

Metoda procjene utjecaja raskrižja s kružnim tokom prometa na okoliš i gospodarstvo

Šubić, Nikola

Doctoral thesis / Disertacija

2018

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:119:785925>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-29**



Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ZAGREB

NIKOLA ŠUBIĆ

**METODA PROCJENE UTJECAJA
RASKRIŽJA S KRUŽNIM TOKOM
PROMETA NA OKOLIŠ I
GOSPODARSTVO**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2018.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ZAGREB

NIKOLA ŠUBIĆ

**METODA PROCJENE UTJECAJA
RASKRIŽJA S KRUŽNIM TOKOM
PROMETA NA OKOLIŠ I
GOSPODARSTVO**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

prof.dr.sc. Tomaž Tollazzi, dipl. ing.
izv.prof.dr.sc. Dubravka Hozjan, dipl. ing

Zagreb, 2018.



University of Zagreb

FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC SCIENCES
ZAGREB

NIKOLA ŠUBIĆ

**THE METHOD FOR ASSESSING THE
IMPACT OF ROUNDABOUTS ON THE
ENVIRONMENT AND THE ECONOMY**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:

Prof. Tomaž Tollazzi, Ph.D.
Assoc. Prof. Dubravka Hozjan, Ph.D.

Zagreb, 2018.

INFORMACIJE O MENTORIMA

- 1. Prof. dr. sc. Tomaž Tollazzi**
- 2. Izv. prof. dr. sc. Dubravka Hozjan**

ŽIVOTOPIS

Prof. dr. sc. Tomaž Tollazzi

Prof.dr.sc. Tomaž Tollazzi redoviti profesor u trajnom zvanju na Fakultetu za građevinarstvo, prometno inženjerstvo i arhitekturu Sveučilišta u Mariboru. Ima izbor za znanstveno područje tehničke znanosti, znanstveno polje građevinarstvo, za predmetne grupe Projektiranje prometnica i Prometna sigurnost. Doktorirao je 1995. godine na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru. Postdoktorski studij završio je 1998. godine na Università degli studi di Trieste, Facolta di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria Civile (Sveučilište u Trstu, Odjel građevinarstva). Znanstveno i stručno se usavršavao na Tehničkom sveučilištu u Bochumu i Delftu. Od 1996. do 2001. godine bio je pročelnik Katedre za prometnu tehniku i sigurnost u prometu na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Mariboru, od 2001. godine je pročelnik Katedre za prometnu infrastrukturu. Od 2014 godine gostujući je profesor na Sveučilištu Kore, Enna, Italija. Autor je ili koautor većeg broja izvornih znanstvenih i preglednih radova, priloga na međunarodnim znanstvenim i stručnim konferencijama, nosilac i suradnik na razvojnim i aplikativnim projektima te projektima međunarodnog i nacionalnog značaja, glavni je autor jednog patenta i dviju patentnih prijava. Autor je znanstvene monografije objavljene pri Springer Verlag (Alternative Types of Roundabouts). Napisao nekoliko stranih smjernica i pravilnika za kružne tokove i reviziju cestovne sigurnosti (RSI, RSA, NSM i RSIA). Licencirani revizor prometne sigurnosti i predavač na obukama revizora u više država.

ŽIVOTOPIS

Izv. prof. dr. sc. Dubravka Hozjan

Izv. prof. dr. sc. Dubravka Hozjan u znanstveno zvanje znanstvene suradnice izabrana je 2007. godine, a u zvanje više znanstvene suradnice 7. prosinca 2011. odlukom Matičnog odbora za područje tehničkih znanosti. U znanstveno-nastavno zvanje docentice izabrana je 2008. godine, a u znanstveno-nastavno zvanje izvanredne profesorice u području tehničkih znanosti, polje: tehnologija prometa i transport, grana: cestovni i željeznički promet 17. veljače 2014. Doktorski rad pod nazivom "Tehnološki modeli izvedbe i održavanja željezničke pruge" obranila je na Fakultetu prometnih znanosti 6. travnja 2007. i stekla akademski naziv doktora znanosti iz znanstvenog područja tehničke znanosti, znanstvenog polja tehnologija prometa i transport, znanstvena grana cestovni i željeznički promet. Nositeljica je kolegija Željeznička infrastruktura I, Cestovne prometnice I i Gradske prometnice na preddiplomskom studiju, kolegija Cestovne prometnice II, Željeznička infrastruktura II i Tračnički urbani sustavi na diplomskom studiju, te kolegija Prometnice velikih brzina na poslijediplomskom doktorskom studiju i Urbani tračnički sustavi na poslijediplomskom specijalističkom studiju. U akademskim godinama 2011./2012. i 2012./2013. je uključena u poslijediplomski specijalistički studij Željeznički elektrotehnički sustavi na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, gdje u okviru predmeta Električna tračnička vozila drži predavanja iz područja željezničke infrastrukture. Predstojnica je Zavoda za cestovni promet i voditeljica je katedre za tehniku cestovnog prometa od 2012. do danas. Članica je Hrvatskog znanstvenog društva za promet, a 2010. godine izabrana je za redovitog člana Znanstvenog vijeća za promet Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti. Bila je članica Upravnog vijeća Agencije za sigurnost željezničkog prometa i pročelnica Prometnog odjela na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu od 2009. do 2014. godine. Do sada je objavila preko dvadeset znanstvenih radova.

ZAHVALA

Ovaj doktorski rad načinjen je pod mentorstvom prof. dr. sc. Tomaža Tollazzia i komentorice izv. prof. dr. sc. Dubravke Hozjan kojima se želim najsrdajnije zahvaliti na predloženoj temi doktorskog rada, nesebično utrošenom vremenu, na savjetima koji su doprinijeli kvantiteti, kao i na divnoj suradnji, podršci i razumijevanju. Još jednom im hvala!

Svim članovima komisije zahvaljujem se što su rado prihvatili ovaj rad. Isto tako se zahvaljujem na stručnoj i tehničkoj pomoći, te na savjetima i konzultacijama koje mi je pružio kolega Ivan Laco dipl. ing., i uvelike pomogao oko pojedinih faza doktorskog rada. Također se zahvaljujem gospodinu mr. sc. Goranu Jovanoviću iz tvrtke Appia d.o.o., na korištenju tehničkih pomagala bez kojih ovaj rad ne bi bio moguć. Najiskrenije se želim zahvaliti kolegama dr. sc. Hrvoju Pilku i Marku Lučiću dipl. ing., na korisnim savjetima i prijateljskoj podršci. Posebno se želim zahvaliti svojem poslodavcu HOK-osiguranju d.d., na financijskoj i vremenskoj pomoći. Zahvaljujem i ostalim kolegama i suradnicima koji ovdje nisu pojedinačno spomenuti, a direktnim i indirektnim sugestijama uspjeli su pridonijeti razvoju ovog doktorskog rada.

Šećer na kraju, dolaze oni bez čije ljubavi, razumijevanja, podrške i pomoći ne bi bilo ovog doktorskog rada, a to su moji roditelji, supruga Ana i kćerkice Marta i Iva kojima ujedno i posvećujem ovaj doktorski rad. Velika im hvala na svemu!

Nikola Šubić

PODATCI I INFORMACIJE O DOKTORANDU

1. **Ime i prezime:** Nikola Šubić, dipl. ing. prom.
2. **Datum i mjesto rođenja:** 18. siječnja 1984., Zagreb
3. **Naziv završenog fakulteta i godina diplomiranja:** Fakultet prometnih znanosti, Sveučilišta u Zagrebu, 15. siječnja 2007.

INFORMACIJE O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

1. **Naziv doktorskog studija:** Tehničko-tehnološki sustavi u prometu i transportu
2. **Naziv doktorske disertacije:** Metoda procjene utjecaja raskrižja s kružnim tokom prometa na okoliš i gospodarstvo
3. **Fakultet na kojem je doktorska disertacija branjena:** Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

POVJERENSTVA, OCJENA I OBRANA DOKTORSKE DISERTACIJE

1. **Datum prijave disertacije:** 28. siječnja 2014.
2. **Datum prihvatanja teme:** 22. travnja 2014.
3. **Mentor:** prof. dr. sc. Tomaž Tollazzi
4. **Mentor:** izv. prof. dr. sc. Dubravka Hozjan
5. **Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:**
prof. dr. sc. Davor Brčić, predsjednik
prof. dr. sc. Tomaž Tollazzi, mentor
izv. dr. sc. Dubravka Hozjan, mentor
prof. dr. sc. Jasna Golubić, član
prof. dr. sc. Vesna Dragčević (Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu), vanjski član
doc. dr. sc. Hrvoje Pilko, zamjena
6. **Povjerenstvo za obranu disertacije**
prof. dr. sc. Davor Brčić, predsjednik
prof. dr. sc. Tomaž Tollazzi, mentor, član
izv. dr. sc. Dubravka Hozjan, mentor, član
prof. dr. sc. Jasna Golubić, član
prof. dr. sc. Vesna Dragčević (Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu), vanjski član
izv. dr. sc. Mihaela Bukljaš Skočibušić, zamjena
7. **Lektura:** Antonija Jurčić, prof.
8. **Datum obrane disertacije:** 8. lipnja 2018.

SAŽETAK

Dosadašnja planiranja, projektiranja i rekonstrukcije postojećih tipova raskrižja u jednoj razini (kružna, semaforizirana i nesemaforizirana) vrlo su malu ili gotovo nikakvu pozornost posvećivala održivom prometnom sustavu, odnosno negativnom utjecaju prometa na okoliš i gospodarstvo. Zasnivala su se isključivo na tehničkim rješenjima koja zadovoljavaju kriterije propusne moći i sigurnosti raskrižja. Danas je izražen interes za odabir tipa raskrižja u jednoj razini koje bi u danom okruženju djelovanja bilo optimalno rješenje za održivi prometni sustav. Nova raskrižja s kružnim tokom prometa koja su zamijenila raskrižja u razini nisu bila podvrgnuta znanstvenim istraživanjima utjecaja na okoliš i gospodarstvo sa svrhom provjere opravdanosti njihove izvedbe uvažavajući ekološke i gospodarske kriterije.

S obzirom na navedeno, ovaj istraživački rad posvetio je pažnju upravo razvoju metode za procjenu utjecaja raskrižja s kružnim tokom prometa na okoliš i gospodarstvo, sa svrhom provjere opravdanosti izgradnje različitih oblika raskrižja u razini uvažavajući ekološke i gospodarske kriterije. Za razvoj metode bilo je potrebno prikupiti dosadašnje teorijske spoznaje o utjecaju raskrižja s kružnim tokom prometa na okoliš i gospodarstvo te prikupiti potrebne ulazne podatke na odabranim raskrižjima s kružnim tokom prometa u urbanim sredinama gradskih područja. Uz navedeno, bilo je potrebno provesti analizu prethodnog i sadašnjeg stanja preko simulacijskih programskih paketa na odabranim raskrižjima. Nakon provedenih analiza uslijedio je razvoj statističkog modela na temelju statističkih metoda, provedenih analiza i prikupljenih podataka. Primjenom statističkog modela razvijena je metoda kojom se procjenjuje utjecaj raskrižja s kružnim tokom prometa na okoliš i gospodarstvo. Predložena metoda u konačnici je verificirana u stvarnom prostornom okruženju.

Ključne riječi: raskrižje s kružnim tokom prometa, ekološki i gospodarski kriteriji, opravdanost izgradnje, simulacijski programski paketi, statistički model, metoda za procjenu utjecaja kružnih raskrižja na okoliš i gospodarstvo, verifikacija

ABSTRACT

Former planning, design, and reconstruction of the existing types of single-level intersections (circular, traffic light signalized, and un-signalized) paid very little or no attention to sustainable transport systems and the negative impact of transport on the environment and economy. Attention was mainly paid to technical solutions that meet the criteria of capacity and intersection security. Today, there is an increasing need for commitment towards a single-level type of intersection, which would be an optimal solution for a sustainable transport system in a given environment. The newly-built roundabouts which have replaced levelled intersections, to this date have not been subjected to scientific studies of their impact on the environment and the economy for the purpose of verifying the feasibility of their performance while taking into account environmental and economic criteria.

In view of the above, this research paper devoted attention to the development of methods for assessing the impact of roundabouts on the environment and the economy, with the purpose of verifying the justification of building different forms of intersections at ground level, while respecting ecological and economic criteria. To develop the method, it was necessary to collect theoretical knowledge about the impact of roundabouts on the environment and the economy and to collect the necessary input data at the selected roundabout intersections in urban areas of the city. In addition, it was necessary to carry out an analysis of the past and present state through a simulation software package on selected intersections. After the analyses were performed, a statistical model based on statistical methods, conducted analyses, and data collected was developed. A statistical model was used to develop a method for assessing the impact of roundabouts on the environment and the economy. The proposed method was ultimately verified in a real-world spatial environment.

Key words: roundabouts, ecological and economic criteria, justification for construction, simulation software packages, statistical model, method for assessing the impact of roundabouts on the environment and the economy, verification

POJMOVNIK

- Raskrižje s kružnim tokom prometa ili kružno raskrižje**
(skraćeno RKT)
- je kanalizirano raskrižje kružnog oblika s neprovoznim, djelomično ili u cijelosti povoznim/provoznim središnjim otokom i kružnim voznim trakom na koji se vežu tri ili više priključnih cesta u razini i u kojem se promet odvija u smjeru suprotnom kretanju kazaljke na satu.
- Održivi razvoj/razvitak**
- podrazumijeva takav razvoj društva koji raspoloživim resursima zadovoljava ljudske potrebe, ne ugrožavajući prirodne sisteme i životnu sredinu, čime se osigurava dugoročno postojanje ljudskog društva i njegovog okruženja.
- Ekološki pokazatelji**
- mjere koje ukazuju na promjenu stanja u ekološkom sustavu. U ovom radu misli se na emisiju štetnih ispušnih plinova.
- Gospodarski pokazatelji**
- mjere koje ukazuju na promjenu u gospodarskom sustavu. U ovom radu misli se na novčane troškove investitora i korisnika.
- Jednotračno kružno raskrižje**
- je kružno raskrižje s jednim prometnim trakom na ulazima/izlazima i jednim kružnim kolničkim trakom.
- “in situ“**
(*lat.* na licu mjesta)
- označava promatranje pojava točno ondje gdje se događaju, tj. u realnim uvjetima.
- Propusna moć raskrižja (kapacitet):**
(C)
- predstavlja najveći broj vozila koja mogu proći u jedinici vremena kroz promatrani privoz (ulaz). Uobičajeno se izražava kao broj vozila u satu [voz/h].
- Prikaz stanja**
(*engl.* state of the art)
- korišteni izraz u znanstvenoj terminologiji u smislu prikaza dosadašnjih znanstvenih dostignuća.
- Metoda maksimalne vjerodostojnosti**
(MLE, *engl.* Maximum Likelihoodmethod)
- statistička metoda koja se koristi za procjenu vrijednosti jednog i više parametara.

Matrica putovanja (O/D, engl. origin-destination)	- prikazuje broj putovanja iz ciljne u odredišnu zonu. Naziva se još i odredišno-ishodišna matrica.
Pokazatelji učinkovitosti (MOE, engl. Measures of Effectiveness)	- niz mjera za opis funkcioniranja raskrižja. Među najčešće korištenim pokazateljima su: stupanj zasićenja (x), prosječno vrijeme kašnjenja (d_s), duljina repa čekanja (Q_{95}) i razina usluge (LOS, RU).
Cost-benefit analiza (CBA)	- metoda ekonomske analize kojom se uspoređuju i vrednuju sve prednosti i svi nedostaci nekog privrednog pothvata ili projekta analizom troškova (cost) i koristi (benefit). Važna je za donošenje ispravne odluke i za korekciju projekata.
Eksterni troškovi u prometu	- su prometom uzrokovani društveni troškovi koji do sada nisu internalizirani te se podmiruju kroz neke druge izvore javnog sektora ili zajednice.
Dizajn eksperimenta (DoE, engl. Desing of Experiments)	- opisani koraci za razvoj eksperimenta.
Emisijski standardi (Euro norme 1-6)	- razina ograničenja kojoj podliježu različite kategorije vozila, a koja se zasniva na njihovoj godini proizvodnje i fizičkim osobinama. Emisijski standardi za svaku kategoriju vozila definirani su po EU direktivama.
Područja učinkovitosti raskrižja	- područje u kojem je pojedino raskrižje učinkovito - efikasno.
Prosječni godišnji dnevni promet (PGDP, AADT engl. Annual Average Daily Traffic)	- predstavlja prosječnu, dnevnu količinu prometa u odnosu na ukupno ostvareni promet tijekom godine, na promatranom presjeku prometnice (ukupni godišnji protok podijeljen sa 365).
Satna i mjesečna neravnomjernost protoka	- predstavlja variranje protoka/prosječnog dnevnog prometa po pojedinim satima u periodu cijelog dana/godine, tj. u periodu 24 sata/12 mjeseci.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Problem i predmet istraživanja	1
1.2. Ciljevi istraživanja.....	1
1.3. Hipoteze istraživanja	2
1.4. Ograničenja istraživanja	3
1.5. Materijali i metodologija istraživanja.....	3
1.6. Struktura disertacije.....	6
1.7. Znanstveni doprinos	8
2. TEORIJSKE ZNAČAJKE KLASIČNIH TIPOVA RASKRIŽJA U RAZINI	9
2.1. Povijesni razvoj	9
2.2. Propusna moć RKT-a	9
2.2.1. Empirijski modeli	10
2.2.2. Modeli prihvaćenih vremenskih praznina	10
2.2.3. Mikrosimulacijski modeli.....	11
2.2.4. Pokazatelji učinkovitosti (<i>engl.</i> MOE - Measures of Effectiveness)	15
2.3. Utjecaj RKT-a na okoliš i gospodarstvo	16
2.3.1. Ekološki pokazatelji	16
2.3.2. Gospodarski pokazatelji	22
3. ANALIZA PRIKUPLJENIH PODATAKA I SIMULACIJSKA OBRADA	27
3.1. Prikupljanje ulaznih podataka na promatranim raskrižjima.....	27
3.1.1. Odabir promatranih raskrižja.....	27
3.1.2. Prometni podatci.....	29
3.1.3. Projektna dokumentacija	33
3.1.4. Troškovi (investitora i korisnika) na promatranim raskrižjima.....	35
3.2. Simulacijska obrada prikupljenih podataka.....	37

3.2.1. Simulacijski programski paket aaSIDRA.....	37
3.2.2. Simulacijski rezultati	39
3.3. Analiza promatranih raskrižja	40
3.3.1. Analiza prometne sigurnosti.....	40
3.3.2. Analiza pokazatelja učinkovitosti na promatranim raskrižjima	44
3.3.3. Analiza troškova raskrižja	46
4. STATISTIČKI MODEL PROCJENE UTJECAJA PLANIRANIH KRUŽNIH RASKRIŽJA NA OKOLIŠ I GOSPODARSTVO.....	51
4.1. Dizajn eksperimenta (<i>engl.</i> Desing of Experiment - DoE).....	52
4.1.1. Nezavisne varijable.....	52
4.1.2. Zavisne varijable.....	55
4.2. Mikrosimulacije (prometni i emisijski model).....	55
4.2.1. Prometni model	57
4.2.2. Emisijski model	61
4.3. Statističko modeliranje	66
4.3.1. Metode u statističkom modeliranju	66
4.3.2. Rezultati statističkog modeliranja	68
4.3.3. Analiza područja učinkovitosti: Johnson – Neyman metoda	77
5. METODA PROCJENE UTJECAJA PLANIRANIH RAKRIŽJA S KRUŽNIM TOKOM PROMETA NA OKOLIŠ I GOSPODARSTVO	83
5.1. Opis metode.....	84
5.1.1. Definiranje ulaznih podataka za metodu	84
5.1.2. Elementi utjecaja na prognozu troškova u metodi.....	85
5.1.3. Primjena razvijenog statističkog modela u svrhu prognoze	87
5.1.4. Pokazatelji opravdanosti metode	90
5.2. Dijagram toka metode procjene utjecaja planiranih RKT-a na okoliš i gospodarstvo	91
5.3. Primjena metode procjene utjecaja planiranih RKT-a na okoliš i gospodarstvo	93

5.3.1. Ulazni podatci.....	93
5.3.2. Elementi utjecaja	95
5.3.3. Analiza osjetljivosti (SA)	95
5.3.4. Analiza rezultata na odabranim lokacijama.....	96
6. VERIFIKACIJA METODE PROCJENE UTJECAJA PLANIRANIH KRUŽNIH RASKRIŽJA NA OKOLIŠ I GOSPODARSTVO.....	102
6.1. Odabir raskrižja	102
6.2. Definiranje scenarija.....	102
6.2.1. Postojeći scenarij S_{1p} (present scenario).....	103
6.2.2. Scenariji srednjih vrijednosti S_{2s} – srednji scenarij (middle scenario).....	103
6.2.3. Scenariji visokih vrijednosti S_{3h} – (high scenario)	103
6.2.3. Analiza rezultata	104
7. ZAKLJUČCI I PREPORUKE.....	110
LITERATURA	113
POPIS ILUSTRACIJA	119
Popis slika.....	119
Popis tablica.....	119
Popis grafikona	121
Popis dijagrama	121
ŽIVOTOPIS	123
POPIS RADOVA.....	124
PRILOZI	126

1. UVOD

1.1. Problem i predmet istraživanja

Razvojem cestovnog prometa i sve većom prijevoznom potražnjom, javljaju se novi zahtjevi za zadovoljavanjem prijevoznike potražnje. Mnoge prometnice i raskrižja više ne uspijevaju ispuniti sve veće zahtjeve prometa te na taj način pridonose nestabilnom i neučinkovitom prometnom toku, porastu broja prometnih nesreća, povećanju emisije štetnih ispušnih plinova, čestim kolonama i zastojsima što rezultira i štetnim utjecajem na gospodarstvo i okoliš. Negativni utjecaj prometa danas u suvremenom okruženju postaje sve veći i ozbiljniji te iziskuje odgovarajuća rješenja prometnih planera i projektanata kojima će se umanjiti štetan utjecaj raskrižja na okoliš. Kao suvremena prometna rješenja za poboljšanje odvijanja prometa i smanjenje njegovog negativnog utjecaja na cestovnim raskrižjima počela su se primjenjivati raskrižja s kružnim tokom prometa (skraćeno RKT) koja su postala popularna i naširoko primjenjivana u mnogim zemljama. S obzirom na mali broj znanstvenih istraživanja o utjecaju RKT-a na okoliš i gospodarstvo, postavlja se pitanje opravdanosti njihove izgradnje u smislu održivog razvoja. Potrebno je, stoga, istražiti njihov utjecaj na okoliš i gospodarstvo, a u svrhu razvoja metode kojom bi se omogućila procjena njihovog utjecaja na okoliš i gospodarstvo.

1.2. Ciljevi istraživanja

Osnovni cilj predloženog doktorskog rada je dokazati pozitivan utjecaj novoizgrađenih kružnih raskrižja na okoliš i gospodarstvo.

Znanstveni cilj predstavlja kreiranje znanstveno utemeljene metode kojom će se procijeniti utjecaj planiranih kružnih raskrižja na okoliš i gospodarstvo sa svrhom vrednovanja izvedbe različitih oblika raskrižja u razini uzimajući u obzir ekološke i gospodarske kriterije.

Praktični cilj: predstavlja primjenjivost predložene metode u konkretnim slučajevima izbora oblikovnog rješenja raskrižja.

Ciljevi ovog istraživanja ostvaruju se sljedećim aktivnostima:

- istraživanjem postojeće mjerodavne literature o utjecaju RKT-a u razini na okoliš i gospodarstvo s osvrtom na dosadašnja istraživanja, teorijske koncepte i njihovu širu primjenu;

- terenskim istraživanjem i analizom prikupljenih podataka na jednotračnim RKT-ima te obradom prikupljenih podataka u simulacijskim programskim paketima;
- kreiranjem statističkog modela i razvojem metode za procjenu utjecaja planiranih RKT-a na okoliš i gospodarstvo;
- verifikacijom (primjenom) predložene metode na reprezentativnom raskrižju u razini.

1.3. Hipoteze istraživanja

Na osnovi uočenog i izraženog problema te ciljeva istraživanja postavljene su radne hipoteze koje glase:

H₁: Provedenim istraživanjem i prikupljenim spoznajama u vlastitom okruženju moguće je odrediti i dokazati pozitivan utjecaj novoizgrađenih kružnih raskrižja na okoliš i gospodarstvo.

Obrazloženje hipoteze H₁: pretpostavka je da novoizgrađeni RKT-i u odnosu na ostale tipove raskrižja u razini pozitivno utječu na održivi prometni sustav s gledišta ekologije i gospodarstva.

H₂: Novoizgrađena kružna raskrižja u odnosu na klasična raskrižja u razini (nesemaforizirana i semaforizirana) imaju manji negativni utjecaj na održivi prometni sustav, te predstavljaju tip raskrižja koji je ekološki prihvatljiv i gospodarski opravdan.

Obrazloženje hipoteze H₂: pretpostavka je da RKT-i predstavljaju optimalan tip raskrižja u razini s gledišta ekoloških i gospodarskih pokazatelja, tj. da će u određenim prometnim situacijama (uvjetima) imati manji negativni utjecaj na održivi prometni sustav od ostalih tipova raskrižja.

Uz pomoć postavljenih hipoteza istraživanja nastojat će se dokazati pozitivan utjecaj novoizgrađenih RKT-a na okoliš i gospodarstvo.

1.4. Ograničenja istraživanja

Zbog ograničenih izvora istraživanja na terenu i financijskih sredstava postavljena su ograničenja ovog istraživanja za dokazivanje utjecaja RKT-a na okoliš i gospodarstvo. Ograničenja istraživanja odnose se na prikupljanje potrebnih podataka i područje istraživanja. U ovom doktorskom radu postavljena su četiri ograničenja istraživanja.

Prvo ograničenje: veže se na uzorak istraživanja i tip raskrižja. Istraživanje je primijenjeno na deset jednotračnih novoizgrađenih RKT-a (mini, malih i srednjih) vanjskog promjera do 45 m u razini. Ostali tipovi RKT-a (dvotračna-višetračna, turbo i „flower“) nisu razmatrani.

Drugo ograničenje: odnosi se na područje u kojem je provedeno istraživanje, tj. prikupljanje uzorka. Istraživanje je provedeno na novoizgrađenim RKT-ima u urbanim sredinama gradskih područja hrvatskih gradova (Zagreb, Osijek, Split, Šibenik, Vodice, Zadar, Rijeka, Čakovec, Varaždin, Vinkovci) dok izvanurbane sredine nisu razmatrane.

Treće ograničenje: utjecaj nemotoriziranog prometa na propusnu moć raskrižja, ekologiju i gospodarstvo nije zanemariv, ali je znanstveno specifičan i poseban, stoga utjecaj nemotoriziranog prometa nije uzet u obzir prilikom razvoja modela i metode, već je poslužio samo za analizu prethodnog i sadašnjeg stanja na promatranim raskrižjima.

Četvrto ograničenje: troškovi vezani za utrošak električne energije prilikom rada rasvjete i semaforiziranog uređaja nisu uzeti u razmatranje.

