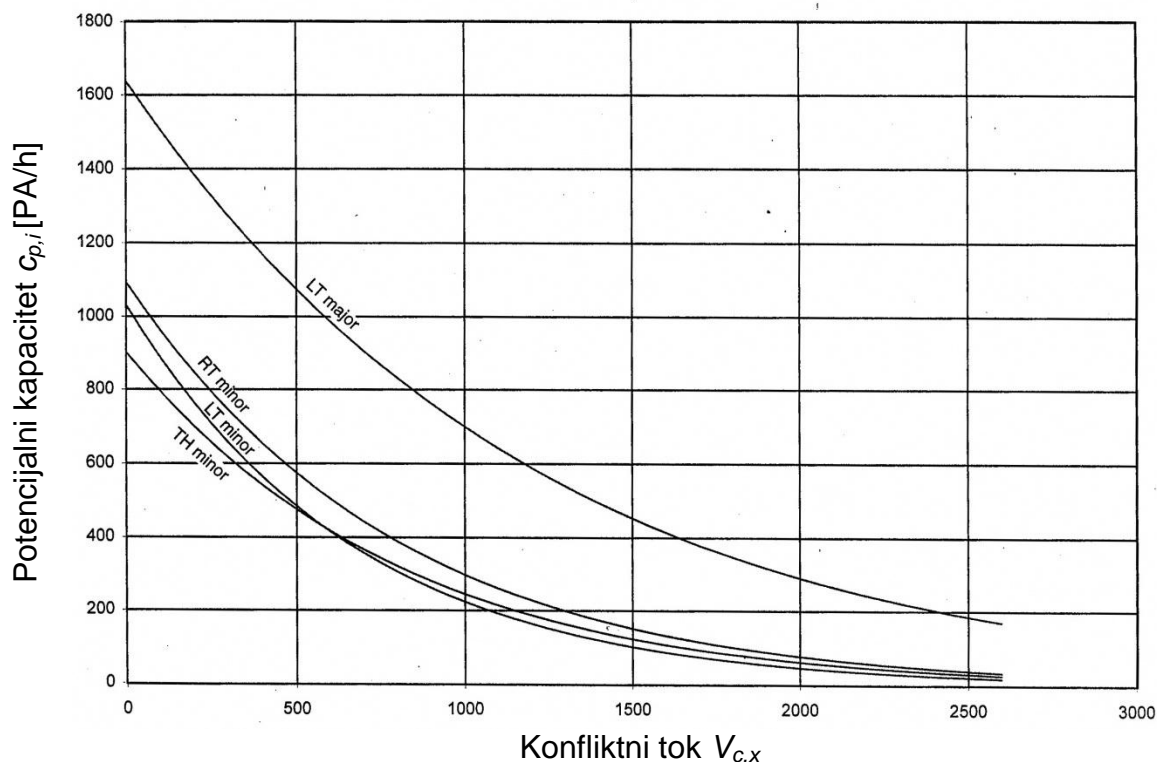
Manevar vozila	Kritičan interval u prioritetnom toku $t_g$ [s]		Vreme kašnjenja pri startu $t_f$ [s]
	Dvotračni glavni put	Četvorotračni glavni put	
Levo skretanje sa prioritetnog prilaza (engl. <i>LT major</i> )	5,0	5,5	2,1
Desno skretanje sa sporednog prilaza (engl. <i>RT minor</i> )	5,5	5,5	2,6
Kretanje pravo sa sporednog prilaza (engl. <i>TH minor</i> )	6,0	6,5	3,3
Levo skretanje sa sporednog prilaza (engl. <i>LT minor</i> )	6,5	7,0	3,4

\*Izvor: HCM 1994, TABLE 10-2.

Potencijalni kapacitet kretanja označen sa  $c_{p,x}$  (za kretanje  $x$ ), definisan je kao kapacitet pri idealnim uslovima za pojedinačna kretanja, podrazumevajući sledeće uslove: 1) nema uticaja susednih raskrsnica, 2) sva kretanja sa sporednog pravca imaju posebnu traku, a takođe i na glavnom pravcu leva skretanja imaju posebnu traku, 3) kretanja ranga 2, 3 i 4 podređena su rangu 1. (Kuzović, 2000)

Na narednoj slici (Slika 3.6) je prikazan potencijalni kapacitet u zavisnosti od konfliktnog toka i tipa manevra, za dvotračni put.

U priručniku su opisani faktori ometanja za manevre rangova 2, 3 i 4, preko verovatnoća (izrazi 10-2 do 10-8 i 10-10, HCM 1994), pa se primenom tih izraza dobijaju merodavni kapaciteti, umesto potencijalnih kapaciteta.



Slika 3.6 Potencijalni kapacitet zasnovan na konfliktnom toku i tipu manevra (dvotračni put)  
\*Izvor: HCM 1994, Figure 10-4.

Prema Ruškić (Ruškić, 2013), za razliku od izdanja HCM (1985), u izdanju HCM (1994), dat je empirijski obrazac za proračun prosečnih vremenskih gubitaka sporednih manevara, kao i postupak za utvrđivanje ukupnih prosečnih vremenskih gubitaka na sporednim i glavnim prilazima, koji predstavljaju relevantan parametar za ocenu nivoa usluge prilaza nesignalisane raskrsnice. Prosečni vremenski gubici se prema HCM (HCM, 1994) računaju prema sledećoj formuli (3.9), odnosno formuli (10-11) navedenog priručnika:

$$D = \frac{3600}{c_{m,x}} + 900 \cdot T \cdot \left[ \frac{V_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left( \frac{V_x}{c_{m,x}} - 1 \right)^2 + \frac{\left( \frac{3600}{c_{m,x}} \right) \left( \frac{V_x}{c_{m,x}} \right)}{450 \cdot T}} \right] \quad (3.9)$$

gde su:

$D$  – prosečni vremenski gubici [s/voz];

$V_x$  – tok kretanja  $x$  [voz/h];

$c_{m,x}$  – (merodavni) kapacitet kretanja  $x$  [voz/h];

$T$  – analizirani period (ako je 15 [min], onda je  $T=0,25$ ).

Nivo usluge je dat u narednoj tabeli (Tabela 3.9), pri čemu postoji šest nivoa usluge. Granice su definisane prema kriterijumu ukupnih vremenskih gubitaka.

Tabela 3.9 Kriterijumi za nivoje usluge TWSC raskrsnica

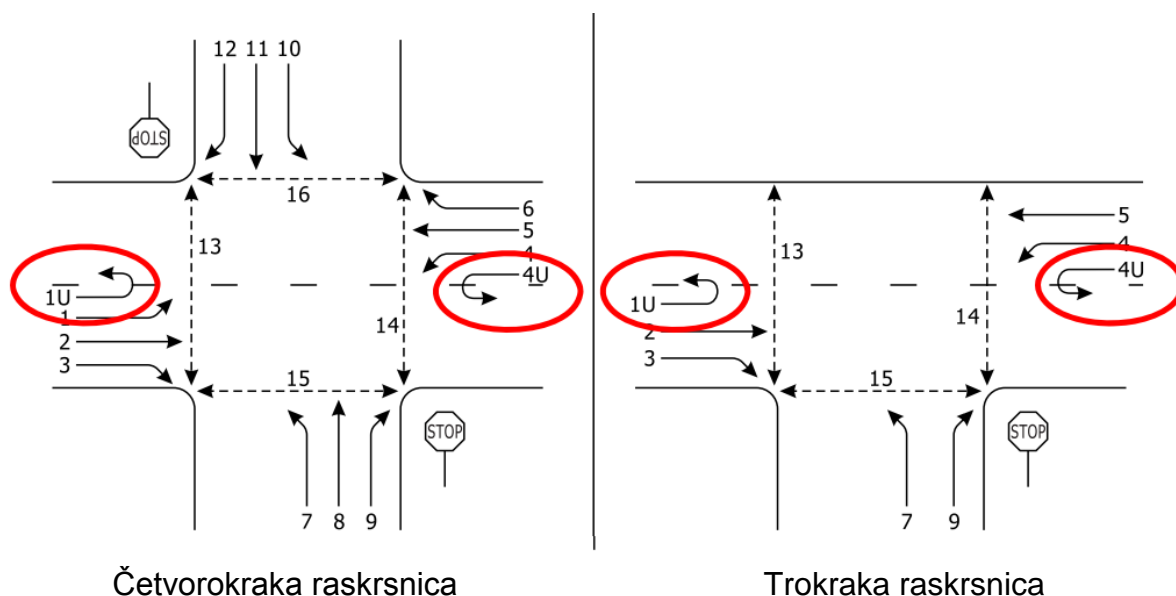
Nivo usluge	Prosečni vremenski gubici [s/voz]
A	$\leq 5$
B	$> 5 \text{ i } \leq 10$
C	$> 10 \text{ i } \leq 20$
D	$> 20 \text{ i } \leq 30$
E	$> 30 \text{ i } \leq 45$
F	$> 45$

\*Izvor: HCM 1994, TABLE 10-3.

### 3.5. Nesignalisane raskrsnice u priručniku HCM (2000/2010)

Metodologija na kojoj se zasniva proračun kapaciteta nesignalisanih raskrsnica po priručniku HCM (HCM, 2000) je obrađena u drugom poglavlju (Tačka 2.3).

Metodologija data u izdanju priručnika HCM (HCM, 2010) se razlikuje od izdanja HCM (HCM, 2000), po dodatnom manevru u prioritetnom toku, na glavnom pravcu. Dodatni manevar se odnosi na polukružna okretanja (Slika 3.7), ali ovaj aspekt u disertaciji nije analiziran. Na snimcima i kasnijoj analizi raskrsnica (poglavlje 6), na posmatranom uzorku raskrsnica nisu primećena polukružna okretanja na glavnom pravcu. Kako polukružna okretanja nisu razmatrana, metodologije (HCM, 2000) i (HCM, 2010) se mogu posmatrati na isti način.



Slika 3.7 Saobraćajni tokovi na nesignalisanoj raskrsnici

\*Izvor: HCM (2010).

### 3.6. Diskusija o postupcima za proračun kapaciteta nesignalisanih raskrsnica

Prema *Đorđević i Bogdanović (Đorđević & Bogdanović, 2002)*, postupak *HCM (HCM, 1994)* ne sadrži metode za utvrđivanje kapaciteta prilaza sa kojih se vrše manevri, već pojedinačnih tokova. Osim toga, metodologija ne uzima u obzir pitanja u vezi kapaciteta tokova, koji se kreću glavnim (prioritetnim) putem i imaju prvenstvo prolaza u odnosu na druge saobraćajne tokove na nesignalisanoj raskrsnici. Na osnovu nalaza navedene metodologije, na prioritetnim prilazima u zoni raskrsnice ne dolazi do značajnijeg usporavanja saobraćaja usled ometanja vozila nižeg ranga, pa se smatra da u prioritetnim tokovima ne nastaju vremenski gubici.

Metodologije koje su navedene u ovom poglavlju, a razvijane do *(HCM, 1994)*, što se odnosi na *(HCM, 1965)* i *(HCM, 1985)* su uglavnom prevaziđene sa gledišta trenutnih saobraćajnih zahteva i potreba. U navedenom periodu je došlo do većih promena u uslovima odvijanja saobraćaja. Navedene promene se mogu svrstati u nekoliko tipova: 1) promene u geometriji prilaza nesignalisanih raskrsnica, 2) promene karakteristika vozača i 3) promene u vozno-dinamičkim karakteristikama vozila.

U izdanju priručnika *(HCM, 1994)* je postavljena osnova za novija izdanja priručnika. Od važnijih stvari treba pomenuti da se prvi put sreću skraćenice *TWSC* i *AWSC*, obeležavanje tokova na glavnom pravcu (brojevima 1-6) i obeležavanja tokova na sporednom pravcu (brojevima 7-12). U izdanju priručnika *(HCM, 1985)* se prvi put sreće termin kritični interval sleđenja i date su vrednosti za četiri sporedna manevra, kao i primeri za računanje konfliktnih tokova.

U okviru priručnika *(HCM, 1994)*, je došlo do izmena, koje se ogledaju u uvođenju i unapređenju modela prihvatljivih intervala sleđenja u proračun kapaciteta sporednih manevara. Drugo značajno unapređenje je redefinisane nivoa usluge nesignalisane raskrsnice uvođenjem pojma prosečnih vremenskih gubitaka i obrasca za proračun ukupnih prosečnih vremenskih gubitaka prilaza, koji predstavljaju osnovni parametar za ocenu uslova odvijanja saobraćaja, odnosno nivoa usluge manevara i prilaza na raskrsnici. Takođe, prednost ovog metoda je što se nivo usluge nesignalisanih raskrsnica ocenjuje po prilazima, a ne za raskrsnicu kao celinu, kako je to rađeno u izdanju *HCM* iz 1985. godine. Pored ovih unapređenja metodologija *(HCM, 1994)* ima i određenih nedostataka, jer se ne definiše precizno postupak za utvrđivanje kapaciteta celog prilaza, odnosno metodologija koja je data u okviru ovog priručnika se ne može upotrebiti u praksi. *(Ruškić, 2013)*

U novijim verzijama priručnika *(HCM, 2000)* i *(HCM, 2010)* su rešeni neki problemi, koji nisu bili rešeni u prethodnim izdanjima. Od važnijih dostignuća, treba pomenuti postupak za proračun vremenskih gubitaka na sporednim prilazima. Od nedostataka, treba da se pomene pretpostavka o nepostojanju vremenskih gubitaka na prioritetnim prilazima. U izdanju priručnika *(HCM, 2010)*, prvi put se obraća pažnja na manevar polukružnih okretanja, pa je definisan postupak za računanje kapaciteta ovog manevara. Takođe, ovde je došlo do razdvajanja levih skretanja i polukružnih okretanja na standardnim nesignalisanim raskrsnicama.

U svim izdanjima priručnika *HCM* od 1985. godine je naznačeno da se kritični interval sleđenja dobija iz merenja na raskrsnicama, ali nigde nije naveden ili postavljen model zasnovan na verovatnoći koji bi povezao prioritetni tok i vreme čekanja u opsluzi vozila sporednog toka, čime bi se pružila teorijska potpora za vrednost kritičnog intervala i dala njegova dekompozicija.

Prema (Brilon, Koenig, & Troutbeck, 1999), treba pomenuti da model za proračun kapaciteta, koji je razvio Siegloch (Siegloch, 1973) ima jaku teorijsku pozadinu. Za ostale procedure procene, kao što su metode procene kritičnih intervala i kapaciteta (kao i vremenskih gubitaka) je napomenuto da nemaju jaku teorijsku pozadinu. Međutim, neki metodi daju rezultate, koji nisu u skladu sa uobičajenim teorijskim konceptima za proračun kapaciteta, a kao primer je naveden *probit* metod iz radova (Solberg & Oppenlander, 1966) i (Miller, 1972). Pregled radova o proceni kritičnih intervala otkriva veliki broj predloženih modela. Iz uzorka modela, koji su dati u radu (Brilon, Koenig, & Troutbeck, 1999) izdvojeni su metod maksimalne verodostojnosti (Troutbeck, 1992) i metod Hewitt (Hewitt, 1983), kao metodi koji daju najbolje rezultate. Metoda maksimalne verodostojnosti je preporučena za procenu kritičnih intervala u priručnicima *HCM*, počevši od verzije (HCM, 2000). Nedostaci metode maksimalne verodostojnosti, od strane (Croarkin & Tobias, 2002) su date u uvodnom razmatranju, kod definisanja problema i cilja istraživanja (Tačka 1.1).

U radu Wu (Wu, 2006), su date neke zamerke na model (Troutbeck, 1992), koji predstavlja mikroskopski model. U modelu (Troutbeck, 1992), maksimalni odbačeni interval i prihvaćeni interval, između vozila prioritetnog toka, od strane jednog vozila se posmatraju kao par vrednosti. U navedenom modelu, postoje dve važne pretpostavke: 1) kritični intervali imaju lognormalnu raspodelu i 2) ponašanje vozača je homogeno i konzistentno (postojano). Prema (Wu, 2006), date pretpostavke su nedostaci i naglašava se da je model (Troutbeck, 1992) veoma komplikovan i da rezultati nisu dovoljno pouzdani, a da je za uspostavljanje stabilnih rezultata potreban veliki uzorak vrednosti.

Predloženi model u disertaciji daje moguća unapređenja, u odnosu na postojeće modele, na dva načina. Prvo, u predloženom modelu je data dekompozicija kritičnog intervala na merljive delove i subjektivni (nemerljivi) deo, što do nije rađeno, a prema navedenoj literaturi. U datoj literaturi su navedeni najznačajniji radovi, u kojima su obrađivane nesignalisane raskrsnice. Drugo, razvijena je funkcionalna veza između merljivih i nemerljivog dela kritičnog intervala i vremena opsluge vozila sporednog toka na prvom mestu u redu na prilazu nesignalisane raskrsnice. Predloženi model daje procenu vrednosti nemerljivog (subjektivnog) dela kritičnog intervala. Na osnovu navedenog, dobija se preciznija vrednost kritičnog intervala. Kako se dobija preciznija vrednost kritičnog intervala, samim tim se u daljem proračunu, prema metodi *HCM*, dobija preciznija vrednost kapaciteta sporednog manevra. Predloženi model ima jaku teorijsku pozadinu.

## 4. Model proračuna kapaciteta manevra levog skretanja sa prioriternog prilaza standardne nesignalisane raskrsnice

### 4.1. Opisivanje osnovnih parametara saobraćajnog toka pomoću raspodela verovatnoća slučajnih promenljivih

Jedan od najvažnijih pojmova teorije verovatnoće je pojam slučajne promenljive. Prema (Vukadinović & Popović, 2004), realizacija svakog slučajnog događaja može se okarakterisati brojem, a promenljiva veličina, koja te brojne vrednosti uzima sa određenim verovatnoćama, naziva se slučajnom promenljivom. Broj različitih vrednosti koje slučajna promenljiva uzima u posmatranom eksperimentu može da bude konačan, prebrojiv ili neprebrojiv. Ako slučajna promenljiva uzima sa pozitivnim verovatnoćama konačan broj vrednosti ili prebrojivo mnogo (da se mogu prebrojati skupom prirodnih brojeva) ona se naziva diskretnom slučajnom promenljivom. Broj automobila koji prođu ulicom u intervalu vremena određene dužine, broj putnika u vozu, broj saobraćajnih nezgoda u određenom vremenskom intervalu i dr., jesu diskretne slučajne promenljive. Slučajna promenljiva je neprekidna, ako sa pozitivnim verovatnoćama može da uzme proizvoljnu brojnu vrednost na određenom intervalu. Primeri neprekidnih slučajnih promenljivih su: brzine kretanja automobila na putu, vremenski razmak između vozila, vreme opsluge kupca i dr.

Osnovni parametri saobraćajnog toka imaju karakter slučajnih promenljivih. Vrednosti osnovnih parametara saobraćajnog toka, koji karakterišu saobraćajni tok, imaju karakter diskretne ili neprekidne slučajne promenljive. (Kuzović & Bogdanović, 2010)

Pogodnosti opisivanja nekog osnovnog parametra saobraćajnog toka (npr. protok vozila) nekom od raspodela verovatnoća slučajne promenljive predstavlja indikaciju, koja svojevrsnim jezikom govori o vladajućim uslovima u saobraćajnom toku na posmatranom odseku puta. (Kuzović, 1987) S obzirom, da je za testiranje, kojoj se od teorijskih raspodela verovatnoća pokorava neki od osnovnih parametara saobraćajnog toka na odseku puta, dovoljno obaviti merenja manjeg obima, to ovaj način opisivanja može imati i praktični značaj.

Više istraživača širom sveta je u svojim publikacijama koje će biti pomenute u narednom delu rada pokazalo da se promene protoka vozila i intervala sleđenja mogu uspešno opisivati pomoću raspodela verovatnoća slučajnih promenljivih. Protok vozila sa pozitivnim verovatnoćama može da uzme konačan (prebrojiv) broj vrednosti i samim tim predstavlja diskretnu slučajnu promenljivu. Potpune karakteristike diskretne slučajne promenljive su zakon raspodele verovatnoća i funkcija raspodele verovatnoća.

Prema (Vukadinović & Popović, 2004), ovu raspodelu je 1873. godine uveo Siméon Denis Poisson kao granični slučaj binomne raspodele pod uslovom da je broj eksperimenata  $n$  veliki, a verovatnoća  $p$  pojave događaja  $A$  u svakom pojedinačnom eksperimentu (Bernulijevog tipa) mala. Prema Gerlough (Gerlough, 1955) i Schuhl (Schuhl, 1955) određene primene Poasonove raspodele u teoriji saobraćajnog toka se prvi put pojavljuju u radovima Kinzer (Kinzer, 1933), Adams (Adams, 1936) i Greenshields i dr. (Greenshields, Schapiro, & Ericksen, 1947). U radu Adams (Adams, 1936), prema Weiss (Weiss, 1963) i Haight (Haight, 1963), izveden je izraz za srednje vreme čekanja pešaka koje uzrokuje tok vozila na glavnom pravcu, pri čemu su intervali sleđenja vozila nezavisni i opisani su negativnom eksponencijalnom raspodelom. Pretpostavljeno je da svaki pešak čeka vremenski interval za prelazak ulice koji je veći od propisanog bezbednog intervala pre pokušaja prelaska ulice. Zakon raspodele verovatnoća broja vozila je opisan Poasonovim zakonom raspodele verovatnoća.

U knjizi autora Vukadinović (Vukadinović, 1967) prema (Vukadinović & Popović, 2004) za proučavanje kretanja vozila na drumovima najprikladniji je aparat matematičke statistike. Prema ovom izvoru, među značajnijim radovima sa primenom Poasonove raspodele, izdvajaju se Normann (Normann, 1942) i Birulja (Бируља, 1959). Kod rada Normann (Normann, 1942), eksperimentalnim putem je uočeno slaganje empirijske raspodele intervala vremena između uzastopnih vozila i teorijske krive tih intervala i utvrđeno je da se broj vozila u uzastopnim intervalima iste širine (istog vremenskog trajanja) raspodeljuje po Poasonovom zakonu. Prema eksperimentu Birulja (Бируља, 1959), utvrđeno je da pri intenzitetu od 200 do 400 vozila na sat ovo slaganje potpuno, ako se za jedinicu posmatranja uzme 10 sekundi. U slučaju većeg broja vozila, ovo slaganje je bolje ukoliko se za vremensku jedinicu posmatranja uzme interval od 5 sekundi.

