

# Utjecaj vremena slijeda prometnih tokova na propusnu moć i sigurnost prometa na raskrižju ulica Slavonska avenija i 13 Vrbik u Gradu Zagrebu

---

Pečet, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:003097>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

# DIPLOMSKI RAD

**Matija Pečet, mag. ing. mech.**

Zagreb, 2020.

Zagreb, 10. travnja 2019.

Zavod:           Zavod za cestovni promet  
Predmet:        Sigurnost cestovnog i gradskog prometa I

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 5146


Pristupnik:    Matija Pečet (0035195277)  
Studij:        Promet  
Smjer:         Cestovni promet

Zadatak:       **Utjecaj vremena slijeda prometnih tokova na propusnu moć i sigurnost prometa na raskrižju ulica Slavonska avenija i 13 Vrbik u Gradu Zagrebu**

### Opis zadatka:

Na raskrižjima na kojima se promet upravlja uz pomoć semafora, važan utjecaj na njegovu prometnu funkcionalnost, definiranje kapaciteta kao i ostale mjera efikasnosti, ima način rada semafora. Način i mogućnost pražnjenja prometnog toka koji se zaustavlja za vrijeme crvenog svjetla, zbog čega dolazi do akumuliranja vozila na stop crti, a s time i učinkovito odvijanje prometa značajno ovisi o duljini ciklusa odnosno o broju i duljini trajanja zelene faze kao i njihovoe progresije. Način odlaska vozila sa stop crte u trenutku pojave zelenog svjetla na semaforu osnovna je karakteristika koju je potrebno opisati prilikom modeliranja prometnog toka. Zbog navedenog potrebno je obaviti istraživanje funkcionalne učinkovitosti pražnjenja prometnog toka na raskrižju u odnosu na raspodjelu vremena u toku ciklusa odnosno progresiji pojedine zelene faze. Rezultate istraživanja s prijedlogom mjera potrebno je opisati u diplomskom radu.

Mentor:

  
\_\_\_\_\_  
doc. dr. sc. Rajko Horvat

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

\_\_\_\_\_

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

# DIPLOMSKI RAD

**Utjecaj vremena slijeda prometnih tokova na  
propusnu moć i sigurnost prometa na raskrižju  
ulica Slavonska avenija i 13. Vrbik u Gradu  
Zagrebu**

**Influence of Time Sequence of Traffic Flows on  
Intersection Capacity and Traffic Safety at the  
Intersection of the Slavonian Avenue and 13. Vrbik  
in the City of Zagreb**

Mentor:

doc. dr. sc. Rajko Horvat

Student:

Matija Pečet

JMBAG:

0035195277

Zagreb, lipanj 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Najsrdajnije se zahvaljujem voditelju rada doc. dr. sc. Rajku Horvatu na ukazanom povjerenju, velikoj motivaciji i nesebičnom odvajanju vremena i mnogim sugestijama tijekom vođenja ovog rada koje su značajno pridonijele njegovoj kvaliteti.

Također, zahvaljujem se Ivanu Cvoku, mag. ing. mech., na nesebičnom odvajanju vremena kako bi snimao prometne tokove u subotu 07. prosinca 2019.

Na kraju, posebno se zahvaljujem svojim roditeljima, Oliveri i Ivanu, na pruženoj podršci i pomoći bez koje ne bih uspješno završio studij.

Matija Pečet

## SAŽETAK

U okviru diplomskog rada analizirani su parametri prometnih tokova na raskrižju Slavonske avenije i Ulice 13. Vrbik u Gradu Zagrebu. Analiza parametra prometnih tokova omogućava uvid u kvalitetu odvijanja prometnih tokova a na temelju kojih je moguće odrediti mjere i smjernice za poboljšanje kvalitete načina odvijanja prometa na raskrižju.

U uvodnom dijelu rada opisani su osnovni parametri prometnih tokova i njihove međusobne relacije. Prikazani su modeli prometnih tokova prema složenosti i njihova usporedba s empirijskim podacima. Za predmetno raskrižje opisane su geoprometne značajke. Obavljena je analiza prometnih nesreća u razdoblju od 2005. do 2017. godine uzrokovanih vremenom slijeda između vozila.

Nakon snimanja prometnih tokova na predmetnom raskrižju u dva navrata, obavljena je analiza vremena slijeda prometnih tokova, određena razina usluge i predložene mjere za poboljšavanje odvijanja prometnih tokova.

Ključne riječi: sigurnost cestovnog prometa; vrijeme slijeda; razina usluge

## **SUMMARY**

This master's thesis the parameters of the traffic flows at the intersection of Slavonian Avenue and 13. Vrbik in the City of Zagreb were analyzed. Traffic flow parameters provide insight into the quality of traffic flows and can be used to determine guidelines for improving the quality of traffic flows. The aim of the master's thesis is to propose measures to improve the quality of traffic flows at the analyzed intersection.

The introductory part of the master's thesis describes the basic parameters of traffic flow and their interrelationships. Traffic flow models are presented by their complexity and compared to empirical data. Main features of the subject intersection were described. An analysis of traffic accidents was carried out between 2005 and 2017 due to the time sequence between vehicles.

After filming the traffic flows at the subject intersection, an analysis of the basic parameters of traffic flows, a level of service is determined and proposed measures to improve the quality of traffic flows.

Keywords: road traffic safety, time sequence, level of service

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. OSNOVNI ELEMENTI PROMETNOG TOKA .....	3
2.1. Kretanje pojedinačnog vozila u funkciji vremena $t$ .....	4
2.2. Osnovni parametri prometnog toka.....	5
2.3. Složenost prometnog toka .....	9
2.4. Relacije između osnovnih parametara prometnog toka .....	12
3. GEOPROMETNE ZNAČAJKE MAKROPODRUČJA RASKRIŽJA .....	22
4. ANALIZA PROMETNO OBLIKOVNIH ELEMENATA PROMETNICA .....	25
4.1. Tlocrtni elementi ceste .....	26
4.2. Vertikalni elementi ceste .....	27
4.3. Raskrižja .....	27
5. ANALIZA PROMETNIH NESREĆA UZROKOVANIH USLIJED VREMENA SLIJEDA I RAZMAKA VOZILA .....	28
5.1. Uzroci prometnih nesreća .....	30
6. ANALIZA VREMENA SLIJEDA PROMETNIH TOKOVA NA ISTOČNOM PRIVOZU .....	34
6.1. Prikupljanje podataka.....	34
6.2. Statistička analiza .....	40
6.3. Usporedba rezultata .....	54
7. ANALIZA PROPUSNE MOĆI I RAZINE USLUGE PRIVOZA .....	58
7.1. Razina usluge raskrižja.....	59
7.2. Određivanje razine usluge semaforiziranog raskrižja.....	60
7.3. Određivanje razine usluge privoza Slavonske avenija i 13. Vrbika .....	69
8. PRIJEDLOZI MJERA ZA POBOLJŠANJE ODVIJANJA PROMETNIH TOKOVA	75
9. ZAKLJUČAK.....	77
LITERATURA .....	79
POPIS SLIKA.....	80
POPIS TABLICA.....	82
POPIS OZNAKA .....	83
POPIS KRATICA .....	86
POPIS PRILOGA .....	87
PRILOG 1 – ANALIZA PROMETNIH NESREĆA.....	88
PRILOG 2 – ODREĐIVANJE ZASIĆENOG PROMETNOG TOKA ZA PROLAZNU GRUPU TRAKOVA NA ISTOČNOM PRIVOZU RASKRIŽJA .....	97



## 1. UVOD

Prijevoz ljudi i transport roba u današnjoj suvremenoj društvenoj zajednici obavlja se uz pomoć raznih prijevoznih sredstava a što je uvjetovano geomorfologijom i urbana morfologija pojedinog područja. Prijevozna sredstava zajedno s prijevoznom uslugom, prijevoznim/prometnim infrastrukturnim objektima (riječni i morski putevi, cestovne prometnice, željezničke pruge, zračne luke itd.) i upravljačkom opremom prometnih procesa (prometna signalizacija) čine prometni sustav.

Urbanizacija prostora uvjetovana porastom broja stanovnika i gospodarskim rastom što dovodi do povećanja prometne potražnje koju u većini slučajeva ne prati povećanje prometne ponude zbog čega dolazi do zagušenja prometnica, povećanog onečišćenja okoliša i smanjenja kvalitete prometnog sustava u cjelini. Zbog navedenog, a u cilju smanjenja negativnog utjecaj povećanja prometne potražnje, raznim mjerena nastoji se poticati korisnike prometnog sustava na upotrebu alternativnih oblika prijevoza (javni gradski prijevoz, bicikl) kao i na obavljanje prijevozne usluge u vremenskom razdoblju manjeg prometnog opterećenja sustava.

Jedan od osnovnih uvjeta za promicanje i predlaganje mjera uz pomoć kojih bi se umanjio utjecaj zagušenja prometnog sustava je kontinuirano obavljanje mjerena parametara prometnog toka. Kontinuiranim mjerenjem i analizom prometnog toka omogućava se spoznaja teorijskih konstanti i osnovnih prometnih veličina u promatranom prostoru i vremensom intervalu što postavlja osnovu za planiranje odgovarajućih prometnih rješenja ili prometnog sustava u cjelini.

Jedan od takvih sustava koji upravljanja prometnim procesom su i prometna svijetla odnosno semafori. Na raskrižjima na kojima se raspodjela prometnih tokova obavlja uz pomoć semafora, važnu ulogu ima raspodjela ciklusa i faza, odnosno upravljačka logika. Raspodjela vremena ciklusa i faza semafora ima važan utjecaj na prometno opterećenje odnosno definiranja kapaciteta raskrižja ali i ostalih parametara prometnog toka na mikroskopskoj i makroskopskoj razini. Zbog zaustavljanja određenih prometnih tokova tijekom crvene faze dolazi do akumuliranja vozila iza stop crte, što može uzrokovati zagušenja privoza raskrižja. Stoga je veoma važno odrediti optimalnu raspodjelu vremena ciklusa i faza kako bi se omogućilo učinkovitog pražnjenja prometnog toka za vrijeme zelene faze. Način odlaska vozila sa stop crte određenog privoza kad se vozilima omogući slobodan prolaz (upali zeleno svijetlo na semaforu), jedna je od karakteristika koju je potrebno opisati prilikom modeliranja prometnih tokova.

U cilju optimiranja vremena ciklusa i faza semafora, obavljeno je istraživanje funkcionalne učinkovitosti pražnjenja prometnih tokova na predmetnom raskrižju na raskrižju Slavonske avenije i Ulice 13. Vrbik u Gradu Zagrebu. U svrhu istraživanja za snimanje prometnih tokova upotrijebljavana je kamera od 12 Mp žarišne duljine 27 mm, a za analizu prometnih tokova programski paket *MS Excel*. Mjerenje načina odvijanja prometnih tokova obavljeno je radnim danom i vikendom za vrijeme jutarnjeg vršnog sata kako bi se kompariralo vrijeme slijeda vozila na istočnom privozu.

U drugom poglavlju opisani su osnovni elementi prometnih tokova i matematičke veze između njih. Relacije između prometnih tokova prikazane su na primjeru empirijskih istraživanja, a prate razvoj od najjednostavnijeg Greenshieldovog modela koji koristi relacije protok-gustoća-brzina, do današnjih „*state of art*“ i diferencijalnih modela prometnih tokova koji su u mogućnosti precizno opisivati kompleksne prometne mreže, njihove parametre i mogu se izvoditi u „*real time*“ kako bi se ostvario uvid u trenutno stanje i predvidjela dešavanja na prometnoj mreži.

U trećem poglavlju opisano je makropodručje predmetnog raskrižja i značenje Grada Zagreba u lokalnoj i globalnoj prometnoj mreži. U četvrtom poglavlju opisani su osnovni prometno oblikovni elementi svake prometnice.

U petom poglavlju obavljena je analiza prometnih nesreća uzrokovanih vremenom slijeda vozila prema podacima Ministarstva unutarnjih poslova Republike Hrvatske. Detaljan prikaz analize prometnih nesreća uzrokovanih nedovoljnim vremenom slijeda vozila.

U šestom poglavlju obavljena je analiza vremena slijeda prometnih tokova na raskrižju. Podaci su prikupljeni snimanjem prometnih tokova u dva navrata, a nakon toga su prometni tokovi prebrojani, utvrđena su vremena slijeda između vozila i provedena je statistička analiza vremena slijeda.

U sedmom poglavlju prikazana je analiza vremena slijeda istočnog privoza i određena razine usluge prema HCM-u, kako bi se ostvario uvid u kvalitetu odvijanja prometnih tokova. Radi usporedbe u jednom slučaju koriste se vrijednosti i faktori preporučeni HCM-om, dok su u drugom slučaju korištene vrijednosti utvrđene analizom prometnih tokova.

U osmom poglavlju dan je osvrt na rezultate istraživanja vremena slijeda i njihov utjecaj na kvalitetu odvijanja prometnih tokova s prije dlogom mjerom za poboljšanje odvijanja prometnih tokova i prijedlozima za buduća poboljšanja i proširenja rada.

U zaključku je na sustavan, koncizan i jezgrovit način izložena sinteza svih relevantnih spoznaja, informacija, stavova, znanstvenih činjenica, teorija i zakona koji su opširnije elaborirani u analitičkom dijelu diplomskog rada.

## 2. OSNOVNI ELEMENTI PROMETNOG TOKA

Osnovni parametri koji opisuju kretanje pojedinačnog vozila u prometnom toku su:

- Vrijeme  $t$ ;
- Put  $s$ ;
- Brzina  $v$ ;
- Ubrzanje (akceleracija)  $a$ ;
- Promjena ubrzanja (impuls)  $k$ .

Pod pojmom kretanja pojedinačnog vozila smatra se kretanje vozila na putu, najvećom brzinom koja zadovoljava uvjete sigurnog odvijanja prometnog toka, a koja nije u ovisnosti o ostalim sudionicima u prometnom toku, odnosno ovisi samo o prometno-tehnološkim karakteristikama prometnice. Opisivanje osnovnih parametara kretanja pojedinačnog vozila u prometnom toku ostvaruje se definiranjem matematičkih relacija između određenih osnovnih parametara prometnog toka, a najčešće se koriste vrijeme  $t$ , put  $s$  ili brzina  $v$ .

Prometni tok je istovremeno kretanje više vozila koja su u međusobnoj interakciji na nekoj prometnici. Osnovna razlika između prometnog toka i pojedinačnog kretanja vozila je upravo interakcija između vozila. Osnovni parametri za opisivanje prometnih tokova su:

- Protok vozila  $q_{voz}$ ;
- Gustoća prometnog toka  $g$ ;
- Brzina prometnog toka  $v_{pt}$ ;
- Vrijeme putovanja u prometnom toku  $t$ ;
- Jedinično vrijeme putovanja vozila u prometnom toku  $t_{jed}$ ;
- Interval slijeđenja vozila u prometnom toku  $t_{hv}$ ;
- Razmak slijeđenja u prometnom toku  $s_{sl}$ ;

## 2.1. Kretanje pojedinačnog vozila u funkciji vremena $t$

Kada se kretanje pojedinačnog vozila u prometnom toku opisuje pomoću funkcije vremena polazi se od vremena  $t$  kao varijable u funkciji puta  $s$ . Grafički prikaz puta u funkciji vremena naziva se  $s$ - $t$  graf puta.

Matematički se prikaz  $s$ - $t$  grafa može opisati jednačbom (1).

$$s = s(t) \quad (1)$$

Ostale osnovne parametre koji opisuju kretanje pojedinačnog vozila moguće je matematički odrediti prema funkciji puta. Matematički dokazom dolazi se do zaključka da je brzina  $v$ , prva derivacija puta po vremenu, akceleracija  $a$ , druga derivacija puta po vremenu, a impuls  $k$ , treća derivacija puta po vremenu. Matematički zapis tih relacija prikazan je u jednačbama (2), (3) i (4).

$$v = v(t) = \frac{ds}{dt} \quad (2)$$

$$a = a(t) = \frac{ds^2}{d^2t} = \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

$$k = k(t) = \frac{ds^3}{d^3t} = \frac{dv^2}{d^2t} = \frac{da}{dt} \quad (4)$$

Kao primjer prikaza ovisnosti osnovnih parametara kretanja pojedinačnog vozila o vremenu pretpostavit će se funkcija kretanja pojedinačnog vozila. Osnovna funkcija kretanja pojedinačnog vozila prikazana je u jednačbi (5).

$$s(t) = \frac{1}{2}t^3 + 3t + 1 \quad (5)$$

Funkcija ovisnosti brzine  $v$  o vremenu  $t$  utvrđuje se nakon derivacije funkcije puta  $s$  po vremenu  $t$ , sukladno jednačbi (6).

$$v = v(t) = \frac{ds}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{2}t^3 + 3t + 1\right)}{dt} = \frac{3}{2}(t^2 + 2) \quad (6)$$

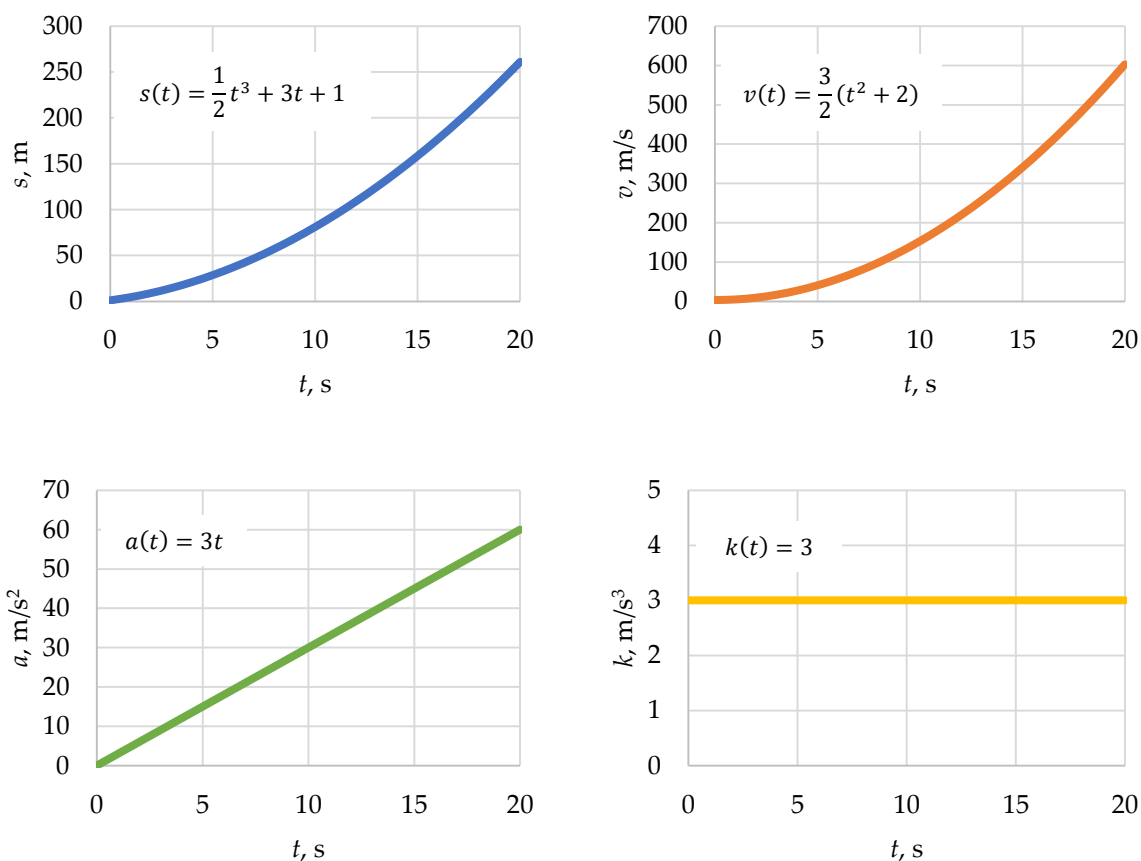
Funkcija ovisnosti akceleracije  $a$  o vremenu  $t$  utvrđuje se nakon derivacije funkcije brzine  $v$  po vremenu  $t$ , sukladno jednačbi (7).

$$a = a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d\left(\frac{3}{2}(t^2 + 2)\right)}{dt} = 3t \quad (7)$$

Funkcija ovisnosti impulsa  $k$  o vremenu  $t$  utvrđuje se nakon derivacije funkcije akceleracije  $a$  po vremenu  $t$ , sukladno jednačbi (8).

$$k = k(t) = \frac{da}{dt} = \frac{d(3t)}{dt} = 3 \quad (8)$$

Grafički prikaz jednadžbi (5), (6), (7) i (8) nalazi se na slici 1.



Slika 1. Osnovni parametri kretanja pojedinačnog vozila u funkciji vremena

## 2.2. Osnovni parametri prometnog toka

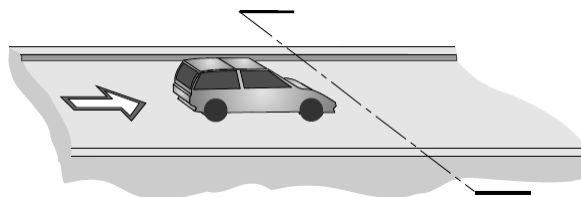
### 2.2.1. Protok vozila

Protok vozila  $q_{\text{voz}}$  predstavlja broj vozila koja prođu kroz promatrani presjek prometnice u jedinici vremena, a računa se prema jednadžbi (9).

$$q_{\text{voz}} = g \cdot V \quad (9)$$

Gdje je:

- $q_{\text{voz}}$  - protok vozila, voz/h;
- $g$  - gustoća prometnog toka, voz/km;
- $V$  - brzina prometnog toka, km/h.



Slika 2. Protok vozila na promatranom presjeku [1]

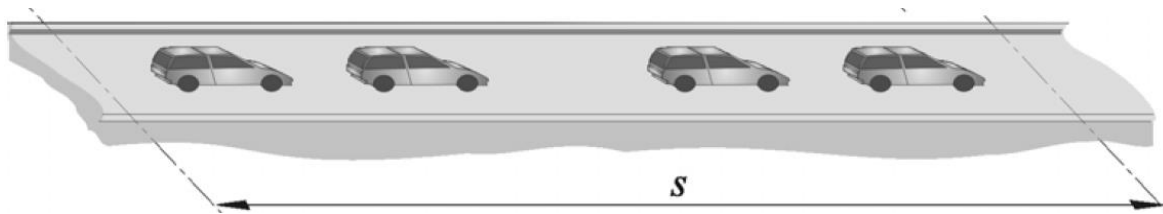
### 2.2.2. Gustoća prometnog toka

Gustoća prometnog toka  $g$  predstavlja broj vozila na jedinici duljine prometnice, po prometnoj traci, u trenutku promatranja, a računa se prema jednadžbi (10).

$$g = \frac{n_{\text{voz}}}{s} \quad (10)$$

Gdje je:

- $g$  - gustoća prometnog toka, voz/km;
- $n_{\text{voz}}$  - broj vozila u prometnom toku na dijelu puta u određenom trenutku, voz;
- $s$  - duljina promatranog dijela prometnice, km.



Slika 3. Gustoća prometnog toka [1]

### 2.2.3. Brzina prometnog toka

Brzina prometnog toka  $v_{\text{pt}}$  je srednja vrijednost svih brzina vozila koja sudjeluju u promatranom prometom toku, mjerna jedinica su m/s ili km/h.

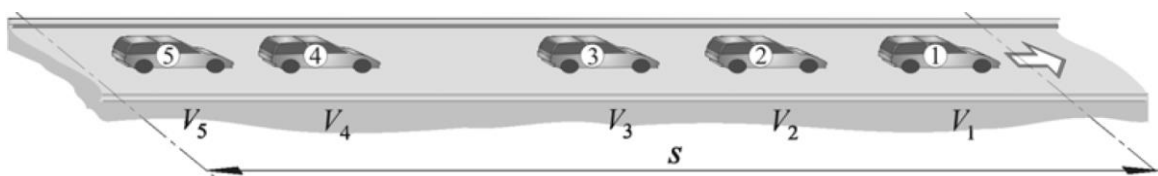
#### 2.2.3.1. Srednja prostorna brzina prometnog toka

Srednja prostorna brzina  $\bar{v}_s$  prometnog toka predstavlja aritmetičku sredinu trenutnih brzina svih vozila u prometnom toku na promatranom odsjeku puta, naziva se još i srednja trenutna brzina. S gledišta prostornog promatranja predstavlja brzinu na dionici ceste, a s gledišta vremenskog promatranja predstavlja trenutnu brzinu toka, a opisuje se jednadžbom (11).

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (11)$$

Gdje je:

- $\bar{v}_s$  - srednja prostorna brzina prometnog toka, m/s;
- $v_i$  - trenutna brzina pojedinačnog vozila u prometnom toku, m/s;
- $n$  - broj vozila u prometnom toku, -.



Slika 4. Srednja prostorna brzina prometnog toka [1]

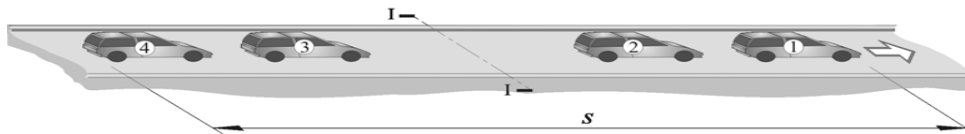
### 2.2.3.2. Srednja vremenska brzina prometnog toka

Srednja vremenska brzina prometnog toka  $\bar{v}_t$  predstavlja aritmetičku sredinu brzina svih vozila u prometnom toku koja prolaze kroz promatrani presjek puta, u određenom intervalu, a opisuje se jednadžbom (12).

$$\bar{v}_t = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (12)$$

Gdje je:

- $\bar{v}_t$  - srednja vremenska brzina prometnog toka, m/s;
- $v_i$  - trenutna brzina pojedinačnog vozila u prometnom toku, m/s;
- $n$  - broj vozila u prometnom toku, -.

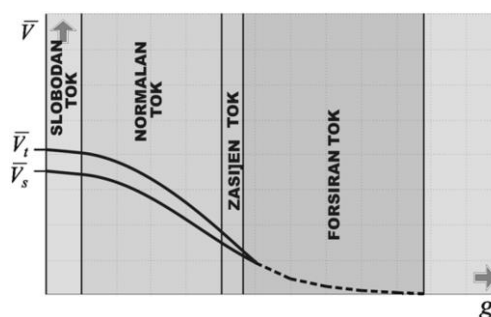


Slika 5. Srednja vremenska brzina [1]

### 2.2.3.3. Vrste prometnog toka s obzirom na brzinu kretanja

U ovisnosti o uvjetima kretanja vozila u prometnom toku s obzirom na međudjelovanje pri približno idealnim uvjetima odvijanja prometnog toka, srednjoj prostornoj i srednjoj vremenskoj brzini dodjeljuju se sljedeći nazivi:

- Brzina slobodnog toka – sva vozila u prometnom toku kreću se približno jednakom brzinom kretanja;
- Brzina normalnog toka – prometni tok može biti stabilan, polustabilan ili nestabilan, u kojem na uvjete kretanja djeluje interakcija među vozilima;
- Brzina zasićenog toka – sva vozila kreću se uz potpunu ili približnu interakciju, i približno jednakom brzinom;
- Brzina forsiranog toka – prometni tok kreće se približno jednakom brzinom, koja je približna 0.
- Na slici 6 prikazane su brzine prometnog toka u različitim uvjetima odvijanja prometnih tokova.



Slika 6. Brzina u različitim odvijanjima prometnog toka [1]

#### 2.2.4. Interval slijeda vozila

Interval slijeda vozila  $t_h$  predstavlja vrijeme između prolaska dva uzastopna vozila kroz zamišljeni poprečni presjek, a mjerna jedinica su s.

Kod promatranja prometnih tokova, ovisno o načinu promatranja razlikuju se:

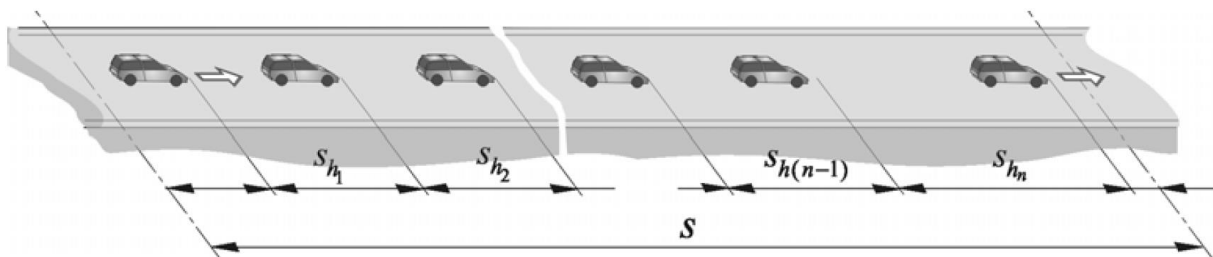
- Interval praćenja pojedinačno za  $n$  vozila, koja u periodu  $t$  prolaze kod promatrano područje;
- Srednja vrijednost intervala praćenja na promatranom presjeku za  $n$  vozila u vremenu  $t$ ;
- Interval slijeđenja na dionici puta, kao aritmetička sredina svih srednjih intervala praćenja na  $m$  promatranih presjeka puta u vremenu  $t$ .

Interval slijeđenja vozila ima velik značaj pri opisivanju uvjeta odvijanja prometnih tokova, u inženjerskoj praksi služi kao osnovni pokazatelj kvalitete prometnih tokova.

#### 2.2.5. Razmak slijeđenja vozila

Razmak slijeđenja vozila  $s_h$  predstavlja prostorni razmak između dva uzastopna vozila u prometnom toku, a mjerna jedinica su m. Pri promatranju prometnih tokova na prometnici predstavlja srednju vrijednost svih razmaka praćenja između uzastopnih vozila u određenom prometnom toku. Razlikuju se:

- Udaljenost između pojedinih vozila u prometnom toku koja su se nalaze na promatranom dijelu;
- Srednja vrijednost trenutnih razmaka između svih vozila koja se nalaze na promatranom dijelu.



Slika 7. Razmaci u slijeđenju vozila [1]



### 2.3. Složenost prometnog toka

U opisivaju prometnih tokova i zakonitosti kretanja vozila na mreži cestovnih prometnica, pri korištenju osnovnih parametara prometnog toka, a prije svega protoka vozila, od značaja je poznavanje vrste prometnog toka sa stajališta broja nizova i smjerova. Prometni tokovi mogu se podijeliti na:

- Jednostavan prometni tok koji se sastoji od niza vozila koja se kreću u istom pravcu i smjeru (najmanje dva vozila);
- Složen prometni tok sastoji se od dva ili više jednostavnih prometnih tokova, a s obzirom na odnose nizova i smjerova može biti:
  - Složen tok od dva ili više jednostavnih tokova međusobno paralelnih u istom ili suprotnom smjeru;
  - Složen tok od dva ili više jednostavnih prometnih tokova koji se međusobno isprepliću;
  - Složeni tok od dva ili više jednostavnih tokova koji se međusobno sijeku, ulijevaju ili odlijevaju.

#### 2.3.1. Vrste i struktura prometnog toka

Prema načinu odvijanja prometni tokovi mogu biti:

- Nепреkinuti tokovi – na uvjete kretanja vozila djeluje jedino njihova međusobna interakcija ovisna o gustoći prometnog toka, uvjete za nепреkinute tokove pružaju duže prometne dionice (npr. autoceste);
- Nепреkinuti, ali djelomično ometani tokovi – na uvjete kretanja vozila, uz međusobnu interakciju, utječu i promjene prometnih trakova u kretanju zbog ulijevanja ili izlivanja (npr. dionice na kojima se prepliću, ulijevaju ili izljevaju tokovi u zonama prometnih čvorišta na više razina);
- Povremeno prekinuti tokovi – na uvjete kretanja vozila, uz međusobnu interakciju, utječu i potrebe za vremenskom podjelom prava na korištenje potrebitih prometnih površina, od strane vozila iz raznih pravaca kretanja, koji se međusobno presijecaju (npr. semaforizirana raskrižja u razini).

S obzirom na sastav ili strukturu prometni tokovi mogu biti:

- Homogeni tokovi – sastavljeni od jedne vrste vozila (npr. putničkih automobila), ako je prometni tok sastavljen od iste vrste motornih vozila kojima upravljaju vozači identičnih psihofizičkih osobina i iste motiviranosti za vožnju, takav tok naziva se idealan homogeni prometni tok (nije ga moguće postići);
- Nehomogeni (realni) tok – sastavljen od dvije ili više vrsta vozila (npr. putnički automobili, kamioni, autobusi...).

Stupanj homogenosti prometnog toka izražava jednadžbom (13).

$$P_{PA} = \frac{q_{UK} - q_{PA}}{q_{UK}} \cdot 100 \quad (13)$$

Gdje je:

$P_{PA}$  - homogenost prometnog toka, %;

$q_{UK}$  - broj vozila u prometnom toku, -;

$q_{PA}$  - broj osobnih automobila u prometnom toku, -.

Homogenost prometnog toka, predstavlja značajnu karakteristiku toka o kojoj ovise uvjeti koji vladaju u prometu na mreži. S porastom stupnja nehomogenosti (smanjenjem stupnja homogenosti) toka pogoršavaju se uvjeti u odnosu na uvjete u homogenom toku.

Razlog pogoršanju uvjeta u prometnom toku kod nehomogenog toka u odnosu na homogeni tok je prije svega što ostala vozila (teretna vozila, autobusi...) imaju veće gabarite, a lošije vozno-dinamičke karakteristike u odnosu na osobne automobile.

### 2.3.2. *Vremenska neravnomjernost protoka vozila*

Promatrajući prema jednakim vremenskim jedinicama na presjeku (lokalno promatranje) ili odsjeku promatrane dionice ceste (na "n" presjeka duž odsjeka) u stvarnim uvjetima, protok vozila je promjenljiva veličina koja ovisi o nizu faktora. Karakteristika vremenske neravnomjernosti prometnih tokova predstavlja u znatnoj mjeri i posljedicu prirode nastajanja potreba za prostornim premještanjem ljudi i dobara u procesu društvenih i privrednih aktivnosti na utjecajnom području promatrane mreže. Neravnomjernost protoka vozila na nekom dijelu mreže može biti izazvana i nekim poremećajima na mreži kao što su, na primjer, uska grla, vremenske i klimatske neprilike i sl., što znači da pojedini faktori koji utječu na neravnomjernost protoka imaju karakter slučajnih varijabli.

Karakteristika vremenske neravnomjernosti prometnog toka ima izuzetan značaj pri definiranju projektnih elemenata i donošenju odluka o opravdanosti izgradnje prometnica. Značaj ove karakteristike prometnog toka je naglašen i za mjere koje se poduzimaju u reguliranju i upravljanju prometom na promatranoj mreži. Zbog velikog značaja neravnomjernosti protoka vozila, za praktične odluke u procesu planiranja cestovnih prometnica, još od ranih faza razvoja motorizacije, napori stručnjaka bili su usmjereni ka što boljem upoznavanju sa zakonitostima vremenske neravnomjernosti protoka vozila.

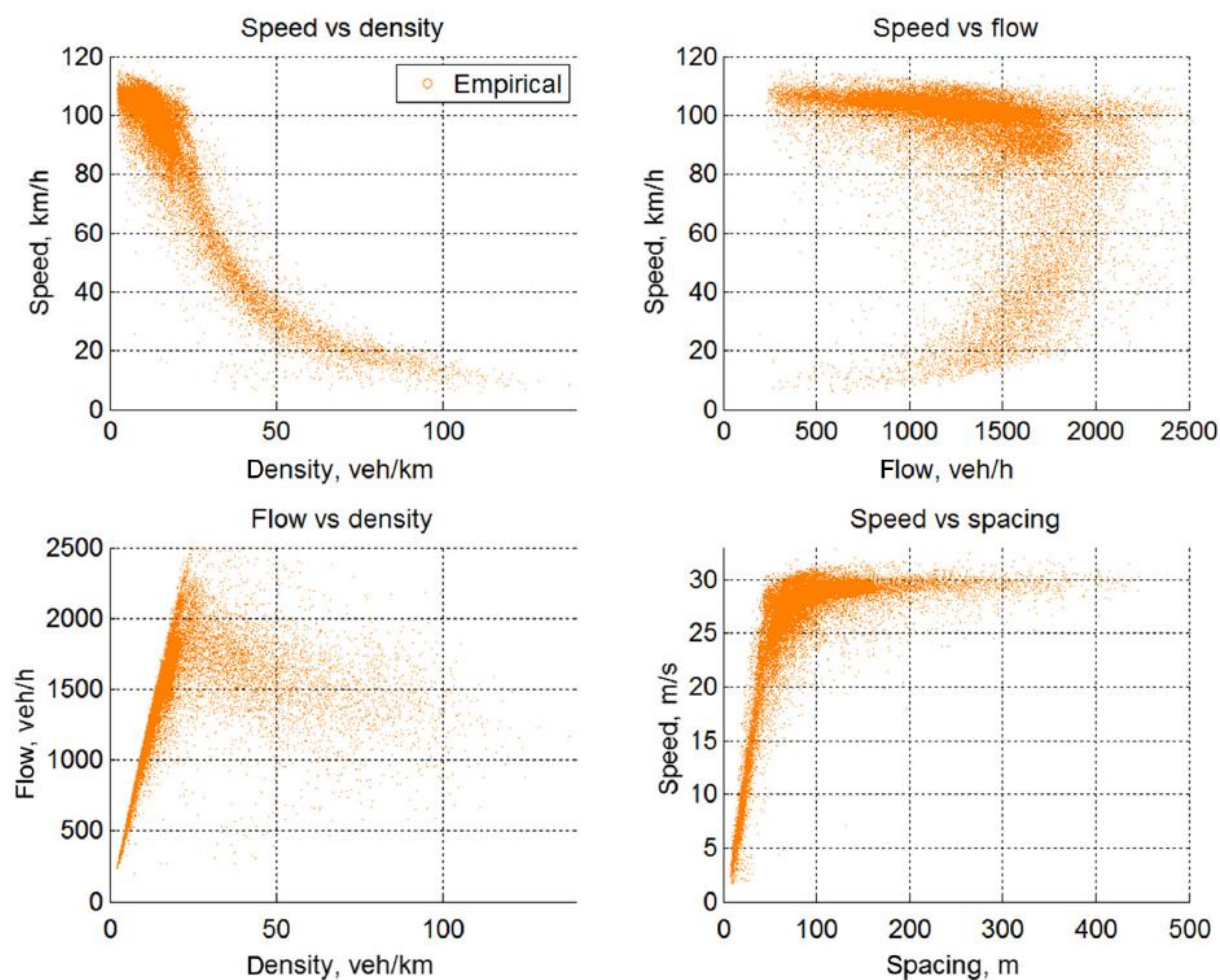
Na današnjem nivou razvijenosti teorije prometnog toka definirane su opće zakonitosti vremenske neravnomjernosti protoka vozila. Saznanja tih zakonitosti su iskorištena u definiranju odgovarajućih kriterija koji se praktično koriste u planiranju

i projektiranju mreže, kao i eksploataciji mreže. Za potrebe prakse od posebnog su značaja karakteristike vremenske neravnomjernosti protoka vozila, koje su u određenoj mjeri povezane sa cikličnostima u nastojanju zahtjeva za prijevozom ljudi i dobara. Zakonitosti vremenske neravnomjernosti protoka vozila s ovog stajališta iskazuju se kroz:

- Satnu neravnomjernost u tijeku jednog dana (24 sata) – variranje protoka po pojedinim satovima u tijekom dana, iskazuje se odnosom između protoka u pojedinim satima i srednjeg satnog protoka u periodu cijelog dana;
- Satnu neravnomjernost u tijeku cijele godine (8 760 sati) – variranje protoka vozila po satima cijeloj godini;
- Dnevnu neravnomjernost u tijeku tjedna (7 dana) – variranje protoka vozila po danima u tjednu, iskazuje se odnosom između protoka vozila u pojedinim danima i srednjeg dnevnog protoka promatranog tjedna;
- Dnevnu neravnomjernost u tijeku mjeseca – variranje protoka vozila po pojedinim danima u tijeku promatranog mjeseca, iskazuje se odnosom između protoka vozila u pojedinim danima i srednjeg dnevnog protoka promatranom mjesecu;
- Dnevnu neravnomjernost u tijeku cijele godine – variranje veličine prometnog toka po pojedinim danima u godini, iskazuje se odnosom između protoka vozila u pojedinim danima i prosječnog godišnjeg dnevnog prometa (PGDP);
- Mjesečnu neravnomjernost u tijeku cijele godine – variranje prosječnog dnevnog prometa po mjesecima u godini, iskazuje se odnosom između prosječnog dnevnog prometnog toka po mjesecima i prosječnog godišnjeg dnevnog prometa (PGDP);
- Neravnomjernost protoka po manjim vremenskim jedinicama od jednog sata u okviru vršnog sata – u stvaranju modela neophodnih za praktičnu primjenu u planiranju, projektiranju i upravljanju prometom, nametnula se potreba za poznavanjem karakteristika neravnomjernosti protoka po manjim vremenskim jedinicama od jednog sata i to prije svega u okviru vršnog sata. [1]

## 2.4. Relacije između osnovnih parametara prometnog toka

U praksi ne postoji idealan prometni tok. U traženju pogodnog načina da se opće teorijske relacije između osnovnih parametara prometnog toka primijene na realne uvjete prometnica, izvršena su brojna empirijska istraživanja, prije svega, o ovisnosti brzine vozila u toku o gustoći toka te istraživanja o ovisnosti brzine vozila u toku o protoku vozila u realnim uvjetima. Osnovni rezultati empirijskih istraživanja izloženi su kroz empirijske modele ovisnosti srednje prostorne brzine toka o gustoći toka, empirijske modele ovisnosti protoka vozila o gustoći toka i empirijske modele ovisnosti srednje prostorne brzine toka o protoku vozila. Rezultati empirijskih istraživanja brzine, gustoće, protoka i razmaka slijeda vozila prikazani su na slici 8.



Slika 8. Rezultati empirijskih istraživanja [2]

### 2.4.1. Greenshioldov model

Budući da nije moguće točno odrediti vezu između brzine i gustoće prometnog toka, Greenshiold je predložio korištenje linearne funkcije (pravca). Takva funkcija može se opisati pomoću dvije točke ( $k = 0, v = v_f$ ) i ( $k = k_j, v = 0$ ), što je prikazano na slici 9, a moguće je izraziti pomoću jednadžbe (14).

$$v = v_f \left( 1 - \frac{k}{k_j} \right) \quad (14)$$

Kada se u obzir uzme relacija:

$$q = k \cdot v \quad (15)$$

Nakon uvrštavanja jednadžbe (15) u jednadžbu (14), eliminira brzina prometnog toka (ostaje samo brzina zasićenog prometnog toka  $v_f$ ), dobiva se sljedeće:

$$q = v_f \left( k - \frac{k^2}{k_j} \right) \quad (16)$$

Na slici 9 ( $q - k$  graf) moguće je uočiti sljedeće:

- Kada je gustoća prometnog toka ( $k \approx 0$ ), protok pada na nulu ( $q \approx 0$ ), jer je cesta gotovo prazna;
- Kada je prometni tok zagušen ( $k = k_j$ ), protok pada na nulu ( $q = 0$ ), jer se vozila nisu u mogućnosti kretati po prometnici.

Jednadžba (16) je konveksna kvadratna funkcija, iz ishodišta ( $k = 0, q = 0$ ) protok vozila proporcionalan je s gustoćom prometnog toka. Ovaj trend nastavlja se do maksimuma funkcije ( $k = k_m$ ), gdje prometi tok iznosi:

$$q = q_{max} = \frac{v_f \cdot k_j}{4} \quad (17)$$

Nakon točke maksimuma, protok je obrnuto proporcionalan s gustoćom prometnog toka (protok pada kako gustoća raste), do točke kada protok postaje  $q = 0$ , a gustoća prometnog toka dostigne svoj maksimum  $k = k_j$  (gustoća zagušenja).