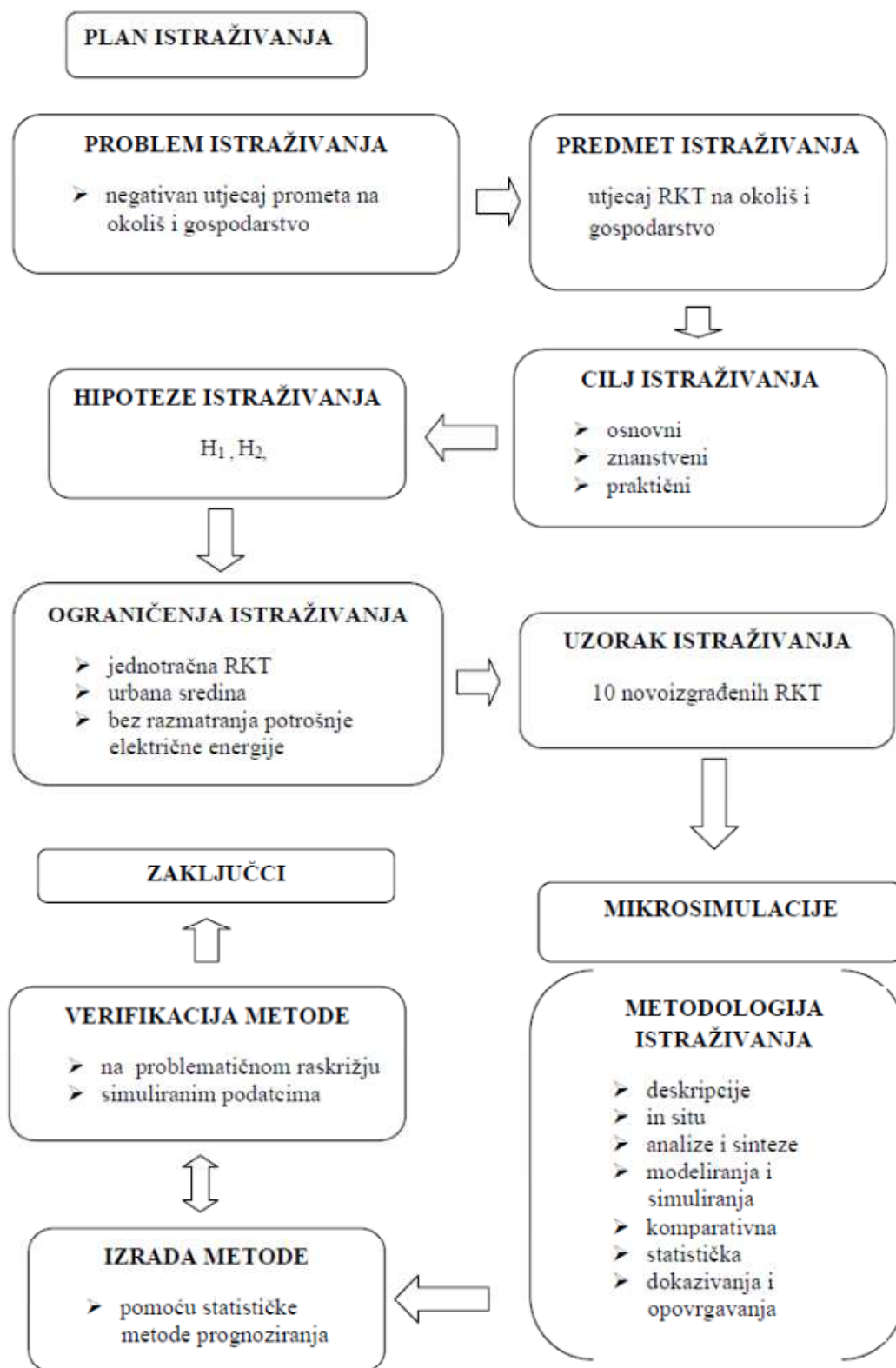
1.5. Materijali i metodologija istraživanja

Na uzorku od desetak novoizgrađenih jednotračnih RKT-a u razini, provedeno je istraživanje u urbanim sredinama gradskih područja hrvatskih gradova za dokazivanje cilja i postavljenih hipoteza ovoga dokorskog rada. Prometni podaci prikupljeni su videosnimanjem na odabranim raskrižjima. Videosnimanje je obavljeno za vrijeme radnog dana u tjednu u vremenskom intervalu od dva sata za razdoblje jutarnjeg i popodnevnog vršnog sata (6:00-8:00, 15:00-17:00). Podatci o prometnim nesrećama i njihovim materijalnim i nematerijalnim troškovima prije i poslije izgradnje promatranih raskrižja prikupljeni su iz Hrvatskog ureda za osiguranje, Ministarstva unutarnjih poslova i osiguravajućih kuća, a troškovi izgradnje i projektna dokumentacija ustupanjem investitora (gradovi) i projektantskih biroa. Prikupljenim podatcima dobile su se sve potrebne ulazne varijable za daljnji razvoj metode.

Za potrebe istraživanja utjecaja novoizgrađenih RKT-a na okoliš i gospodarstvo te za provjeru ciljeva i postavljenih hipoteza u ovom doktorskom radu upotrebljavano je više znanstvenih metoda u tijeku znanstvenog istraživanja, s obzirom na pristup u obrađivanju pojedinih segmenata doktorskog rada. Doktorski rad započinje definicijom problema. Koristeći se znanstvenom metodom deskripcije obuhvaćena je postojeća literatura vezana za problematiku izgrađenosti različitih oblika raskrižja u razini i njihov utjecaj na okoliš i gospodarstvo (pozitivan ili negativan). Na taj način utvrdile su se dosadašnje znanstvene spoznaje i istraživačka dostignuća o utjecaju RKT-a na okoliš i gospodarstvo. Zbog nedostatka baze potrebnih podataka o prometnim tokovima, projektnoj dokumentaciji, prometnim nesrećama i njihovim materijalnim i nematerijalnim novčanim vrijednostima te troškovima izgradnje i održavanja provedeno je terensko istraživanje „in situ“ za njihovo prikupljanje i analizu. Prikupljeni i analizirani prometno-projektni podatci korišteni su u simulacijskim programskim paketima “VISSIM“ (PTV Planung Transport Verkehr AG) i “aaSIDRA“ (Signalized and unsignalized Intersection Design and Research Aid) za simuliranje prethodnih i sadašnjih prometnih pokazatelja (propusna moć, stupanj zasićenja, vrijeme putovanja, razina uslužnosti i vremenski gubitci), ekoloških pokazatelja (potrošnja goriva, emisija štetnih ispušnih plinova CO₂, NO_x, CO, HC, PM_{2,5}) i gospodarskih pokazatelja (trošak cijene goriva i utrošak vremena). Nakon prikupljenih i simuliranih podataka o prometnim nesrećama, njihovim posljedicama i gospodarskim troškovima uslijedila je usporedba s prethodnim i sadašnjim stanjem prometnih, ekoloških i gospodarskih parametara (komparativna metoda) i cjenovno vrednovanje pojedinog parametra. Na temelju provedenih istraživanja i dobivenih rezultata uz daljnju primjenu statističkog programskog paketa *R* razvijen je statistički model za prognoziranje očekivanih troškova. Primjenom razvijenog statističkog modela razvijena je metoda za procjenu utjecaja planiranih RKT-a na okoliš i gospodarstvo, sa svrhom opravdanosti izvedbe različitih oblika raskrižja u razini. Nova metoda verificirana je na reprezentativnom kritičnom raskrižju na području Republike Hrvatske i na prikupljenim i simuliranim podacima. Na osnovi objedinjenih podataka, putem prethodno navedenih metoda, opisane metodologije istraživanja i dobivenih rezultata donijeti su konačni zaključci i preporuke.

Na slici 1. prikazan je plan istraživanja osmišljen tako da omogući odgovore na istraživačka pitanja. Planom istraživanja obuhvaćen je cjelokupni istraživački proces koji se sastoji od: problema istraživanja, predmeta istraživanja, cilja istraživanja, hipoteza istraživanja,

ograničenja istraživanja, uzorka, mikrosimulacija (metodologije istraživanja), izrade metode procjene utjecaja RKT-a na okoliš i gospodarstvo, verifikacije nove metode i zaključaka.



Slika 1.1. Plan istraživanja

1.6. Struktura disertacije

Doktorski rad strukturiran je u sedam poglavlja te sadrži 163 stranica teksta, 11 slika, 37 tablica, 9 grafikona, 13 dijagrama i tri priloga na 24 stranice. U popisu literature navedeno je 80 referenci.

U **uvodnom poglavlju** rada definiran je problem i predmet istraživanja, određeni su jasni ciljevi istraživanja i hipoteze čija se istinitost dokazuje, te su postavljena ograničenja u istraživanju. Specificirana je metodologija koja se koristi u istraživanju, obrazložena je struktura rada i iznijet je znanstveni doprinos.

U **drugom poglavlju naslova „Teorijske značajke klasičnih tipova raskrižja u razini“**, prikazan je kratki povijesni pregled razvoja RKT-a. Navedena su dosadašnja istraživanja o propusnoj moći RKT-a pri čemu su u kratkim crtama opisani empirijski modeli, modeli prihvaćenih vremenskih praznina i mikrosimulacijski modeli za izračun propusne moći RKT-a. S osvrtom na dosadašnja istraživanja, teorijske koncepte i praktičnu primjenu prikazan je i utjecaj RKT-a na okoliš i gospodarstvo.

U **trećem poglavlju pod nazivom „Analiza prikupljenih podataka i simulacijska obrada“** opisan je postupak prikupljanja ulaznih podataka na promatranim raskrižjima uz primjenu posebnih tehnika i razvijenih programskih pomagala. Objašnjava se implementacija prikupljenih podataka i dobivanje pokazatelja učinkovitosti za prethodna i sadašnja stanja na promatranim raskrižjima korištenjem simulacijskog programskog paketa aaSIDRA. Provedena je statistička analiza sadašnjeg i prethodnog stanja prometne sigurnosti, pokazatelja učinkovitosti i troškova na promatranim raskrižjima korištenjem odabranih statističkih testova. Prema provedenim statističkim testovima dokazana je statistička značajnost u odnosima sadašnjeg i prethodnog stanja na promatranim raskrižjima.

U **četvrtom poglavlju „Statistički model procjene utjecaja planiranih kružnih raskrižja na okoliš i gospodarstvo“** opisan je dizajn eksperimenta u kojem su navedene sve vrijednosne razine nezavisnih varijabli koje utječu na zavisne varijable u eksperimentu. Provedeno je modeliranje prometnog i emisijskog modela uz primjenu mikrosimulacijskih programskih paketa VISSIM i Enviver. Opisan je proces statističkog modeliranja na temelju dobivenih izlaznih rezultata iz prometnog i emisijskog modela te primjenom statističkih metoda linearne regresije. Prikazani su rezultati statističkog modeliranja za zavisne varijable. Analizirano je područje učinkovitosti pojedinog tipa raskrižja korištenjem Johnson – Neyman metode.

U **petom poglavlju pod nazivom „Metoda procjene utjecaja planiranih raskrižja s kružnim tokom prometa na okoliš i gospodarstvo“** opisana je metoda, definirani su ulazni podatci za metodu, zatim su određeni elementi koji utječu na procjenu troškova određenog tipa raskrižja na okoliš i gospodarstvo. Opisan je proces prognoziranja očekivanih troškova na svakom pojedinom tipu raskrižja tijekom njegovog čitavog uporabnog vijeka primjenom razvijenog statističkog modela. Određeni su pokazatelji kojima se dokazuje opravdanost metode. Prikazana je primjena predložene metode na odabranim lokacijama raskrižja i analiza dobivenih rezultata.

U **šestom poglavlju „Verifikacija metode procjene utjecaja planiranih kružnih raskrižja na okoliš i gospodarstvo“** prikazana je verifikacija predložene metode na odabranom raskrižju koje se nije pokazalo kao najbolje prometno rješenje. Verifikacija metode na odabranom raskrižju provedena je prema postavljenim scenarijima postojećeg stanja, scenarija srednjih vrijednosti i scenarija visokih vrijednosti na temelju variranja ulaznih podataka, elemenata utjecaja i analize osjetljivosti (SA) u predloženoj metodi. Analizom rezultata iz postavljenih scenarija zaključeno je da je predložena metoda funkcionalna i pouzdana za predviđeni oblik korištenja.

Dokazano je da RKT-i pozitivno utječu na održivi prometni sustav s gledišta ekologije (emisija štetnih ispušnih plinova) i gospodarstva (kašnjenje i potrošnja goriva) u odnosu na ostale tipove raskrižja u razini. Iznimno na raskrižjima s malim PGDP-om ne pridonose smanjenju troškova, već imaju negativni utjecaj na održivi prometni sustav za razliku od ostalih tipova raskrižja.

U **sedmom poglavlju „Zaključci i preporuke“** prikazana su zaključna razmatranja kroz sažeti pregled provedenog znanstvenog istraživanja i kritički osvrt na rezultate istraživanja po pojedinim dijelovima rada. Na kraju se s obzirom na pretpostavke na kojima se temelji metoda i ograničenu veličinu uzorka, te rezultate provedenog istraživanja daju preporuke za daljnja istraživanja.

Doktorski rad sadrži tri priloga, i to Prilog 1. (Izdvajanje prometnih podataka o vršnom satu, intenzitetu i strukturi prometa), Prilog 2. (Programsko pomagalo i izdvajanje vremena slijeđenja, brzina vozila i kritične vremenske praznine) i Prilog 3. (Projektno-oblikovni elementi RKT-a.).

1.7. Znanstveni doprinos

Izgradnja infrastrukture treba predstavljati dugoročno rješenje koje zadovoljava sve potrebe u vremenskom trajanju 20 - 30 godina, a ukoliko negativan utjecaj na okoliš i gospodarstvo traje 30 godina, tada takav utjecaj nije beznačajan. Utjecaj infrastrukture na okoliš i gospodarstvo ne treba promatrati na mikro već na makro razini. Ekološki i gospodarski utjecaji pojedinog tipa raskrižja u razini aktualni su u znanstvenoj literaturi, ali još uvijek nedovoljno istraženi i dokazani te kao takvi predstavljaju ideju vodilju za razvoj metode koja je razvijena kroz ovaj doktorski rad.

Znanstveni doprinos rada je prijedlog metode za određivanje utjecaja RKT-a na okoliš i gospodarstvo koji bi u budućnosti obvezno morao predstavljati jedan od pokazatelja za izbor optimalnog tipa raskrižja, pogotovo u urbanoj sredini.

Predložena metoda za procjenu utjecaja RKT-a na okoliš i gospodarstvo sa svrhom provjere opravdanosti izvedbe različitih tipova raskrižja u razini, omogućit će odabir raskrižja koje prema ekološkim i gospodarskim pokazateljima ima najmanje izražen negativni utjecaj na okoliš i gospodarstvo.

Znanstveni doprinos istraživanja može se izraziti u teorijskom i aplikativnom smislu, a odnosi se na:

- određivanje utjecaja novoizgrađenih RKT-a na okoliš i gospodarstvo
- određivanje utjecaja klasičnog semaforiziranog i nesemaforiziranog raskrižja na okoliš i gospodarstvo.
- razvoj metode za procjenu utjecaja planiranih RKT-a na okoliš i gospodarstvo sa svrhom provjere opravdanosti izvedbe različitih tipova raskrižja u razini.

2. TEORIJSKE ZNAČAJKE KLASIČNIH TIPOVA RASKRIŽJA U RAZINI

Obzirom da predmet istraživanja ovog rada nisu semaforizirana i nesemafoizirana raskrižja u ovom poglavlju opisuju se samo teorijske značajke RKT-a. Postoji određeni broj obavljenih radova i studija u svijetu koje se bave problematikom RKT-a u smislu njihove propusne moći i utjecaja na okoliš i gospodarstvo. Prateći samo objavljene radove u značajnijim znanstvenim časopisima, na znanstvenim i stručnim konferencijama uočava se određena aktivnost u rješavanju ove problematike. U ovom poglavlju doktorskog rada prikazani su rezultati postojećih istraživanja i dosadašnja dostignuća vezana za teorijske značajke RKT-a.

2.1. Povijesni razvoj

Prva RKT kao oblikovno-strukturni elementi javila su se početkom XX. stoljeća, mnogo prije dominacije motornog prometa. Povijesni razvoj raskrižja s kružnim tokom prometa započeo je Eugen Henard koji je 1903. godine predložio kružno kretanje prometa u središtima velikih gradova, a prva praktična upotreba zabilježena je na lokalitetu Columbus Circle u New Yorku 1905. g. [1]. Provedene studije početkom 1980-ih u Velikoj Britaniji, u pogledu sigurnosti i propusne moći u odnosu na ostala klasična raskrižja, dovele su do intenzivne gradnje RKT-a u svijetu i Europi posljednjih dvadesetak godina. Procjenjuje se da je unazad nekoliko godina izgrađeno više od 2.300 RKT-a diljem Sjeverne Amerike i Kanade [2]. Sličan je i broj RKT-a izgrađenih u nekoliko europskih zemalja poput Njemačke, Italije, Portugala, Španjolske i Velike Britanije. Procjenjuje se da ih u Francuskoj ima više od 30.000 [3], a u Švedskoj preko 2.000 koja su izgrađena od sredine 1980-ih [4].

2.2. Propusna moć RKT-a

Svrha ovog doktorskog rada nije objašnjavanje svih svjetskih modela koji su u primjeni (state-of-the-art) i prikaz njihovih proračuna, već se u radu navodi njihov kratki pregled.

Propusna moć ili kapacitet raskrižja izražava broj vozila koja prolaze kroz RKT u jedinici vremena, a dobije se zbrajanjem propusnosti svih privoznih ulaza [1, 5]. Na propusnu moć raskrižja imaju utjecaj i ekološki čimbenici poput snijega, leda, kiše i sumraka [6], kao i drugi čimbenici u prometu poput prometne potražnje i geometrije raskrižja. Pješački prijelazi na ulazu i izlazu također utječu na smanjenje propusne moći raskrižja. Utjecaj pješačkog prometa na ulazni kapacitet raskrižja može se procijeniti pomoću Marlow i Maycock formule [7] ili

pomoću CETE de l'Quest formule [8]. U svjetskoj literaturi modeli za proračun propusne moći RKT-a podijeljeni su u tri grupe [9]:

Empirijski modeli temeljeni su na odnosima između geometrije raskrižja i stvarnog izmjerenog kapaciteta [10, 11, 12]. Modeli prihvaćenih vremenskih praznina razvijeni su na razumijevanju vozača-korisnika (kritične vremenske praznine i vremena slijeđenja) [5, 13, 14], a mikrosimulacijski modeli temeljeni su na modeliranju kretanja i interakcija pojedinačnih korisnika (vozila, pješak, biciklist) kroz prometnu mrežu korištenjem linkova, čvorova i konektora [9].

2.2.1. Empirijski modeli

Empirijski modeli za proračun propusne moći RKT-a bazirani su na vezi između geometrije raskrižja i stvarnog izmjerenog kapaciteta raskrižja. Empirijski modeli nastali su primjenom statističke multivarijatne regresijske analize kako bi odgovarao matematički odnos između izmjerenog ulaznog kapaciteta, prometnog toka u kružnom kolniku i ostalih nezavisnih varijabli koje bitno utječu na kapacitet kružnog raskrižja, poput geometrijskih elemenata [9]. Nekoliko linearno regresijskih modela poznato je i priznato u širokoj primjeni za proračun propusne moći kružnih raskrižja u svijetu poput LR942 linearno regresijskog modela [15], Girabase modela [16] te švicarskog i austrijskog modela [5]. Empirijski modeli imaju svoja ograničenja što ne mogu nužno dokazati uzročnosti ili pružiti potpuno teorijsko razumijevanje odnosa ulaznih parametara i kapaciteta raskrižja.

2.2.2. Modeli prihvaćenih vremenskih praznina

Modeli prihvaćenih vremenskih praznina predstavljaju alternativni pristup modeliranju kapaciteta RKT-a na temelju parametara dobivenih iz mjerenja pojedinih vremenskih praznina između vozila u kružnom kolniku i vozila na ulasku u kružni kolnik (teorija vremenskih praznina). Modeli prihvaćenih vremenskih praznina oslanjaju se na dvije varijable za utvrđivanje ulaznog kapaciteta raskrižja, kritičnu vremensku prazninu (t_c) i vrijeme slijeđenja (t_f) [9].

Kritična vremenska praznina (t_c) je minimalna vremenska praznina između vozila u kružnom kolniku koju će prihvatiti vozač na ulasku u raskrižje. Predstavlja stohastičku distribuiranu vrijednost koja se ne može izravno prikupiti na raskrižju (terenu). Postoje različite metode i

postupci za procjenu kritične vremenske praznine (više od 20) od kojih je široku primjenu našla metoda po Troutbecku MLE metoda [17].

Vrijeme slijeđenja (t_f) je vrijeme između dva uzastopna vozila na ulazu u kružni kolnik koja čekaju istu vremensku prazninu kako bi se mogla uključiti u kružno raskrižje. Izračunava se kao prosječna razlika između vremena prolaska dva uzastopna vozila na sporednom toku (privozu) koji prihvaćaju iste kritične vremenske praznine na glavnom prometnom toku (kružni kolnik) pod istim uvjetima čekanja.

Poznati modeli prihvaćenih vremenskih praznina koji su priznati u širokoj svjetskoj primjeni su: australski model (Sidra model nastao na Troutbeckovom SR45 modelu) [18], njemački model (nastao na istraživanju Brilon –Wu) [19] i Highway Capacity Manual 2010 model (nastao u Sjedinjenim Američkim Državama na modelu LR942) [5]. Modeli prihvaćenih vremenskih praznina također imaju svoja ograničenja što ne mogu izravno kvantificirati odnos između geometrije i kapaciteta raskrižja. To je problem što su modeli osjetljivi na vrijednosti kritične vremenske praznine i vremena slijeđenja [9].

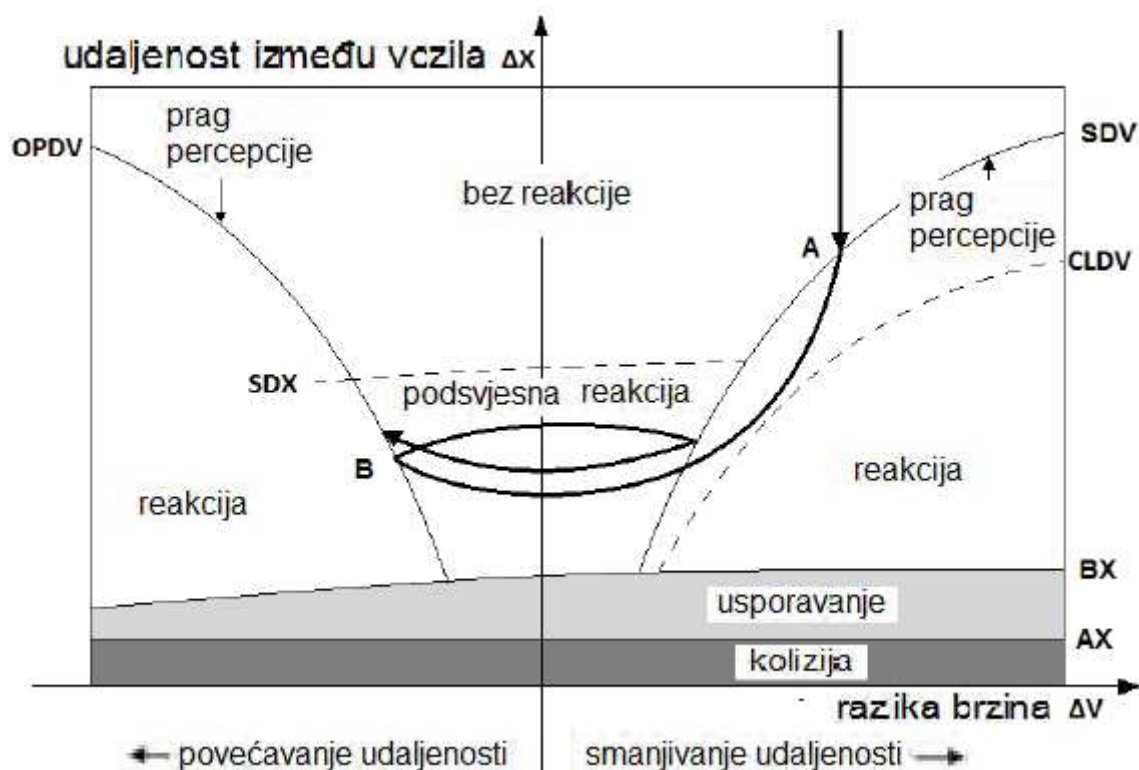
2.2.3. Mikrosimulacijski modeli

Mikrosimulacijski modeli temelje se na modeliranju kretanja i interakcija pojedinog korisnika (pješač, vozilo i biciklist) na mreži koja se sastoji od linkova, čvorova i konektora. Kretanje korisnika kroz modeliranu mrežu regulirano je modelima prihvaćenih vremenskih praznina, praćenja vozila i ostalim modelima te analiziraju individualno svakog korisnika posebno, prema njegovim stvarnim karakteristikama (dimenzije, brzine, ubrzanja, usporenja, itd.) u specifičnim vremenskim intervalima [9]. Izlazni podatci dobiveni primjenom mikroskopskih simulacijskih modela ovise o velikom broju različitih parametara koji definiraju kretanje vozila kroz model. Mnogi od ovih parametara teško se mogu kalibrirati i validirati bez dostupnih podataka na terenu, stoga je presudna usporedba izlaznih rezultata modela s prikupljenim terenskim podacima na ukupnoj razini, kao što su vrijeme trajanja putovanja, brzina vozila i količina prometa. Ograničenja kod primjene mikrosimulacijskih modela su njihova kalibracija i validacija sa stvarnim podacima kako bi se približno dobili stvarni prometni uvjeti u prometnoj mreži [20]. Nekoliko mikroskopskih simulacijskih programskih paketa dostupno je na tržištu od kojih su najpoznatiji S-Paramics [21], Aimsun [22], Vissim [23] i SUMO [24]. Abou-Senna et al. (2011) koji je razmatrao pregled literature u kojoj su korišteni pojedini simulacijski programski alati za prometno modeliranje došao je do zaključka da se u većini provedenih studija koristio mikrosimulacijski alat VISSIM [25].

2.2.3.1. Vissim

VISSIM je mikroskopski višemodalni simulacijski programski alat koji je razvio PTV Planung Transport Verkehr AG iz Karlsruhea, Njemačka [23]. Koristi se za modeliranje operacija urbanog prometa i javnog prijevoza te toka pješaka pri kojem je svaki entitet (pješač, vozilo, tramvaj, itd...) simuliran individualno. Ima sposobnost simulacije više od jedne vrste prometa (osobna vozila - automobili, teretna vozila, autobusi i motociklisti, javni prijevoz - tramvaji i autobusi, nemotorizirani promet - biciklisti i pješaci) koje mogu biti u međusobnoj korelaciji čineći tako cjelokupnu prometnu mrežu. Navedeni mikrosimulacijski alat uzima u obzir projektno-oblikovne elemente prometne mreže i raskrižja, stvarne vozačeve navike (brzina, ubrzanje, usporenje), karakteristike vozila (dimenzije, klasifikacije, itd..) i navike pješaka za modeliranje prometnih uvjeta i dobivanje izlaznih parametra učinkovitosti raskrižja (duljina repa čekanja, razina usluge i prosječno vrijeme čekanja) ili prometne mreže. Kretanje entiteta može se prikazati u 2D ili 3D prikazu. Tlocrtna fotografija mapa prometnih mreža i Cad crteži također se mogu u pozadini mapirati u postavljenom mjerilu. Ova značajka omogućuje korisniku stvaranje realističkog prikaza prilikom prezentacije projekta.

Simulacijski model u Vissimu temeljen je na psiho-fizičkom modelu praćenja vozila i pravila koja se temelje na algoritmu za bočna kretanja istraživača Wiedemanna [23]. Osnovni princip modela temelji se na "imitiranju" konkretnih reakcija i odluka koje donosi vozač kad vozi iza drugog vozila. Kad vozač dostigne vozilo ispred sebe, počne kočiti u trenutku svog individualnog praga zamjećivanja sporijeg vozila ispred sebe. Budući da nije moguće odrediti točnu brzinu vozila ispred sebe, njegova će prilagođena brzina biti niža od brzine vozila ispred njega. Zatim vozač počne ponovno ubrzavati vozilo dok ne postigne sljedeći prag zamjećivanja (percepcije). Proces se iterativno nastavlja izmjenom ubrzavanja i kočenja (vidi sliku 2.1.) [23]. Osnovna ideja modela je da se vozač može nalaziti u jednom od četiri načina vožnje: slobodno voziti, približavati se drugom vozilu, slijediti drugo vozilo i kočiti, stoga svaki način vožnje predstavlja ubrzanje koje je rezultat brzine, razlike brzina, udaljenosti i osobina vozača i vozila. Granične vrijednosti i matematički opis modela detaljnije pogledati u literaturi [23, 26].



Slika 2.1. Prikaz Widemannovog modela [23]

Za modeliranje raskrižja u ovom simulacijskom programskom paketu potrebno je slijediti proceduru modeliranja kroz pet glavnih značajki modela koje utječu na ispravnost simulacije, a to su: (1) Linkovi i konektori koji se koriste za izgradnju oblika raskrižja, (2) Zone redukcije brzine kretanja koje reguliraju brzine kretanja vozila na ulasku, izlasku i u kružnom kolniku raskrižja, (3) Rute prometnog toka (usmjeravanja) koje odlučuju o intenzitetu i toku kretanja prometa kroz raskrižje, (4) Pravila prioriteta ili područja sukoba (konfliktni markeri) koja kontroliraju ulazak vozila u raskrižje prema pravilima prednosti (predstavljaju najvažniji korak prilikom modeliranja jer se s njima postiže kalibracija modela), (5) Postavke modela kojima se definiraju izlazni rezultati simulacija. Princip korištenja i modeliranja u ovom simulacijskom paketu detaljnije se može pogledati u literaturi [26].

2.2.3.2. Kalibracija i validacija modela

Kalibracija i validacija su najvažniji koraci za modeliranje prometnih situacija u simulacijskim programskim paketima sa svrhom da modelirane situacije budu identične promatranom okruženju. Služe za smanjivanje sistematskih pogrešaka i provjeru dobivenih izlaznih rezultata prilikom razvijanja modela.