Kao što se momenti pojavljivanja vozila na jednom mestu ređaju na slučajan način, prema (Vukadinović & Popović, 2004), tako isto je i vremenski interval između dva vozila slučajna promenljiva veličina. Osnovni zadatak je da se nađe zakonitost ređanja momenta prolaza vozila na jednom posmatranom mestu puta, ili, što je isto, da se nađe raspodela verovatnoća slučajne promenljive koja karakteriše vremenske razmake između vozila, odnosno da se verifikuje hipoteza o saglasnosti empirijske raspodele frekvencija s pretpostavljenom teorijskom raspodelom verovatnoća. Proučavanje raspodele frekvencija vremenskih razmaka između vozila ima neposredno praktično značenje. Ako se, na primer, ispituje mogućnost prelaženja puta većeg značaja osnovno je da se ustanovi učestalost vremenskih razmaka ne manjih po dužini trajanja od vremena potrebnog za prelaženje tog puta.



Prema ovom izvoru (Vukadinović & Popović, 2004), poznavanje ove učestalosti vremenskih „šupljina“ između vozila na putu većeg značaja omogućava donošenje zaključaka o veličini intenziteta na putu manjeg značaja, odnosno poznavanje ove učestalosti obrazlaže potrebu konstrukcije raskrsnice u dva nivoa.

Za razliku od protoka vozila koji je sa pozitivnim verovatnoćama mogao da uzme konačan (prebrojiv) broj vrednosti i koji je samim tim predstavljao diskretnu slučajnu promenljivu, interval sleđenja vozila u toku sa pozitivnom verovatnoćom može da uzme proizvoljnu brojnu vrednost, tako da je interval sleđenja vozila neprekidna slučajna promenljiva. (Kuzović & Bogdanović, 2010) Samim tim, intervali sleđenja vozila u saobraćajnom toku okarakterisani su određenim gustinama raspodele verovatnoća. Potpune karakteristike neprekidne slučajne promenljive su funkcija raspodele verovatnoća i funkcija gustine raspodele verovatnoća. Prema Vukadinović (Vukadinović, 1988), iz grafika funkcije raspodele i gustine eksponencijalne raspodele, vidi se da eksponencijalna raspodela dobro opisuje slučajeve kada se osnovna masa klijenata opslužuje vrlo brzo, dok je manji broj klijenata koje treba duže opsluživati.

Prema Raff i Hart (Raff & Hart, 1950), matematička statistika dozvoljava uopštavanje širokog raspona uslova u saobraćajnom toku, dok korišćenje empirijskih podataka sa snimanja i brojanja saobraćaja osigurava praktičnu korisnost modela. Od posebnog značaja, u skladu sa Haight (Haight, 1963), je nalaženje razumne sredine između čiste matematičke statistike i saobraćajnog inženjerstva. Na taj način, ovaj rad predstavlja još jedan korak u dodavanju naučne osnove saobraćajnog inženjerstva.

U nastavku ovog poglavlja su date osnovne postavke novog modela, deklaracija elementarnih neprekidnih slučajnih promenljivih i njihove relacije i proračun elementarnih verovatnoća i vremena čekanja u opsluzi vozila koje vrši manevar levog skretanja na raskrsnici. Na kraju je izvršena provera normativnog uslova i dat je obrazac za proračun srednjeg vremena čekanja u opsluzi vozila koje vrši manevar levog skretanja na raskrsnici. (Tanackov, Deretić, Bogdanović, Ruškić, & Jović, 2018)

## 4.2. Osnovne postavke novog modela

Minimalno potrebna vremenska praznina u prioritetnom toku u okviru koje je moguće izvršiti sporedni manevar naziva se kritični interval sleđenja i označava se sa  $t_c$ . Zbog različitih uslova odvijanja saobraćaja i činjenice da vozači imaju različita ponašanja, u analizama se pretpostavlja stohastička priroda kritičnog intervala. Kritični interval je slučajna promenljiva  $T_c$ , a  $t_c$  je srednja vrednost kritičnog intervala.

Kompleksna struktura kritičnog intervala proizilazi iz činjenice da slučajna promenljiva  $T_c$  zavisi od uslova odvijanja saobraćajnog toka, tako da ona u stvari predstavlja konvoluciju većeg broja slučajnih promenljivih.

Osnovna ideja ovog modela se zasniva na deduktivnom pristupu i dekompoziciji uslovljene konvolutivne slučajne promenljive  $T_c$  do sume elementarnih slučajnih promenljivih, koje mogu biti objektivne ili subjektivne. Objektivne slučajne promenljive se mogu izmeriti, jer su poznati počeci i krajevi njihovih intervala. Sa druge strane, subjektivne slučajne promenljive se ne mogu izmeriti, ali se diferencijacijom subjektivni status može konvertovati u status objektivnosti.

Prema tome,  $T_c$  kao subjektivna slučajna promenljiva se dekompozicijom može razlučiti na konvolutivne slučajne promenljive i minimalno jednu subjektivnu slučajnu promenljivu. Ako se postigne tražena singularna subjektivnost slučajnih promenljivih, postavljena je platforma za induktivni pristup, odnosno za formiranje funkcije jedne nepoznate kojom se proračunava srednja vrednost subjektivne slučajne promenljive, koja može biti eksplicitna ili implicitna.

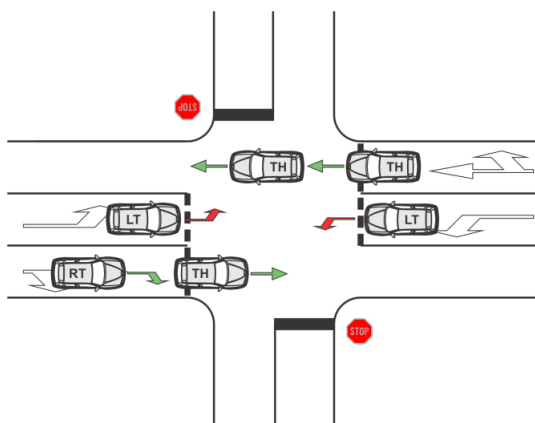
Uslovi pod kojima se u novom modelu može pristupiti deduktivnom pristupu su sledeći (Slika 4.1):

- 1) raskrsnica tipa *TWSC*, na kojoj je jedan putni pravac definisan kao glavni putni pravac i pruža se u pravcu, dok je drugi putni pravac sporedni;
- 2) na prioritetnom prilazu postoji posebna traka za levo skretanje sa teorijski neograničenom dužinom, odnosno beskonačnim brojem mesta u redu čekanja;
- 3) vozila koja vrše manevar levog skretanja sa glavnog putnog pravca prelaze preko jedne saobraćajne trake koja je namenjena za kretanje prioritetnog toka u suprotnom smeru;
- 4) vozila koja vrše desno skretanje sa prioritetnog prilaza imaju posebnu traku i ne ometaju vozila koja obavljaju levo skretanje sa suprotnog prioritetnog prilaza;
- 5) raskrsnice su značajno udaljene od najbližih signalisanih raskrsnica, pa intervali vozila u prioritetnom toku nemaju karakteristike plotuna;
- 6) svi prilazi su ravni, bez nagiba;
- 7) preglednost na raskrsnici nema ograničenja od okolnih objekata;
- 8) na raskrsnici nema tokova biciklista i pešaka, kako bi se maksimalno pojednostavio i homogenizovao koncept uslovnih verovatnoća;
- 9) prioritetni tok je Poasonov tok, a procesi u raskrsnici su Markovski procesi.

## Model proračuna kapaciteta manevra levog skretanja sa prioriternog prilaza standardne nesignalisane raskrsnice

---

Osnovna hipoteza disertacije je da se procesi koji se dešavaju na nesignalisanim *TWSC* raskrsnicama mogu opisati kroz modele koji su zasnovani na sistemima masovnog opsluživanja. Za izvršenje svakog sporednog manevra potrebno je određeno vreme opsluge. Vreme opsluge sporednog manevra u teorijskom, ali i praktičnom smislu ima značenje kritičnog intervala sleđenja. U postupku modeliranja, sporedni manevar levog skretanja sa sporednog prilaza posmatran je kao jednokanalni sistem masovnog opsluživanja.



Slika 4.1 Standardna nesignalisana raskrsnica sa posebnom (izdvojenom) trakom za leva skretanja sa prioriternih prilaza

#### 4.3. Deklaracija elementarnih neprekidnih slučajnih promenljivih i njihove relacije

Prioritetni tok je nezavistan, pa deklaracija promenljivih počinje od prioriternog toka. Sa  $T_h$  (oznaka „ $h$ “ deklarirana od *headway time*) je označena slučajna promenljiva vremenskog intervala između nailaska uzastopnih vozila, tj. interval sleđenja vozila u prioriternom toku. Neka je srednje vreme ovog intervala označeno sa  $t_h$ . Saglasno mnogobrojnim prethodnim istraživanjima, pretpostavljena je Poasonova priroda prioriternog toka. Intenzitet prioriternog toka u oznaci  $\lambda_h$  je recipročan srednjoj vrednosti intervala sleđenja  $t_h$ , tj.  $\lambda_h=1/t_h$ . Iz Poasonove prirode prioriternog toka proizilazi poznat oblik eksponencijalne gustine slučajne promenljive sa parametrom  $\lambda_h$  ((4.1). Slučajna promenljiva  $T_h$  treba da je objektivna i da je u potpunosti merljiva:

$$f(t) = \lambda_h e^{-\lambda_h t} \quad (4.1)$$

U okviru prioriternog toka vozila se slede u različitim vremenskim intervalima po funkciji (4.1). Ove vrednosti intervala sleđenja u prioriternom toku mogu biti veće ili manje od potrebnog kritičnog intervala za izvođenje manevra levog skretanja sa prioriternog prilaza. Uslov za izvršenje ovog sporednog manevra je pojava intervala sleđenja u prioriternom toku koji je veći od minimalno potrebnog vremena za vršenje manevra, odnosno kritičnog intervala. Prema tome, sporedni manevar će biti izvršen ukoliko je  $t_h \geq t_c$ . Zbog toga je slučajna promenljiva  $T_c$  uslovljena slučajnom promenljivom  $T_h$ .

U suprotnom, ako je  $t_h < t_c$ , prvo vozilo u sporednom toku manevar levog skretanja ne može izvršiti na bezbedan način. U ovom slučaju vozilo se mora zaustaviti na prilazu i čekati na pojavu intervala koji je jednak ili veći od kritičnog, odnosno koji je dovoljan za bezbedno izvođenje sporednog manevra. Ovo vreme je uslovljeno slučajnim karakteristikama prioriternog toka i zbog toga ono predstavlja uslovljenu slučajnu promenljivu u oznaci  $T_{sw}$  (oznaka „ $sw$ “ deklarirana od *service waiting*).

Srednja vrednost slučajne promenljive  $T_{sw}$  ili srednje vreme čekanja na pojavu vremenskog intervala u prioriternom toku, koji je jednak ili veći od kritičnog, označeno je sa  $t_{sw}$ . Slučajna promenljiva  $T_{sw}$  se odnosi isključivo na prvo vozilo sporednog toka, i ona je objektivna i u potpunosti merljiva. Vremena čekanja drugog, trećeg i ostalih vozila se ne sme poistovećivati sa vremenom čekanja prvog vozila sporednog toka. Prvo vozilo koje vrši levo skretanje se nalazi u servisu, a sva ostala u redu za čekanje i uslovljena su prvim vozilom.

Vozilo koje vrši sporedni manevar levog skretanja sa prioriternog prilaza uslovljeno je kretanjem prvog vozila koje mu dolazi u susret i vozilima koja se kreću iza njega. Naime, prvo vozilo koje mu dolazi u susret i vozilo koje se kreće iza njega se slede na određenoj vremenskoj distanci koja može biti manja, jednaka ili veća od kritičnog intervala sleđenja  $t_c$ .

Vozač može da izvrši sporedni manevar, levog skretanja, kada se pouzdano uveri da je prvo vozilo koje mu dolazi u susret, a koje ima svoju dužinu i varijabilnu brzinu, prošlo pored njega. Uvažavanjem dužine i brzine kretanja prvog vozila iz suprotnog toka vozila je osnova razvoja materijalno realnog modela i unapređenja modela „materijalne tačke”. Vozilo prioriternog toka prosečne dužine  $l_v$ , koje se kreće prosečnom brzinom  $v_v$ , participira u kritičnom intervalu sa srednjom vrednošću, koja se može proračunati preko izraza:  $t_v=l_v/v_v$ . Vreme mimoilaženja je slučajna promenljiva  $T_v$  (oznaka „v“ deklarirana od *vehicle passing*) koja predstavlja vremenski interval koji je neophodan za mimoilaženje vozila iz prioriternog toka sa vozilom koje čeka da vrši manevar levog skretanja. Slučajna promenljiva  $T_v$  je elementarna, objektivna i u potpunosti merljiva.

Po isteku vremena  $T_v$  započinje vreme reagovanja sistema vozač-vozilo za manevar levog skretanja. Vreme reagovanja sistema vozač-vozilo započinje u momentu prolaska zadnjeg dela vozila prioriternog toka do momenta početka manevra levog skretanja. Ovo vreme je slučajna promenljiva  $T_r$  (oznaka „r“ deklarirana od *system reaction time*) i participira u kritičnom intervalu sa srednjom vrednošću  $t_r$ . Vreme reagovanja sistema vozač-vozilo je elementarna, objektivna i u potpunosti merljiva veličina koja se kreće u intervalu od 0,8-1,0 s.

Slučajne promenljive  $T_v$  i  $T_r$  uslovljene su kretanjem vozila prioriternog toka, zbog čega je moguće formirati konvoluciju slučajne promenljive  $T_a$  (oznaka „a“ deklarirana od *time after vehicle*) (4.2). U vremenskom intervalu koji je kraći od srednjeg vremena  $t_a$ , vozilo koje vrši sporedni manevar neće započeti levo skretanje da ne bi došlo do konflikta sa vozilom iz suprotnog smera.

$$T_a = T_v + T_r \quad (4.2)$$

Vozilo koje se kreće iza prvog vozila konfliktnog prioriternog toka, takođe je kroz dva karakteristična vremenska intervala povezano sa vozilom koje vrši sporedni manevar levog skretanja sa prioriternog prilaza.

Prvi interval je vreme potrebno za izvođenje sporednog manevra levog skretanja sa prioriternog prilaza. Ovo vreme započinje u momentu kada vozilo iz stanja mirovanja započne kretanje u cilju realizacije sporednog manevra levog skretanja sa glavnog prilaza do momenta, kada zadnja strana ovog vozila izađe iz zone zahvatanja vozila koje mu se kreće u susret. Ovo vreme je slučajna promenljiva  $T_m$  (oznaka „m“ deklarirana od *manoeuvre*) je elementarna, objektivna i u potpunosti merljiva, a u kritičnom intervalu  $t_c$  participira sa srednjom vrednošću  $t_m$ . Srednja vrednost  $t_m$  zavisi od geometrije raskrsnice, ugla skretanja, prosečne brzine izvođenja manevra, itd.

Drugi interval, koji je vezan za drugo vozilo koje iz suprotnog smera, je zaštitno vreme koje započinje u momentu kada vozilo koje vrši sporedni manevar izađe iz gabarita vozila prioriternog toka do prolaska čela vozila prioriternog toka kroz apstraktnu konfliktnu tačku. Ovo vreme je slučajna promenljiva  $T_s$  (oznaka „s“ deklarirana od *safety*) i participira u kritičnom intervalu sa srednjom vrednošću  $t_s$ .

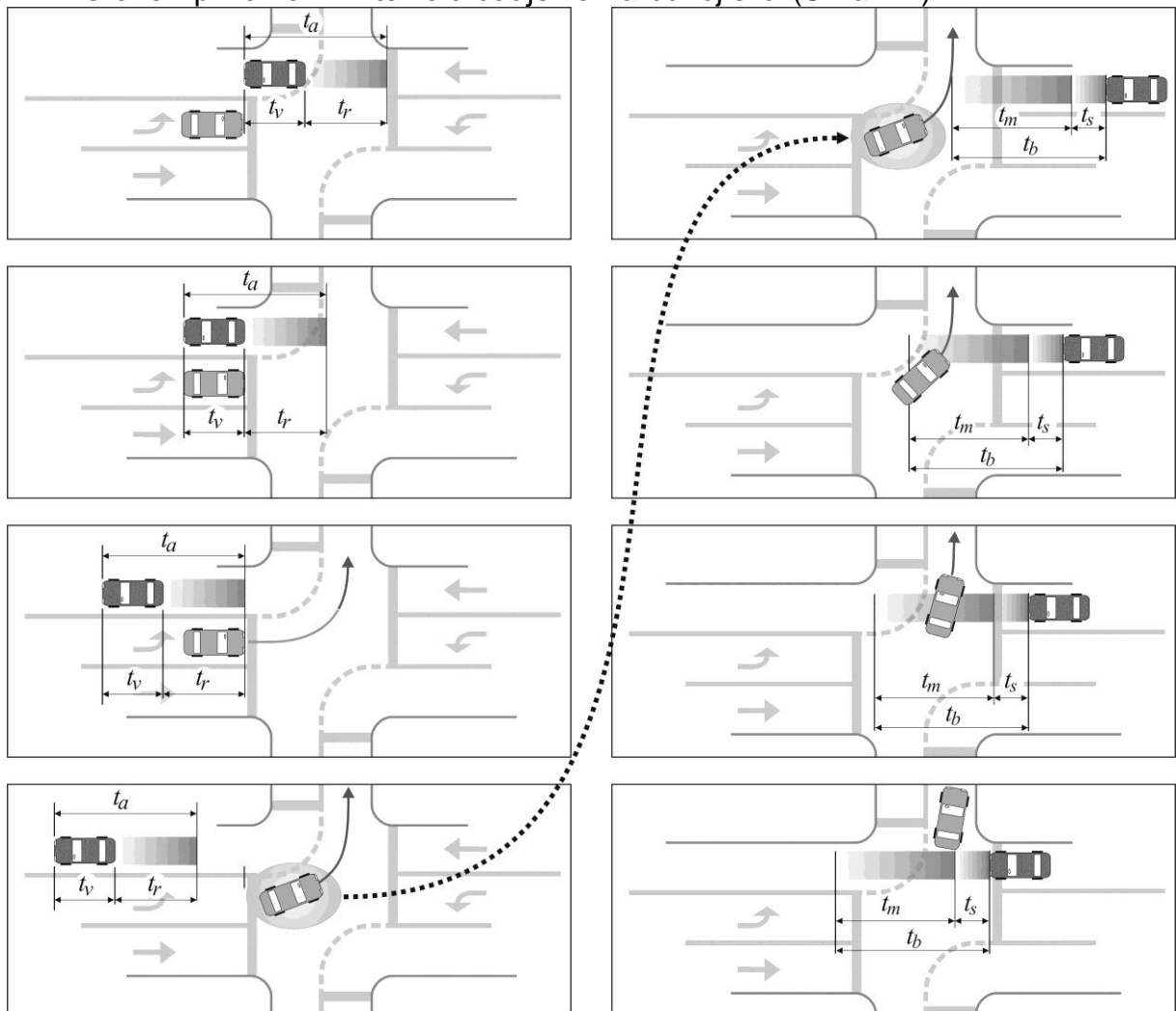
Model proračuna kapaciteta manevra levog skretanja  
sa prioritetnog prilaza standardne nesignalisane raskrsnice

Slučajna promenljiva  $T_s$  je elementarna, ali je takođe i subjektivna, pa se kao takva ne može utvrditi merenjem. Ona jedino i isključivo zavisi od procene vozača da li postoji dovoljno veliki vremenski interval u prioritetnom toku koji omogućava pojavu  $t_s$ , odnosno bezbedno mimoilaženje.

Slučajne promenljive  $T_m$  i  $T_s$  formiraju konvoluciju slučajne promenljive  $T_b$  (oznaka „b“ deklarirana od *time before vehicle*) (4.3). U okviru srednjeg vremena  $t_b$  vozilo sporednog toka izvodi manevar levog skretanja bez konflikta sa drugim vozilom ponuđenog intervala prioritetnog toka (4.3).

$$T_b = T_m + T_s \quad (4.3)$$

Grafički prikaz ovih intervala dat je na narednoj slici (Slika 4.2):



Slika 4.2 Grafički prikaz slučajnih promenljivih  $T_a$  i  $T_b$  preko srednjih vrednosti

\*Izvor: Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., Jović, S. (2018). Safety time in critical gap of left turn manoeuvres from priority approach at TWSC unsignalized intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.

Odnos slučajnih promenljivih ima dva važna svojstva.

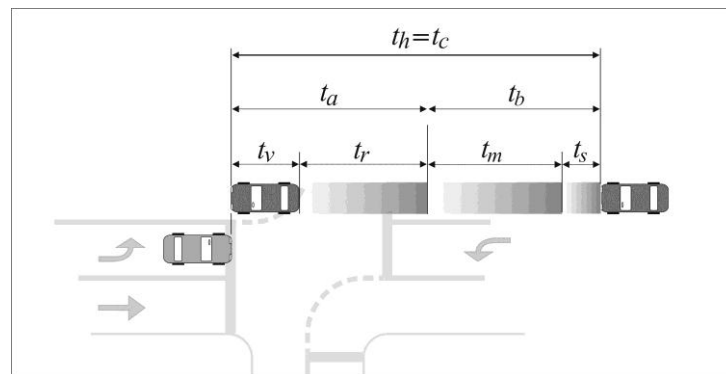
Prvo, slučajne promenljive  $T_a$  i  $T_b$  se mogu smatrati nezavisnim slučajnim promenljivama (4.4):

$$P(T_a/T_b) = P(T_a) \wedge P(T_b/T_a) = P(T_b) \quad (4.4)$$

Drugo, zbir nezavisnih slučajnih promenljivih  $T_a$  ( $T_v+T_r$ ) i  $T_b$  ( $T_m+T_s$ ) predstavlja vrednost kritičnog intervala  $T_c$ , koji se u potpunosti može diferencirati na objektivna – merljiva vremena ( $T_v, T_r$  i  $T_m$ ) i subjektivno – nemerljivo vreme ( $T_s$ ) (4.5):

$$T_c = T_a + T_b = T_v + T_r + T_m + T_s \quad (4.5)$$

Za idealne teorijske uslove, kada je interval sleđenja prioriternog toka jednak kritičnom intervalu, konvolucija slučajnih promenljivih je data na narednoj slici (Slika 4.3):



Slika 4.3 Dekompozicija kritičnog intervala na konvolutivne slučajne promenljive u idealnom teorijskom slučaju

\*Izvor: Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., Jović, S. (2018). Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.