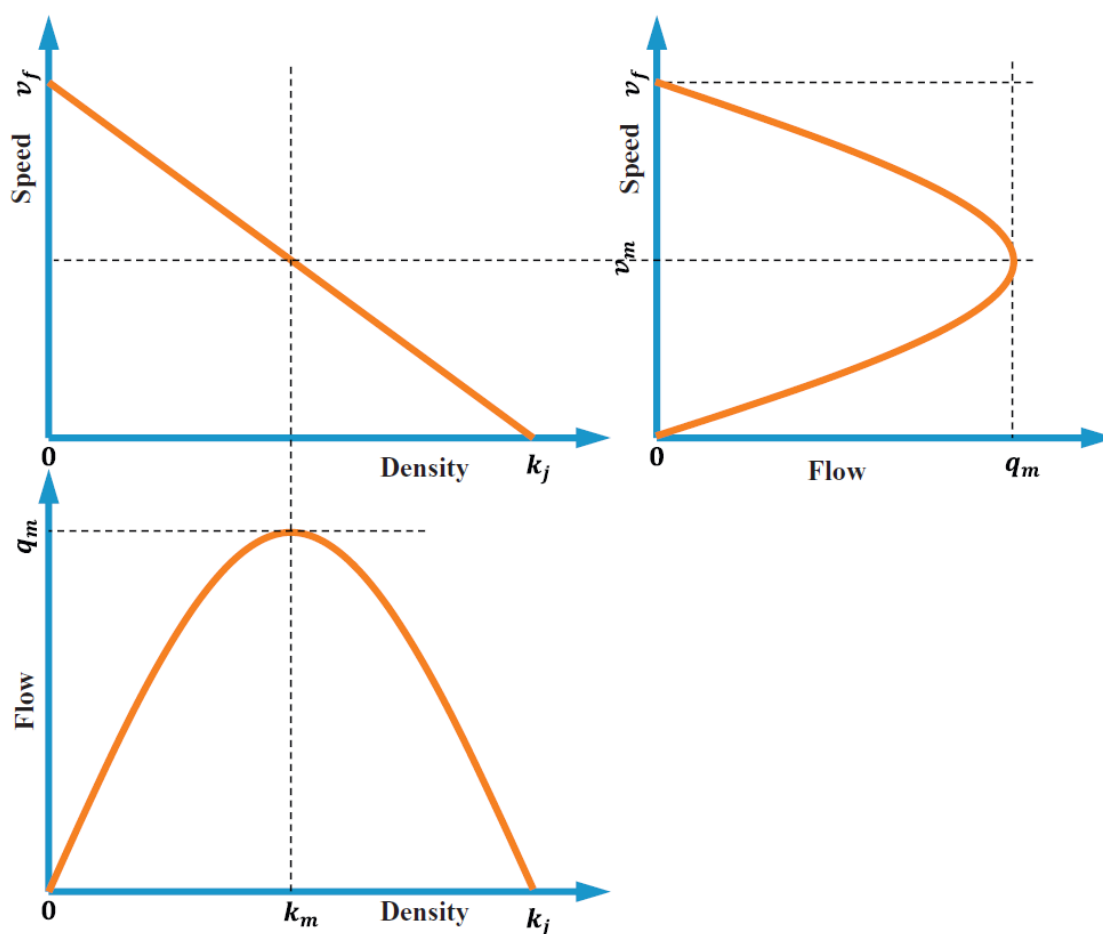
Isto tako, iz jednadžbe (14) može se eliminirati  $k$  koristeći jednadžbu (15) i dobiva se:

$$q = k_j \left( v - \frac{v^2}{v_f} \right) \quad (18)$$

Na slici 9 ( $q - v$  graf) prikazan je funkcija jednadžbe (18). Ova funkcija je također kvadratna, no s drugačijim parametrima jednadžbe (otvor u lijevo). Kada je prometni tok  $q \approx 0$ , moguća su dva scenarija odvijanja prometa, prvi je da je prometnica gotovo prazna i vozila se kreću brzinom slobodnog toka i bez međusobne interakcije ( $v = v_f$ ), drugi scenarij je da je na prometnici došlo do zagušenja i brzina kretanja prometnog toka približna je nuli ( $v \approx 0$ ). Ako se u jednadžbu kao ulazni parametar unese protok

na prometnici, zbog oblika jednadžbe (kvadratna jednadžba) ima dva rješenja. „Manju“ brzinu koja odgovara „lošijim“ uvjetima odvijanja prometnog toka i „veću“ brzinu koja odgovara „boljim“ uvjetima odvijanja prometnog toka. Kada te dvije brzine postanu jednake (kvadratna jednadžba s jednim dvostrukim rješenjem) postignut je nazivni kapacitet prometnice ( $q = q_m$ ), a brzina odvijanja prometnih tokova je optimalna  $v_m$ .

Na slici 9 prikazane su Greenshioldovi dijagrami koji povezuju protok, gustoću i brzinu prometnog toka, a nazivaju i osnovni dijagrami prometnog toka.

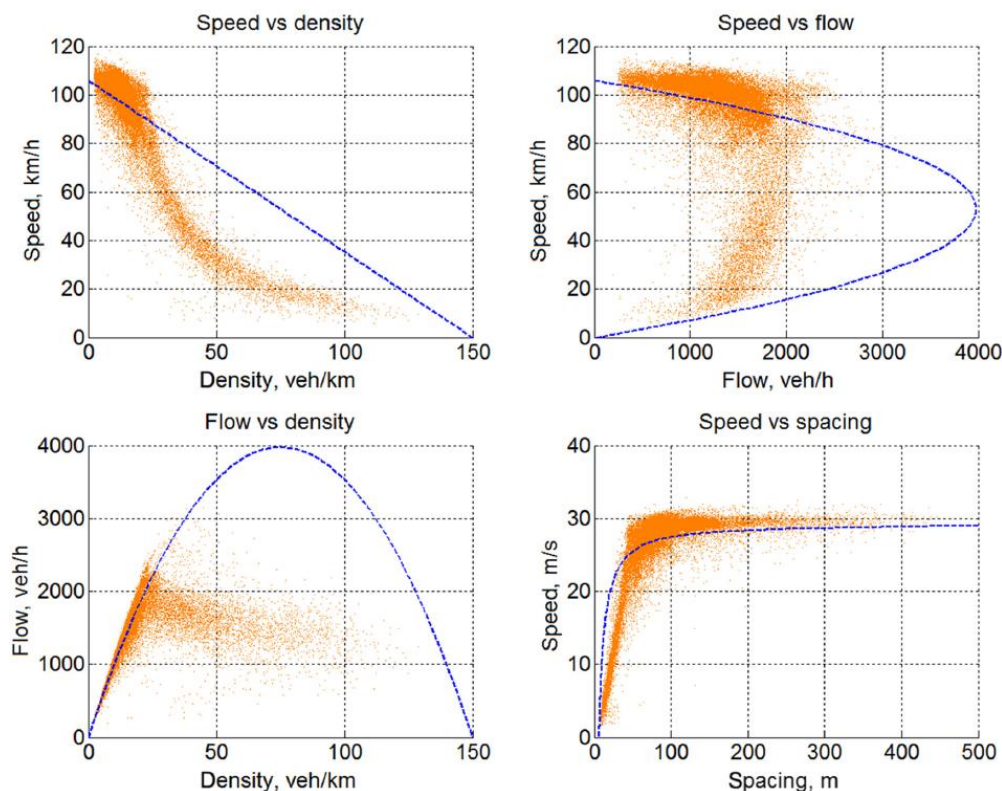


Slika 9. Greenshioldove protok-gustoća-brzina relacije [2]

Odnos brzine i gustoće prometnog toka odnosi se na odabir brzine kretanja pojedinog vozila u odnosu na druga vozila u prometnom toku s kojima je u interakciji. Taj odnos se uobičajeno koristi za modeliranje ponašanja vozila „u slijedu“. Odnos gustoće i protoka prikladan za objašnjavanje širenja poremećaja u prometnom toku kao što su šok valovi (engl. *shock wave*) i brzine njihova širenja u dinamičkom modeliranju prometnih tokova. Odnos brzine i protoka koristi se za određivanje razine usluge (engl. *level of service*, LOS) prometnice, što se danas uvelike koristi u prometnoj struci, za određivanje kvalitete odvijanja prometnih tokova.

### 2.4.2. Ostali jednorežimski modeli prometnog toka

Greenshieldov model služi kao idealna ilustracija osnovnih parametara prometnog toka, no empirijska promatranja pokazuju da mu nedostaje točnosti. Usporedba Greenshieldovog modela prometnog toka i empirijskih podataka prikazana je na slici 10.



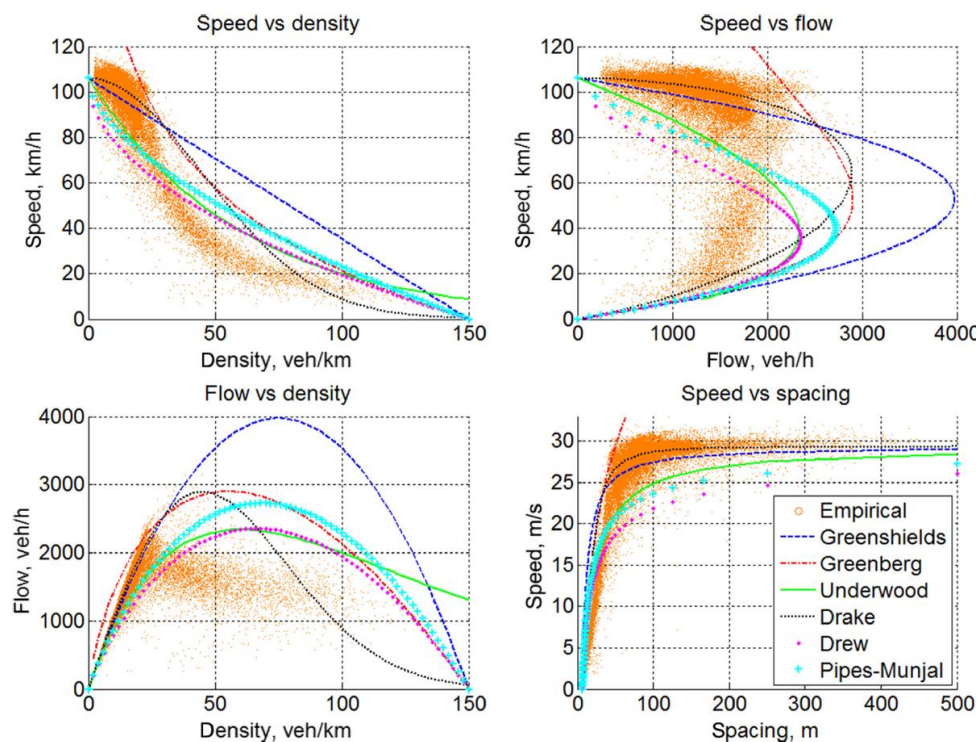
Slika 10. Greenshieldove relacije prometnog toka [2]

Greenshieldov model prometnih tokova je jednostavan stoga se koristi u edukacijske svrhe kako bi se korisnika uvelo u teorije prometnih tokova. Kada se uspoređi s empirijskim rezultatima, uočavaju se nesavršenosti u modelu, poput modela predviđa da se maksimalni kapacitet prometnice ( $q = q_m$ ) ostvaruje na polovici gustoće zagušenog prometnog toka ( $k_m = 0,5k_j$ ). Ako se pretpostavi da je dužina prosječnog vozila 6 m, gustoća zagušenog prometnog toka iznosila bi oko 164 voz/km. Polovica tog iznosa je 82 voz/km kada se predviđa da je ostvaren maksimalni kapacitet prometnice, no empirijskim promatranjima utvrđeno se maksimalni kapacitet prometnice ostvaruje pri 25 do 40 voz/km. Također, ovisnost brzine u gustoće prometnog toka je linearna, no u stvarnosti je ta ovisnost linearna do oko 15 voz/km, a nakon toga znatno pada. Kao početna točka za usavršavanje, Greenshieldov model poslužio je mnogim istraživačima prometnog toka, za stvaranje jednorežimskih modela prometnog toka, čiji je pregled u tablici 1, a grafički prikaz i usporedba s empirijskim podacima i Greenshieldovim modelom na slici 11.

Tablica 1. Usporedba jednorežimskih modela prometnog toka

Naziv modela	Osnovna jednačba modela	Parametri
Greenshield	$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right)$	$v_f, k_j$
Greenberg	$v = v_m \ln\left(\frac{k}{k_j}\right)$	$v_m, k_j$
Underwood	$v = v_f e^{-\frac{k}{k_m}}$	$v_f, k_m$
Drake	$v = v_f e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{k}{k_m}\right)^2}$	$v_f, k_m$
Drew	$v = v_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j}\right)^{n+\frac{1}{2}}\right]$	$v_f, k_j, n$
Pipes-Munjal	$v = v_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j}\right)^n\right]$	$v_f, k_j, n$

$v_f$  je brzina slobodnog toka,  $k_j$  gustoća prometnog toka kod zagušenja,  $k_m$  optimalna gustoća prometnog toka, a  $n$  eksponent



Slika 11. Usporedba jednorežimskih modela prometnog toka [2]

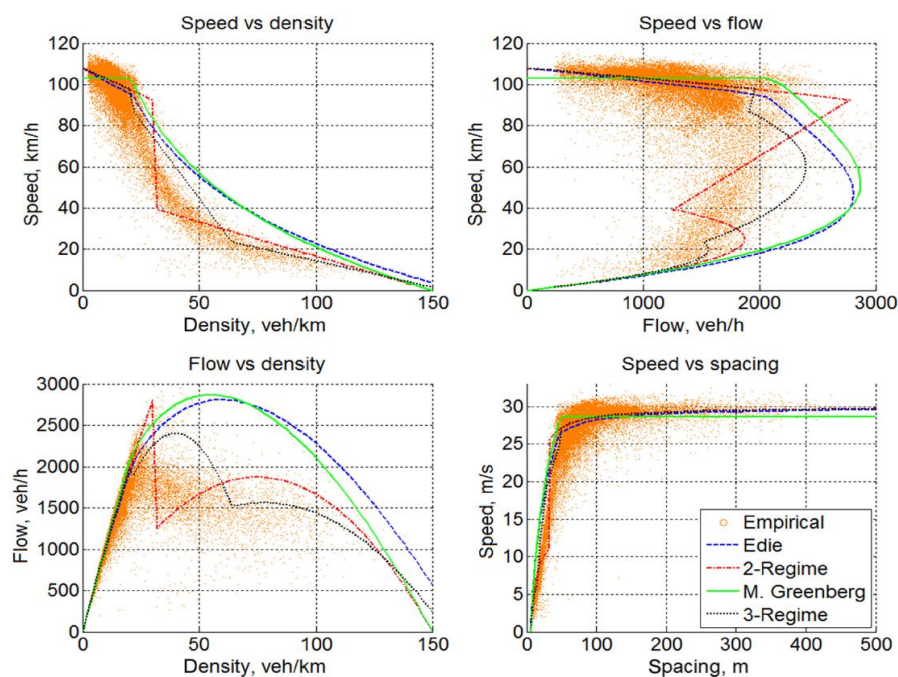


### 2.4.3. Višerežimski modeli prometnog toka

Prikazani jednorežimski modeli prometnog toka u cijelom rasponu gustoće prometnog toka dovoljno precizno ne opisuju empirijske podatke. Netočnost jednorežimskih modela potakla je istraživače prometnih znanosti na razvoj višerežimskih modela koji će preciznije opisivati empirijske podatke, pomoću matematičkih zakonitosti. Pregled nekih višerežimskih modela je u tablici 2, a grafički prikaz i usporedba s empirijskim podacima na slici 12.

Tablica 2. Usporedba višerežimskih modela prometnog toka [2]

Naziv modela	Slobodni tok	Prijelazni tok	Forsirani tok
Edie model	$v = 108e^{-\frac{k}{163,9}}$ $k \leq 20$	-	$v = 47\ln\left(\frac{162,5}{k}\right)$ $k > 20$
Dvorežimski model	$v = 108 - 0,515k$ $k \leq 30$	-	$v = 50 - 0,33k$ $k > 30$
Modificirani Greenbergov model	$v = 103$ $k \leq 20$	-	$v = 52\ln\left(\frac{150}{k}\right)$ $k > 20$
Trorežimski model	$v = 108 - 0,5k$ $k \leq 20$	$v = 120 - 1,5k$ $20 < k \leq 65$	$v = 40 - 0,256k$ $k > 65$



Slika 12. Usporedba višerežimskih modela prometnog toka [2]

#### 2.4.4. „State of art“ modeli prometnog toka

Svaki ekvilibrijalni model kao što su Greenshieldov, Greenbergov, Underwoodov, Drakeov, Drewov i Pipes-Munjtal model, su relativno jednostavni te se u matematičkom zapisu nalaze dva ili tri parametra. Također, kod tih modela u svakoj točki na krivulji može se odrediti derivacija protoka po gustoći prometnog toka ( $dq/dk$ ), to ih čini pogodnima jer je ta relacija korisna u makroskopskom modeliranju kao i rješavanju LWR (dinamički model prometnih tokova nazvan prema njegovim tvorcima, Lightwill, Whitham, Richards) modela koji je parcijalna homogena diferencijalna jednačba prvog reda. Višerežimski modeli kao Ediev, dvorežimski linarni, modificirani Greenbergov i trorežimski model prikladnije opisuju prometne tokove, zbog više parametara koji su uključeni u njihovu formulaciju. Zbog veće točnosti opisivanja prometnih tokova razvijeni su „state of art“ modeli čiji pregled je u nastavku.

- Newellov nelinearni model

Sadrži tri parametra, a njegov zapis glasi:

$$v = v_f \left( 1 - e^{-\frac{\lambda}{v_f} \left( \frac{1}{k} - \frac{1}{k_j} \right)} \right) \quad (19)$$

Gdje je:

- $v_f$  - brzina slobodnog toka, km/h;
- $k_j$  - gustoća forsiranog toka, voz/km;
- $\lambda$  - koeficijent nagiba krivulje brzina, -;

- Del Castilliov i Benitezov model

Kao i Newellov model, sadrži tri parametra, a njegov zapis glasi:

$$v = v_f \left( 1 - e^{1 - e^{\frac{|C_j|}{v_f} \left( \frac{k_j}{k} - 1 \right)}} \right) \quad (20)$$

Gdje je:

- $v_f$  - brzina slobodnog toka, km/h;
- $k_j$  - gustoća forsiranog toka, voz/km;
- $C_j$  - kinematička brzina šok vala; km/h.

- Del Castillio model negativne snage (engl. *Del Castillio Negative Power Model*, NPM)

Kao i Newellov model, sadrži tri parametra, a njegov zapis glasi:

$$\varphi = [(v_f \rho) + (1 - \rho)^{-\omega}]^{-\frac{1}{\omega}} \quad (21)$$

Gdje je:

$$\rho = \frac{k}{k_j} \quad - \text{ omjer gustoće prometnog toka i gustoće forsiranog toka, -;}$$

$$\varphi = \frac{q}{q_0} \quad - \text{ omjer trenutnog i nazivnog protoka, -;}$$

$$v_f = -\frac{v_f}{C_j} \quad - \text{ omjer brzine prometnog toka i kinematičke brzine šok vala, -}$$

- Van Aerde model

Njegov zapis glasi:

$$k = \frac{1}{c_1 + c_3 v + \frac{c_2}{v_f - v}} \quad (22)$$

Gdje je:

$$c_1 = \frac{v_f}{k_j v_m^2} (2v_m - v_f) \quad (23)$$

$$c_2 = \frac{v_f}{k_j v_m^2} (v_f - v_m)^2 \quad (24)$$

$$c_3 = \frac{1}{q_m} - \frac{v_f}{k_j v_m^2} \quad (25)$$

Parametri u modelu su brzina slobodnog toka  $v_v$ , optimalna brzina  $v_m$ , optimalni protok  $q_m$  i gustoća forsiranog toka  $k_j$ .

- Model inteligentnog vozača (engl. *Intelligent Driver Model*, IDM)

U matematičkom zapisu nalaze se četiri parametra, a njegov zapis glasi:

$$k = \frac{1}{(s_0 + vT) \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_f} \right)^\delta \right]^{-\frac{1}{2}}} \quad (26)$$

Gdje je:

$v_f$  - brzina slobodnog toka, km/h;

$s_0$  - udaljenost vozila pri forsiranom toku, km;

$T$  - sigurnosni vremenski razmak između vozila, h;

$\delta$  - akceleracijski eksponent, -.

- Model uzdužne kontrole (engl. *Longitudinal Control Model*, LCM)

U matematičkom zapisu nalaze se četiri parametra, a glasi:

$$k = \frac{1}{(\gamma v^2 + \tau v + l) \left[ 1 - \ln \left( 1 - \frac{v}{v_f} \right) \right]} \quad (27)$$

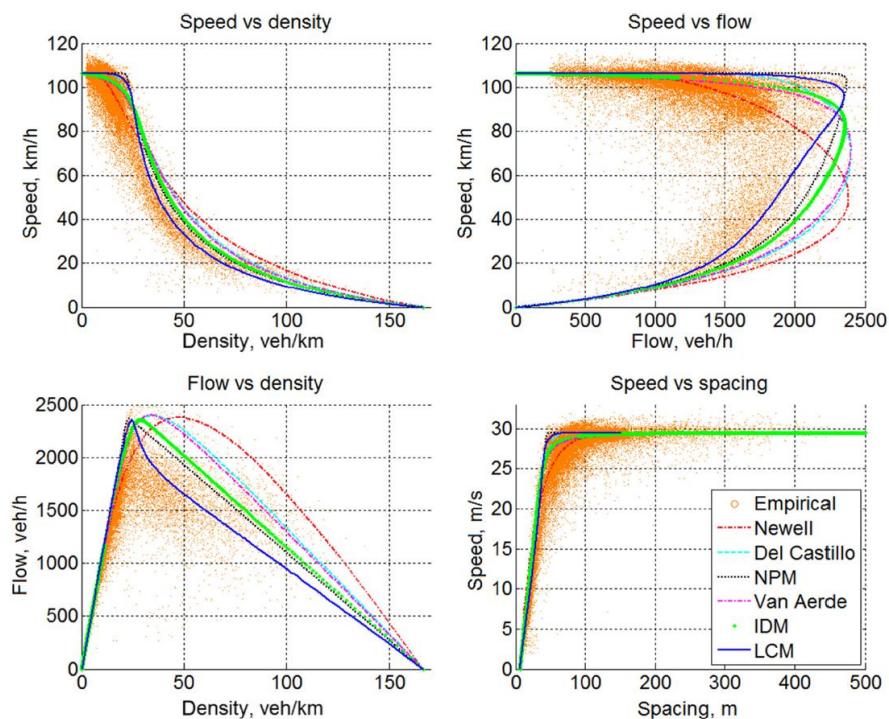
Gdje je:

- $v_f$  - brzina slobodnog toka, km/h;
- $l$  - prosječna dužina vozila u prometnom toku, m;
- $\tau$  - vrijeme reakcije, s;
- $\gamma$  - koeficijent agresije vozača u prometnom toku, s<sup>2</sup>/m.

U tablici 3 prikazani su parametri za navedene modele, a na slici 13 njihova usporedba s empirijskim podacima.

Tablica 3. Usporedba parametara „state of art“ modela prometnog toka

Naziv modela	Parametri
Newell	$v_f = 106$ km/h; $k_j = 167$ vozila/km; $\lambda = 1,25$
Del Castillo i Benitez	$v_f = 106$ km/h; $k_j = 167$ vozila/km; $C_j = 20$ km/h
NPM	$v_f = 106$ km/h; $k_j = 167$ vozila/km; $C_j = -16,56$ km/h; $\omega = 50$
Van Aerde	$v_f = 106$ km/h; $k_j = 167$ vozila/km; $v_m = 20$ km/h, $q_m = 2\,400$ vozila/h
IDM	$v_f = 106$ km/h; $s_0 = 6$ m; $T = 1,25$ s; $\delta = 15$
LCM	$v_f = 106$ km/h; $l = 6$ m; $\tau = 1,3$ s; $\gamma = -0,04$ s <sup>2</sup> /m



Slika 13. Usporedba „state of art“ modela prometnog toka [2]

### 2.4.5. Modeli prometnog toka višeg reda (diferencijalni modeli)

Osnova za sve modele prometnog toka je fizikalni zakon očuvanja mase, odnosno očuvanja ukupnog broja vozila na promatranom segmentu, koji se u matematičkom obliku zapisuje na sljedeći način.

$$\frac{\partial k(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (28)$$

U jednadžbi (28)  $k$  i  $q$  su gustoća prometnog toka i protok, koji ovise o vremenu  $t$  i razmaku slijeđena vozila  $x$ .

Zakon očuvanja ukupnog broja vozila na promatranom segmentu je najjednostavniji model prometnog toka višeg reda, jer ne koristi zakon očuvanja linearnog momenta i zakon očuvanja energije, koji da bi se opisali koriste parcijalne diferencijalne jednadžbe višeg reda. U nastavku su prikazana dva diferencijalna modela prometnog toka.

- PW model

Predložen je od strane autora Paynea i Whithama 1971. godine, a sastoji se od sustava dvije diferencijalne jednadžbe. Prva je zakon očuvanja mase (odnosno ukupnog broja vozila na promatranom segmentu), a druga je Navier-Stokesova jednadžba gibanja u jednodimenzijском prostoru.

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial x} - \lambda(v - V_d(k)) - \frac{1}{k} \frac{dP}{dk} \frac{\partial k}{\partial x} \end{cases} \quad (29)$$

Gdje je  $v$  brzina prometnog toka,  $V_e(k)$  je ekvilibrijalna relacija brzina-gustoća,  $P(k)$  prometni pritisak, a  $\lambda$  koeficijent koji se utvrđuje eksperimentalno.

- Treiberov model

Makroskopski model prometnog toka izvede iz kinetičke jednadžbe idealnog plina, a sastoji se od parcijalnih diferencijalnih jednadžbi za gustoću i prosječnu brzinu, zbog brzine rješavanja numeričke integracije stotine kilometara prometne mreže mogu biti simulirani u stvarnom vremenu (engl. *real time simulation*).

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = \lambda(v - V_d(k)) + \frac{1}{k} \frac{\partial k A v^2}{\partial x} - \frac{V_e A(k)}{\tau A(k_j)} \left( \frac{k_\alpha T v}{1 - \frac{k_\alpha}{k_j}} \right)^2 B(\delta_v) \end{cases} \quad (30)$$

Gdje je  $A = A(k)$  funkcija ovisna o gustoći,  $k_\alpha$  je gustoća u točki  $x_\alpha$ , a  $B(\delta_v)$  makroskopska funkcija i  $V_e(k)$  ekvilibrijalna brzina-gustoća relacija.

### 3. GEOPROMETNE ZNAČAJKE MAKROPODRUČJA RASKRIŽJA

Grad Zagreb glavni je grad Republike Hrvatske i samostalna, jedinstvena teritorijalna i upravna jedinica sa statusom županije, a graniči s Krapinsko-zagorskom i Zagrebačkom županijom. Nalazi se na 15°59' istočne zemljopisne dužine i 45°49' sjeverne geografske širine (koordinate opservatorija na Griču). Prema popisu stanovništva iz 2011. godine ima 790 017 stanovnika na površini od 641,32 km<sup>2</sup> čini 1,13 % Republike Hrvatske, s 370 505 registriranih vozila na dan 31. prosinca 2017. [3]

Grad Zagreb nalazi se na Mediteranskom koridoru (čvorište nekadašnjeg paneuropskog cestovnog i željezničkog koridora): X-(Salzburg – Ljubljana – Zagreb – Thessaloniki), i Vb (Rijeka – Zagreb – Budimpešta). Zagreb je na spoju dvaju ključnih hrvatskih i europskih prostora, podunavskog i jadranskog. Ujedno ima središnji položaj u odnosu na tri sekundarna hrvatska središta, Rijeku, Split i Osijek i na većinu središta nižega reda. [4]

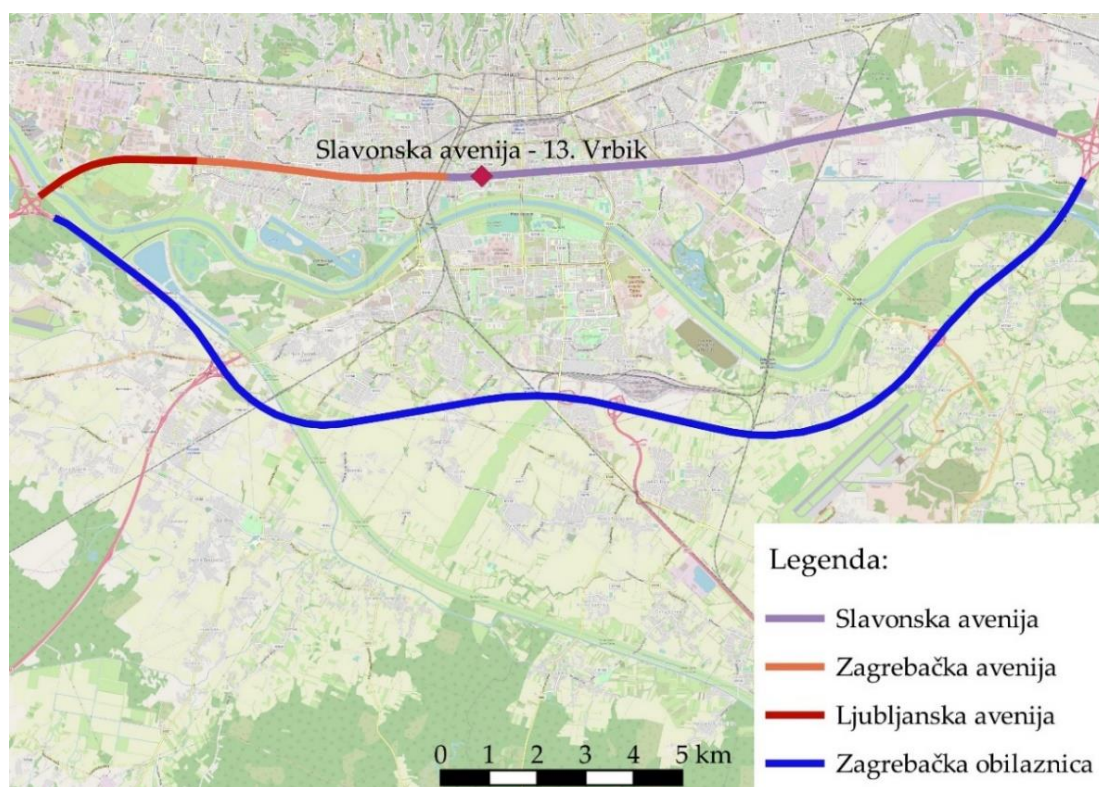
Analizom geoprometnih značajki makro područja raskrižja utvrđuje se uloga raskrižja na području predmetne prometnice (Slavonska avenija). Slavonska avenija dio je prometnica koje povezuju čvorove Ivanja Reka i Jankomir, odnosno istočni i zapadni ulaza u Grad Zagreb. Predmetna prometnica, uz Ulicu Grada Vukovara, jedan je od glavnih longitudinalnih pravaca koji prolazi kroz Grad.

Prometnica se sastoji od tri dijela:

- Slavonske avenije (od čvora Ivanja Reka do Savske ceste, duljine 13 183 m);
- Zagrebačke avenije (od Savske ceste od Ulice Svilkovići, duljine 8 100 m);
- Ljubljanska avenija (od Ulice Svilkovići do čvora Jankomir, duljine 3 010 m).
- Čvorovi Ivanja Reka i Jankomir, povezani su još i Zagrebačkom obilaznicom (E65).

Na slici 14 prikazane su dionice Slavonska – Zagrebačka – Ljubljanska i Zagrebačka obilaznica. Na slici 15 prikazan je položaj Zagreba u odnosu na autoceste koje prolaze njegovom neposrednom blizinom.

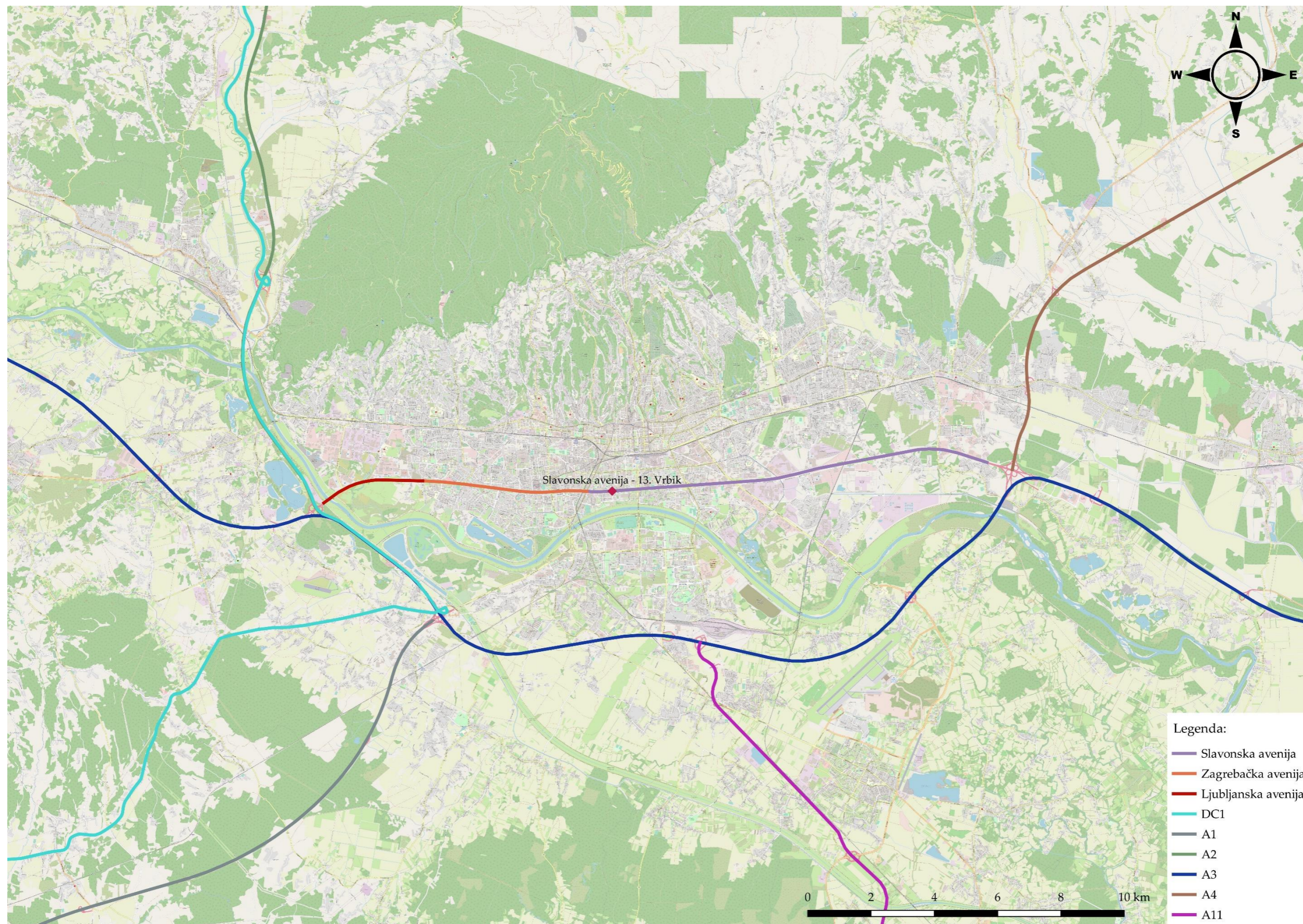
Grad Zagreb nalazi se na čvorištu prometnih (cestovnih i željezničkih) koridora Republike Hrvatske i Europe. Takav položaj omogućuje mu gradnju logističkih centara i skladišta robe i tereta radi daljnjeg transporta.



Slika 14. Gravitacijsko područje

Grad Zagreb zbog povoljnog geoprometnog položaja povezan je sa svim važnim prometnicama koje determiniraju prometni sustav Hrvatske, a to su:

- DC1 od međunarodnog graničnog prijelaza Macelj sa Slovenijom, preko Krapine, Zagreba, Karlovca, Gračaca, Knina, Sinja do Splita ukupne duljine 421 km;
- Autocesta A1 od Zagreba preko Karlovca, Gospića, Zadra, Šibenika, Splita do Ploča, ukupne duljine 483 km, preko autocesta A1 Zagreb je povezan s Rijekom i autocestom A6 (primorsko-goranska autocesta);
- Autocesta A2 (Zagorska autocesta) od međunarodnog graničnog prijelaza Macelj sa Slovenijom, preko Krapine do čvora Jankomir, ukupne duljine 61 km;
- Autocesta A3 (Posavska autocesta) od međunarodnog graničnog prijelaza Bregana, preko Zagreba, Slavenskog Broda, do međunarodnog graničnog prijelaza Bajakovo, sa Srbijom, čiji je Slavonska avenije i promatrano raskrižje dio;
- Autocesta A4 (Varaždinska autocesta) od međunarodnog graničnog prijelaza Goričana s Mađarskom prema Zagrebu (do čvora Ivanja Reka) ukupne duljine 97 km;
- Autocesta A11 (Sisačka autocesta) od Zagreba preko Velike Gorice do Siska, ukupna duljina nakon povezivanja sa Siskom bit će 48 km.

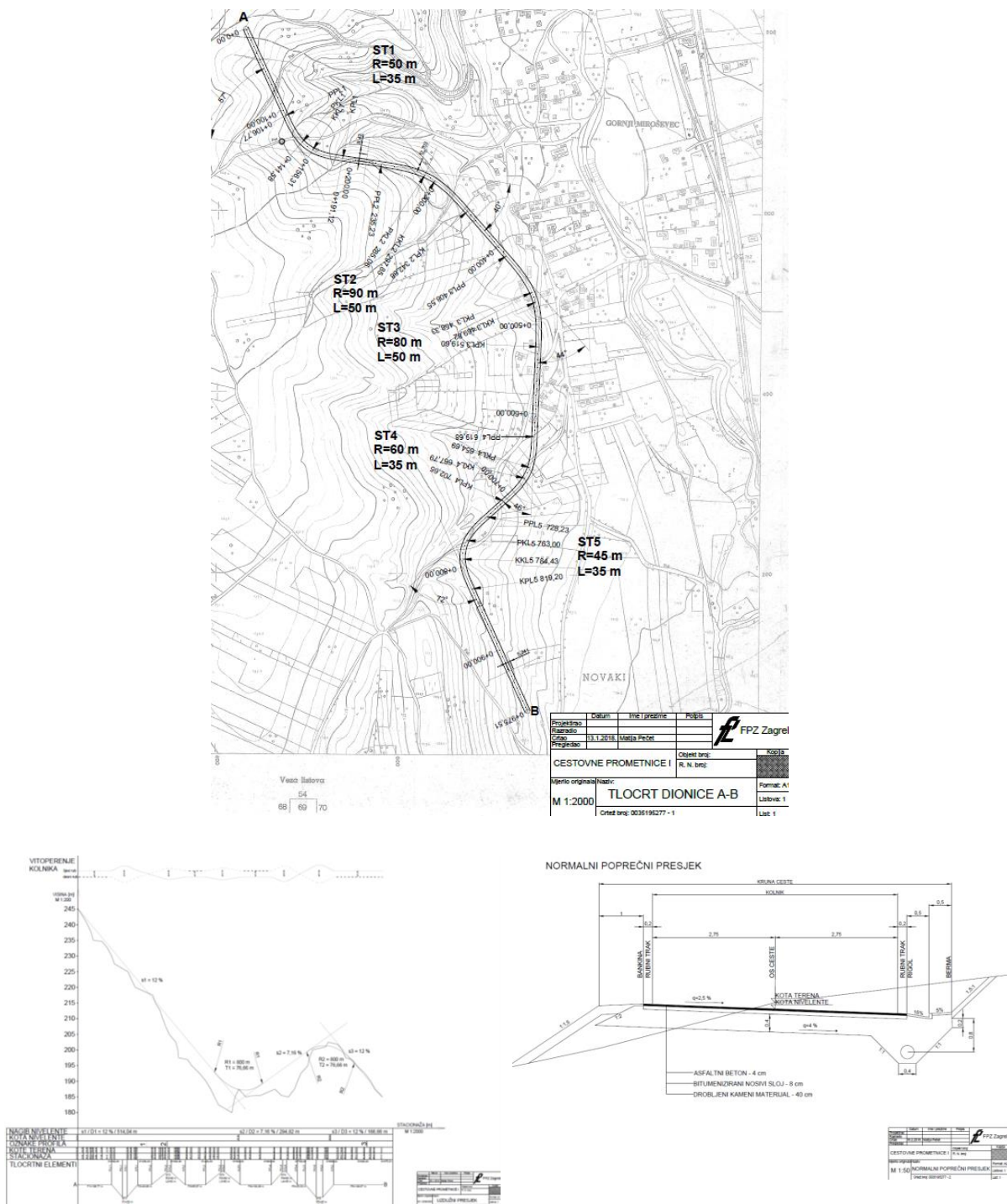


Slika 15. Geoprometni položaj Grada Zagreba



## 4. ANALIZA PROMETNO OBLIKOVNIH ELEMENATA PROMETNICA

Karakteristike određene prometnice moguće je opisati uz pomoć tlocrtne i vertikalne projekcije, te poprečnim presjekom. Na slici 16 prikazana je tlocrtna projekcija prometnice, njezina vertikalna projekcija kao i karakterističan poprečni presjek (desno dolje).



Slika 16. Karakteristike prometnice

## 4.1. Tloctni elementi ceste

Pod tloctne elemente ceste spadaju pravci, kružni lukovi i prijelaznice. Kružni lukovi i prijelaznice zajedno čine tloctne zavoje.

### 4.1.1. *Pravac*

Uobičajeno je mišljenje da pravac čini najbolji izbor za trasu ceste jer je tada put između polazišta i odredišta najkraći, no u praksi se to pokazalo netočnim iz više razloga:

- Vožnja dugim pravcima zamara vozača i postaje monotona;
- Otežano je procjenjivanje udaljenosti između vozila i potencijalnih prepreka;
- Dugi pravci mogu uzrokovati neharmoničnost trase, zbog nemogućnosti prilagodbe pravca da se prilagodi terenu;
- Tijekom mimoilaženja na pravcu noću dolazi do povećanja opasnosti zbog mogućnosti zasljepljenja vozača iz suprotnog smjera.