Kalibracija (prilagodba) definira se kao proces podešavanja parametara modela, mreže i prometne potražnje prema stvarnim uvjetima promatrane okoline. Proces kalibracije ima za cilj proizvesti model koji će dovoljno precizno pružiti pouzdane prognoze koje će biti u stanju zadovoljiti postavljene ciljeve istraživanja. Sljedeći prikupljeni podaci na terenu mogu poslužiti za kalibraciju simulacijskog modela: brzina putovanja, vrijeme trajanja putovanja, duljina repa čekanja, intenziteti prometa, kapacitet, matrica putovanja OD (engl. origin-destination), vrijeme slijeđenja, kritična vremenska praznina, itd... [27].

Validacija (ocjena) je proces testiranja performansi kalibriranog modela pomoću neovisnog skupa podataka (podatci koji nisu korišteni u kalibraciji modela) koji se odnose na kontrolu preciznosti vrijednosti parametara, a koji su rezultat simulacije i parametara mjerenih na terenu. Validacija je dodatna potvrda kako je razvijeni model ispravno kalibriran i odgovara postojećim uvjetima odvijanja prometa na raskrižjima. Vrijednosti simulacije obično se kreću unutar 5 - 10% odstupanja od terenskih mjerenja [27].

Za usporedbu promatranih i simuliranih vrijednosti može se uporabiti široki spektar pokazatelja (GEH metoda, t-test, z-test, Chi-2 test, RMSNE - Root Mean Square Normalized Error, CC - Correlation coefficient, potreban broj simulacija, itd...) [28]. Odabir pravovaljanih metoda za provjeru validacije nije propisan nikakvim zakonskim aktima, pravilnicima i smjernicama, već odabir metode i modela ovisi o iskustvu istraživača. Prema preporukama praktičara i smjernicama [28, 29, 30] preporuča se korištenje sljedećih pokazatelja:

- GEH metoda - preporuka je da za barem 85% prometnih tokova pokazatelj GEH-a ima vrijednost manju od 5 ($GEH < 5$), ali na „kontrolnim presjecima“ vrijednost mora biti manja od 4 ($GEH < 4$) [27, 28];
- RMSNE (engl. Root Mean Square Normalized Error) metoda - preporuka je da RMSNE bude manji od 0.15 za ispravnost simulacijskog modela [29, 30];
- Potreban broj simulacija (N) – kako bi se smanjio utjecaj stohastičke prirode modela na dobivene rezultate u simulacijskim modelima potrebno je više puta pokrenuti simulacije jer se u njima generiraju različiti parametri za različitu distribuciju prometnih tokova. U pravilu, potrebno je napraviti 10 simulacija s različitim brojem entiteta [29, 30].

2.2.4. Pokazatelji učinkovitosti (*engl. MOE - Measures of Effectiveness*)

Kako bi se dobila procjena učinkovitosti klasičnih raskrižja u razini, postoji niz mjera za opis kvalitete funkcioniranja raskrižja. Postoji veliki broj pokazatelja u primjeni, a osnovni pokazatelji koji se koriste u analizi funkcioniranja raskrižja, a kojima se kvantificiraju određeni aspekti prolaska vozila kroz raskrižje i na taj način "mjeri" učinkovitost samog raskrižja su: stupanj zasićenja raskrižja/prometnog traka (X), prosječno vrijeme kašnjenja (d_s), duljina repa čekanja (Q_{95}) i razina usluge (LOS, RU) [5, 29].

Stupanj zasićenja raskrižja (X) – predstavlja omjer broja vozila na privozu i kapaciteta privoza. Prema preporukama [5] za normalno funkcioniranje raskrižja, stupanj zasićenja ne bi trebao biti veći od $X > 0.85$, a prema smjernicama [29] stupanj zasićenja može iznositi najviše do $X = 0.95$. Kada je stupanj zasićenja raskrižja $X > 1.0$, raskrižje djeluje preko kapaciteta, tj. prezasićeno.

Prosječno vrijeme kašnjenja (d_s) - standardni je parametar koji se primjenjuje za procjenu učinkovitosti RKT-a i klasičnih raskrižja u razini. Prosječno vrijeme kašnjenja definira se kao vrijeme koje je potrebno vozaču da uspori na red čekanja pri ulasku u raskrižje, pričekava prihvatljivu vremensku prazninu za ulazak u raskrižje i nakon ulaska u raskrižje ubrza svoj izlazak iz raskrižja. Formulu za prosječno vrijeme kašnjenja razvili su istraživači Akcelik i Troutbeck, a detaljniji opis formule može se pogledati u literaturi [5, 29].

Duljina repa čekanja (Q_{95}) – često predstavlja odlučujući kriterij za propusnu moć / kapacitet raskrižja. Definira se kao funkcija kapaciteta i stvarnog protoka u analiziranom vremenu. Posebno je duljina repa čekanja izražena kod onih raskrižja koja imaju ograničenu duljinu prometnih trakova za desna i lijeva skretanja. Duljine prometnih trakova za lijeva i desna skretanja (kod kružnih raskrižja samo za desna skretanja) moraju biti projektirane tako da nakupljena vozila mogu naći mjesto na prometnom traku za skretanje. Prilikom projektiranja kružnih i ostalih oblika raskrižja treba voditi računa da se u 95% slučajeva ne premaši duljina nakupljanja vozila pred ulazom u raskrižje. Wu [31] je razvio formulu za duljinu repa čekanja, a detaljniji opis formule može se pogledati u literaturi [5, 29, 31].

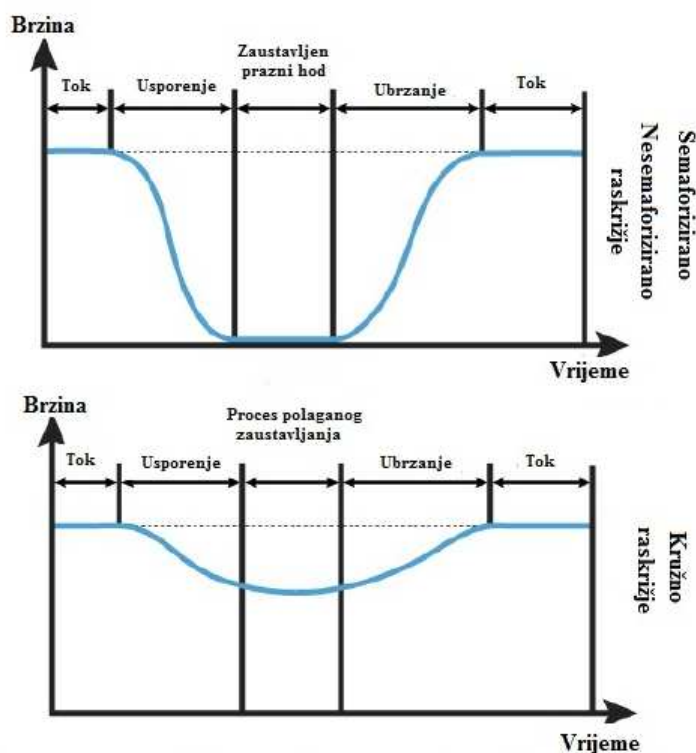
Razina usluge (LOS *engl. Level of Service*) - predstavlja komfor vožnje, odnosno stupanj slobodne vožnje. Uobičajeno se definira šest stupnjeva razine usluge (A-F) u cestovnom prometu po metodi HCM 2010 (*engl. Highway Capacity Manual*) [5].

2.3. Utjecaj RKT-a na okoliš i gospodarstvo

Dosadašnje teorijske postavke o utjecaju izvedenih RKT-a na okoliš i gospodarstvo temeljene su na međusobnoj usporedbi s raskrižjima u razini (semaforizirana i nesemaforizirana) kroz ekološke (emisija štetnih ispušnih plinova, potrošnja goriva i razina buke) i gospodarske pokazatelje (troškovi i koristi za društvo).

2.3.1. Ekološki pokazatelji

Cestovna raskrižja usporavaju prometni tok i prisiljavaju vozila na zaustavljanje te na taj način ometaju idealni prometni tok i brzine vozila. Što duže vozila stoje, raste potrošnja goriva i povećava se emisija štetnih ispušnih plinova i razina buke. Uz navedene probleme postalo je razborito odabrati određene tipove raskrižja (semaforizirana, nesemaforizirana, RKT i raskrižja u više razina) koji mogu poboljšati prometni tok na raskrižjima te smanjiti emisiju štetnih ispušnih plinova, potrošnju goriva i razinu buke. RKT-i u odnosu na ostala klasična raskrižja (nesemaforizirana i semaforizirana) u razini imaju kontinuirani tok kretanja vozila kroz raskrižje bez nepotrebnih zaustavljanja za razliku od ostalih tipova raskrižja u razini gdje se tok vozila mora zaustavljati i čekati da mu se omogući slobodan ulazak u raskrižje (vidi sliku 2.2.) [32].



Slika 2.2. Prikaz kretanja toka kroz pojedine oblike raskrižja [32]

Ovaj problem prvenstveno se javlja kod semaforiziranih raskrižja kad dolazi do prisilnog zaustavljanja prometnog toka i promjene signalnog plana. Nepotrebnim čekanjem na raskrižju troši se gorivo, povećava emisija štetnih ispušnih plinova te stvara neželjena buka što će rezultirati negativnim utjecajem pojedinog tipa raskrižja na okoliš i društvo. Utjecaj RKT-a na okoliš i ljude može se prikazati kroz pokazatelje potrošnje goriva, emisije štetnih ispušnih plinova, razinu buke i gubitak vremena.

2.3.1.1. Emisija štetnih ispušnih plinova

Uz godišnje povećanje prometa, jedan od glavnih problema za okoliš i zdravlje ljudi u mnogim razvijenim zemljama je količina emisije štetnih ispušnih plinova. Količina emisije štetnih ispušnih plinova varira ovisno o ukupnoj količini prometa, načinu upravljanja prometnim tokovima, ponašanju sudionika i tehničkim karakteristikama vozila. Emisije štetnih ispušnih plinova iz cestovnih vozila sadrže široku paletu zagađivača od kojih su najštetniji ugljični monoksid (CO), dušikov oksid (NO_x), ugljikov dioksid (CO₂), ugljikovodici (CH) ili hlapljivi organski spojevi (VOC), krute čestice (PM) i sumporovi oksidi (SO). Oni pridonose uništenju ozona, globalnom zatopljenju, stvaranju kiselih kiša i smoga te negativno utječu na zdravlje čovjeka što dovodi do dugoročnih štetnih učinaka na okoliš i čovjeka [33, 34]. Provedenim istraživanjima [34, 35] dokazano je da se povećanjem brzine vozila povećava i količina dušikovog oksida (NO_x), a smanjuje količina ugljičnog monoksida (CO), hlapljivih organskih spojeva (VOC) i krutih čestica (PM). Količine ugljikovog dioksida (CO₂) ovise o potrošnji goriva i karakteristikama vozila dok ukupna količina štetnih ispušnih plinova ovisi o duljini putovanja i načinu vožnje (ponašanju vozača). U primjeni postoji više znanstveno utemeljenih emisijskih modela na osnovi kojih se može izračunati emisija ispušnih plinova i potrošnja goriva.

2.3.1.2. Emisijski modeli

Mnogi emisijski modeli razlikuju se u svojim pristupima modeliranju, strukturi modeliranja i podatkovnim zahtjevima. Emisija se približno može odrediti i korištenjem emisijskih čimbenika jedne vrste vozila i određenog načina vožnje koji su dobiveni preko ispitnih ciklusa pri prosječnoj brzini kretanja vozila (ispitni ciklusi pri radnoj temperaturi i pri hladnom startu motora). Emisijske modele moguće je klasificirati u dvije glavne skupine prema složenosti, na mikroskopske i makroskopske modele [34].

Makroskopski modeli - koriste parametre iz cjelokupne prometne mreže za procjenu emisije štetnih ispušnih plinova. Ovi modeli mogu se koristiti za izračunavanje emisije štetnih ispušnih plinova i stvaranje inventara kako na nacionalnoj tako i na lokalnoj razini, a posebno u ekološkoj studiji koja se planira provesti na određenom području. Općenito gledajući, kod ovih modela polazi se od činjenice da prosječna emisija na nekom putu ovisi o prosječnoj brzini vožnje na tom putu. Makroskopski modeli koji se koriste u širokoj primjeni za izračun emisije štetnih ispušnih plinova su: COPERT [36], MOBILE [37] i TEDS [38].

Mikroskopski modeli - temelje se na kinematičkim varijablama (brzina i ubrzanje) ili modalnim varijablama (konstantna brzina i ubrzanje) pojedinačnih vozila. Modeli koji se koriste u širokoj primjeni kod ove podjele su: VSP [39], VERSIT + LD, HD micro [40], MOVES [41], VT micro [42] i CNEM [43]. Prema istraživanjima [40, 43, 44] u novije vrijeme korišten je mikrosimulacijski emisijski model VERSIT + micro i mikrosimulacijski programski paket VISSIM.

2.3.1.3. VERSIT + emisijski model (EnViVer)

VERSIT + micro je mikroskopski emisijski model za izračun emisije štetnih ispušnih plinova (CO_2 , NO_x i PM_{10}) temeljen na različitim tipovima vozila i ponašanjima korisnika uzimajući u obzir za svako vozilo pojedinačno njegov profil snage, brzine i vremena vožnje na promatranoj dionici. Model uzima u obzir samo četiri glavne kategorije vozila i to: osobna vozila, autobuse, laka i teška teretna vozila. Razvio ga je TNO (*engl.* The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research) na uzorku koji obuhvaća 20.000 mjerenja emisije štetnih ispušnih plinova na 3.200 vozila tokom 20 godina istraživanja u Nizozemskoj. EnViVer je posebna verzija VERSIT + micro modela koja je dizajnirana za suradnju s mikrosimulacijskim programskim paketom VISSIM. Za izračun emisije štetnih ispušnih plinova EnViVer koristi sljedeću formulu:

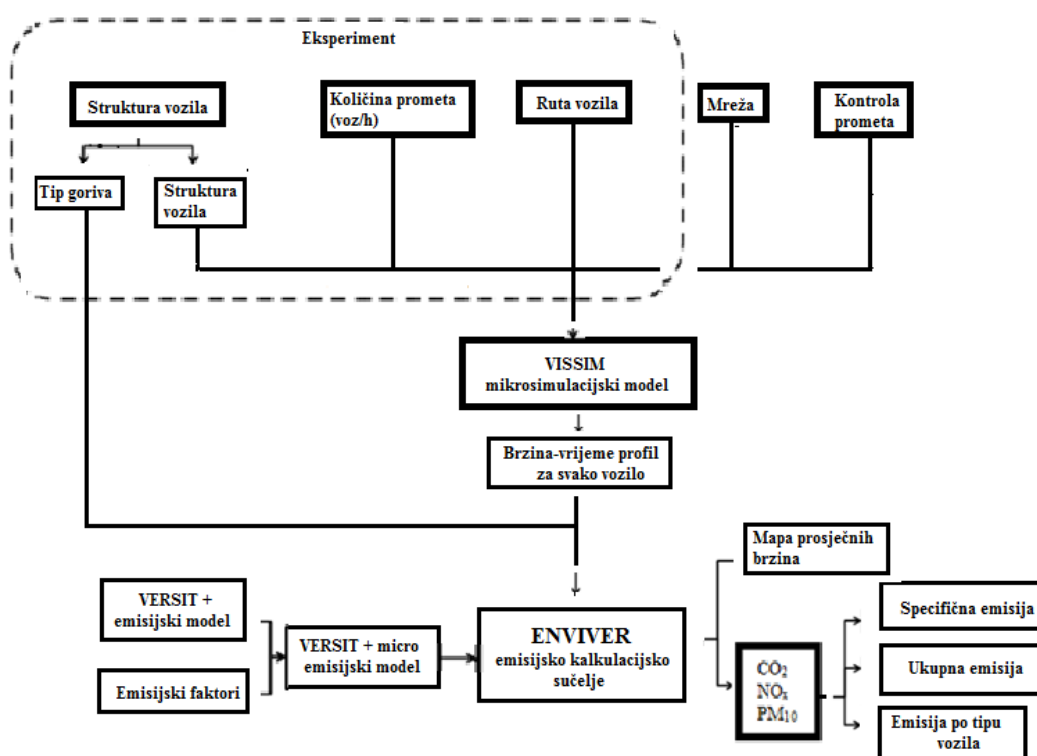
$$TE_j = \sum_{k,m} E_{j,k,l}^F \cdot Tv_{k,m} \cdot L_m \quad (2.1)$$

gdje TE_j za određenu emisiju j , predstavlja količinu emisije štetnog ispušnog plina u satu (g/h ili kg/h), $E_{j,k,l}^F$ predstavlja predviđeni srednji čimbenik emisije (g/km) za određenu emisiju j , vrstu vozila k , i profil brzine i vremena l . $Tv_{k,m}$ predstavlja količinu prometa za

određenu vrstu vozila k (voz/h) na određenoj dionici prometnice m gdje će se profil brzine i vremena primjenjivati. L_m predstavlja duljinu dionice na određenoj prometnici.

Iz formule 2.1., može se zaključiti da emisijski model EnViVer koristi profilne brzine za svako pojedinačno vozilo iz simulacija u VISSIM-u.

Na slici 2.3. prikazana je osnovna struktura emisijskog modela EnViVer. Prvi korak u emisijskom modelu je simulacija prometa u mikrosimulacijskom programu VISSIM. Nakon završetka simulacije prometa i pohranjivanja podataka o simulaciji, spremljeni podatci se implementiraju u emisijski model EnViVer koji izračunava emisiju štetnih ispušnih plinova CO_2 , NO_x i PM_{10} .



Slika 2.3. Struktura emisijskog modela EnViVer [45]

Princip korištenja i modeliranja u ovom simulacijskom paketu detaljnije se može pogledati u literaturi [45].

2.3.1.4. Pregled postojećih istraživanja o utjecaju RKT-a na ekološke pokazatelje

Najrelevantnija istraživanja o utjecaju RKT-a na ekološke pokazatelje podijeljena su u dvije grupe: u prvoj grupi korišteni su podatci koji su dobiveni mjerenjem na terenu [46-50], a u

drugoj grupi korišteni su u međusobnoj korelaciji prometni i emisijski modeli na temelju proizvoljnih postavljenih scenarija (količina prometa, brzina vozila, matrica putovanja, itd.) [32, 51-56]. Istraživač Várhelyi [46], koji je promatrao količinu štetnih ispušnih plinova i potrošnju goriva na 21 raskrižju u Švedskoj preuređenom u RKT, dokazao je da su RKT-i u odnosu na semaforizirana raskrižja ostvarili učinke u smanjenju emisije ugljikovog monoksida (CO) za 29%, dušikovog oksida (NO_x) za 21% i potrošnji goriva za 28%. RKT-i koji su zamijenili nesemaforizirana raskrižja nisu ostvarili učinke u pogledu smanjenja količine emisije štetnih ispušnih plinova, već su ostvarili povećanje. Emisije ugljikovog monoksida (CO) povećane su za 6%, dušikovog oksida (NO_x) za 4%, a potrošnja goriva povećana je za 3%. Prema istraživanju Zugera i ostalih [47] koji je proučavao učinke RKT-a na emisiju štetnih ispušnih plinova i potrošnju goriva pomoću mjernih uređaja koji su bili instalirani u vozilu na temelju različitih ciklusa vožnji (ubrzanje, usporenje, određeni dio dana, određena ometanja, itd.) došlo se do podataka da su RKT-i bolji u odnosu na ostala klasična raskrižja (nesemaforizirana i semaforizirana) u razini kad nisu ometana drugim sudionicima (pješaci, biciklisti, itd.). Istraživanje Coelhoa i ostalih [48] temeljilo se na prikupljenim podacima o dinamici vozila i njihovim različitim profilima brzina na jednotračnim kružnim raskrižjima u SAD-u i Portugalu. Koristeći prikupljene profile brzina istraživač je došao do zaključka da povećanje emisije štetnih ispušnih plinova ima izravan odnos s povećanjem prometa u kružnom kolniku. Emisije štetnih ispušnih plinova poput ugljikovog monoksida (CO), dušikovog oksida (NO_x) i ugljikovodika (HC) povećat će se i kod smanjene količine prometa u kružnom kolniku zbog visoke stope ubrzanja radi neometanog ulaska u kružno raskrižje. Proučavajući na različitim koridorima određene tipove raskrižja (nesemaforizirana, semaforizirana i RKT) korištenjem odgovarajuće mjerne opreme u vozilu PEMS (engl. Portable Emissions Monitor) koju su koristili dva vozača, istraživač Hallmark s ostalima [49] došao je do zaključaka da je utjecaj RKT-a na okoliš ovisan o obliku raskrižja i količini prometa na ulasku u raskrižje i u kružnom kolniku kao i o ponašanju sudionika-vozača. Učinak ugljikovog dioksida (CO₂) u većini slučajeva manji je kod RKT-a nego kod ostalih oblika raskrižja. Autor studije Mandavilli [32] istraživao je utjecaj emisije štetnih ispušnih plinova u američkim saveznom državama Kansasu i Nevadi korištenjem simulacijskog programskog paketa aaSIDRA na pet nesemaforiziranih raskrižja koja su preuređena u RKT. Provedena studija na novoizgrađenim RKT-ima u jutarnjem i popodnevnom vremenskom promatranju dokazala je smanjenje emisije štetnih ispušnih plinova za ugljikov monoksid (CO) od 21% do 42%, dušikov oksid (NO_x) od 20% do 48%, ugljikov dioksid (CO₂) od 16% do 59% i ugljikovodike (HC) od 18% do 65%.

Prema istraživanju autora Deckyja [50], koje je u Slovačkoj obuhvatilo pet gradova i osam RKT-a koja su zamijenila nesemaforizirana raskrižja, došlo se do spoznaja da je prosječno smanjenje razine buke u gradu Michalovce iznosilo oko 2.2 dB, u gradu Bojnice oko 6 dB, u gradu Považská Bystrica oko 4.8 dB i u gradu Havířov oko 4 dB. U istraživanje su bila uključena samo jednotračna RKT koja su zamijenila nesemaforizirana raskrižja vanjskog promjera do $D_v = 45$ m i na kojima se količina prometa kretala od 800 – 1500 voz/h, a mjerenje je bilo obavljeno direktno na terenu uz primjenu mjernog uređaja za buku. Autor Chevallier [51] je uz primjenu statističkih, analitičkih i determinističkih modela za predviđanje razine buke i primjenom proizvoljnih prometnih scenarija za različite stupnjeve zasićenja istraživao utjecaj RKT-a i semaforiziranog raskrižja na razinu buke u odnosu na stupanj zasićenja koji vlada na njima. Prema provedenom istraživanju zaključeno je da je razina buke u slučaju niskog i srednjeg prometnog toka u odnosu na semaforizirano raskrižje kod RKT-a smanjena za 2,5 dB, a u slučaju visokog prometnog toka (zasićenog) razina buke identična je kod oba raskrižja. Primjenom mikrosimulacijskog programskog paketa PARAMICS za prometno modeliranje i programskih paketa za modeliranje ispušnih plinova MOVES i CEM istraživač Chamberlin [52] promatrao je emisije ugljikovog monoksida (CO) i dušikovog oksida (NO_x) na semaforiziranom “T” raskrižju (priključku) i na jednotračnom kružnom raskrižju na temelju proizvoljno postavljenih scenarija. Rezultati istraživanja pokazali su veće emisije navedenih plinova kod RKT-a u odnosu na semaforizirano “T” raskrižje. Istraživač Rakha [53] korištenjem mikrosimulacijskog programskog paketa INTEGRATION za prometno modeliranje i programskog paketa za modeliranje ispušnih plinova VT-Micro promatrao je emisije ugljičnog dioksida (CO₂), ugljikovog monoksida (CO), dušikovog oksida (NO_x) i ugljikovodika (HC) za određene O/D matrice na jednotračnom RKT-u, semaforiziranom i nesemaforiziranom raskrižju (slobodan prolaz i obvezno zaustavljanje). Provedeno istraživanje dokazalo je da RKT smanjuje emisije štetnih ispušnih plinova u odnosu na druga raskrižja koja su bila uključena u istraživanje. U novije vrijeme provedena su istraživanja [54, 55, 56] koja su se bavila usporedbom emisije štetnih ispušnih plinova, propusne moći i kašnjenja vozila između konvencionalnih oblika RKT-a (jednotračno 1+1, višetračno u kružnom kolniku 1+2, višetračno na privozu 2+1¹ i s pomoćnim trakom za desna skretanja i suvremenih oblika RKT-a (Turbo [57], Flower [58], Target[59], i Four flyover kružno raskrižje [59]).

¹ 1+1 jedan prometni trak na privozu i jedan prometni trak u kružnom kolniku, 1+2 jedan prometni trak na privozima i dva prometna traka u kružnom kolniku, 2+1 dva prometna traka na privozu i jedan prometni trak u kružnom kolniku i 2+2 dva prometna traka na privozu i dva prometna traka u kružnom kolniku.

Po istraživaču Corrierea [54] napravljena je komparativna analiza između klasičnih RKT-a (1+1, 1+2, 2+2) i *flower* kružnog raskrižja na temelju proizvoljno postavljenih scenarija i emisijskog modela COPERT. Istraživanjem je zaključeno da *flower* kružna raskrižja daju bolje rezultate (smanjeno kašnjenje, veći kapacitet i smanjenu emisiju štetnih ispušnih plinova) u odnosu na klasična RKT kod količine prometa u kružnom kolniku do 1600 voz/h dok kod veće količine prometa klasično RKT (2+2) daje bolje rezultate. Kada je količina prometa visoka (do 450.000 voz/god), emisija štetnih ispušnih plinova ovisna je o geometriji raskrižja. Usporedba klasičnih RKT-a (1+1, 2+2) i turbokružnog raskrižja na promatranim raskrižjima u Portugalu uz primjenu simulacijskog prometnog paketa AIMSUN i emisijskog programskog paketa VSP provedena je prema istraživaču Vasconcelosu [57]. Rezultati istraživanja pokazali su da turbokružno raskrižje proizvodi puno više ugljikovog dioksida (CO₂) i dušikovog oksida (NO_x) nego klasično RKT (2+2). Ako je prioritet smanjenje ugljikovog dioksida (CO₂), klasično RKT (2+2) raskrižje je najbolji izbor dok za druge emisije poput ugljikovog monoksida (CO) i ugljikovodika (CH) turbokružno raskrižje predstavlja optimalno rješenje za smanjenje emisije. Po istraživaču Guerrierietu [56] napravljena je komparativna analiza između klasičnih RKT-a (1+1, 1+2, 2+2), *flower* kružnih raskrižja (gdje su desna pomoćna skretanja kontrolirana obveznim zaustavljanjem - stop, slobodnim prolazom i provjerom prolaza) i turbokružnog raskrižja na temelju proizvoljno postavljene matrice i emisijskog modela COPERT. Istraživanjem je zaključeno da pri količini prometa do 1300 voz/h klasični RKT-i (1+1) imaju bolji funkcionalni, ekološki i ekonomski aspekt u odnosu na ostale tipove promatranih raskrižja dok pri većoj količini prometa od 2.500 voz/h turbokružna raskrižja i *flower* kružna raskrižja daju najbolje rezultate.

2.3.2. Gospodarski pokazatelji

Opravdanost izvedbe RKT-a na nekoj lokaciji popraćena je pitanjem ekonomske isplativosti njegove izvedbe. U cilju utvrđivanja ekonomičnosti rješenja RKT-a potrebno ga je usporediti s ostalim varijantama predloženih rješenja (nesemaforizirana/semaforizirana raskrižja) kroz gospodarske pokazatelje. Gospodarski pokazatelji podrazumijevaju troškove i dobiti koji će proizaći iz određenog tipa raskrižja. U društvenom smislu traže se odgovori na pitanja:

- Koliki će biti troškovi RKT-a u usporedbi s klasičnim raskrižjima u razini (semaforizirana i nesemaforizirana)?
- Koliko će uštedjeti društvo odabirom određenog tipa raskrižja?

Odgovori na ova pitanja temelje se na analizi troškova (engl. cost) i koristi (engl. benefit) prometnog rješenja za određeni tip raskrižja, a koja služi za provjeru gospodarske opravdanosti izabranog prometnog rješenja (cost-benefit analiza). Navedenom analizom prosuđuju se društveni troškovi i koristi koji će se predvidljivo pojaviti realizacijom izabranog prometnog rješenja. Cost-benefit analiza (i uz analizu ostalih utjecaja) trebala bi omogućiti jednoznačno donošenje odluke je li društvo spremno prihvatiti (platiti) razinu troškova (šteta) koje će određeni zahvat uzrokovati za društvo (ali i pojedinca) u odnosu na koristi koje će zahvat osigurati. Ukupne koristi i štete odnose se na: ekosustav, zdravlje ljudi, gospodarstvo i društvo. Pod troškovima se podrazumijevaju: troškovi investitora (investicijski troškovi, tekući troškovi i troškovi održavanja) i troškovi korisnika raskrižja (društva), a koristi obuhvaćaju smanjenje: troškova prometnih nesreća, vremena putovanja, potrošnje goriva, razine buke, emisije štetnih ispušnih plinova te podizanje razine usluge i kvalitete prometnog toka [60].