Slučajna promenljiva koja sintetiše uticaje svih do sada navedenih slučajnih promenljivih je vreme čekanja vozila sporednog toka u servisu raskrsnice,  $T_{sw}$ . Zbog toga, izraz za proračun vremena čekanja je jedna analitička funkcija, koja vezuje sve navedene promenljive (4.6):

$$T_{sw} = f(T_a, T_b, T_p) \quad (4.6)$$

Pored toga, slučajna promenljiva  $T_{sw}$  je objektivno - merljivo vreme. Potpuno rešenje problema kritičnog intervala se nalazi u određivanju subjektivnog, nemerljivog zaštitnog vremena opisanog slučajnom promenljivom  $T_s$ , koje se iz obrasca (4.6) može izraziti u obrascu ((4.7):

$$T_{sw} = f(T_a, T_b, T_p) \Rightarrow T_b = g(T_a, T_{sw}, T_p) \Leftrightarrow T_m + T_s = g(T_a, T_{sw}, T_p) \Leftrightarrow T_s = g(T_a, T_{sw}, T_p) - T_m \quad (4.7)$$

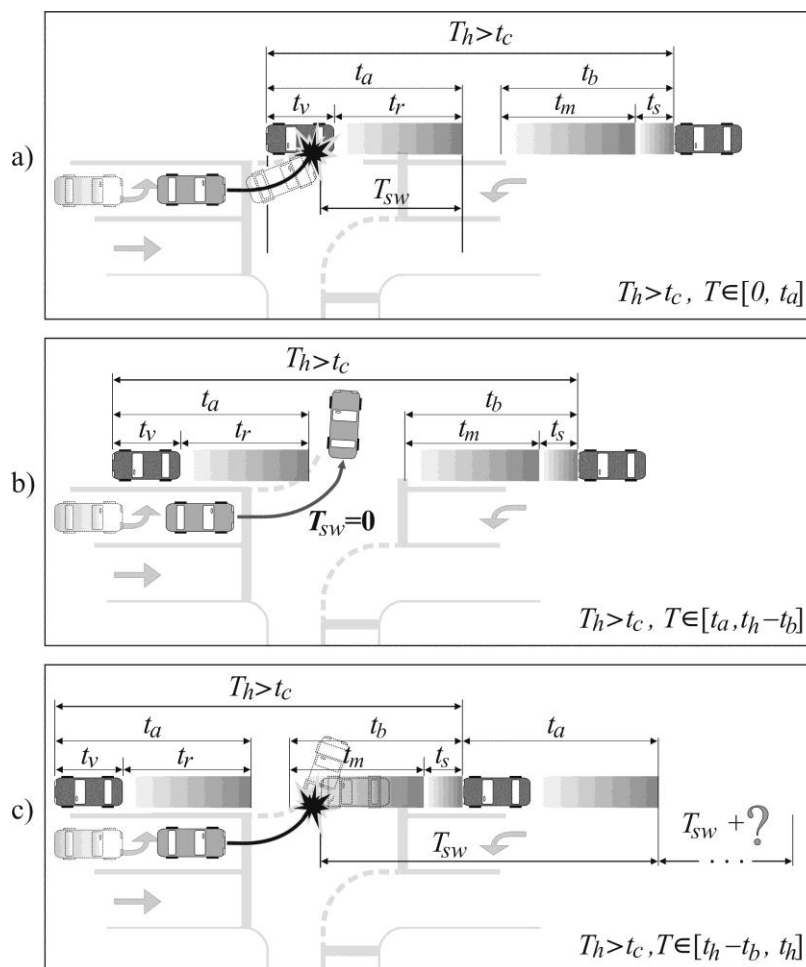
Model proračuna kapaciteta manevra levog skretanja sa prioriternog prilaza standardne nesignalisane raskrsnice

Izuzev teorijskog slučaja prikazanog na prethodnoj slici (Slika 4.3), razlikuju se dva realna komplementarna slučaja:

- 1) Prvi, ako je ponuđeni vremenski interval sleđenja u prioriternom toku veći od kritičnog intervala sleđenja.  
Pojava ovog intervala je određena verovatnoćom  $P(t_c < T_h < \infty)$ ;
- 2) Drugi, ako je ponuđeni vremenski interval sleđenja u prioriternom toku manji od kritičnog intervala sleđenja.  
Pojava ovog intervala je određena verovatnoćom  $P(0 < T_h < t_c)$ ;

Pojava kada je ponuđeni vremenski interval sleđenja u prioriternom toku veći od kritičnog intervala sleđenja je potreban, ali ne i dovoljan uslov za izvođenje manevra levog skretanja.

U zavisnosti od vremena pristizanja vozila koja vrše manevar levog skretanja sa sporednog prilaza u odnosu na ponuđeni vremenski interval sleđenja u prioriternom toku, razlikuju se tri karakteristična slučaja (Slika 4.4):



Slika 4.4 Struktura  $T_{sw}$  u slučaju  $t_c < T_h < \infty$

\*Izvor: Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., Jović, S. (2018). Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.

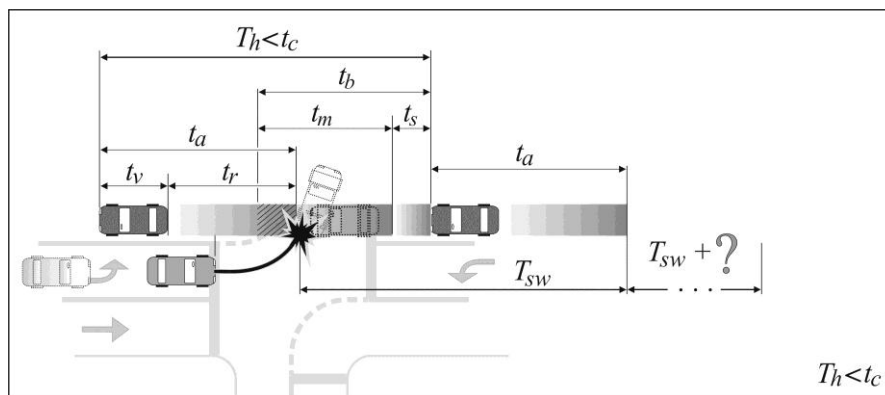


U prvom slučaju, vozilo iz sporednog toka pristize na sporedni prilaz u intervalu  $[0, t_a]$  (Slika 4.4.a). U ovom slučaju, vozilo mora da se zaustavi i da sporedni manevar započne nakon isteka dela vremena  $t_a$ .

U drugom slučaju, vozilo koje vrši sporedni manevar pristupa na sporedni prilaz u intervalu  $[t_a, t_h - t_b]$  (Slika 4.4.b). U ovom slučaju, vozilo vrši sporedni manevar bez zaustavljanja i zadržavanja na prilazu raskrsnice. Ovaj slučaj je frekventan i karakterističan u uslovima malog intenziteta prioriternog toka, tj. kada je srednja vrednost intervala sleđenja prioriternog toka velika.

U trećem slučaju, vreme pristupa vozila koje vrši sporedni manevar je u intervalu  $[t_h - t_b, t_h]$  (Slika 4.4.c). Vozilo koje vrši sporedni manevar, u ovom slučaju, mora da sačeka istek dela vremena  $t_b$ . Nakon toga, vozilo koje vrši sporedni manevar mora da sačeka i istek vremena  $t_a$ . Mogućnost obavljanja manevra u narednim uzastopnim intervalima je neizvesna i biće posebno proračunato u nastavku ovog poglavlja.

U slučaju pojave vremenskog intervala sleđenja u prioriternom toku, koji je manji od kritičnog intervala (Slika 4.5), vozilo ne može da obavi sporedni manevar, odnosno mora obavezno sačekati istek vremena  $t_a$ . Mogućnost obavljanja manevra u uzastopnim intervalima je neizvesna i biće posebno proračunato u nastavku ovog poglavlja.



Slika 4.5 Struktura  $T_{sw}$  u slučaju  $0 < T_h < t_c$

\*Izvor: Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., Jović, S. (2018). Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.

#### 4.4. Proračun elementarnih verovatnoća i vremena čekanja u opsluzi $t_{sw}$ na raskrsnici

Saglasno sa ustanovljenim slučajnim promenljivama i prethodnom analizom, uočena su četiri slučaja prvog ponuđenog intervala u prioriternom toku. Prva tri slučaja su vezana za situaciju kada je ponuđeni vremenski interval sleđenja u prioriternom toku veći od kritičnog intervala sleđenja (Slika 4.4). Saglasno pretpostavci o Poasonovoj prirodi prioriternog toka, ova verovatnoća primenom (4.1) je jednaka (4.8):

$$P(t_a + t_b < T_h < \infty) = \int_{t_a+t_b}^{\infty} \lambda_h e^{-\lambda_h t} dt = e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} \quad (4.8)$$

Srednja vrednost intervala prioriternog toka je poznata i iznosi  $t_h$  (4.9):

$$E(0 < T_h < \infty) = \int_0^{\infty} t \lambda_h e^{-\lambda_h t} dt = t_h \quad (4.9)$$

Međutim, uslovna srednja vrednost, kada je interval prioriternog toka veći od kritičnog intervala jednak je (4.10, u oznaci  $t_h^+$ ):

$$t_h^+ = E(t_a + t_b < T_h < \infty) = \int_{t_a+t_b}^{\infty} t \lambda_h e^{-\lambda_h t} dt = \frac{e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} (\lambda_h(t_a+t_b) + 1)}{\lambda_h} \quad (4.10)$$

Vozilo u sporednom toku sa verovatnoćom (4.8) pristupa po ravnomernoj raspodeli na prvi interval  $[0, t_h^+]$  prioriternog toka (4.10), koji je veći od kritičnog intervala. Saglasno ustanovljenim intervalima opisanim na pretposlednjoj slici (Slika 4.4), ispunjen je normirajući uslov (4.11):

$$\int_0^{t_h^+} \frac{1}{t_h^+} dt + \int_{t_a}^{t_h^+-t_b} \frac{1}{t_h^+} dt + \int_{t_h^+-t_b}^{t_h^+} \frac{1}{t_h^+} dt = \frac{[t_a - 0] + [(t_h^+ - t_b) - t_a] + [t_h^+ - (t_h^+ - t_b)]}{t_h^+} = 1 \quad (4.11)$$

Vozilo sporednog toka će pristupiti u interval  $[0, t_a]$  sa verovatnoćom  $p_1$  (4.12):

$$p_1 = e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} \int_0^{t_a} \frac{1}{t_h^+} dt = \frac{t_a e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}}{\frac{e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} (\lambda_h(t_a+t_b) + 1)}{\lambda_h}} = \frac{t_a \lambda_h}{\lambda_h(t_a+t_b) + 1} \quad (4.12)$$

Ako je vozilo sporednog toka pristupilo u interval  $[0, t_a]$ , srednje vreme čekanja u oznaci  $t_{sw1}$  je jednako matematičkom očekivanju slučajne promenljive koja ima ravnomernu raspodelu, sa gustom verovatnoće  $f(t)=1/t_a$  i iznosi (4.13):

$$t_{sw1} = E(T) = \int_0^{t_a} t \frac{1}{t_a} dt = \frac{t_a}{2} \quad (4.13)$$

Proizvod verovatnoće (4.12) i prvog vremena čekanja (4.13) jednak je (4.14):

$$p_1 t_{sw1} = \frac{t_a^2 \lambda_h}{2[\lambda_h(t_a + t_b) + 1]} \quad (4.14)$$

Vozilo koje vrši sporedni manevar će pristupiti na prilaz u intervalu  $[t_a, t_h^+ - t_b]$  sa verovatnoćom  $p_2$  ((4.15):

$$p_2 = e^{-\lambda_h(t_a + t_b)} \int_{t_a}^{t_h^+ - t_b} \frac{1}{t_h^+} dt = e^{-\lambda_h(t_a + t_b)} - \frac{\lambda_h(t_a + t_b)}{\lambda_h(t_a + t_b) + 1} \quad (4.15)$$

Ako vozilo koje vrši sporedni manevar pristupi na prilaz u intervalu  $[t_a, t_h^+ - t_b]$ , srednje vreme čekanja  $t_{sw2}$  jednako je nuli, jer nema čekanja vozila sporednog toka (4.16):

$$t_{sw2} = 0 \quad (4.16)$$

Proizvod verovatnoće (4.15) i vremena čekanja (4.16) jednak je nuli (4.17):

$$p_2 t_{sw2} = 0 \quad (4.17)$$

Vozilo koje vrši sporedni manevar, na prilaz pristupa u intervalu  $[t_h^+ - t_b, t_h^+]$  sa verovatnoćom  $p_3$  (4.18):

$$p_3 = e^{-\lambda_h(t_a + t_b)} \int_{t_h^+ - t_b}^{t_h^+} \frac{1}{t_h^+} dt = \frac{t_b \lambda_h}{\lambda_h(t_a + t_b) + 1} \quad (4.18)$$

Ako vozilo koje vrši sporedni manevar pristupi u interval  $[t_h^+ - t_b, t_h^+]$ , onda se može odrediti samo srednje vreme do kraja vremenskog intervala u prioritelnom toku, u okviru koga je moguće izvršiti sporedni manevar. Ovo vreme je jednako matematičkom očekivanju slučajne promenljive, koja ima ravnomernu raspodelu sa gustinom verovatnoće  $f(t) = 1/t_b$ . U najboljem slučaju, ako je drugi interval u prioritelnom toku veći od kritičnog intervala sleđenja sa verovatnoćom (4.8), vozilo koje vrši sporedni manevar može da ga izvede u narednom intervalu, posle isteka vremena  $t_a$ .

Verovatnoća ovog događaja je označena sa  $p_{3,0}$  (4.19), a vreme čekanja sa  $t_{sw3,0}$  (4.20). Ovaj slučaj je prikazan na narednoj slici (Slika 4.6.0).

$$p_{3,0} = e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} \frac{t_b \lambda_h}{\lambda_h(t_a+t_b)+1} \quad (4.19)$$

$$t_{sw3,0} = E(T) + t_a = \int_0^{t_a} t \frac{1}{t_b} dt + t_a = \frac{t_b}{2} + t_a \quad (4.20)$$

Međutim, drugi vremenski interval sleđenja u prioritelnom toku može biti manji od kritičnog intervala sleđenja sa verovatnoćom (4.21):

$$P(0 < T_h < t_a + t_b) = \int_0^{t_a+t_b} \lambda_h e^{-\lambda_h t} dt = 1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} \quad (4.21)$$

Srednja dužina ovog intervala jednaka je (4.22). Analogno sa (4.10), dužina ovog intervala je označena sa  $t_h^-$ :

$$t_h^- = E(0 < T_h < t_a + t_b) = \int_0^{t_a+t_b} t \lambda_h e^{-\lambda_h t} dt = \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} (\lambda_h(t_a+t_b)+1)}{\lambda_h} \quad (4.22)$$

Ako vozilo koje vrši sporedni manevar mora da sačeka jedan interval prioritelnog toka, koji je manji od kritičnog intervala sleđenja, verovatnoća opisanog događaja se dobija proizvodom (4.19) i (4.21), a vreme čekanja (4.20) se uvećava za (4.22). Neka je označena verovatnoća ovog događaja sa  $p_{3,1}$  (4.23), a vreme čekanja sa  $t_{sw3,1}$  (4.24). Ovaj slučaj je prikazan na narednoj slici (Slika 4.6.1).

$$p_{3,1} = \frac{t_b \lambda_h e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}}{\lambda_h(t_a+t_b)+1} (1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}) \quad (4.23)$$

$$t_{sw3,1} = M(t) + t_a = \int_0^{t_a} t \frac{1}{t_b} dt + t_a = \frac{t_b}{2} + \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} (\lambda_h(t_a+t_b)+1)}{\lambda_h} + t_a \quad (4.24)$$

Ako vozilo koje vrši sporedni manevar mora da sačeka dva uzastopna vremenska intervala sleđenja u prioritelnom toku, koji su manji od kritičnog intervala, verovatnoća opisanog događaja se dobija proizvodom (4.19) i (4.23), a vreme čekanja (4.24) se uvećava za (4.22). Neka je označena verovatnoća ovog događaja sa  $p_{3,2}$  (4.25), a vreme čekanja sa  $t_{sw3,2}$  (4.26). Ovaj slučaj je prikazan na narednoj slici (Slika 4.6.2).

$$p_{3,2} = \frac{t_b \lambda_h e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}}{\lambda_h(t_a+t_b)+1} (1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)})^2 \quad (4.25)$$

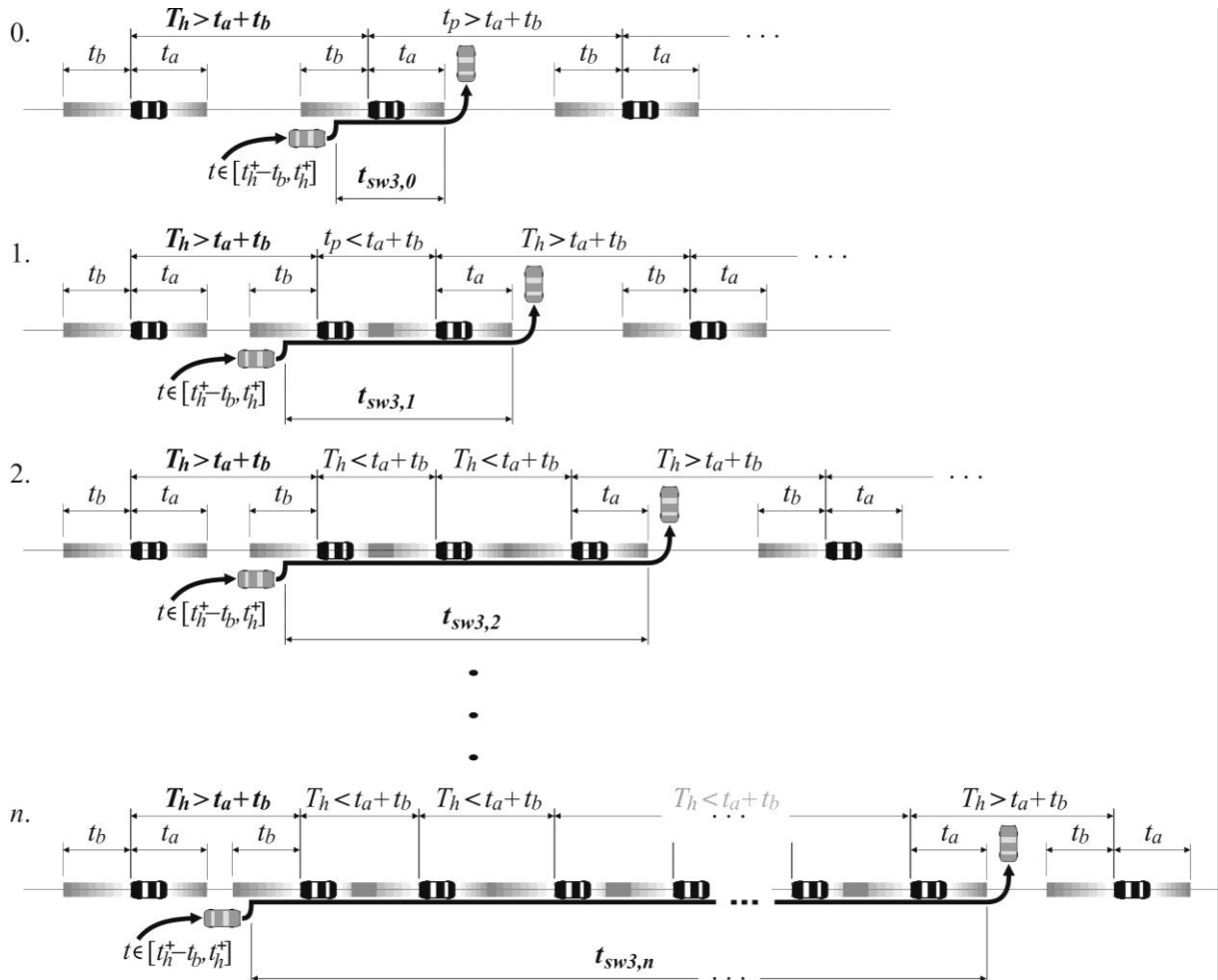
$$t_{sw3,2} = E(T) + t_a = \int_0^{t_a} t \frac{1}{t_b} dt + t_a = \frac{t_b}{2} + 2 \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} (\lambda_h(t_a+t_b)+1)}{\lambda_h} + t_a \quad (4.26)$$

Model proračuna kapaciteta manevra levog skretanja  
sa prioriternog prilaza standardne nesignalisane raskrsnice

Koncept se može uopštiti do pojave prvog vremenskog intervala sleđenja u prioriternom toku koji je veći od kritičnog intervala. Ovaj događaj se realizuje posle isteka „ $n$ ” vremenskih intervala sleđenja u prioriternom toku koji su manji od kritičnog intervala. Neka je označena verovatnoća ovog događaja sa  $p_{3,n}$  (4.27), a vreme čekanja sa  $t_{sw3,n}$  (4.28). Ovaj slučaj je prikazan na narednoj slici (Slika 4.6.n). U opštem slučaju  $n \rightarrow \infty$ .

$$p_{3,n} = \frac{t_b \lambda_h e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}}{\lambda_h(t_a+t_b)+1} \left(1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}\right)^n \quad (4.27)$$

$$t_{sw3,n} = E(T) + t_a = \int_0^{t_a} \frac{1}{t_b} dt + t_a = \frac{t_b}{2} + n \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} (\lambda_h(t_a+t_b) + 1)}{\lambda_h} + t_a \quad (4.28)$$



Slika 4.6 Grafički prikaz potpunog sistema događaja za slučaj prvog intervala prioriternog toka većeg od kritičnog intervala i pristupa prvog vozila sporednog toka u podintervalu  $[t_h^+ - t_b, t_h^+]$

\*Izvor: Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., Jović, S. (2018). Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.