Poprečni nagib kolnika u pravcu koristi se radi odvodnje oborinskih voda, kolnik u pravilu ima jednostrani nagib, ali može biti dvostrani, dvostrani sa zaobljenom srednjom trećinom i dvostrani parabolični nagib. Jednostrani nagib najčešće se primjenjuje na prometnicama sa suvremenim zastorom s vrijednosti  $q_{\min} = 2,5 \%$ . [5]

### 4.1.2. *Kružni luk*

Zavoji su izvedeni pomoću kružnih lukova i trebaju biti pažljivo projektirati kako ne bi smanjivali sigurnost prometna, stoga je potrebno da radijus zavoja bude što veći. Povećanjem polumjera zavoja smanjuju se poprečne sile koje djeluju na vozilo tijekom prolaska kroz kružni luk i nastoje ga izbaciti iz putanje. Pri projektiranju poželjno je da zavoji budu protusmjerni (desni se nastavlja na lijevi i obratno) zbog dobre preglednosti. Također pri projektiranju je potrebno paziti da radijus zavoja bude harmoniziran, odnosno ne dopušta se naizmjenično nizanje zavoja velikim i malih promjera. Unutar zavoja kolnik mora imati jednostrani nagib prema središtu zakrivljenosti kako bi se smanjio utjecaj poprječnih sila. Minimalni nagib jednak je jednostranom nagibu u pravcu  $q_{\min} = 2,5 \%$ , dok je maksimalni nagib  $q_{\max} = 7,0 \%$ . [5]

### 4.1.3. *Prijelaznica*

Tijekom prolaska kroz kružni luk, na vozilo konstantno djeluje centrifugalna sila. U trenutku kada vozilo dolazi iz pravca i kružni luk počinje, dolazi do udara centrifugalne sile koji se manifestira kao bočni trzaj. Kako bi se taj udar smanjio prije kružnog luka radi se prijelaznica, krivulja koja postupno prelazi iz pravca u kružni luk, kako bi centrifugalna sila postepeno rasla i smanjio se utjecaj bočnog udara. Kao optimalnom krivuljom za prijelaznicu, pokazala se klotoida. [5]

## 4.2. Vertikalni elementi ceste

Nakon što su karakteristični poprečni presjeci i tlocrtni elementi trase određeni, potrebno je odrediti i vertikalne elemente prometnice. Visinski tok trase utvrđuje se linijskim projekcijama u bočnoj vertikalnoj ravnini. Bitni oblikovni elementi koji se određuju su vertikalna zaobljenja i vitoperenje kolnika. [5]

### 4.2.1. Uzdužni nagib

Određen je nagibom nivelete  $s$  u osi kolnika. Niveleta se sastoji od pravaca koji predstavljaju uspone i padove i kružnica na mjestu prijeloma pravaca. Uzdužni nagib izražava se u visinskoj razlici na 100 m trase. Zaobljenje prijeloma nivelete može biti konveksno ili konkavno i bez prijelaznica, a za određivanje radijusa zaobljenja mjerodavna je zaustavna preglednost i udobnost vožnje. [5]

### 4.2.2. Vitoperenje kolnika

Vitoperenje kolnika predstavlja stalnu promjenu poprečnog nagiba kolnika po prijelaznici. Poprečni nagibi kolnika određeni su kosinom vitoperernja, a uvjetovani su voznodinamičkim i optičkim svojstvima prometnice te zahtjevom učinkovite odvodnje površine vode s prometnice.

## 4.3. Raskrižja

Prema Zakonu o sigurnosti prometna na cestama [6] raskrižje je površina na kojoj se križaju ili spajaju dvije ceste ili više cesta, a i šira prometna površina (trgovi i sl.) koja nastaje križanjem, odnosno spajanjem cesta.

Raskrižje Slavonske avenije – 13. Vrbik – Ulice Josipa Marohnića spada u kategorije raskrižja u razini s četiri privoza. Satelitska snimka raskrižja nalazi se na slici 17.



Slika 17. Satelitska snimka raskrižja [7]

## 5. ANALIZA PROMETNIH NESREĆA UZROKOVANIH USLIJED VREMENA SLIJEDA I RAZMAKA VOZILA

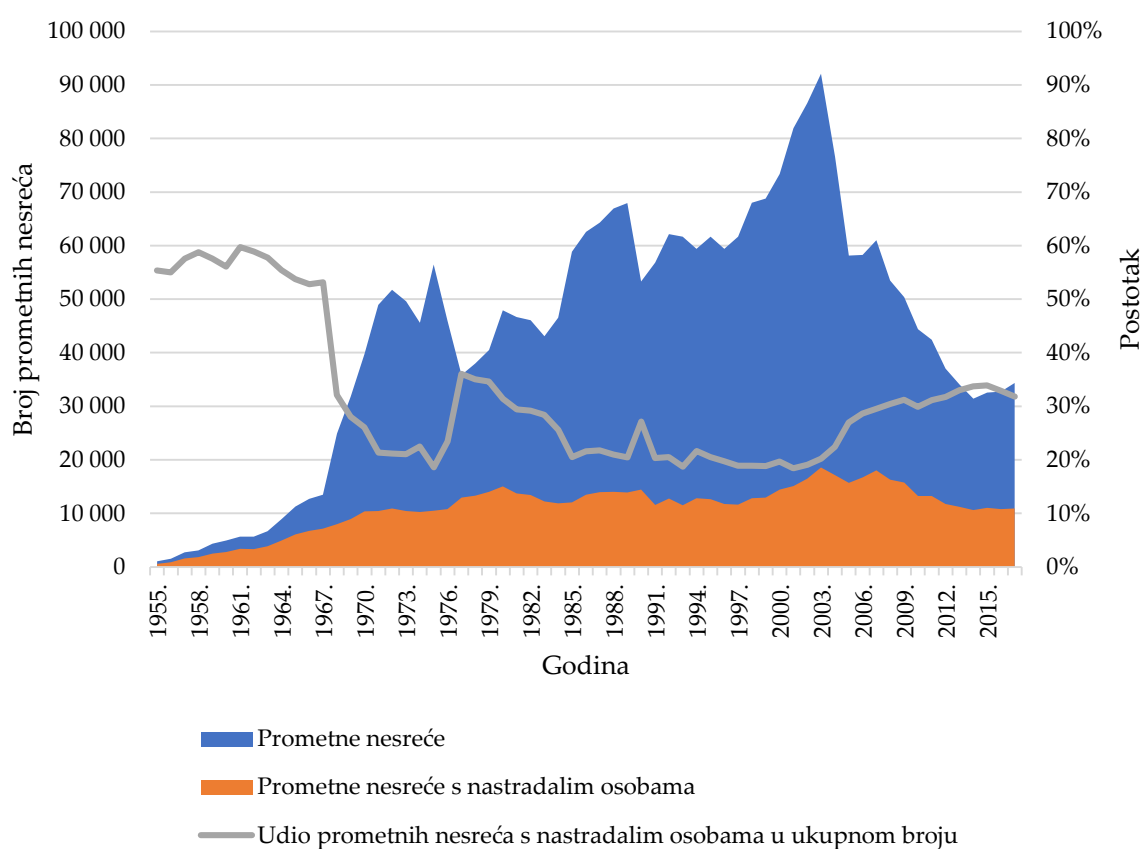
Prema Zakonu o sigurnosti prometa na cestama [6] prometna nesreća je događaj na cesti, izazvan kršenjem prometnih propisa, u kojem je sudjelovalo najmanje jedno vozilo u pokretu i u kojem je najmanje jedna osoba ozlijeđena ili poginula, ili u roku od 30 dana preminula od posljedica te prometne nesreće ili je izazvana materijalna šteta. Nije prometna nesreća kada je radno vozilo, radno stroj, motokultivator, traktor ili zaprežno vozilo, krećući se po nerazvrstanoj cesti ili pri obavljanju radova u pokretu, sletjelo s nerazvrstane ceste ili se prevrnulo ili udarilo u neku prirodnu prepreku, a pritom ne sudjeluje drugo vozilo ili pješak i kada tim događajem drugoj osobi nije prouzročena šteta.

Prema istraživanju [8] svaka prometna nesreća sa sobom nosi određene materijalne posljedice koje se mogu izraziti u novčanim vrijednostima ovisno o težini prometne nesreće i prometnici na kojoj se prometna nesreća dogodila. Troškovi koji nastaju uslijed prometne nesreće su liječnički troškovi sudionika u nesreći, policijska intervencija, materijalna šteta, izgubljena dobit i dr. Procjena troškova prometnih nesreća prikazana je u tablici 4.

Tablica 4. Procijenjeni troškovi prometnih nesreća [8]

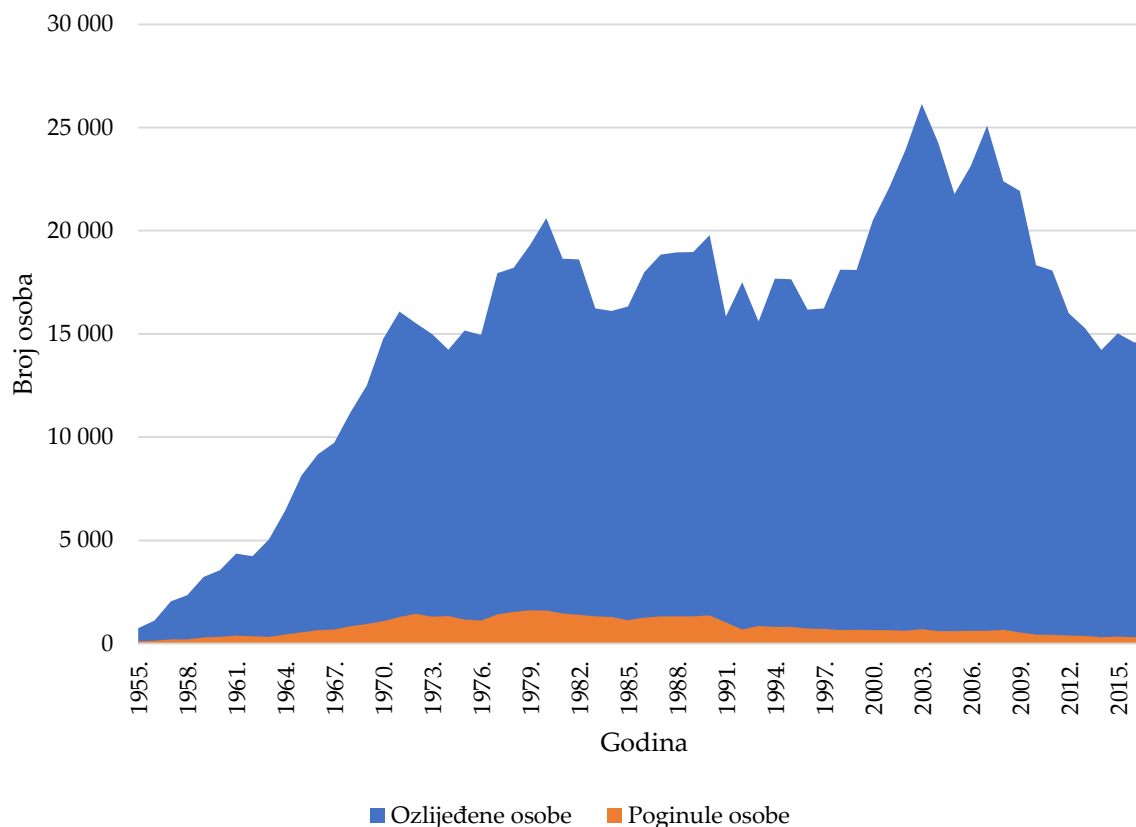
Sve vrijednosti u EUR	Ceste izvan naselja		Ceste u naselju	
	Autocesta	Državna cesta	Glavna ulica	Sporodna ulica
Nesreće s poginulim i teško ozlijeđenim osobama	295 000	265 000	155 000	130 000
Nesreće s lako ozlijeđenim osobama	30 500	18 000	12 500	10 000
Nesreće s teško ozlijeđenim osobama	105 000	110 000	44 000	38 000
Nesreće s velikom materijalnom štetom	18 000	12 500	11 500	11 500
Nesreće s malom materijalnom štetom	10 500	6 500	6 500	6 000

U razdoblju od 2007. do 2017. godine na prometnicama u Republici Hrvatskoj se u prosjeku dogodilo 39 294 prometnih nesreća, a u 31,8 % prometnih nesreća stradavale su osobe. Godišnje je u prometu prosječno stradavalo 17 456 osoba, a od toga je 79,6 % s lakšim ozljedama. 18,0 % osoba zadobilo je teške ozlijede, dok je 2,4 % poginulo, odnosno 411 osoba godišnje. Na cestama se od 1955. godine desilo 2 736 012, od čega je u 692 433 prometnih nesreća došlo do stradavanja osoba, odnosno u 25,3 % prometnih nesreća. Na slici 18 prikazan je broj prometnih nesreća, prometne nesreće s nastradalim osobama i njihov udio u ukupnom broju prometnih nesreća. U Prilogu 1. Analiza prometnih nesreća nalaze se tablice s podacima, dok je u radu dan samo njihov grafički prikaz. [9]



Slika 18. Prometne nesreće i nesreće s nastradalima od 1955. do 2017. godine

U 2 736 012 prometnih nesreća od 1955. do 2017. godine ozlijeđeno je ukupno 956 404 osoba, dok su život izgubile ukupno 50 542 osobe, odnosno grad veličina Karlovca ili Siska. Na slici 19 prikazan je broj ozlijeđenih i poginulih osoba u navedenom razdoblju.



Slika 19. Prometne nesreće s ozlijeđenim osobama i poginule osobe od 1955. do 2017. godine

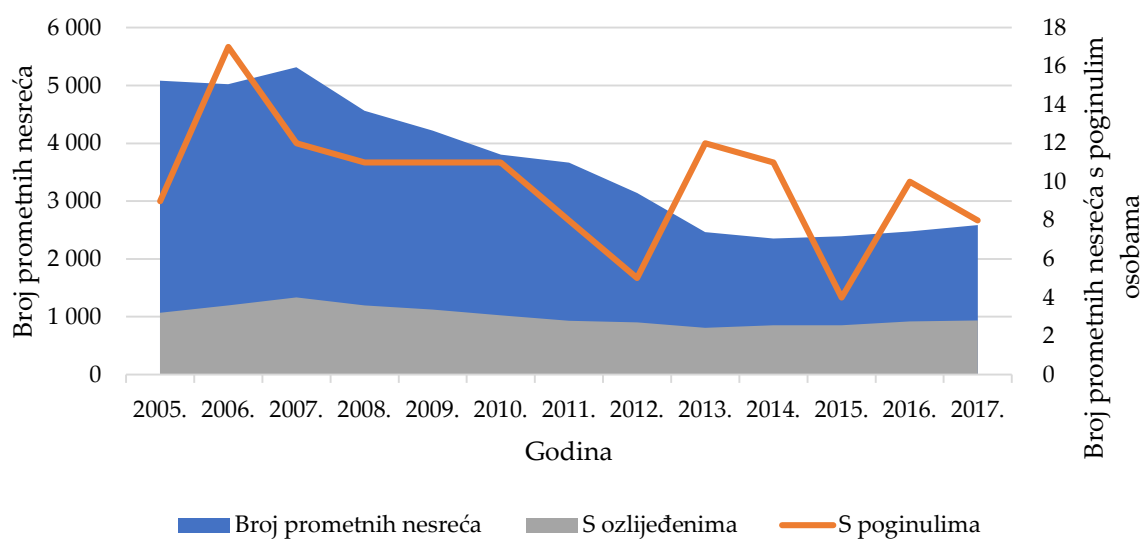
### 5.1. Uzroci prometnih nesreća

Vožnja na nedovoljnoj udaljenosti, zakašnjelo uočavanje opasnosti i naglo usporavanje pogreške su vozača koje su uzroci analiziranih prometnih nesreća u razdoblju od 2005. do 2017. godine.

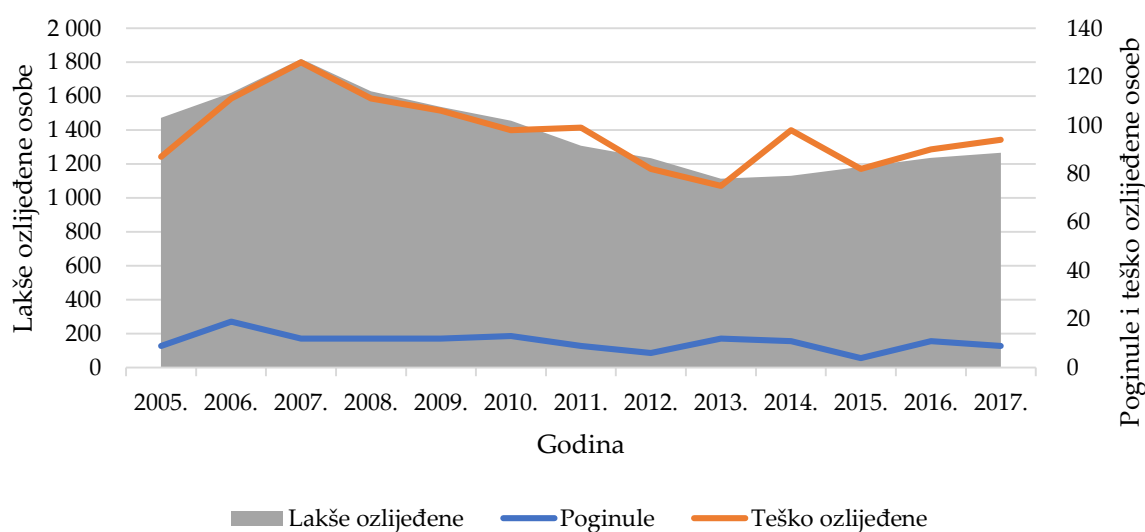
Tijekom vožnje vozila u slijedu opasnosti pretpostavljaju vozači koji ne održavaju sigurnosni razmak između vozila i time u opasnost dovode sudionike u prometu zbog smanjene preglednosti koja može dovesti do zakašnjelog uočavanja opasnosti. Ako se ne održava dovoljan razmak slijeda vozila i vozač vozila ispred krene naglo usporavati, nedovoljni razmak između vozila može uzrokovati prometnu nesreću. Prometne nesreće pri vožnji u slijedu česta su pojava na prometnicama u Republici Hrvatskoj s vrlo teškim posljedicama. Prema Zakonu o sigurnosti prometna na cestama [6], Članak 109., vozač je dužan održavati potreban razmak kad se kreće iza drugog vozila, tako da ne ugrožava sigurnost prometa i novčanom kaznom od

500,00 kuna kaznit će se za prekršaj vozač koji ne drži potreban razmak kad se kreće iza drugog vozila.

U navedenom razdoblju vožnja na nedovoljnoj udaljenosti uzrokovala je 47 091 prometnih nesreća, od kojih je 129 s poginulim osobama i 13 410 s teško ozlijeđenim osobama. Poginulo je ukupno 139 osoba, 1 259 je teško ozlijeđeno, dok su lakše ozlijeđe zadobile 18 007 osoba. Na slici 20 prikazan je broj prometnih nesreća uzrokovanih vožnjom na nedovoljnoj udaljenosti s ozlijeđenim i poginulim osobama. Na slici 21 prikazan je broj lakše ozlijeđenih, teško ozlijeđenih i poginulih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim vožnjom na nedovoljnoj udaljenosti.

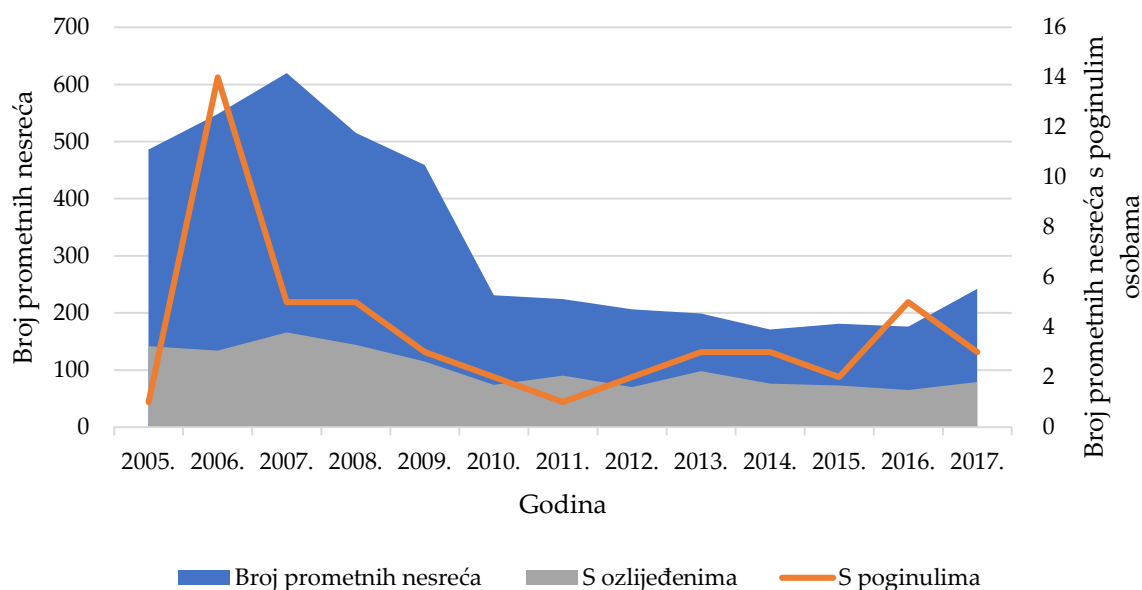


Slika 20. Broj prometnih nesreća uzrokovanih vožnjom na nedovoljnoj udaljenosti s ozlijeđenim i poginulim osobama

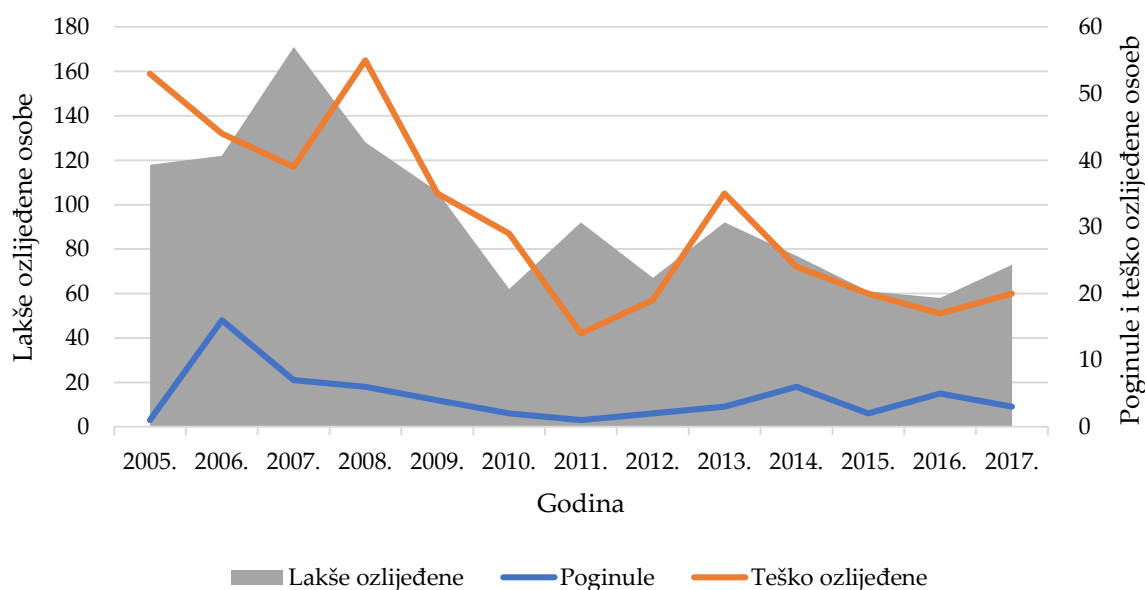


Slika 21. Broj lakše ozlijeđenih, teško ozlijeđenih i poginulih osoba u nesrećama uzrokovanim nedovoljnom udaljenosti između vozila

U navedenom razdoblju zakašnjelo uočavanje opasnosti uzrokovalo je 4 258 prometnih nesreća, od kojih je 49 s poginulim osobama i 1 326 s teško ozlijeđenim osobama. Poginulo je ukupno 58 osoba, 404 je teško ozlijeđeno, dok su lakše ozlijeđe zadobile 1 227 osoba. Na slici 22 prikazan je broj prometnih nesreća uzrokovanih zakašnjelim uočavanjem opasnosti s ozlijeđenim i poginulim osobama. Na slici 23 prikazan je broj lakše ozlijeđenih, teško ozlijeđenih i poginulih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim zakašnjelim uočavanjem opasnosti.



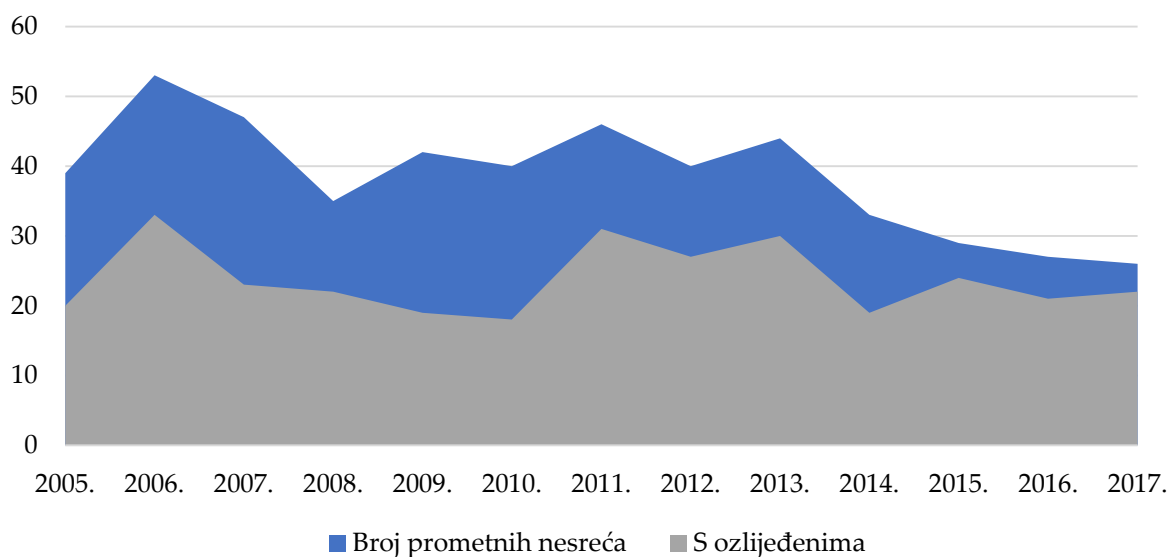
Slika 22. Broj prometnih nesreća uzrokovanih zakašnjelim uočavanjem opasnosti s ozlijeđenim i poginulim osobama



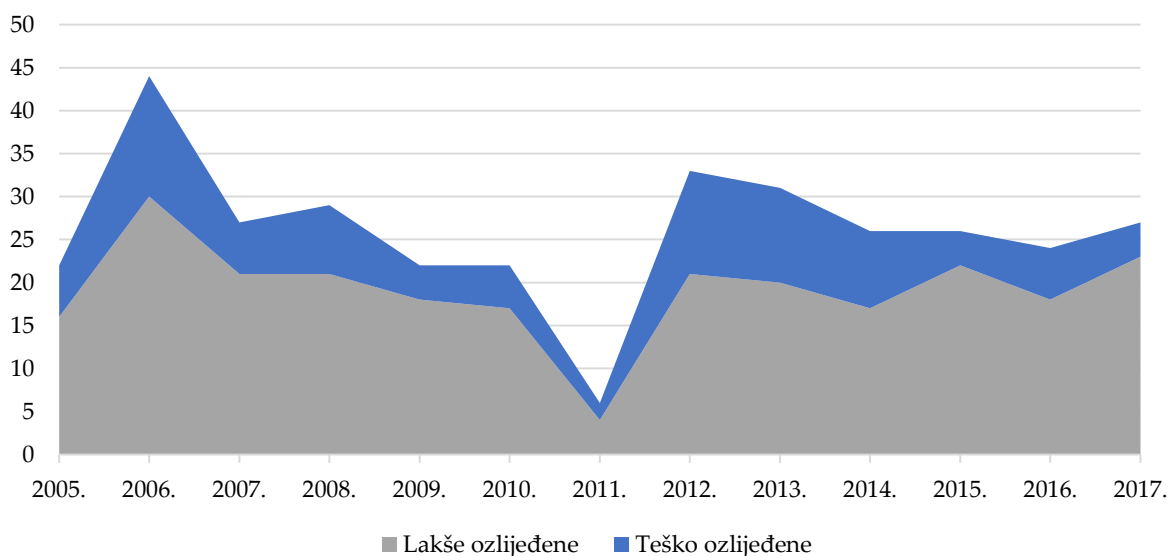
Slika 23. Broj lakše ozlijeđenih, teško ozlijeđenih i poginulih osoba u nesrećama uzrokovanim zakašnjelim uočavanjem opasnosti



U navedenom razdoblju naglo kočenje uzrokovalo je 501 prometna nesreća, u kojima nije bilo poginulih osoba, a u 309 prometnih nesreća došlo je do ozljeda. Lakše je ozlijeđeno ukupno 248 osoba, dok je teške ozlijede zadobila 91 osoba. Na slici 24 prikazan je broj prometnih nesreća uzrokovanih naglim kočenjem s ozlijeđenim osobama. Na slici 25 prikazan je broj lakše i teže ozlijeđenih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim naglim kočenjem.



Slika 24. Broj prometnih nesreća uzrokovanih naglim kočenjem s ozlijeđenim osobama



Slika 25. Broj lakše ozlijeđenih, teško ozlijeđenih i poginulih osoba u nesrećama uzrokovanim zakašnjelim uočavanjem opasnosti

Analiza prometnih nesreća na predmetnom raskrižju nije provedena zbog nedostupnosti podataka o istima.

## 6. ANALIZA VREMENA SLIJEDA PROMETNIH TOKOVA NA ISTOČNOM PRIVOZU

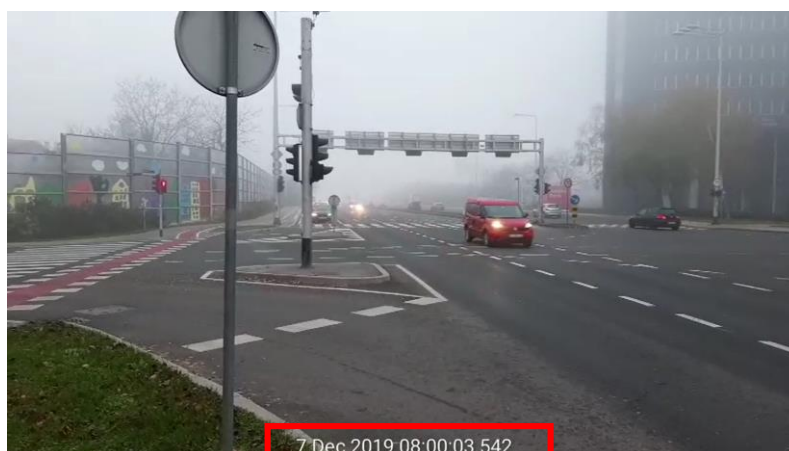
Analiza vremena slijeda prometnih tokova bazirana je na osnovnim parametrima prometnog toka a koji su opisani su u poglavlju 2. diplomskog rada. Temeljem toga obavljena je analiza vremena slijeda prometnih tokova istočnog privoza predmetnog raskrižja kako bi se utvrdila stvarna slika odvijanja prometnih tokova i predložile mjere za poboljšanje odvijanja prometnih tokova.

### 6.1. Prikupljanje podataka

Postupak prikupljanja podataka može se podijeliti u četiri osnovne faze:

- Izbor lokacije i vremena snimanja;
- Snimanje prometnih tokova;
- Analiza prometnih tokova;
- Statistička analiza prikupljenih podataka.

Prometni tokovi snimani su 07. prosinca 2019. (subota) i 24. prosinca 2019. (utorak).

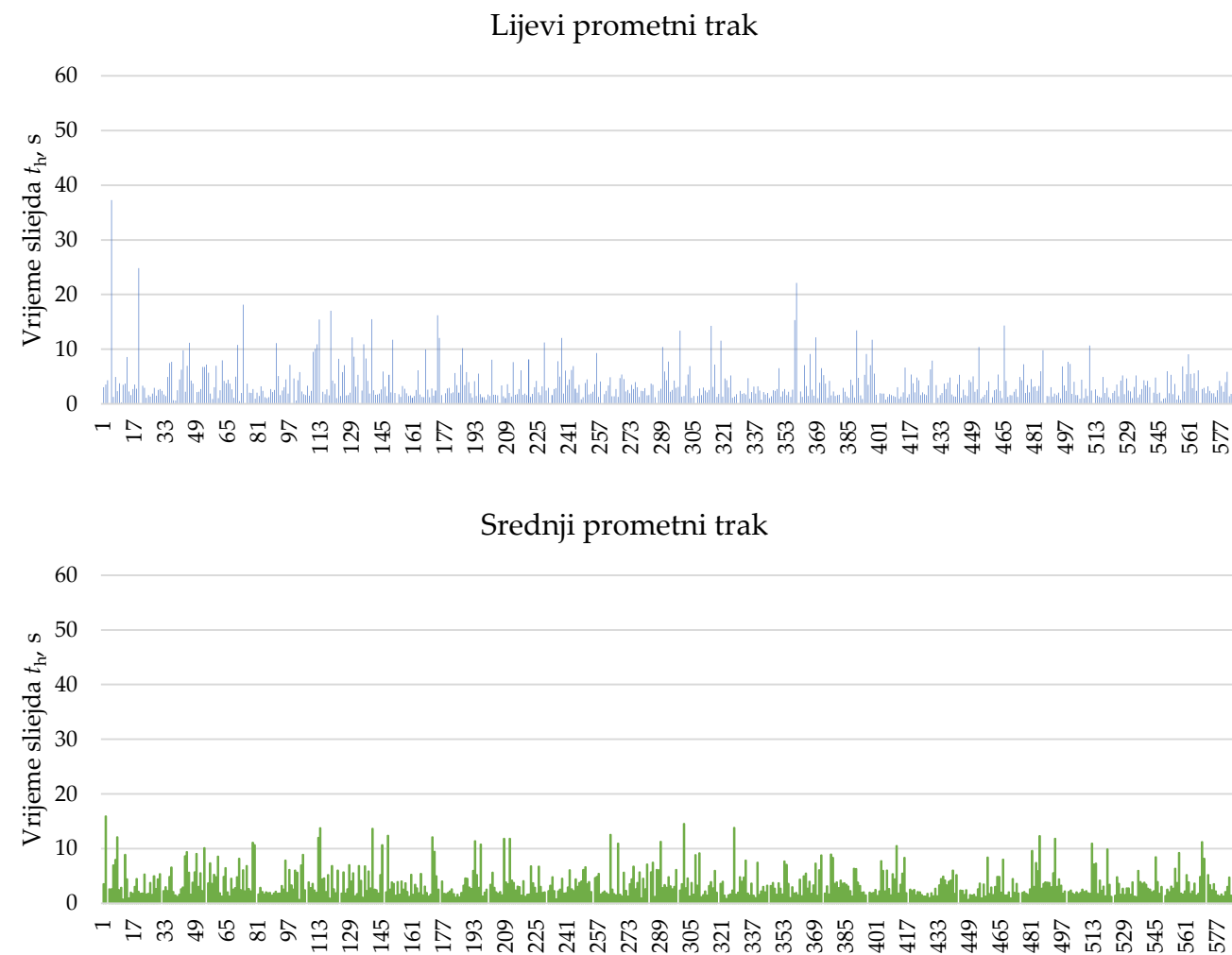


Slika 26. Datumi snimanja prometnih tokova

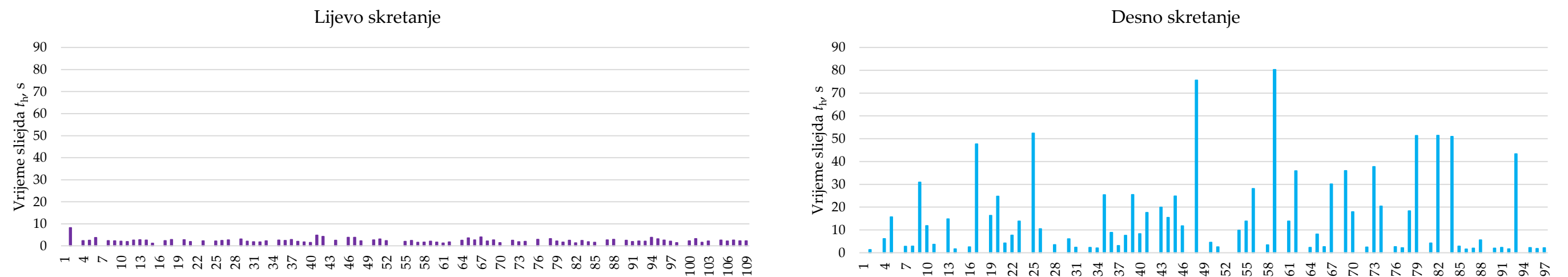
### 6.1.1. Brojanje prometnih tokova(07. prosinac 2019.)

Vremena slijeda vozila izmjerena su iz snimki i prikazana na slici 27, a 5-minutni protoci na slici 28.

#### PROLAZNI PROMETNI TRAKOVI



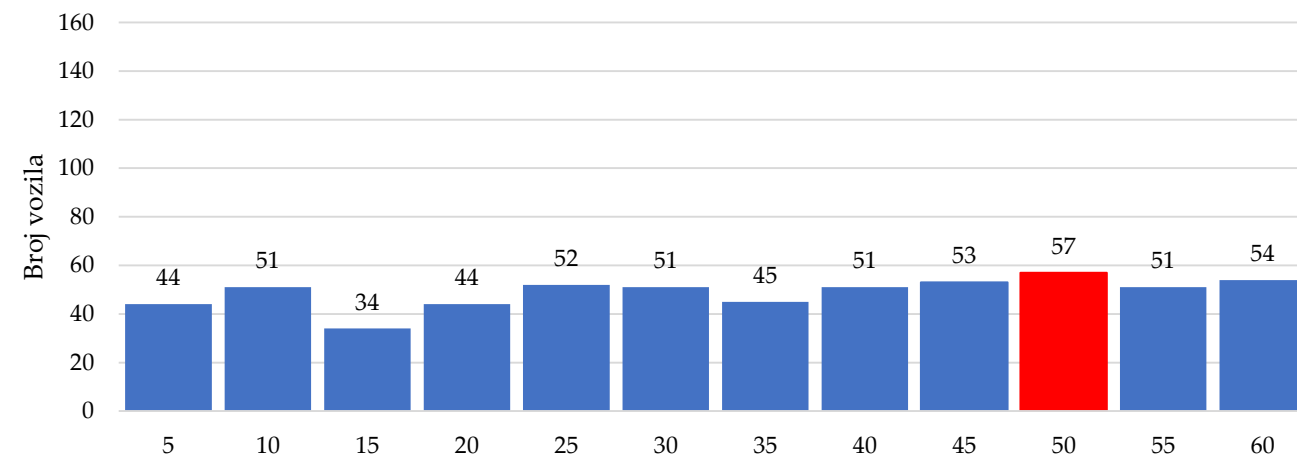
#### PROMETNI TRAKOVI ZA SKRETANJE



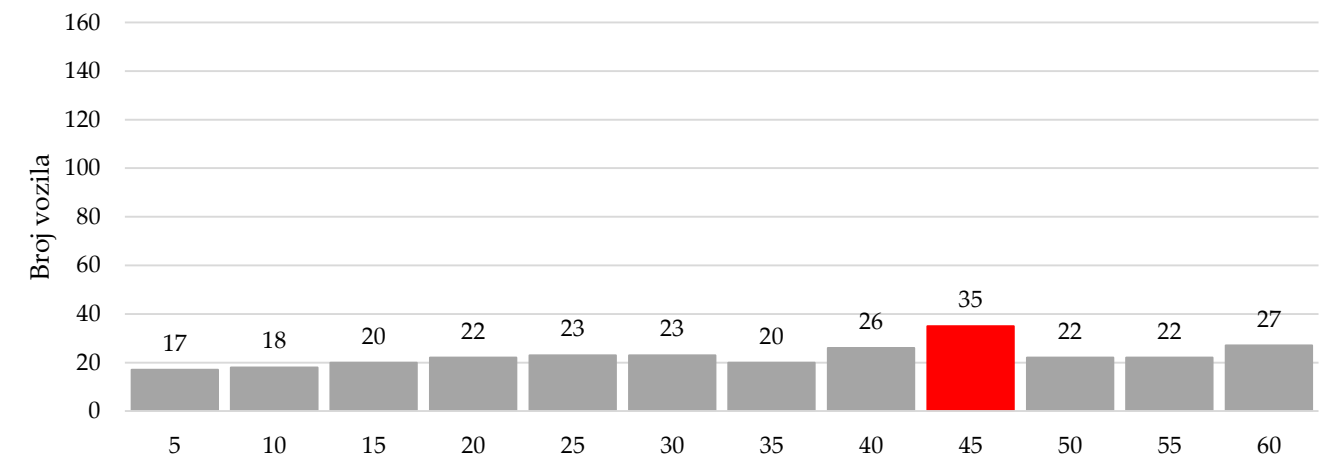
Slika 27. Vremena slijeda (07. prosinac 2019.)