2.3.2.1. Troškovi investitora

Troškovi investitora podrazumijevaju troškove građenja (investicijski troškovi), tekuće troškove i troškove održavanja. Ovi troškovi mogu se prilično točno odrediti iz tehničke dokumentacije i iz podataka nadležnih službi o stvarnim troškovima koji se izdvajaju na godišnjoj razini za neometano djelovanje i odvijanje prometa na raskrižju.

Investicijski troškovi - uključuju izradu projektne dokumentacije i izgradnju raskrižja. Troškove za izradu projektne dokumentacije čine troškovi za: idejni, glavni i izvedbeni projekt raskrižja i troškovi za ishođenje potrebnih dozvola za gradnju raskrižja. Troškove za izgradnju raskrižja čine troškovi vezani za: pripremne radove, zemljane radove i temelje, kolničku konstrukciju, odvodnju, prateće objekte, prometnu signalizaciju i opremu raskrižja. Navedeni troškovi investitora mogu se točno izračunati iz priloženih dokumentacija (projektnih elaborata) i ispostavljenih računa za obavljene radove.

Tekući troškovi raskrižja - uključuju sve potrebno za njegovo funkcionalno djelovanje. Kod semaforiziranog raskrižja obuhvaćaju potrošnju energije za rad semafora i javne rasvjete, a kod RKT-a samo trošak djelovanja javne rasvjete.

Troškovi održavanja - procjenjuju se na temelju iskustva poduzeća za ceste i nadzor, ovisno prema geografskom području i lokalnim uvjetima na kojem se raskrižje nalazi. Posebno se troškovi održavanja odnose na zimsko održavanje (čišćenje i posipavanje), uređenje bankina i

okoline uz prometnicu (košnja trave), zamjenu dotrajale vertikalne i horizontalne signalizacije te sanaciju oštećene kolničke konstrukcije. Na semaforiziranom raskrižju troškovi održavanja uključuju zamjenu žarulja (obične ili led) i redovno servisiranje semaforškog uređaja.

2.3.2.2. Troškovi korisnika (društva)

Pod troškovima korisnika (društva) podrazumijevaju se troškovi čekanja (zakašnjenja), odnosno dobit u vremenu putovanja, troškovi goriva u vidu potrošnje, troškovi nastali kao posljedica prometnih nesreća i troškove onečišćenja (emisije štetnih ispušnih plinova). Ukoliko postoji dovoljno podataka o troškovima društva - troškovi korisnika (trošak zakašnjenja), odnosno dobit (ušteda u vremenu putovanja i gorivu) te troškovi prometne sigurnosti (zbog posljedica prometnih nesreća) - poželjno je cost-benefit analizom odrediti gospodarsku opravdanost pojedinog rješenja. Ukoliko ne postoje pouzdani podatci, kako bi se procijenilo smanjenje navedenih društvenih troškova, vrednovanje po gospodarskim pokazateljima može se pojednostaviti i svesti na vrednovanje kapitalnih (investicijskih) troškova te operativnih troškova i troškova održavanja [60]. Za proračun troškova korisnika uvažavajući troškove čekanja i troškove goriva koriste se računalni programi poput programskog paketa aaSIDRA [61]. Mjerodavne visine stvarnih troškova materijalnih i nematerijalnih šteta koje su nastale na raskrižjima prilikom prometnih nesreća moguće je adekvatno utvrditi prema provedenim isplatama osiguravajućih kuća dok se broj prometnih nesreća kroz analizirano razdoblje (trend smanjenja ili povećanja broja nesreća) može predvidjeti kroz primjenu različitih metoda i modela za predviđanje broja prometnih nesreća od kojih su najznačajnije metode navedene u radovima [62, 63, 64] i SSAM model (engl. Surrogate Safety Assessment Model) [65]. Troškovi poput ozljeda, onečišćenja okoliša i zakašnjenja mogu se pretvoriti u eksterne troškove. Eksterni troškovi često nisu novčani tako da ih je teško kvantificirati novčanim vrijednostima. Postoje razne studije o eksternim troškovima, međutim diskutabilno je koliko su one usporedive. Problemi nastaju zbog drukčije metodologije u izračunu eksternih troškova kao i činjenice da neke studije uzimaju u obzir samo određene eksterne troškove. Prema smjernicama Europske unije (EU) po direktivi 2009/33/EC [66] novčana cijena pojedinog eksternog troška za onečišćenje iznosi za ugljikov dioksid (CO₂) = 0.04 €/kg; dušikov oksid (NO_x) = 0.0044 €/g i krutečestice (PM_{2.5}, PM₁₀) = 0.087 €/g. Prema istraživanju [67] iz 2014. g., zasvaku pojedinu zemlju iz EU-a navedena je cijena eksternog troška za smrt, težu tjelesnu ozljedu i lakšu ozljedu. Za Republiku Hrvatsku cijena eksternog troška za smrt iznosi 1.333,00 €, težu tjelesnu ozljedu 173.000 € i za lakšu tjelesnu ozljedu 13.300 €. Vrijednost troška zagušnjaja po istraživanju [68] iznosi 10 €/h.

2.3.2.3. Pregled postojećih istraživanja o utjecaju RKT-a na gospodarske pokazatelje

Postojeća istraživanja o utjecaju RKT-a na gospodarske pokazatelje odnose se na usporedbu broja prometnih nesreća i troškova investitora odnosno korisnika/društva kod RKT-a i ostalih oblika raskrižja u razini. Podijeljena su u dvije grupe, prva grupa odnosi se na smanjenje broja prometnih nesreća [69-72], a druga grupa na troškove [68, 73-74].

Istraživanjem 181 raskrižja (semaforizirana i nesemaforizirana) u Nizozemskoj koja su preuređena u RKT, istraživač Schoon [69] došao je do zaključka da se broj prometnih nesreća i lakših tjelesnih ozljeda smanjio za 41 - 71%, a broj teških tjelesnih ozljeda za 81%. Istraživač Neiderhauser [70] proveo je istraživanje prosječnih troškova prometnih nesreća na pet nesemaforiziranih raskrižja koja su rekonstruirana u RKT u američkoj saveznoj državi Maryland. Za potrebe studije statistički podatci o vrsti i prosječnim troškovima prometnih nesreća prikupljeni su u vremenskom intervalu u trajanju od tri godine prije i poslije izgradnje RKT-a. Provedenim istraživanjem dokazano je da se prosječni broj prometnih nesreća na RKT-u smanjio za 50%, a prosječni troškovi po prometnoj nesreći za 30%. Prije rekonstrukcije prosječni troškovi prometnih nesreća iznosili su oko 119.788 \$, a nakon rekonstrukcije oko 84.125 \$. Studijom IIHS-a (*engl.* Insurance Institute for Highway Safety) prema Persaudu [71] provedeno je istraživanje sigurnosti na 23 kružna raskrižja u SAD-u praćenjem broja prometnih nesreća prije i poslije izgradnje RKT-a koja su zamijenila semaforizirana i nesemaforizirana raskrižja. Istraživanjem je dokazano da RKT-i smanjuju broj prometnih nesreća u kojima su nastupile lakše ozljede za 75%, smrtne ozljede za 90%, ozljede na pješacima za 40% i sve ozljede za 37% na mjestima gdje su se ranije za kontrolu prometa koristila semaforizirana i nesemaforizirana raskrižja. U studiji se navodi nekoliko razloga zašto RKT-i smanjuju vjerojatnost nastanka prometnih nesreća i njihovih posljedica: niske putne brzine, broj konfliktnih točaka i jednosmjerno vođenje. Na 55 lokacija u SAD-u gdje su nesemaforizirana i semaforizirana raskrižja u razini zamijenjena RKT-om, istraživač Rodegerdts [72] došao je do spoznaja da se ukupni broj svih prometnih nesreća smanjio za 35%. Osim toga, broj ozbiljnih ozljeda (težih) smanjen je za 76%. U ruralnim sredinama gdje su nesemaforizirana i semaforizirana raskrižja zamijenjena RKT-om broj težih ozljeda smanjen je za 87% dok je u prigradskim sredinama ukupni broj svih ozljeda smanjen za 67%. Autori Mauro i Cattani [68] u svom su istraživanju na tri semaforizirana i tri kružna raskrižja analizirali troškove investitora (tekuće troškove, troškove održavanja) i troškove korisnika.

Prema gore navedenim autorima cijene zemljišta variraju u ovisnosti o lokaciji raskrižja. U centralnim dijelovima grada cijene zemljišta su visoke, a smanjuju se udaljavanjem od središta grada. U urbanim dijelovima grada cijene zemljišta kreću se u rasponu od 50 do 100 €/m². Cijene kolničkih konstrukcija ovise o vrsti materijala, a za asfaltnu konstrukciju kolničkog zastora cijena iznosi oko 30 €/m². Prosječne cijene semaforne opreme na četverkrakom semaforiziranom raskrižju iznose oko 40.000 €. Tekući troškovi i troškovi održavanja ovise o tipu raskrižja. Na semaforiziranim raskrižjima tekući troškovi i troškovi održavanja uključujući i potrošnju električne energije na godišnjoj razini iznose oko 4.000 € dok na RKT-u tekući troškovi i troškovi održavanja variraju ovisno o veličini raskrižja. Na malim RKT-ima (mali vanjski radijus) troškovi iznose oko 1.000 €, a na velikim RKT-ima cijene troškova iznose i do 10.000 € na godišnjoj razini. Troškovi čekanja vozila po satu na raskrižju iznose oko 10 €/h. U radu [73] istraživač Tollazzi proveo je usporedbu funkcionalnih, ekoloških i ekonomskih aspekata između konvencionalnih RKT-a (1+1, 2+1, 2+2) i suvremenih oblika RKT-a *flower*, *four-flyover* i *target* koristeći proizvoljno postavljene matrice putovanja i simulacijski program COPERT za određivanje emisije štetnih ispušnih plinova za promatrani vremenski period od 30 g. Zaključeno je da konvencionalni RKT-i (2+2) imaju bolju propusnu moć i smanjeno kašnjenje dok *flower* kružna raskrižja imaju uvijek bolju propusnu moć i manje kašnjenje od konvencionalnog RKT-a (1+1). U pogledu troškova gradnje, održavanja, kašnjenja i emisije štetnih ispušnih plinova *target* kružno raskrižje ima visoke troškove gradnje, ali male troškove emisije štetnih ispušnih plinova i kašnjenja. Navedenim istraživanjem zaključeno je da su srednje količine prometa ($Q_{max} = 2800 - 3000$ voz/h) pogodne za RKT, a njihova ekonomska isplativost je sve značajnija pri količinama prometa većima od $Q_{max} = 3300$ voz/h.

3. ANALIZA PRIKUPLJENIH PODATAKA I SIMULACIJSKA OBRADA

Analiza postojećeg stanja na promatranim raskrižjima napravljena je kroz tri bazna koraka. Prvi korak za analizu postojećeg stanja RKT-a na području Republike Hrvatske predstavlja odabir RKT-a i prikupljanje ulaznih podataka na njima. Drugi korak obuhvaća simulacijsku obradu prikupljenih podataka za dobivanje što realnijih prethodnih i sadašnjih prometnih parametara na promatranim raskrižjima. Treći i završni korak predstavlja analizu sadašnjeg stanja u odnosu na prethodno stanje prometne sigurnosti, troškove i simulirane pokazatelje učinkovitosti na promatranim RKT-ima koja su zamijenila klasična raskrižja u razini (semaforizirana i nesemaforizirana raskrižja).

3.1. Prikupljanje ulaznih podataka na promatranim raskrižjima

Terenskim istraživanjem “in situ“ na promatranim RKT-ima u urbanim sredinama gradskih područja hrvatskih gradova prikupljeni su potrebni ulazni (prometni i projektni) podatci za daljnji razvoj ovog doktorskog rada. Podatci o prometnim nesrećama i njihovim troškovima prije i poslije izgradnje RKT-a prikupljeni su pismenim upitom Hrvatskom uredu za osiguranje, Ministarstvu unutarnjih poslova i osiguravajućim kućama, a troškovi izgradnje i dodatna projektna dokumentacija ustupanjem dokumentacije investitora (gradova) i projektantskih biroa.

3.1.1. Odabir promatranih raskrižja

Metodom slučajnog odabira odabrano je deset jednotračnih RKT-a u urbanim sredinama gradskih područja Republike Hrvatske koja su zamijenila semaforizirana i nesemaforizirana raskrižja u razini. Lokacije promatranih raskrižja nalaze se u Kutini, Novskoj, Osijeku, Rijeci, Vinkovcima, Vodicama, Splitu, Varaždinu, Zadru i Zagrebu. Na raskrižju ulica Ljudevita Posavskog i Vinkovačke u gradu Kutini nalazi se RKT V_1 koje je zamijenilo nesemaforizirano raskrižje. RKT V_2 koje je zamijenilo semaforizirano raskrižje u gradu Novskoj nalazi se na raskrižju ulica Zagrebačke i državne ceste br. 47. U gradu Osijeku na raskrižju ulica Vinkovačke i Bosutske nalazi se RKT V_3 koje je zamijenilo nesemaforizirano raskrižje. RKT V_4 koje je zamijenilo nesemaforizirano raskrižje nalazi se na raskrižju ulica Radničke i Spinčićeve u gradu Rijeci. Na raskrižju ulica Kneza Mislava i Lapovačke nalazi se RKT V_5 koje je zamijenilo semaforizirano raskrižje u gradu Vinkovcima. U gradu Vodicama na raskrižju ulica Ljudevita Gaja i Ante Kabalera nalazi se RKT V_6 koje je zamijenilo nesemaforizirano raskrižje. Na raskrižju ulica Hercegovačka i Sarajevska u gradu Splitu nalazi

se RKT V₇ koje je zamijenilo nesemaforizirano raskrižje. RKT V₈ koje je zamijenilo nesemaforizirano raskrižje nalazi se na raskrižju ulica Marije Jurić Zagorke i Jalkovečke u gradu Varaždinu. Na raskrižju ulica Nikole Tesle i Benka Benkovića nalazi se RKT V₉ koje je zamijenilo nesemaforizirano raskrižje u gradu Zadru. U gradu Zagrebu na raskrižju ulica Granešinska i Sunekova nalazi se RKT V₁₀ koje je zamijenilo nesemaforizirano raskrižje. Slika 3.1. prikazuje lokaciju odabranih raskrižja u ovom istraživanju. Ovakvim odabirom raskrižja obuhvaćeni su veliki gradovi s različitih područja Republike Hrvatske (Slavonija, Posavina, Zagorje, Kvarner i Dalmacija).



Slika 3.1. Lokacija odabranih kružnih raskrižja

3.1.2. Prometni podatci

Prometni podatci o vršnom satu, intenzitetu, strukturi prometa, kritičnim vremenskim prazninama, intervalima slijeđenja i brzinama (na ulazu, izlazu i kružnom kolniku) na promatranim RKT-ima prikupljani su u dvije faze. U prvoj fazi prometni podatci prikupljeni su u obliku videozapisa korištenjem videokamere, a u drugoj fazi iz snimljenih videozapisa napravljeno je njihovo izdvajanje.

Faza 1 – Videozapisi

Za prikupljanje videozapisa s promatranih RKT-a korištena je sportska videokamera i prijenosna memorija na koju su videozapisi pohranjeni. Videokamera je postavljena na rasvjetni stup okomito na tlo u visini od 2.5 do 3.5 m uz neposrednu blizinu promatranog raskrižja kako bi se snimilo cjelokupno raskrižje (ulazak i izlazak vozila, odnosno tok prometa kroz raskrižje) i izbjeglo nepotrebno ometanje sudionika. Cjelokupna oprema za snimanje videozapisa malih je dimenzija i jednostavna za upotrebu. Tijekom 2013. i 2014. godine na promatranim raskrižjima za vrijeme normalnog radnog dana u tjednu u vremenskom trajanju od dva karakteristična sata za razdoblje jutarnjeg i popodnevnog vremenskog intervala kada se može očekivati veliki intenzitet prometa na raskrižjima snimljeni su videozapisi. Kao karakteristični sati za snimanje videozapisa u jutarnjem intervalu uzeti su 6:00-8:00 h, a u popodnevnom 15:00-17:00 h. Normalan radni dan u ovom istraživanju odnosi se na jedan radni dan u tjednu bez nepogodnih vremenskih uvjeta (vjetar, snijeg, led i magla) i vanjskih čimbenika (posebni društveni događaji u obližnjem lokalitetu raskrižja).

Faza 2 - Izdvajanje prometnih podataka iz videozapisa

U ovoj fazi napravljeno je izdvajanje prometnih podataka o vršnom satu, intenzitetu, strukturi prometa, kritičnim vremenskim prazninama, intervalima slijeđenja i brzinama (na ulazu, izlazu i kružnom kolniku) na RKT-ima iz dvosatnih videozapisa za jutarnji i popodnevni vremenski interval snimanja.

Prometni podatci o vršnom satu, intenzitetu i strukturi izdvojeni su vizualnim pregledom videozapisa uz primjenu besplatnog programskog paketa GOM Playera 2.2 (*GOM LAB. 2014*). Postupak izdvajanja gore navedenih prometnih podataka objašnjen je i prikazan u prilogu 1.

Izdvajanje potrebnih prometnih podataka iz videozapisa za procjenu kritične vremenske praznine, vrijeme slijeđenja i brzinu vozila obavljeno je uz pomoć razvijenog programskog pomagala za potrebe ovog istraživanja. Korišteno programsko pomagalo programirano je u programskom jeziku Python (verzija 2.7.9) i knjižnici (library) Pygame gdje je korištenjem aplikacije VLC media playera omogućeno korisniku gledanje videozapisa i bilježenje posebnih događaja i radnji na promatranom raskrižju primjenom određenih slova na tipkovnici računala. Zabilježene posebne radnje preko tipkovnice posebno su evidentirane u tekstualne baze (ekstenzija .txt) iz kojih je moguće uz primjenu statističkih metoda izdvojiti potrebne prometne podatke. Vrijeme slijeđenja i brzina vozila (na ulazu, u kružnom kolniku i na izlazu) na promatranim RKT-ima izdvojeni su direktnim prikupljanjem podataka iz tekstualnih baza korištenjem aritmetičke sredine i standardne devijacije primjenom programskog paketa Excela dok je kritična vremenska praznina procijenjena na temelju prihvaćenih i odbačenih vremenskih praznina koje su izdvojene iz tekstualnih baza i primjenom statističke metode najveće vjerodostojnosti (*MLE-Maximum Likelihood Method*). Objašnjenje razvijenog programskog pomagala i opis procjene kritične vremenske praznine detaljno je prikazano u prilogu 2. Za izdvajanje navedenih prometnih podataka korišteni su određeni privozi na promatranim RKT-ima. Izdvojeni su samo oni privozi koji imaju najveći broj vozila u vršnom satu kako bi se dobila što realnija procjena kritične vremenske praznine, vremena slijeđenja i brzine vozila. Izdvojeni privozi sažeto su prikazani u tablici 3.1. Ostali privozi i promatrana raskrižja nisu uzeti u obzir uz pretpostavku da su odabrani privozi mjerodavni za cjelokupno raskrižje i ostala promatrana raskrižja.

Tablica 3.1. Izdvojeni privozi za procjenu kritične vremenske praznine, vremena slijeđenja i brzine vozila na promatranim raskrižjima

<i>Grad/Lokacija RKT</i>	<i>Privozi</i>	<i>Vanjski promjer raskrižja D [m]</i>	<i>Vršni sat [h]</i>	<i>Intenzitet prometa na ulaznom toku privoza (pcu/h)</i>	<i>Intenzitet prometa na konfliktnom toku ulaznog privoza (pcu/h)</i>	<i>Datum snimanja videozapisa</i>	<i>Trajanje video zapisa [h]</i>
Rijeka V ₄	S(1)	33	15:00-16:00	483	140	25.10.2014	1h
Vinkovci V ₅	J(3)	36	15:00-16:00	387	504	23.10.2013	1h
Varaždin V ₆	I(2)	29	7:00-8:00	476	433	23.10.2014	1h
Zadar V ₆	J(3)	26	7:00-8:00	695	273	23.7.2013	1h
Zagreb V ₁₀	I(2)	24	15:00-16:00	637	340	29.5.2014	1h

3.1.2.1. Kritične vremenske praznine (t_c)

Rezultati procjene kritične vremenske praznine na promatranim RKT-ima prikazani su u tablici 3.2.

Tablica 3.2. Rezultati procjene kritičnih vremenskih praznina

Kritična vremenska praznina na promatranim RKT-ima u RH

Grad/Lokacija kružnog raskrižja	Privoz	Vanjski promjer raskrižja D [m]	Kritična vremenska praznina			Bootstrap procjena pristranosti		Bootstrap 95% interval
			Uzorak prihvaćenih i odbačenih praznina N	Kritična vremenska praznina $E(t_c)$ (s)	Standardna devijacija SD (t_c)	E(t_c)	SD(t_c)	
Grad			N	$E(t_c)$	SD(t_c)	E(t_c)	SD(t_c)	E(t_c)
Rijeka V ₄	S(1)	33	85	4,13	1,04	0	-0,05	(3.61, 4.66)
Varaždin V ₆	I(2)	29	74	4,68	1,62	-0,02	-0,07	(3.95, 5.41)
Vinkovci V ₅	J(3)	36	80	4,31	0,94	-0,01	-0,05	(3.86, 4.73)
Zadar V ₉	J(3)	26	56	3,81	0,7	0,05	-0,21	(3.31, 4.23)
Zagreb V ₁₀	I(2)	24	102	4,73	1,43	-0,01	-0,06	(4.11, 5.38)
Total			397	4,38	1,18			

Prema tablici 3.2. može se vidjeti da kritična vremenska praznina varira od 3.8 s pa do 4.7 s, s prosječnom vaganom aritmetičkom sredinom od 4.38 s i standardnom devijacijom od 1.18 s. Pristranost procjenitelja očekivanja kritičnih praznina ni za jedno promatrano RKT ne prelazi 0.05 sekunde što je zanemarivo odstupanje, posebno ako se uzme u obzir da preciznost mjerenja praznina putem videosnimke može imati pogrešku i do nekoliko desetinki sekunde. Što se tiče standardne devijacije, četiri RKT-a imaju zanemarive vrijednosti pristranosti dok je kod lokacije RKT-a za Zadar standardna devijacija podcijenjena za, u prosjeku, 0.21 sekundu. Ovo odstupanje može biti rezultat premalog uzorka vozila (56) da bi MLE metoda dala konzistentne procjenitelje. Bootstrap 95-postotni intervali pouzdanosti za očekivanje kritičnih praznina imaju raspone od 0.87 do 1.46 sekundi, s tim da najniža donja granica jednog intervala iznosi 3.31 sekundu, a najviša gornja granica 5.41 sekundu. Veća vrijednost kritične vremenske praznine uočljivija je kod raskrižja koja imaju veći broj vozila u kružnom kolniku što je i logično obzirom da na ulaznom privozu vozila duže čekaju prihvatljivu vremensku prazninu u kružnom kolniku.

3.1.2.2. Vrijeme slijeđenja (t_f)

U tablici 3.3. prikazani su rezultati vremena slijeđenja na promatranim RKT-ima.

Tablica 3.3. Rezultati procjene kritičnih vremenskih praznina

Vremena slijeđenja na promatranim RKT-ima u RH

Grad/Lokacija kružnog raskrižja	Privoz	Vanjski promjer raskrižja D [m]	Vremena slijeđenja		
			Uzorak N	Vremena slijeđenja t_f (s)	Standardna devijacija SD (s)
Rijeka V ₄	S(1)	33	171	2,8	0,85
Varaždin V ₈	I(2)	29	196	2,4	0,84
Vinkovci V ₅	J(3)	36	151	2,6	1,2
Zadar V ₉	J(3)	26	392	3,2	0,8
Zagreb V ₁₀	I(2)	24	249	3,7	0,9
Aritmetička sredina E(tc)/St				2,94/0,91	
Minimum				2,4	
Maksimum				3,7	
95% interval pouzdanosti donja/gornja granica				2,29/3,58	

Iz tablice 3.3. može se vidjeti da vremena slijeđenja variraju od 2.4 s pa do 3.7 s, s prosječnom aritmetičkom sredinom od 2.94 s i standardnom devijacijom od 0.91 s. Najniža donja granica jednog intervala pouzdanosti (95%) za vremena slijeđenja iznosi 2.29 sekundi, a najviša gornja granica 3.58 sekundi.

3.1.2.2. Brzine vozila (na ulazu, izlazu i u kružnom kolniku)

Brzina vozila kroz RKT-e smatra se jednim od najvažnijih parametara pri projektiranju i oblikovanju RKT-a. Postizanje odgovarajuće brzine kroz RKT-e smanjuje broj prometnih nesreća, a povećava propusnu moć raskrižja. U pravilu, brzina na RKT-u određena je prilikom projektiranja iz prihvatljivih projektnih smjernica [28, 29, 60]. U tablici 3.4. prikazane su prosječne vrijednosti brzina vozila na ulazu, u kružnom kolniku i na izlazu iz promatranih

RKT-a. Iz tablice 3.4 vidljivo je da brzine vozila variraju od 19.8 km/h pa do 41.66 km/h ovisno o području promatranja (ulaz, kružni kolnik i izlaz iz raskrižja). Prosječna vrijednost brzine vozila na ulazu iznosi 22.85 km/h, u kružnom kolniku 29.47 km/h dok na izlazu iz raskrižja iznosi 38.97 km/h.

Tablica 3.4. Procjena brzina vozila na promatranim RKT-ima u RH

Brzine vozila na promatranim RKT-ima u RH						
Grad/Lokacija kružnog raskrižja	Privoz	Vanjski promjer raskrižja D [m]	Uzorak N	Brzine vozila		
				Na ulasku u raskrižje (km/h)	U kružnom kolniku (km/h)	Na izlasku iz raskrižja (km/h)
Rijeka V ₄	S(1)	33	341	26,63	33,2	41,44
Varaždin V ₈	I(2)	29	344	19,8	26,81	32,41
Vinkovci V ₅	J(3)	36	311	21,34	27,5	41,66
Zadar V ₉	J(3)	26	504	25,86	31,87	40,78
Zagreb V ₁₀	I(2)	24	453	20,63	27,86	38,56
Aritmetička sredina				22,85	29,47	38,97
Minimum				19,8	26,81	32,41
Maksimum				26,63	33,2	41,66

3.1.3. Projektna dokumentacija

Projektna dokumentacija prethodnog i sadašnjeg stanja prikupljena je pismenim upitom investitorima (gradovima) i projektantskim biroima, a pretežno je na traženi upit dostavljena u digitalnom obliku (ekstenzija .dwg). Terenskim istraživanjem “in situ“ na lokacijama odabranih raskrižja napravljen je uvid u sadašnje činjenično stanje i usporedba s prikupljenom projektnom dokumentacijom. Prikupljeni projektno – oblikovni elementi promatranih kružnih raskrižja detaljno su prikazani u tablici 3.5. i korišteni su u daljnjim analizama ovog istraživanja. Objašnjenje projektno-oblikovnih elemenata RKT-a dano je u prilogu 3.