Sistematizacija verovatnoća  $p_{3,n}$  i vremena čekanja  $t_{sw3,n}$  data je sa (4.29):

$$t_{sw3,n} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\lambda_h t_b e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}}{\lambda_h(t_a+t_b)+1} (1-e^{-\lambda_h(t_a+t_b)})^0 & \frac{t_b}{2} + 0 \cdot \frac{1-e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}(\lambda_h(t_a+t_b)+1)}{\lambda_h} + t_a \\ \frac{\lambda_h t_b e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}}{\lambda_h(t_a+t_b)+1} (1-e^{-\lambda_h(t_a+t_b)})^1 & \frac{t_b}{2} + 1 \cdot \frac{1-e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}(\lambda_h(t_a+t_b)+1)}{\lambda_h} + t_a \\ \frac{\lambda_h t_b e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}}{\lambda_h(t_a+t_b)+1} (1-e^{-\lambda_h(t_a+t_b)})^2 & \frac{t_b}{2} + 2 \cdot \frac{1-e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}(\lambda_h(t_a+t_b)+1)}{\lambda_h} + t_a \\ \dots & \dots \\ \frac{\lambda_h t_b e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}}{\lambda_h(t_a+t_b)+1} (1-e^{-\lambda_h(t_a+t_b)})^n & \frac{t_b}{2} + n \cdot \frac{1-e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}(\lambda_h(t_a+t_b)+1)}{\lambda_h} + t_a \\ \dots & \dots \end{array} \right\}, n \in [0, \infty) \quad (4.29)$$

Međutim, ako je prvi vremenski interval sleđenja u prioritarnom toku manji od kritičnog intervala (Slika 4.5) sa verovatnoćom (4.21), vozilo koje vrši sporedni manevar pristupa u interval srednje dužine  $t_h^-$  (4.22). Vreme čekanja u servisu koje vrši sporedni manevar je jednako matematičkom očekivanju slučajne promenljive, koja ima ravnomernu raspodelu sa gustinom verovatnoće  $f(t)=1/t_h^-$ .

U najboljem slučaju, ako je drugi vremenski interval sleđenja u prioritarnom toku veći od kritičnog intervala sleđenja sa verovatnoćom (4.8), vozilo koje vrši sporedni manevar može da izvede manevar u narednom vremenskom intervalu sleđenja u prioritarnom toku posle isteka vremena  $t_a$ . Neka je označena verovatnoća ovog događaja sa  $p_{4,1}$  (4.30), a vreme čekanja sa  $t_{sw4,1}$  (4.31). Ovaj slučaj je prikazan na narednoj slici (Slika 4.7.1).

$$p_{4,1} = \left(1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}\right) e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} \quad (4.30)$$

$$t_{sw4,1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}(\lambda_h(t_a+t_b)+1)}{\lambda_h} + t_a \quad (4.31)$$

Ako vozilo koje vrši sporedni manevar posle prvog manjeg intervala mora da sačeka još jedan vremenski interval sleđenja u prioritarnom toku, koji je manji od kritičnog intervala, verovatnoća opisanog događaja se dobija proizvodom (4.19) i (4.30), a vreme čekanja (4.31) se uvećava za (4.22). Neka je označena verovatnoća ovog događaja sa  $p_{4,2}$  (4.32), a vreme čekanja sa  $t_{sw4,2}$  (4.33). Ovaj slučaj je prikazan na narednoj slici (Slika 4.7.2).

$$p_{4,2} = \left(1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}\right)^2 e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} \quad (4.32)$$

$$t_{sw4,2} = \left(\frac{1}{2} + 1\right) \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}(\lambda_h(t_a+t_b)+1)}{2\lambda_h} + t_a \quad (4.33)$$

Ako je i treći uzastopni vremenski interval sleđenja u prioritetnom toku manji od kritičnog intervala sa verovatnoćom (4.21), vreme čekanja u servisu vozila koje vrši sporedni manevar se uvećava za (4.22). Neka je označena verovatnoća ovog događaja sa  $p_{4,3}$  (4.34), a vreme čekanja sa  $t_{sw4,3}$  (4.35). Ovaj slučaj je prikazan na narednoj slici (Slika 4.7.3).

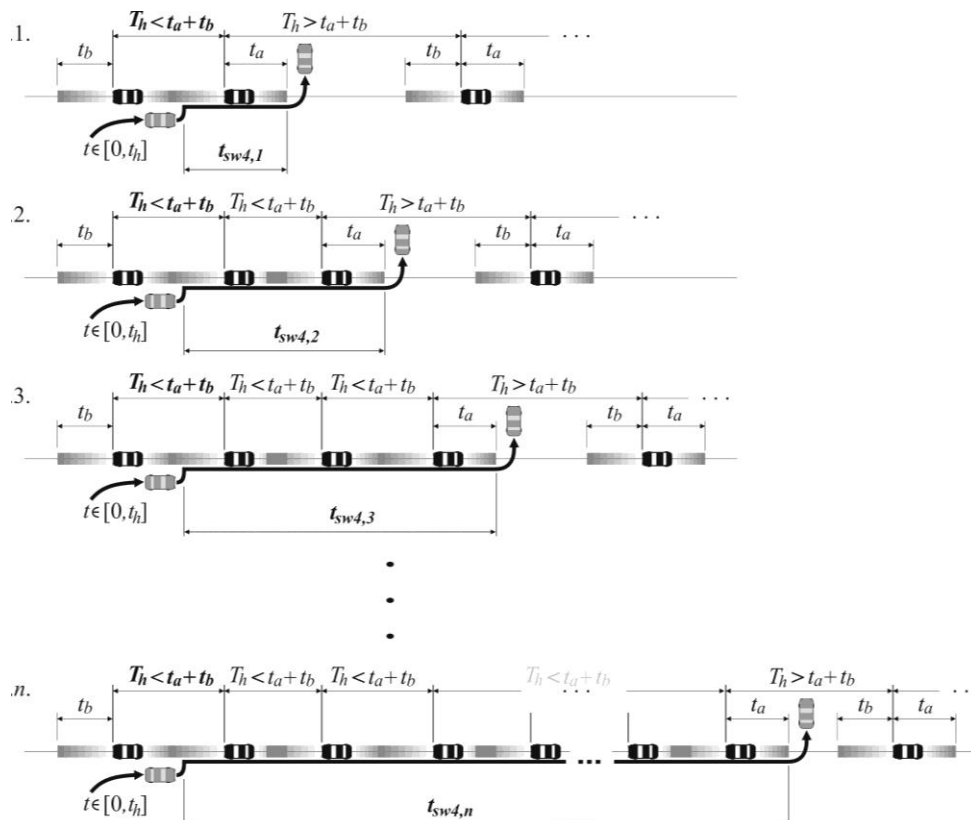
$$p_{4,3} = \left(1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}\right)^3 e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} \quad (4.34)$$

$$t_{sw4,3} = \left(\frac{1}{2} + 2\right) \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} (\lambda_h(t_a+t_b) + 1)}{2\lambda_h} + t_a \quad (4.35)$$

Rekurentni sistem verovatnoća (4.36) i vremena čekanja (4.37) vozila koje vrši sporedni manevar i koje u  $n$ -tom intervalu prioritetnog toka obavi manevar levog skretanja, prikazan je na narednoj slici (Slika 4.7.n). U ovom slučaju je niz prethodnih  $(n-1)$  uzastopnih vremenskih intervala sleđenja u prioritetnom toku bio manji od kritičnog intervala sleđenja:

$$p_{4,n} = \left(1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}\right)^n e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} \quad (4.36)$$

$$t_{sw4,n} = \left(\frac{1}{2} + n - 1\right) \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} (\lambda_h(t_a+t_b) + 1)}{2\lambda_h} + t_a \quad (4.37)$$



Slika 4.7 Grafički prikaz potpunog sistema događaja za slučaj kada je prvi vremenski interval sleđenja u prioritetnom toku manji od kritičnog intervala sleđenja

\*Izvor: Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., Jović, S. (2018). Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.

Sistematizacija verovatnoća  $p_{4,n}$  i vremena čekanja  $t_{sw4,n}$  data je sa (4.38):

$$t_{sw4,n} = \left\{ \begin{array}{ll} \left(1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}\right)^1 e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} & \left(\frac{1}{2} + 1 - 1\right) \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}(\lambda_h(t_a+t_b) + 1)}{\lambda_h} + t_a \\ \left(1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}\right)^2 e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} & \left(\frac{1}{2} + 2 - 1\right) \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}(\lambda_h(t_a+t_b) + 1)}{\lambda_h} + t_a \\ \left(1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}\right)^3 e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} & \left(\frac{1}{2} + 3 - 1\right) \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}(\lambda_h(t_a+t_b) + 1)}{\lambda_h} + t_a \\ \dots & \dots \\ \left(1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}\right)^n e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} & \left(\frac{1}{2} + n - 1\right) \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)}(\lambda_h(t_a+t_b) + 1)}{\lambda_h} + t_a \\ \dots & \dots \end{array} \right\}, \quad n \in [1, \infty) \quad (4.38)$$



#### 4.5. Provera normativnog uslova i obrazac za proračun srednjeg vremena čekanja

Srednje vreme čekanja vozila koje vrši sporedni manevar levog skretanja i koje se nalazi na prvom mestu u redu, u oznaci  $t_{sw}$ , može da se proračuna na osnovu izvedenih verovatnoća (4.12), (4.15), (4.29) za  $n \in [0, \infty)$  i (4.38) za  $n \in [1, \infty)$  i pripadajućih vremena čekanja u opsluzi (4.13), (4.16), (4.29) za  $n \in [0, \infty)$  i (4.38) za  $n \in [1, \infty)$ , koje su sistematizovane u (4.39).

$$t_{sw} = \left\{ \begin{array}{l} p_1 = \frac{\lambda_h t_a}{\lambda_h(t_a + t_b) + 1} \qquad \frac{t_a}{2} \\ p_2 = e^{-\lambda_h(t_a + t_b)} - \frac{\lambda_h(t_h - (t_a + t_b))}{\lambda_h(t_a + t_b) + 1} \qquad 0 \\ p_{3,n} = \frac{\lambda_h t_b (1 - e^{-\lambda_h(t_a + t_b)})^n}{\lambda_h(t_a + t_b) + 1} e^{-\lambda_h(t_a + t_b)} \qquad \frac{t_b}{2} + n \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a + t_b)} (\lambda_h(t_a + t_b) + 1)}{\lambda_p} + t_a \\ p_{4,n} = (1 - e^{-\lambda_h(t_a + t_b)})^n e^{-\lambda_h(t_a + t_b)} \qquad \left( \frac{1}{2} + n - 1 \right) \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a + t_b)} (\lambda_h(t_a + t_b) + 1)}{\lambda_h} + t_a \end{array} \right\} \quad (4.39)$$

Normativni uslov podrazumeva da je zbir svih verovatnoća iz (4.39) jednak aksiomatskoj vrednosti 1 (4.40):

$$p_1 + p_2 + \sum_{n=0}^{\infty} p_{3,n} + \sum_{n=1}^{\infty} p_{4,n} = 1 \quad (4.40)$$

Kako su verovatnoće (4.8) i (4.21) manje od vrednosti 1, u dokazu normativnog uslova mogu se primeniti poznate sume koje su date u (4.41):

$$\sum_{n=0}^{\infty} ca^n = \frac{c}{1-a}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} ca^n = \frac{ca}{1-a}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot a^n = \frac{a}{(1-a)^2} \quad (4.41)$$

Za potrebe dokaza normativnog uslova i primene (4.41) na (4.40), sređeni izrazi verovatnoća svih slučajeva su dati u (4.42).

$$\left. \begin{array}{l} p_1 = \frac{\lambda_p t_a}{\lambda_p(t_a + t_b) + 1} \\ p_2 = e^{-\lambda_p(t_a + t_b)} - \frac{\lambda_p(t_a + t_b)}{\lambda_p(t_a + t_b) + 1} \\ \sum_{n=0}^{\infty} p_{3,n} = \frac{\lambda_p t_b e^{-\lambda_p(t_a + t_b)}}{\lambda_p(t_a + t_b) + 1} \sum_{n=0}^{\infty} (1 - e^{-\lambda_p(t_a + t_b)})^n = \frac{\lambda_p t_b}{\lambda_p(t_a + t_b) + 1} \\ \sum_{n=1}^{\infty} p_{4,n} = e^{-\lambda_p(t_a + t_b)} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - e^{-\lambda_p(t_a + t_b)})^n = 1 - e^{-\lambda_p(t_a + t_b)} \end{array} \right\} \quad (4.42)$$

Sabiranjem verovatnoća iz (4.42) dobija se traženi dokaz normativnog uslova (4.43):

$$\frac{\lambda_p t_a}{\lambda_p(t_a+t_b)+1} + e^{-\lambda_p(t_a+t_b)} - \frac{\lambda_p(t_a+t_b)}{\lambda_p(t_a+t_b)+1} + \frac{\lambda_p t_b}{\lambda_p(t_a+t_b)+1} + 1 - e^{-\lambda_p(t_a+t_b)} = 1 \quad (4.43)$$

Na osnovu dosadašnjih dekompozicija verovatnoća i vremena sistematizovanih u (4.39), potrebno je ustanoviti eksplicitnu funkcionalnu vezu srednje vrednosti slučajne promenljive srednjeg vremena čekanja u opsluzi  $t_{sw}$  i srednjih vrednosti  $t_h$ ,  $t_a$ ,  $t_b$ .

Na osnovu verovatnoća i vremena sistematizovanih u (4.39) i opšteg obrasca za proračun srednje vrednosti vremena čekanja u opsluzi za vozila sporednog toka dobija se (4.44):

$$t_{sw} = \sum_{i=1}^4 t_{swi} \cdot p_i = t_{sw1} \cdot p_1 + t_{sw2} \cdot p_2 + t_{sw3} \cdot p_3 + t_{sw4} \cdot p_4 \quad (4.44)$$

$$\begin{aligned} t_{sw} &= \frac{t_a}{2} \cdot \frac{\lambda_h t_a}{\lambda_h(t_a+t_b)+1} + 0 \cdot \frac{\lambda_h(t_h-(t_a+t_b))}{\lambda_h(t_a+t_b)+1} \\ &+ \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{t_b}{2} + n \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} (\lambda_h(t_a+t_b)+1)}{\lambda_h} + t_a \right) \frac{\lambda_h t_b (1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)})^n}{\lambda_h(t_a+t_b)+1} e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \left( \left( \frac{1}{2} + n - 1 \right) \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} (\lambda_h(t_a+t_b)+1)}{\lambda_h} + t_a \right) \left( 1 - e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} \right)^n e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} \end{aligned} \quad (4.45)$$

Radi pojednostavljenja, uvođenjem predloženih smena (4.46), obrazac (4.45) dobija formu (4.47):

$$A = (\lambda_h(t_a+t_b)+1) \quad i \quad B = e^{-\lambda_h(t_a+t_b)} \quad (4.46)$$

$$t_{sw} = \frac{\lambda_h t_a^2}{2A} + \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{t_b}{2} + n \cdot \frac{1-AB}{\lambda_h} + t_a \right) \frac{\lambda_h t_b (1-B)^n B}{A} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \left( n - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{1-AB}{\lambda_h} + t_a \right) (1-B)^n B \quad (4.47)$$

Priprema (4.47) za rešavanje beskonačnih suma je data u izrazu (4.48).

$$\begin{aligned} t_{sw} &= \frac{\lambda_h t_a^2}{2A} + \left( \frac{t_b}{2} + t_a \right) \frac{\lambda_h t_b B}{A} \sum_{n=0}^{\infty} (1-B)^n + \left( \frac{1-AB}{\lambda_p} \right) \frac{\lambda_h t_b B}{A} \sum_{n=0}^{\infty} n (1-B)^n + \\ &+ \left( \frac{1-AB}{\lambda_h} \right) B \sum_{n=1}^{\infty} n (1-B)^n + \left( t_a - \frac{1-AB}{2\lambda_h} \right) B \sum_{n=1}^{\infty} (1-B)^n \end{aligned} \quad (4.48)$$

Rešenje beskonačnih suma iz (4.48), uz primenu (4.41), dato je sa (4.49).

$$t_{sw} = \frac{\lambda_h t_a^2}{2A} + \left(\frac{t_b}{2} + t_a\right) \frac{\lambda_h t_b B}{A} \frac{1}{1-(1-B)} + \left(\frac{1-AB}{\lambda_p}\right) \frac{\lambda_h t_b B}{A} \frac{1-B}{(1-(1-B))^2} + \left(\frac{1-AB}{\lambda_h}\right) B \frac{1-B}{(1-(1-B))^2} + \left(t_a - \frac{1-AB}{2\lambda_h}\right) B \frac{1-B}{1-(1-B)} \quad (4.49)$$

Sređivanjem izraza (4.49) dobija se izraz (4.50), koji posle izvlačenja zajedničkih elemenata postaje izraz (4.51).

$$t_{sw} = \frac{\lambda_h t_a^2}{2A} + \left(\frac{t_b}{2} + t_a\right) \frac{\lambda_h t_b}{A} + \left(\frac{1-AB}{\lambda_h}\right) \frac{\lambda_h t_b}{A} \frac{1-B}{B} + \left(\frac{1-AB}{\lambda_h}\right) \frac{1-B}{B} + \left(t_a - \frac{1-AB}{2\lambda_h}\right) (1-B) \quad (4.50)$$

$$t_{sw} = \frac{\lambda_h}{2A} (t_a + t_b)^2 + \left(\frac{1-AB}{\lambda_h}\right) \left(\frac{1-B}{B}\right) \left(\frac{\lambda_h t_b}{A} + 1\right) + \left(t_a - \frac{1-AB}{2\lambda_h}\right) (1-B) \quad (4.51)$$

Vraćanjem smena (4.46) u (4.51), dobija se konačna forma obrasca (4.52) za eksplicitno izračunavanje srednjeg vremena koje vozilo sporednog toka provede u posebnoj traci za levo skretanje, čekajući prihvatljiv interval sleđenja prioriternog toka pre izvođenja manevra.

$$t_{sw} = \frac{\lambda_h}{2(\lambda_h(t_a + t_b) + 1)} (t_a + t_b)^2 + \left(\frac{1 - (\lambda_h(t_a + t_b) + 1)e^{-\lambda_h(t_a + t_b)}}{\lambda_h}\right) \left(\frac{1 - e^{-\lambda_h(t_a + t_b)}}{e^{-\lambda_h(t_a + t_b)}}\right) \left(\frac{\lambda_h t_b}{\lambda_h(t_a + t_b) + 1} + 1\right) + \left(t_a - \frac{1 - (\lambda_h(t_a + t_b) + 1)e^{-\lambda_h(t_a + t_b)}}{2\lambda_h}\right) (1 - e^{-\lambda_h(t_a + t_b)}) \quad (4.52)$$

Saglasno jednačinama (4.2) i (4.3) dobija se eksplicitna funkcionalna veza (4.53) srednjeg vremena čekanja  $t_{sw}$  i elementarnih vremena  $t_v$ ,  $t_r$ ,  $t_m$  i  $t_s$ .

$$t_{sw} = \frac{\lambda_h}{2(\lambda_h(t_v + t_r + t_m + t_s) + 1)} (t_v + t_r + t_m + t_s)^2 + \left(\frac{1 - (\lambda_h(t_v + t_r + t_m + t_s) + 1)e^{-\lambda_h(t_v + t_r + t_m + t_s)}}{\lambda_h}\right) \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda_h(t_v + t_r + t_m + t_s)}}{e^{-\lambda_h(t_v + t_r + t_m + t_s)}}\right) \left(\frac{\lambda_h(t_m + t_s)}{\lambda_h(t_v + t_r + t_m + t_s) + 1} + 1\right) + \left((t_v + t_r) - \frac{1 - (\lambda_h(t_v + t_r + t_m + t_s) + 1)e^{-\lambda_h(t_v + t_r + t_m + t_s)}}{2\lambda_h}\right) (1 - e^{-\lambda_h(t_v + t_r + t_m + t_s)}) \quad (4.53)$$

Iz jednačine (4.53) nije moguće eksplicitno izraziti srednju vrednost subjektivnog vremena  $t_s$ . Međutim za srednje vrednosti slučajnih promenljivih  $t_{sw}$ ,  $t_v$ ,  $t_r$ , i  $t_m$ , koje su statistički ustanovljene merenjem na raskrsnici, metodom matematičke interpolacije je moguće proračunati vrednost  $t_s$ . Time se dobija subjektivno vreme neophodno za proračun srednje vrednosti kritičnog intervala (4.54):

$$t_c = t_v + t_r + t_m + t_s \quad (4.54)$$

Za slučajne promenljive  $T_{sw}$ ,  $T_v$ ,  $T_r$ , i  $T_m$ , merenjem i statističkom analizom mogu se pojedinačno ustanoviti osnovni parametri (srednja vrednost i standardna devijacija) i gustina raspodela slučajnih promenljivih  $f(T_{sw})$ ,  $f(T_v)$ ,  $f(T_r)$ , i  $f(T_m)$ . Jednačina (4.53), osim proračuna srednje vrednosti  $t_s$  matematičkom interpolacijom, ne daje mogućnosti za direktno određivanje gustine raspodele  $f(T_s)$  neophodne za dublju analizu strukture slučajne promenljive  $T_s$ .

## 5. Definisanje područja i metodologije istraživanja

### 5.1. Područje istraživanja za merenje parametara saobraćajnog toka

Lokacije na kojim je vršeno istraživanje su raskrsnice, koje su odabrane prvenstveno na osnovu njihovih geometrijskih karakteristika. Preduslov za nastajanje gore navedenog događaja jeste da na prilazu nesignalisane raskrsnice postoji posebna traka za levo skretanje i da vozilo sporednog toka svoj manevar obavlja preko jedne trake kojom se kreću vozila prioritetnog toka iz suprotnog smera. Shodno tome, izvršen je odabir lokacija na kojim je vršeno istraživanje.

Izbor raskrsnica koje su uključene u istraživanje je rađen u skladu sa preporukama iz radova *Kittelson* i *Vandehey* ([Kittelson & Vandehey, 1991](#)) i *Ruškić* ([Ruškić, 2013](#)). Raskrsnice koje su odabrane kao uzorak za istraživanje su ispunjavale sledeće kriterijume:

- 1) raskrsnica tipa *TWSC*, na kojoj je jedan putni pravac definisan kao glavni putni pravac i pruža se u pravcu, dok je drugi putni pravac sporedni;
- 2) na prioritetnom prilazu postoji posebna traka za levo skretanje sa ograničenim brojem mesta u redu čekanja;
- 3) vozila koja vrše manevar levog skretanja sa glavnog putnog pravca prelaze preko jedne saobraćajne trake koja je namenjena za kretanje prioritetnog toka u suprotnom smeru;
- 4) vozila koja vrše desno skretanje sa prioritetnog prilaza imaju posebnu traku i ne ometaju vozila koja obavljaju levo skretanje sa suprotnog prioritetnog prilaza;
- 5) raskrsnice su značajno udaljene od najbližih signalisanih raskrsnica pa intervali vozila u prioritetnom toku nemaju karakteristike plotuna;
- 6) svi prilazi su ravni, bez nagiba;
- 7) preglednost na raskrsnici nema ograničenja od okolnih objekata;
- 8) na raskrsnici nema tokova biciklista i pešaka, ili su navedeni tokovi malog intenziteta.