## PROLAZNI PROMETNI TRAKOVI

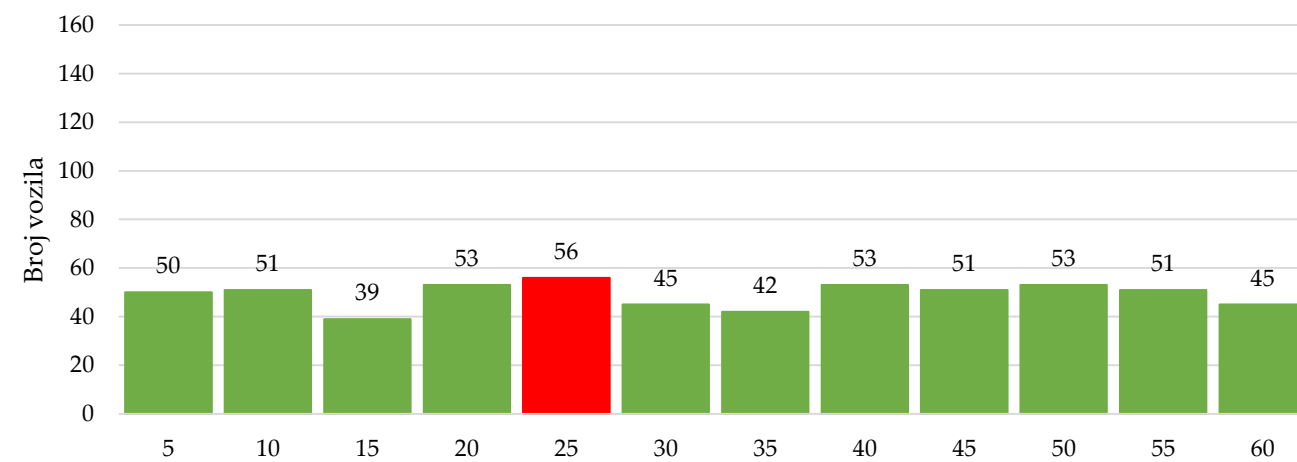
Lijevi prometni trak



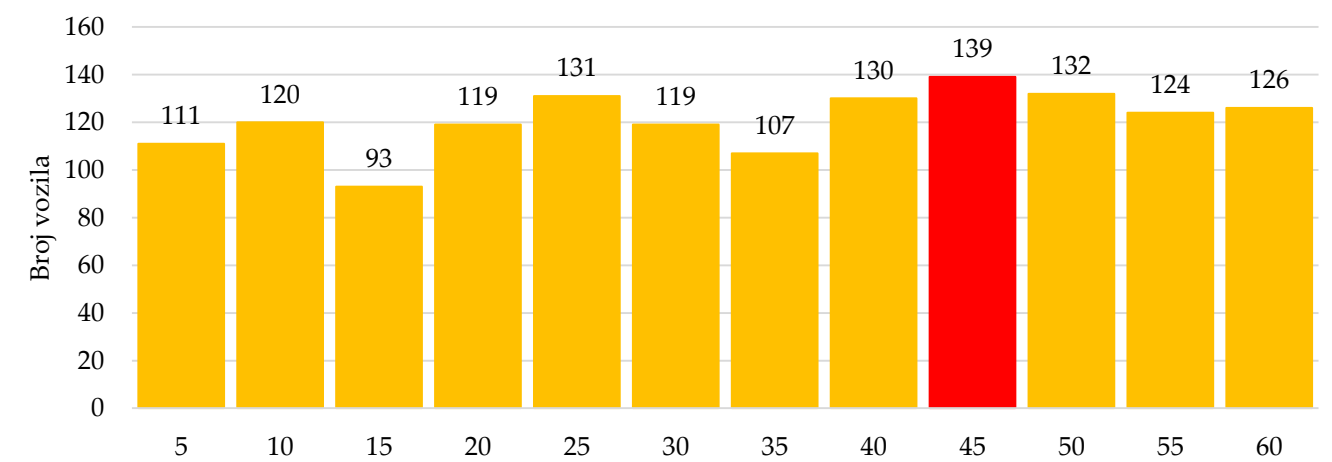
Desni prometni trak



Srednji prometni trak

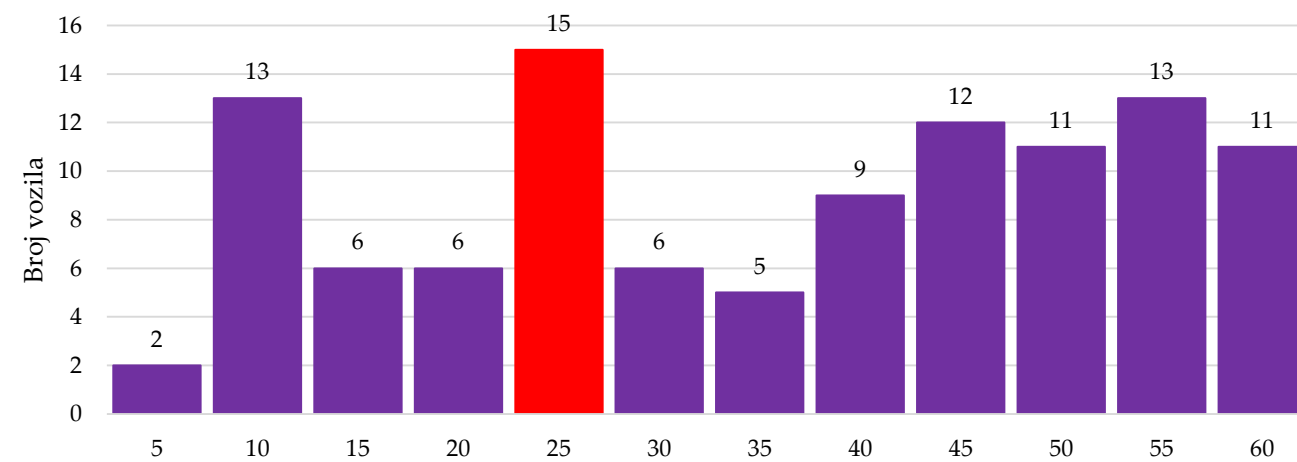


Privoz

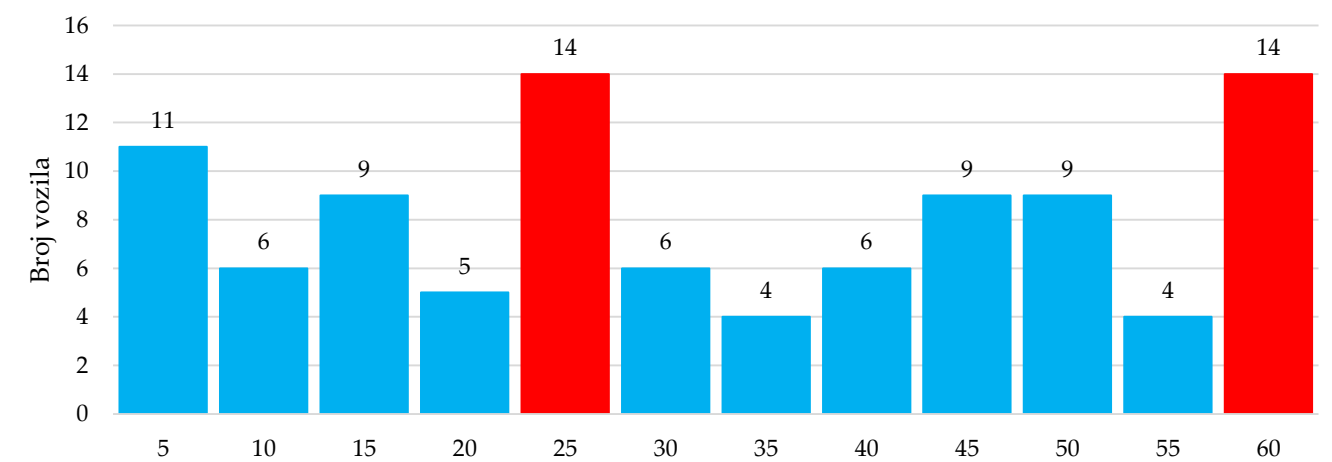


## PROMETNI TRAKOVI ZA SKRETANJE

Lijevo skretanje



Desno skretanje

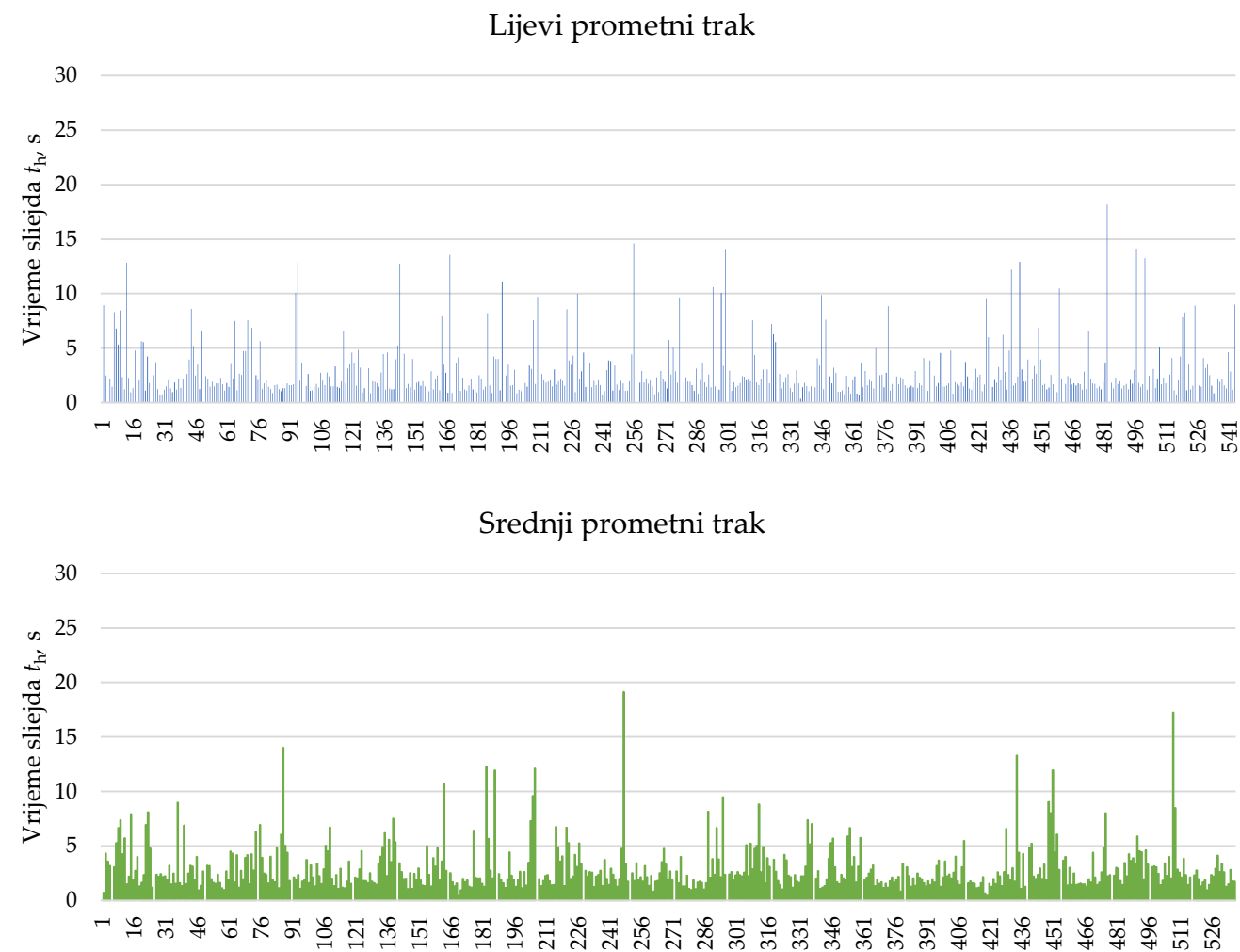


Slika 28. 5-minutni protoci vozila (07. prosinac 2019.)

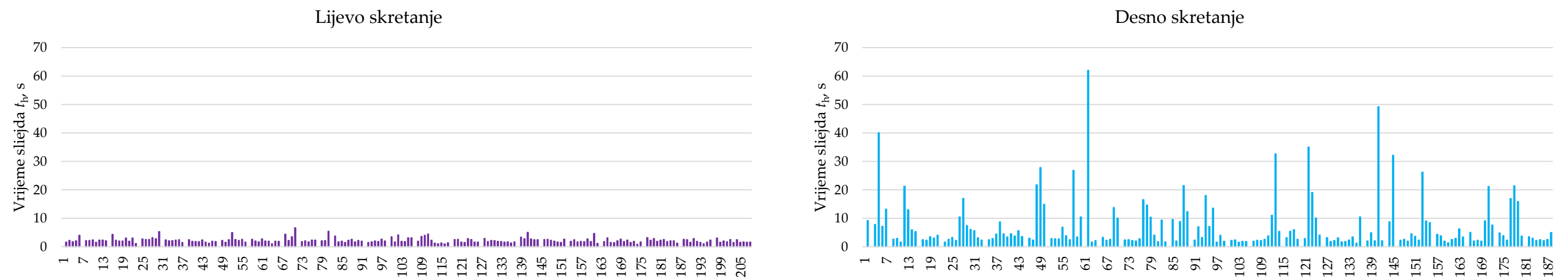
### 6.1.2. Brojanje prometnih tokova(24. prosinac 2019.)

Vremena slijeda vozila izmjerena su iz snimki i prikazana na slici 29, a 5-minutni protoci na slici 30.

#### PROLAZNI PROMETNI TRAKOVI

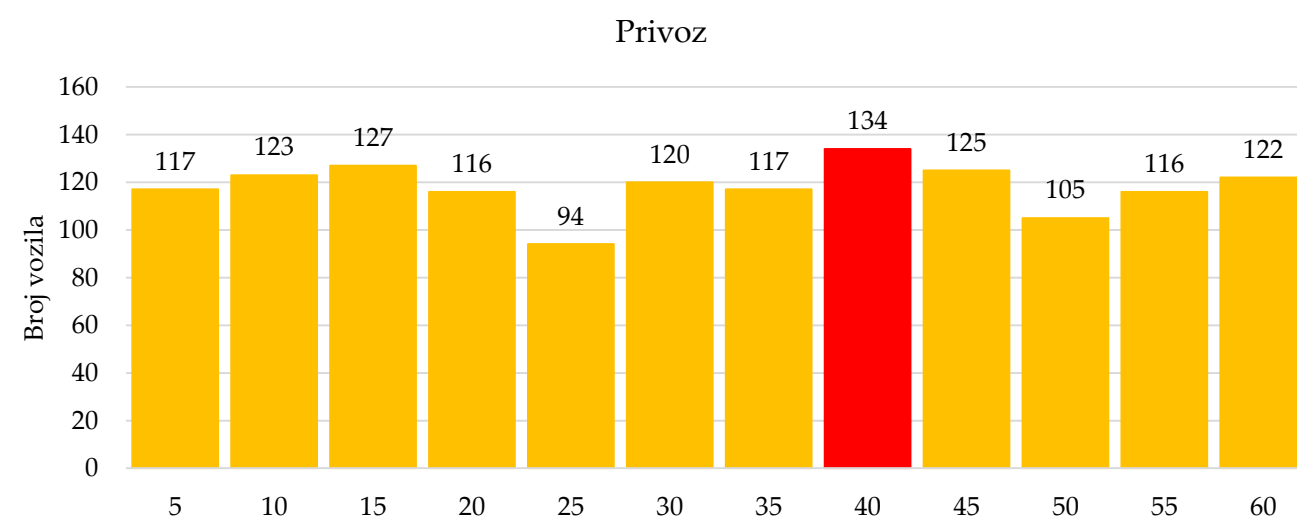
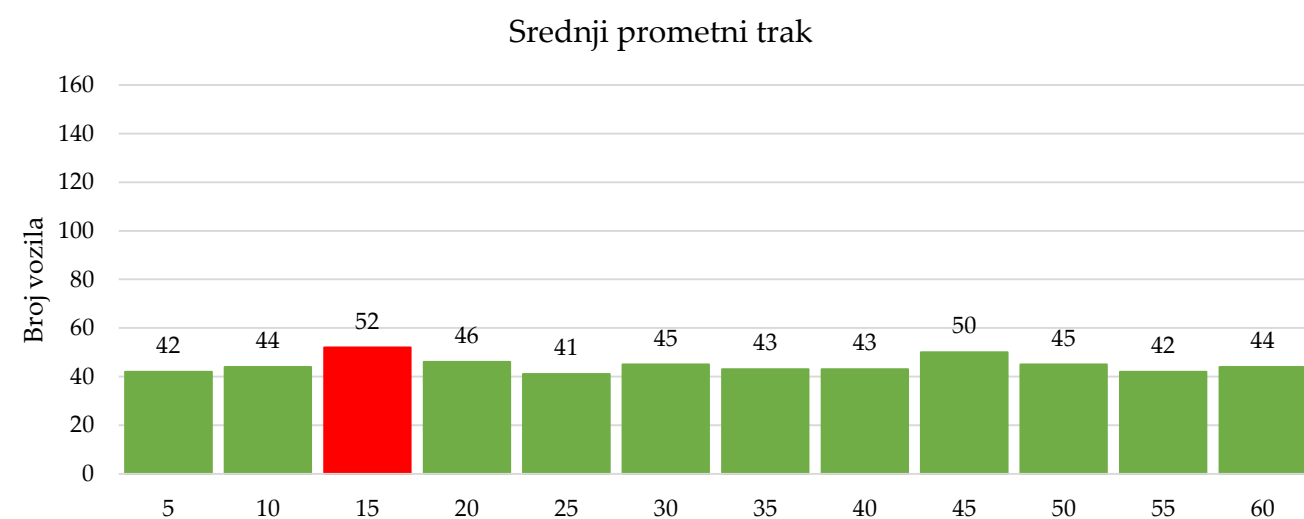
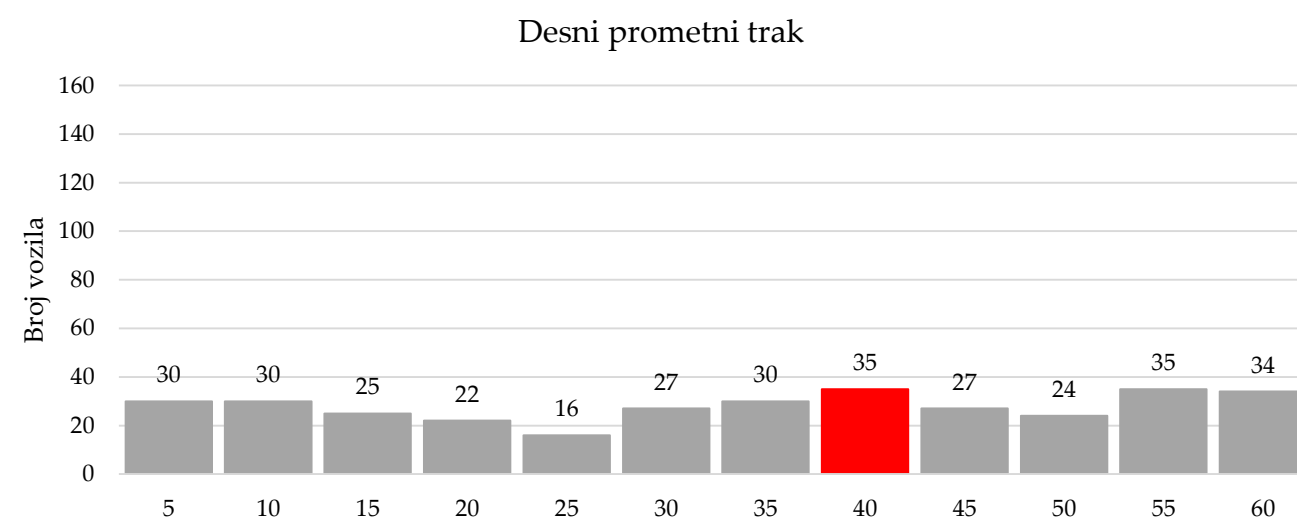
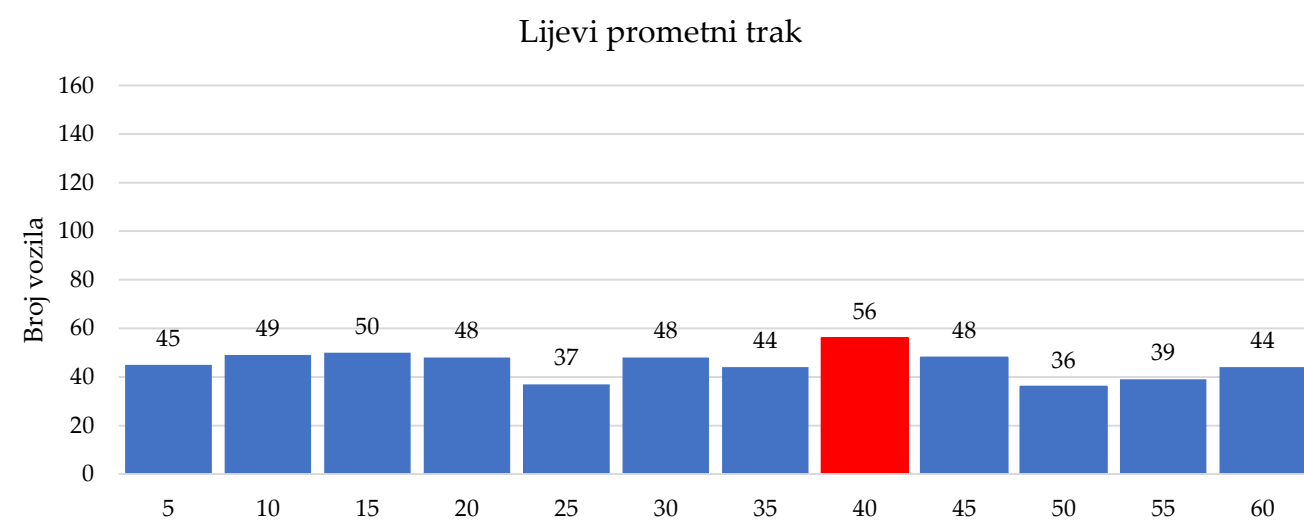


#### PROMETNI TRAKOVI ZA SKRETANJE

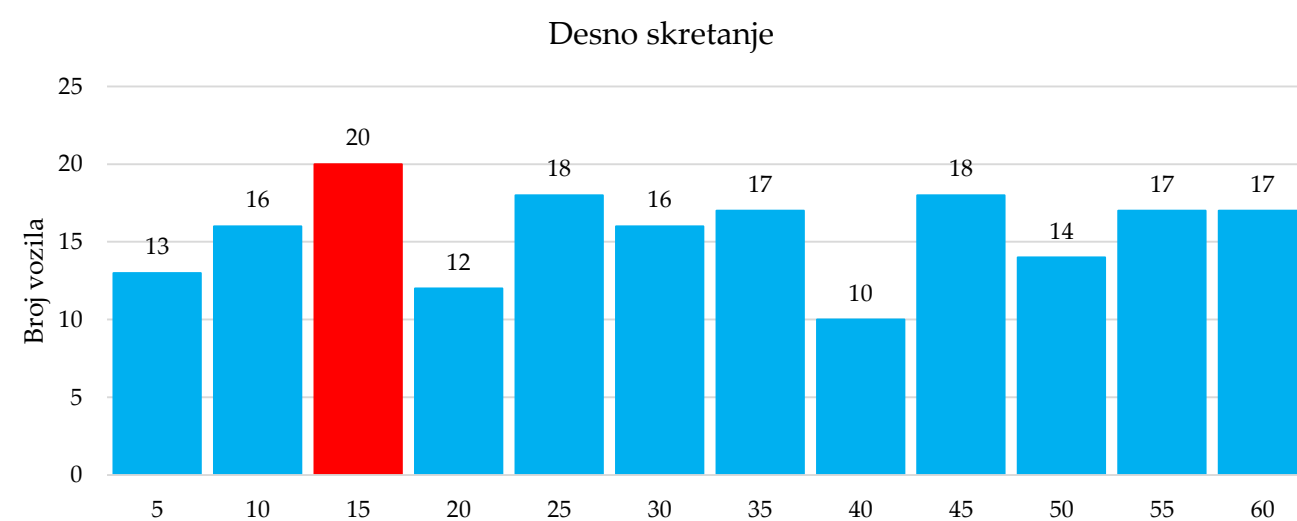
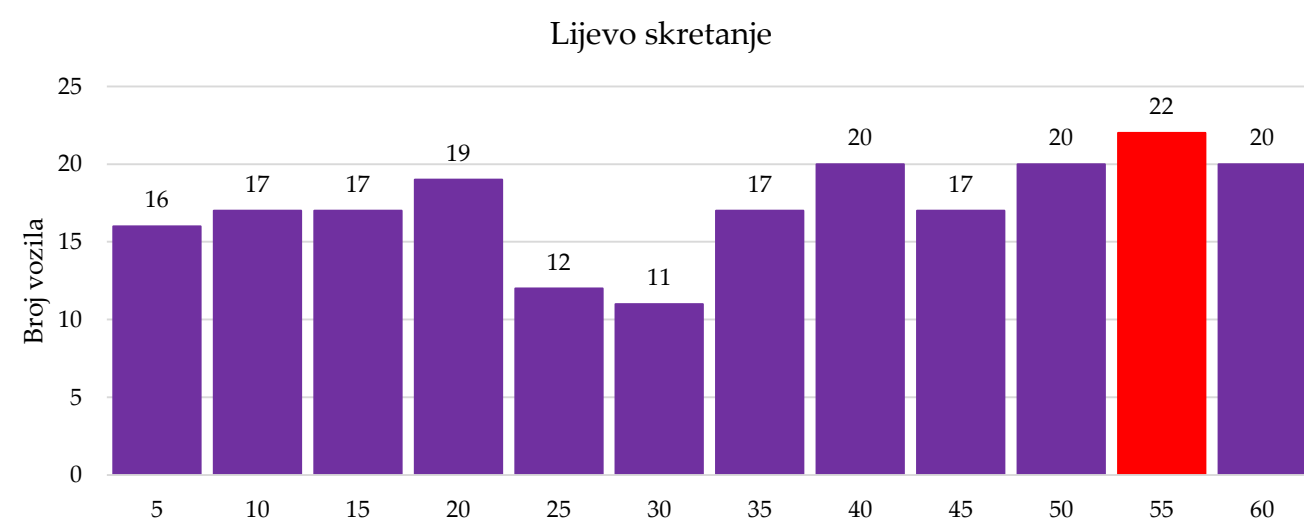


Slika 29. Vremena slijeda (24. prosinac 2019.)

PROLAZNI PROMETNI TRAKOVI



PROMETNI TRAKOVI ZA SKRETANJE



Slika 30. 5-minutni protoci vozila (24. prosinac 2019.)

Zbog nepoznavanja potpunog signalnog plana za raskižje, proračun se provodi samo za prolazne trakove.

Kako bi se utvrdilo u kojem razdoblju dolazi do zagušenja grupe trakova za ravno istočnog privoza, obavljena su brojanja prometnih tokova u 5-minutnim intervalima. Mjerodavni protok za se računa prema jednadžbi (31), proračun je proveden za 07. prosinac 2019., a za 24. prosinac 2019. prikazani su rezultati.

$$q_{MJ} = 12q_{5_{\max}} \quad (31)$$

Mjerodavni protok po trkovima i za grupu trakova prikazan je u jednadžbi (32).

$$\begin{aligned} q_{MJ_1} &= 12q_{5_1 \max} = 12 \cdot 57 = 684 \text{ voz/h} \\ q_{MJ_2} &= 12q_{5_2 \max} = 12 \cdot 56 = 672 \text{ voz/h} \\ q_{MJ_3} &= 12q_{5_3 \max} = 12 \cdot 35 = 420 \text{ voz/h} \\ q_{MJ_4} &= 12q_{5_4 \max} = 12 \cdot 139 = 1\,668 \text{ voz/h} \end{aligned} \quad (32)$$

Faktor vršnog sata predstavlja neravnomjernost protoka u odnosu na mjerodavni protok, a računa se prema jednadžbi (33).

$$FVS = \frac{q_{UK}}{q_{MJ}} \quad (33)$$

Faktor vršnog sata po trkovima i za grupu trakova prikazan je u jednadžbi (34).

$$\begin{aligned} FVS_1 &= \frac{q_{UK_1}}{q_{MJ_1}} = \frac{587}{684} = 0,858 \\ FVS_2 &= \frac{q_{UK_2}}{q_{MJ_2}} = \frac{589}{672} = 0,876 \\ FVS_3 &= \frac{q_{UK_3}}{q_{MJ_3}} = \frac{275}{420} = 0,655 \\ FVS_L &= \frac{q_{UK_L}}{q_{MJ_L}} = \frac{1\,451}{1\,668} = 0,870 \end{aligned} \quad (34)$$

Mjerodavni protok po trkovima i za grupu trakova (24. prosinac 2019.).

$$\begin{aligned} q_{MJ_1} &= 672 \text{ voz/h} \\ q_{MJ_2} &= 624 \text{ voz/h} \\ q_{MJ_3} &= 420 \text{ voz/h} \\ q_{MJ_4} &= 1\,608 \text{ voz/h} \end{aligned} \quad (35)$$

Faktor vršnog sata po trkovima i za grupu trakova (24. prosinac 2019.).

$$\begin{aligned} FVS_1 &= 0,810 \\ FVS_2 &= 0,861 \\ FVS_3 &= 0,798 \\ FVS_L &= 0,881 \end{aligned} \quad (36)$$

## 6.2. Statistička analiza

U nastavku je prikazana statistička analiza podataka i grafički prikazi rezultata. U svim proračunima indeks 1 odnosi se na lijevi prometni trak, indeks 2 na srednji prometni trak, indeks 3 na desni prometni trak, a indeks L na grupu trakova za ravno istočnog privoza raskrižja. Izračun svih vrijednosti kao primjer prikazan je za 07. prosinac, dok su za 24. prosinac prikazani samo rezultati.

### 6.2.1. Grupiranje podataka, proračun apsolutnih i relativnih frekvencija

Grupiranjem vrijednosti pomoću Sturjerovim pravila utvrđuje se razdioba frekvencija i pomoću grupiranih vrijednosti utvrđene su apsolutne frekvencije svakog promatranog razreda. Prikupljeni podaci o intervalima slijeda grupiraju se u razrede jednake širine. Broj razreda određuje se Sturjerovim pravilom prikazanim u jednadžbi (37).

$$k = 1 + 3,322 \log N \quad (37)$$

Gdje je:

- $k$  - broj razreda, -;
- $N$  - Broj elemenata u skupu, -.

Nakon utvrđivanja broja razreda određuje se njihova širina prema jednadžbi (38).

$$r = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k} \quad (38)$$

Gdje je:

- $x_{\max}$  - vrijednost najvećeg elementa u skupu, -;
- $x_{\min}$  - vrijednost najmanjeg elementa u skupu, -;
- $k$  - broj razreda, -.

Broj razreda određen je u jednadžbi (39), a širina razreda u jednadžbi (40).

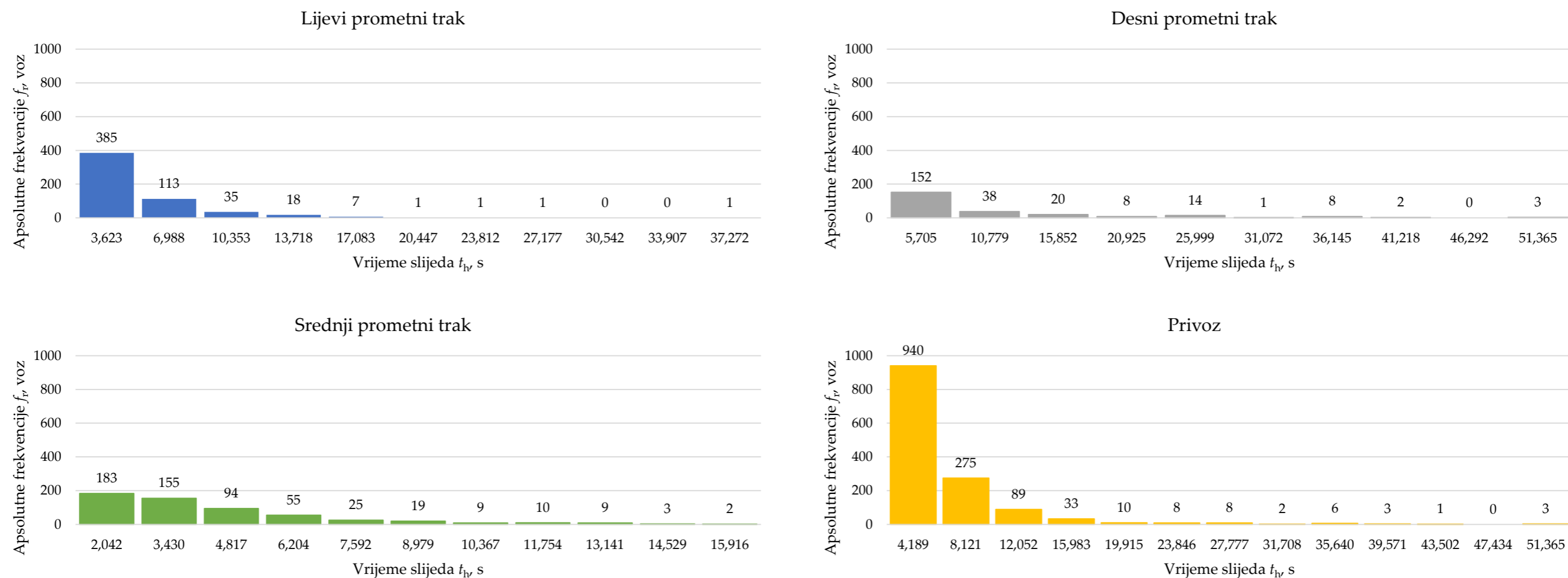
$$\begin{aligned} k_1 &= 1 + 3,322 \log N = 1 + 3,322 \log 587 = 11 \text{ razreda} \\ k_2 &= 1 + 3,322 \log N = 1 + 3,322 \log 589 = 11 \text{ razreda} \\ k_3 &= 1 + 3,322 \log N = 1 + 3,322 \log 275 = 10 \text{ razreda} \\ k_L &= 1 + 3,322 \log N = 1 + 3,322 \log 1451 = 13 \text{ razreda} \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k_1} = \frac{37,272 - 0,258}{11} = 3,365 \text{ s} \\ r_2 &= \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k_2} = \frac{15,916 - 0,655}{11} = 1,128 \text{ s} \\ r_3 &= \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k_3} = \frac{51,365 - 0,632}{10} = 5,073 \text{ s} \\ r_L &= \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k_L} = \frac{51,365 - 0,258}{13} = 3,931 \text{ s} \end{aligned} \quad (40)$$

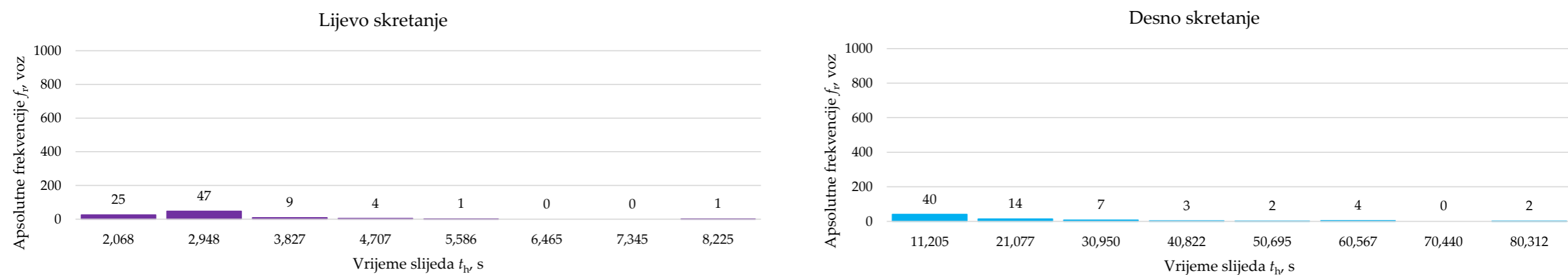


Kada su utvrđeni broj i raspon razreda i vremena slijeda grupirana, određuju se apsolutne frekvencije skupova. Apsolutna frekvencija predstavlja ukupan broj vozila i vrijednosti njihovih vremena slijeda koja se nalaze unutar određenog skupa, a prikazane su na slici 31.

### PROLAZNI PROMETNI TRAKOVI



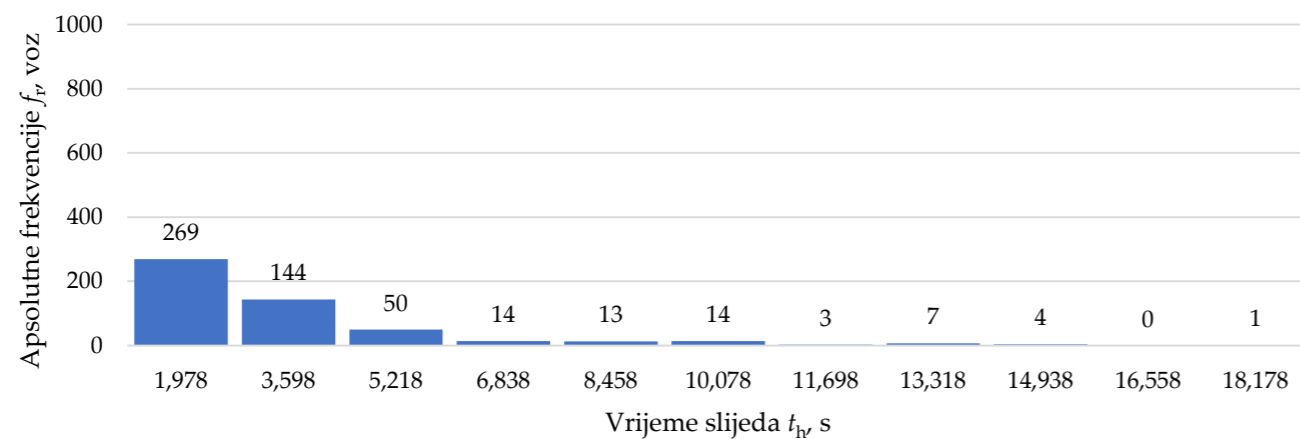
### PROMETNI TRAKOVI ZA SKRETANJE



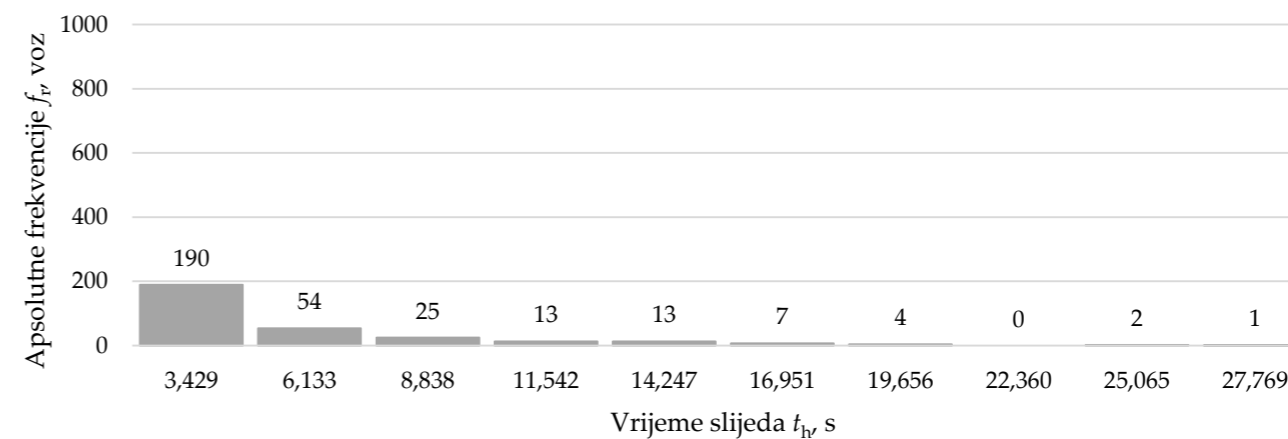
Slika 31. Apsolutne frekvencije (07. prosinac 2019.)

PROLAZNI PROMETNI TRAKOVI

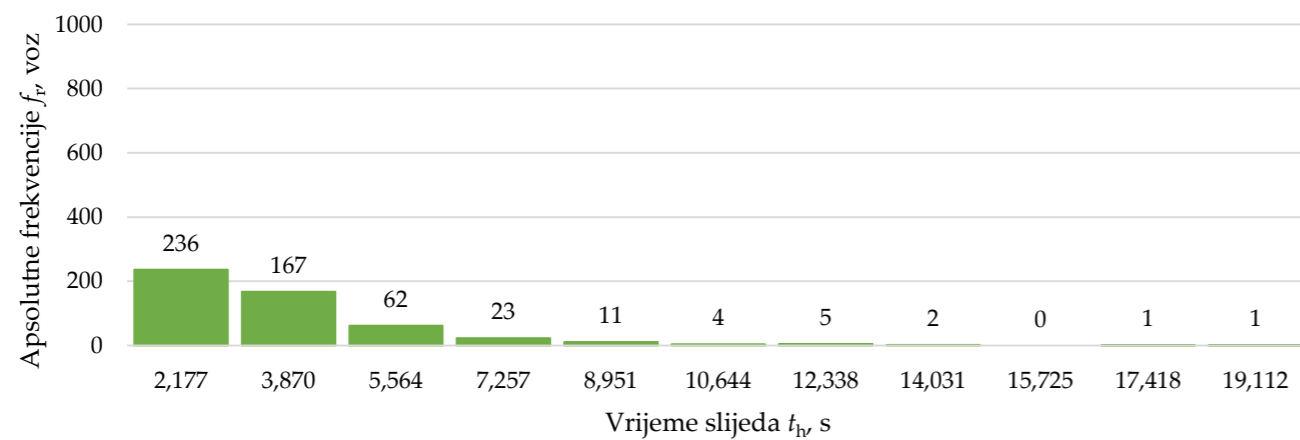
Lijevi prometni trak



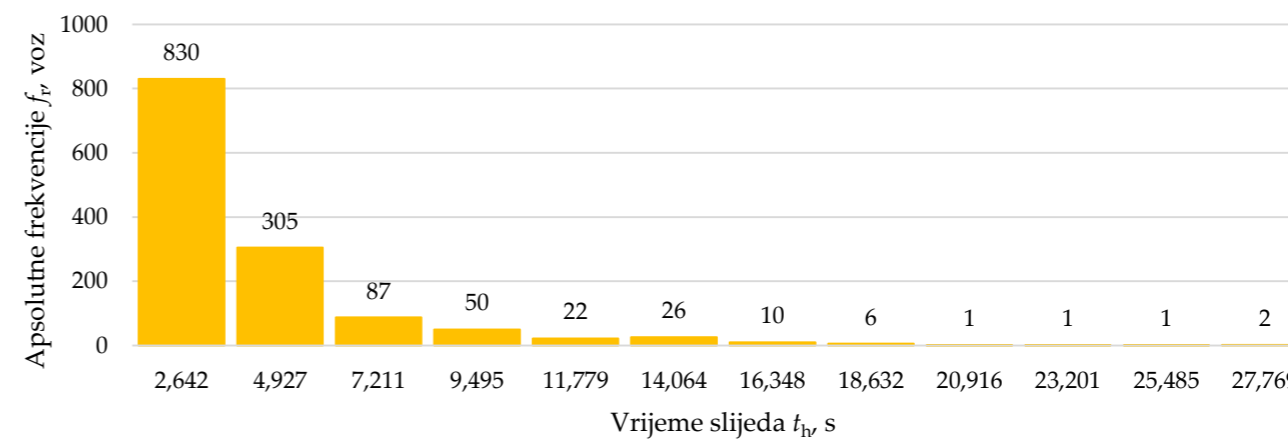
Desni prometni trak



Srednji prometni trak

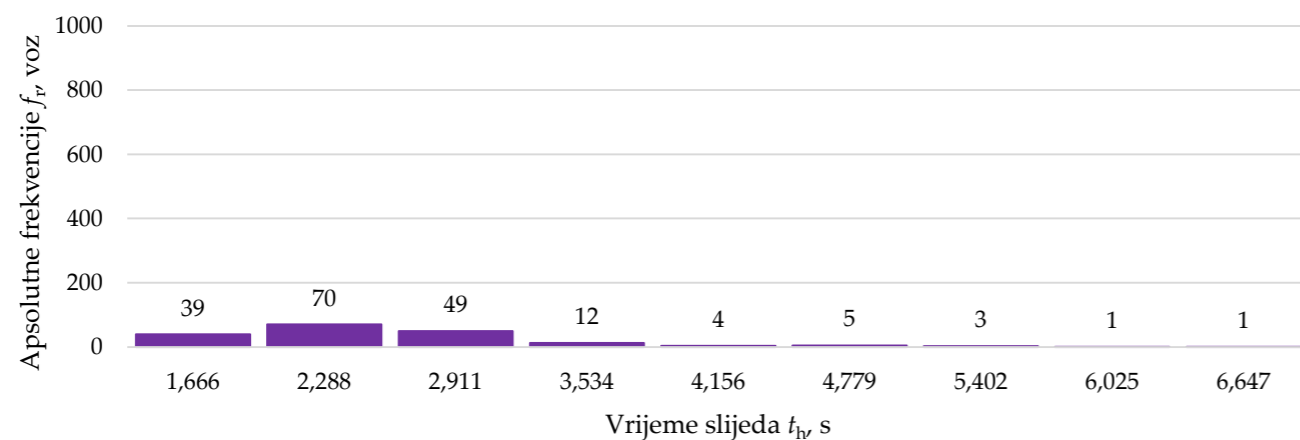


Privoz

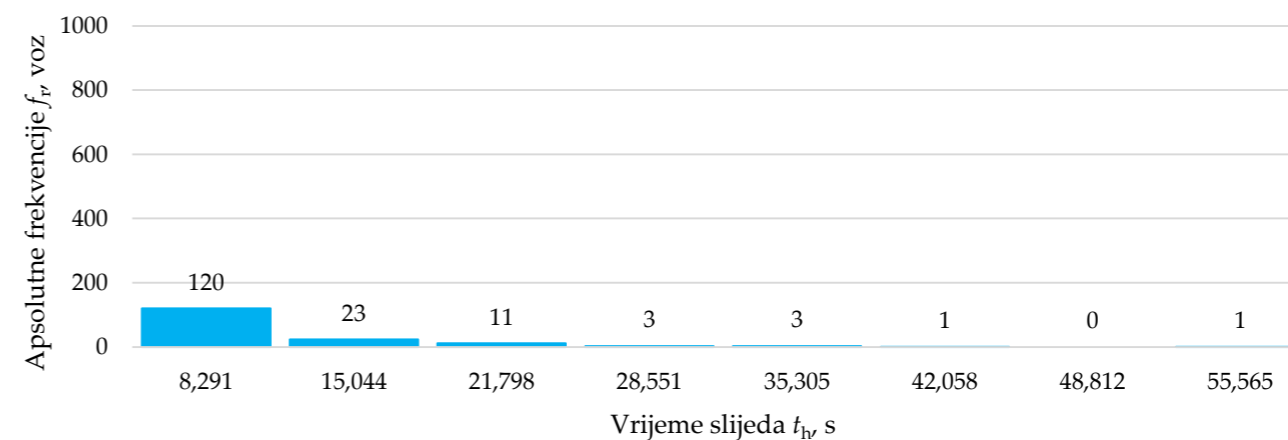


PROMETNI TRAKOVI ZA SKRETANJE

Lijevo skretanje



Desno skretanje



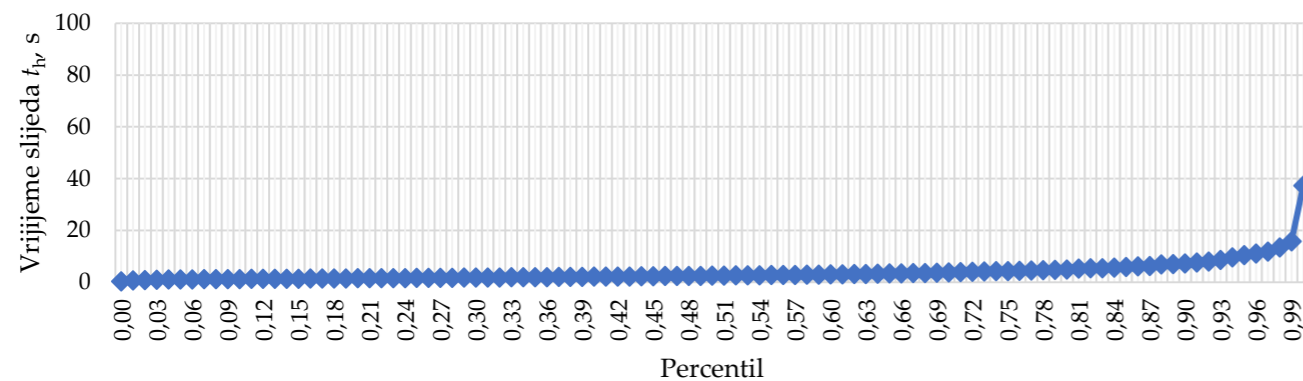
Slika 32. Apsolutne frekvencije (24. prosinac 2019.)