Tablica 3.5. Projektno-oblikovni elementi promatranih raskrižja

Grad/Lokacija kružnog raskrižja	Privozi	Vanjski promjer raskrižja D	Vanjski/Unutarnji polumjer raskrižja (Rv) i (Ru)	Širina kružnog kolničkog traka (u)	Širina ulaza (eu) / izlaza (ei)	Ulazni polumjer (Rul) / izlazni polumjer (Riz)	Širina ulaznog (up) / izlaznog prometnog traka (ip)	Ulazni kut (Φ)
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[$^{\circ}$]
Kutina V ₁	S(1)	27.0	13.5/6.5	7.0	5.0/3.5	12.0/12.0	3.5/3.0	25
	I(2)	27.0	13.5/6.5	7.0	5.0/5.0	12.0/15.0	3.0/3.0	40
	J(3)	27.0	13.5/6.5	7.0	4.0/4.0	15.0/12.0	3.0/3.0	20
	Z(4)	27.0	13.5/6.5	7.0	4.0/3.0	12.0/12.0	3.0/3.0	40
Novska V ₂	S(1)	37.0	18.5/11.0	7.5	5.0/5.0	12.0/17.0	3.0/3.0	42
	I(2)	37.0	18.5/11.0	7.5	4.0/5.0	17.0/12.0	3.0/3.0	21
	J(3)	37.0	18.5/11.0	7.5	5.0/4.5	12.0/15.0	4.0/3.5	31
	Z(4)	37.0	18.5/11.0	7.5	4.0/4.5	15.0/12.0	3.0/3.0	30
Osijek V ₃	S(1)	30.0	15.0/8.0	7.0	4.5/5.0	20.0/12.0	3.5/3.5	40
	I(2)	30.0	15.0/8.0	7.0	4.0/3.5	12.0/15.0	3.5/3.5	48
	J(3)	30.0	15.0/8.0	7.0	4.0/5.0	15.0/10.0	4.0/4.0	22
	Z(4)	30.0	15.0/8.0	7.0	3.0/3.0	10.0/20.0	3.0/3.0	45
Rijeka V ₄	S(1)	33.0	17.0/12.0	5.0	4.0/6.0	12.0/16.1	3.5/3.5	25
	I(2)	33.0	17.0/12.0	5.0	3.5/3.5	16.1/21.0	3.5/3.5	20
	J(3)	33.0	17.0/12.0	5.0	5.5/4.5	21.0/25.0	3.5/3.5	40
	Z(4)	33.0	17.0/12.0	5.0	3.0/3.0	25.0/12.0	3.0/3.0	15
Vinkovci V ₅	S(1)	36.0	18.0/10.0	8.0	3.43/3.63	12.0/14.0	3.0/3.0	40
	I(2)	36.0	18.0/10.0	8.0	3.47/5.54	12.0/14.0	3.0/3.0	30
	J(3)	36.0	18.0/10.0	8.0	4.95/3.64	12.0/15.0	3.0/3.0	28
	Z(4)	36.0	18.0/10.0	8.0	4.43/4.55	12.0/14.0	3.5/3.5	28
Vodice V ₆	S(1)	27.0	13.5/7.0	6.5	5.0/4.0	15.9/11.9	3.0/3.0	25
	I(2)	27.0	13.5/7.0	6.5	4.0/4.0	11.9/18.4	3.0/3.0	40
	J(3)	27.0	13.5/7.0	6.5	3.0/6.0	18.4/12.0	3.0/3.0	40
	Z(4)	27.0	13.5/7.0	6.5	5.5/4.4	16.1/15.9	3.0/3.0	20
Split V ₇	S(1)	28.0	14.0/6.5	7.5	4.0/5.0	12.0/12.0	3.5/3.5	20
	I(2)	28.0	14.0/6.5	7.5	4.5/4.0	12.0/15.0	3.5/3.5	38
	J(3)	28.0	14.0/6.5	7.5	4.0/5.0	15.0/12.0	3.5/3.5	26
	Z(4)	28.0	14.0/6.5	7.5	4.0/4.0	12.0/12.0	3.5/3.5	27
Varaždin V ₈	S(1)	29.0	14.5/8.0	6.5	4.0/4.3	21.0/18.0	3.5/3.7	37
	I(2)	29.0	14.5/8.0	6.5	4.0/4.3	18.0/15.0	4.1/4.4	40
	J(3)	29.0	14.5/8.0	6.5	4.0/4.3	15.5/17.5	3.5/3.6	33
	Z(4)	29.0	14.5/8.0	6.5	4.0/4.3	17.5/21.0	3.25/3.25	25
Zadar V ₉	S(1)	26.0	13.0/8.0	5.0	4.0/4.5	12.0/15.0	3.5/3.5	39
	I(2)	26.0	13.0/8.0	5.0	4.0/5.0	15.0/12.0	3.5/3.5	28
	J(3)	26.0	13.0/8.0	5.0	3.5/4.5	12.0/15.0	3.5/3.5	25
	Z(4)	26.0	13.0/8.0	5.0	4.0/4.5	15.0/12.0	3.5/3.5	29
Zagreb V ₁₀	S(1)	24.0	12.0/5.0	7.0	3.5/3.5	12.0/14.0	3.5/3.5	40
	I(2)	24.0	12.0/5.0	7.0	2.75/2.75	12.0/14.0	2.75/2.75	40
	J(3)	24.0	12.0/5.0	7.0	3.5/3.5	12.0/14.0	3.5/3.5	32
	Z(4)	24.0	12.0/5.0	7.0	3.5/3.5	12.0/14.0	3.5/3.5	23
Min	/	24.0	12.0/5.0	8.0	2.75/2.75	10.0/10.0	2.75/2.75	15
Max	/	37.0	18.5/11.0	5.0	5.5/6.0	25.0/25.0	4.1/4.4	48

3.1.4. Troškovi (investitora i korisnika) na promatranim raskrižjima

Na promatranim raskrižjima podatci o troškovima njihove izgradnje i održavanja prikupljeni su od strane investitora (gradova), projektantskih biroa i poduzeća za ceste na temelju iskustvenih procjena i ispostavljenih računa za obavljene radove, a podatci o broju prometnih nesreća i nastalim troškovima na njima (materijalni i nematerijalni troškovi) prikupljeni su od Hrvatskog ureda za osiguranje, Ministarstva unutarnjih poslova i osiguravajućih kuća.

3.1.4.1. Troškovi investitora

U tablici 3.6. za promatrana RKT prikazani su troškovi investitora na temelju iskustvenih procjena (za pojedina raskrižja nisu bili dostupni troškovi izgradnje) i ispostavljenih računa za obavljene radove.

Tablica 3.6. Troškovi izgradnje promatranih raskrižja

<i>Grad/Lokacija kružnog raskrižja</i>	<i>Iskustvena procjena (kn)</i>	<i>Računi izgradnje (kn)</i>
Kutina V ₁	1.800.000,00	
Novska V ₂		1.234.301,00
Osijek V ₃	2.000.000,00	
Rijeka V ₄	2.500.000,00	
Vinkovci V ₅		2.592.540,56
Vodice V ₆	2.500.000,00	
Split V ₇	2.000.000,00	
Varaždin V ₈	2.000.000,00	
Zadar V ₉		5.300.000,00
Zagreb V ₁₀		1.000.000,00
<i>Ukupno kn</i>	22.926.841,56	
<i>MIN kn</i>	1.000.000,00	
<i>MAX kn</i>	5.300.000,00	

Iz tablice 3.6. vidljivo je da troškovi izgradnje odnosno rekonstrukcije klasičnih i semaforiziranih raskrižja u RKT variraju od mjesta do mjesta i o veličini raskrižja. Za promatrana RKT na tražene upite nisu dobiveni nikakvi odgovori vezani za tekuće troškove i troškove njihovih održavanja. Za daljnji tijek ovog istraživanja uzeti su u obzir tekući troškovi i troškovi održavanja iz dosadašnjih provedenih istraživanja u svijetu [67, 68] (vidi poglavlje 2.).

3.1.4.2. Troškovi korisnika (društva) na promatranim raskrižjima

Zbog nedostatka jedinstvene baze podataka o evidencijama prometnih nesreća i ozljeda u Republici Hrvatskoj i nepovezanosti Ministarstva unutarnjih poslova i osiguravajućih kuća, evidencije o prometnim nesrećama i ozljedama prikupljane su od Hrvatskog ureda za osiguranje, Ministarstva unutarnjih poslova i osiguravajućih kuća terenskim istraživanjem i na traženi upit. Evidencija broja prometnih nesreća na promatranim raskrižjima u analiziranom razdoblju od tri godine prije izgradnje i poslije izgradnje te u vrijeme njihove izgradnje prikazana je u tablici 3.7. Od deset promatranih raskrižja prikupljeni su podatci za samo njih osam dok za ostala dva raskrižja nisu prikupljeni nikakvi podatci iz terenskog istraživanja i traženih upita. Promatrana raskrižja za koja nisu prikupljene evidencije o prometnim nesrećama i ozljedama su raskrižja koja se nalaze na lokacijama V₂ - Novska i V₄ – Rijeka. Pretpostavka je da se prometne nesreće na njima nisu događale ili nisu bile evidentirane u Ministarstvu unutarnjih poslova i osiguravajućim kućama.

Tablica 3.7. Prikaz broja prometnih nesreća prije i poslije izgradnje RKT-a na promatranim lokacijama

LOKACIJA	PRIJE (TRI GODINE)				POSLIJE (TRI GODINE)			
	M	OZLJEDE		Σ	M	OZLJEDE		Σ
		L	T	UKUPNO		L	T	UKUPNO
V ₁	1	1	0	2	0	0	0	0
V ₃	4	1	1	6	8	1	0	9
V ₅	4	3	1	8	0	0	0	0
V ₆	1	0	0	1	0	0	0	0
V ₇	5	2	1	8	0	0	0	0
V ₈	7	3	5	15	1	1	0	2
V ₉	12	8	2	22	1	0	0	1
V ₁₀	9	3	1	13	10	1	1	11
Σ	43	21	11	75	20	3	1	23

Značenje: M-materijalna šteta, L-lak tjelesna ozljeda, T- teža tjelesna ozljeda

Troškovi prometnih nesreća na promatranim raskrižjima prikupljeni su terenskim istraživanjem osiguravajućih kuća na temelju isplaćenih iznosa (vidi tablicu 3.8.) prema oštećenima.

Tablica 3.8. Troškovi materijalnih i nematerijalnih šteta na promatranim raskrižjima

Troškovi šteta na promatranim raskrižjima				
LOKACIJA	PRIJE (TRI GODINE)		POSLIJE (TRI GODINE)	
	MATERIJALNA ŠTETA	NEMATERIJALNA ŠTETA	MATERIJALNA ŠTETA	NEMATERIJALNA ŠTETA
Kutina V ₁	25.085,68 kn	11.530,00 kn	0,00 kn	0,00 kn
Osijek V ₃	4.000,00 kn	0,00 kn	20.476,00 kn	13.809,00 kn
Vinkovci V ₅	61.984,33 kn	35.624,02 kn	0,00 kn	0,00 kn
Vodice V ₆	15.488,53 kn	0,00 kn	0,00 kn	0,00 kn
Split V ₇	55.992,48 kn	77.209,00 kn	0,00 kn	0,00 kn
Varaždin V ₈	101.712,29 kn	116.420,00 kn	4.015,00 kn	58.690,00 kn
Zadar V ₉	297.804,10 kn	48.582,04 kn	0,00 kn	0,00 kn
Zagreb V ₁₀	36.252,95 kn	89.680,02 kn	30.989,00 kn	50.745,00 kn
Σ	598.320,36 kn	379.045,08 kn	55.480,00 kn	123.244,00 kn
Min	4.000,00 kn	0,00 kn	0,00 kn	0,00 kn
Max	297.804,10 kn	116.420,00 kn	30.989,00 kn	58.690,00 kn

3.2. Simulacijska obrada prikupljenih podataka

Za potrebe obrade prikupljenih podataka i dobivanje pokazatelja učinkovitosti za prethodna i sadašnja stanja na promatranim raskrižjima korišten je simulacijski programski paket aaSIDRA (Signalized and unsignalized Intersection Design and Research Aid) na temelju dosadašnjih znanstvenih istraživanja [32, 34]. Prethodna i sadašnja stanja na promatranim raskrižjima modelirana su u odabranom simulacijskim programskom paketu, a dobiveni rezultati poslužili su za statističke analize odnosa prethodnog i sadašnjeg stanja na njima.

3.2.1. Simulacijski programski paket aaSIDRA

Primjenom simulacijskog programskog paketa aaSIDRA svako prethodno i sadašnje stanje raskrižja modelirano je po sljedećim baznim koracima.

Korak 1: Kreiranje oblika (izgleda) raskrižja i kretanja prometnog toka

U prvom baznom koraku za modeliranje promatranih raskrižja u simulacijskom modelu određuje se oblik raskrižja, tj. broj ulaznih/izlaznih privoza i broj prometnih trakova na njima. Definira se pravilo desne strane kretanja, tip prometnog traka i mogućnost kretanja prometnog toka (ravno, lijevo, desno i polukružno). Nakon definiranja oblika raskrižja, pravila i mogućnosti kretanja prometnog toka potrebno je projektno-oblikovne elemente raskrižja (promjer, širina kružnog prometnog traka i prometnog otoka, kut ulaska itd...) u modelu

uskладiti i postaviti prema stvarnim prikupljenim podacima na promatranim raskrižjima (vidi tablicu 3.5.). Za modeliranje prvog koraka koriste se prikupljeni podaci o obliku raskrižja iz terenskog istraživanja.

Korak 2: Intenzitet prometa (količina i struktura prometnog toka)

U drugom baznom koraku za modeliranje promatranih raskrižja u simulacijskom programskom paketu unose se prometni podaci o intenzitetu prometa, smjeru kretanja i strukturi prometnog toka za svaki prometni trak zasebno (vidi prilog 1.). Prometni podaci za promatrana RKT prikupljeni su terenskim istraživanjem dok su za prethodna stanja (nesemaforizirana i semaforizirana) raskrižja korišteni isti prometni podaci kao i kod RKT-a.

Korak 3: Kalibracija modela (vremenske praznine, brzine kretanja vozila)

Treći bazni korak predstavlja ujedno i najvažniji bazni korak za modeliranje promatranih raskrižja kako bi se u simulacijskom modelu mogli prilagoditi postojeći prometni uvjeti na promatranim raskrižjima sa svrhom da model bude identičan stvarnim prometnim uvjetima na raskrižju. Za potrebe prilagodbe/kalibracije postojećih prometnih uvjeta na promatranim raskrižjima u simulacijskom modelu raskrižja potrebno je postaviti kritičnu vremensku prazninu, vrijeme slijeđenja i prosječnu brzinu kretanja vozila na raskrižju te ih prilagoditi u simulacijskom modelu. Kritična vremenska praznina, vrijeme slijeđenja i brzine vozila za kružna raskrižja preuzeti su iz tablica 3.2., 3.3., i 3.4. dok su vrijednosti za nesemaforizirana raskrižja na području Republike Hrvatske preuzete iz istraživanja autora Cvitanića [74]. Istraživanja za semaforizirana raskrižja na području Republike Hrvatske nisu provedena, stoga su za potrebe ovog istraživanja na semaforiziranim raskrižjima preuzete vrijednosti iz svjetskih istraživanja [5, 75, 76, 77] uz pretpostavku da vrijede na području Republike Hrvatske.

Korak 4: Postavke modela

U četvrtom i završnom baznom koraku simulacijskog modela promatranih raskrižja određene su postavke modela o učinkovitosti raskrižja. Za potrebe ovog doktorskog rada odabrani izlazni pokazatelji učinkovitosti za operativnu analizu promatranih raskrižja su: propusna moć raskrižja po metodi HCM 2010, stupanj zasićenja (X), duljina repa čekanja (Q_{95}), razina usluge (A,B,C,D,E,F) i prosječno vrijeme čekanja/zastoja (d_s), te svi štetni ispušni plinovi koji su mogući u simulacijskom modelu (CO, CO₂, NO_x, CH). Cijene troškova postavljene su prema istraživanjima [66, 67, 68] pri čemu je cijena goriva u simulacijskom modelu

promatranog raskrižja određena po novčanoj vrijednosti od 1.0 € za litru potrošenog goriva, a troškovi vremena čekanja po novčanoj vrijednosti od 10 € po nepotrebno potrošenom satu.

3.2.2. Simulacijski rezultati

Simulacijski izlazni rezultati programskog paketa aaSidra za operativnu analizu učinkovitosti promatranih raskrižja za prethodna stanja raskrižja prikazani su u tablici 3.9., a za sadašnja stanja raskrižja u tablici 3.10.

Tablica 3.9. Simulacijski rezultati za prethodno stanje

Sažetak simulacija za prethodno stanje										
Analiza pokazatelja za vršni sat	Kutina	Novska	Osijek	Rijeka	Vinkovci	Vodice	Split	Varaždin	Zadar	Zagreb
	Prijšašnje stanje									
Prometna potražnja (ukupna) voz/h	739,00	546,00	1523,00	1395,00	1341,00	597,00	1613,00	1283,00	1167,00	1667,00
Postotak teških teretnih vozila %	7,50	10,30	4,60	1,20	8,70	3,80	2,80	1,40	9,90	6,70
Stupanj zasićenja x [-]	0,24	0,48	0,65	0,77	0,44	0,25	0,98	0,87	0,73	0,84
Efektivni kapacitet raskrižja C [voz/h]	3029,00	1147,00	2341,00	1801,00	3084,00	2417,00	1644,00	1473,00	1587,00	1992,00
Kontrola kašnjenja (prosječna) ds [s]	4,60	12,30	9,90	13,80	18,60	3,60	15,00	22,90	13,00	15,50
Razina prometne usluge raskrižja (LOS)	LOS A	LOS B	LOS A	LOS B	LOS C	LOS A	LOS C	LOS C	LOS B	LOS B
Duljina repa čekanja Q95%	8,80	42,40	33,80	57,90	63,10	8,40	62,10	108,30	42,30	82,10
Trošak (ukupni) Eur/h	90,05	139,05	181,74	162,17	226,53	54,57	214,60	194,61	154,16	227,62
Potrošnja goriva (ukupno) L/h	27,80	36,30	52,80	44,90	76,90	15,80	58,00	49,30	46,00	66,50
Ugljični dioksid CO ₂ (ukupno) kg/h	69,80	91,10	132,30	112,40	193,00	39,60	145,30	123,40	115,50	166,70
Ugljikovodici HC (ukupno)kg/h	0,11	0,14	0,23	0,20	0,31	0,07	0,26	0,23	0,19	0,29
Ugljični monoksid (ukupno)kg/h	4,98	4,56	9,62	8,24	18,11	2,52	10,06	8,57	8,48	12,98
Dušični oksidi NOx (ukupno) kg/h	0,15	0,14	0,28	0,23	0,55	0,08	0,29	0,24	0,25	0,37
Analiza pokazatelja na godišnjoj razini										
Prometna potražnja (ukupna) voz/g	354695,00	262232,00	731116,00	669474,00	643705,00	286484,00	774063,00	615916,00	560337,00	800337,00
Kašnjenje voz-h/g	450,00	898,00	2007,00	2563,00	3324,00	286,00	3225,00	3925,00	2016,00	3437,00
Vrijeme putovanja voz-h/g	3193,00	5656,00	6806,00	6245,00	7306,00	2046,00	8469,00	7952,00	5578,00	8412,00
Trošak Eur/g	43222,00	66743,00	87234,00	77840,00	108734,00	26192,00	103014,00	93414,00	73998,00	109257,00
Potrošnja goriva L/g	13361,00	17403,00	25355,00	21569,00	36928,00	7592,00	27857,00	23686,00	22075,00	31920,00
Ugljični dioksid CO ₂ kg/g	33506,00	43706,00	63504,00	53953,00	92655,00	19006,00	69726,00	59249,00	55433,00	80030,00
Ugljikovodici HC kg/g	54,00	67,00	109,00	98,00	150,00	31,00	125,00	112,00	92,00	139,00
Ugljični monoksidkg/g	2390,00	2190,00	4620,00	3956,00	8693,00	1209,00	4828,00	4116,00	4070,00	6231,00
Dušični oksidi NOx kg/g	70,00	66,00	132,00	110,00	265,00	36,00	138,00	114,00	118,00	175,00

Razina uslužnosti (LOS) Metoda: Delay & v/c (HCM 2010).

SIDRA model

Tablica 3.10. Simulacijski rezultati sadašnjeg stanja

Sažetak simulacija za sadašnje stanje										
Analiza vršnog sata	Kutina	Novska	Osijek	Rijeka	Vinkovci	Vodice	Split	Varaždin	Zadar	Zagreb
	Sadašnje stanje (kružna raskrižja)									
Prometna potražnja (ukupna) veh/h	739,00	546,00	1523,00	1395,00	1341,00	597,00	1613,00	1283,00	1167,00	1667,00
Postotak teških teretnih vozila %	7,50	10,30	4,60	1,20	8,70	3,80	2,80	1,40	9,90	6,70
Stupanj zasićenja x [-]	0,28	0,26	0,57	0,57	0,47	0,20	0,67	0,44	0,55	0,79
Efektivni kapacitet raskrižja C [veh/h]	2657,00	2141,00	2674,00	2432,00	2836,00	2877,00	2392,00	2864,00	2104,00	2115,00
Kontrola kašnjenja ds (prosječna) [s]	5,70	5,20	9,80	10,40	10,20	5,40	12,10	8,10	8,70	14,90
Razina prometne usluge raskrižja (LOS)	LOS A	LOS A	LOS A	LOS B	LOS B	LOS B	LOS B	LOS B	LOS B	LOS B
Duljina repa čekanja Q95%	9,30	9,10	28,40	26,70	17,40	6,40	41,10	17,60	26,60	78,10
Trošak (ukupni) Eur/h	93,78	52,04	182,09	164,73	198,90	61,72	208,13	142,18	140,51	229,86
Potrošnja goriva (ukupno) L/h	28,30	16,10	51,80	44,70	69,90	18,00	57,70	39,70	42,90	64,90
Ugljični dioksid CO ₂ (ukupno) kg/h	71,10	40,50	129,80	111,70	175,40	45,00	144,30	99,20	107,70	162,80
Ugljikovodici HC (ukupno)kg/h	0,11	0,06	0,22	0,20	0,27	0,08	0,26	0,18	0,17	0,28
Ugljični monoksid (ukupno)kg/h	4,91	3,16	8,96	7,58	16,01	3,11	10,29	6,96	7,75	11,70
Dušični oksidi NOx (ukupno) kg/h	0,15	0,09	0,26	0,22	0,50	0,09	0,29	0,20	0,23	0,34
Analiza pokazatelja na godišnjoj razini										
Prometna potražnja (ukupna) voz/g	354695,00	262232,00	731116,00	669474,00	644210,00	286484,00	774063,00	615916,00	560842,00	807411,00
Kašnjenje voz-h/g	560,00	382,00	1994,00	1934,00	1833,00	394,00	2608,00	1385,00	1358,00	3335,00
Vrijeme putovanja voz-h/g	3389,00	1832,00	6907,00	6499,00	6144,00	2302,00	8062,00	5498,00	4994,00	8738,00
Trošak Eur/g	45015,00	24979,00	87405,00	79072,00	95474,00	29627,00	99901,00	68246,00	67446,00	110334,00
Potrošnja goriva L/g	13602,00	7740,00	24878,00	21437,00	33551,00	8631,00	27673,00	19039,00	20588,00	31174,00
Ugljični dioksid CO ₂ kg/g	34112,00	19443,00	62312,00	53621,00	84182,00	21612,00	69264,00	47625,00	51680,00	78145,00
Ugljikovodici HC kg/g	55,00	31,00	106,00	95,00	130,00	36,00	123,00	84,00	83,00	134,00
Ugljični monoksidkg/g	2358,00	1519,00	4302,00	3640,00	7684,00	1495,00	4939,00	3340,00	3718,00	5617,00
Dušični oksidi NOx kg/g	70,00	43,00	126,00	105,00	240,00	44,00	140,00	96,00	110,00	162,00

Razina uslužnosti (LOS) Metoda: Delay & v/c (HCM 2010).

SIDRA model

3.3. Analiza promatranih raskrižja

Na osnovi prikupljenih i simuliranih podataka napravljena je usporedba sadašnjeg stanja s osvrtnom na prethodna stanja prometne sigurnosti, pokazatelje učinkovitosti i troškove na RKT-ima koji su zamijenili nesemaforizirana i semaforizirana raskrižja u razini korištenjem statističkih analiza. Statističke analize provedene su upotrebom određenih statističkih testova koji su korišteni za potrebe ovog istraživanja. Prva bazna pretpostavka za odabir određenog statističkog testa je ispitivanje normalnosti distribucije prikupljenih i dobivenih podataka. U nastavku slijedi opis korištenih statističkih testova za usporedbu prethodnog i sadašnjeg stanja na promatranim raskrižjima.

Prvi test je *Shapiro-Wilk test* koji se koristi za ispitivanje normalnosti distribucije malog broja uzorka, stoga je kod njega razina značajnosti postavljena na vrijednost $\alpha = 0.05$ (kad bi se postavila razina značajnosti $\alpha = 0.01$ samo najnenormalniji uzorci bili bi odbačeni što nije dobro za analizu) kako bi se smanjila mogućnost lažnog odbacivanja nul hipoteze (H_0 : “uzorak je normalno distribuiran“). Test se odbacuje ako je p-vrijednost, tj. vjerojatnost $p < \alpha$.

Drugi test je *T-test* (parametrijski) uparenih uzoraka koji se koristi za usporedbu (prije i poslije) dva različita, ali uparena seta podataka (varijabli) koji su normalno distribuirani. Nul hipoteza ($H_0: \mu_1 = \mu_2$) glasi da je prethodno stanje jednako sadašnjem stanju, odnosno da je srednja vrijednost prethodnog i sadašnjeg stanja jednaka. Razina značajnosti postavljena je na vrijednost $\alpha = 0.05$. Test se odbacuje ako je p-vrijednost, tj. vjerojatnost $p < \alpha$.

Treći test je *Wilcoxonov test* (neparametrijski test) koji se primjenjuje za usporedbu (prije i poslije) dva različita, ali uparena seta podataka (varijabli) koji nisu normalno distribuirani. Nul hipoteza ($H_0: m_1 = m_2$) glasi da je prethodno stanje jednako odnosno da je medijan razlika između prethodnog i sadašnjeg stanja jednak nuli (0). Razina značajnosti postavljena je na vrijednost $\alpha = 0.05$. Test se odbacuje ako je p-vrijednost, tj. vjerojatnost $p < \alpha$.

3.3.1. Analiza prometne sigurnosti

Statistička analiza broja prometnih nesreća prije i nakon izgradnje RKT-a korištena je kako bi se analizirala prometna sigurnost na njima u svrhu određivanja troškova prometnih nesreća. Za dokazivanje statističke značajnosti prije i poslije izgradnje RKT-a u smanjenju broja prometnih nesreća korišten je (parametrijski) dvosmjerni statistički t-test (nakon provjere

normalnosti distribucije) za uparene uzorke. Statističkim t-testom uspoređuju se dva različita, ali uparena seta podataka (varijabli) prije i poslije izgradnje RKT-a u vremenskom periodu od tri godine prije i tri godine poslije izgradnje raskrižja kako bi se statističkim dokazivanjem dokazala razlika (značajnost) između dva seta podataka. Dostupni prikupljeni podatci o broju prometnih nesreća na promatranim raskrižjima odnose se na osam RKT-a za koja su bili dostupni podatci o broju prometnih nesreća. Veličina uzorka za analizu broja prometnih nesreća na raskrižjima bila je $n = 16$, po jedna vrijednost za broj nesreća koje su se dogodile tijekom tri godine, neposredno prije i nakon izgradnje RKT-a (vidi tablicu 3.11).

Tablica 3.11. Broj prometnih nesreća u promatranom vremenskom periodu na promatranim raskrižjima

LOKACIJA	PRIJE (3.god.)	POSLIJE (3.god.)	RAZLIKA	% RAZLIKA
	BROJ NESREĆA	BROJ NESREĆA		
V ₁	2	0	-2	-100,00%
V ₃	6	9	3	50,00%
V ₅	8	0	-8	-100,00%
V ₆	1	0	-1	-100,00%
V ₇	8	0	-8	-100,00%
V ₈	15	2	-13	-86,67%
V ₉	22	1	-21	-95,45%
V ₁₀	13	11	-2	-15,38%
Σ	75	23	-52	-69,33%

U tablici 3.12. prikazan je rezultat provedenog t-testa. Iz provedenog t-testa ($t(7) = 2.379$, $p < 0.05$) zaključuje se kako postoji značajno smanjenje broja prometnih nesreća na RKT-u u odnosu na broj nesreća koje su se na istom raskrižju dogodile prije rekonstrukcije raskrižja.