Na osnovu ovako definisanih kriterijuma, odabrano je pet raskrsnica, od toga četiri u Republici Srbiji (SRB), a jedna u Bosni i Hercegovini (BIH-RS), odabrano je:

- (SRB) Beograd – 2 raskrsnice, period istraživanja 3h (1h+2h), lokacije:
  - o BG-A (1h), (T), 44°44'24.0"N 20°24'53.1"E,
  - o BG-B (2h), (T), 44°23'25.7"N 20°14'21.4"E.
- (SRB) Novi Sad – 1 raskrsnica, period istraživanja 2h, lokacija:
  - o NS (2h), (+), 45°14'55.4"N 19°51'09.1"E.
- (SRB) Pančevo – 1 raskrsnica, period istraživanja 2h, lokacija:
  - o PA (2h), (T), 44°52'10.9"N 20°39'27.3"E.
- (BIH-RS) Doboј – 1 raskrsnica, period istraživanja 2h, lokacija:
  - o DO (2h), (T), 44°44'08.8"N 18°05'47.8"E.

U pogledu broja prilaza, četiri raskrsnice su trokake (T) standardne nesignalisane raskrsnice, a jedna raskrsnica je četvorokraka (+) standardna nesignalisana raskrsnica (nalazi se u Novom Sadu). Pored navedenih osnovnih kriterijuma, za biranje raskrsnica koje su ušle u uzorak, veoma važan kriterijum je bio da su tokovi vozila na glavnim i sporednim prilazima intenzivni. Navedeni kriterijum je bio od posebne važnosti, jer se tada stvara veći broj kritičnih intervala, a na sporednom prilazu se stvara red čekanja, što omogućava dobijanje realnih vrednosti i kasniju validaciju modela (Tačka 6). Sva sprovedena istraživanja na standardnim nesignalisanim raskrsnicama se odnose na realni saobraćajni tok.

## 5.2. Metodologija istraživanja

Istraživanje je sprovedeno kroz tri osnovna metodološka koraka: 1) analiza dosadašnjih istraživanja, 2) prikupljanje podataka i 3) statistička obrada dobijenih podataka sa grafičkim predstavljanjem rezultata. Svrha analize saobraćajnih tokova na posmatranim raskrsnicama jeste da se dobije realna slika o strukturi i intenzitetu, kako bi se kasnije ti podaci doveli u zavisnost sa nastankom analiziranih vremenskih gubitaka kod čekanja u vozila, koja vrše manevar levog skretanja sa prioritnog prilaza. U okviru prikaza podataka o saobraćajnom opterećenju dat je tabelarni prikaz časovnog opterećenja za periode u kojima je vršeno snimanje (brojanje) i procentualni prikaz strukture saobraćajnih tokova i prilaza prioritnog pravca. U okviru analize strukture saobraćajnog toka izvršena je raspodela na deset karakterističnih kategorija vozila (Tabela 5.1), odnosno učesnika u saobraćajnom toku.

Tabela 5.1 Broj vozila u levom skretanju po raskrsnicama

R.br.	Kategorija	R.br.	Kategorija
1	Bicikl (BIC)	6	Srednje teretno vozilo (STV)
2	Motocikl (MOT)	7	Teško teretno vozilo (TTV)
3	Putnički automobil (PA)	8	Autovoz (AV)
4	Autobus (BUS)	9	Traktor (T)
5	Lako teretno vozilo (LTV)	10	Radna mašina (RM)

Važan aspekt rada je posvećen merenju vremenskih intervala u prioritonom toku i toku vozila koja obavljaju levo skretanje sa glavnog prilaza. Korišćena procedura je obuhvatala dva veoma bitna segmenta:

- 1) Na svakom snimku iz uzorka raskrsnica je definisan neki od nepokretnih objekata (kao npr. horizontalna signalizacija, saobraćajni znak, stub rasvete ili sl.) za svaki od prilaza, u odnosu na koji je moglo da bude praćeno kretanje vozila.
- 2) Prolazak posmatranog vozila pored ili preko ovog objekta je beleženo kao prvo vreme za potrebe merenja nekog intervala, a prolazak sledećeg vozila je beležen kao drugo vreme.

Detaljan način obrade dobijenih vremenskih intervala dat je u nastavku ovog poglavlja.

### 5.3. Merenje parametara saobraćajnog toka

Za utvrđivanje parametara saobraćajnog toka i osobnosti saobraćajnog toka, koji su bili neophodni za predmetnu analizu, izvršeno je istraživanje na slučajnom uzorku prikupljenom na unapred utvrđenim lokacijama metodom obrade video zapisa. Merenje parametara saobraćajnog toka obradom snimaka je jedna od najstarijih metoda, koju je koristio još *Greenshields* ([Greenshields, 1935](#)). Obradu video zapisa saobraćajnog toka vršena su početkom tridesetih godina prošlog veka u SAD od strane naučnika koje je predvodio *Bob Greenshields*. ([Greenshields, Thompson, Dickinson, & Swinton, 1934](#)) Sličan način analize saobraćajnog toka nastavljen je i u narednim godinama sa nešto naprednijom tehnologijom.

Naučnik *Richard Strickland* ([Strickland, 1947](#)) je prilikom istraživanja, za potrebe doktorske disertacije u američkom gradu *Hartford*, vršio istovremeno snimanje sa više kamera u cilju dobijanja preciznijih podataka o veličini pojedinih parametara toka.

U disertaciji je korišćen metod, koji je zasnovan na prikupljanju digitalnog video zapisa realnog saobraćajnog toka i naknadnoj obradi snimka primenom različitih softvera. Ovakav način prikupljanja i obrade podataka pokazao se kao veoma praktičan i efikasan i u drugim istraživanjima parametara saobraćajnog toka. ([Bogdanović, Papić, Ruškić, & Jeftić, 2011](#)); ([Bogdanović, Ruškić, Kulović, & Han, 2013](#)); ([Ivanović, Garunović, & Tomanović, 2014](#)); ([Ruškić, 2013](#)).

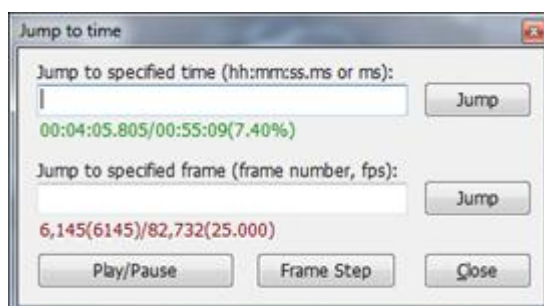
Prema *Goodwin* ([Goodwin, 2002](#)), istraživanje se sprovodi u vremenskim uslovima koji pogodno utiču na odvijanje saobraćaja, odnosno vreme bez kiše, magle, jakog vetra, snega i drugih nepovoljnih vremenskih uslova koji mogu negativno uticati na kretanje vozila i ponašanje vozača.

Prilikom snimanja saobraćajnih tokova na raskrsnicama, korišćena je kamera *Canon LEGRIA FS200 41x Advanced Zoom* koja je prikazana na narednoj slici (Slika 5.1). Obrada snimka je rađena preko programa *VideoPad* (verzija 4.11).



Slika 5.1 Kamera kojom je vršeno snimanje

Video zapis je serija slika koje se prikazuju jedna za drugom velikom brzinom. Svaka pojedinačna slika u video zapisu se naziva „frejm“ (*engl. frame*). U softveru za pregled video snimka, koji je korišćen u ovom slučaju, moguće je pregledati video zapis po jednom zabeleženom frejmu. Analiza video zapisa se može raditi (Slika 5.2) sa tačnošću od 0,001 [s].



Slika 5.2 Prikaz parametara izabranog frejma

Snimak je pregledan u programu *KMPlayer* (Slika 5.3) (verzija 3.9.1.138).



Slika 5.3 Prikaz video zapisa lokacije raskrsnice u Doboju (program *KMPlayer*)

Za potrebe istraživanja i kasnije validacije modela, izvršeno je merenje parametara saobraćajnog toka, kojima se opisuje:

- 1) tok vozila u skretanju levo, sa prioritnog prilaza, na glavnom pravcu, i
- 2) tok vozila u kretanju pravo, sa suprotnog prioritnog prilaza glavnog pravca, u odnosu na onaj sa koga se vrši manevar levog skretanja.



Za vozila, koja su obavljala manevar levog skretanja, sa prioriternog prilaza, u opštem slučaju su beležena četiri karakteristična vremena: 1) vreme zaustavljanja vozila, 2) vreme pokretanja vozila, 3) vreme presecanja sa saobraćajnom trakom iz suprotnog smera (zonom konflikta) i 4) vreme napuštanja zone konflikta.

U obradi video snimaka je postavljeno više pomoćnih (imaginarnih) osa, kod:

- 1) saobraćajne trake iz koje je vršeno levo skretanje i
- 2) saobraćajne trake za kretanje pravo, sa suprotnog prioriternog prilaza.

Prva svrha postavljanja pomoćnih (imaginarnih) osa je da se odrede dva trenutka, koja su važna za određivanje vremena manevra, (vrednosti slučajne promenljive  $T_m$ ), vozila koja su vršila leva skretanja (5.1):

- 1) kada je vozilo u levom skretanju presecalo traku, koja je namenjena vozilima u kretanju pravo sa suprotnog prioriternog prilaza (ulazak u potencijalnu zonu konflikta) i
- 2) kada je vozilo u levom skretanju napuštalo traku, koja je namenjena vozilima u kretanju pravo sa suprotnog prioriternog prilaza (izlazak iz potencijalne zone konflikta).

$$\text{Vreme manevra} = \text{Vreme napuštanja} - \text{Vreme presecanja} \quad (5.1)$$

Vozila, pre vršenja manevra levog skretanja, su pri dolasku na prilaz raskrsnice zaticala praznu saobraćajnu taku za levo skretanje, ili su stajala u red u slučaju da je već bilo vozila. U posmatranom toku vozila, koja su obavljala manevar levog skretanja, uočena je podela na tri vrste ponašanja:

- Saobraćajna traka za levo skretanje je bila prazna:
  - 1) Vozila koja su se zaustavljala, pre nego što su izvršila manevar, i za njih su beležena četiri vremena: 1) vreme zaustavljanja vozila, 2) vreme pokretanja vozila, 3) vreme presecanja i 4) vreme napuštanja,
  - 2) Vozila koja se nisu zaustavljala, pre nego što su izvršila manevar, i za njih su beležena dva vremena: 1) vreme presecanja i 2) vreme napuštanja,
- Saobraćajna traka za levo skretanje nije bila prazna:
  - 3) Vozila koja su zaticala red u saobraćajnoj traci za levo skretanje. pre nego što su izvršila manevar, i za njih su beležena tri vremena: 1) vreme zaustavljanja vozila, 2) vreme presecanja i 3) vreme napuštanja.

Druga svrha postavljanja pomoćnih (imaginarnih) osa je da se odrede vremenski intervali sleđenja vozila u kretanju pravo, sa suprotnog prioriternog prilaza, u odnosu na onaj sa koga se vrši manevar levog skretanja. Tada je pomoćna linija postavljena na zaustavnoj liniji trake za levo skretanje, pa su beleženi trenuci kada pored nje prođu vozila u kretanju pravo, sa suprotnog prioriternog prilaza. Preko ovog postupka se dobijaju vrednosti slučajne promenljive  $T_h$ .

Treća svrha postavljanja pomoćnih (imaginarnih) osa je da se odrede vremenski trenuci neophodni za određivanje vrednosti slučajnih promenljivih  $T_a$  i  $T_b$ .

Prvi trenutak za određivanje vrednosti  $T_a$  je trenutak susreta vozila u levom skretanju i vozila u kretanju pravo sa suprotnog prilaza (tzv. „čelo-čelo“). Drugi trenutak je kada vozilo u levom skretanju preseca traku, koja je namenjena vozilima u kretanju pravo sa suprotnog prioritnog prilaza. (Slika 5.4) Razlika ove dve zabeležene vrednosti čini vrednosti slučajne promenljive  $T_a$ . Ako je vozilo izvršilo manevar levog skretanja, ali se nije susrelo sa vozilom iz toka pravo sa suprotnog prilaza, onda se za prvi trenutak beleži kada su oba vozila prešla preko pomoćne linije postavljene na zaustavnoj liniji saobraćajne trake za levo skretanje.



Slika 5.4 Trenuci koji su potrebni za određivanje vrednosti slučajne promenljive  $T_a$

Prvi trenutak za određivanje vrednosti  $T_b$  je kada vozilo u levom skretanju preseca traku, koja je namenjena vozilima u kretanju pravo sa suprotnog prioritnog prilaza, što je prikazano na slučaju 2 prethodne slike (Slika 5.4). Drugi trenutak je kada naredno vozilo u kretanju pravo sa suprotnog prilaza prođe kroz prethodno definisanu tačku. Razlika ove dve zabeležene vrednosti čini vrednosti slučajne promenljive  $T_b$ . Na taj način su zaokružene vrednosti slučajnih promenljivih  $T_a$  i  $T_b$ , čiji zbir pojedinačnih vrednosti ( $t_a$  i  $t_b$ ), predstavljaju vrednosti intervala, koje su iskoristila vozila u levom skretanju da obave svoj manevar.

Kako je već naznačeno u uvodnoj tački (Tačka 1), vremenski gubici vozila koja čekaju da izvrše manevar levog skretanja iz posebne trake za levo skretanje glavnog prilaza, imaju dve komponente: 1) vreme čekanja u opsluzi (kada se vozilo nalazi na prvom mestu u redu) i 2) vreme čekanja u redu (kada se ispred posmatranog vozila nalazi barem jedno vozilo). Za model koji je razvijen za potrebe ove disertacije, od posebne važnosti su vremena čekanja u opsluzi, odnosno vrednosti slučajne promenljive  $T_{sw}$ . U posmatranom toku vozila, koja su čekala u opsluzi, pre manevara levog skretanja, uočena je podela na dve vrste ponašanja:

- Saobraćajna traka za levo skretanje je bila prazna:
  - 1) Vozila koja su se zaustavljala, pre vršenja manevara, vreme čekanja u opsluzi se računa tako što se od vremena presecanja oduzima vreme zaustavljanja.
- Saobraćajna traka za levo skretanje nije bila prazna:
  - 2) Vozila koja su stala u red, pre vršenja manevara:
    - a. ukupno vreme čekanja se dobija kada se od vremena presecanja oduzima vreme zaustavljanja,
    - b. vreme čekanja u opsluzi se dobija kada se oduzmu vremena presecanja dva vozila (vozila ispred koje je izvršilo manevar i posmatranog vozila, koje čeka povoljan interval za vršenje manevara).

## 6. Prikaz rezultata istraživanja i testiranje modela

Prema programu *XLSTAT* ([XLSTAT, 2014](#)), u matematičkoj statistici, vrednost *outlier* je vrednost koju uzima slučajna promenljiva, pri čemu je navedena vrednost neuobičajeno manja ili veća od drugih posmatranih vrednosti. Mogu se razlikovati dva tipa *outlier*-a. Sa prvog gledišta, *outlier* može da se odnosi na grešku pri čitanju, grešku pri merenju, grešku pri unosu ili na specijalan događaj koji ometa posmatrani fenomen do te mere da je neuporediv sa drugim vrednostima. U takvim slučajevima, pristupa se ili ispravljanju greške, ukoliko je moguće, ili uklanjanju vrednosti iz uzorka kako bi se izbeglo ometanje planirane analize (deskriptivna analiza, modeliranje, predviđanje i sl.). Sa drugog gledišta, *outlier* može da nastane i zbog netipičnog događaja, ali koji je pored toga poznat ili interesantan za analizu.

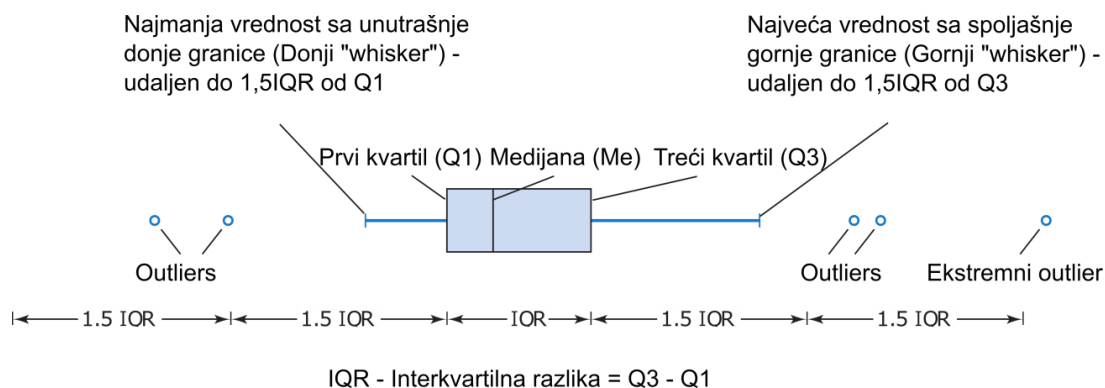
Prema *Mann* ([Mann, 2009](#)), *Box plot* daje grafički prikaz podataka koristeći pet mera: medijanu, prvi kvartil, treći kvartil, najmanju i najveću vrednost u seriji podataka između donje i gornje unutrašnje granice. Takođe, *Box plot* pomaže da se odrede ekstremne vrednosti. Konstruiše se crtanjem pravougona, pomoću medijane, prvog kvartila, trećeg kvartila, i najmanje i najveće vrednosti u seriji podataka između donje i gornje unutrašnje granice.

U skladu sa *Mann* ([Mann, 2009](#)), vrednosti koje se nalaze izvan dve unutrašnje granice se nazivaju *outliers*. Oni se mogu klasifikovati u dve vrste: umereni i ekstremni. Kod *Box-plot* postoje dve unutrašnje i dve spoljašnje granice:

- 1) donja unutrašnja granica je  $1,5 \times IQR$  (interkvartilni razmak) ispod prvog kvartila,
- 2) gornja unutrašnja granica je  $1,5 \times IQR$  (interkvartilni razmak) iznad trećeg kvartila.
- 3) donja spoljašnja granica je  $3,0 \times IQR$  (interkvartilni razmak) ispod prvog kvartila,
- 4) gornja spoljašnja granica je  $3,0 \times IQR$  (interkvartilni razmak) iznad trećeg kvartila.

Ukoliko je vrednost izvan bilo koje od dve unutrašnje granice, ali unutar bilo koje od dve spoljašnje granice, ona se naziva *umereni outlier*. Vrednost koja se nalazi izvan bilo koje od dve spoljašnje granice, se naziva *ekstremni outlier*.

## Prikaz rezultata istraživanja i testiranje modela



Slika 6.1 Opis vrednosti koje se nalaze na Box-plot-u

\*Izvor: Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2003). *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley & Sons., p. 207.

U statističkom zaključivanju,  $p$ -vrednost (engl.  $p$ -value) govori o tome da li treba da se odbaci ili ne odbaci postavljena hipoteza protiv neke alternativne hipoteze. Ukoliko je ona manja od praga značajnosti ( $\alpha$ ), hipoteza se odbacuje, u suprotnom ona se ne odbacuje. (Mann, 2009)

### 6.1. Rezultati istraživanja

#### 6.1.1. Vrednosti tokova vozila na raskrsnicama

U narednoj tabeli (Tabela 6.1), dati su ukupan broj vozila u levom skretanju i broj putničkih automobila (PA), koji su vršili manevar levog skretanja, na posmatranim raskrsnicama. U traci za levo skretanje, najveći uticaj komercijalnih vozila je primećen na raskrsnici u Doboju, dok je najviše homogen tok bio na raskrsnici u Novom Sadu. U istraživanju su obrađeni parametri levog skretanja za 1424 vozila, od kojih su 1302 putnička automobila (PA).

Tabela 6.1 Broj vozila u levom skretanju po raskrsnicama

Raskrsnica	Broj vozila u levom skretanju	Broj PA u levom skretanju	PA (u %)
BG-A	243	238	97,94
DO-1	129	98	75,97
DO-2	192	152	79,17
PA-1	134	128	95,52
PA-2	121	117	96,69
BG-B1	180	165	91,67
BG-B2	143	128	89,51
NS-1	162	160	98,77
NS-2	120	116	96,67
Ukupno	1424	1302	91,43

\*Broj pored oznake raskrsnice se odnosi na čas istraživanja (1-prvi čas, itd.).

U sledećoj tabeli (Tabela 6.2), dati su podaci o ukupnom broju vozila u kretanju pravo i broju putničkih automobila (PA), u kretanju pravo sa suprotnog prioritnog prilaza u odnosu na onaj sa koga su vozila vršila manevar levog skretanja iz posebne trake.

U kretanju pravo sa suprotnog prioritetnog prilaza, najveći uticaj komercijalnih vozila je zabeležen na raskrsnici BG-B, jer se nalazi na Ibarskoj magistrali (vangradska raskrsnica), gde putnički automobili (PA), čine samo 63,44% odnosno 62,83% toka vozila. U istraživanju su zabeležena 4105 vremenskih intervala između vozila u kretanju pravo, o čijim raspodelama je diskusija sprovedena u jednoj od narednih tačaka (Tačka 6.1.4). Najmanji uticaj komercijalnih vozila je zabeležen na raskrsnicama u Pančevu i Novom Sadu, jer se one nalaze u širem centru grada.

Tabela 6.2 Broj vozila u kretanju pravo na prioritetnom prilazu sa suprotnog prilaza u odnosu na prilaz sa koga vozila vrše manevar levog skretanja po raskrsnicama

Raskrsnica	Broj vozila u kretanju pravo	Broj PA u kretanju pravo	PA (u %)
BG-A	612	505	82,52
DO-1	413	330	79,90
DO-2	506	400	79,05
PA-1	442	387	87,56
PA-2	451	401	88,91
BG-B1	331	210	63,44
BG-B2	339	213	62,83
NS-1	531	490	92,28
NS-2	480	424	88,33
Ukupno	4105	3360	81,85

\*Broj pored oznake raskrsnice se odnosi na čas istraživanja (1-prvi čas, itd.).

### 6.1.2. Analiza vrednosti slučajne promenljive $T_a$

Za određivanje vrednosti  $t_a$ , analiziran je događaj manevra levog skretanja vozila sa prioritetnog prilaza. U rezultatima su posebno prikazani putnički automobili (PA), jer je PA izabran kao referentno vozilo. Prilikom posmatranja skretanja vozila uočeno da se pre vršenja manevra levog skretanja vozila zaustavljaju, usporavaju ili slobodno skreću bez zaustavljanja ili staju u red u posebnoj traci za levo skretanje, ukoliko postoji vozilo (vozila) ispred njega, koje čekaju da obave manevar levog skretanja.