### 6.2.2. Proračun percentila i srednjih vrijednosti

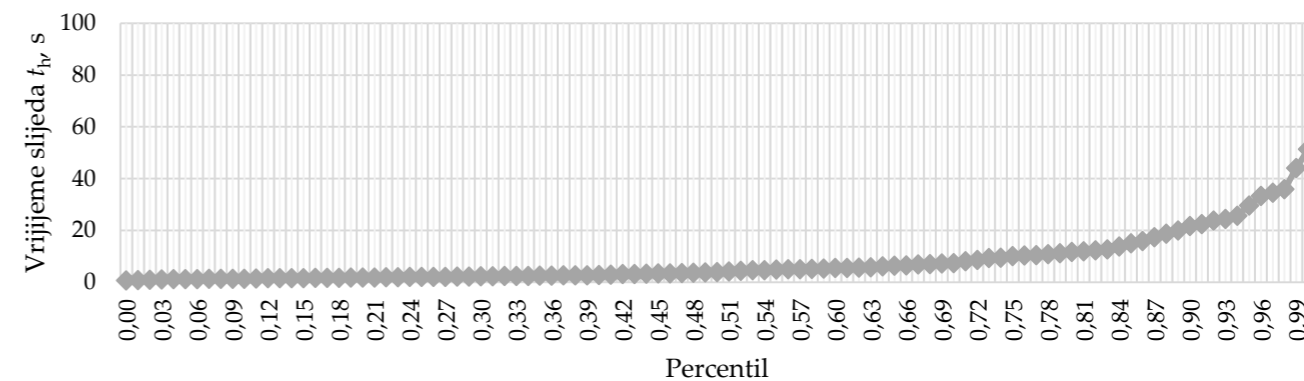
Percentil ili centil (prema percent, lat. *centum*: sto), jedna od određenih srednjih vrijednosti (tzv. kvantila) statističkih nizova, koji uređeni brojčani ili redosljedni niz dijele na jednake dijelove. Na slici 33 prikazane su percentilne vrijednosti za 07. prosinac, na slici 34 percentilne vrijednosti za 24. proinac, a na slici 35 usporedbe percentilnih vrijednosti.

#### PROLAZNI PROMETNI TRAKOVI

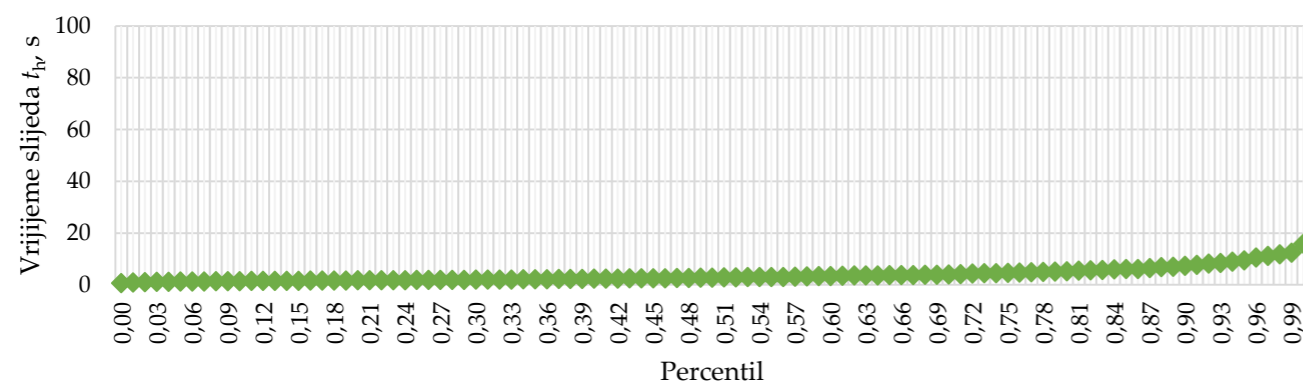
##### Lijevi prometni trak



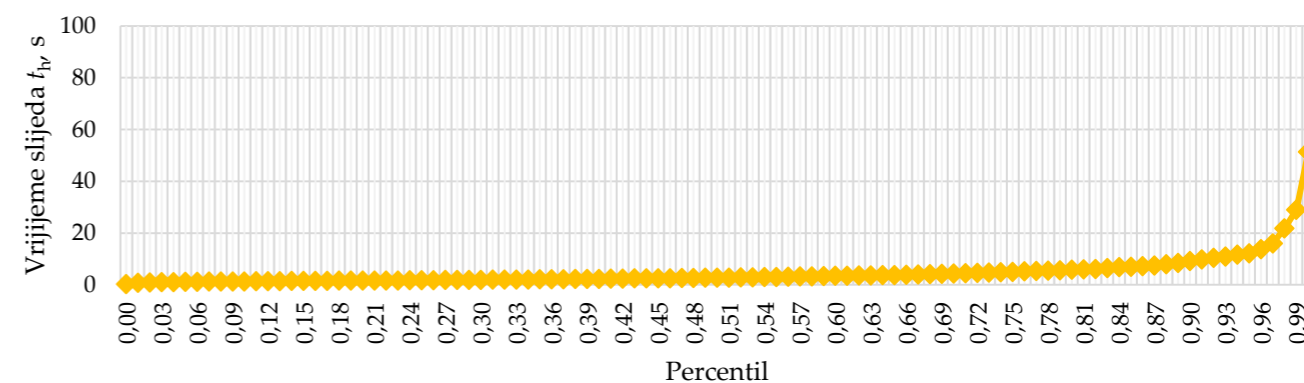
##### Desni prometni trak



##### Srednji prometni trak

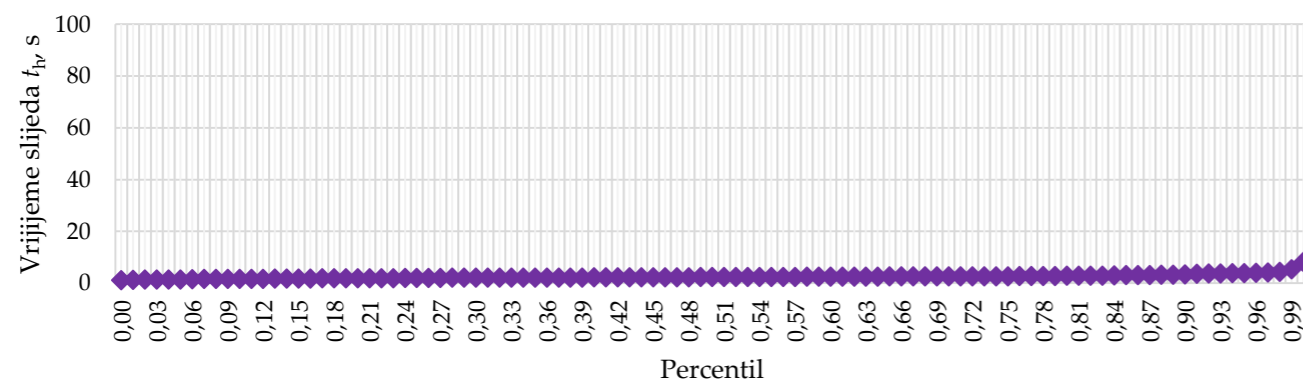


##### Privoz

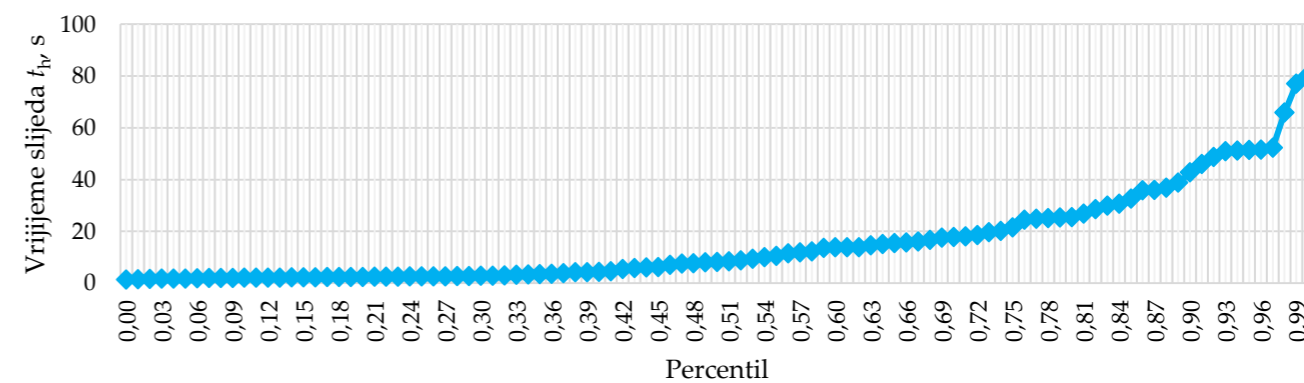


#### PROMETNI TRAKOVI ZA SKRETANJE

##### Lijevo skretanje



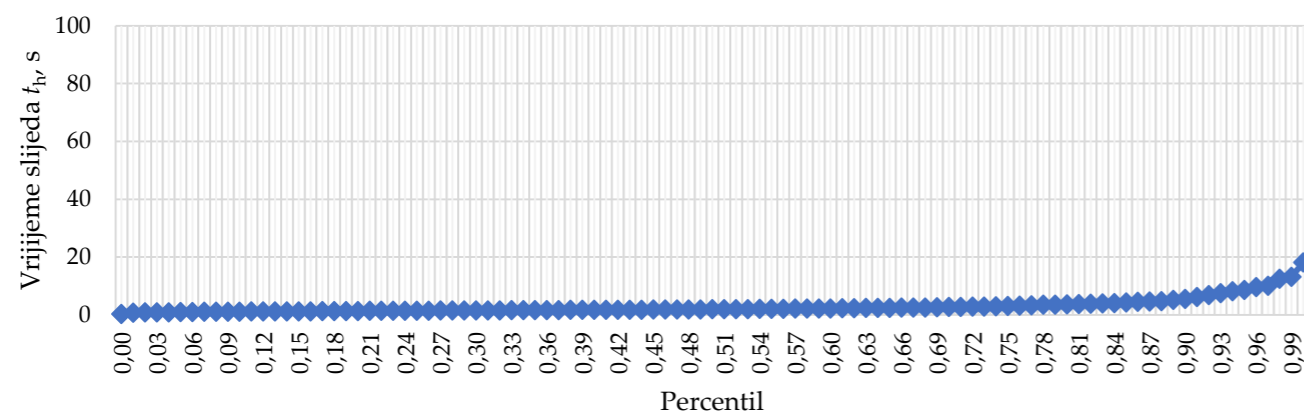
##### Desno skretanje



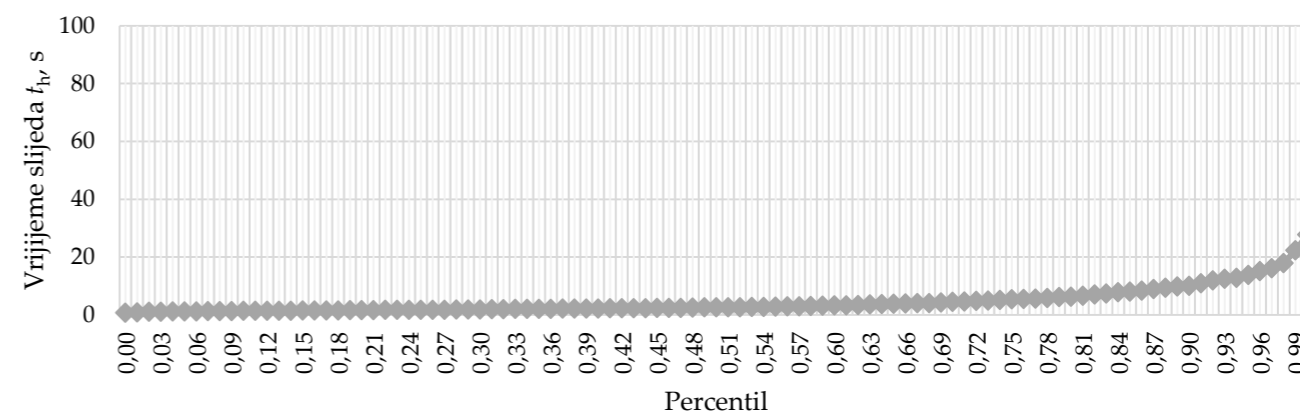
Slika 33. Percentilne vrijednosti (07. prosinac 2019.)

PROLAZNI PROMETNI TRAKOVI

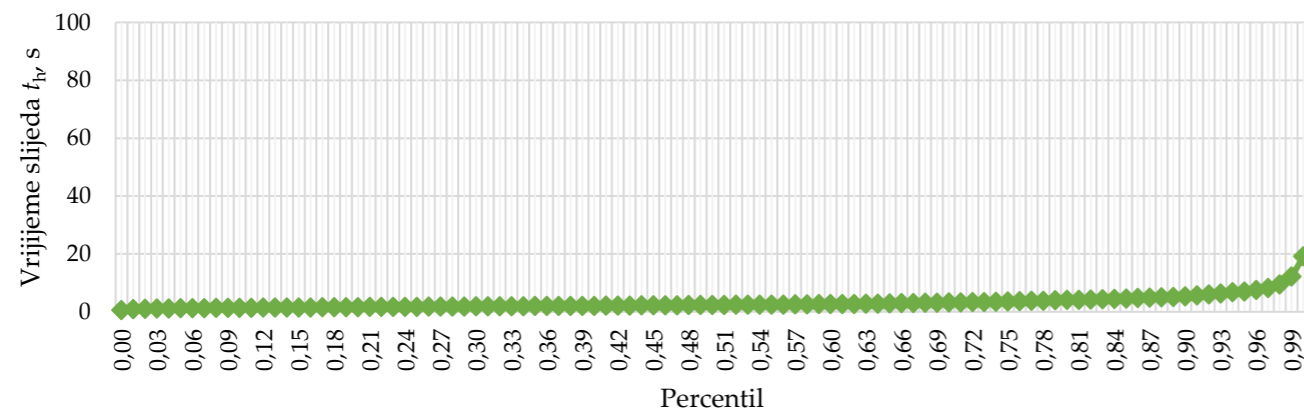
Lijevi prometni trak



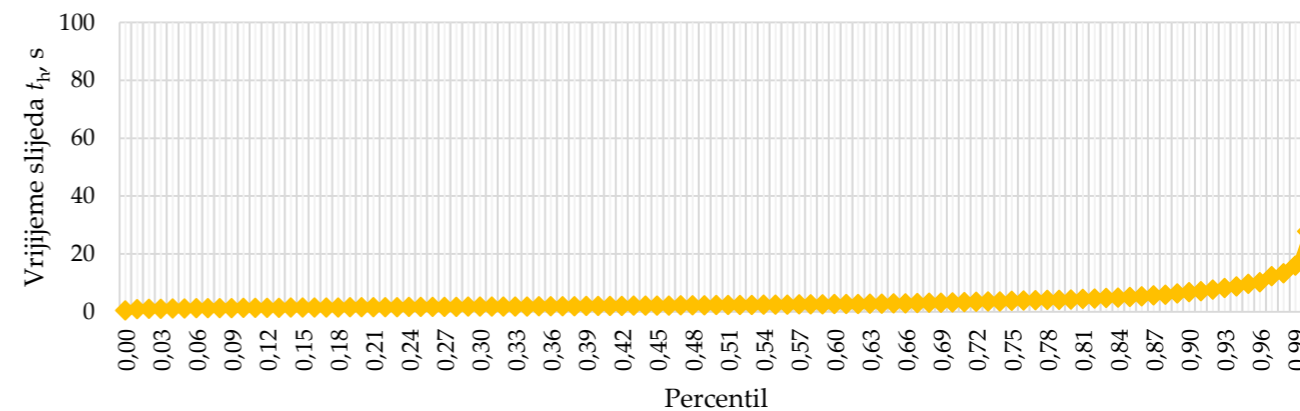
Desni prometni trak



Srednji prometni trak

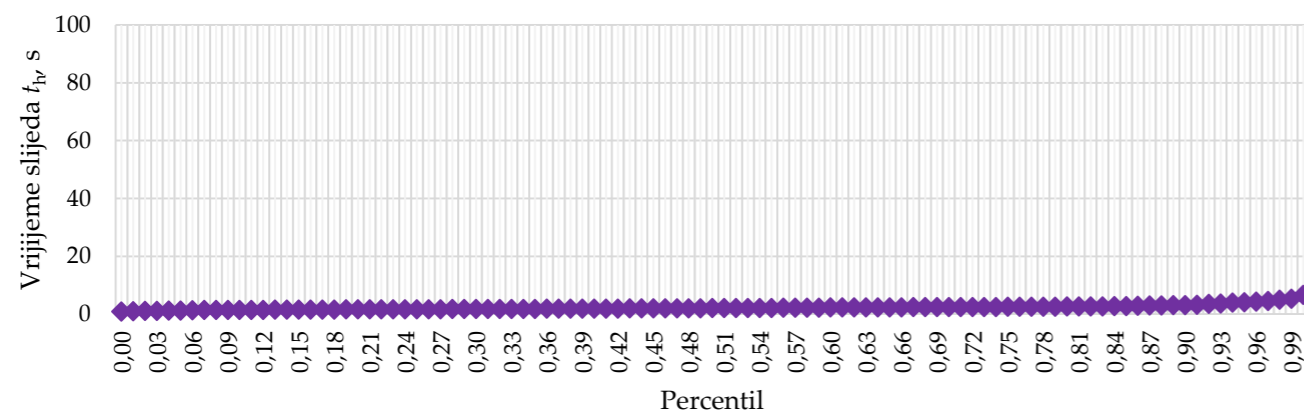


Privoz

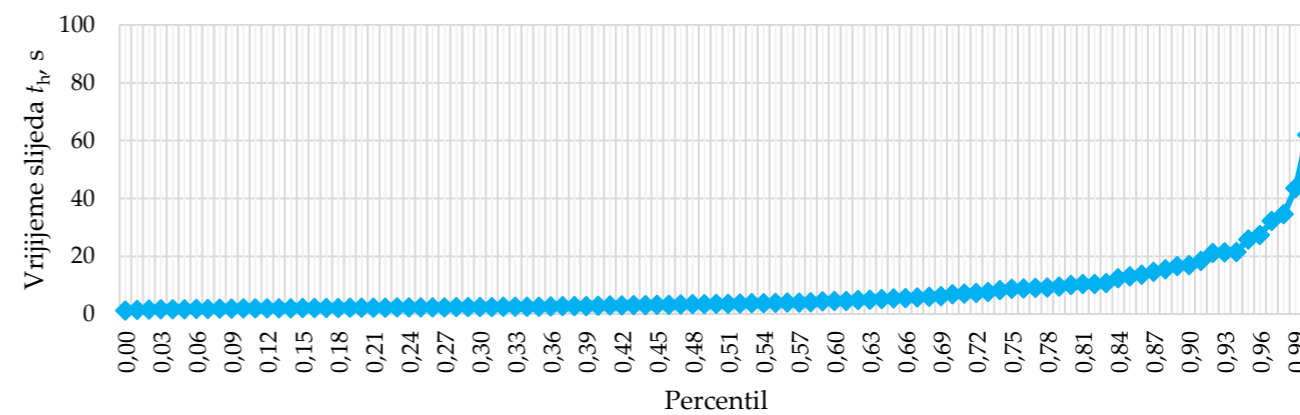


PROMETNI TRAKOVI ZA SKRETANJE

Lijevo skretanje



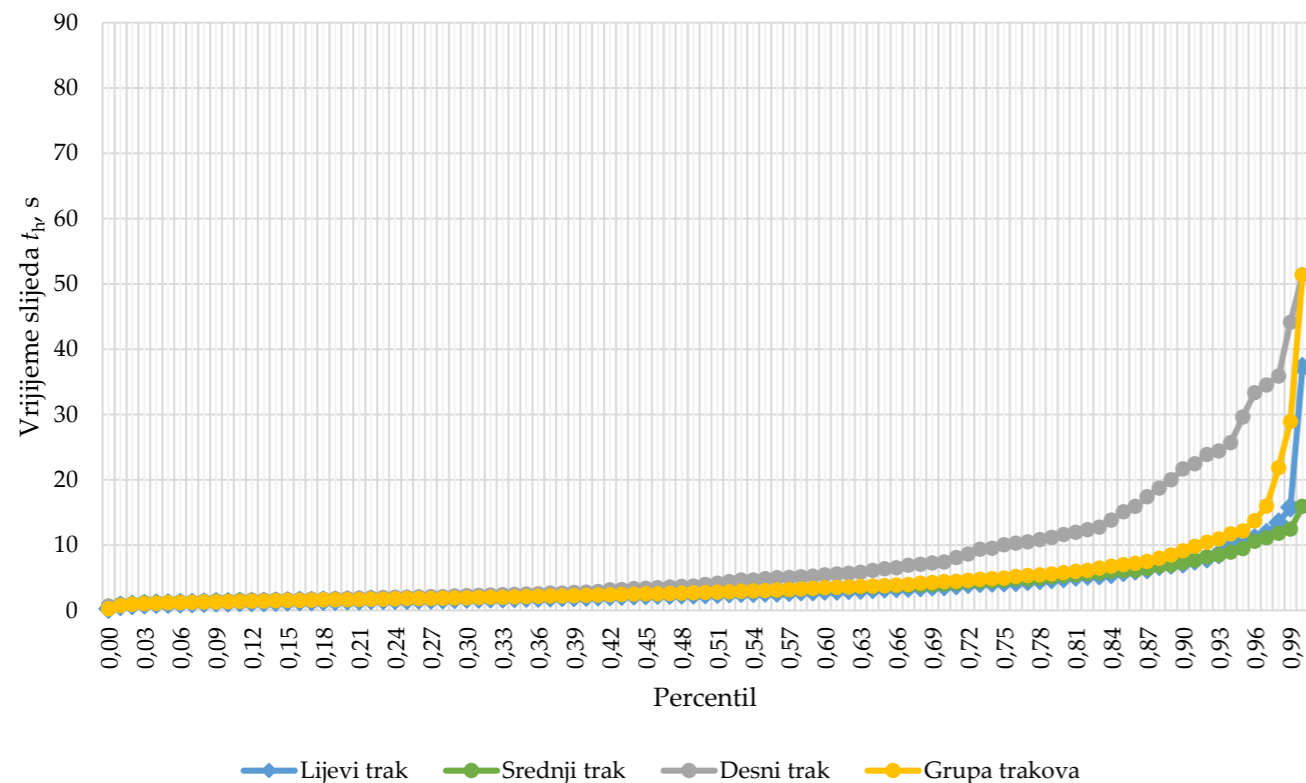
Desno skretanje



Slika 34. Percentilne vrijednosti (24. prosinac 2019.)

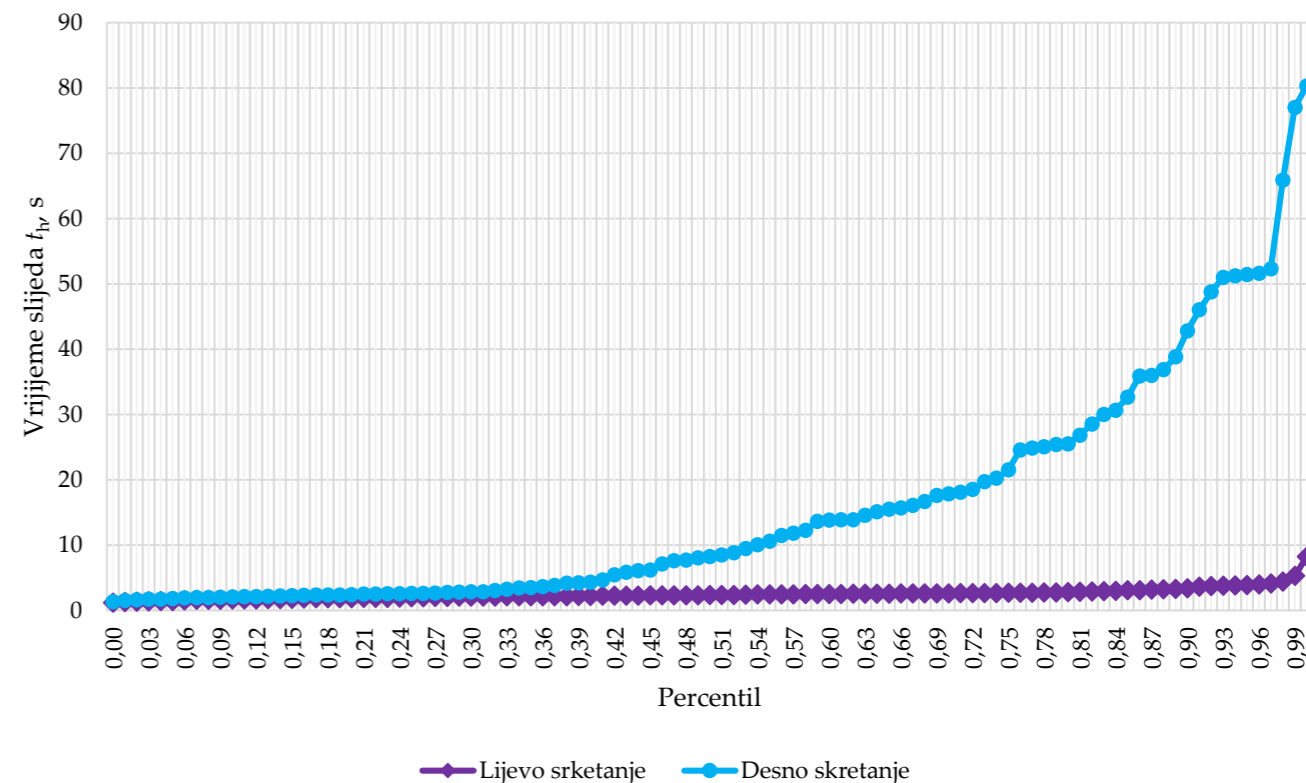
PROLAZNI PROMETNI TRAKOVI

07. prosinac 2019.

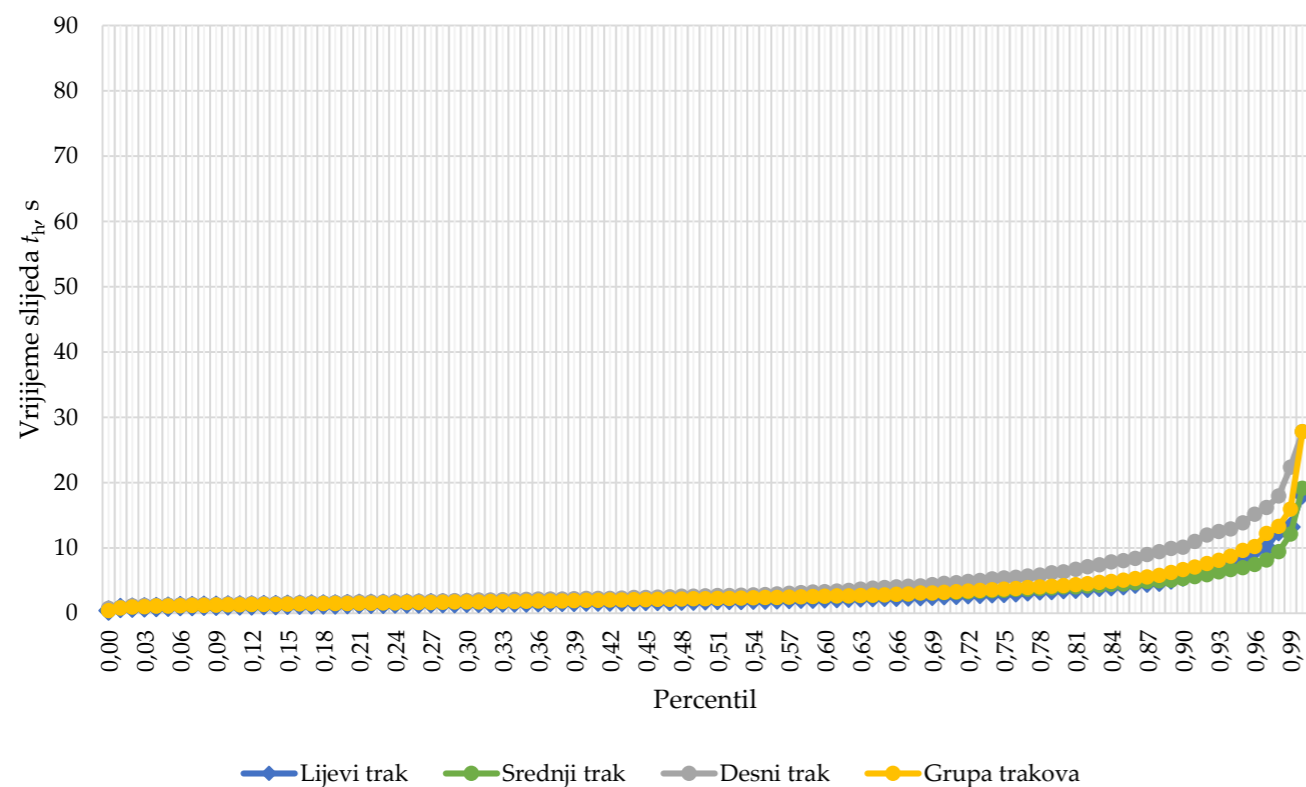


PROMETNI TRAKOVI ZA SKRETANJE

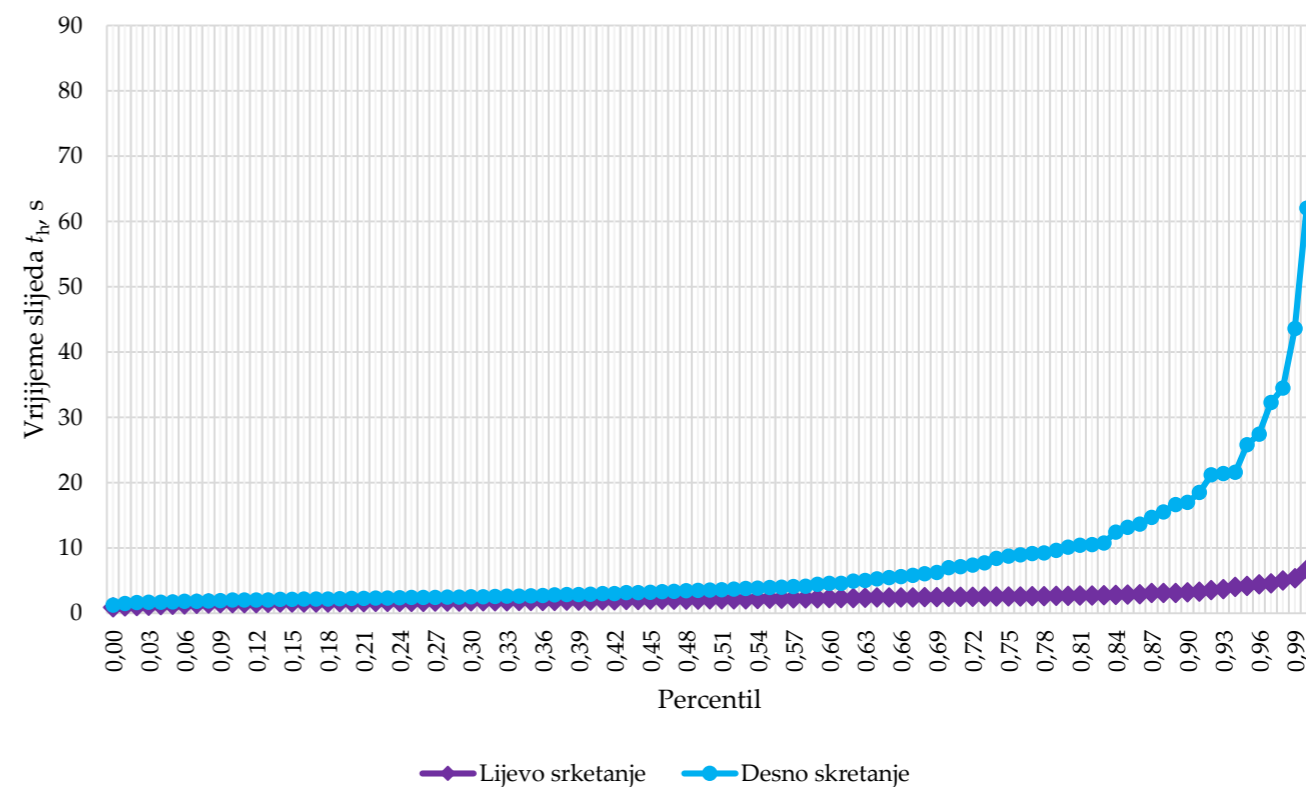
07. prosinac 2019.



24. prosinac 2019.

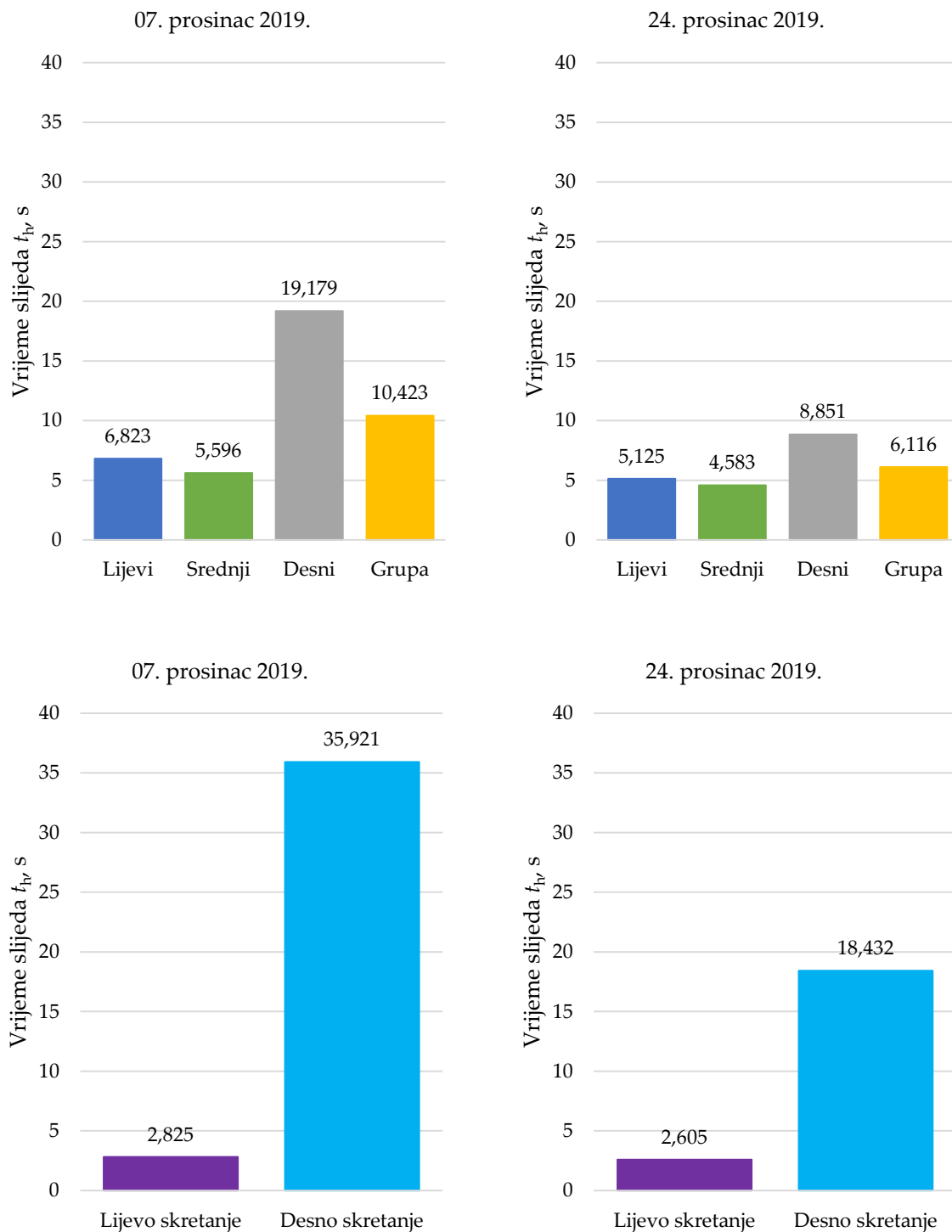


24. prosinac 2019.



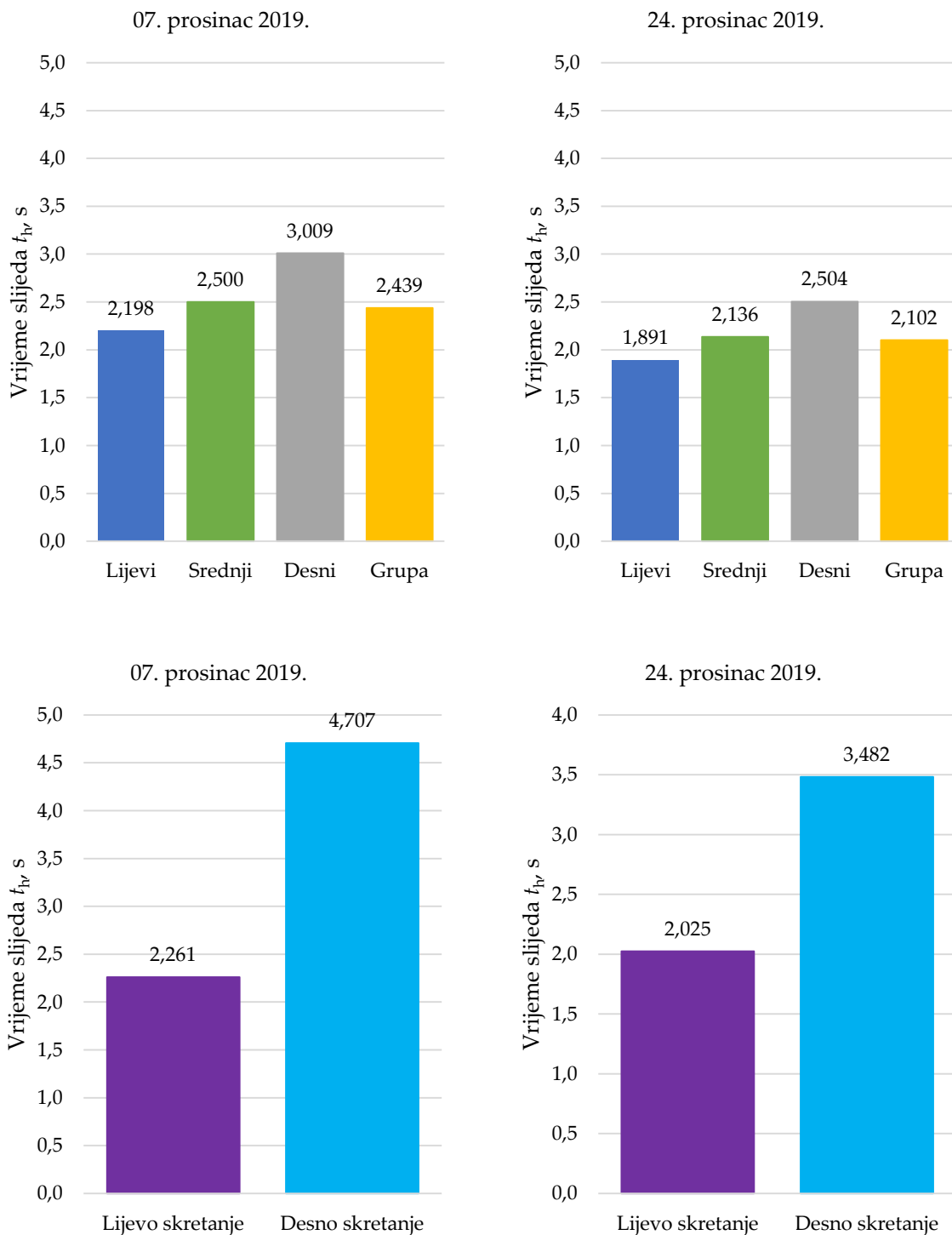
Slika 35. Usporedba percentilnih vrijednosti

Ponderirana (vagana) aritmetička sredina  $X_A$  uzima u obzir vrijednost veličina pri izračunavanju aritmetičke sredine. Ponderirana aritmetička sredina za trakove i grupu trakova prikazana je na slici 36.