Tablica 3.12. Rezultati t testa za broj prometnih nesreća prije i poslije izgradnje promatranih RKT-a (SPSS-program)

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	Interval of the				
					Lower				Upper
Pair 1	Prije - Poslije	6,500	7,728	2,732	,040	12,960	2,379	7	,049

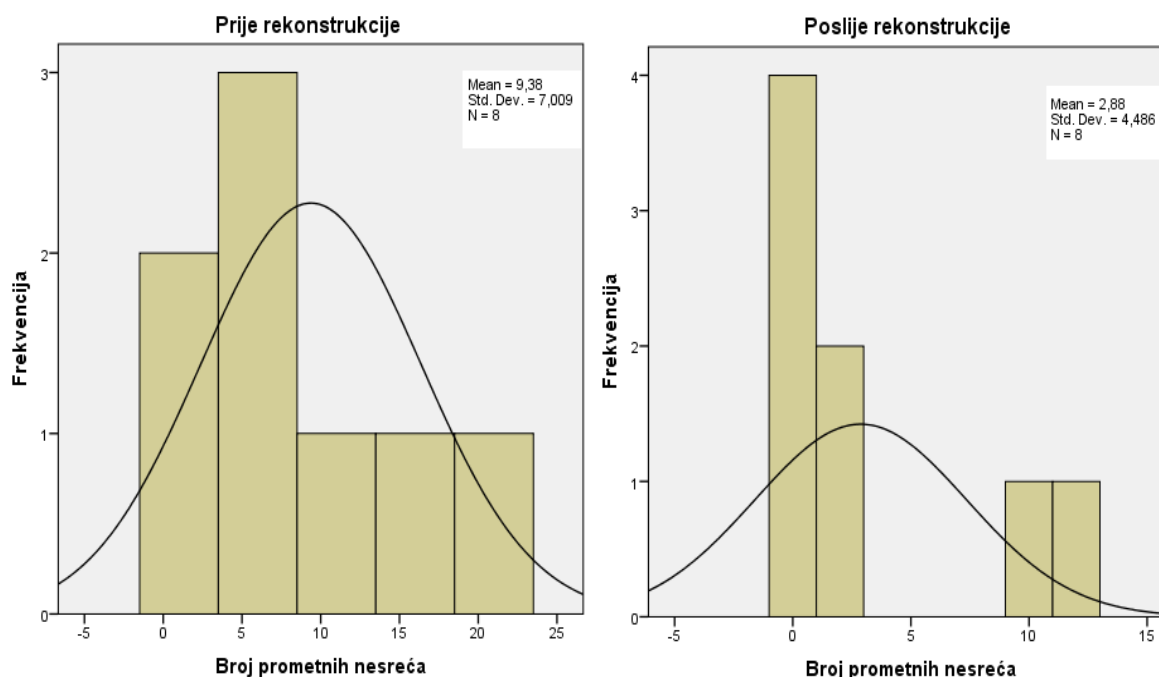
Za detaljnu analizu broja prometnih nesreća prije i poslije izgradnje RKT-a u promatranom vremenskom periodu korištena je i analiza deskriptivnom statistikom (frekvencijska distribucija, centralna tendencija i disperzija). U tablici 3.13. prikazana je deskriptivna

statistika broja prometnih nesreća prije i poslije izgradnje. Iz navedene tablice vidljivo je da svi pokazatelji deskriptivne statistike pokazuju niske vrijednosti za RKT-a u odnosu na prethodna stanja raskrižja. Usporedba broja nesreća prije ($M = 9.37$, $SD = 7.0$) i nakon ($M = 2.87$, $SD = 4.48$) izgradnje RKT-a pokazala je prosječno smanjenje broja nesreća za 6.5. Također je i standardna devijacija broja nesreća manja nakon izgradnje, što u slučaju ovog uzorka nije iznenađujuće kad se uočava da kod čak četiri raskrižja, nakon izgradnje unutar tri godine, nije bilo zabilježenih prometnih nesreća. Ipak, zbog malog uzorka i relativno malog broja nesreća i ozljeda kod nekih raskrižja prije izgradnje RKT-a, ne može se sa sigurnošću potvrditi da je manja raspršenost broja nesreća i ozljeda reprezentativna, odnosno manje raspršenje koje je zabilježeno kod kružnih raskrižja u uzorku može dijelom biti rezultat donje granice broj nesreća (0). Iz istog razloga bi prosječno smanjenje broja nesreća moglo biti podcijenjeno.

Tablica 3.13. Deskriptivna statistika broja prometnih nesreća prije i poslije izgradnje promatranih RKT-a (SPSS-program)

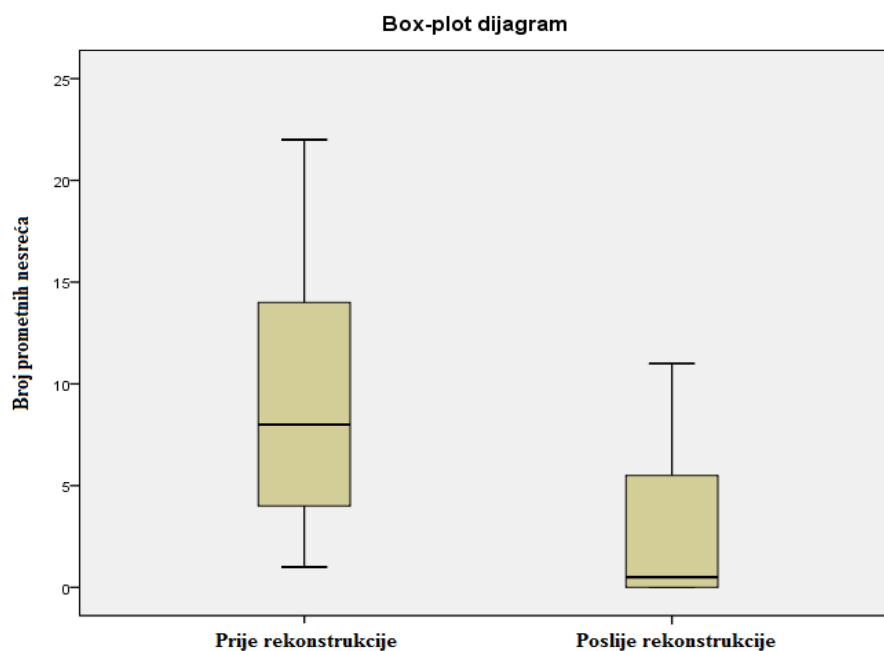
Statistic		Prije	Poslije
Mean		9.37	2.87
95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	3.515	-0.875
	Upper Bound	15.234	6.6254
5% Trimmed Mean		9.375	2.875
Median		8.0	0.50
Variance		49.12500	20.12500
Std. Deviation		7.0089	4.4860
Std. Error Mean		2.4780	1.5860
Minimum		1	0
Maximum		22	11
Range		21	11

Na grafikonu 3.1. prikazana je frekvencijska distribucija broja prometnih nesreća prije i poslije izgradnje RKT-a. Iz navedenog grafikona vidljivo je kako je nakon izgradnje smanjen broj prometnih nesreća koje se događaju pri nižim frekvencijama.



Grafikon 3.1. Frekvencijska distribucija broja prometnih nesreća prije i poslije izgradnje promatranih RKT-a (SPSS-program)

Centralna tendencija i disperzija (raspršenost podataka) broja prometnih nesreća prije i poslije izgradnje RKT-a prikazani su kroz box-plot dijagram na dijagramu 3.1. Središnja vrijednost prikazana je kao središnja linija koja prolazi kroz pravokutnik i prikazuje mjeru središnje tendencije - median dok duljina pravokutnika predstavlja interkvartilni raspon broja prometnih nesreća od donjeg do gornjeg kvartila. Krajnje donje i gornje horizontalne linije predstavljaju najmanji i najveći podatak koji se nalazi unutar 1.5 puta interkvartilnog raspona, gledajući od donjeg odnosno gornjeg kvartila. Sve vrijednosti koje odudaraju od navedenih granica prikazane su posebno (*outlierima*). Iz navedene slike vidljivo je da su srednje vrijednosti broja prometnih nesreća prije izgradnje RKT-a znatno veće, a vidljiva je i raspršenost prikupljenih podataka prije izgradnje RKT-a.



Dijagram 3.1. Box-plot dijagram broja prometnih nesreća prije i poslije rekonstrukcije RKT-a (SPSS-program)

Promatrana RKT koja su zamijenila prethodna klasična raskrižja u razini (semaforizirana i nesemaforizirana) pridonijela su postotnim uštedama u smanjenju prometnih nesreća za oko 69%, odnosno za 52 prometne nesreće u odnosu na prethodna izvedena stanja raskrižja u vremenskom periodu promatranja od tri godine.

3.3.2. Analiza pokazatelja učinkovitosti na promatranim raskrižjima

Prosječna razlika između pokazatelja učinkovitosti za navedena stanja promatranih raskrižja prikazana je u tablici 3.14. iz koje je vidljivo da su RKT-i pokazali poboljšanja u odnosu na prethodna izvedena stanja raskrižja. Količine emisije štetnih ispušnih plinova na RKT-ima u prosjeku su smanjene 8% za ugljični monoksid (CO), 8% za ugljični dioksid (CO₂), 10% za ugljikovodike (HC) i 7% za dušikove okside (NO_x). Potrošnja goriva u prosjeku je smanjena za 8%, stupanj zasićenja za 23%, prosječno vrijeme čekanja za 30%, duljina repa čekanja za 48%, a propusna moć raskrižja povećala se za 22%.

Tablica 3.14. Prosječna razlika između prethodnog i sadašnjeg stanja za promatrane pokazatelje učinkovitosti na promatranim raskrižjima

	PRETHODNO nesemaf./semafor	SADAŠNJE RKT	RAZLIKA	% RAZLIKA
Vršni sat				
Parametri efikasnosti				
Efektivni kapacitet raskrižja C [veh/h]	2051,50	2509,20	457,70	22,31%
Stupanj zasićenja [-]	0,62	0,48	-0,14	-23,13%
Prosječno vrijeme čekanja ds [s]	12,92	9,05	-3,87	-29,95%
Duljina repa čekanja Q95 [m]	50,92	26,07	-24,85	-48,80%
Emisija štetnih ispušnih plinova				
Ugljični dioksid (CO ₂) (kg/h)	118,91	108,75	-10,16	-8,54%
Ugljikovodici (HC) (kg/h)	0,20	0,18	-0,02	-10,19%
Ugljični monoksid (CO) (kg/h)	8,81	8,04	-0,77	-8,73%
Dušični oksidi (NOx) (kg/h)	0,25	0,24	-0,02	-7,10%
Potrošnja goriva (l/h)	47,43	43,40	-4,03	-8,50%
Godišnje				
Kašnjenje voz-h/g	2213,10	1578,30	-634,80	-28,68%
Emisija štetnih ispušnih plinova				
Ugljični dioksid CO ₂ kg/g	57076,8	52199,6	-4877,20	-8,54%
Ugljikovodici HC kg/g	97,7	87,7	-10,00	-10,24%
Ugljični monoksid CO kg/g	4230,3	3861,2	-369,10	-8,73%
Dušični oksidi NOx kg/g	122,4	113,6	-8,80	-7,19%
Potrošnja goriva (l/h)	22774,6	20831,3	-1943,30	-8,53%

Postotna razlika za prethodna i sadašnja stanja za svaku promatranu lokaciju prikazana je u tablici 3.15. iz koje je vidljivo da su se na pojedinim lokacijama (Kutina, Vinkovci, Vodice i Split) RKT-i pokazali kao neodgovarajuće rješenje.

Tablica 3.15. Usporedba prethodnog i sadašnjeg stanja promatranih parametara za svaku lokaciju promatranih raskrižja

Parametri	Stanje	Razlika (Prethodno-Sadašnje)									
		Lokacija									
		Kutina	Novska	Osijek	Rijeka	Vinkovci	Vodice	Split	Varaždin	Zadar	Zagreb
Efektivni kapacitet raskrižja C [veh/h]	prethodno	3029,00	1147,00	2341,00	1801,00	3084,00	2417,00	1644,00	1473,00	1587,00	1992,00
	sadašnje	2657,00	2141,00	2674,00	2432,00	2836,00	2877,00	2392,00	2864,00	2104,00	2115,00
	%razlika	-12,28%	86,66%	14,22%	35,04%	-8,04%	19,03%	45,50%	94,43%	32,58%	6,17%
Stupanj zasićenja [-]	prethodno	0,24	0,48	0,65	0,77	0,44	0,25	0,98	0,87	0,73	0,84
	sadašnje	0,28	0,26	0,57	0,57	0,47	0,20	0,67	0,44	0,55	0,79
	%razlika	13,93%	-46,43%	-12,31%	-25,97%	8,74%	-19,03%	-31,63%	-49,43%	-24,66%	-5,62%
Prosječno vrijeme kašnjenja ds [s]	prethodno	4,60	12,30	9,90	13,80	18,60	3,60	15,00	22,90	13,00	15,50
	sadašnje	5,70	5,20	9,80	10,40	10,20	5,40	12,10	8,10	8,70	14,90
	%razlika	23,91%	-57,72%	-1,01%	-24,64%	-45,16%	50,00%	-19,33%	-64,63%	-33,08%	-3,87%
Duljina repa čekanja Q95 [m]	prethodno	8,80	42,40	33,80	57,90	63,10	8,40	62,10	108,30	42,30	82,10
	sadašnje	9,30	9,10	28,40	26,70	17,40	6,40	41,10	17,60	26,60	78,10
	%razlika	5,68%	-78,54%	-15,98%	-53,89%	-72,42%	-23,81%	-33,82%	-83,75%	-37,12%	-4,87%
Ugljični dioksid (CO ₂) (kg/h)	prethodno	69,80	91,10	132,30	112,40	193,00	39,60	145,30	123,40	115,50	166,70
	sadašnje	71,10	40,50	129,80	111,70	175,40	45,00	144,30	99,20	107,70	162,80
	%razlika	1,86%	-55,54%	-1,89%	-0,62%	-9,12%	13,64%	-0,69%	-19,61%	-6,75%	-2,34%
Ugljikovodici (HC) (kg/h)	prethodno	0,11	0,14	0,23	0,20	0,31	0,07	0,26	0,23	0,19	0,29
	sadašnje	0,11	0,06	0,22	0,20	0,27	0,08	0,26	0,18	0,17	0,28
	%razlika	1,79%	-53,96%	-3,08%	-2,45%	-13,46%	15,38%	-1,54%	-24,89%	-9,42%	-3,45%
Ugljični monoksid (CO) (kg/h)	prethodno	4,98	4,56	9,62	8,24	18,11	2,52	10,06	8,57	8,48	12,98
	sadašnje	4,91	3,16	8,96	7,58	16,01	3,11	10,29	6,96	7,75	11,70
	%razlika	-1,41%	-30,70%	-6,86%	-8,01%	-11,60%	23,41%	2,29%	-18,79%	-8,61%	-9,86%
Dušični oksidi (NOx) (kg/h)	prethodno	0,15	0,14	0,28	0,23	0,55	0,08	0,29	0,24	0,25	0,37
	sadašnje	0,15	0,09	0,26	0,22	0,50	0,09	0,29	0,20	0,23	0,34
	%razlika	0,00%	-34,31%	-4,73%	-4,80%	-9,26%	22,67%	2,09%	-15,61%	-7,29%	-7,40%
Potrošnja goriva (l/h)	prethodno	27,80	36,30	52,80	44,90	76,90	15,80	58,00	49,30	46,00	66,50
	sadašnje	28,30	16,10	51,80	44,70	69,90	18,00	57,70	39,70	42,90	64,90
	%razlika	1,80%	-55,65%	-1,89%	-0,45%	-9,10%	13,92%	-0,52%	-19,47%	-6,74%	-2,41%

Neophodno je napraviti statističke testove za dokazivanje statističke značajnosti u poboljšanju parametara učinkovitosti prije i nakon izgradnje RKT-a. Rezultati provedenih statističkih testova za dokazivanje statističke značajnosti u poboljšanju pokazatelja učinkovitosti prije i nakon izgradnje RKT-a prikazani su u tablici 3.16.

Tablica 3.16. Rezultati provedenih statističkih testova za dokazivanje statističke značajnosti između prethodnih i sadašnjih stanja pokazatelja učinkovitosti na promatranim raskrižjima

Parametri učinkovitosti za vršni sat	Statistički testovi							Značajan
	Shapiro-Wilk				Wilcoxonov ili T test			
	N	W	p		t	Z/df	P	
Kapacitet raskrižja C [veh/h]	10	0,979462	0,96	T test	-2,698	9	0,024	DA
Stupanj zasićenja [-]	10	0,944	0,597	T test	3,035	9	0,014	DA
Prosječno vrijeme kašnjenja ds [s]	10	0,916	0,323	T test	2,403	9	0,040	DA
Duljina repa čekanja Q95 [m]	10	0,838	0,042	Wilcox.		-2,701	0,007	DA
Ugljični dioksid (CO ₂) (kg/h)	10	0,799	0,014	Wilcox.		-1,886	0,059	NE
Ugljikovodici (HC) (kg/h)	10	0,861	0,078	T test	2,236	9	0,052	NE
Ugljični monoksid (CO) (kg/h)	10	0,972	0,906	T test	2,862	9	0,019	DA
Dušični oksidi (NO _x) (kg/h)	10	0,949	0,659	T test	3,115	9	0,012	DA
Potrošnja goriva (l/h)	10	0,8	0,014	Wilcox.		-1,886	0,059	NE

Značenje: df-stupanj slobode, W- kvadrat koeficijenta varijacije, p-vrijednost, t-vrijednost, Z-standardni test statistike, df-stupnjevi slobode

Iz tablice 3.16. može se prema provedenim statističkim testovima zaključiti da su RKT-i koji su zamijenili nesemaforizirana i semaforizirana raskrižja u razini pridonijeli značajnom poboljšanju u pogledu propusne moći, stupnja zasićenja, prosječnog vremena kašnjenja, duljine repa čekanja, emisije ugljičnog monoksida (CO) i dušikovog oksida (NO_x) u odnosu na prošlo izvedeno stanje raskrižja. Za potrošnju goriva, emisiju ugljičnih dioksida i ugljikovodika u odnosu na prošla stanja RKT-i nisu ostvarili značajna smanjenja.

3.3.3. Analiza troškova raskrižja

Analiza troškova na promatranim raskrižjima prikazana je kroz statističku usporedbu financijskih troškova investitora (tekući troškovi i troškovi održavanja) i troškova korisnika (količine emisije štetnih ispušnih plinova, vrijeme čekanja i nematerijalne štete) koji su se

prikupili terenskim istraživanjem i provedenim simulacijama za prethodna i sadašnja stanja raskrižja.

Tekući troškovi i troškovi održavanja za RKT-e nisu prikupljeni terenskim istraživanjem, stoga su za daljnji tijek ovog istraživanja uzeti u obzir tekući troškovi i troškovi održavanja na temelju dosadašnjih provedenih istraživanja u svijetu (vidi poglavlje 2.). Uvažavajući navedene troškove za pojedine oblike raskrižja, na promatranim raskrižjima koja su zamijenila semaforizirana raskrižja na godišnjoj razini ostvarile su se uštede za oko 45.000,00 kn (6.000 €), odnosno za oko 75% u odnosu na semaforizirana raskrižja (vidi tablicu 3.17.).

Tablica 3.17. Godišnje uštede na troškovima održavanja

LOKACIJA	Troškovi održavanja			
	RASKRIŽJE		RAZLIKA	% RAZLIKA
	SEMAFORIZIRANO	KRUŽNO		
PRIJE	POSLIJE			
Novska V ₂	30.000,00 kn	7.500,00 kn	-22.500,00 kn	-75,00%
Vinkovci V ₅	30.000,00 kn	7.500,00 kn	-22.500,00 kn	-75,00%
Σ	60.000,00 kn	15.000,00 kn	-45.000,00 kn	-75,00%

Troškovi materijalnih i nematerijalnih šteta na RKT-ima u vremenskom razdoblju od tri godine prije njihove izgradnje i tri godine nakon njihove izgradnje prikupljeni su kroz terensko istraživanje od osiguravajućih kuća za razmatrana raskrižja. RKT-i koji su zamijenili prethodna nesemaforizirana i semaforizirana raskrižja u razini pridonijeli su uštedama u materijalnim troškovima (oštećenja na motornim vozilima i stvarima) za oko 542.840,36 kn, a u nematerijalnim troškovima (tjelesne ozljede sudionika) za oko 255.801,08 kn što predstavlja smanjenje materijalnih troškova za 91% i nematerijalnih troškova za 67% u odnosu na prethodna izvedena stanja raskrižja u analiziranom vremenskom razdoblju promatranja (vidi tablicu 3.18.). Iz tablice 3.18. vidljivo je da RKT na lokaciji Osijek u odnosu na prošlo stanje raskrižja nije pridonijelo smanjenju materijalnih i nematerijalnih troškova. Naprotiv, njegovi troškovi materijalnih i nematerijalnih šteta povećali su se u odnosu na prethodno stanje raskrižja. Može se pretpostaviti da je privikavanje vozača na novi tip raskrižja i količina prometa glavni razlog za navedeno.

Tablica 3.18. Usporedba materijalnih i nematerijalnih troškova prije i poslije izgradnje promatranih RKT-a u analiziranom vremenskom periodu promatranja

Troškovi materijalnih i nematerijalnih šteta				
LOKACIJA	PRIJE (TRI GODINE)	POSLIJE (TRI GODINE)	RAZLIKA	% RAZLIKA
	MATERIJALNA ŠTETA	MATERIJALNA ŠTETA		
Kutina V ₁	25.085,68 kn	0,00 kn	-25.085,68 kn	-100,00%
Osijek V ₃	4.000,00 kn	20.476,00 kn	16.476,00 kn	411,90%
Vinkovci V ₅	61.984,33 kn	0,00 kn	-61.984,33 kn	-100,00%
Vodice V ₆	15.488,53 kn	0,00 kn	-15.488,53 kn	-100,00%
Split V ₇	55.992,48 kn	0,00 kn	-55.992,48 kn	-100,00%
Varaždin V ₈	101.712,29 kn	4.015,00 kn	-97.697,29 kn	-96,05%
Zadar V ₉	297.804,10 kn	0,00 kn	-297.804,10 kn	-100,00%
Zagreb V ₁₀	36.252,95 kn	30.989,00 kn	-5.263,95 kn	-14,52%
Σ	598.320,36 kn	55.480,00 kn	-542.840,36 kn	-90,73%
LOKACIJA	NEMATERIJALNA ŠTETA	NEMATERIJALNA ŠTETA	RAZLIKA	% RAZLIKA
Kutina V ₁	11.530,00 kn	0,00 kn	-11.530,00 kn	-100,00%
Osijek V ₃	0,00 kn	13.809,00 kn	13.809,00 kn	100,00%
Vinkovci V ₅	35.624,02 kn	0,00 kn	-35.624,02 kn	-100,00%
Vodice V ₆	0,00 kn	0,00 kn	0,00 kn	0,00%
Split V ₇	77.209,00 kn	0,00 kn	-77.209,00 kn	-100,00%
Varaždin V ₈	116.420,00 kn	58.690,00 kn	-57.730,00 kn	-49,59%
Zadar V ₉	48.582,04 kn	0,00 kn	-48.582,04 kn	-100,00%
Zagreb V ₁₀	89.680,02 kn	50.745,00 kn	-38.935,02 kn	-43,42%
Σ	379.045,08 kn	123.244,00 kn	-255.801,08 kn	-67,49%

Troškovi korisnika (društva) podijeljeni su u tri skupine: troškovi stradavanja, onečišćenja okoliša i zagušenja. Za potrebe ovog istraživanja troškovi stradavanja na promatranim raskrižjima u vidu ozljeda (teža, laka i smrt) prikupljeni su terenskim istraživanjem na bazi tri godine (vidi tablicu 3.7.) dok su ostali eksterni troškovi poput onečišćenja okoliša i zagušenja dobiveni umnoškom dobivenih simulacijskih rezultata na bazi jedne godine s novčanom vrijednosti pojedinog eksternog troška (vidi poglavlje 2.). Vrijednost eksternih troškova za prethodno i sadašnje stanje na promatranim raskrižjima prikazana je u tablici 3.19.

RKT-i koji su zamijenili prethodna klasična raskrižja u razini (semaforizirana i nesemaforizirana) pridonijeli su postotnoj uštedi u eksternim troškovima za oko 86% u lakšim tjelesnim ozljedama, 91% u težim tjelesnim ozljedama (na bazi tri godine), 28% u vremenu putovanja, 9% u potrošnji goriva i 95% u emisiji ugljičnog dioksida (na bazi jedne godine), odnosno novčanom uštedi za oko 239.400,00 € na lakšim tjelesnim ozljedama, 1.730.000,00 €

na težim tjelesnim ozljedama, 60.480,00 € u vremenu putovanja, 19.499,00 € u potrošnji goriva i 437.262,00 € u emisiji ugljičnog dioksida u odnosu na prethodna izvedena stanja raskrižja u vremenskom razdoblju promatranja. Od svih promatranih eksternih troškova RKT- i jedino za troškove dušičnih oksida nisu ostvarili uštedu, već naprotiv, postotno povećanje navedenog eksternog troška za oko 76%, odnosno novčano za oko 4 €.

Tablica 3.19. Vrijednost eksternih troškova za prethodno i sadašnje stanje na promatranim raskrižjima

Grad/Lokacija kružnog raskrižja	PARAMETRI EFIKASNOSTI				Košnjeenje vozila (t/g)	Potrošnja goriva (l/godinu)	Ugljični dioksid CO ₂ (kg/godinu)	Dušični oksidi NOx (kg/godinu)	Trošak (€/godinu)
	PRUJE / POSLUJE	A	Lakša tjelesna ozljeda	Teža tjelesna ozljeda					
	Trošak (€)	B	13300	173000	10	1	0,04	0,0044	
Kutina V ₁	PRUJE	A	1	0	150	13.361	33.506	70	16.201,55
	POSUJE	A*B	13300	0	1500	13361	1340,24	0,308	
Novska V ₂	PRUJE	A	0	0	560	13.602	34.112	70	20.566,79
	POSUJE	A*B	0	0	5600	13602	1364,48	0,308	
Osijek V ₃	PRUJE	A	1	1	898	17.403	43.706	66	463.443,29
	POSUJE	A*B	13300	173000	8980	17403	437060	0,2904	
Rijeka V ₄	PRUJE	A	0	0	382	7.740	19.443	43	12.337,91
	POSUJE	A*B	0	0	3820	7740	777,72	0,1892	
Vinkovci V ₅	PRUJE	A	3	1	2.007	25.335	63.504	132	47.945,74
	POSUJE	A*B	39900	173000	20070	25335	2540,16	0,5808	
Vodice V ₆	PRUJE	A	0	0	1.994	24.878	62.312	126	47.315,52
	POSUJE	A*B	0	0	19940	24878	2492,48	5,04	
Split V ₇	PRUJE	A	2	1	2.563	21.569	53.953	110	49.357,60
	POSUJE	A*B	26600	173000	25630	21569	2158,12	0,484	
Varaždin V ₈	PRUJE	A	3	5	1.934	21.437	53.621	105	42.922,30
	POSUJE	A*B	39900	865000	19340	21437	2144,84	0,462	
Zadar V ₉	PRUJE	A	8	2	3.324	36.928	92.655	265	73.875,37
	POSUJE	A*B	106400	346000	33240	36928	3706,2	1,166	
Zagreb V ₁₀	PRUJE	A	3	1	1.833	33.551	84.182	240	55.249,34
	POSUJE	A*B	39900	173000	18330	33551	3367,28	1,056	
RAZLIKA	PRUJE-POSUJE		-239.400,00	-1.730.000,00	286	7.592	19.006	36	11.212,40
	% RAZLIKA		-85,71%	-90,91%	2860	7592	760,24	0,1584	
Σ	PRUJE	A	279.300,00	1.903.000,00	394	8.631	21.612	44	13.435,67
	POSUJE	A*B	39.900,00	173.000,00	3940	8631	864,48	0,1936	
Σ	PRUJE	A	279.300,00	1.903.000,00	3.225	27.857	69.726	138	62.896,65
	POSUJE	A*B	39.900,00	173.000,00	32250	27857	2789,04	0,6072	
% RAZLIKA	PRUJE-POSUJE		-239.400,00	-1.730.000,00	2.608	27.637	69.264	140	56.488,18
	% RAZLIKA		-85,71%	-90,91%	26080	27637	2770,56	0,616	
Σ	PRUJE	A	279.300,00	1.903.000,00	3.925	23.686	59.249	114	65.306,46
	POSUJE	A*B	39.900,00	173.000,00	39250	23686	2369,96	0,5016	
% RAZLIKA	PRUJE-POSUJE		-239.400,00	-1.730.000,00	1.385	19.039	47.625	96	34.794,42
	% RAZLIKA		-85,71%	-90,91%	13850	19039	1905	0,4224	
Σ	PRUJE	A	279.300,00	1.903.000,00	2.016	22.075	55.433	118	44.452,84
	POSUJE	A*B	39.900,00	173.000,00	20160	22075	2217,32	0,5192	
% RAZLIKA	PRUJE-POSUJE		-239.400,00	-1.730.000,00	1.358	20.588	51.680	110	36.235,68
	% RAZLIKA		-85,71%	-90,91%	13580	20588	2067,2	0,484	
Σ	PRUJE	A	279.300,00	1.903.000,00	3.437	31.920	80.030	175	69.491,97
	POSUJE	A*B	39.900,00	173.000,00	34370	31920	3201,2	0,77	
% RAZLIKA	PRUJE-POSUJE		-239.400,00	-1.730.000,00	3.335	31.174	78.145	162	67.650,51
	% RAZLIKA		-85,71%	-90,91%	33350	31174	3125,8	0,7128	
Σ	PRUJE	A	279.300,00	1.903.000,00	218.310,00	227.726,00	458.142,48	5,39	904.183,87
	POSUJE	A*B	39.900,00	173.000,00	157.830,00	208.277,00	20.879,84	9,48	
% RAZLIKA	PRUJE-POSUJE		-239.400,00	-1.730.000,00	-60.480,00	-19.449,00	-437.262,64	4,10	- 517.187,54
	% RAZLIKA		-85,71%	-90,91%	-27,70%	-8,54%	-95,44%	76,10%	

NAPOMENA: A-promatrani parametar učinkovitosti
B-novčana vrijednost troška za promatrani parametar

Za dokazivanje statističke značajnosti u smanjenju novčanih troškova prije i nakon izgradnje RKT-a provedeni su odabrani statistički testovi za analizu. Rezultati provedenih statističkih testova prikazani su u tablici 3.20. Iz tablice 3.20. može se zaključiti da su RKT-i koji su zamijenili nesemaforizirana i semaforizirana raskrižja u razini pridonijeli značajnom smanjenju u svim promatranim troškovima.