U narednom delu su analizirana sledeća pitanja:

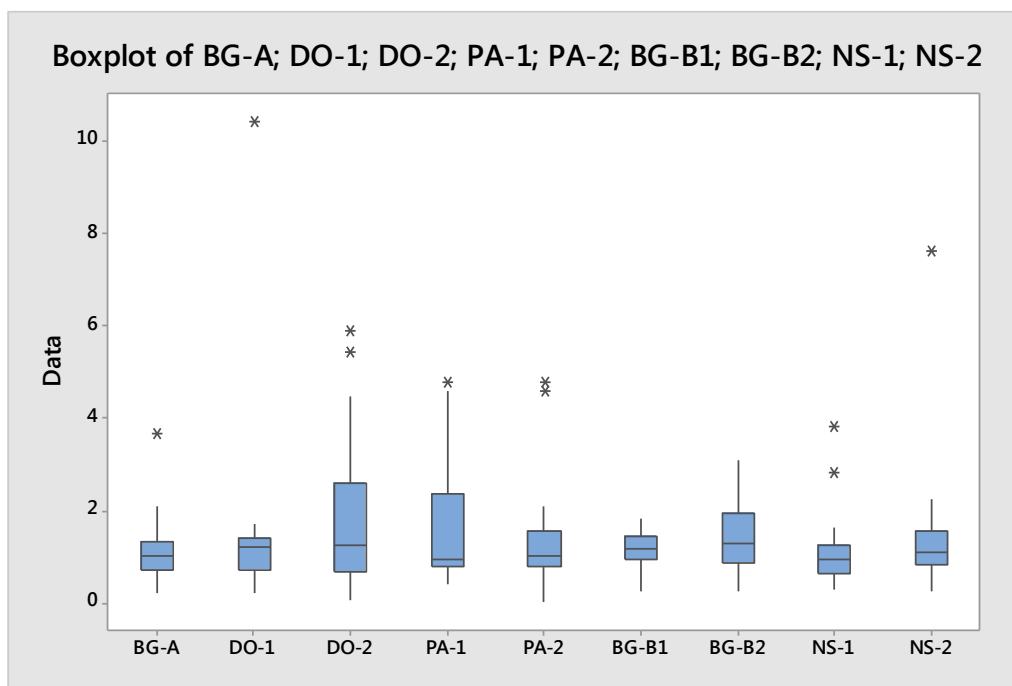
- 1) Koji opseg vrednosti  $t_a$  prihvata prosečni vozač pri manevaru levog skretanja?
- 2) Koje su osnovne deskriptivne mere vrednosti  $t_a$ , pre svega aritmetička sredina i standardno odstupanje slučajne promenljive  $T_a$ ?
- 3) Koja je saglasnost između hipotetične raspodele u generalnoj populaciji i empirijske raspodele frekvencija u uzorku, koji je izvučen iz te generalne populacije?

Da bi se odredio opseg vrednosti  $t_a$ , koji prihvata prosečni vozač pri manevaru levog skretanja, iz perioda posmatranja, izvučeni su samo oni PA koji su se zaustavili na prvom mestu u redu, pre vršenja manevra (Tabela 6.3).

Tabela 6.3 Broj PA koji su se zaustavili pre manevra levog skretanja

Variable	BG-A	DO-1	DO-2	PA-1	PA-2	BG-B1	BG-B2	NS-1	NS-2
Count	34	21	28	20	19	17	15	23	16

Prikaz vrednosti  $t_a$  iz uzorka je urađen pomoću grafika *Box plot*, koji daje grafički prikaz podataka koristeći pet mera: medijanu, prvi kvartil, treći kvartil, najmanju i najveću vrednost iz serije podataka. Kod analize uzoraka (Slika 6.2), vrednosti  $t_a$  iznad 2,4 [s] kod 7 od 9 analiziranih perioda su prikazane sa oznakom \*, što je oznaka za neuobičajene ekstremne vrednosti (engl. *outlier*).

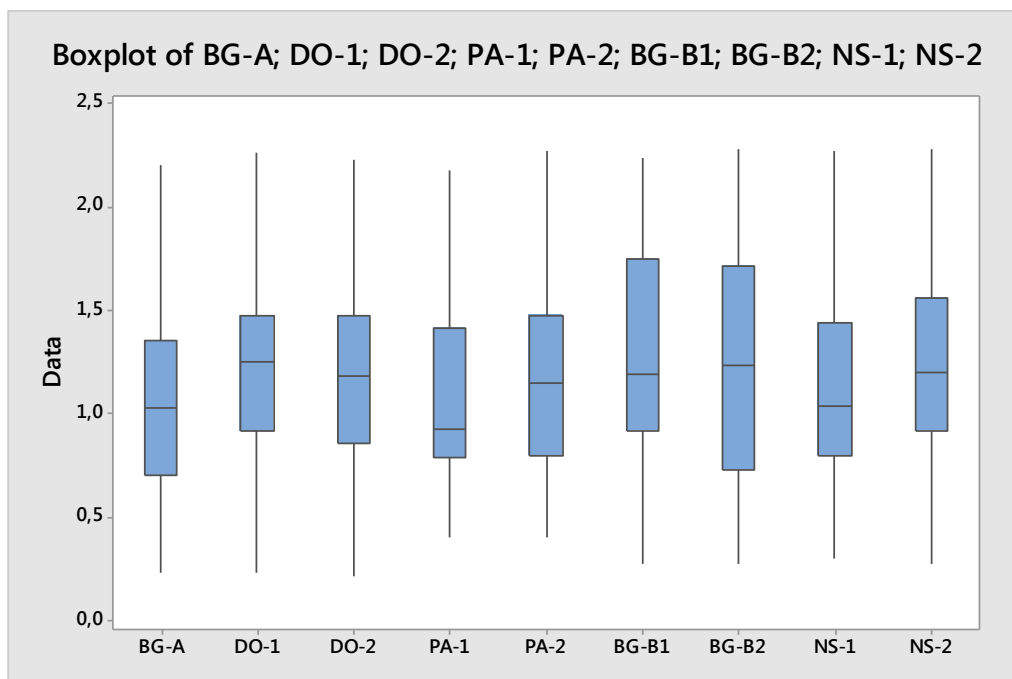


Slika 6.2 Box-plot za vrednosti  $t_a$  sa outliers

Zbog povećanja obima uzorka, u dalju analizu vrednosti parametra  $t_a$  su uključeni i oni PA koji vrše manevar levog skretanja bez zaustavljanja ili iz kolone, ali koja ispunjavaju postavljeno ograničenje do 2,4 [s]. (Slika 6.3). U tabeli (Tabela 6.4) su prikazane osnovne deskriptivne mere, posebno za svaki čas posmatranja: veličina uzorka  $n$  (engl. *Count*), aritmetička sredina (engl. *Mean*), standardna devijacija uzorka (engl. *StDev*), najveća vrednost (engl. *Maximum*) i najmanja vrednost (engl. *Minimum*) iz uzorka. Pored ovih vrednosti, dat je i prikaz vrednosti prvog kvartila (Q1), medijane (engl. *Median*), trećeg kvartila (Q3) i interkvartilne razlike (*IQR*). Deskriptivne mere su izračunate pomoću programa *Minitab 17*.

Tabela 6.4 Deskriptivne mere za vrednost parametra  $t_a$  bez outliers

Variable	Count	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
BG-A	114	1,072	0,515	0,230	0,705	1,029	1,358	2,203	0,654
DO-1	46	1,201	0,456	0,236	0,919	1,252	1,475	2,266	0,557
DO-2	62	1,199	0,530	0,216	0,863	1,189	1,479	2,236	0,616
PA-1	47	1,080	0,441	0,401	0,790	0,928	1,414	2,178	0,624
PA-2	55	1,167	0,463	0,405	0,800	1,150	1,480	2,273	0,680
BG-B1	41	1,277	0,521	0,280	0,921	1,196	1,753	2,240	0,832
BG-B2	31	1,250	0,577	0,280	0,730	1,239	1,720	2,280	0,990
NS-1	61	1,117	0,468	0,303	0,800	1,041	1,441	2,279	0,641
NS-2	43	1,273	0,462	0,280	0,921	1,200	1,560	2,280	0,639



Slika 6.3 Box-plot za vrednosti parametra  $t_a$  bez outliers

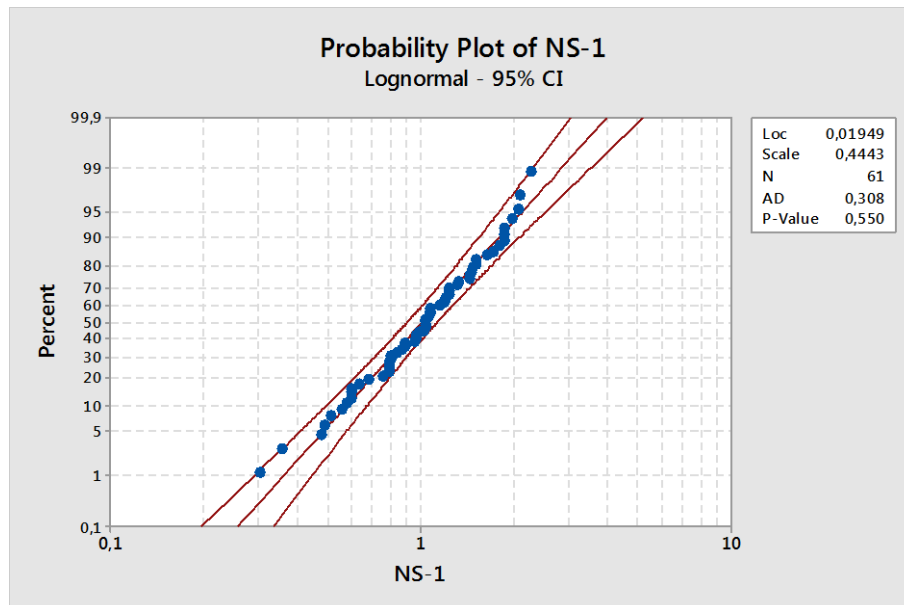
Sledeća tabela (Tabela 6.5), daje podatke o raspodelama verovatnoća parametra  $t_a$ , od uzorka za putničke automobile. Ovaj parametar će kasnije biti korišćen kod validacije modela (Tačka 6.2). Kod sedam od devet raskrsnica, ne može se odbaciti hipoteza o slaganju sa lognormalnom raspodelom, jer je  $p$  vrednost veća od 0,05.

Na raskrsnici u Doboju, za oba sata istraživanja (DO-1, prvi sat i DO-2), primećen je najveći uticaj komercijalnih vozila (oko 20%), pa se u ova dva slučaja može odbaciti hipoteza o slaganju sa lognormalnom raspodelom. Međutim, u ova dva slučaja se ne može odbaciti slaganje sa Vejbulovom i logističkom raspodelom, jer je za obe raskrsnice  $p$  vrednost veća od 0,05.

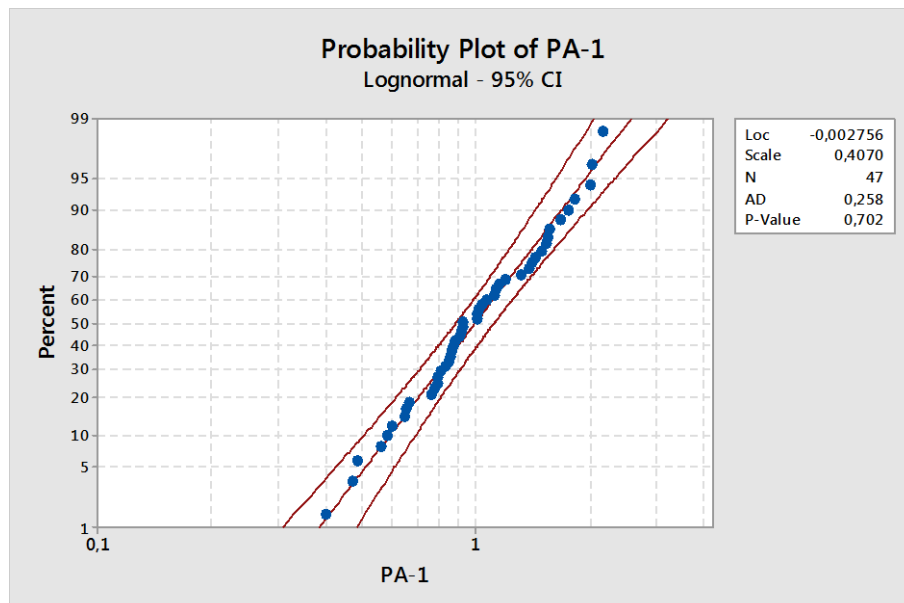
Tabela 6.5 Raspodele verovatnoća za vrednosti parametra  $t_a$

Raskrsnica	Uzorak	Raspodela		$p$ -vrednost	
BG-A	114	Lognormal		0,059	
DO-1	46	Weibull	Logistic	0,220	>0,25
DO-2	62	Weibull	Logistic	0,102	>0,25
PA-1	47	Lognormal		0,702	
PA-2	55	Lognormal		0,433	
BG-B1	41	Lognormal		0,094	
BG-B2	31	Lognormal		0,202	
NS-1	61	Lognormal		0,550	
NS-2	43	Lognormal		0,308	

Slaganje vrednosti parametra  $t_a$  sa lognormalnom raspodelom za raskrsnice NS-1 ( $p$  vrednost = 0,55) i PA-1 ( $p$  vrednost = 0,702) je dato na narednim slikama (Slika 6.4 i Slika 6.5).



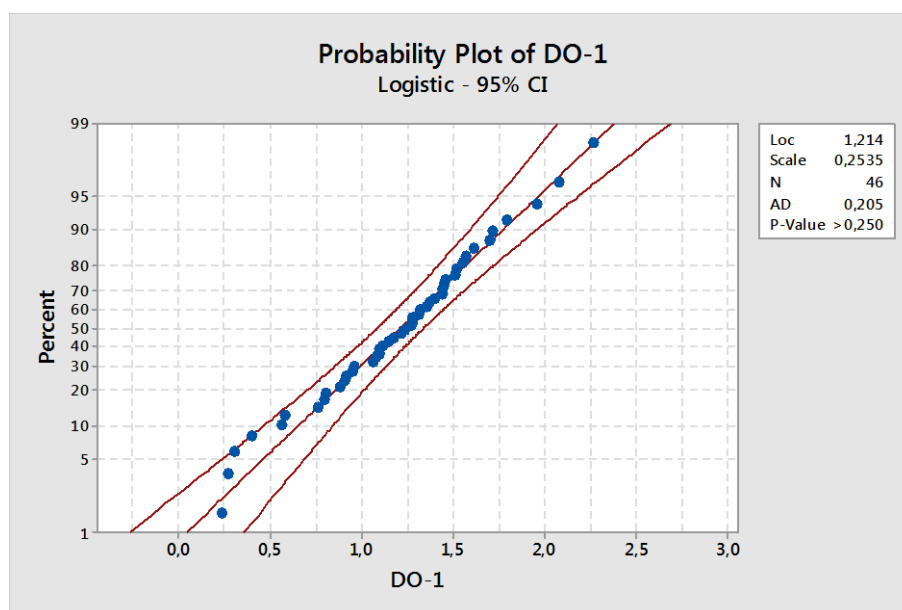
Slika 6.4 Slaganje vrednosti parametra  $t_a$  sa lognormalnom raspodelom za raskrsnicu NS-1



Slika 6.5 Slaganje vrednosti parametra  $t_a$  sa lognormalnom raspodelom za raskrsnicu PA-1



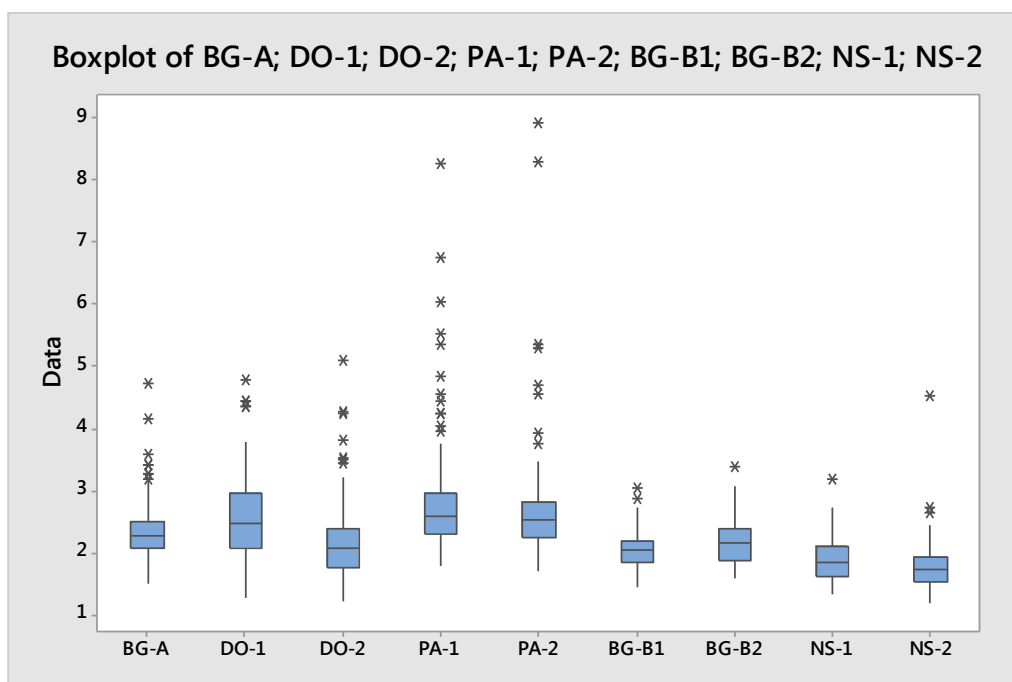
Slaganje vrednosti parametra  $t_a$  sa logističkom raspodelom za raskrsnicu DO-1 ( $p$  vrednost  $> 0,25$ ) je dato na narednoj slici (Slika 6.6).



Slika 6.6 Slaganje vrednosti parametra  $t_a$  sa logističkom raspodelom za raskrsnicu DO-1

### 6.1.3. Analiza vrednosti slučajne promenljive $T_m$

Sledeća slika (Slika 6.7) daje grafički prikaz u vidu *Box-plot*, svih vrednosti vremena manevra levog skretanja za putničke automobile, po istraživanim raskrsnicama i časovima istraživanja. Na slici se primećuje određen broj *outlier*, usled različitih ometanja vozila koja su obavljala manevar levog skretanja. Najveći broj ometanja zbog pešaka i biciklista je primećen na raskrsnici u Pančevu, koja se nalazi unutar šireg centra grada. Deskriptivne mere su date u narednoj tabeli (Tabela 6.6).



Slika 6.7 Box-plot za vrednosti parametra  $t_m$  sa outliers

Vrednosti slučajne promenljive  $T_b$  nisu posebno analizirane jer se sastoje iz objektivnog (merljivog) dela (izraženog u vrednostima slučajne promenljive  $T_m$ ) i subjektivnog dela (izraženog u vrednostima slučajne promenljive  $T_s$ ). Zato je u narednom delu data analiza za merljiv deo slučajne promenljive  $T_b$ , odnosno za slučajnu promenljivu  $T_m$ . Vrednosti slučajne promenljive  $T_s$  su date u nastavku rada (Tačka 6.2 i Tabela 6.11). Naredna tabela (Tabela 6.6) sadrži osnovne deskriptivne mere uzorka vrednosti  $t_m$  za kategoriju putničkih automobila, posebno za svaki čas posmatranja. Od pokazatelja su dati: veličina uzorka  $n$  (engl. *Count*), aritmetička sredina (engl. *Mean*), standardna devijacija uzorka (engl. *StDev*), najveća vrednost (engl. *Maximum*) i najmanja vrednost (engl. *Minimum*) iz uzorka. Pored ovih vrednosti, dat je i prikaz vrednosti prvog kvartila (Q1), medijane (engl. *Median*) i trećeg kvartila (Q3). Kako su u uzorku uključene i vrednosti *outlier*, onda je u tabeli dat i pokazatelj o aritmetičkoj sredini koja obuhvata srednjih 90% vrednosti, odnosno odbacuje se 5% najvećih i 5% najmanjih vrednosti, (engl. *Trimmed Mean - TrMean*). U svim slučajevima je vrednost *TrMean* bila manja od vrednosti *Mean*. Deskriptivne mere su izračunate pomoću programa *Minitab 17*.

Tabela 6.6 Deskriptivne mere za vrednost parametra  $t_m$  sa outliers

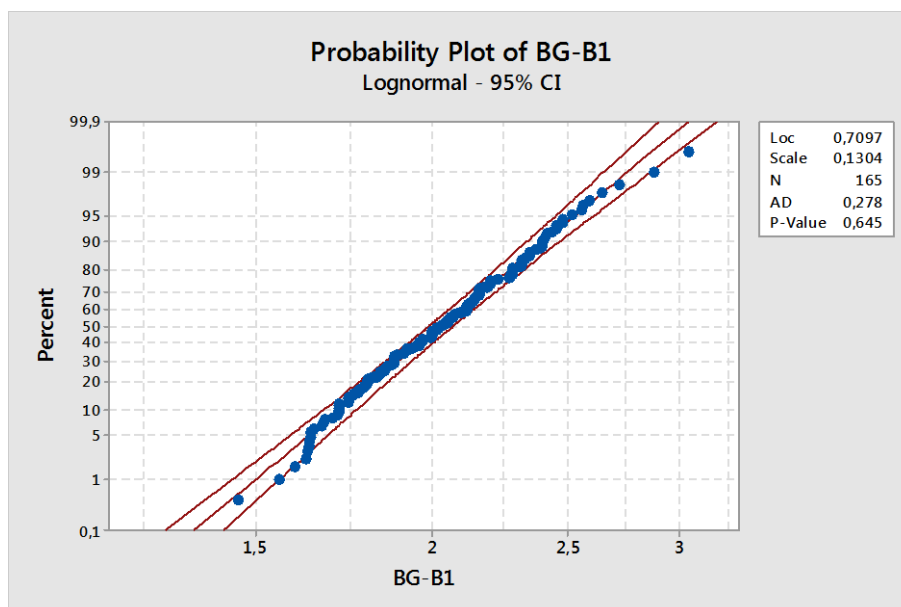
Variable	Count	Mean	TrMean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
BG-A	238	2,2979	2,2735	0,4282	1,503	2,0665	2,261	2,5038	4,738
DO-1	98	2,6035	2,5563	0,6777	1,269	2,081	2,4735	2,954	4,799
DO-2	152	2,1499	2,0972	0,5878	1,212	1,7653	2,068	2,4008	5,094
PA-1	128	2,8035	2,68	0,934	1,802	2,3135	2,5915	2,947	8,258
PA-2	117	2,723	2,5738	0,9821	1,716	2,2485	2,545	2,804	8,914
BG-B1	165	2,0509	2,0408	0,2716	1,458	1,852	2,04	2,2005	3,048
BG-B2	128	2,1679	2,1536	0,3323	1,584	1,88	2,156	2,3942	3,4
NS-1	160	1,8734	1,8603	0,3194	1,32	1,605	1,8405	2,1115	3,189
NS-2	116	1,7761	1,7408	0,3885	1,198	1,538	1,72	1,937	4,519

Naredna tabela (Tabela 6.7), daje podatke o raspodelama verovatnoća parametra  $t_m$ , od svih vrednosti uzorka za putničke automobile, uključujući vrednosti *outlier*. Ovaj parametar će kasnije biti korišćen kod validacije modela (Tačka 6.2). Kod sedam od devet raskrsnica, ne može se odbaciti hipoteza o slaganju sa lognormalnom raspodelom, jer je  $p$  vrednost veća od 0,05. Međutim, ovaj zaključak se uzima sa rezervom u slučaju raskrsnica BG-A, DO-2 i NS-2, zbog velikog uticaja *outlier*. U tri navedena slučaja je iz uzorka odbačeno po 1 ili 2 najveće i najmanje vrednosti, a ti uzorci su obeleženi sa \*.