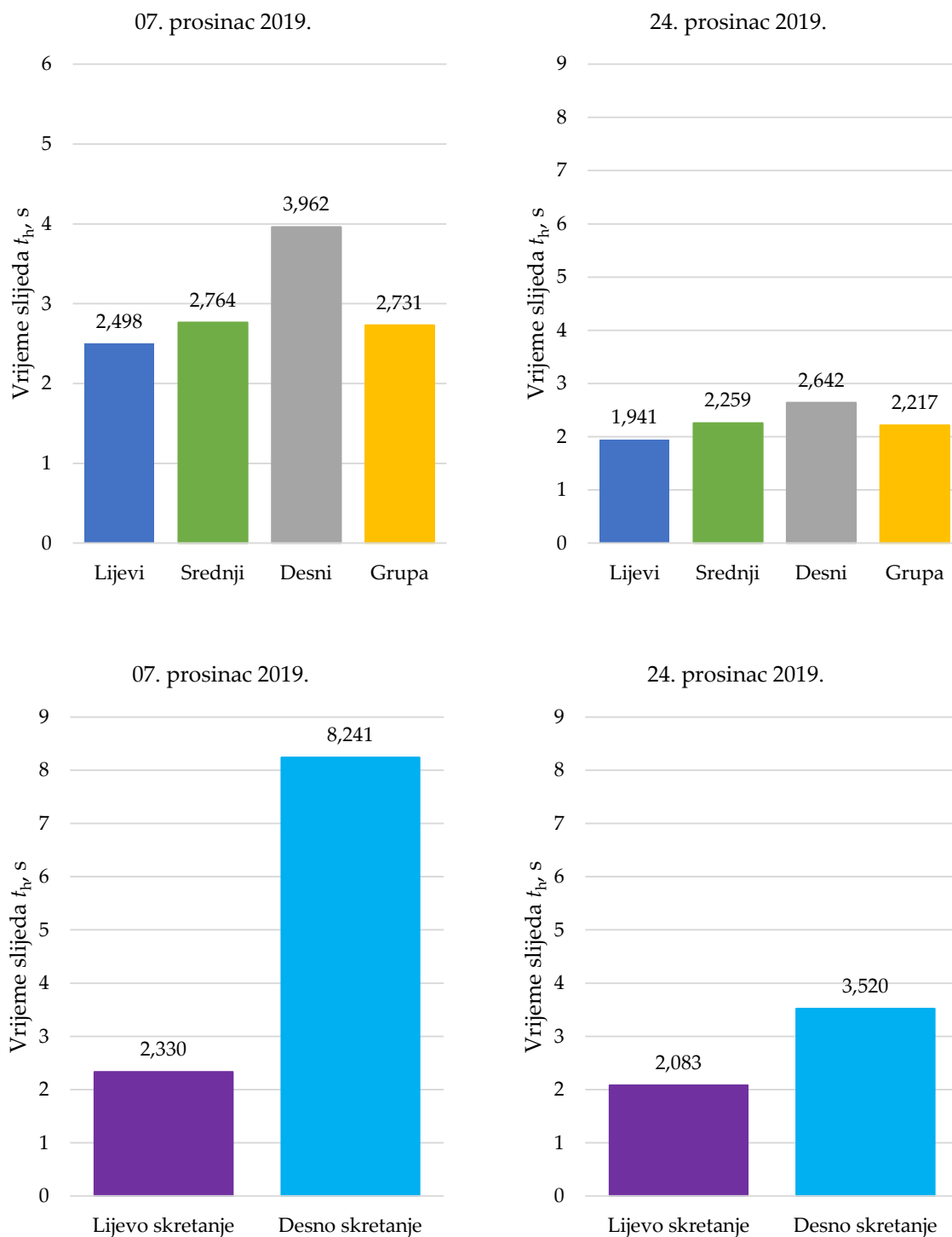
Slika 36. Ponderirana aritmetička sredina

Harmonijska sredina  $X_H$  je recipročna vrijednost aritmetičke sredine recipročnih vrijednosti u skupu. Harmonijska sredina za trakove i grupu trakova prikazana je na slici 37.



Slika 37. Harmonijska sredina

Medijan  $Me$  je srednja vrijednost elemenata u skupu poredanih od najvećeg do najmanjeg, odnosno vrijednost koja dijeli skup na dva jednaka dijela. Prednost medijana nad aritmetičkom sredinom je da na njega ne utječu vrijednosti pojedinih ekstremnih rezultata. Medijan za trakove i grupu trakova prikazan je na slici 38.



Slika 38. Medijan

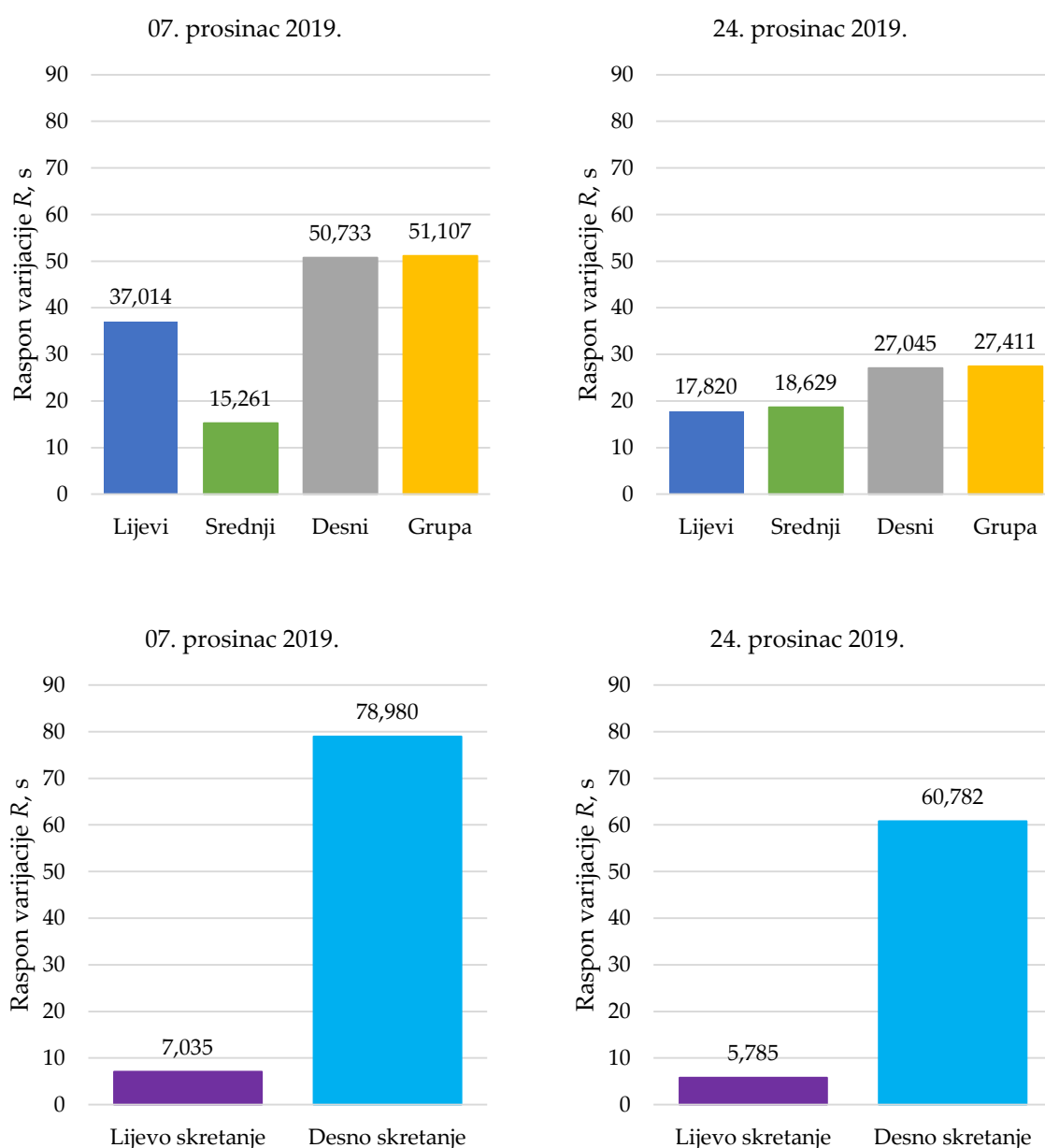


### 6.2.3. Proračun mjera disperzije i mjera oblika

Statističkom analizom određene su mjere disperzije (raspon varijacije, varijanca, standardna devijacija i koeficijent varijacije) i mjere oblika (koeficijent asimetrije i koeficijent spljoštenosti).

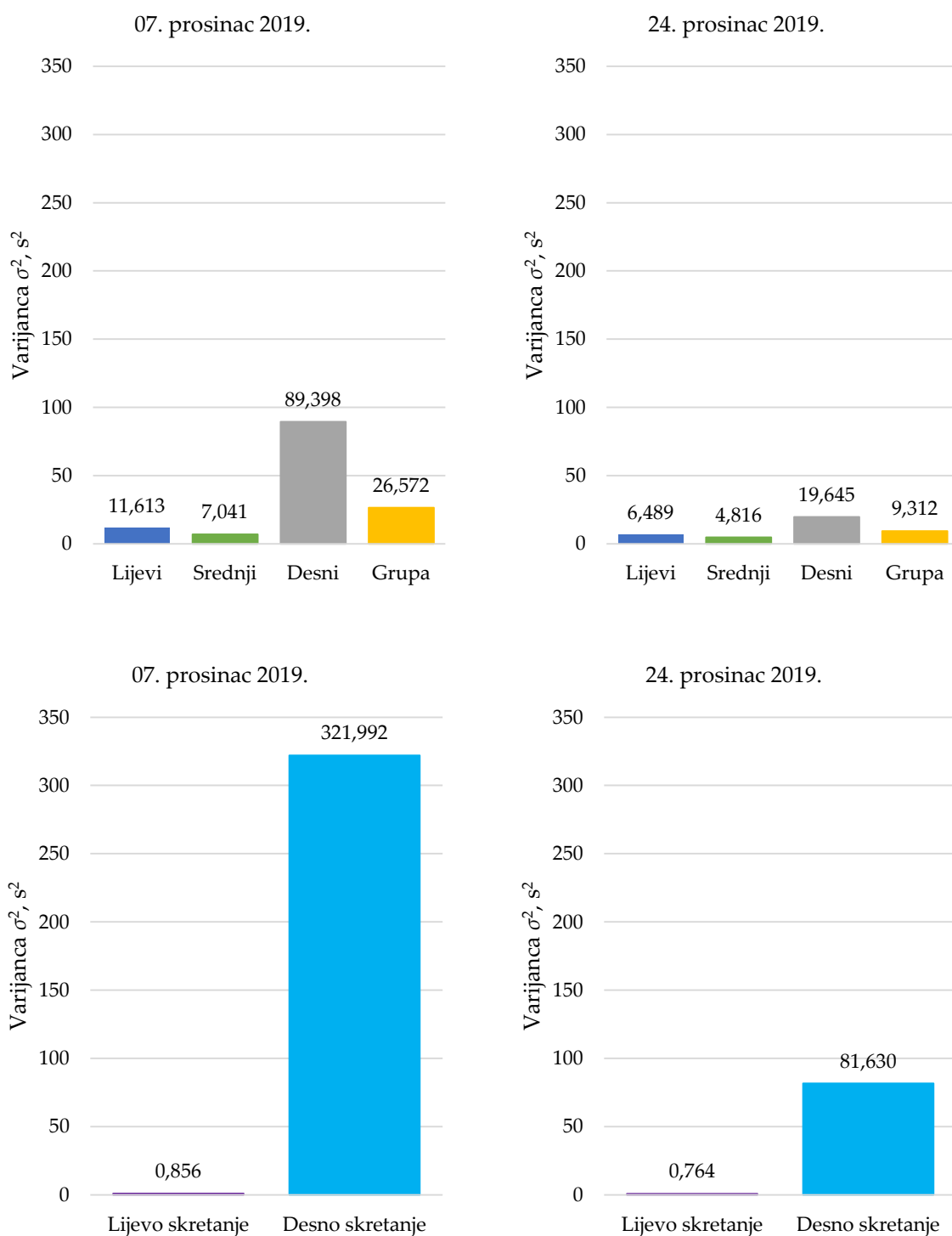
Najjednostavniji pokazatelj raspršenosti je raspon varijacije  $R$  (razlika najveće i najmanje vrijednosti u skupu), koji se računa prema jednadžbi (41).

$$\begin{aligned}
 R_1 &= x_{1\max} - x_{1\min} = 37,272 - 0,258 = 37,014 \text{ s} \\
 R_2 &= x_{2\max} - x_{2\min} = 15,916 - 0,655 = 15,261 \text{ s} \\
 R_3 &= x_{3\max} - x_{3\min} = 51,365 - 0,632 = 50,733 \text{ s} \\
 R_L &= x_{L\max} - x_{L\min} = 51,365 - 0,258 = 51,107 \text{ s}
 \end{aligned}
 \tag{41}$$



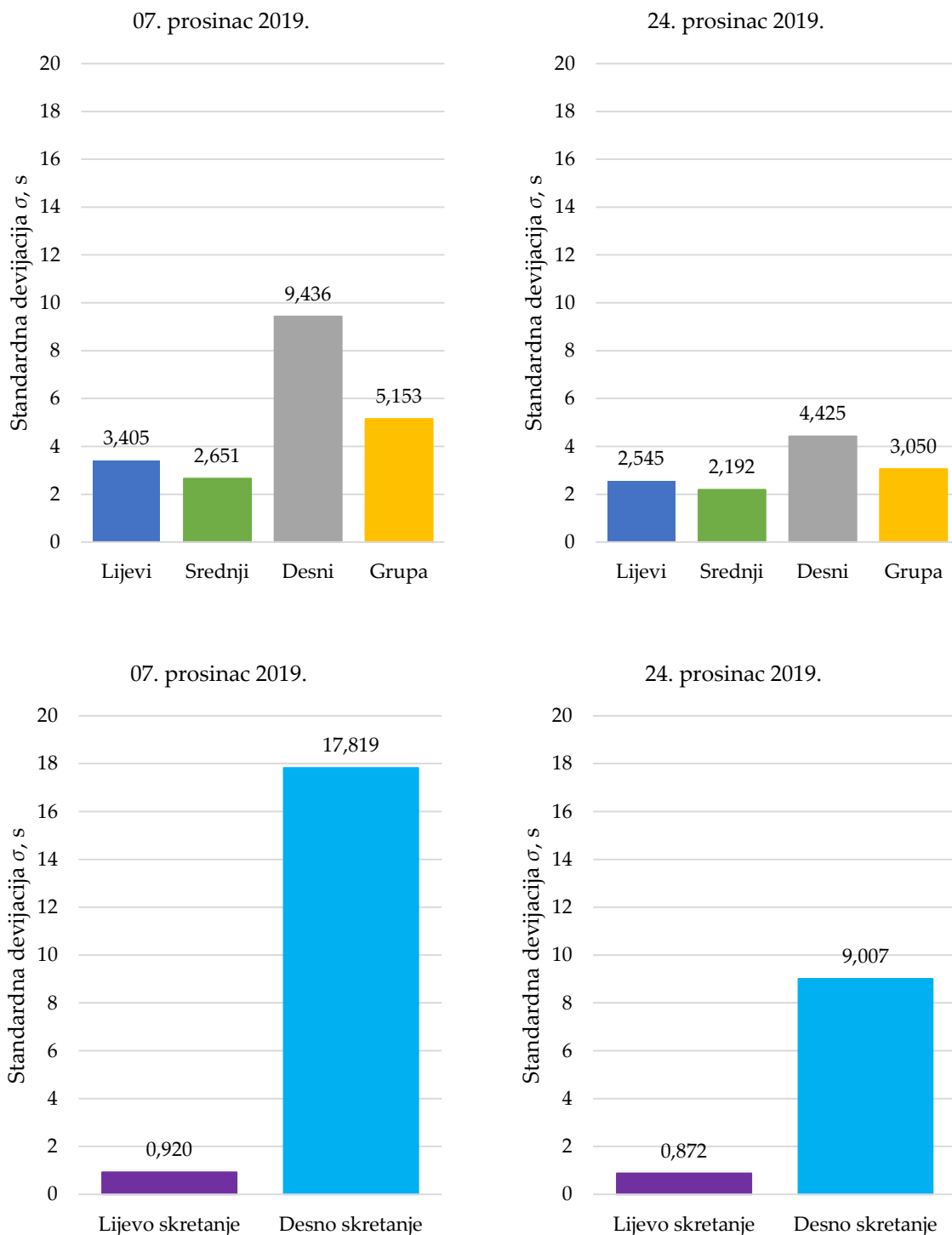
Slika 39. Raspon varijacije

Varijanca  $\sigma^2$  predstavlja aritmetičku sredinu kvadrata odstupanja vrijednosti od aritmetičke sredine skupa. Varijanca za trakove i grupu trakova prikazana na slici 40.



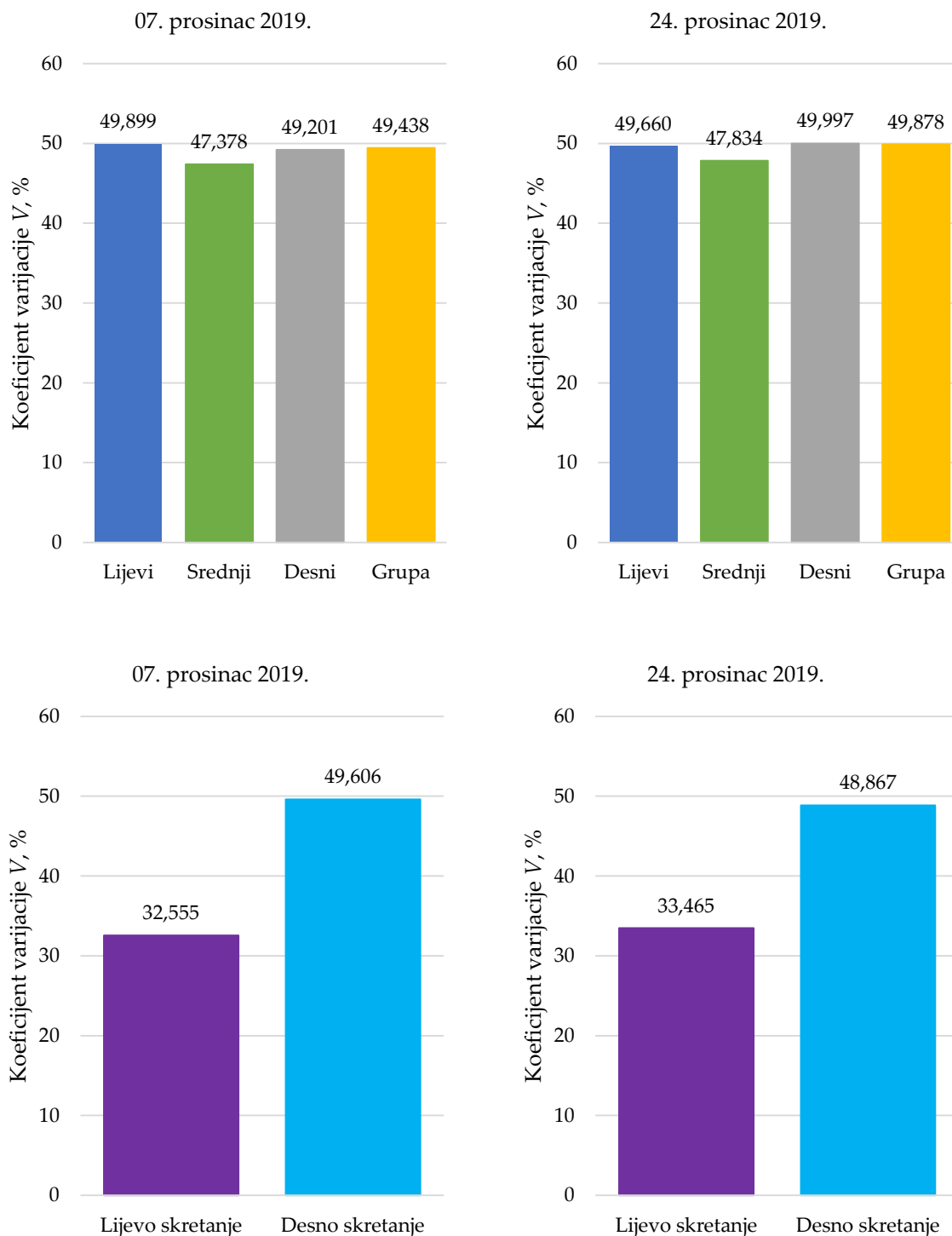
Slika 40. Varijanca

Standardna devijacija  $\sigma$  predstavlja prosječno srednje kvadratno odstupanje neke veličine od aritmetičke sredine. Standardna devijacija za trakove i grupu trakova prikazana je na slici 41.



Slika 41. Standardna devijacija

Koeficijent varijacije  $V$  je omjer standardne devijacije i aritmetičke sredine iskazan u postocima i pokazuje relativnu mjeru disprezije. Koeficijent varijacije za trakove i grupu trakova prikazana je na slici 42.



Slika 42. Koeficijent varijacije

Koeficijent asimetrije  $\gamma_3$  je standardizirana mjera smjera i veličina asimetrije. Ako je  $\gamma_3 = 0$ , razdioba je simetrična, ako je u intervali između -0,5 i 0,5, razdioba je blago asimetrična, ako je u intervali između -2 i 2 razdioba je umjereno asimetrična, ako je  $\gamma_3$  izvan navedenih intervala razdioba je izrazito asimetrična.

07. prosinac 2019.

 $\gamma_{3_1} = 3,6$  - izrazito asimetrična razdioba $\gamma_{3_2} = 1,7$  - umjereno asimetrična razdioba $\gamma_{3_3} = 2,2$  - izrazito asimetrična razdioba $\gamma_{3_L} = 4,2$  - izrazito asimetrična razdioba $\gamma_{li} = 3,1$  - izrazito asimetrična razdioba $\gamma_{de} = 1,7$  - umjereno asimetrična razdioba

24. prosinac 2019.

 $\gamma_{3_1} = 2,7$  - izrazito asimetrična razdioba $\gamma_{3_2} = 3,0$  - izrazito asimetrična razdioba $\gamma_{3_3} = 2,4$  - izrazito asimetrična razdioba $\gamma_{3_L} = 3,1$  - izrazito asimetrična razdioba $\gamma_{li} = 1,9$  - umjereno asimetrična razdioba $\gamma_{de} = 3,1$  - izrazito asimetrična razdioba

Koeficijent spljoštenosti  $\varepsilon$  uspoređuje zaobljenost vrha razdiobe prema zaobljenosti vrha normalne razdiobe. Ako je veći od 0, razdioba je šiljastija od normalne, a ako je manji od 0, razdioba je plosnatija od normalne.

07. prosinac 2019.

 $\varepsilon_1 = 22,2$  - šiljasta razdioba $\varepsilon_2 = 3,0$  - šiljasta razdioba $\varepsilon_3 = 5,3$  - šiljasta razdioba $\varepsilon_L = 24,1$  - šiljasta razdioba $\varepsilon_{li} = 16,6$  - šiljasta razdioba $\varepsilon_{de} = 2,2$  - šiljasta razdioba

24. prosinac 2019.

 $\varepsilon_1 = 7,9$  - šiljasta razdioba $\varepsilon_2 = 12,8$  - šiljasta razdioba $\varepsilon_3 = 6,5$  - šiljasta razdioba $\varepsilon_L = 12,9$  - šiljasta razdioba $\varepsilon_{li} = 1,9$  - šiljasta razdioba $\varepsilon_{de} = 3,1$  - šiljasta razdioba

### 6.3. Usporedba rezultata

Najveći protok vozila za 07. prosinac u lijevom prometnom traku iznosi 57 vozila (u razdoblju od 8:45 do 8:50), u srednjem prometnom traku 56 vozila (u razdoblju od 8:20 do 8:25), u desnom prometnom traku 35 vozila (u razdoblju od 8:40 do 8:45), a za grupu trakova 139 vozila (u razdoblju od 8:40 do 8:45), za lijevo skretanje 15 vozila (u razdoblju od 8:20 do 8:25), a za desno skretanje 14 vozila (u razdoblju od 8:20 do 8:25).

Najveći protok vozila za 24. prosinac u lijevom prometnom traku iznosi 56 vozila (u razdoblju od 8:40 do 8:45), u srednjem prometnom traku 52 vozila (u razdoblju od 8:10 do 8:15), u desnom prometnom traku 35 vozila (u razdoblju od 8:35 do 8:40), a za grupu trakova 134 vozila (u razdoblju od 8:35 do 8:40), za lijevo skretanje 22 vozila (u razdoblju od 8:50 do 8:55), a za desno skretanje 20 vozila (u razdoblju od 8:10 do 8:15).

Mjerodavni protok vozila za 07. prosinac u lijevom prometnom traku iznosi 684 vozila/h, u srednjem prometnom traku 672 vozila/h, u desnom prometnom traku 420 vozila/h, a za grupu trakova 1 668 vozila/h. Za lijevo skretanje iznosi 180 vozila/h, a za desno skretanje 168 vozila/h. Faktor vršnog sata za lijevi prometni trak iznosi 0,858, za srednji prometni trak iznosi 0,876, za desni prometni trak iznosi 0,655, a za grupu trakova iznosi 0,870. Za lijevo skretanje iznosi 0,606, a za desno skretanje 0,577.

Mjerodavni protok vozila za 24. prosinac u lijevom prometnom traku iznosi 672 vozila/h, u srednjem prometnom traku 624 vozila/h, u desnom prometnom traku 420 vozila/h, a za grupu trakova 1 608 vozila/h. Za lijevo skretanje iznosi 264 vozila/h, a za desno skretanje 240 vozila/h. Faktor vršnog sata za lijevi prometni trak iznosi 0,810, za srednji prometni trak iznosi 0,861, za desni prometni trak iznosi 0,798, a za grupu trakova iznosi 0,881. Za lijevo skretanje iznosi 0,788, a za desno skretanje 0,783.

Za određivanje broja razreda kod razdiobe frekvencija korišteno je Strugerovo pravilo. Za 07. prosinac 2019. za lijevi i srednji prometni trak određeno je 11 razreda apsolutnih frekvencija, za desni prometni trak određeno je 10 razreda apsolutnih frekvencija, a za grupu trakova 13 razreda apsolutnih frekvencija. Za lijevo i desno skretanje određeno je 8 razreda apsolutnih frekvencija. Za 24. prosinac 2019. za lijevi i srednji prometni trak određeno je 11 razreda apsolutnih frekvencija, za desni prometni trak određeno je 10 razreda apsolutnih frekvencija, a za grupu trakova 13 razreda apsolutnih frekvencija. Za lijevo i desno skretanje određeno je 8 razreda apsolutnih frekvencija.

Kod svih prolaznih prometnih trakova i grupe trakova najviše vozila nalazi se u prvom razredu apsolutnih frekvencija. Za 07. prosinac 2019. za lijevi prometni trak u prvom razredu (do 3,623 s) nalazi se 385 vozila, što čini 68,5 % od ukupnog broja vozila tog prometnog traka. Za srednji prometni trak u prvom razredu (do 2,042 s) nalazi se 183 vozila (32,4 %), a u drugom razredu (od 2,042 s do 3,430) 155 vozila (27,5 %). Za desni prometni trak u prvom razredu (do 5,705 s) nalazi se 152 vozila (61,8 %). Za grupu trakova u prvom razredu (do 4,189 s) nalazi se 940 vozila (71,4 %), a u drugom razredu vozila (od 4,189 s do 8,121 s) nalazi se 275 vozila (17,9 %). Za lijevo skretanje u drugom razredu (od 2,068 s do 2,948 s) nalazi se 47 vozila (54,0 %), za desno skretanje u prvom razredu (do 11,205 s) nalazi se 40 vozila (55,6 %).

Za 24. prosinac 2019. za lijevi prometni trak u prvom razredu (do 1,978 s) nalazi se 269 vozila, što čini 51,8 % od ukupnog broja vozila tog prometnog traka, a u drugom razredu nalazi se 144 vozila (27,7 %). Za srednji prometni trak u prvom razredu (do 2,177 s) nalazi se 236 vozila (46,1 %), a u drugom razredu (od 2,177 s do 3,870) 167 vozila (32,6 %). Za desni prometni trak u prvom razredu (do 3,429) nalazi se 190 vozila (61,5 %). Za grupu trakova u prvom razredu (do 2,642 s) nalazi se 830 vozila (61,9 %), a u drugom razredu vozila (od 2,642 s do 4,927 s) nalazi se 305 vozila (22,7 %). Za lijevo skretanje u drugom razredu (od 1,666 s do 2,288 s) nalazi se 70 vozila (38,3 %), za desno skretanje u prvom razredu (do 8,291 s) nalazi se 120 vozila (73,6 %).

Ponderirana aritmetička sredina za 07. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 6,823 s, za srednji prometni trak 5,596 s, a za desni prometni trak 19,197 s, dok je za grupu trakova 10,423 s. Za lijevo skretanje iznosi 2,825 s, a desno skretanje 35,921 s. Za 24. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 5,125 s, za srednji prometni trak 4,583 s, a za desni prometni trak 8,851 s, dok je za grupu trakova 6,116 s. Za lijevo skretanje iznosi 2,605 s, a desno skretanje 18,432 s.

Harmonijska sredina za 07. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 2,198 s, za srednji prometni trak 2,500 s, a za desni prometni trak 3,009 s, dok je za grupu trakova 2,439 s. Za lijevo skretanje iznosi 2,861 s, a desno skretanje 4,707 s. Za 24. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 1,891 s, za srednji prometni trak 2,136 s, a za desni prometni trak 2,504 s, dok je za grupu trakova 2,102 s. Za lijevo skretanje iznosi 2,025 s, a desno skretanje 3,482 s.

Medijan za 07. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 2,498 s, za srednji prometni trak 2,764 s, a za desni prometni trak 3,962 s, dok je za grupu trakova 2,731 s. Za lijevo skretanje iznosi 2,330 s, a desno skretanje 8,241 s. Za 24. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 1,941 s, za srednji prometni trak 2,259 s, a za desni prometni trak 2,642 s, dok je za grupu trakova 2,217 s. Za lijevo skretanje iznosi 2,083 s, a desno skretanje 3,520 s.

Raspon varijacije za 07. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 37,014 s, za srednji prometni trak 15,261 s, a za desni prometni trak 50,733 s, dok je za grupu trakova 51,107 s. Za lijevo skretanje iznosi 7,035 s, a desno skretanje 78,980 s. Za 24. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 17,820 s, za srednji prometni trak 18,629 s, a za desni prometni trak 27,045 s, dok je za grupu trakova 27,411 s. Za lijevo skretanje iznosi 5,785 s, a desno skretanje 60,782 s.

Varijanca za 07. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 11,613 s<sup>2</sup>, za srednji prometni trak 7,041 s<sup>2</sup>, a za desni prometni trak 89,398 s<sup>2</sup>, dok je za grupu trakova 26,572 s<sup>2</sup>. Za lijevo skretanje iznosi 0,856 s<sup>2</sup>, a desno skretanje 321,992 s<sup>2</sup>. Za 24. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 6,489 s<sup>2</sup>, za srednji prometni trak 4,816 s<sup>2</sup>, a za desni prometni trak 19,645 s<sup>2</sup>, dok je za grupu trakova 0,764 s<sup>2</sup>. Za lijevo skretanje iznosi 0,856 s<sup>2</sup>, a desno skretanje 81,630 s<sup>2</sup>.

Standardna devijacija za 07. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 3,405 s, za srednji prometni trak 2,651 s, a za desni prometni trak 9,436 s, dok je za grupu trakova 5,153 s. Za lijevo skretanje iznosi 0,920 s, a desno skretanje 17,819 s. Za 24. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 2,545 s, za srednji prometni trak 2,192 s, a za desni prometni trak 4,425 s, dok je za grupu trakova 3,050 s. Za lijevo skretanje iznosi 0,872 s, a desno skretanje 9,007 s.

Koeficijent varijacije za 07. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 49,899 %, za srednji prometni trak 47,378 %, a za desni prometni trak 49,201 %, dok je za grupu trakova 49,438 %. Za lijevo skretanje iznosi 32,555 %, a desno skretanje 49,606 %. Za 24. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 49,660 %, za srednji prometni trak 47,834 %, a za desni prometni trak 49,997 %, dok je za grupu trakova 49,878 %. Za lijevo skretanje iznosi 33,465 %, a desno skretanje 48,867 %.

Koeficijent asimetrije za 07. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 3,6 (izrazito asimetrična razdioba), za srednji prometni trak 1,7 (blago asimetrična razdioba), a za desni prometni trak 2,2 (izrazito asimetrična razdioba), dok je za grupu trakova 4,2 (izrazito asimetrična razdioba). Za lijevo skretanje iznosi 3,1 (izrazito asimetrična razdioba), a desno skretanje 1,7 (umjereno asimetrična razdioba). Za 24. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 2,7 (izrazito asimetrična razdioba), za srednji prometni trak 3,0 (izrazito asimetrična razdioba), a za desni prometni trak 2,4 (izrazito asimetrična razdioba), dok je za grupu trakova 3,1 (izrazito asimetrična razdioba). Za lijevo skretanje iznosi 1,9 (umjereno asimetrična razdioba), a desno skretanje 3,1 (izrazito asimetrična razdioba).



Koeficijent spljoštenosti za 07. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 22,2 (šiljasta razdioba), za srednji prometni trak 3,0 (šiljasta razdioba), a za desni prometni trak 5,3 (šiljasta razdioba), dok je za grupu trakova 24,1 (šiljasta razdioba). Za lijevo skretanje iznosi 16,6 (šiljasta razdioba), a desno skretanje 2,2 (šiljasta razdioba). Za 24. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosi 7,9 (šiljasta razdioba), za srednji prometni trak 12,8 (šiljasta razdioba), a za desni prometni trak 6,5 (šiljasta razdioba), dok je za grupu trakova 12,9 (šiljasta razdioba). Za lijevo skretanje iznosi 1,9 (šiljasta razdioba), a desno skretanje 3,1 (šiljasta razdioba).

## 7. ANALIZA PROPUSNE MOĆI I RAZINE USLUGE PRIVOZA

Primjena metoda koje se temelje na rezultatima istraživanja objavljenih u priručniku *Highway Capacity Manual* (HCM) veoma je značajno prilikom projektiranja i planiranja cesta i cestovnog prometnog sustava. U priručniku se detaljno opisuju metode proračuna za kapacitet i razine usluge svih vrsta ceste i raskrižja, javnog gradskog prijevoza i ostalih vrsta prometa (pješački, biciklistički). Prvo izdanje priručnika publicirano je 1950. godine, dok je važeće šesto izdanje publicirano je u listopadu 2016. godine. U priručniku iz 1965. prvi puta je predstavljen danas jedan od danas najvažnijih pojmova kojima se određuje kvaliteta odvijana prometnih tokova na prometnicama, a to je razina usluge (eng. *Level of Service*, LOS). Priručnik je temeljen na uvjetima odvijanja prometnih tokova u Sjedinjenim Američkim Državama, danas se kao standard koristi u velikom dijelu Europe, kao i Republici Hrvatskoj. Prema Pravilniku o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa [10], u Članku 11. Provjera propusne moći odabranog tipskog normalnog poprečnog presjeka ceste stoji da se za proračun propusne moći prometnice određuje prema *Highway Capacity Manualu*, dok je upotrebu drugih metoda potrebno posebno obrazložiti.

Na raskrižjima na kojima se promet upravlja prometnim svjetlima moguća su tri načina raspodjele vremena u signalnom planu:

- Stalni signalni planovi – redosljed i vrijeme trajanja faza je konstantno i ponavljajuće, svaka od faza ima fiksno zeleno vrijeme;
- Poluautomatski signalni planovi – neki privozi raskrižja (glavna cesta) imaju senzore, dok na sporednim privozima nema senzora;
- Automatski signalni planovi – raspodjela vremena u ciklusu ovisi o podacima koji se prikupljaju na svim privozima raskrižja, moguće su razne promjene u signalnim planovima kao preskakanje faze ako nema vozila na privozu, produljivanje faze, ubacivanje međufaze.

Signalni planovi na raskrižjima mogu funkcionirati zasebno, bez utjecaja drugih signalnih planova drugih raskrižja na signalni plan predmetnog raskrižja i zavisno o signalnim planovima na okolnim raskrižjima. Kada su signalni planovi zavisni o susjednim raskrižjima moguća je korekcija u signalnom planu, a propisana je minimalna duljina zelene faze. Na privozima s manjim prometnim opterećenjem zbog smanjenje prometne potražnje, trajanje zelene faze smanjuje se na minimalno trajanje, a preostalo vrijeme raspoređuje u faze s većom prometnom potražnjom.

Protok vozila tijekom zasićenog prometnog toka, osnovni je parametar za određivanje kapaciteta raskrižja. Određuje se pomoću minimalnog razmaka slijeda vozila u grupi trakova koja s prazni preko stop linije. Moguće ga je odrediti analitički, no potrebno je uzeti velik broj parametara u obzir (geometrijske, prometne i okolišne karakteristike raskrižja), stoga se najčešće određuje snimanjem prometnih tokova i njihovom analizom.

### 7.1. Razina usluge raskrižja

Razina usluge za signalizirana raskrižja određena je kašnjenjem vozila, koja je mjera udobnosti vožnje, frustracije, potrošnje goriva i povećanog vremena putovanja. Razina usluge (LOS) za signalizirana raskrižja određuje se za 15 minutne periode u satu. Kašnjenje vozila je složena mjera koja ovisi o više parametara, a neki od njih su trajanje ciklusa, trajanje zelene faze, izgubljeno vrijeme u raskrižju, stupanj zasićenja... Kritični stupanj zasićenja (engl. *v/c ratio*, omjer prometne potražnje i kapaciteta), a ovisi o konfliktnim prometnim tokova i signalnom planu.

Razina usluge raskrižja vrednuje se slovnim oznaka od A do F, gdje razina usluge A (LOS A) predstavlja slobodni prometni tok, dok razina usluge F (LOS F) predstavlja zagušeni prometni tok.

- LOS A – uvjeti odvijanja prometnih tokova s vremenom kašnjenja manjim od 10 s, većina vozila na raskrižje dolazi tijekom zelene faze i ne zaustavljaju se;
- LOS B – uvjeti odvijanja prometnih tokova s vremenom kašnjenja između 10 s i 20 s, više vozila se zaustavlja nekog kod LOS A i uzrokuju dulja vremena kašnjenja;
- LOS C – uvjeti odvijanja prometnih tokova s vremenom kašnjenja između 20 s i 35 s, zelena faza ne traje dovoljno dugo da zadovolji prometnu potražnju i prometnica se počinje zagušivati, broj vozila koja prolaze bez zaustavljanja i onih koja se zaustavljaju na raskrižju približno jednak;
- LOS D – uvjeti odvijanja prometnih tokova s vremenom kašnjenja između 35 s i 55 s, zagušenje prometnice postaje primjetno i sve više napreduje, smanjuje se broj vozila koja kroz raskrižje prolaze bez zaustavljanja;
- LOS E – uvjeti odvijanja prometnih tokova s vremenom kašnjenja između 55 s i 80 s, značajno zagušenje;
- LOS F – kašnjenje vozila veće od 80 s, neprihvatljivo većini vozača, dolazi do frustracija, prometna potražnja uvelike premašuje ponudu (stupanj zasićenja prometnice veći od 1).

## 7.2. Određivanje razine usluge semaforiziranog raskrižja

Kako bi se odredila razina usluge cijelog raskrižja, potrebno je odrediti razinu usluge svih grupa trakova. Potrebni ulazni podaci za određivanje razine usluge su geometrijske karakteristike raskrižja, podaci o prometnim tokovima i signalni plan. Na slici 46 prikazana je slijed metodologije za određivanja razine usluge raskrižja.



Slika 43. Metodologija za određivanje razine usluge raskrižja

### 7.2.1. Razina usluge

Kao što je navedeno razina usluge određena je kašnjenjem vozila prilikom prolaska kroz raskrižje. U tablici 5 prikazani su kriteriji za smještaj u određenu razinu usluge.

Tablica 5. Razina usluge za semaforizirana raskrižja

Razina usluge (LOS)	Kašnjenje po vozilu (s/voz)
A	≤ 10
B	> 10 - 20
C	> 20 - 35
D	> 35 - 55
E	> 55 - 80
F	> 80

### 7.2.2. Ulazni podaci

Potrebni ulazni podaci za određivanje razine usluge su geometrijske karakteristike raskrižja, podaci o prometnim tokovima i signalni plan.

- Geometrijski podaci

Geometrija raskrižja mora uključivati sve bitne podatke o raskrižju kao što su broj i širina prometnih trakova, nagib privoza, duljine traka za lijevo i desno skretanje... Prilikom projektiranja novog raskrižja geometrijske elemente je potrebno pretpostaviti prema važećim smjernicama i kao takve ih koristiti u proračunu.

- Podaci o prometnim tokovima

Protok vozila po privozima mora biti poznat u 15 minutnom razdoblju. Potrebno je utvrditi protok vozila u zasićenom toku, faktor vršnog sata (engl. *peak hour factor*, PHF), postotak teških vozila (engl. *percent heavy vehicles*, HV), prilazna brzina...

- Signalni plan

Potrebno je poznavati potpuni signalni plan raskrižja (trajanje ciklusa, trajanje zelene faze, pješačke faze...) za pouzdano određivanje usluge.

#### 7.2.2.1. Grupe trakova

Analizirano raskrižje potrebno je raščlaniti na manje cjeline, odnosno trakove po privozima podijeliti u grupe trakova i zatim ih analizirati. Podjela trakova u grupe ovisi o geometrijskim elementima raskrižja i smjerovima kojima se može proći raskrižjem. Općenite smjernice za podjelu trakova u grupe su:

- Traku samo za lijevo skretanje promatra se kao posebnu grupu trakova, isto vrijedi i za traku samo za desno skretanje;
- Ako postoji zajednička traka za lijevo/desno i ravno potrebno je provesti brojanje vozila koja skreću i zadržavaju smjer kretanja kako bi se utvrdio dominantan smjer.

7.2.2.2. *Određivanje zasićenog prometnog toka*

Zasićeni prometni tok je broj vozila na sat koja mogu proći kroz grupu trakova pod pretpostavkom stalnoga trajanja zelene faze na semaforu, a računa se prema jednadžbi (42).

$$s_L = s_0 \cdot N \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} \cdot f_{LT} \cdot f_{RT} \cdot f_{Lpb} \cdot f_{Rpb} \quad (42)$$

Gdje je:

- $s_L$  - zasićeni prometni tok za grupu trakova, voz/ h;
- $s_0$  - osnovni zasićeni prometni tok za jedan trak, voz/ h;
- $N$  - broj prometnih traka u grupi trakova, -;
- $f_w$  - faktor prilagodbe širine traka, -;
- $f_{HV}$  - faktor prilagodbe za teška vozila, -;
- $f_g$  - faktor prilagodbe za nagib ceste, -;
- $f_p$  - faktor prilagodbe za aktivnosti povezane s parkingom vozila, -;
- $f_{bb}$  - faktor prilagodbe za javni gradski prijevoz, -;
- $f_a$  - faktor prilagodbe za područje izračuna, -;
- $f_{LU}$  - faktor prilagodbe za iskorištenje prometnog traka, -;
- $f_{LT}$  - faktor prilagodbe za lijeve skretače, -;
- $f_{RT}$  - faktor prilagodbe za desne skretače, -;
- $f_{Lpb}$  - pješачki/biciklistički faktor prilagodbe za lijeve skretače u grupi trakova, -;
- $f_{Rpb}$  - pješачki/biciklistički faktor prilagodbe za desne skretače u grupi trakova, -.

Kada se zasićeni prometni tok utvrđuje na terenu uzima se vrijednost pražnjenja iza stop linije postignuta 10 do 14 s nakon početka zelene faze. Pri utvrđivanju mjeri se vrijeme prolaska prednje osovine četvrtog vozila preko stop linije i vrijeme prolaska prednje osovine zadnjeg vozila u zelenoj fazi preko stop linije.

Ako je četvrto vozilo prošlo preko stop linije na 9,8 s, a petnaesto i zadnje vozila na 37,3 s. Vrijeme slijeda između vozila računa se kao količnik razlike vremena prolaska prvog i zadnjeg vozila i ukupnog broja vozila umanjenog za četiri. Kada se vrijeme slijeda podijeli s 3 600 (broj sekundi u satu) utvrđuje se osnovni zasićeni prometni tok za jedan trak. Mjerenje vremena slijeda i postupak određivanja zasićenog prometnog toka prikazan je u Prilogu 2.

- Osnovni zasićeni prometni tok za jedan trak  $s_0$

Kao početna vrijednost uzima se 1 900 vozila po traci po satu, no ta vrijednost ovisi o više parametara.

- Faktor prilagodbe širine traka  $f_w$

Uzima u obzir sužavanje prometnih trakova i smanjenje osnovnog zasićenog prometnog toka.

- Faktor prilagodbe za teška vozila i nagib ceste  $f_{HV}$  i  $f_g$

Teška vozila su ona kojima imaju više od četiri gume u dodiru s kolnikom i potrebno im je više vremena kako bi napustile raskrižje od osobnih vozila. Faktor prilagodbe nagiba ceste uzima se u obzir kada je prije raskrižja nagib koji utječe na gibanje svih vozila u prometnom toku.

- Faktor prilagodbe za aktivnosti povezane s parkingom vozila  $f_p$

Uzima se u obzir kada je u blizini raskrižja parking vozila. Pretpostavlja se da parkiranje vozila zaustavlja promet u prometnom traku na 18 s dok vozila ulaze ili izlaze na parking.

- Faktor prilagodbe za javni gradski prijevoz  $f_{bb}$

Uzima se u obzir kada se na 75 m od stop linije nalazi autobusna stanica bez ugibališta. Dolazi do ometanja prometa u prometnom traku i smanjenja osnovnog zasićenog prometnog toka.