Tablica 3.20. Rezultati provedenih statističkih testova za dokazivanje statističke značajnosti između prethodnih i sadašnjih stanja novčanih troškova na promatranim raskrižjima

Parametri učinkovitosti za vršni sat	Statistički testovi							Značajan
	Shapiro-Wilk				Wilcoxonov ili T test			
	N	W	p		t	Z/df	P	
TROŠKOVI ODRŽAVANJA								
Troškovi održavanja	PREMALI UZORAK ZA ANALIZU !!!!							
MATERIJALNI I NEMATERIJALNI TROŠKOVI								
Materijalni troškovi	8	0,712	0,03	Wilcx.		-2,1	0,036	DA
Nematerijalni troškovi	8	0,923	0,454	T test	2,949	7	0,021	DA
EKSTERNI TROŠKOVI								
Lakše tj. ozljede	8	0,853	0,101	T test	3,30	7	0,013	DA
Teže tj. ozljede	8	0,749	0,008	Wilcx.		-2,06	0,039	DA
Kašnjenje voz- h/g	10	0,943	0,582	T test	-4,82	9	0,001	DA
Ugljični dioksid (CO ₂) (kg/g)	10	0,944	0,601	T test	6,198	9	0	DA
Dušični oksidi (NO _x) (kg/g)	10	0,954	0,713	T test	4,942	9	0,001	DA
Potrošnja goriva (l/g)	10	0,689	0,01	Wilcx.		-1.988	0,047	DA

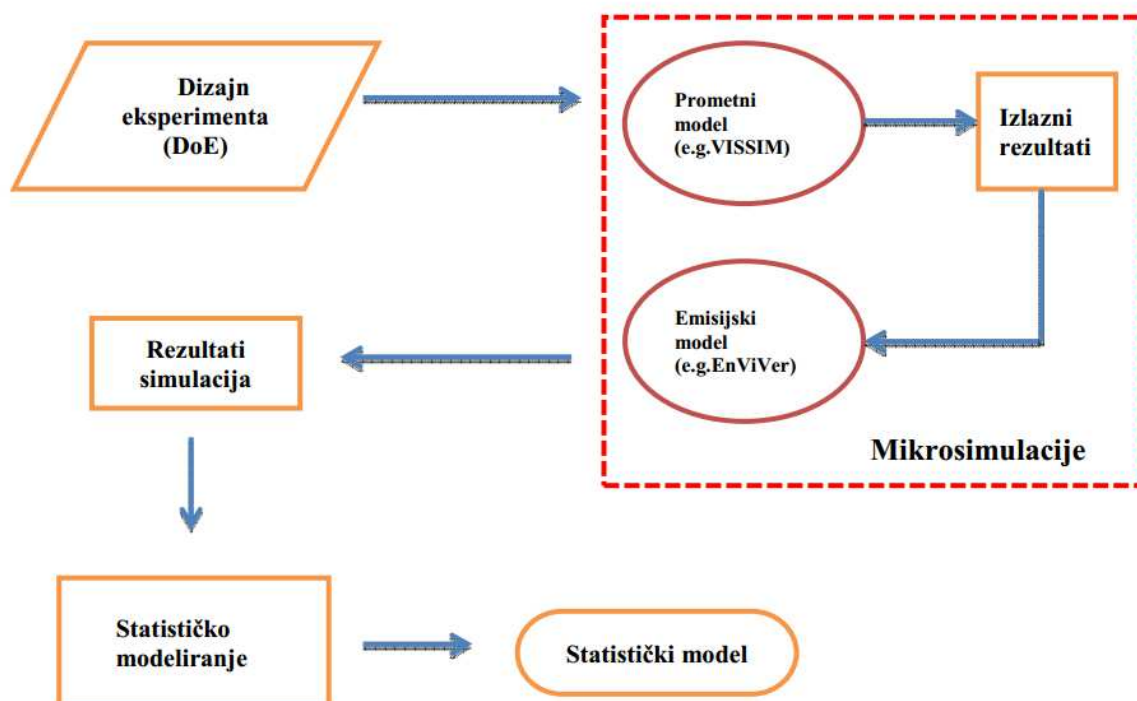
Značenje: df-stupanj slobode, W- kvadrat koeficijenta varijacije, p-vrijednost, t-vrijednost, Z-standardni test statistike, df-stupnjevi slobode

4. STATISTIČKI MODEL PROCJENE UTJECAJA PLANIRANIH KRUŽNIH RASKRIŽJA NA OKOLIŠ I GOSPODARSTVO

U ovom poglavlju prikazan je razvoj statističkog modela kojim se procjenjuje utjecaj RKT-a na okoliš i gospodarstvo. Statistički model procjene razvijen je na temelju postavljene metodologije koja uključuje sljedeće metodološke korake:

1. dizajn eksperimenta (DoE) (eng. Design of Experiments)
2. mikrosimulacije (izrada prometnog i emisijskog modela)
3. statističko modeliranje

U prvom koraku opisan je dizajn eksperimenta u kojem su navedene sve vrijednosne razine nezavisnih varijabli koje utječu na zavisne varijable u eksperimentu. Nakon postavljenog dizajna eksperimenta proveden je drugi metodološki korak koji obuhvaća modeliranje prometnog i emisijskog modela uz primjenu mikrosimulacijskih programa paketa VISSIM i Enviver. U posljednjem, trećem koraku napravljeno je statističko modeliranje na temelju dobivenih izlaznih rezultata iz prometnog i emisijskog modela. Pregled plana metodoloških koraka prikazan je na dijagramu 4.1.



Dijagram 4.1. Plan metodoloških koraka

4.1. Dizajn eksperimenta (*engl. Desing of Experiment - DoE*)

U dizajnu eksperimenta postavljeni su parametri od interesa koji variraju u eksperimentu, odnosno postavljene su vrijednosne razine ulaznih varijabli (nezavisne varijable) koje stvaraju uzročno-posljedičnu vezu na izlazne varijable (zavisne). Određene vrijednosne razine ulaznih varijabli određene su temeljem prikupljenih i obrađenih podataka na promatranim raskrižjima.

4.1.1. Nezavisne varijable

Na temelju prikupljenih podataka i projektne dokumentacije na promatranim raskrižjima postavljene su ulazne (nezavisne) varijable i njihove vrijednosti za eksperiment. Ukupno je u eksperimentu postavljeno šest (6) nezavisnih varijabli s vrijednosnim razinama:

1. *Tip raskrižja - nesemaforizirano, RKT i semaforizirano*

Od 10 promatranih raskrižja, odabrano je raskrižje na lokaciji V₈ (Varaždin) zbog većeg broja sličnosti kod projektno oblikovnih elemenata u odnosu na druga promatrana raskrižja. Težilo se homogenosti između promatranih raskrižja (približni promjeri, polumjeri, ulazni privozi itd...). Oblikovni elementi za njegovo prethodno i sadašnje stanje preuzeti su iz prikupljenih podataka dok je semaforizacija raskrižja napravljena na temelju prethodnog stanja s fiksnim signalnim planom od C=60 s, s dvije faze (efektivno zeleno svjetlo 29 s za glavne smjerove, zaštitno vrijeme za glavni i sporedni smjer 3 s žuto, efektivno zeleno na sporednim smjerovima 22 s, zaštita pješaka 5 s, trajanje efektivnog zelenog svjetla za pješake na glavnom smjeru 26 s i sporednom smjeru 22 s). Tipovi raskrižja za potrebe eksperimenta prikazani su na slici 4.2.

2. *Količina prometa na raskrižjima*

Za svaki tip raskrižja određena je njegova ukupna prometna potražnja koja iznosi za: motorizirani promet

- Klasični tip raskrižja (voz/h): 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500
- Kružni tip raskrižja (voz/h): 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000
- Semaforizirani tip raskrižja (voz/h): 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000

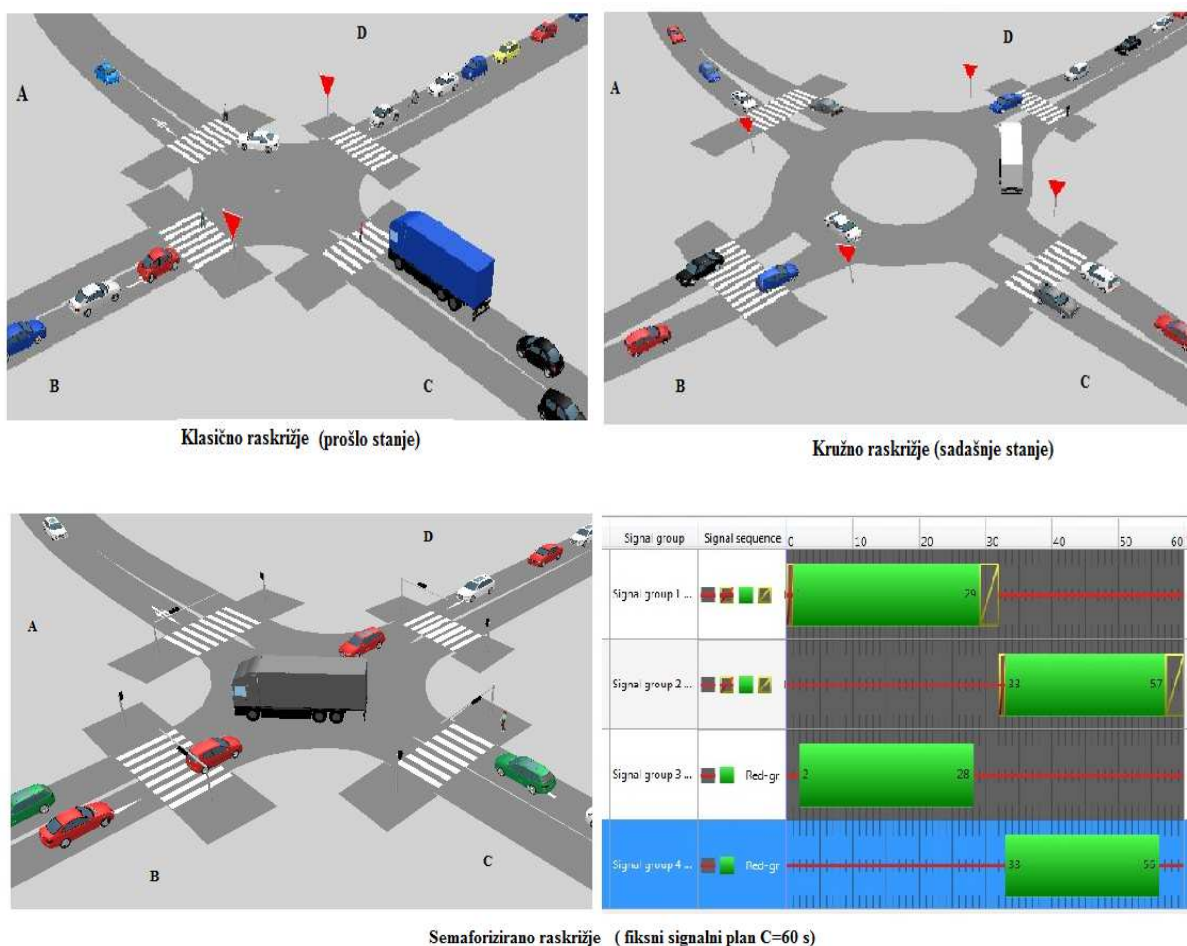
nemotorizirani promet (pješaci i biciklisti) nije uzet u obzir zbog premalog uzorka (vidi prilog 1. i treće ograničenje).

3. Omjeri količina prometa (glavni/sporedni smjer)

Omjeri količine prometa za glavni smjer u odnosu na sporedni smjer postavljeni su:

- 1:1.0 - količina prometa na glavnom smjeru jednaka je količini prometa na sporednom smjeru
- 1:1.5 - količina prometa na glavnom smjeru 50% je veća od količine prometa na sporednom smjeru
- 1:2.0 - količina prometa na glavnom smjeru duplo je veća od količine prometa na sporednom smjeru

Za glavni smjer određen je privoz A i C (AC i CA) dok je za sporedni smjer određen privoz B i D (BD i DB), vidi sliku 4.1.



Slika 4.1. Tipovi raskrižja

4. Struktura toka

Udio teških teretnih vozila, motocikala i autobusa određen je prema prikupljenim podacima o brojanju prometa na promatranom raskrižju (V_8) i to za:

- teška teretna vozila: 0,025 (2.5%) i 0,1 (10%)²
- autobusi: 0.01 (1%) fiksirana vrijednost
- motocikli: 0.01 (1%) fiksirana vrijednost

5. Brzina vozila

Brzina vozila na prilazima raskrižjima postavljena je kao fiksna varijabla i iznosi za sve tipove raskrižja 50 km/h.

6. O/D matrica

Prometni tok iz glavnog u sporedni smjer i iz sporednog u glavni smjer postavljen je prema O/D matricama, uvažavajući pritom prikupljene podatke na promatranim raskrižjima. O/D matrice prikazane su u tablici 4.1. Prometni tokovi iz privoza A i C na glavnom smjeru postavljeni su u pojedinoj O/D matrici po jednom od tri moguća plana (lijevo:ravno:desno) – 10:80:10, 10:70:20 i 30:60:10. Također, prometni tokovi iz privoza B i D na sporednom smjeru postavljeni su u pojedinoj O/D matrici po jednom od tri moguća plana: 25:50:25, 45:30:25 i 40:20:40. Ukupno devet prikazanih O/D matrica predstavljaju sve kombinacije gore navedenih planova za glavni i sporedni smjer.

Tablica 4.1. O/D matrica prometnog toka u postotcima

$P_1=$	A	0	0.25	0.80	0.25	$P_4=$	A	0	0.25	0.70	0.25	$P_7=$	A	0	0.25	0.60	0.25
	B	0.10	0	0.10	0.50		B	0.20	0	0.20	0.50		B	0.30	0	0.30	0.50
	C	0.80	0.25	0	0.25		C	0.70	0.25	0	0.25		C	0.60	0.25	0	0.25
	D	0.10	0.50	0.10	0		D	0.10	0.50	0.10	0		D	0.30	0.50	0.30	0
$P_2=$	A	0	0.45	0.80	0.25	$P_5=$	A	0	0.45	0.70	0.25	$P_8=$	A	0	0.45	0.60	0.25
	B	0.10	0	0.10	0.30		B	0.20	0	0.20	0.30		B	0.30	0	0.30	0.30
	C	0.80	0.25	0	0.45		C	0.70	0.25	0	0.45		C	0.60	0.25	0	0.45
	D	0.10	0.30	0.10	0		D	0.10	0.30	0.10	0		D	0.30	0.30	0.30	0
$P_3=$	A	0	0.40	0.80	0.40	$P_6=$	A	0	0.45	0.70	0.40	$P_9=$	A	0	0.45	0.60	0.40
	B	0.10	0	0.10	0.20		B	0.20	0	0.20	0.20		B	0.30	0	0.30	0.20
	C	0.80	0.40	0	0.40		C	0.70	0.25	0	0.40		C	0.60	0.25	0	0.40
	D	0.10	0.20	0.10	0		D	0.10	0.30	0.10	0		D	0.30	0.30	0.30	0

² Određene su dvije vrijednosti kako bi se dokazalo da određeni postotak teških teretnih vozila ima različit utjecaj na okoliš.

Kako bi svaka vrijednost nezavisnih varijabli bila uključena u eksperiment, potrebno je odrediti broj međusobnih kombinacija vrijednosti nezavisnih varijabli, tj. broj simulacija za svaki tip raskrižja u eksperimentu. Uzimajući u obzir i utjecaj stohastičke prirode (vidi potpoglavlje 2.2.3.2.) potrebno je svaku pojedinačnu simulaciju pokrenuti i nekoliko puta. Za potrebe ovog eksperimenta određeno je da se svaka kombinacija vrijednosti nezavisnih varijabli pokrene pet (5) puta kroz prometni model. Ukupan broj potrebnih interakcija-simulacija između vrijednosti nezavisnih varijabli iznosi 5.940, od čega 2.160 simulacija otpada na RKT, 2.160 na semaforizirano raskrižje i 1.620 na klasično raskrižje u eksperimentu.

4.1.2. Zavisne varijable

Zavisne varijable predstavljaju mjeru ishoda u eksperimentu, a posljedice su djelovanja nezavisnih varijabli. Zavisne varijable koje su postavljene i koje se promatraju u ovom eksperimentu podijeljene su na dvije grupe zavisnih varijabli koje predočuju procjenu utjecaja RKT-a na okoliš i gospodarstvo, a to su:

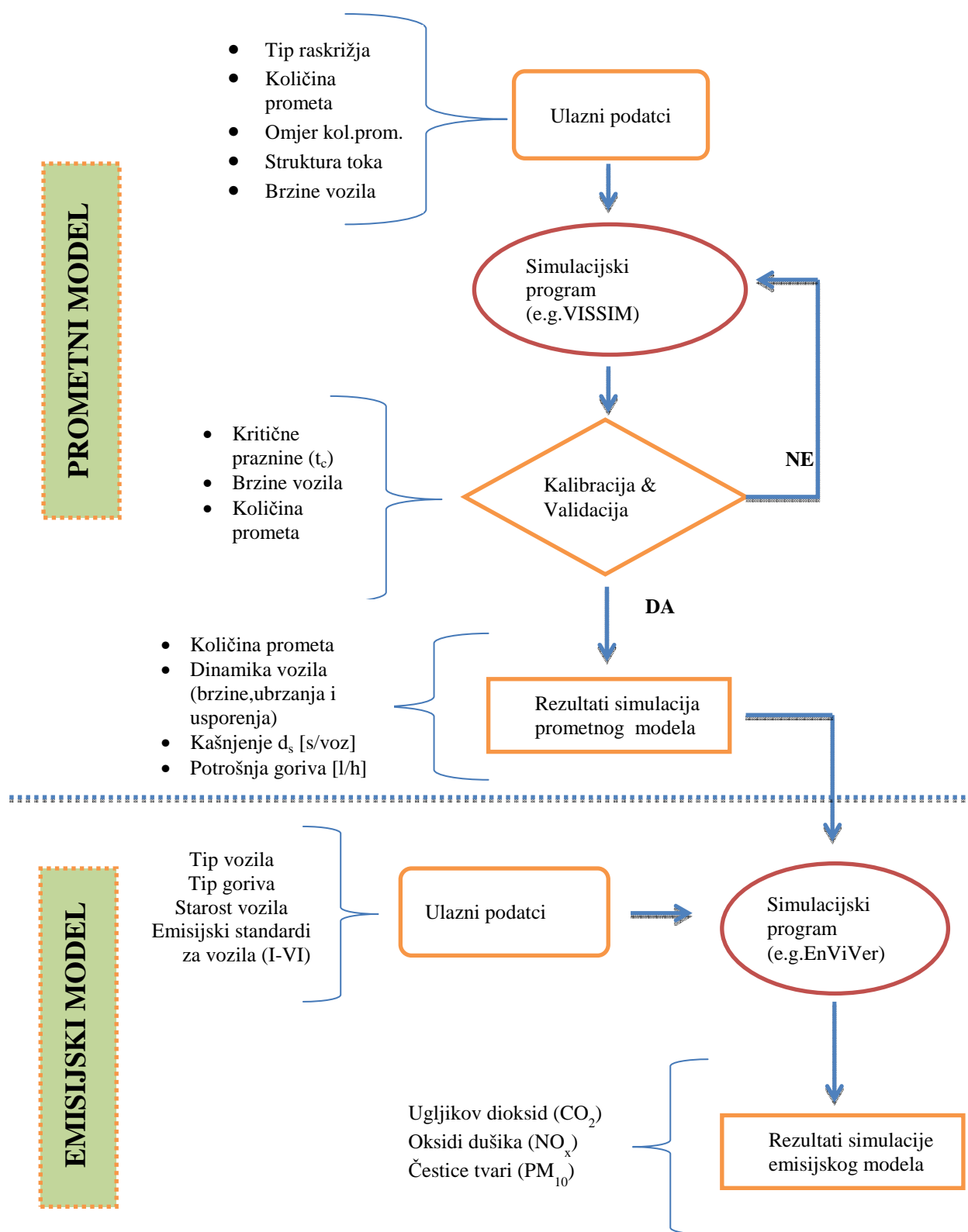
1. Ekološke - koje uključuju pokazatelje:
 - ugljikov dioksid (CO₂) [kg/h]
 - oksidi dušika (NO_x) [kg/h]
 - čestice tvari (Particulate matter-PM₁₀) [kg/h]

2. Gospodarske - koje uključuju pokazatelje:
 - kašnjenja vozila ds [s/voz]
 - potrošnje goriva [l/h]

Ustvari, ekološke i gospodarske zavisne varijable predstavljaju rezultate koji su dobiveni primjenom eksperimenta i mikrosimulacija (prometnog i emisijskog modela).

4.2. Mikrosimulacije (prometni i emisijski model)

Osnovni temelj za razvoj statističkog modela predstavlja prometni i emisijski model. Ovi modeli omogućuju procjenu utjecaja RKT-a na okoliš i gospodarstvo. Prometni i emisijski modeli razvijeni su prema postavljenom planu modeliranja uz primjenu mikrosimulacijskih programskih paketa VISSIM-a (prometni model) i EnVivera (emisijski model). Na dijagramu 4.2. prikazan je postavljeni plan razvoja modela.



Dijagram 4.2. Plan modeliranja prometnog i emisijskog modela

4.2.1. Prometni model

U svrhu provedbe ovog eksperimenta prema postavljenom planu modeliranja postoje četiri glavna koraka u razvoju prometnog modela, odnosno unos podataka (dizajn eksperimenta), primjena mikrosimulacijskog programskog paketa VISSIM, kalibracija i validacija modela i izlazni rezultati (vidi dijagram 4.2.).

4.2.1.1. Ulazni podatci prometnog modela

Ulazni podatci za razvoj prometnog modela sadrže sve postavke i vrijednosti koje su postavljene u dizajnu eksperimenta, a odnose se na prometne podatke i projektno-oblikovne elemente na promatranim tipovima raskrižja za potrebe primjene u mikrosimulacijskom programskom paketu Vissim.

4.2.1.2. Postavke VISSIM-a

Postavke u mikrosimulacijskom programskom paketu VISSIM odnose se na modeliranje određenog tipa raskrižja prema projektno-oblikovnim elementima (izrada oblika raskrižja u modelu pomoću linkova i konektora), ponašanju vozača (brzine - usporenje i ubrzanje, rute prometnog toka i pravila prioriteta), odabirom parametara modela (t_c , brzine na ulasku, izlasku i kružnom kolniku). Svrha ovog koraka je napraviti prometni model koji je provjerljiv, ponovljiv i točan. Postupci i koraci modeliranja u programskom paketu VISSIM mogu se vidjeti iz preporučene literature [23, 26]. Prikupljeni i obrađeni podatci sadašnjeg i prethodnog stanja na lokaciji V_8 korišteni su za razvoj prometnog modela (vidi potpoglavlje 3.2.1).

4.2.1.3. Kalibracija i validacija prometnog modela

U procesu kalibracije i validacije prometnog modela, točnost modela mora biti provjerena, tj. je li ona reprezentativna za stvarno stanje na raskrižju. Proces kalibracije i validacije ujedno je i kontrola za postavke mikrosimulacijskog programa. Ukoliko kalibracija i validacija nisu zadovoljene, znači da postavke u simulacijskom paketu nisu dobro postavljene. U dizajnu eksperimenta odabrano je raskrižje na lokaciji V_8 kao reprezentativno, stoga je proces kalibracije i validacije prometnog modela napravljen prema stvarnim prikupljenim i obrađenim podacima na njemu za popodnevi vršni sat (15:00-16:00 h). Za kalibraciju modela korišteni su kritična vremenska praznina, vrijeme slijeđenja i brzine vozila (vidi

potpoglavlja 2.2.3.2. i 3.2.1.), a u svrhu validacije korištene su GEH i RMSNE metode ovisno o tipu raskrižja (RKT, nesemaforizirano i semaforizirano).

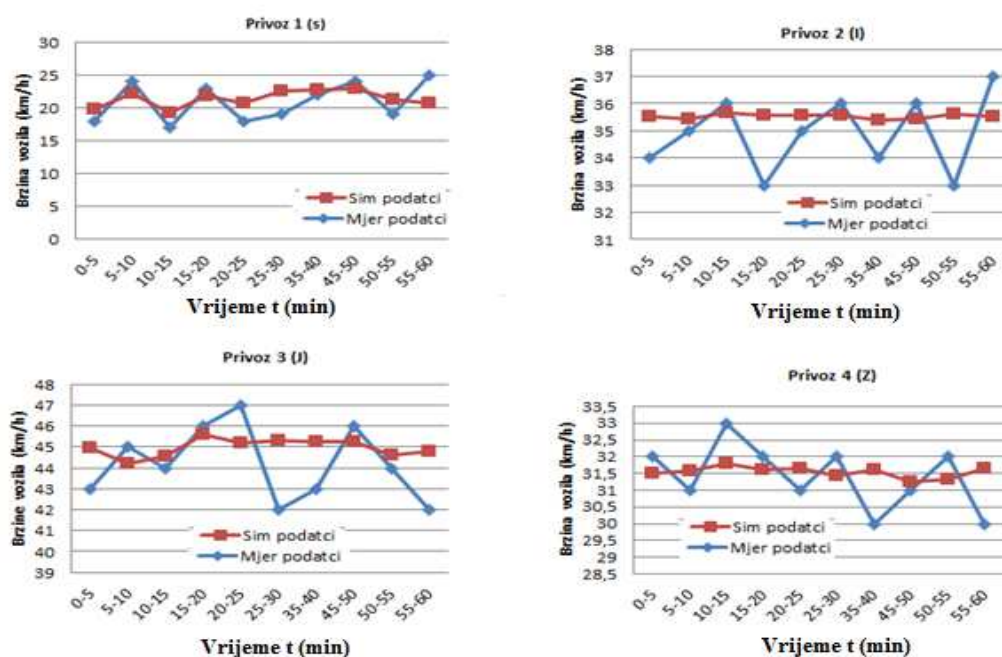
4.2.1.3.1. Kalibracija i validacija RKT-a

U prometnom modelu za kalibraciju modela RKT-a korištene su količina prometa i brzine vozila za svaki privoz k raskrižju. Usporedba prosječnih simuliranih podataka iz deset uzastopnih pokretanja i mjerenih podataka za količinu prometa na odabranom RKT-u prikazana je u tablici 4.2. iz koje je vidljivo da su simulirani podatci približno jednaki mjerenim podacima, što je i dokazano validacijom po GEH metodi.

Tablica 4.2. Rezultati GEH metode za modelirani tip RKT-a

VRIJEME	Privoz 1 (S)			Privoz 2 (I)			Privoz 3 (J)			Privoz 4 (Z)		
	Sim	Mje	GEH	Sim	Mje	GEH	Sim	Mje	GEH	Sim	Mje	GEH
0-15	110	114	0,378	58	61	0,389	95	101	0,606	69	66	0,365
15-30	110	102	0,777	58	55	0,399	72	69	0,357	64	64	0,000
30-45	114	122	0,736	65	59	0,762	75	70	0,587	61	66	0,627
45-60	80	77	0,339	53	63	1,313	63	68	0,618	56	61	0,654

Prikaz mjerenih i simuliranih brzina na RKT-u prikazan je na grafikonu 4.1. Za dokazivanje točnosti kalibriranog modela i simuliranih podataka za brzinu vozila korištena je RMSNE metoda.



Grafikon 4.1. Prikaz simuliranih i mjerenih brzina na RKT-u

Provjerom prometnog modela prema RMSNE metodi za brzine vozila dokazana je njegova točnost. Sve vrijednosti RMSNE metode po privozima pokazuju vrijednosti manje od 0.15 (vidi tablicu 4.3.) što upućuje na ispravnost modela, tj. njegovu primjenjivost za daljnji tijek razvoja znanstvenog eksperimenta.