Tabela 6.7 Raspodele verovatnoća za vrednosti parametra  $t_m$

Variable	N ukupno	N korigovano	% uzorka	$p$ -vrednost	Raspodela
BG-A*	238	234	98,32	0,054	*Lognormal
DO-1	98	98	100,00	0,237	Lognormal
DO-2*	152	150	98,68	0,188	*Lognormal
BG-B1	165	165	100,00	0,645	Lognormal
BG-B2	128	128	100,00	0,333	Lognormal
NS-1	160	160	100,00	0,051	Lognormal
NS-2*	116	114	98,28	0,195	*Lognormal

Uzorak vrednosti  $t_m$  na raskrsnici u Pančevu ima veliki broj *outlier*, zbog ometanja vozila u vršenju manevra levog skretanja, usled propuštanja pešaka i biciklista. Prema dva sata posmatranja odvijanja saobraćaja na ovoj raskrsnici, može se odbaciti hipoteza o slaganju sa lognormalnom raspodelom, jer je  $p$  vrednost manja od 0,05. Slaganje vrednosti parametra  $t_m$  sa lognormalnom raspodelom za raskrsnicu BG-B1 ( $p$  vrednost = 0,645) je dato na narednoj slici (Slika 6.8).



Slika 6.8 Slika 6.9 Slaganje vrednosti parametra  $t_m$  sa lognormalnom raspodelom za raskrsnicu BG-B1

#### 6.1.4. Analiza vrednosti slučajne promenljive $T_h$

Sledeća tabela (Tabela 6.8) sadrži osnovne deskriptivne mere uzorka vrednosti  $t_h$  za sva vozila, posebno za svaki čas posmatranja. Od pokazatelja su dati: veličina uzorka  $n$  (engl. *Count*), aritmetička sredina (engl. *Mean*), standardna devijacija uzorka (engl. *StDev*), najveća vrednost (engl. *Maximum*) i najmanja vrednost (engl. *Minimum*) iz uzorka. Pored ovih vrednosti, dat je i prikaz vrednosti prvog kvartila (Q1), medijane (engl. *Median*) i trećeg kvartila (Q3). Deskriptivne mere su izračunate pomoću programa *Minitab 17*.

Tabela 6.8 Deskriptivne mere za vrednost parametra  $t_h$  sa outliers

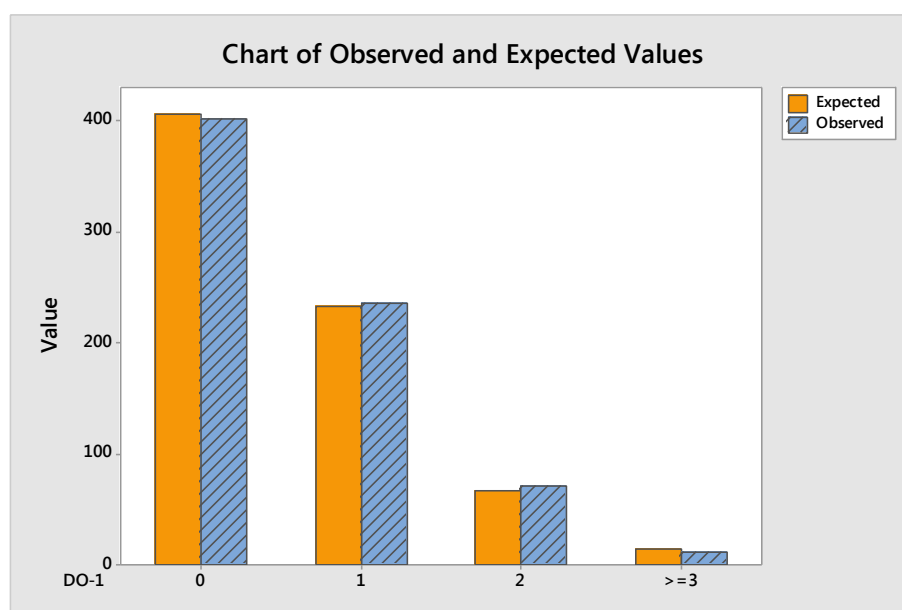
Variable	Count	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
BG-A	413	8,668	10,327	0,163	2,521	4,76	10,836	102,431
DO-1	506	7,075	7,516	0,641	2,318	4,038	9,475	66,468
DO-2	613	5,878	7,092	0,125	1,831	3,036	6,573	52,548
PA-1	442	8,139	8,954	0,738	2,38	4,281	10,887	56,183
PA-2	451	7,975	8,071	0,697	2,451	4,711	10,317	56,183
BG-B1	331	10,869	14,578	0,322	2,039	3,847	13,917	81,307
BG-B2	339	10,458	17,392	0,322	1,921	3,046	9,021	112,449
NS-1	531	6,844	10,37	0,488	1,828	2,721	7,586	76,919
NS-2	480	7,498	11,777	0,631	1,96	3,2	7,13	79,088

Prema *Vukadinović i Popović (Vukadinović & Popović, 2004)*, u radu *Birulja (Бируља, 1959)*, navodi se da se u slučaju većeg broja vozila od 400 [voz/h], slaganje sa Poasonovom raspodelom bolje, ukoliko se za vremensku jedinicu posmatranja uzme interval od 5 sekundi. Vrednosti sa intervalima od 5 [s] su obrađene u programu *Minitab 17*, a vrednosti sa intervalima od 3 [s] su obrađene u programu *Statistica*. U tabeli, vrednost *N* predstavlja broj analiziranih intervala (720 za interval od 5 sekundi, 1200 interval od 3 sekunde), vrednost *DF* predstavlja broj stepeni slobode (engl. *degrees of freedom*), a *Chi-Sq* predstavlja računsku vrednost *Hi kvadrat* testa.

Tabela 6.9 Raspodele verovatnoća za vrednosti parametra  $t_h$

Program	Variable	Broj	N	DF	Chi-Sq	p-vrednost
Minitab	BG-A	612	720	3	3,41879	0,331
Minitab	DO-1	413	720	2	0,865406	0,649
Minitab	DO-2	506	720	3	5,18497	0,159
Minitab	PA-1	442	720	2	3,01841	0,221
Minitab	PA-2	451	720	2	1,44497	0,486
Statistica	BG-B1	331	1200	1	5,86751	0,01542
Statistica	BG-B2	339	1200	1	13,65806	0,00022
Statistica	NS-1	531	1200	1	0,21943	0,63948
Statistica	NS-2	480	1200	1	0,38302	0,53599

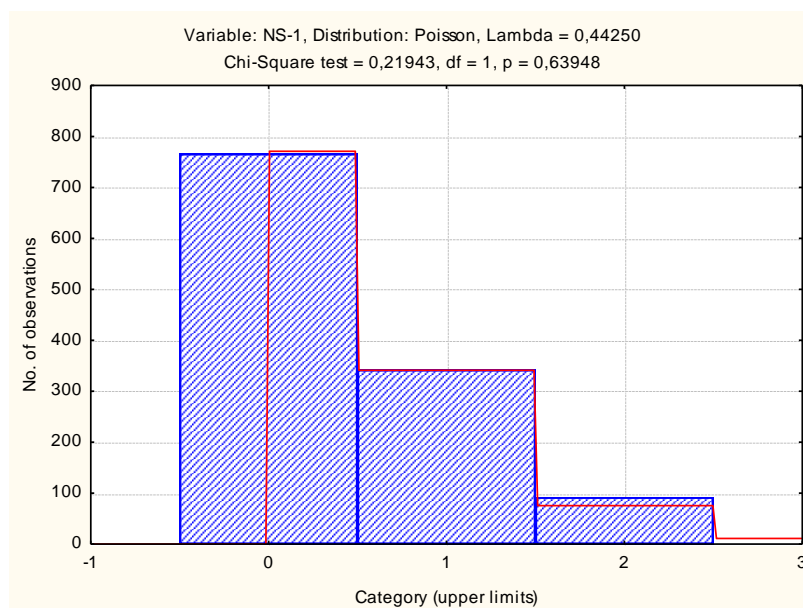
Kod sedam od devet raskrsnica, ne može se odbaciti hipoteza o slaganju sa Poasonovom raspodelom, jer je *p* vrednost veća od 0,05. U slučaju raskrsnice BG-B, na osnovu posmatranja od dva časa, može se odbaciti hipoteza o slaganju sa Poasonovom raspodelom, jer je *p* vrednost manja od 0,05. Na sledećoj slici (Slika 6.10) je prikazano slaganje dolazaka vozila na raskrsnicu u Doboju (DO-1, prvi čas) sa Poasonovom raspodelom verovatnoća, iz programa *Minitab*.



Slika 6.10 Slaganje dolazaka vozila na raskrsnicu DO-1 sa Poasonovom raspodelom verovatnoća (*Minitab 17*)

U toku pravo na raskrsnici BG-B, putnički automobili (PA), čine samo 63,44% (prvi sat), odnosno 62,83% toka vozila (drugi sat), što znači da značaj deo toka čine komercijalna vozila, koja zbog svojih vozno-dinamičkih karakteristika prouzrokuju stvaranje kolona.

Na sledećoj slici (Slika 6.10) je prikazano slaganje dolazaka vozila na raskrsnicu u Novom Sadu (NS-1, prvi čas) sa Poasonovom raspodelom verovatnoća, iz programa *Statistica*.



Slika 6.11 Slaganje dolazaka vozila na raskrsnicu NS-1 sa Poasonovom raspodelom verovatnoća (*Statistica*)

## 6.2. Validacija modela

Validacija modela je urađena na 3 gradske raskrsnice u ukupnom trajanju od 5h. Od toga, dve su u Beogradu (BG-A i BG-B, broj stanovnika 1.700.000) i jedna u Novom Sadu (NS, broj stanovnika 300.000). Sve raskrsnice su standardne nesignalisane, različitih geometrijskih karakteristika. Vozila koja skreću levo na raskrsnicama BG nisu opterećenja propuštanjem pešaka, a na raskrsnici NS su beznačajno opterećena.

U tabeli (Tabela 6.10) su dati podaci o tokovima vozila u kretanju pravo sa suprotnog prilaza u odnosu na prilaz sa koga vozila vrše manevar levog skretanja: period merenja (Period), broj vozila u kretanju pravo sa prioriternog prilaza na čas, ( $n$ , voz/h) i broj vozila u kretanju pravo sa prioriternog prilaza u sekundi ( $\lambda$ , voz/s).

Pored ovih podataka, dati su podaci o toku vozila, koja vrše manevar levog skretanja: broj vozila u skretanju levo sa prioriternog prilaza ( $m$ , voz/h), broj putničkih automobila u skretanju levo sa prioriternog prilaza ( $m_l$ ), procenat putničkih automobila u toku vozila u skretanju levo sa prioriternog prilaza ( $100 \cdot m_l / m$ ) izražen u %.

Tabela 6.10 Osnovni podaci o tokovima vozila na izabranim raskrsnicama

Oznaka raskrsnice	Period (h)	n	$\lambda$	m	$m_l$	$100 \cdot m_l / m$ [%]
BG-A	16:00-17:00	612	0,1700	243	238	97,94
BG-B1	14:00-15:00	331	0,0919	180	165	91,67
BG-B2	15:00-16:00	339	0,0941	143	128	89,51
NS-1	08:00-09:00	531	0,1475	162	160	98,77
NS-2	09:00-10:00	480	0,1333	120	116	96,67

\*Izvor: Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., Jović, S. (2018). Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.

Prioritetni tokovi su po prirodi heterogeni Poasonovi tokovi. Osim putničkih vozila, u prioritetnom toku su prisutna i komercijalna vozila (autobusi i teretna vozila). Na gradskim raskrsnicama u levom skretanju su dominantni tokovi putničkih vozila (približno svi preko 90%). Za svaku raskrsnicu su statistički ustanovljena srednja vremena za putničke automobile u skretanju levo sa prioritetnog prilaza: vremena opsluge  $t_{sw}$ , vremena posle vozila  $t_a$  i vremena manevra  $t_m$ .

Primenom obrasca (4.53), metodom matematičke interpolacije je proračunato bezbednosno vreme (engl. *safety time*)  $t_s$ . Rezultati su prikazani u tabeli (Tabela 6.11):

Tabela 6.11 Statističke srednje vrednosti objektivnih vremena i proračunato subjektivno vreme – *safety time*, za raskrsnice u validaciji modela

Oznaka raskrsnice	Period (h)	$t_{sw}$	$t_a$	$t_m$	$t_s$
BG-A	16:00-17:00	2,511	1,072	2,298	0,862
BG-B1	14:00-15:00	1,798	1,277	2,051	1,799
BG-B2	15:00-16:00	1,905	1,250	2,168	1,805
NS-1	08:00-09:00	2,063	1,117	1,873	1,199
NS-2	09:00-10:00	2,038	1,273	1,776	1,316

Napomena: broj pored oznake raskrsnice označava sat merenja.

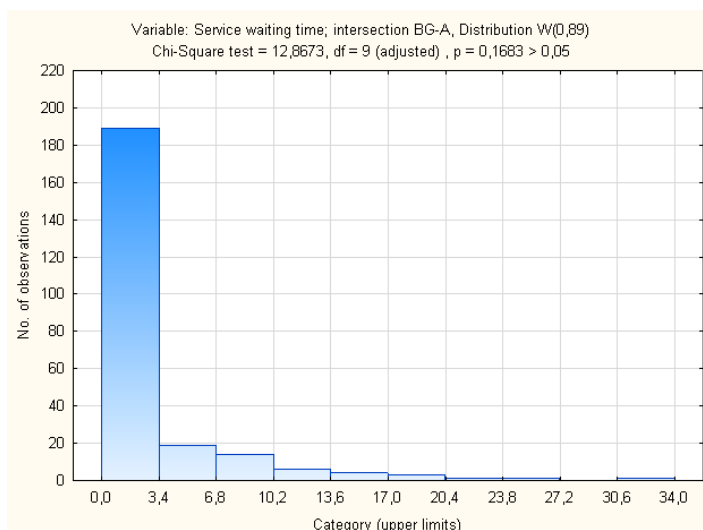
\*Izvor: Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., Jović, S. (2018). Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.

Vreme opsluge (engl. *service waiting time*) ima karakterističnu raspodelu: u svim slučajevima ima jednoparametarsku Vejbulovu raspodelu (engl. *Weibul*) sa gustom raspodele (6.1), zbog većeg broja vozila koja nemaju zadržavanje na raskrsnici, pre izvođenja manevra levog skretanja ili uzastopnog ulaska na servis iz reda.

$$f(x) = at^{a-1} e^{-t^2} \quad (6.1)$$

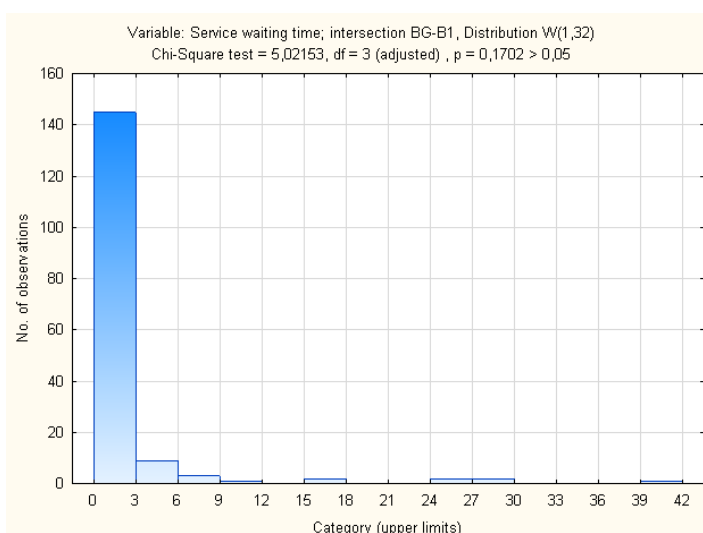
Primeri verifikacije Vejbulove raspodele vremena čekanja u opsluzi za raskrsnice BG-A i BG-B1 (prvi sat) su dati na slikama (Slika 6.12 i Slika 6.13), a parametri verifikacije su dati u tabeli (Tabela 6.12).

## Prikaz rezultata istraživanja i testiranje modela



Slika 6.12 Verifikacija Weibulove raspodele za raskrnicu BG-A

\*Izvor: Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., Jović, S. (2018). Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.



Slika 6.13 Verifikacija Weibulove raspodele za raskrnicu BG-B1

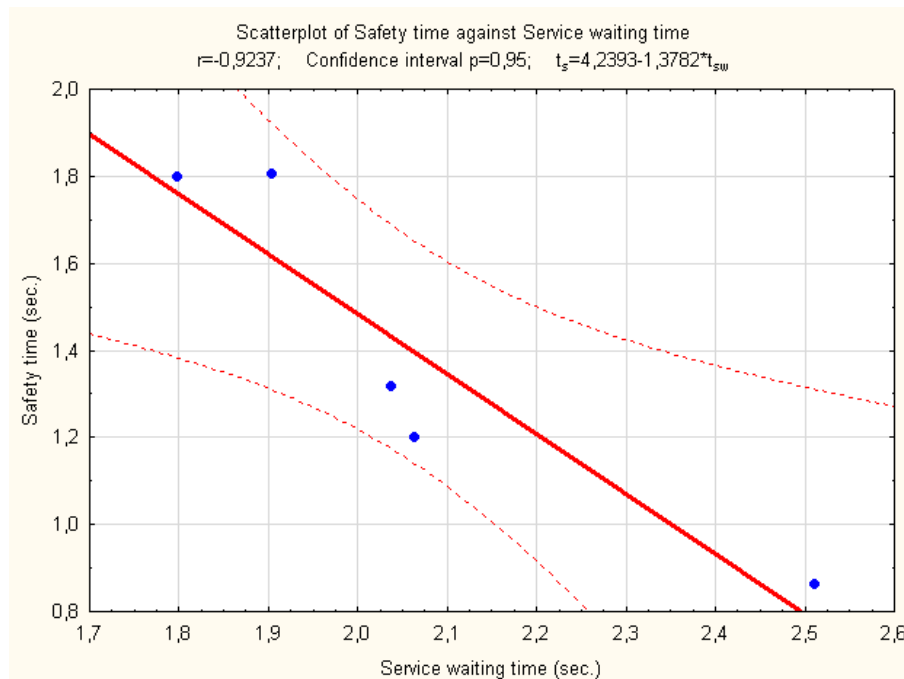
\*Izvor: Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., Jović, S. (2018). Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.

Tabela 6.12 Parametri verifikacije Weibulove raspodele sa rezultatima  $\chi^2$  testa

Oznaka raskrsnice	Raspodela	Parametar a	$\chi^2$	df	P
BG-A	Weibull	0,89	12.8673	9	0.1683
BG-B1	Weibull	1,32	5.0125	3	0.1702
BG-B2	Weibull	1,28	4.3850	3	0.2227
NS-1	Weibull	1,19	4.7599	3	0,1902
NS-2	Weibull	1.23	6,5161	3	0,0890

\*Izvor: Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., Jović, S. (2018). Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.

Na slici (Slika 6.14) su dati koeficijenti korelacije i jednačine linearne regresije proračunatog bezbednosnog vremena (engl. *safety time*)  $t_s$  i vremena u opsluzi vozila u vršenju manevra levog skretanja (engl. *service waiting time*)  $t_{sw}$ .



Slika 6.14 Koeficijent korelacije i jednačina linearne regresije bezbednosnog vremena (*safety time*) i vremena čekanja u opsluzi vozila u skretanju levo (*service waiting time*) za 5 raskrsnica

\*Izvor: Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., Jović, S. (2018). *Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersections. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.*

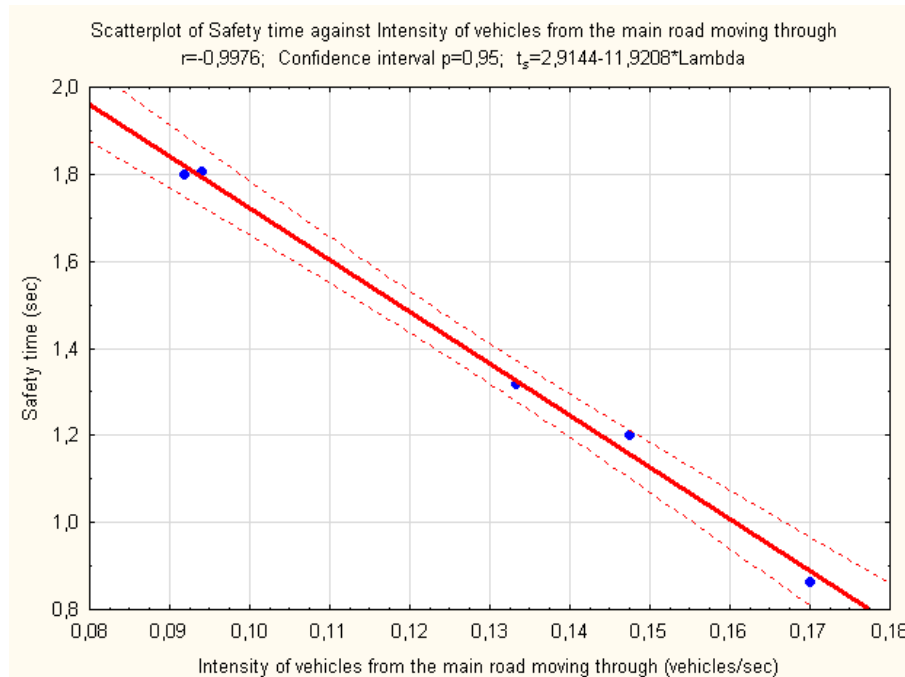
Negativna vrednost visokog koeficijenta korelacije ( $r = -0,9237$ ) ukazuje na specifično ponašanje vozača: što je vreme čekanja na izvođenje manevra levog skretanja duže, onda će bezbednosno vreme biti kraće. Minimalna vrednost kritičnog intervala je sadržana u slobodnom članu jednačine linearne regresije  $a$ , čija vrednost iznosi je 4,2393 (sec). Ova vrednost je bliska vrednosti minimalnog kritičnog intervala deklarisanog od strane HCM (2000, 2010) od 4,10 [s].