- Faktor prilagodbe za područje izračuna  $f_a$

Ovisi o području u kojem se nalazi raskrižje. Ako se nalazi u poslovnoj zoni česti su manevri parkiranja, ometanja prometa od strane javnog gradskog prijevoza, malih radijusa zavoja, pješačkih i biciklističkih aktivnosti...

- Faktor prilagodbe za iskorištenje prometnog traka  $f_{LU}$

Uzima u obzir neravnomjernu raspodjelu broja vozila po prometnim trakovima u grupi trakova. Računa se prema jednadžbi (46).

$$f_{LU} = \frac{v_g}{v_{g1}N} \quad (43)$$

Gdje je:

- $f_{LU}$  - faktor prilagodbe za područje izračuna, -;
- $v_g$  - prometna potražnja za grupu trakova, voz/h;
- $v_{g1}$  - prometna potražnja za trak s najvećom potražnjom u grupi trakova, voz/h;
- $N$  - broj prometnih traka u grupi trakova, -.

Koristi se kada prije ili nakon raskrižja dolazi do promjene u broju prometnih trakova u grupi trakova. Ako se provode mjerenja na terenu za vrijednost ovog faktora uzima se 1,00.

- Faktor prilagodbe za lijeve i desne skretače  $f_{LT}$  i  $f_{RT}$

Ovise o geometriji raskrižja. Ako se u grupi trakova ne nalaze trakovi za lijevo i desno skretanje za njihovu vrijednost uzima se 1,00.

- Faktor prilagodbe za biciklistički i pješački promet  $f_{Lpb}$  i  $f_{Rpb}$

Ovise o broju pješaka/biciklista i lijevih/desnih skretača koji su u konfliktu.

#### 7.2.2.3. Određivanje kapaciteta grupe trakova $c_i$

Računa se pomoću zasićenog prometnog toka, efektivnog zelenog vremena za grupu trakova i ukupnog trajanja ciklusa prema jednadžbi (44).

$$c_i = s_i \frac{g_i}{C} \quad (44)$$

Gdje je:

- $c_i$  - kapacitet grupe trakova, voz/h;
- $s_i$  - zasićeni prometni tok grupe trakova, voz/h;
- $g_i$  - efektivno zeleno vrijeme grupe trakova, s;
- $C$  - ukupno trajanje ciklusa, s.

#### 7.2.2.4. Određivanje stupnja zasićenja $X_i$

Još se naziva omjer intenziteta i kapaciteta grupe trakova, a računa se prema jednadžbi (45). Vrijednosti stupnja zasićenja veće od jedan ukazuju potražnja nadmašuje ponudu.

$$X_i = \frac{v_i}{c_i} \quad (45)$$

Gdje je:

- $X_i$  - stupanj zasićenja grupe trakova, -;
- $v_i$  - zasićeni prometni tok grupe trakova, voz/h;
- $c_i$  - kapacitet grupe trakova, voz/h;

#### 7.2.2.5. Kritični stupanj zasićenja raskrižja $X_C$

$$X_C = \sum \left( \frac{v}{s} \right)_{ci} \left( \frac{C}{C-L} \right) \quad (46)$$

Gdje je:

- $X_C$  - kritični stupanj zasićenja raskrižja, -;
- $C$  - trajanje ciklusa, s;
- $L$  - izgubljeno vrijeme u ciklusu, s;



7.2.2.6. *Određivanje vremena kašnjenja  $d$* 

Predstavlja koje teče od trenutka kada vozilo dođe na kraj repa čekanja do trenutka kada prođe kroz stop liniju, a računa se prema jednadžbi (47).

$$d = d_1 \cdot PF + d_2 \quad (47)$$

Gdje je:

- $d$  - vrijeme kašnjenja po grupi trakova, s;
  - $d_1$  - uniformno vrijeme kašnjenja, s;
  - $PF$  - progresijski faktor prilagodbe, -;
  - $d_2$  - inkrementalno vrijeme kašnjenja, s.
- Progresijski faktor prilagodbe

Kada je u primjeni kvalitetan signalni plan većina vozila do raskrižja će dolaziti za vrijeme zelene faze, progresijski faktor prilagodbe daje uvid o kvaliteti signalnog plana, a određuje se prema postotku vozila koja do raskrižja dolaze tijekom zelene faze i omjeru zelenog i ukupnog trajanja ciklusa.

- Uniformno vrijeme kašnjenja  $d_1$

Određuje se prema Websterovoj jednadžbi (48).

$$d_1 = \frac{\frac{C}{2} \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \left[\min(1, X) \frac{g}{C}\right]} \quad (48)$$

Gdje je:

- $d_1$  - uniformno vrijeme kašnjenja, s;
  - $C$  - trajanje ciklusa, s;
  - $g$  - efektivno zeleno vrijeme, s.
  - $X$  - stupanj zasićenja grupe trakova, -.
- Inkrementalno vrijeme kašnjenja  $d_2$

Određuje se prema Akcelikovoj jednadžbi (49).

$$d_2 = 900T \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8kX}{cT}} \right] \quad (49)$$

Gdje je:

- $d_2$  - inkrementalno (povećano) vrijeme kašnjenja, s;
- $T$  - period analize (obično se uzima vrijednost 0,25), -;
- $k$  - inkrementalni faktor prilagodbe (obično se uzima vrijednost 0,25), -;
- $c$  - kapacitet grupe trakova, voz/h;
- $X$  - stupanj zasićenja grupe trakova, -.

7.2.2.7. *Određivanje razine usluge semaforiziranog raskrižja*

Nakon određivanja kašnjenja za svaku grupu trakova, određuje se kašnjenje po privozima, pomoću jednadžbe (50).

$$d_A = \frac{\sum d_i v_i}{\sum v_i} \quad (50)$$

Gdje je:

- $d_A$  - vrijeme kašnjenja privoza, s;
- $d_i$  - vrijeme kašnjenja grupe trakova, s;
- $v_i$  - prilagođeni broj vozila u grupi trakova, voz/h.

Nakon određivanja vremena kašnjenja po privozima, određuje se vrijeme kašnjenja za cijelo raskrižje po istom principu, prema jednadžbi (51).

$$d_I = \frac{\sum d_A v_A}{\sum v_A} \quad (51)$$

Gdje je:

- $d_I$  - vrijeme kašnjenja raskrižja, s;
- $d_A$  - vrijeme kašnjenja privoza, s;
- $v_A$  - prilagođeni broj vozila na privozu, voz/h.

Razina usluge određuje se prema vremenu kašnjenja prikazanom u tablici 6.

Tablica 6. *Razine usluge za semaforizirana raskrižja*

Razina usluge (LOS)	Kašnjenje po vozilu (s/voz)
A	≤ 10
B	> 10 - 20
C	> 20 - 35
D	> 35 - 55
E	> 55 - 80
F	> 80

7.2.2.8. *Određivanje repa čekanja semaforiziranog raskrižja Q*

Predstavlja broj vozila koja se nalaze iza stop linije, odnosno nisu uspjela proći kroz raskrižje tijekom zelene faze, a određuje se pomoću jednadžbe (52).

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (52)$$

Gdje je:

- $Q$  - duljina repa čekanja, voz;
- $Q_1$  - duljina repa čekanja prvog reda, voz;
- $Q_2$  - duljina repa čekanja drugog reda, voz.

- Duljina repa čekanja prvog reda  $Q_1$

Pretpostavlja se jednolično punjenje repa čekanja, a računa se prema jednadžbi (53).

$$Q_1 = PF_2 \frac{\frac{v_L C}{3600} \left(1 - \frac{g}{C}\right)}{1 - \left[\min(1, X_L) \frac{g}{C}\right]} \quad (53)$$

Gdje je:

- $Q_1$  - duljina repa čekanja prvog reda, voz;
- $PF_2$  - progresijski faktor prilagodbe duljine repa čekanja prvog reda, -;
- $v_L$  - broj vozila u grupi trakova, voz/h;
- $C$  - trajanje ciklusa, s;
- $g$  - efektivno zeleno vrijeme, s;
- $X_L$  - stupanj zasićenja grupe trakova, -.

Progresijski faktor prilagodbe duljine repa čekanja prvog reda računa se prema jednadžbi (54).

$$PF_2 = \frac{\left(1 - R_p \frac{g}{C}\right) \left(1 - \frac{v_L}{s_L}\right)}{\left(1 - \frac{g}{C}\right) \left(1 - R_p \frac{v_L}{s_L}\right)} \quad (54)$$

Gdje je:

- $PF_2$  - progresijski faktor prilagodbe duljine repa čekanja prvog reda, -;
- $v_L$  - broj vozila u grupi trakova, voz/h;
- $s_L$  - zasićeni prometni tok grupe trakova, voz/;
- $C$  - trajanje ciklusa, s;
- $g$  - efektivno zeleno vrijeme, s;
- $R_p$  - kalibracijski parametar tipa dolaska na raskrižje, -.

- Duljina repa čekanja drugog reda  $Q_2$

Predstavlja povećani red čekanja uslijed nejednoličnih dolazaka vozila na raskrižje, a određuje se prema jednadžbi (55).

$$Q_2 = \frac{c_L T}{4} \left[ (X_L - 1) + \sqrt{(X_L - 1)^2 + \frac{8k_b X_L}{c_L T}} \right] \quad (55)$$

Gdje je:

- $Q_2$  - duljina repa čekanja drugog reda, voz;
- $c_L$  - kapacitet grupe trakova, voz/h;
- $T$  - period analize (obično se uzima vrijednost 0,25), -;
- $X_L$  - stupanj zasićenja grupe trakova, -;
- $k_b$  - faktor prilagodbe uslijed nejednoličnih dolazaka na raskrižje, -.

Faktor prilagodbe uslijed nejednoličnih dolazaka na raskrižje  $k_b$  određuje se prema jednadžbi (56).

$$k_b = 0,12l \left( \frac{s_L g}{3600} \right)^{0,7} \quad (56)$$

Gdje je:

- $k_b$  - faktor prilagodbe uslijed nejednoličnih dolazaka na raskrižje, -;
- $s_L$  - zasićeni prometni tok grupe trakova, voz/;
- $g$  - efektivno zeleno vrijeme, s;
- $l$  - faktor prilagodbe za prilazak raskrižju, -.

#### 7.2.2.9. Određivanje percentila repa čekanja semaforiziranog raskrižja $Q_{\%}$

Pokazuje broj vozila koja se nalaze u repu čekanja s određenom sigurnošću, a računa se prema jednadžbi (57).

$$Q_{\%} = Q f_{b_{\%}} \quad (57)$$

Gdje je:

- $Q_{\%}$  - percentil repa čekanja, voz;
- $Q$  - duljina repa čekanja, voz;
- $f_{b_{\%}}$  - percentilni faktor repa čekanja, -.

Percentilni faktor repa čekanja  $f_{b_{\%}}$  određuje se prema jednadžbi (58).

$$f_{b_{\%}} = p_1 + p_2 e^{-\frac{Q}{p_3}} \quad (58)$$

Gdje je:

- $f_{b_{\%}}$  - percentilni faktor repa čekanja, -;
- $p_1$  - prvi parametar percentilnog faktora repa čekanja, -;
- $p_2$  - drugi parametar percentilnog faktora repa čekanja, -;
- $p_3$  - treći parametar percentilnog faktora repa čekanja, -;
- $Q$  - duljina repa čekanja, voz.

Parametri za 95 percentilni rep čekanja iznose  $p_1 = 1,6$ ,  $p_2 = 1,0$  i  $p_3 = 5,0$ .

### 7.3. Određivanje razine usluge privoza Slavonske avenija i 13. Vrbika

Radi usporedbe provest će se proračuni s pretpostavljenim osnovnim zasićenim prometnim tokom za jedan trak  $s_0$ , s vrijednosti  $s_0 = 1\,900$  voz/h (preporuka HCM [11]) i s vrijednosti  $s_0 = 923$  voz/h koja je utvrđena mjerenjima na terenu.

Raskrižje Slavonske avenija (istočni i zapadni privoz, glavni privozi) i 13. Vrbika (sjeverni i južni privoz, sporedni privozi) nalazi se u poslovnoj-stambenoj zoni. Promatra se samo smjer za ravno istočnog privoza (3 prometne trake).

Poznato je:

- Postotak teških vozila 4,64 %;
- Faktor vršnog sata iznosi 0,870;
- Duljina trajanja zelenog svijetla 115 s;
- Duljina trajanja ciklusa je 150 s;
- Slavonska avenija ima tri prolazna prometna traka za ravno;
- U blizini raskrižja nema parkinga i javnog gradskog prijevoza;
- Izgubljeno vrijeme u fazi iznosi 4 s;
- Raskrižje se nalazi na ravnom terenu.

ULAZNI PODACI			
Osnovne informacije		Informacije o raskrižju	
Datum: 07. prosinac 2019., subota		Raskrižje Slavonske avenije i 13. Vrbik	
Vrijeme: 08:00 – 09:00		Položaj raskrižja - Poslovna zona	
Prometni tokovi			
Istočni privoz	Lijevi prometni trak (1)	Srednji prometni trak (2)	Desni prometni trak (3)
Broj vozila, voz/h	587	275	589
Postotak teških vozila, %	4,64		
Faktor vršnog sata, -	0,870		
Tip dolaska	3		
Parking	Ne		
Javni gradski prijevoz	Ne		
Prilagođeni broj vozila $v_L$ , voz/h	1668		
Signalni plan			
Vrijeme	$g = 115$ s $C = 150$ s		

### 7.3.1. Slučaj 1 - vrijednost osnovnog zasićenog prometnog toka $s_0 = 1\,900$ voz/h

Uzima se vrijednost zasićenog prometnog toka  $s_L = 1\,900$  voz/tr/h.

- Faktor prilagodbe širine traka  $f_w$

$$f_w = 1 + \frac{W - 3,6}{9} = 1 + \frac{3,25 - 3,6}{9} = 0,961 \quad (59)$$

- Faktor prilagodbe za teška vozila  $f_{HV}$

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + HV(E_T - 1)} = \frac{100}{100 + 4,69(2 - 1)} = 0,955 \quad (60)$$

- Faktor prilagodbe za nagib raskrižja  $f_g$

$$f_g = 1,000, \text{ nagib raskrižja } 0\% \quad (61)$$

- Faktor prilagodbe za parking  $f_p$

$$f_p = 1,000, \text{ nema aktivnosti povezanih s parkingom u blizini raskrižja} \quad (62)$$

- Faktor prilagodbe za javni gradski prijevoz  $f_{bb}$

$$f_{bb} = 1,000, \text{ nema aktivnosti povezanih s autobusima u blizini raskrižja} \quad (63)$$

- Faktor prilagodbe za područje raskrižja  $f_a$

$$f_a = 0,900, \text{ poslovna zona} \quad (64)$$

- Faktor iskorištenja prometnog traka  $f_{LU}$

$$f_{LU} = \frac{v_g}{Nv_{gmax}} = \frac{1\,451}{3 \cdot 589} = 0,821 \quad (65)$$

- Faktor prilagodbe za lijeve skretače  $f_{LT}$

$$f_{LT} = 1,000, \text{ prometni trakovi za ravno} \quad (66)$$

- Faktor prilagodbe za desne skretače  $f_{RT}$

$$f_{RT} = 1,000, \text{ prometni trakovi za ravno} \quad (67)$$

- Faktor prilagodbe za lijeve skretače (pješaci/biciklisti)  $f_{pb}$

$$f_{pb} = 1,000, \text{ prometni trakovi za ravno} \quad (68)$$

- Zasićeni prometni tok  $s_L$

$$s_L = s_0 \cdot N \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} \cdot f_{LT} \cdot f_{RT} \cdot f_{pb} \quad (69)$$

Modificirana jednadžba kada se zanemare faktori koji su jednaki 1,000.

$$s_L = s_0 \cdot N \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_a \cdot f_{LU} \quad (70)$$

$$s_L = 1\,900 \cdot 3 \cdot 0,961 \cdot 0,955 \cdot 0,900 \cdot 0,821 = 3\,867 \text{ voz/h}$$

- Kapacitet grupe trakova  $c_L$

$$c_L = s_L \cdot \frac{g}{C} = 3\,867 \cdot \frac{115}{150} = 2\,965 \text{ voz/h} \quad (71)$$

- Stupanj zasićenja grupe trakova  $X_L$

$$X_L = \frac{v_L}{c_L} = \frac{1\,668}{2\,965} = 0,563 \quad (72)$$

- Uniformno kašnjenje  $d_1$

$$d_1 = \frac{\frac{C}{2} \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \left[\min(1, X_L) \cdot \frac{g}{C}\right]} = \frac{\frac{150}{2} \left(1 - \frac{115}{150}\right)^2}{1 - \left[0,563 \cdot \frac{115}{150}\right]} = 7,2 \text{ s/voz} \quad (73)$$

- Inkrementalno kašnjenje  $d_2$

$$d_2 = 900T \left( (X_L - 1) + \sqrt{(X_L - 1)^2 + \frac{8kX_L}{cT}} \right) \quad (74)$$

$$d_2 = 900 \cdot \frac{15}{60} \left( (0,563 - 1) + \sqrt{(0,63 - 1)^2 + \frac{8 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,563}{2\,965 \cdot \frac{15}{60}}} \right) = 0,8 \text{ s/voz}$$

- Progresijski faktor prilagodbe  $PF$

$$PF = 1,000 \quad (75)$$

- Kašnjenje grupe trakova  $d$

$$d = d_1 \cdot PF + d_2 = 7,2 \cdot 1,000 + 0,8 = 8,0 \text{ s/voz} \quad (76)$$

- Razina usluge grupe trakova = LOS A

- Duljina repa čekanja prvog reda  $Q_1$

$$Q_1 = PF_2 \frac{\frac{v_L C}{3\,600} \left(1 - \frac{g}{C}\right)}{1 - \left[\min(1, X_L) \frac{g}{C}\right]} = 1,000 \frac{\frac{1\,668 \cdot 150}{3\,600} \left(1 - \frac{115}{150}\right)}{1 - \left[0,563 \cdot \frac{115}{150}\right]} = 29 \text{ voz} \quad (77)$$

- Duljina repa čekanja drugog reda  $Q_2$

$$Q_2 = \frac{c_L T}{4} \left[ (X_L - 1) + \sqrt{(X_L - 1)^2 + \frac{8k_b X_L}{c_L T}} \right] \quad (78)$$

$$Q_2 = \frac{2\,965 \cdot 0,25}{4} \left[ (0,563 - 1) + \sqrt{(0,563 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 3,495 \cdot 0,563}{2\,965 \cdot 0,25}} \right]$$

$$Q_2 = 4 \text{ voz}$$

- Faktor prilagodbe uslijed nejednoličnih dolazaka na raskrižje  $k_b$

$$k_b = 0,12 \left( \frac{s_L g}{3600} \right)^{0,7} = 0,12 \left( \frac{3967 \cdot 115}{3600} \right)^{0,7} = 3,495 \quad (79)$$

- Duljina repa čekanja

$$Q = Q_1 + Q_2 = 29 + 4 = 33 \text{ voz} \quad (80)$$

### 7.3.2. Slučaj 2 - izmjerena vrijednost osnovnog zasićenog prometnog toka

$$s_0 = 923 \text{ voz/h}$$

Uzima se vrijednost zasićenog prometnog toka  $s_L = 923 \text{ voz/tr/h}$ . Opis mjerenja i rezultati mjerenja nalaze se u Prilogu 2. Uzima se vrijednost ciklusa i efektivnog zelenog vremena utvrđena na terenu.

- Zasićeni prometni tok  $s_L$

$$s_L = s_0 \cdot N = 923 \cdot 3 = 2769 \text{ voz/h} \quad (81)$$

- Kapacitet grupe trakova  $c_L$

$$c_L = s_L \cdot \frac{g}{C} = 2769 \cdot \frac{115}{150} = 2123 \text{ voz/h} \quad (82)$$

- Stupanj zasićenja grupe trakova  $X_L$

$$X_L = \frac{v_L}{c_L} = \frac{1668}{2123} = 0,768 \quad (83)$$

- Uniformno kašnjenje  $d_1$

$$d_1 = \frac{\frac{C}{2} \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \left[\min(1, X_L) \cdot \frac{g}{C}\right]} = \frac{\frac{150}{2} \left(1 - \frac{115}{150}\right)^2}{1 - \left[0,768 \cdot \frac{115}{150}\right]} = 10,3 \text{ s/voz} \quad (84)$$

- Inkrementalno kašnjenje  $d_2$

$$d_2 = 900T \left( (X_L - 1) + \sqrt{(X_L - 1)^2 + \frac{8kX_L}{c_L T}} \right)$$

$$d_2 = 900 \cdot \frac{15}{60} \left( (0,786 - 1) + \sqrt{(0,786 - 1)^2 + \frac{8 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,786}{2123 \cdot \frac{15}{60}}} \right) \quad (85)$$

$$d_2 = 3,0 \text{ s}$$



- Progresijski faktor prilagodbe  $PF$

$$PF = 1,000 \quad (86)$$

- Kašnjenje grupe trakova  $d$

$$d = d_1 \cdot PF + d_2 = 10,3 \cdot 1,000 + 3,0 = 13,3 \text{ s/voz} \quad (87)$$

- Razina usluge grupe trkova = LOS B

- Duljina repa čekanja prvog reda  $Q_1$

$$Q_1 = PF_2 \frac{\frac{v_L C}{3\,600} \left(1 - \frac{g}{C}\right)}{1 - \left[\min(1, X_L) \frac{g}{C}\right]} = 1,000 \frac{\frac{1\,668 \cdot 150}{3\,600} \left(1 - \frac{115}{150}\right)}{1 - \left[0,786 \cdot \frac{115}{150}\right]} = 41 \text{ voz} \quad (88)$$

- Duljina repa čekanja drugog reda  $Q_2$

$$Q_2 = \frac{c_L T}{4} \left[ (X_L - 1) + \sqrt{(X_L - 1)^2 + \frac{8k_b X_L}{c_L T}} \right]$$

$$Q_2 = \frac{2\,123 \cdot 0,25}{4} \left[ (0,786 - 1) + \sqrt{(0,786 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 2,766 \cdot 0,786}{2\,123 \cdot 0,25}} \right] \quad (89)$$

$$Q_2 = 9 \text{ voz}$$

- Faktor prilagodbe uslijed nejednoličnih dolazaka na raskrižje  $k_b$

$$k_b = 0,12 \left( \frac{s_L g}{3\,600} \right)^{0,7} = 0,12 \left( \frac{2\,769 \cdot 115}{3\,600} \right)^{0,7} = 2,766 \quad (90)$$

- Duljina repa čekanja

$$Q = Q_1 + Q_2 = 41 + 9 = 50 \text{ voz} \quad (91)$$

### 7.3.3. Usporedba rezultata

Određeni su rezultati pomoću vrijednosti i faktora koje preporuča HCM [11] (slučaj 1) i vrijednosti utvrđenih snimanjem i analizom prometnih tokova (slučaj 2). U tablici 7 prikazani su rezultati za 07. prosinac 2019. (subota), a u tablici 8 rezultati za 24. prosinac 2019. (utorak).

Tablica 7. Usporedba rezultata (07. prosinac 2019.)

	Slučaj 1	Slučaj 2
Zasićeni prometni tok $s_L$ , voz/h	3 867	2 769
Kapacitet grupe trakova $c_L$ , voz/h	2 965	2 123
Stupanj zasićenja grupe trakova $X_L$ , -	0,563	0,786
Uniformno kašnjenje $d_1$ , s	7,2	10,3
Inkrementalno kašnjenje $d_2$ , s	0,8	3,0
Kašnjenje grupe trakova $d$ , s	8,0	13,3
Razina usluge grupe trkova, -	A	B
Duljina repa čekanja prvog reda $Q_1$ , voz	29	41
Duljina repa čekanja drugog reda $Q_2$ , voz	4	9
Duljina repa čekanja $Q$ , voz	33	50

Tablica 8. Usporedba rezultata (24. prosinac 2019.)

	Slučaj 1	Slučaj 2
Zasićeni prometni tok $s_L$ , voz/h	4 081	3 690
Kapacitet grupe trakova $c_L$ , voz/h	3 129	2 829
Stupanj zasićenja grupe trakova $X_L$ , -	0,514	0,568
Uniformno kašnjenje $d_1$ , s	6,7	7,2
Inkrementalno kašnjenje $d_2$ , s	0,6	0,8
Kašnjenje grupe trakova $d$ , s	7,3	8,0
Razina usluge grupe trkova, -	A	A
Duljina repa čekanja prvog reda $Q_1$ , voz	26	28
Duljina repa čekanja drugog reda $Q_2$ , voz	4	4
Duljina repa čekanja $Q$ , voz	30	32

## 8. PRIJEDLOZI MJERA ZA POBOLJŠANJE KVALIETE ODVIJANJA PROMETNIH TOKOVA

U nastavku su predložene mjere i zahvati na lokaciji predmetnog raskrižja kojima je moguće poboljšati odvijanje prometnih tokova i unaprijediti prometni sustav u cjelini. Predložene mjere temelje se na rezultatima analize postojećeg stanja, bez prognoze prometa.

- Trenutna mjera optimizacije horizontalne i vertikalne prometne signalizacije, ako se dodatnom analizom utvrdi potreba;
- Trenutna mjera korekcije signalnog plana i upravljačke logike, nakon provedenog brojanja prometnih tokova ili automatska regulacija signalnog plana prema opterećenju pojedinog privoza;
- Trenutna mjera djelovanja na organizaciju elemenata prometnog sustava je poboljšanje organizacije sadašnjeg sustava javnog gradskog prijevoza kako bi se korisnike potaklo na korištenje istoga;
- Dugoročna mjera djelovanja na prometnu infrastrukturu je rekonstrukcija postojećeg raskrižja. Sadašnje odvijanje prometnih tokova je na jednoj razini, a prijedlog je denivelacija raskrižja, kako bi se promet odvijao u dvije razine, na razini 0 semaforizirano raskrižje, a na razini -1 podvožnjak sa tri prometna traka u oba smjera;
- Dugoročna mjera djelovanja na prometnu infrastrukturu je izgradnja jednog prometnog traka u oba smjera na obilaznici i povećanje broja čvorova na obilaznici, kako bi se omogućila bolja povezanost i rasteretila predmetna prometnica;
- Dugoročna mjera djelovanja na prometnu infrastrukturu je stvaranje novog gradskog longitudinalnog pravca sjeverno Ilice, od istočnog do zapadnog dijela Grada Zagreba, čime bi se postojeći pravci rasteretili;
- Dugoročna mjera djelovanja na organizaciju elemenata prometnog sustava je predstavljanje novog prometnog sustava (podzemna željeznica) na koji ne utječu dešavanja na postojećim prometnicama i time osigurava pouzdanost.

Zbog složenosti interakcijskih odnosa između prometnih eniteta rješavanju problema u prometnom sustavu potrebno je pristupiti sustavno i koordinairno. Jednako tako rješavanju prometnih problema potrebno je pristupiti globalno i sanirati cijele dionice. Kako bi se riješio problem prometnog opterećenja Slavonske avenije, potrebno je sanirati prometnicu u cjelini (sve čvorove), a ne jedno ili dva raskrižja.

Primjenjeni postupak snimanja prometnih tokova, preloženi alat za statističku analizu kao i analiza rezultat istraživanja, mogu biti polazna osnova za dalje istraživanje i analizu prometnih tokova, kako na predmetnom raskrižju, tako i u prometnu sustavu Grada Zagreba u cjelini. Prijedlozi za daljnji razvoj i poboljšanja uključuju:

- Automatizirano brojanje prometnih tokova kako bi se izbjegla subjektivna pogreška istraživača prilikom brojanja vozila;
- Brojanje prometnih tokova jedan tjedan (jedan mjesec), pomoću automatiziranih uređaja koji mogu detektirati broj i brzinu vozila, vremena slijeda vozila i razmak slijeda kako bi se ostvario točniji uvid u trenutno odvijanje prometnih tokova, pri brojanju vozila sa snimke brojač ručno zaustavlja snimku kada prema utvrdi da je vozilo prešlo preko zamišljene linije i time dolazi do greške u očitavanju vremena slijeda;
- Izrada prometne prognoze i ocjena jesu li predložena rješenja dugoročno održiva, korekcija predloženih mjera za poboljšanje odvijanja prometnih tokova.

## 9. ZAKLJUČAK

U diplomskom radu obavljena je analiza vremena slijeda kao jednog od važnijih parametra odvijanja prometnih tokova, na istočnom privozu, grupi trakova za ravno, lijevo i desno skretanje raskrižja Slavonske avenije i Ulice 13. Vrbik u Gradu Zagrebu. Prometni tokovi snimani su u dva navrata, u subotu 07. prosinca 2019. i utorak 24. prosinac 2019. Nakon snimanja obavljena je analiza prometnih tokova s ciljem utvrđivanja vremena slijeda i ostalih statističkih parametara vremena slijeda.

Dan je uvod u osnovne parametre koji opisuju kretanje pojedinačnog vozila u prometnom toku i pomoću matematičkih relacija izvedene su veze između osnovnih parametra. Sve je potkrijepljeno primjerom kako bi se praktično prikazala veza između osnovnih parametara prometnih tokova. Također su prikazani i osnovni parametri za opisivanje prometnih tokova. Od sedam osnovnih parametra za opisivanje prometnih tokova nastavak rada usredotočuje se na interval slijeđenja vozila u prometnom toku, odnosno vrijeme slijeda. Prikazane su relacije između osnovnih parametra prometnog toka (protok-gustoća-brzina). Prvi model prometnog toka, na temelju empirijskih istraživanja matematički je opisao Greenshield, pomoću pravaca i kvadratnih funkcija. Na osnovu njegovih modela razvijeni su mnogi jednorežimski modeli prometnih tokova. No zbog njihove nemogućnosti dovoljno preciznog opisivanja prometnih tokova u cijelom rasponu gustoće, razvijeni su viserežimski modeli prometnog toka. Kako bi se ostvarila veća točnost opisivanja prometnih tokova razvijeni su „state of art“ modeli prometnog toka koji sadrže tri i više parametra u matematičkom zapisu i time omogućuju točnije opisivanje prometnih tokova. U današnje vrijeme koriste se složeni modeli prometnog toka višeg reda, tzv. diferencijalni modeli, čija su osnova fizikalni zakon očuvanja mase, odnosno očuvanja vozila na promatranoj prometnoj mreži. Takve modele nije moguće riješiti klasičnim pristupom, već su potrebni složeni računalni alati kojima se numerički mogu modelirati i simulirati stotine kilometara prometne mreže, a mogu se izvoditi u stvarnom vremenu.

Nakon snimanja i brojanja prometnih tokova, pomoću programskog paketa *MS Excel* obavljena je statistička analiza. Brojanje prometnih tokova odvijalo se u 5-minutnim intervalima kako bi se u slučaju zagušenja utvrdilo u kojem intervalu dolazi do njega. Utvrđene vrijednosti za 07. prosinac 2019. iznosile su 587 vozila u lijevom prometnom traku, 589 vozila u srednjem prometnom traku, 275 vozila u desnom prometnom traku, dok je ukupan broj vozila u grupi trakova za ravno istočnog privoza iznosio 1451. Lijevo je skrenulo 109 vozila, a desno 97 vozila. Za 24. prosinac 2019. vrijednosti su iznosile 544 vozila u lijevom prometnom traku, 537 vozila u srednjem prometnom traku, 335 vozila u desnom prometnom traku, dok je ukupan broj vozila

u grupi trakova za ravno istočnog privoza iznosio 1416. Lijevo je skrenulo 208 vozila, a desno 188 vozila.

Medijan vremena slijeda za 07. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosio je 2,5 s, za srednji prometni trak 2,8 s, za desni prometni trak 4,0 s, dok je za grupu trakova 2,7 s. Za lijevo skretanje iznosio je 2,3 s, a desno skretanje 8,2 s. Medijan vremena slijeda za 24. prosinac 2019. za lijevi prometni trak iznosio je 2,0 s, za srednji prometni trak 2,3 s, za desni prometni trak 2,6 s, dok je za grupu trakova 2,2 s. Za lijevo skretanje iznosio je 2,1 s, a desno skretanje 3,5 s.

Nakon što je određen broj vozila koji prolazi istočnim privozom raskrižja, obavljena je analiza propusne moći i određivanje razine usluge pomoću HCM metodologije, samo za prolazne zbog nepoznavanja potpunog signalnog plana raskrižja. Zasićeni prometni tok određen je na dva načina, prvi je pomoću preporučenih vrijednosti i faktora prilagodbe iz HCM. Na taj način za 07. prosinac određen je zasićeni prometni tok od 3 867 voz/h, dok je kapacitet grupe trakova 2 965 voz/h. U drugom slučaju, zasićeni prometni tok određuje se pomoću analize vremena slijeda vozila. Na taj način određen je zasićeni prometni tok od 2 769 voz/h, i kapacitet grupe trakove od 2 123 voz/h. Za 24. prosinac 2019. prema preporukama HCM određen je zasićeni prometni tok od 4 081 voz/h i kapacitet grupe trakova od 3 129 voz/h. analize vremena slijeda, razina usluge B. Za 24. prosinac 2019. za oba slučaja utvrđena je razina usluge A.

Potrebno je obaviti dodatnu analizu prometnih tokova u dužem vremenskom razdoblju (tjedan, mjesec), radi određivanja relevantnih podataka, mehanizama i vremena nastanka zagušenja promatranog raskrižja u cilju predlaganja konkretnih mjera za rješavanje problema zagušenja raskrižja i cijele prometnice.

Iako provednim snimanjima i istraživanjem za navedene dane i u navedenom vremenu nije utvrđeno nastajanje zagušenja predmetnog raskrižja, iz iskustva može se zaključiti da su zagušenja predmetnog raskrižja i cijele Slavonske avenije česta pojava. Poboljšanjem odvijanja kvalitete prometnih tokova na raskrižju smanjila bi se akumulacija vozila na stop crti raskrižja za crvenog svijetla na semaforu (zabrane prolazna korz raskrižje). Jedan od mjera za poboljšanje toka je „povećanje“ pažnje vozača, što bi doprinjelo smanjenju izgubljenog vremena u raskrižju i smanjulo vremena slijeda između vozila. Smanjenjem vremena slijeda povećao bi se broj vozila koji tijekom slobodnog prolaza prolaze korz raskrižje, no treba paziti da se to vrijeme ne smanji ispod neke vrijednosti kako se ne bi postigao suprotni efekt i dešavala se prometne nesreće koje za uzrok imaju smanjenje vremena slijeda (npr. nalet na vozilo ispred).

## LITERATURA

- [1] Dadić I., Kos G., Ševrović M.; Teorija prometnog toka; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; Zagreb 2014.
- [2] Daiheng N.; Traffic Flow Theory - Characteristics, Experimental Methods, and Numerical Techniques; Department of Civil and Environmental Engineering, University of Massachusetts Amherst, MA, USA; 2016.
- [3] Statistički ljetopis Grada Zagreba 2018.;  
preuzeto s: <https://www.zagreb.hr/statisticki-ljetopis-grada-zagreba/1044>;  
[Pristupljeno: kolovoz 2019.]
- [4] Razvojna strategija Grada Zagreba za razdoblje do 2020. godine;  
preuzeto s: <https://www.zagreb.hr>; [Pristupljeno: kolovoz 2019.]
- [5] Legac I.; Cestovne prometnice I; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; Zagreb 2006.
- [6] Zakon o sigurnosti prometa na cestama;  
preuzeto s: <https://www.zakon.hr/z/78/Zakon-o-sigurnosti-prometa-na-cestama>;  
[Pristupljeno: srpanj 2019.]
- [7] Google Maps; preuzeto s: <https://www.google.com/maps>;  
[Pristupljeno: kolovoz 2019.]
- [8] Maßnahmen Gegen Unfallhäufungen Auswertung Von Straßenverkehrs-Unfällen, teil 1. Isk & GDV, 1998, Köln
- [9] Bilten o sigurnosti cestovnog prometa 2018.; preuzeto s:  
[https://mup.gov.hr/UserDocsImages//statistika/2019//bilten\\_promet\\_2018.pdf](https://mup.gov.hr/UserDocsImages//statistika/2019//bilten_promet_2018.pdf);  
[Pristupljeno: srpanj 2019.]
- [10] Pravilniku o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa, preuzeto s:  
[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2001\\_12\\_110\\_1829.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2001_12_110_1829.html);  
[Pristupljeno: kolovoz 2019.]
- [11] Highway Capacity Manual; Transport Research Board, National Research Council; 2000.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Osnovni parametri kretanja pojedinačnog vozila u funkciji vremena .....	5
Slika 2. Protok vozila na promatranom presjeku [1].....	5
Slika 3. Gustoća prometnog toka [1].....	6
Slika 4. Srednja prostorna brzina prometnog toka [1] .....	6
Slika 5. Srednja vremenska brzina [1].....	7
Slika 6. Brzina u različitim odvijanjima prometnog toka [1] .....	7
Slika 7. Razmaci u slijedenju vozila [1] .....	8
Slika 8. Rezultati empirijskih istraživanja [2] .....	12
Slika 9. Greenshieldove protok-gustoća-brzina relacije [2].....	14
Slika 10. Greenshieldove relacije prometnog toka [2].....	15
Slika 11. Usporedba jednorežimskih modela prometnog toka [2] .....	16
Slika 12. Usporedba višerežimskih modela prometnog toka [2].....	17
Slika 13. Usporedba „state of art“ modela prometnog toka [2].....	20
Slika 14. Gravitacijsko područje .....	23
Slika 15. Geoprometni položaj Grada Zagreba .....	24
Slika 16. Karakteristike prometnice .....	25
Slika 17. Satelitska snimka raskrižja [7].....	27
Slika 18. Prometne nesreće i nesreće s nastradalima od 1955. do 2017. godine .....	29
Slika 19. Prometne nesreće s ozlijeđenim osobama i pogonile osobe od 1955. do 2017. godine.....	30
Slika 20. Broj prometnih nesreća uzrokovanih vožnjom na nedovoljnoj udaljenosti s ozlijeđenim i poginulim osobama.....	31
Slika 21. Broj lakše ozlijeđenih, teško ozlijeđenih i poginulih osoba u nesrećama uzrokovanim nedovoljnom udaljenosti između vozila .....	31
Slika 22. Broj prometnih nesreća uzrokovanih zakašnjelim uočavanjem opasnosti s ozlijeđenim i poginulim osobama.....	32
Slika 23. Broj lakše ozlijeđenih, teško ozlijeđenih i poginulih osoba u nesrećama uzrokovanim zakašnjelim uočavanjem opasnosti .....	32
Slika 24. Broj prometnih nesreća uzrokovanih naglim kočenjem s ozlijeđenim osobama .....	33
Slika 25. Broj lakše ozlijeđenih, teško ozlijeđenih i poginulih osoba u nesrećama uzrokovanim zakašnjelim uočavanjem opasnosti.....	33
Slika 26. Datumi snimanja prometnih tokova.....	34
Slika 27. Vremena slijeda (07. prosinac 2019.) .....	35
Slika 28. 5-minutni protoci vozila (07. prosinac 2019.) .....	36
Slika 29. Vremena slijeda (24. prosinac 2019.) .....	37
Slika 30. 5-minutni protoci vozila (24. prosinac 2019.) .....	38
Slika 31. Apsolutne frekvencije (07. prosinac 2019.).....	41
Slika 32. Apsolutne frekvencije (24. prosinac 2019.).....	42
Slika 33. Percentilne vrijednosti (07. prosinac 2019.).....	43



Slika 34. Percentilne vrijednosti (24. prosinac 2019.).....	44
Slika 35. Usporedba percentilnih vrijednosti .....	45
Slika 36. Ponderirana aritmetička sredina .....	46
Slika 37. Harmonijska sredina .....	47
Slika 38. Medijan.....	48
Slika 39. Raspon varijacije .....	49
Slika 40. Varijanca.....	50
Slika 41. Standardna devijacija .....	51
Slika 42. Koeficijent varijacije.....	52
Slika 44. Metodologija za određivanje razine usluge raskrižja.....	60
Slika 45. Broj prometnih nesreća, prometnih nesreća s nastradalim osobama i udio prometnih nesreća s nastradalim osobama u razdoblju od 1955. do 2017. godine.....	89
Slika 46. Broj ozlijeđenih i poginulih osoba u prometnim nesrećama u razdoblju od 1955. do 2017. godine .....	90
Slika 47. Prometne nesreće uzrokovane vožnjom na nedovoljnoj udaljenosti s poginulim i ozlijeđenim osobama u razdoblju od 2005. do 2017. godine..	91
Slika 48. Broj stradalih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim vožnjom na nedovoljnoj udaljenosti u razdoblju od 2005. do 2017. godine.....	92
Slika 49. Prometne nesreće uzrokovane zakašnjelim uočavanjem opasnosti s poginulim i ozlijeđenim osobama u razdoblju od 2005. do 2017. godine..	93
Slika 50. Broj stradalih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim zakašnjelim uočavanjem opasnosti u razdoblju od 2005. do 2017. godine.....	94
Slika 51. Prometne nesreće uzrokovane naglim usporavanjem s ozlijeđenim osobama u razdoblju od 2005. do 2017. godine .....	95
Slika 52. Broj stradalih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim naglim usporavanjem u razdoblju od 2005. do 2017. godine.....	96

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba jednorežimskih modela prometnog toka.....	16
Tablica 2. Usporedba višerežimskih modela prometnog toka [2].....	17
Tablica 3. Usporedba parametara „state of art“ modela prometnog toka .....	20
Tablica 4. Procijenjeni troškovi prometnih nesreća [8] .....	28
Tablica 5. Razina usluge za semaforizirana raskrižja .....	60
Tablica 6. Razine usluge za semaforizirana raskrižja.....	66
Tablica 7. Usporedba rezultata (07. prosinac 2019.) .....	74
Tablica 8. Usporedba rezultata (24. prosinac 2019.) .....	74
Tablica 9. Broj prometnih nesreća, prometnih nesreća s nastradalim osobama i udio prometnih nesreća s nastradalim osobama u razdoblju od 1955. do 2017. godine.....	88
Tablica 10. Broj ozlijeđenih i poginulih osoba u prometnim nesrećama u razdoblju od 1955. do 2017. godine .....	90
Tablica 11. Broj prometnih nesreća uzrokovanih vožnjom na nedovoljnoj udaljenosti s poginulim i ozlijeđenim osobama u razdoblju od 2005. do 2017. godine	91
Tablica 12. Broj poginulih i ozlijeđenih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim vožnjom na nedovoljnoj udaljenosti u razdoblju od 2005. do 2017. godine .....	92
Tablica 13. Broj prometnih nesreća uzrokovanih zakašnjelim uočavanjem opasnosti s poginulim i ozlijeđenim osobama u razdoblju od 2005. do 2017. godine..	93
Tablica 14. Broj poginulih i ozlijeđenih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim zakašnjelim uočavanjem opasnosti u razdoblju od 2005. do 2017. godine	94
Tablica 15. Broj prometnih nesreća uzrokovanih naglim usporavanjem s ozlijeđenim osobama u razdoblju od 2005. do 2017. godine .....	95
Tablica 16. Broj ozlijeđenih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim naglim usporavanjem u razdoblju od 2005. do 2017. godine.....	96
Tablica 17. Određivanje zasićenog prometnog toka (07. prosinac 2019.).....	97
Tablica 18. Određivanje zasićenog prometnog toka (24. prosinac 2019.).....	98

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
$a$	$m/s^2$	Akceleracija
$C_j$	$km/h$	Kinematika brzina šok vala
$C$	$s$	Trajanje ciklusa
$c_i$	$voz/h$	Kapacitet grupe trakova
$d$	$s$	Vrijeme kašnjenja po grupi trakova
$d_1$	$s$	Uniformno vrijeme kašnjenja
$d_2$	$s$	Inkrementalno vrijeme kašnjenja
$f_a$	-	Faktor prilagodbe za područje izračuna
$f_b\%$	-	Percentilni faktor repa čekanja
$f_{bb}$	-	Faktor prilagodbe za javni gradski prijevoz
$f_g$	-	Faktor prilagodbe za nagib ceste
$f_{HV}$	-	Faktor prilagodbe za teška vozila
$f_{LPB}$	-	Pješачki/biciklistički faktor prilagodbe za lijeve skretače u grupi trakova
$f_{LT}$	-	Faktor prilagodbe za lijeve skretače
$f_{LU}$	-	Faktor prilagodbe za iskorištenje prometnog traka
$f_P$	-	Faktor prilagodbe za aktivnosti povezane s parkingom vozila
$f_r$	-	Relativna frekvencija
$f_{Rpb}$	-	Pješачki/biciklistički faktor prilagodbe za desne skretače u grupi trakova
$f_{RT}$	-	Faktor prilagodbe za desne skretače
$FVS$	-	Faktor vršnog sata
$f_w$	-	Faktor prilagodbe širine traka
$g$	$voz/km$	Gustoća prometnog toka
$g_i$	$s$	Efektivno zeleno vrijeme
$k$	$m/s^3$	Impuls

$k_b$	-	Faktor prilagodbe uslijed nejednoličnih dolazaka na raskrižje
$k_j$	voz/km	Gustoća zagušenog prometnog toka
$l$	m	Prosječna dužina vozila u prometnom toku
$L$	s	Izgubljeno vrijeme u ciklusu
$Me$	-	Medijan
$Mo$	-	Mod
$N$	-	Broj prometnih trakova u grupi trakova
$n_{voz}$	VOZ	Broj vozila
$PF$	-	Progresijski faktor prilagodbe
$PF_2$	-	Progresijski faktor prilagodbe duljine repa čekanja prvog reda
$P_{PA}$	%	Homogenost prometnog toka
$Q$	voz	Duljina repa čekanja
$Q_{\%}$	voz	Percentil repa čekanja
$Q_1$	voz	Duljina repa čekanja prvog reda
$Q_2$	voz	Duljina repa čekanja drugog reda
$q_m$	voz/h	Maksimalni kapacitet prometnice
$q_{PA}$	voz	Broj putničkih automobila u prometnom toku
$q_{uk}$	voz	Ukupan broj vozila u prometnom toku
$q_{voz}$	voz/h	Protok vozila
$r$	-	Širina razreda
$R$	-	Raspon varijacije
$R_p$	-	Kalibracijski parametar tipa dolaska na raskrižje
$s$	m	Put
$s_0$	voz/h	Osnovni zasićeni prometni tok za jedan trak
$s_L$	voz/h	Zasićeni prometni tok za grupu trakova
$s_{sl}$	m	Razmak slijeđenja
$t$	s	Vrijeme

---

$t_s$	s	Interval slijeda
$v$	m/s	Brzina
$V$	km/h	Brzina
$V$	%	Koeficijent varijacije
$v_f$	km/h	Brzina slobodnog prometnog toka
$X$	-	Stupanj zasićenja
$X_A$	-	Ponderirana aritmetička sredina
$X_C$	-	Kritični stupanj zasićenja
$X_H$	-	Harmonijska sredina
$\gamma$	-	Koeficijent agresije vozača u prometnom toku
$\gamma_3$	-	Koeficijent asimetrije
$\delta$	-	Akceleracijski eksponent
$\varepsilon$	-	Koeficijent spoljoštenosti
$\lambda$	-	Koeficijent nagiba krivulja brzina
$\rho$	-	Omjer gustoće prometnog toka i gustoće forsiranog toka
$\sigma$	-	Standardna devijacija
$\sigma^2$	-	Varijanca
$\varphi$	-	Omjer trenutnog i nazivnog protoka

**POPIS KRATICA**

Kratika	Opis
IDM	engl. Intellignet Driver Model
LCM	engl. Longitudinal Control Model
LOS	engl. Level of Service
NPS	engl. Del Castillio Negative Power Model
PGDP	Prosječan godišnji dnevni promet

## POPIS PRILOGA

1. Analiza prometnih nesreća
2. Određivanje zasićenog prometnog toka za prolaznu grupu trakova na istočnom privozu raskrižja
3. CD – R

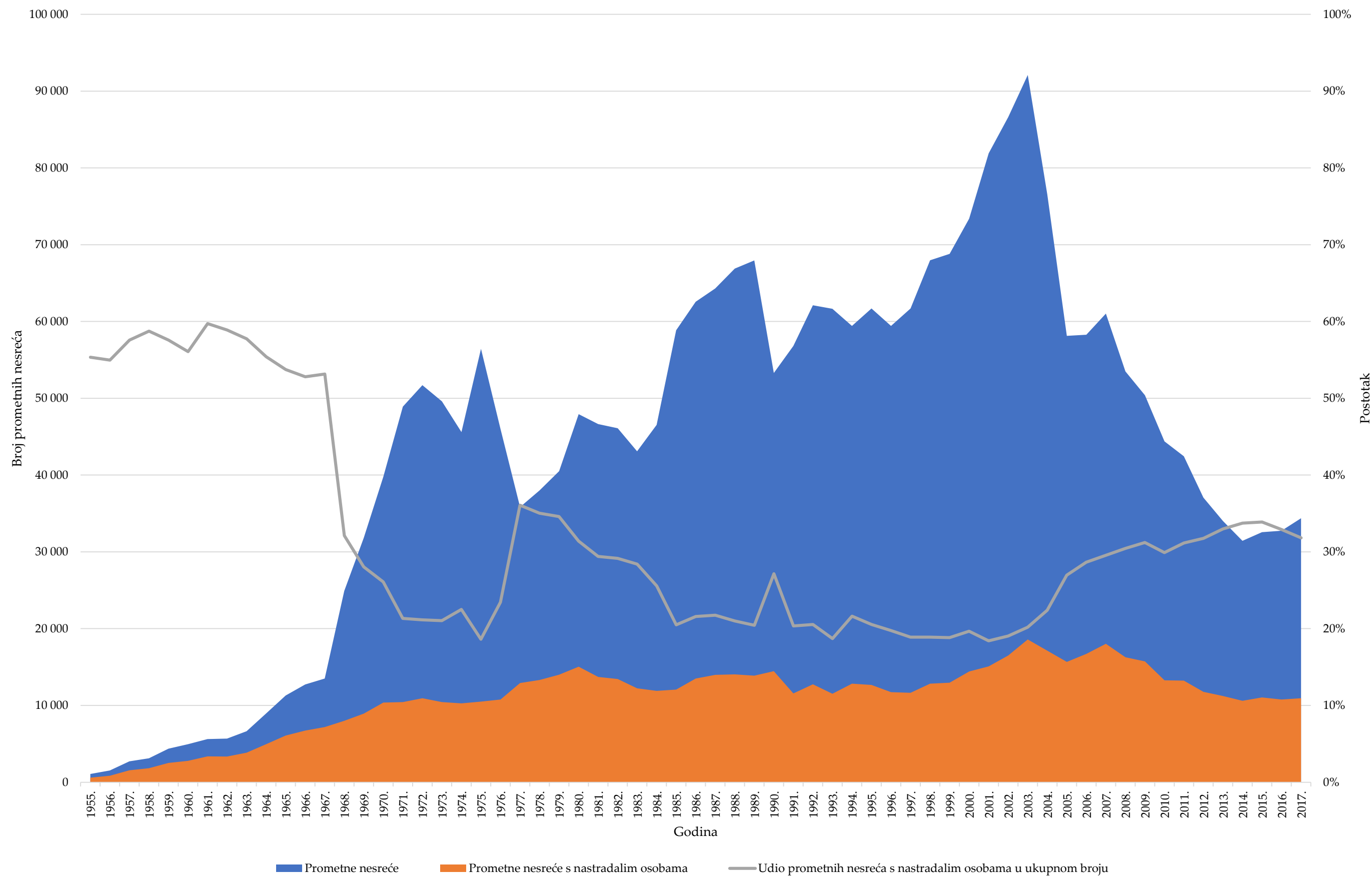
## PRILOG 1 – ANALIZA PROMETNIH NESREĆA

Tablica 9. Broj prometnih nesreća, prometnih nesreća s nastradalim osobama i udio prometnih nesreća s nastradalim osobama u razdoblju od 1955. do 2017. godine

Godina	Prometne nesreće	Prometne nesreće s nastradalim osobama	Udio prometnih nesreća s nastradalim osobama u ukupnom broju
1955.	1 077	596	55,3%
1956.	1 539	846	55,0%
1957.	2 716	1 564	57,6%
1958.	3 113	1 829	58,8%
1959.	4 370	2 516	57,6%
1960.	4 957	2 780	56,1%
1961.	5 626	3 360	59,7%
1962.	5 683	3 347	58,9%
1963.	6 649	3 839	57,7%
1964.	8 954	4 962	55,4%
1965.	11 296	6 071	53,7%
1966.	12 729	6 721	52,8%
1967.	13 505	7 179	53,2%
1968.	24 914	8 002	32,1%
1969.	31 844	8 933	28,1%
1970.	39 788	10 382	26,1%
1971.	48 917	10 432	21,3%
1972.	51 715	10 936	21,1%
1973.	49 611	10 442	21,0%
1974.	45 599	10 262	22,5%
1975.	56 437	10 509	18,6%
1976.	45 984	10 775	23,4%
1977.	35 831	12 924	36,1%
1978.	38 008	13 318	35,0%
1979.	40 504	14 014	34,6%
1980.	47 925	15 053	31,4%
1981.	46 633	13 716	29,4%
1982.	46 087	13 441	29,2%
1983.	43 096	12 238	28,4%
1984.	46 531	11 896	25,6%
1985.	58 866	12 072	20,5%
1986.	62 563	13 501	21,6%

Godina	Prometne nesreće	Prometne nesreće s nastradalim osobama	Udio prometnih nesreća s nastradalim osobama u ukupnom broju
1987.	64 300	13 985	21,7%
1988.	66 894	14 048	21,0%
1989.	67 952	13 888	20,4%
1990.	53 297	14 471	27,2%
1991.	56 815	11 559	20,3%
1992.	62 120	12 758	20,5%
1993.	61 656	11 529	18,7%
1994.	59 420	12 846	21,6%
1995.	61 685	12 668	20,5%
1996.	59 420	11 740	19,8%
1997.	61 685	11 652	18,9%
1998.	67 982	12 846	18,9%
1999.	68 798	12 958	18,8%
2000.	73 387	14 430	19,7%
2001.	81 911	15 079	18,4%
2002.	86 611	16 500	19,1%
2003.	92 102	18 592	20,2%
2004.	76 540	17 140	22,4%
2005.	58 132	15 679	27,0%
2006.	58 283	16 706	28,7%
2007.	61 020	18 029	29,5%
2008.	53 496	16 283	30,4%
2009.	50 388	15 730	31,2%
2010.	44 394	13 272	29,9%
2011.	42 443	13 228	31,2%
2012.	37 065	11 773	31,8%
2013.	34 021	11 225	33,0%
2014.	31 432	10 607	33,7%
2015.	32 571	11 038	33,9%
2016.	32 757	10 779	32,9%
2017.	34 368	10 939	31,8%
Ukupno	2 736 012	692 433	25,3%

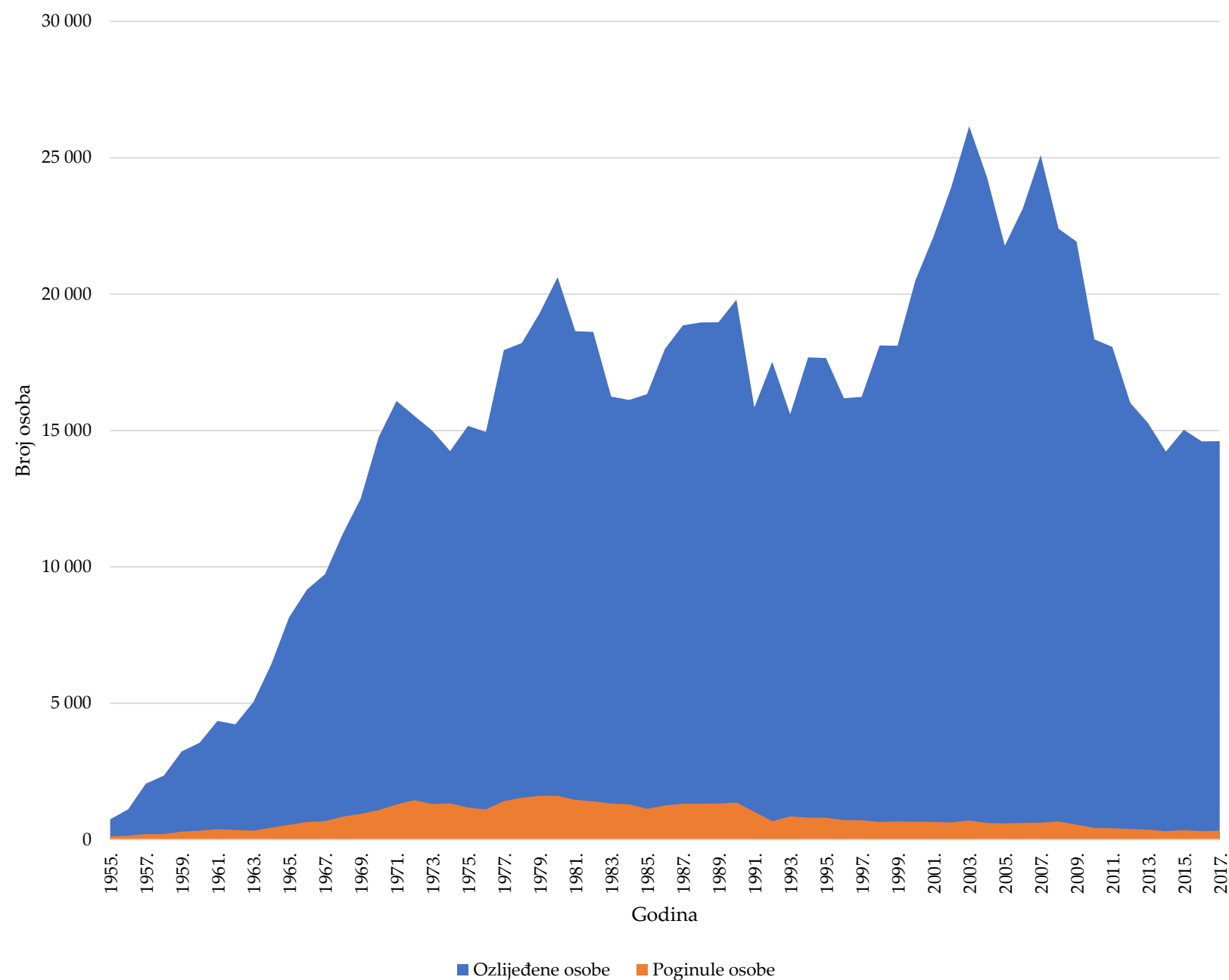




Slika 44. Broj prometnih nesreća, prometnih nesreća s nastradalim osobama i udio prometnih nesreća s nastradalim osobama u razdoblju od 1955. do 2017. godine

Tablica 10. Broj ozlijeđenih i poginulih osoba u prometnim nesrećama u razdoblju od 1955. do 2017. godine

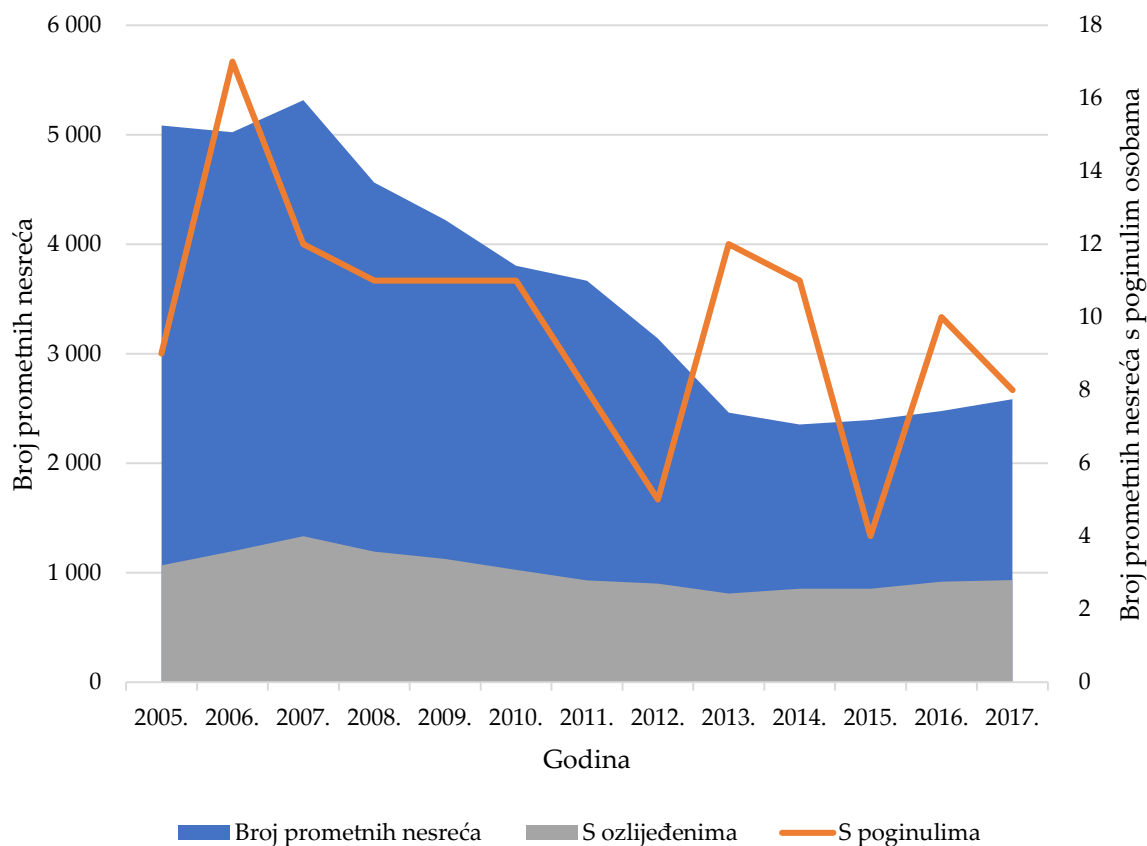
Godina	Ozlijeđene osobe	Poginule osobe	Godina	Ozlijeđene osobe	Poginule osobe
1955.	742	113	1987.	18 850	1 311
1956.	1 111	140	1988.	18 955	1 312
1957.	2 049	202	1989.	18 964	1 321
1958.	2 345	207	1990.	19 791	1 360
1959.	3 229	290	1991.	15 845	1 020
1960.	3 555	326	1992.	17 517	675
1961.	4 350	382	1993.	15 596	855
1962.	4 229	356	1994.	17 679	804
1963.	5 040	326	1995.	17 655	800
1964.	6 429	433	1996.	16 182	721
1965.	8 141	543	1997.	16 234	714
1966.	9 165	645	1998.	18 118	646
1967.	9 726	674	1999.	18 103	662
1968.	11 204	844	2000.	20 501	655
1969.	12 500	941	2001.	22 093	647
1970.	14 748	1 079	2002.	23 923	627
1971.	16 078	1 289	2003.	26 153	701
1972.	15 530	1 444	2004.	24 271	608
1973.	15 002	1 303	2005.	21 773	597
1974.	14 243	1 336	2006.	23 136	614
1975.	15 164	1 169	2007.	25 092	619
1976.	14 946	1 111	2008.	22 395	664
1977.	17 947	1 412	2009.	21 923	548
1978.	18 206	1 533	2010.	18 333	426
1979.	19 304	1 605	2011.	18 065	418
1980.	20 616	1 603	2012.	16 010	393
1981.	18 640	1 459	2013.	15 274	368
1982.	18 609	1 400	2014.	14 222	308
1983.	16 237	1 322	2015.	15 024	348
1984.	16 121	1 294	2016.	14 596	307
1985.	16 327	1 125	2017.	14 608	331
1986.	17 990	1 256	Ukupno	956 404	50 542



Slika 45. Broj ozlijeđenih i poginulih osoba u prometnim nesrećama u razdoblju od 1955. do 2017. godine

Tablica 11. Broj prometnih nesreća uzrokovanih vožnjom na nedovoljnoj udaljenosti s poginulim i ozlijeđenim osobama u razdoblju od 2005. do 2017. godine

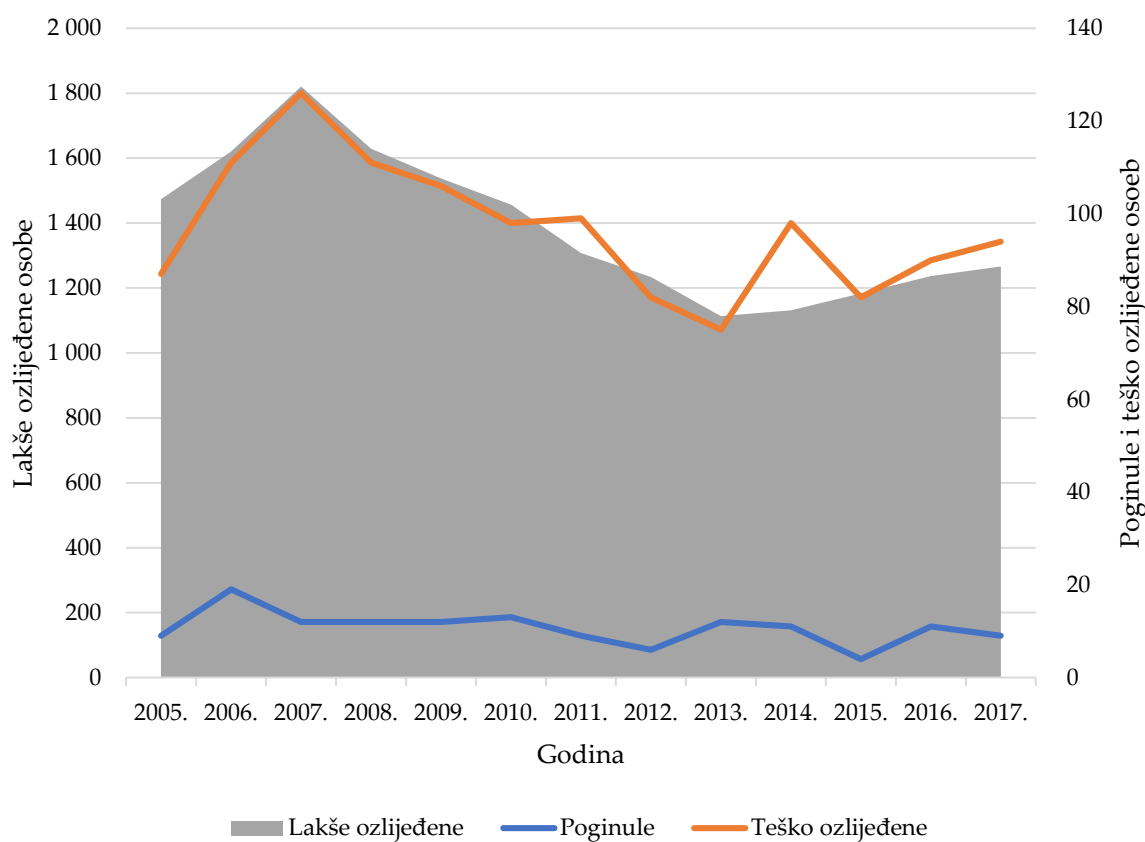
Godina	Broj prometnih nesreća	S poginulima	S ozlijeđenima
2005.	5 085	9	1 066
2006.	5 023	17	1 195
2007.	5 316	12	1 334
2008.	4 564	11	1 194
2009.	4 222	11	1 125
2010.	3 804	11	1 025
2011.	3 666	8	930
2012.	3 140	5	900
2013.	2 463	12	810
2014.	2 354	11	853
2015.	2 394	4	855
2016.	2 477	10	919
2017.	2 583	8	934
Ukupno	47 091	129	13 140



Slika 46. Prometne nesreće uzrokovane vožnjom na nedovoljnoj udaljenosti s poginulim i ozlijeđenim osobama u razdoblju od 2005. do 2017. godine

Tablica 12. Broj poginulih i ozlijeđenih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim vožnjom na nedovoljnoj udaljenosti u razdoblju od 2005. do 2017. godine

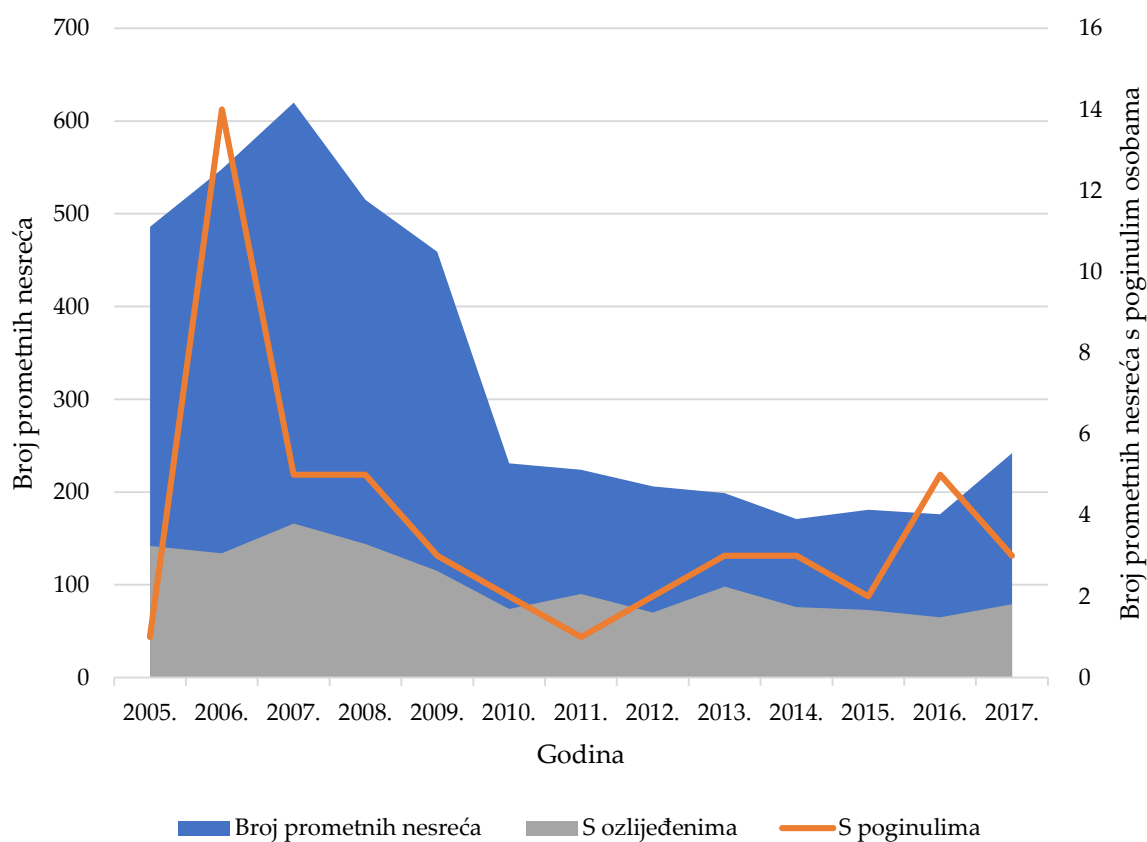
Godina	Poginule	Teško ozlijeđene	Lakše ozlijeđene
2005.	9	87	1 473
2006.	19	111	1 620
2007.	12	126	1 820
2008.	12	111	1 629
2009.	12	106	1 537
2010.	13	98	1 456
2011.	9	99	1 308
2012.	6	82	1 234
2013.	12	75	1 113
2014.	11	98	1 131
2015.	4	82	1 183
2016.	11	90	1 237
2017.	9	94	1 266
Ukupno	139	1 259	18 007



Slika 47. Broj stradalih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim vožnjom na nedovoljnoj udaljenosti u razdoblju od 2005. do 2017. godine

Tablica 13. Broj prometnih nesreća uzrokovanih zakašnjelim uočavanjem opasnosti s poginulim i ozlijeđenim osobama u razdoblju od 2005. do 2017. godine

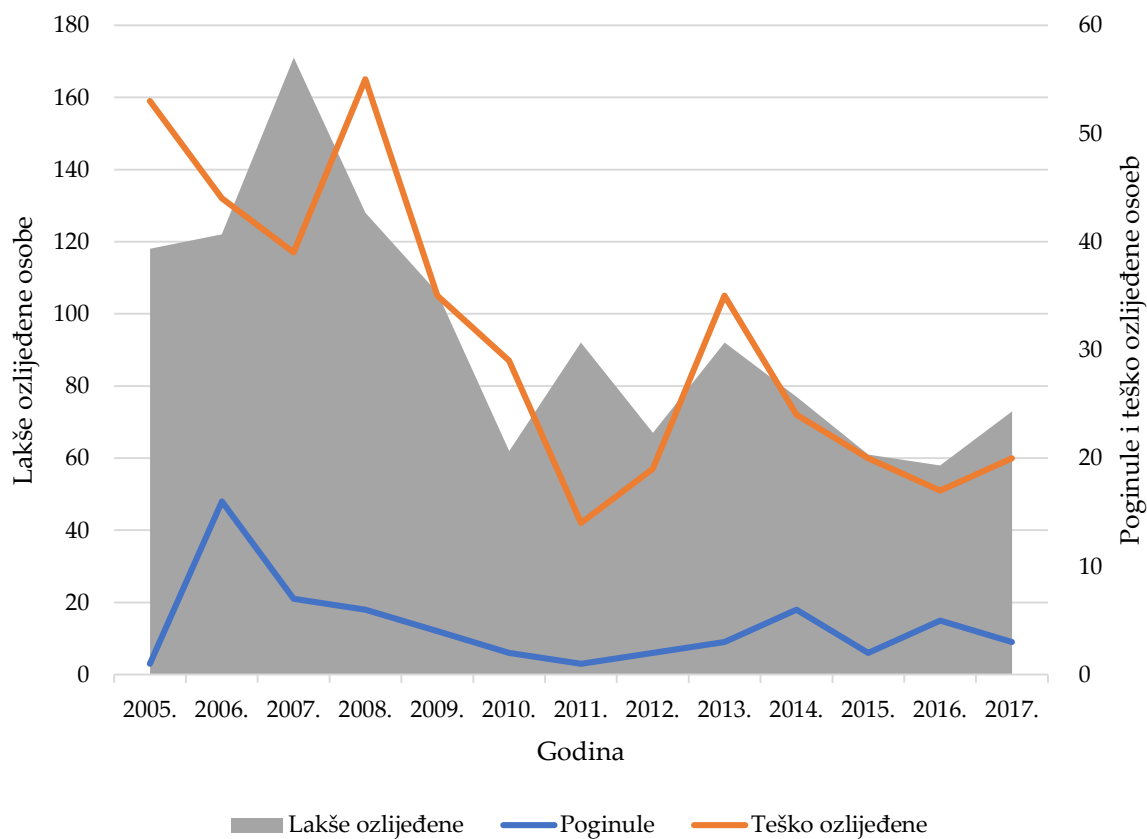
Godina	Broj prometnih nesreća	S poginulima	S ozlijeđenima
2005.	486	1	142
2006.	548	14	134
2007.	620	5	166
2008.	515	5	144
2009.	459	3	115
2010.	231	2	74
2011.	224	1	90
2012.	206	2	70
2013.	199	3	98
2014.	171	3	76
2015.	181	2	73
2016.	176	5	65
2017.	242	3	79
Ukupno	4 258	49	1 326



Slika 48. Prometne nesreće uzrokovane zakašnjelim uočavanjem opasnosti s poginulim i ozlijeđenim osobama u razdoblju od 2005. do 2017. godine

Tablica 14. Broj poginulih i ozlijeđenih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim zakašnjelim uočavanjem opasnosti u razdoblju od 2005. do 2017. godine

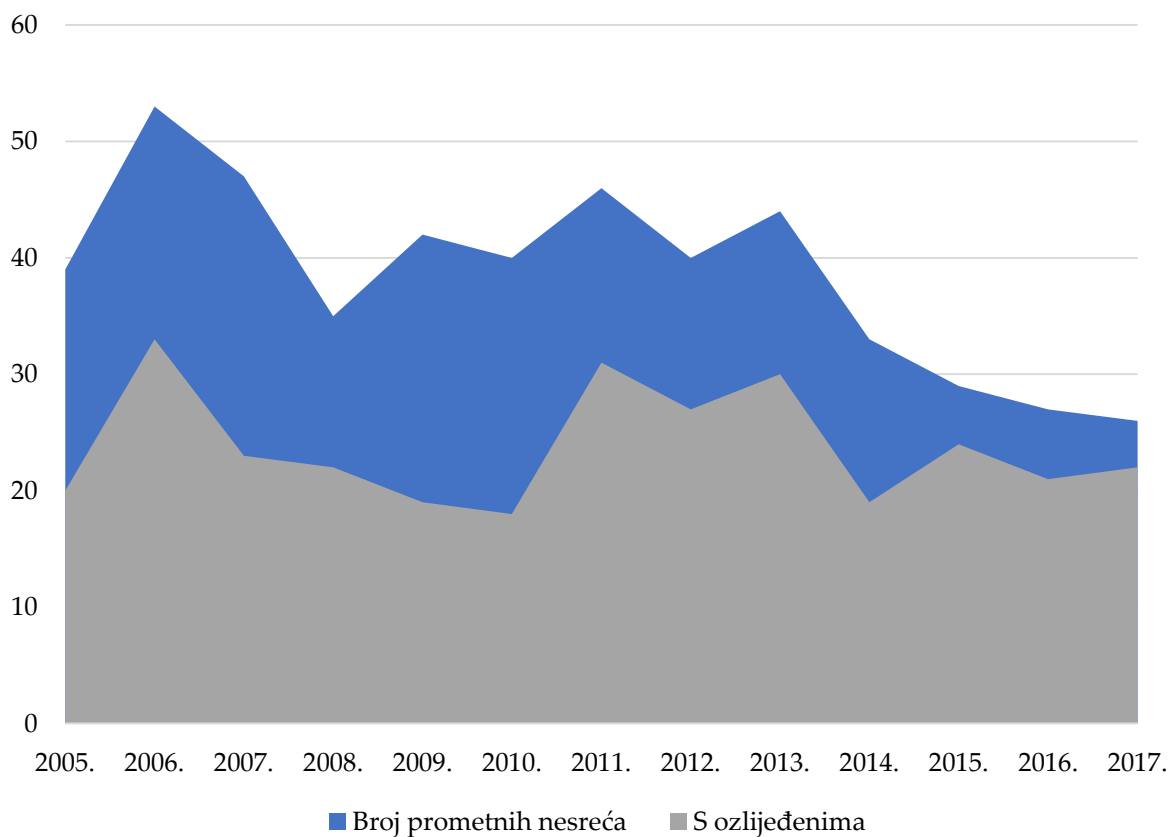
Godina	Poginule	Teško ozlijeđene	Lakše ozlijeđene
2005.	1	53	118
2006.	16	44	122
2007.	7	39	171
2008.	6	55	128
2009.	4	35	106
2010.	2	29	62
2011.	1	14	92
2012.	2	19	67
2013.	3	35	92
2014.	6	24	77
2015.	2	20	61
2016.	5	17	58
2017.	3	20	73
Ukupno	58	404	1 227



Slika 49. Broj stradalih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim zakašnjelim uočavanjem opasnosti u razdoblju od 2005. do 2017. godine

Tablica 15. Broj prometnih nesreća uzrokovanih naglim usporavanjem s ozlijeđenim osobama u razdoblju od 2005. do 2017. godine

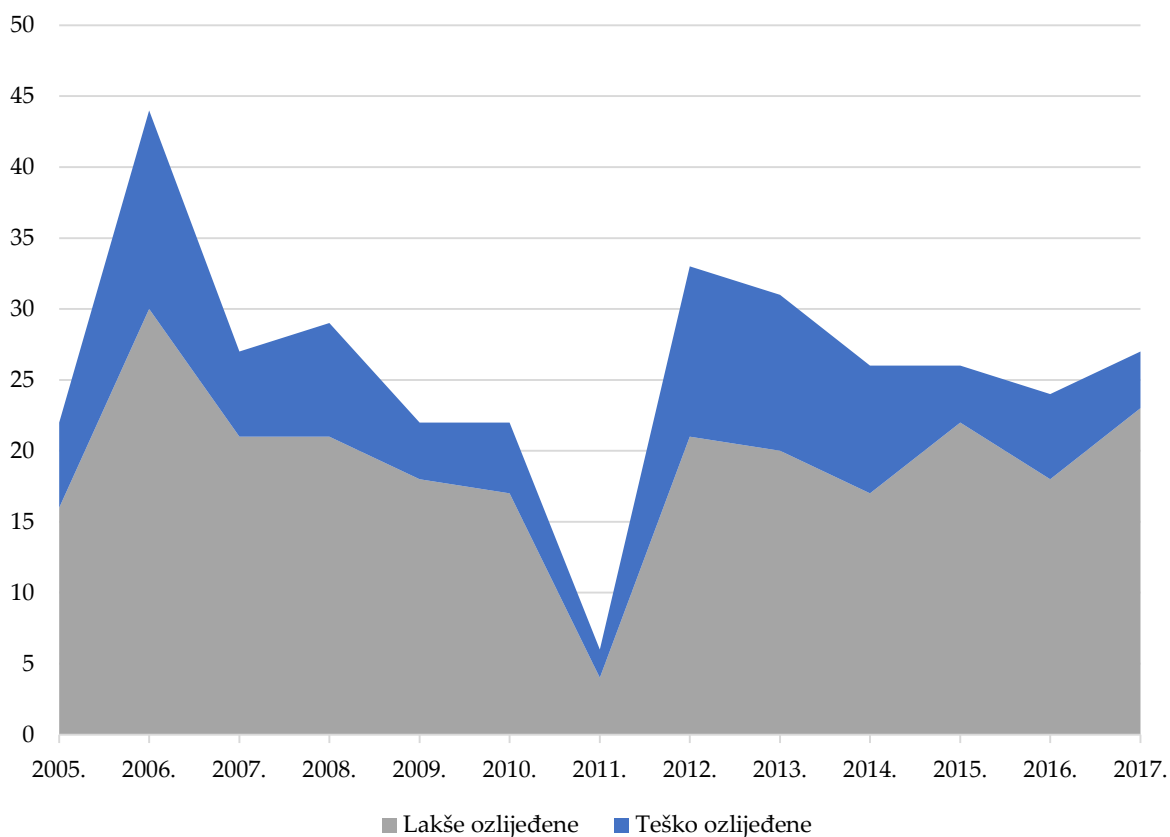
Godina	Broj prometnih nesreća	S ozlijeđenima
2005.	39	20
2006.	53	33
2007.	47	23
2008.	35	22
2009.	42	19
2010.	40	18
2011.	46	31
2012.	40	27
2013.	44	30
2014.	33	19
2015.	29	24
2016.	27	21
2017.	26	22
Ukupno	501	309



Slika 50. Prometne nesreće uzrokovane naglim usporavanjem s ozlijeđenim osobama u razdoblju od 2005. do 2017. godine

Tablica 16. Broj ozlijeđenih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim naglim usporavanjem u razdoblju od 2005. do 2017. godine

Godina	Lakše ozlijeđene	Teško ozlijeđene
2005.	16	6
2006.	30	14
2007.	21	6
2008.	21	8
2009.	18	4
2010.	17	5
2011.	4	2
2012.	21	12
2013.	20	11
2014.	17	9
2015.	22	4
2016.	18	6
2017.	23	4
Ukupno	248	91



Slika 51. Broj stradalih osoba u prometnim nesrećama uzrokovanim naglim usporavanjem u razdoblju od 2005. do 2017. godine



## PRILOG 2 – ODREĐIVANJE ZASIĆENOG PROMETNOG TOKA ZA PROLAZNU GRUPU TRAKOVA NA ISTOČNOM PRIVOZU RASKRIŽJA

Kada se zasićeni prometni tok utvrđuje na terenu uzima se vrijednost pražnjenja iza stop linije postignuta 10 do 14 s nakon početka zelene faze. Pri utvrđivanju mjeri se vrijeme prolaska prednje osovine četvrtog vozila preko stop linije i vrijeme prolaska prednje osovine zadnjeg vozila u zelenoj fazi preko stop linije. Potrebno je provesti minimalno 15 mjerenja, s više od 8 vozila kako bi se utvrdila zadovoljavajuća vrijednost slijeda vozila. U tablici su navedene vrijednosti mjerenja i vremena slijeda vozila. Određeno je vrijeme slijeda  $t_h = 3,902$  s (medijan mjerenja) i za njega određen zasićeni prometni tok.

$$t_h = \frac{t_{\text{zadnje}} - t_4}{n_{\text{zadnje}} - 4} \quad (1)$$

$$s_L = \frac{3600}{3,902} = 923 \text{ voz/traci/h} \quad (2)$$

Tablica 17. Određivanje zasićenog prometnog toka (07. prosinac 2019.)

Br. mjerenja	$t_{\psi}$ s	$t_{\text{zadnje}}$ s	$n_{\text{zadnje}}$ VOZ	$t_h$ s
1	08:01:25.253	08:02:53.656	28	3,927
2	08:03:50.293	08:05:18.030	23	4,737
3	08:06:25.723	08:08:08.878	26	4,852
4	08:09:09.910	08:10:24.196	26	4,852
5	08:13:57.954	08:15:25.899	23	4,725
6	08:16:27.299	08:17:53.671	29	3,555
7	08:19:12.252	08:20:26.005	25	3,593
8	08:21:22.143	08:22:55.408	30	3,697
9	08:24:13.090	08:25:20.150	24	3,593
10	08:26:21.150	08:27:53.316	29	3,902
11	08:29:22.652	08:30:14.695	15	4,840
12	08:31:53.154	08:32:52.256	21	4,333
13	08:34:09.438	08:35:23.025	26	3,410
14	08:36:41.539	08:38:09.709	28	3,785
15	08:39:10.643	08:40:24.661	23	3,983

$$s_L = \frac{3600}{2,928} = 1\,230 \text{ voz/traci/h} \quad (3)$$

Tablica 18. Određivanje zasićenog prometnog toka (24. prosinac 2019.)

Br. mjerenja	$t_d$ s	$t_{\text{zadnje}}$ s	$n_{\text{zadnje}}$ VOZ	$t_h$ s
1	08:01:31.116	08:02:41.716	21	4,641
2	08:04:19.643	08:05:13.388	25	2,619
3	08:06:39.893	08:07:43.548	24	3,253
4	08:09:23.936	08:10:16.856	24	2,888
5	08:11:40.098	08:12:43.566	30	2,438
6	08:19:03.377	08:20:07.178	24	2,799
7	08:24:03.055	08:25:09.766	23	3,265
8	08:26:41.265	08:27:37.809	24	2,928
9	08:36:49.963	08:37:41.297	24	2,660
10	08:39:10.821	08:40:10.455	32	2,244
11	08:44:02.882	08:46:10.635	28	2,657
12	08:46:39.548	08:47:41.660	19	4,263
13	08:51:49.429	08:52:43.278	22	3,117
14	08:54:19.663	08:55:12.003	20	3,145
15	08:56:39.640	08:57:39.508	22	3,447

Za 07. prosinac 2019. određen je zasićeni prometni tok od 923 voz/traci/h (medijan vremena slijeda 3,902 s). Za 24. prosinac 2019. određen je zasićeni prometni tok od 1 230 voz/traci/h (medijan vremena slijeda 2,928 s).



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih  
znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ diplomski rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ diplomskog rada

pod naslovom **Utjecaj vremena slijeda prometnih tokova na propusnu moć i**

**sigurnost prometa na raskrižju ulica Slavonska avenija i 13. Vrbik u Gradu Zagrebu**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student:

15.06.2020.

U Zagrebu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(potpis)