Količnik  $k_1$  odnosa apsolutne vrednosti koeficijenta uz promenljivu  $t_{sw}$  (apsolutna vrednost 1,3782) i slobodnog člana (vrednost 4,2393) jednak je  $k_1 = 0,3251$ . On pokazuje koji deo kritičnog intervala vozači pre izvođenja manevra subjektivno rezervišu za bezbednosno vreme. Očigledno je da bezbednosno vreme ima značajno učešće od 32,51% ili skoro celu trećinu kritičnog intervala  $t_c$ .

Na slici (Slika 6.15) su dati koeficijenti korelacije i jednačine linearne regresije proračunatog bezbednosnog vremena (engl. *safety time*)  $t_s$  i broja vozila u kretanju pravo sa prioriternog prilaza u sekundi (engl. *intensity of all vehicles from the main road moving through per second*) [ $\lambda$ , vehicle/sec].



Negativna vrednost izuzetno visokog koeficijenta korelacije ( $r=-0.9976$ ) ukazuje na očekivanu intenciju, odnosno pri gustom prioritetnom toku, vozači su spremni da rizikuju više i da prihvate kraće intervale za obavljanje manevra levog skretanja na račun skraćanja subjektivnog vremena, odnosno bezbednosnog vremena. Pritom, dolazi do poremećaja zbog usporavanja vozila prioritetnog toka, koja na taj način povećavaju vrednost bezbednosnog vremena.



Slika 6.15 Koeficijent korelacije i jednačina linearne regresije bezbednosnog vremena (safety time) i toka vozila u kretanju pravo sa suprotnog prilaza (intensity of vehicles from the main road moving through) za 5 raskrsnica

\*Izvor: Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., Jović, S. (2018). Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.

Bezbednosno vreme ima minimalnu vrednost  $t_s=0$  ako je  $\lambda$  jednaka količniku  $k_2$  koji se dobija iz odnosa slobodnog koeficijenta jednačine linearne regresije (vrednost 2,9144) i apsolutne vrednosti koeficijenta uz promenljivu  $\lambda$  (apsolutna vrednost 11,9208). Ova vrednost je jednaka  $k_2=0,2445$  i predstavlja intenzitet toka  $\lambda$  [voz/s] ili  $k_2=880,1288$  [voz/h], koji maksimalno iscrpljuje bezbednosno vreme i onemogućuje izvođenje manevra levog skretanja.

Dobijena vrednost je saglasna sa maksimalnim intenzitetom toka, koji se dobija iz HCM (2000, 2010) vrednosti minimalnog kritičnog intervala  $t_c=4.10$  sekundi, na osnovu kojeg se dobija maksimalan intenzitet prioritetnog toka koji omogućuje izvođenje manevra levog skretanja  $\lambda_{max}=3600/t_c=878,0487$  [voz/h], što je izuzetno blisko vrednosti količnika  $k_2$ .

U narednom delu su prikazani rezultati za raskrsnice, koje su bile obrađene pre validacije modela, a jedna od njih (BG-A) je korišćena i za validaciju modela.

Raskrsnica u Doboju (DO-1 i DO-2) ima veliki uticaj komercijalnih vozila, jer je procenat putničkih automobila, koji vrše manevar levog skretanja 75,97% i 79,17%, od ukupnog broja vozila, koja su vršila navedeni manevar. Istovremeno, u toku pravo sa suprotnog prioritetnog prilaza, procenat putničkih automobila iznosi 79,90% i 79,05%. Zbog velikog uticaja komercijalnih vozila, ovde se mogao očekivati veći kritični interval, što je i prikazano u sledećoj tabeli (Tabela 6.13).

Na raskrsnici u Pančevu (PA-1 i PA-2), zabeleženi su tokovi pešaka i biciklista, koji su manjim delom ometali vozila u levom skretanju. Navedeni slučajevi su rezultovali većim vremenom manevra, u odnosu na uobičajeno, pa su te vrednosti manevra zabeležene kao *outlier* (Tabela 6.6 i Slika 6.7).

Kada se pogledaju izračunate vrednosti kritičnog intervala  $t_c$ , iz rezultata istraživanja se može videti da su samo po jedno vozilo, po satu istraživanja, uspele da izvrše manevar levog skretanja u intervalu manjem od kritičnog intervala, što pokazuje dobro slaganje predloženog modela sa realnim stanjem saobraćajnog toka.

Tabela 6.13 Statističke srednje vrednosti objektivnih vremena i proračunato subjektivno vreme – safety time, za raskrsnice pre validacije modela

Oznaka raskrsnice	Period (h)	$t_{sw}$	$t_a$	$t_b$	$t_m$	$t_s$	$t_c$	Broj vozila ( $<t_c$ )
BG-A	16:00-17:00	2,511	1,072	3,160	2,298	0,862	4,232	0
DO-1	8:00-9:00	3,373	1,201	4,920	2,6035	2,3165	6,120	2 (1*)
DO-2	15:00-16:00	3,314	1,199	4,156	2,1499	2,0061	5,356	3 (2*)
PA-1	15:00-16:00	1,931	1,08	3,471	2,8035	0,6675	4,551	1
PA-2	16:00-17:00	2,087	1,167	3,468	2,723	0,745	4,635	1

\* Vozila koja se mogu zanemariti, jer nisu na bezbedan način vršila manevar levog skretanja iz posebne trake i uzrokovala su usporavanje/zaustavljanje vozila iz toka pravo sa suprotnog prioritetnog prilaza.

\*Izvor: Deretić, N., Teorijske osnove doktorske disertacije, (2016)

## 7. Zaključna razmatranja i pravci daljih istraživanja

U okviru disertacije je prikazan postupak na osnovu koga je analitičkim putem moguće odrediti kritični interval sleđenja  $t_c$ , a potom je model testiran za sporedni manevar levog skretanja sa prioriternog prilaza nesignalisane raskrsnice, na osnovu rezultata istraživanja u realnom saobraćajnom toku. Manevar levog skretanja sa prioriternog prilaza je izabran za testiranje kao najjednostavniji sporedni manevar, jer se preostali sporedni manevri odnose na manevre sa sporednih prilaza. Ovaj parametar se proračunava indirektno, interpolacijom, na osnovu srednjih vrednosti slučajnih promenljivih, koje predstavljaju vozila u levom skretanju ( $T_{sw}$ ,  $T_a$  i  $T_b$ ) i vozila u kretanju pravo sa suprotnog prioriternog prilaza ( $T_b$ ).

U disertaciji je prikazano potpuno raščlanjivanje slučajne promenljive  $T_c$  do sume elementarnih slučajnih promenljivih, koje mogu biti objektivne ili subjektivne. Objektivne slučajne promenljive se mogu izmeriti, jer su poznati počeci i krajevi njihovih intervala. Sa druge strane, subjektivna slučajna promenljiva se ne može izmeriti, ali se diferencijacijom subjektivni status može konvertovati u status objektivnosti. Predloženi model se uz određena prilagođavanja može primeniti i za sve druge sporedne manevre na svim tipovima TWSC nesignalisanih raskrsnica, bez obzira na geometrijske karakteristike, broj saobraćajnih traka na prilazima, itd., što daje dalje pravce istraživanja ove teme.

Pored osnovnih kriterijuma koji se odnose na geometrijske karakteristike standardnih nesignalisanih raskrsnica, za biranje raskrsnica koje su ušle u uzorak, veoma važan kriterijum je bio da su tokovi vozila na glavnim i sporednim prilazima intenzivni. Navedeni kriterijum je bio od posebne važnosti, jer se tada stvara veći broj kritičnih intervala, a na suprotnom prioriternom prilazu se stvara red čekanja, što je omogućilo dobijanje realnih vrednosti i kasniju validaciju modela. Sva sprovedena istraživanja na standardnim nesignalisanim raskrsnicama su se odnosila na realni saobraćajni tok. Ograničenja modela su data u kriterijumima za izbor raskrsnica, na kojima je vršeno istraživanje i kasnija validacija modela.

Osim za homogene tokove putničkih automobila, model se može primeniti i za heterogene saobraćajne tokove. U slučaju kada u strukturi saobraćajnog toka postoje komercijalna vozila, sporedni manevar će biti veći zbog dužeg vremena prolaska vozila  $t_v$ . Ukoliko komercijalna vozila vrše sporedni manevar njihovo srednje vreme reakcije  $t_r$  ili srednje vreme potrebno za izvođenje manevra  $t_m$  će se povećati, što će dovesti do veće vrednosti kritičnog intervala sleđenja  $t_c$ .

Vrednost kritičnog intervala za iste strukture saobraćajnog toka i različite intenzitete prioritetnog toka treba da bude isti ili veoma sličan. Proračunom kritičnog intervala sleđenja prema predloženom modelu stvaraju se uslovi za precizniji proračun kapaciteta prioritetnih raskrsnica.

U svim izdanjima priručnika *HCM* od 1985. godine je naznačeno da se kritični interval sleđenja dobija iz merenja na raskrsnicama. Do sada, u pretraženoj literaturi nije naveden ili postavljen model, zasnovan na verovatnoći koji bi povezao prioritetni tok i vreme čekanja u opsluzi vozila sporednog toka. Model, koji je predložen u ovoj disertaciji, pruža teorijsku podlogu za vrednost kritičnog intervala i daje njegovu potpunu dekompoziciju. U predloženom modelu, vozilo se ne posmatra kao materijalna tačka, što doprinosi boljoj primeni na realne saobraćajne tokove.

## Literatura

- Adams, W. (1936). Road Traffic Considered as a Random Series. *Journal of the ICE*, 121-130.
- Ashwort, R. (1968). A note on the selection of gap acceptance criteria for traffic simulation studies. *Transportation Research* 2, 171-175.
- Bogdanović, V., Papić, Z., Ruškić, N., & Leković, M. (2009). Definisanje parametara potrebnih za analizu sudara na prioritetnim raskrsnicama. *VII Simpozijum o saobraćajno-tehničkom veštačenju i proceni štete*, (str. 369-381). Vrnjačka Banja.
- Bogdanović, V., Papić, Ž., Ruškić, N., & Jeftić, N. (2011). Karakteristike brzina na signalisanim raskrižjima. *Suvremeni promet*, 31 (3-4), pp. 196-200.
- Bogdanović, V., Ruškić, N., Kulović, M., & Han, I. (2013). Toward a Capacity Analysis Procedure for Nonstandard Two-Way Stop-Controlled Intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2395, pp. 132-138.
- Bogdanović, V., Ruškić, N., Papić, Z., & Saulić, N. (2013). Analiza prioriteta kretanja vozila na nestandardnoj nesignalisanoj raskrsnici. *Savetovanje sa međunarodnim učešćem na temu Saobraćajne nezgode* (str. 119-128). Zlatibor: Agencija Expert.
- Brilon, W., Koenig, R., & Troutbeck, R. J. (1999). Useful estimation procedures for critical gaps. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33, 161-186.
- Catchpole, E. A., & Plank, A. W. (1986). The Capacity of a Priority Intersection. *Transportation Research Board*, 20B (6), pp. 441-456.
- Croarkin, C., & Tobias, P. (2002). *Engineering statistics handbook*. NIST/Sematech.
- Daganzo, C. (1977). Traffic Delay at Unsignalized Intersections: Clarification of Some Issues. *Transportation Science*, Vol. 11.
- Daganzo, C. (1981). Estimation of gap acceptance parameters within and across the population from direct roadside observation. *Transportation research* 15b, 1-15.
- Dorđević, T., & Bogdanović, V. (2002). *Kapacitet putnih i uličnih ukrštanja prioritetne raskrsnice (novi koncept) – monografija*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka.
- Gerlough, D. L. (1955). *Use of Poisson Distribution in Highway Traffic*. Saugatuck, CT: The ENO foundation for highway traffic control.
- Goodwin, L. C. (2002). *Weather Impacts on Arterial Traffic Flow*. Fairview Park: Mitretek systems inc.

- Greenshields B. D., (1935). A study of highway capacity. *Proceedings Highway Research Record, Washington*, Vol. 14, pp. 448-477.
- Greenshields, B. D., Thompson, J. T., Dickinson, H. C., & Swinton, R. S. (1934). The photographic method of studying traffic behavior. *Highway Research Board Proceedings*, 13 (1), pp. 382-399.
- Greenshields, B. D., Schapiro, D., & Ericksen, E. L. (1947). *Traffic Performance at Urban Intersections*. Bureau of Highway Traffic. New Haven, CT.: Yale University Press.
- Haight, F. A. (1963). *Mathematical theories of traffic flow*. New York, NY: Academic Press, Incorporated.
- Harders, J. (1968). *Die Leistungsfähigkeit nicht signalregelter städtischer Verkehrsknoten [Capacity of unsignalized urban intersections]*. Bonn: Bundesminister für Verkehr.
- Harders, J. (1976). Grenz- und Folgezeitlücken als Grundlage für die Leistungsfähigkeit von Landstrassen (Critical Gaps and Move-Up Times as the Basis of Capacity Calculations for Rural Roads). *Schriftenreihe Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, Vol. 216.
- Hawkes, A. G. (1966). Delay at traffic intersections. *Journal of the Statistics Society B*, 28, 202-212.
- HCM. (1965). *Highway Capacity Manual*. Washington D.C.: Transportation Research Board of The National Research Council.
- HCM. (1985). *Highway Capacity Manual*. Washington D.C.: Transportation Research Board of The National Research Council.
- HCM. (1994). *Highway Capacity Manual*. Washington D.C.: Transportation Research Board of The National Research Council.
- HCM. (2000). *Highway Capacity Manual*. Washington D.C.: Transportation Research Board of The National Research Council.
- HCM. (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington D.C.: Transportation Research Board of The National Research Council.
- Hebert, J. (1963). A Study of Four-Way Stop Intersection Capacities. *Highway Research Record*, 27, 130-147.
- Hewitt, R. (1983). Measuring critical gap. *Transportation science* 17(1), 87-109.
- Hewitt, R. (1985). A comparison between some methods of measuring critical gap. *Traffic Engineering and Control*, 13-22.
- Hewitt, R. (1993). Analysis of Critical Gaps by Probit Analysis. *Strassenverkehrstechnik*, 142-148.
- Ivanović, B., Garunović, N., & Tomanović, Z. (2014). Research on the length of passing distance in the real traffic flow. *Građevinar*, 66 (9), pp. 823-830.
- Katanić, J., Anđus, V., & Maletin, M. (1983). *Projektovanje puteva*. Beograd: IRO "Građevinska knjiga".
- Kinzer, J. (1933). *Application of The Theory of Probability to Problems of Highway Traffic*. Brooklin: Polytechnic Institute of Brooklyn.
- Kittelson, W. K., & Vandehey, M. A. (1991). Delay effects on driver gap acceptance characteristics at two-way stop-controlled intersections. *Transportation Research Record*, 1320, 154-159.
- Kremser, H. (1962). Ein Zusammengesetztes Wartezeitproblem Bei Poissonschen Verkehrsströmen (A Complex Problem of Delay with Poisson-Distributed Traffic Flows). *Osterreichisches Ingenieur-Archiv*, Volume 16.

- Kremser, H. (1964). Wartezeiten Und Warteschlangen Bei Einfadlung Eines Poissonprozesses in Einen Anderen Solchen Prozess (Delays and Queues with One Poisson Process Merging into Another One). *Österreichisches Ingenieur-Archiv*, Volume 18.
- Kuzović, Lj. (1987). *Teorija saobraćajnog toka*. Beograd: IRO Građevinska knjiga.
- Kuzović, Lj. (1994). *Vrednovanje u upravljanju razvojem i eksploatacijom putne mreže*. Beograd: Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- Kuzović, Lj. (2000). *Kapacitet i nivo usluge drumskih saobraćajnica*. Beograd: Saobraćajni fakultet.
- Kuzović, Lj., & Bogdanović, V. (2010). *Teorija saobraćajnog toka*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu.
- Kyte, M., Tian, Z., Mir, Z., Hameedmansoor, Z., Kittelson, W., Vandehey, M., i drugi. (1996). *Capacity and Level of Service at Unsignalized Intersections*. Project 3-46: Final Report for National Cooperative Highway Research Program.
- Luttinen, T. R. (2003). *Capacity at Unsignalized Intersections (No. 3)*. Lahti: TL Consulting Engineers, Ltd.
- Mann, P. S. (2009). *Uvod u statistiku*. Beograd: Centar za izdavačku delatnost Ekonomskog fakulteta.
- McDonald, M., & Armitage, D. J. (1978). The Capacity of Roundabouts. *Traffic Engineering & Control*, Vol. 19(10), pp. 447-450.
- Miller, A. (1972). Nine estimators for gap-acceptance parameters. *Proceedings of the International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation*. Berkeley, California: Elsevier Amsterdam.
- Miller, A., & Pretty, R. (1968). Overtaking on two-lane rural roads. *Proceedings of Australian Road Research Board*, (str. 582-591).
- Normann, O. K. (1942). Results of Highway Capacity Studies. *Public Roads*, vol. 23, No. 4, 57-81.
- Plank, A. W., & Catchpole, E. A. (1984). A General Capacity Formula for an Uncontrolled Intersection. *Traffic Engineering Control*, 25(6), pp. 327-329.
- Poeschl, F. J. (1983). Die Nicht Signalgesteuerte Nebenstrassenzufahrt Als Verallgemeinertes M/G/ 1- Warteschlangensystem (The Unsignalized Minor Street Entry as a Generalized M/G/1 Queueing System). *Zeitschrift für Operations Research*, Vol. 27 B.
- PSS. (2016). *Pravilnik o saobraćajnoj signalizaciji*. Beograd: Ministarstvo građevinarstva, saobraćaja i infrastrukture.
- Raff, M., & Hart, J. (1950). *A volume warrant for urban stop signs*. Saugatuck, Connecticut: Eno foundation for highway traffic control.
- Ramsey, J. B., & Routledge, I. W. (1973). A New Approach to the Analysis of Gap Acceptance Times. *Traffic Engineering Control*, 15(7), pp. 353-357.
- RRL. (1965). *"Research on Road Traffic"*, London, 1965. London: Department of Scientific and Industrial Research.
- Ruškić, N. (2013). *Doktorska disertacija: Model proračuna kapaciteta nestandardnih nesignalisanih raskrsnica*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka.
- Schuhl, A. (1955). *The Probability Theory Applied to Distribution of Vehicles on Two-Lane Highways*. Saugatuck, CT: The ENO foundation for highway traffic control.
- Siegloch, W. (1973). Die leistungsermittlung an knotenpunkten ohne lichtsignalanlagen (Capacity calculations at unsignalized intersections). *Series Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*.

- Solberg, P., & Oppenlander, J. (1966). Lag and Headway Acceptances at Stop-Controlled Intersections. *Highway Research Record* 118, 48-67.
- Solberg, P., & Oppenlander, J. C. (1964). *Lag and gap acceptances at stop-controlled intersections (No. 26, Project: C-36-17BB)*. Purdue university Lafayette Indiana: Joint Highway Research Project.
- Strickland, I. (1947). A study of Merging Vehicular Traffic Movements. *Bureau of Highway Traffic*, 81-85.
- Tanackov, I., Deretić, N., Bogdanović, V., Ruškić, N., & Jović, S. (2018). Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Article in Press.
- Tanner, J. (1962). A Theoretical Analysis of Delays at an Uncontrolled Intersection. *Biometrika*, 163-170.
- Tian, Z., Vandehey, M., Robinson, B. W., Kittelson, W., Kyte, M., Troutbeck, R., i drugi. (1999). Implementing the maximum likelihood methodology to measure a driver's critical gap. *Transportation Research Part A*, 187-197.
- Troutbeck, R. J., (1975). A Review of the Ramsey-Routledge Method for Gap Acceptance Times. *Traffic Engineering & Control*, 16(9), pp. 373-375.
- Troutbeck, R. J., (1986). Average Delay at an Unsignalized Intersection with Two Major Streams Each Having a Dichotomized Headway Distribution. *Transportation Science*, 20(4), pp. 272-286.
- Troutbeck, R. J., (1988). *Current and Future Australian Practices for the Design of Unsignalized Intersections*. In: *Intersections without Traffic Signals (Ed.: W. Brilon)*. Berlin: Springer Publications.
- Troutbeck, R. J., (1992). *Estimating the critical acceptance gap from traffic movements*. Physical infrastructure centre. Brisbane: Queensland University of Technology, Research Report 92-5.
- Troutbeck, R. J., & Brilon, W. (2001). *Traffic flow theory, A state-of-the-art Report, Chapter 8 Unsignalized Intersections*. (AHB45): Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics.
- Vukadinović, S. (1967). Poasonova raspodela verovatnoća u primeni na probleme saobraćaja. *Saobraćaj, Tehnika*, Broj 1, 146-148.
- Vukadinović, S. (1988). *Masovno opsluživanje* (Треће допуњено издање izd.). Beograd: Naučna knjiga.
- Vukadinović, S., & Popović, J. (2004). *Matematička statistika*. Beograd: Saobraćajni fakultet.
- Wegmann, H. (1991). *A General Capacity Formula for Unsignalized Intersections*. In: *Intersections without Traffic Signals II (Ed.: W. Brilon)*. Berlin: Springer Publications.
- Weiss, G. H. (1963). An Analysis of Pedestrian Queueing. *JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards-B. Mathematics and Mathematical Physics*, 67(4), 229-243.
- Wu, N. (2006). A new model for estimating critical gap and its distribution at unsignalized intersections based on the equilibrium of probabilities. *Proceeding of the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality*. Yokohama, Japan.
- XLSTAT. (2014). *XLSTAT-software, version 2014.5*. Paris, France: Adinsoft, S. A. R. L.



- Yeo, G., & Weesakul, B. (1964). Delays to road traffic at an intersection. *Journal of Applied Probability*, 1, 297-310.
- Бируља, А. К. (1959). Учет неравномерној интензивности движеніја при проєктированији автомобилних дорог. *Известија вузов, Строительство и архитектура, Москва*, Но. 2(8).