Tablica 4.3. RMSNE metoda na reprezentativnom raskrižju temeljem mjerenih i simuliranih brzina na privozima

VRIJEME	Privoz 1 (S)			Privoz 2 (I)			Privoz 3 (J)			Privoz 4 (Z)		
	Mje, y_{obs}	Sim, y_{sim}	$\left(\frac{y_{sim} - y_{obs}}{y_{obs}}\right)^2$	Mje, y_{obs}	Sim, y_{sim}	$\left(\frac{y_{sim} - y_{obs}}{y_{obs}}\right)^2$	Mjes, y_{obs}	Sim, y_{sim}	$\left(\frac{y_{sim} - y_{obs}}{y_{obs}}\right)^2$	Mje, y_{obs}	Sim, y_{sim}	$\left(\frac{y_{sim} - y_{obs}}{y_{obs}}\right)^2$
0-5	18	19,8	0,01000	34	35,53	0,00203	43	44,95	0,00206	32	31,5	0,00024
5-10	24	22,18	0,00575	35	35,44	0,00016	45	44,22	0,00030	31	31,57	0,00034
10-15	17	19,27	0,01783	36	35,64	0,00010	44	44,55	0,00016	33	31,8	0,00132
15-20	23	21,85	0,00250	33	35,59	0,00616	46	45,59	0,00008	32	31,6	0,00016
20-25	18	20,81	0,02437	35	35,55	0,00025	47	45,18	0,00150	31	31,64	0,00043
25-30	19	22,63	0,03650	36	35,57	0,00014	42	45,32	0,00625	32	31,43	0,00032
35-40	22	22,74	0,00113	34	35,39	0,00167	43	45,24	0,00271	30	31,62	0,00292
45-50	24	22,9	0,00210	36	35,42	0,00026	46	45,26	0,00026	31	31,27	0,00008
50-55	19	21,35	0,01530	33	35,62	0,00630	44	44,63	0,00021	32	31,33	0,00044
55-60	25	20,8	0,02822	37	35,51	0,00162	42	44,8	0,00444	30	31,65	0,00302
$\sum \left(\frac{y_{sim} - y_{obs}}{y_{obs}}\right)^2$			0,14371				0,01869				0,01796	0,00926
n			10	10			10			10		
$RMSNE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(\frac{y_{sim} - y_{obs}}{y_{obs}}\right)^2}$			0,119877633	0,043230253			0,042382319			0,030429484		

Značenje: Mje, y_{obs} -mjereni podatci., Sim, y_{sim} . simulirani podatci.,

4.2.1.3.2. Kalibracija i validacija nesemaforiziranog i semaforiziranog raskrižja

Ostali tipovi raskrižja (nesemaforizirano i semaforizirano), zbog nedostatka prikupljenih podataka na njima, kalibrirani su prema dosadašnjim preporukama i provedenim istraživanjima (vidi poglavlje 3.2.1.). Korištenjem GEH metode napravljena je njihova validacija na količinama prometa raskrižja za svaki ulazni privoz na raskrižju.

Nesemaforizirano raskrižje

U tablici 4.4. na odabranom V_8 nesemaforiziranom raskrižju prikazana je usporedba prosječnih simuliranih podataka iz deset uzastopnih pokretanja i postavljenih podataka. Iz navedene tablice vidljivo je da su simulirani podatci približno jednaki postavljenim podacima, tj. sve vrijednosti po GEH metodi ne prelaze vrijednost 5.0 što upućuje na ispravnost prometnog modela.

Tablica 4.4. Rezultati GEH metode za modelirani tip nesemaforiziranog raskrižja

Ulazni privozi	Prometni model	Postavljeni podatci	Validacija
	Količina prometa (voz/h)		GEH
Privoz 1 (S)	420	415	0,347105067
Privoz 2 (I)	230	238	0,733358798
Privoz 3 (J)	289	308	1,531063632
Privoz 4 (Z)	250	257	0,617513528

Semaforizirano raskrižje

Rezultati validacije prometnog modela za semaforizirano raskrižje korištenjem GEH metode za količinu prometa na njima prikazani su u tablici 4.5., iz koje je vidljivo da se sve vrijednosti po GEH metodi nalaze ispod 5.0.

Tablica 4.5. Rezultati GEH metode za modelirani tip semaforiziranog raskrižja

Ulazni privozi	Prometni model	Postavljeni podatci	Validacija
	Količina prometa (voz/h)		GEH
Privoz 1 (S)	395	415	1,388420269
Privoz 2 (I)	220	238	1,650057295
Privoz 3 (J)	325	308	1,369899039
Privoz 4 (Z)	275	257	1,587891929

4.2.1.4. Izlazni podatci

Izlazni podatci iz prometnog modela odnose se na cjelokupno raskrižje i na svako pojedinačno vozilo. Izlazni podatci za cjelokupno raskrižje sadrže prosječnu kontrolu kašnjenja ds [s/voz] i potrošnju goriva [l/h] dok izlazni rezultati za svako pojedinačno vozilo sadrže njegovu brzinu, broj, tip, naziv, vrijeme simulacije, koordinate (x, y, z), nagib ceste, broj linka, snagu i masu. Podatci za svako pojedinačno vozilo, odnosno njegov profil snage, brzine i vremena koriste se u emisijskim modelima za izračun emisije štetnih ispušnih plinova. Izlazni podatci za cjelokupno raskrižje nakon svake provedene simulacije spremljeni su u krajnju odredišnu bazu (rezultati simulacije). Podatci za svako pojedinačno vozilo spremljeni su u tekstualnu bazu (ekstenzija .fzp), programskog paketa VISSIM te su kasnije primijenjeni u emisijski model.

4.2.2. Emisijski model

U ovom doktorskom radu za razvoj emisijskog modela korišteni su prikupljeni ulazni podatci za vozni park na području RH-a, izlazni podatci iz prometnog modela, simulacijski programski paket EnViVER i izlazni rezultati (vidi dijagram 4.2.).

4.2.2.1. Ulazni podatci emisijskog modela

Ulazni podatci za emisijski model podijeljeni su u dvije kategorije:

- podatci prikupljeni iz prometnog modela za svako pojedinačno vozilo zasebno
- podatci za vozni park na području Republike Hrvatske

Podatci za svako vozilo odnose se na prikupljene izlazne podatke iz prometnog modela dok se podatci za vozni park na području Republike Hrvatske odnose na strukturu voznog parka i prosječnu starost vozila. Podatci za vozni park u Republici Hrvatskoj prikupljeni su prema dobiveni podacima od Centra za vozila Hrvatske (CVH) za razdoblje od 2012. godine do 2014. godine. U prikupljene podatke uključene su grupe vozila (podjela po UN-ECE) koje se koriste u emisijskom modelu (motocikli i mopedi (L1,L3), osobni automobili (M1), teška teretna vozila (N1,N2 i N3) i autobusi (M2 i M3) prema strukturi odnosno tipu vozila, vrsti pogonskog goriva i prosječnoj starosti.

Struktura vozila voznog parka

U tablici 4.6. prikazana je struktura vozila voznog parka za razvoj emisijskog modela po promatranom razdoblju. Iz navedene tablice vidljiv je trend rasta u promatranom razdoblju za sve grupe vozila osim za motocikle.

Tablica 4.6. Struktura grupe vozila po godinama

Grupa (UN-ECE)	Godine		
	2012.g	2013.g	2014.g
Motocikli (L1 i L3)	146.967,00	146.623,00	145.067,00
Osobna vozila (M1)	1.397.785,00	1.418.119,00	1.444.480,00
Autobusi (M2 i M3)	4.641,00	4.836,00	5.101,00
Teretna vozila (N1,N2 i N3)	137.162,00	137.949,00	138.773,00
Ukupno	1.686.555,00	1.707.527,00	1.733.421,00

Vrsta (tip) pogonskog goriva

U emisijskom modelu za izračun emisije štetnih ispušnih plinova za svaku grupu vozila primjenjuju se određene vrste pogonskog goriva. Vrste pogonskih goriva koje se promatraju u modelu su: benzin, dizel, ukapljeni naftni plin (LPG - eng. Liquefied Petroleum Gas), stlačeni prirodni plin (CNG - eng. compressed natural gas) i električna energija iz baterija. U tablici 4.7. prikazan je udio pojedine vrste pogonskog goriva za promatrane grupe vozila.

Tablica 4.7. Udio vrste goriva po promatranim grupama vozila

GODINA	GRUPA (UN-ECE)	UDIJO VRSTE POGONSKOG GORIVA (%)				
		BENZIN	DIESEL	BENZIN-LPG	BENZIN-CNG	ELEKTRICNI
2012.g.	OSOBNA VOZILA	58,452	37,845	3,675	0,004	0,001
	MOTOCIKLI	99,980	0,001	0,000	0,000	0,018
	AUTOBUSI	0,086	98,535	0,022	1,357	0,000
	TERETNA VOZILA	3,206	96,277	0,476	0,035	0,002
2013.g.	OSOBNA VOZILA	57,040	39,225	3,701	0,003	0,001
	MOTOCIKLI	99,970	0,002	0,000	0,000	0,028
	AUTOBUSI	0,062	98,201	0,021	1,716	0,000
	TERETNA VOZILA	3,133	96,331	0,505	0,025	0,002
2014.g.	OSOBNA VOZILA	55,056	41,175	3,705	0,004	0,005
	MOTOCIKLI	99,970	0,001	0,000	0,000	0,028
	AUTOBUSI	0,078	98,000	0,020	1,647	0,000
	TERETNA VOZILA	2,987	96,395	0,561	0,044	0,005

Iz tablice 4.7. vidljivo je kako najveći udio pogonskih goriva kod promatranih grupa vozila čine klasična benzinska i dizelska goriva dok udio za ostale vrste ekološki prihvatljivijih goriva kroz promatrano razdoblje postepeno raste. Razlog tome može biti i uvođenje novih emisijskih standarda (razina EURO 6).

Starost vozila

Starost vozila važno je obilježje stanja na tržištu automobila, a još važniji pokazatelj stanja sigurnosti u prometu na cestama. Prema podacima Centra za vozila Hrvatske (CVH, Statistika za 2014.) za promatrane grupe vozila od ukupno 1.733.421 vozila, 1.043.741 (60,21%) je staro deset i više godina. Slijede vozila starosti šest do devet godina kojih ima 450.695 odnosno 26,00%. Od dvije do pet godina starosti je 191.284 (11,04%). Starosti do jedne godine ima 47.701 odnosno 2,75% vozila. Prema ovim podacima utvrđeno je da za 2014.g. prosječna starost automobila u Hrvatskoj iznosi 11,38 godina za promatrane grupe

vozila. U tablici 4.8. prikazan je broj vozila prema starosti za sve promatrane grupe vozila. Vozila su podijeljena u četiri kategorije starosti, i to do 1 godine, 2-5 godina, 6-9 godina i 10 i više godina.

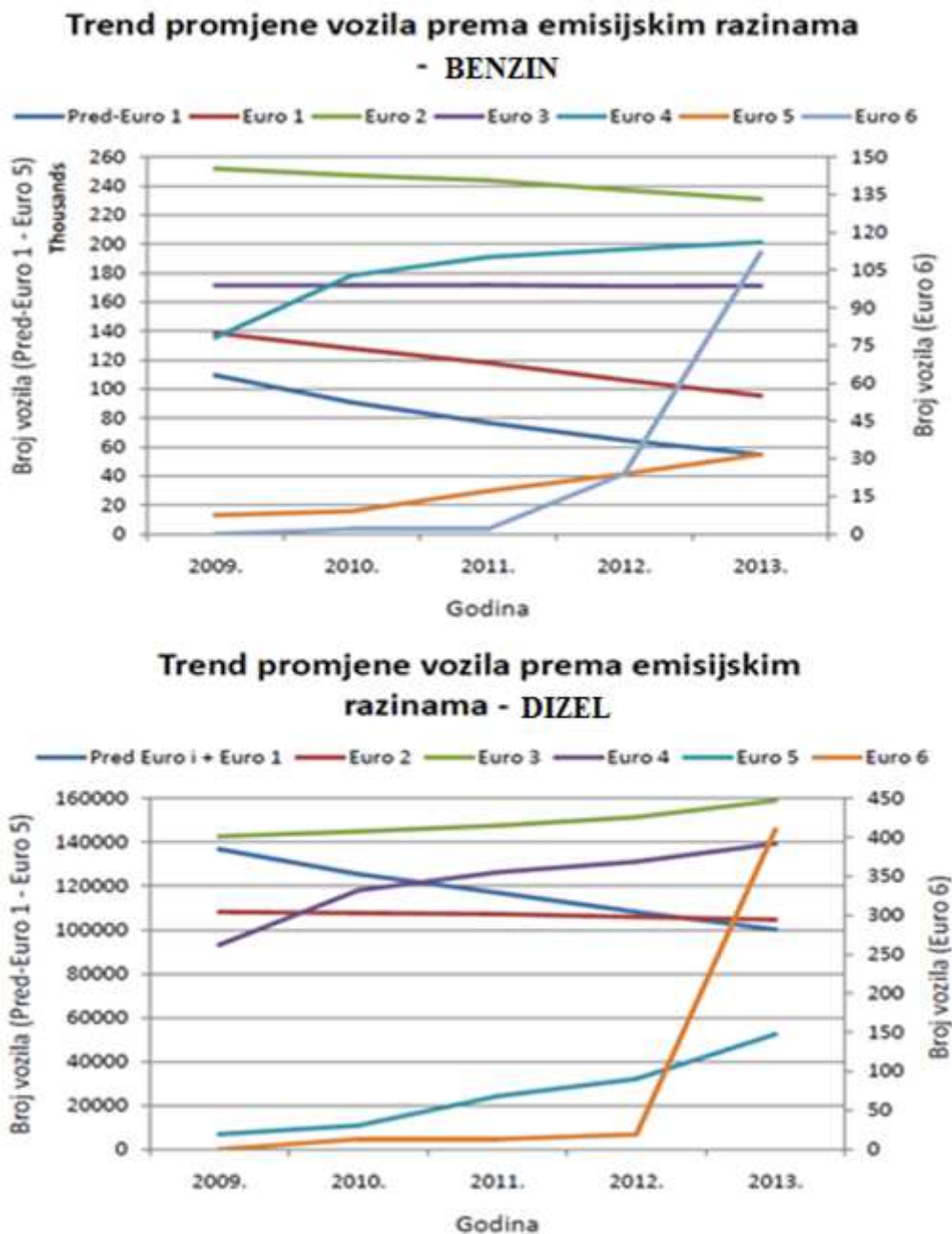
Tablica 4.8. Starost vozila po promatranim grupama vozila

		STAROST VOZILA					
		10 i više	6-9	2-5	1 godina	Ukupno vozila	Prosječna starost
GODINA	GRUPA (UN-ECE)	godina	godina	godina	godina		
2012.g.	OSOBNA VOZILA	40.489	49.862	52.198	4.418	1469.67	11,38
	MOTOCIKLI	806.501	311.510	246.686	33.088	1.397.785	8,54
	AUTOBUSI	2.555	954	1013	119	4.641	11,31
	TERETNA VOZILA	69.720	34.703	28.309	4.430	137.162	11,26
						1.539.588	10,62
2013.g.	OSOBNA VOZILA	50.562	56.270	35.949	3.842	146.623	11,80
	MOTOCIKLI	859.222	321.862	207.180	29.855	1.418.119	9,36
	AUTOBUSI	2.724	1.141	782	189	4.836	11,41
	TERETNA VOZILA	72.714	37.487	21.633	6.115	137.949	11,43
						1.707.527	11,00
2014.g.	OSOBNA VOZILA	59.508	61.559	19.927	4.073	145.067	12,14
	MOTOCIKLI	905.662	345.915	155.658	37.245	1.444.480	10,10
	AUTOBUSI	2.907	1.383	608	203	5.101	11,54
	TERETNA VOZILA	75.664	41.838	15.091	6.180	138.773	11,73
						1.733.421	11,38

Iz tablice 4.8. može se zaključiti da je od 2012. godine porastao broj vozila starosti 10 i više godina i 6-9 godina kao i da se broj vozila u kategorijama starosti do 1 godine i 2-5 godine smanjio. Sve navedeno jasno upućuje kako se prosječna starost promatranih grupa vozila u RH povećala.

Emisijski standardi (razine)

Analiza stanja voznog parka prema emisijskim standardima napravljena je prema prikupljenim podacima Centra za vozila Hrvatske (CVH) za razdoblje od 2009. godine do 2013. godine. Ova analiza prikazuje kako se mijenja stanje voznog parka u RH-u u zadnjih nekoliko godina. Na grafikonu 4.2. prikazan je trend promjene vozila prema emisijskim razinama za vozila pogonjena benzinskim i dizelskim motorom.



Grafikon 4.2. Promjena broja vozila prema apsolutnim vrijednostima emisijskih razina za vozila pogonjena benzinskim i dizelskim motorom

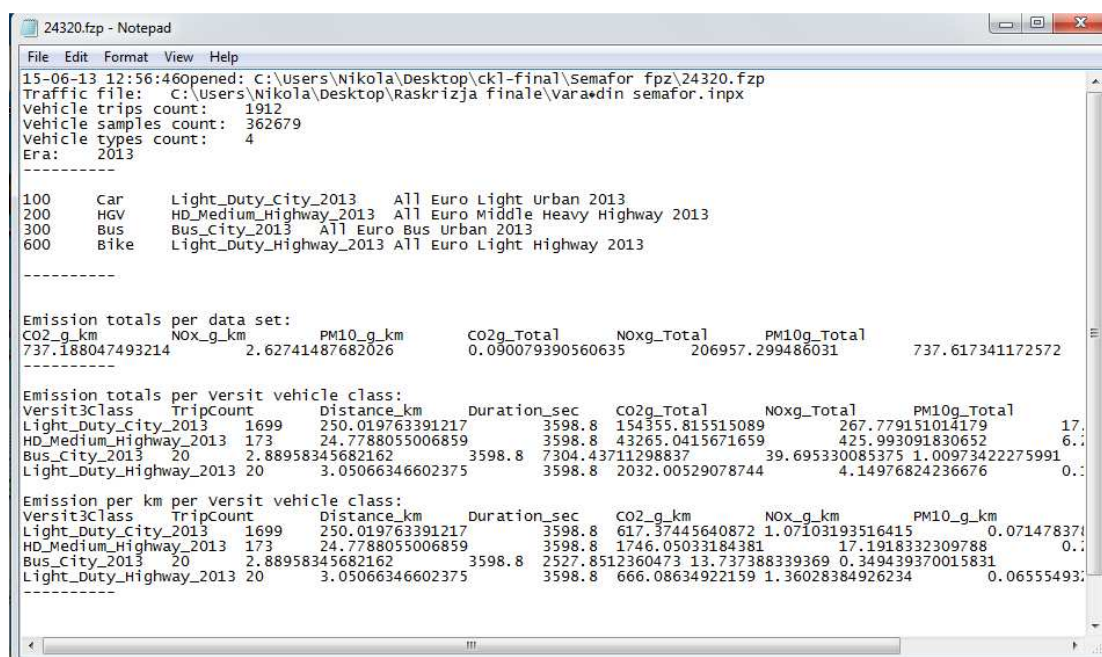
Iz grafikona 4.2. primijećeno je kako se broj vozila s manjom emisijskom razinom (ekološki neprihvatljiva vozila) smanjio, a broj vozila s većom emisijskom razinom (ekološki prihvatljivija vozila) povećao.

4.2.2.2. Postavke EnViVera

Izlazni rezultati prometnog modela VISSIM (ekstenzija .fzp) u znanstvenom eksperimentu i prikupljeni podatci o voznom parku na području RH-a (kategorija vozila, vrsta pogonskog goriva i prosječna starost vozila) predstavljaju osnovne informacije koje se unose u postavke programskog paketa EnViVer za izračun emisije štetnih ispušnih plinova (CO₂, NO_x i PM₁₀). Za ispravnost simulacije vrlo je važno da su postavke u modelu usklađene sa stvarnim prikupljenim stanjima iz okoline (prometni model i stanje voznog parka u RH-u). Postupak modeliranja u programskom paketu EnViVer detaljnije je objašnjen u literaturi [40, 43, 44].

4.2.2.3. Izlazni rezultati

Izlazni rezultati iz emisijskog modela odnose se na cjelokupno raskrižje, a sadrže ukupnu emisiju štetnih ispušnih plinova za CO₂, NO_x i PM₁₀. Nakon svake provedene simulacije u emisijskom modelu izlazni podatci spremljeni su u tekstualnu bazu programskog paketa EnViVer (ekstenzija .txt, vidi sliku 4.2.) koji su kasnije implementirani u završnu odredišnu bazu.



```
24320.fzp - Notepad
File Edit Format View Help
15-06-13 12:56:46opened: C:\Users\Nikola\Desktop\ck1-final\semafor fpz\24320.fzp
Traffic file: C:\Users\Nikola\Desktop\Raskrizja finale\Varadin semafor.inpx
vehicle trips count: 1912
vehicle samples count: 362679
vehicle types count: 4
Era: 2013
-----
100 Car Light_Duty_City_2013 All Euro Light urban 2013
200 HGV HD_Medium_Highway_2013 All Euro Middle Heavy Highway 2013
300 Bus Bus_City_2013 All Euro Bus Urban 2013
600 Bike Light_Duty_Highway_2013 All Euro Light Highway 2013
-----
Emission totals per data set:
CO2_g_km NOx_g_km PM10_g_km
737.188047493214 2.62741487682026 0.090079390560635 206957.299486031 737.617341172572
-----
Emission totals per versit vehicle class:
Versit3Class TripCount Distance_km Duration_sec CO2g_Total NOxg_Total PM10g_Total
Light_Duty_City_2013 1699 250.019763391217 3598.8 154355.815515089 267.779151014179 17.
HD_Medium_Highway_2013 173 24.7788055006859 3598.8 43265.0415671659 425.993091830652 6.
Bus_City_2013 20 2.88958345682162 3598.8 7304.43711298837 39.695330085375 1.00973422275991
Light_Duty_Highway_2013 20 3.05066346602375 3598.8 2032.00529078744 4.14976824236676 0.
-----
Emission per km per versit vehicle class:
Versit3Class TripCount Distance_km Duration_sec CO2_g_km NOx_g_km PM10_g_km
Light_Duty_City_2013 1699 250.019763391217 3598.8 617.37445640872 1.07103193516415 0.07147837
HD_Medium_Highway_2013 173 24.7788055006859 3598.8 1746.05033184381 17.1918332309788 0.
Bus_City_2013 20 2.88958345682162 3598.8 2527.8512360473 13.737388339369 0.349439370015831
Light_Duty_Highway_2013 20 3.05066346602375 3598.8 666.08634922159 1.36028384926234 0.06555493
```

Slika 4.2. Izlazni rezultati emisijskog modela

4.3. Statističko modeliranje

Statističko modeliranje prethodno opisanih podataka provedeno je programskim paketom *R* (verzija 3.2.2) uz korištenje postojećih algoritama i procedura, a razvijene su i specijalne procedure za ovu primjenu. Osim primjene u samom statističkom modeliranju ekstenzivno su se koristile i grafičke funkcionalnosti paketa.

4.3.1. Metode u statističkom modeliranju

Analiza podataka provedena je metodom višestruke linearne regresije. Modeliranje je provedeno zasebno za svaku zavisnu varijablu s ciljem pronalaženja modela koji, s obzirom na prikupljeni uzorak, najbolje opisuje varijaciju u zavisnoj varijabli. Osim što bolje prilagodbe modela podacima iz uzorka, glavni kriterij za dobivanje dobrog modela je njegova sposobnost generalizacije na populaciju od interesa. Uz samu prediktivnu sposobnost modela, od interesa je i učinak koji pojedina nezavisna varijabla ima na vrijednosti zavisne varijable. S obzirom da su podaci korišteni u modeliranju dobiveni računalnim simulacijama koje ne mogu postići razinu reprezentativnosti slučajnog uzorka iz stvarne populacije, teško je donositi zaključke o uzročno–posljedičnim vezama. S druge strane, prednost simulacijskog modela je što omogućuje analizu velikog broja kombinacija vrijednosti nezavisnih varijabli s dovoljno velikim uzorkom koji je jedino ograničen računalnom snagom i raspoloživim vremenom za provedbu simulacija. Na ovaj način moguće je istražiti velik broj interakcija između varijabli, kao i složenije oblike povezanosti između nezavisnih i zavisnih varijabli. U svim modelima su osim zadanih nezavisnih varijabli uključene i njihove međusobne interakcije, odnosno članovi modela koji moderiraju utjecaj pojedine nezavisne varijable na zavisnu varijablu u ovisnosti od vrijednosti drugih nezavisnih varijabli uključenih u dotičnu interakciju. Analiza je za svaku zavisnu varijablu započeta prilagođavanjem osnovnog regresijskog modela koji uključuje samo originalne nezavisne varijable, a koji se tokom analize proširivao. Analizom reziduala utvrđeno je postoji li značajno odstupanje od pretpostavki normalnosti i homogenosti varijance, postoje li značajni outlieri (netipične vrijednosti) te je li povezanost linearna. U tu svrhu su korišteni kvantil–kvantil dijagrami, pravokutni dijagrami, razni dijagrami raspršenja i testovi značajnosti. Kod pretpostavke normalnosti, uz standardni Lilliefors test korišteni su kvantil–kvantil dijagrami kojima je dodano 95% područje značajnosti. Homogenost varijance provjeravana je dijagramima raspršenja te Breusch-Pagan testom nekonstantnosti varijance koji testira postoji li veza između varijance reziduala i određenih kombinacija nezavisnih varijabli. Postojanje outliera,

kao i postojanje sistematskog nelinearnog oblika u rezidualima je provjeravano dijagramima raspršenja. U slučaju nenormalnosti i heterogenosti varijance modela provedena je Box – Coxova metoda za procjenu najbolje transformacije nad zavisnom varijablom u smislu regresijskog modela. Primjenom odabrane transformacije ponovljena je navedena analiza pretpostavki. Neslučajni oblici u dijagramima raspršenja reziduala upućuju na postojanje nelinearnih efekata koji nisu pokriveni postojećim modelom. Kako bi se što više linearizirali efekti, po potrebi se u model dodao kvadratni član ukupne količine prometa kao jedine kontinuirane nezavisne varijable. Kod modela kod kojih je i nakon navedenih intervencija preostala određena heterogenost varijance primijenjena je vagana metoda najmanjih kvadrata (*WLS* – *weighted least squares*). Za razliku od obične metode najmanjih kvadrata (*OLS* – *ordinary least squares*) gdje svi reziduali imaju jednak utjecaj na parametre modela, kod *WLS* se reziduali važu (ponderiraju) koeficijentima koji su obrnuto proporcionalni varijanci reziduala. Na taj način se područja kod kojih reziduali imaju veliku varijancu (što ujedno znači da imaju manju razinu izvjesnosti) umanjuje utjecaj na parametre modela. U ovom slučaju pokazalo se da je kombinacija nezavisnih varijabli ukupnog prometa i tipa raskrižja kod svih modela objasnila većinu heterogenosti varijance. Tako je za svaku kombinaciju količine prometa i tipa raskrižja na osnovu preliminarnog *OLS* regresijskog modela izračunata varijanca reziduala te se potom recipročna vrijednost te varijance koristi kao koeficijent u *WLS* metodi. Na ovaj način se anulira heterogenost varijance te su svi dobiveni parametri kao i njihove varijance nepristrani. Činjenica je da se dodavanjem novih članova dobiva model koji opisuje sve više varijacije u zavisnoj varijabli, no to ne garantira da će se takav model dobro ponašati na nekom drugom uzorku iz iste populacije. Dodavanje previše članova (nezavisnih varijabli, njihovih interakcija i transformacija) u model može dovesti do pojave koja se zove *overfitting*³. Takvi modeli su skloni opisivati varijaciju koja je specifična samo za uzorak u pitanju, ali ne i za populaciju, pa na nekom drugom uzorku imaju loše performanse. Zbog opasnosti od *overfittinga*, ključni dio analize je odabir članova koji će biti uključeni u model. Kako je uzorak na kojem se razvijaju modeli relativno velik, u modelima su uz originalne nezavisne varijable uključene i sve interakcije prvog reda, odnosno interakcije između parova nezavisnih varijabli. Daljnji proces odabira varijabli kombinira ručno provjeravanje različitih modela algoritmom najboljih podskupova (*best subsets*). Kao kriteriji za odabir korišteni su koeficijent determinacije (*coefficient of determination*) R^2 , Akaike informacijski kriterij (*Akaike information criteria*) AIC i predikcijska suma kvadrata

³ *Overfitting* se događa kad je model prekomjerno složen, kao što je previše parametara u odnosu na broj promatranja.

reziduala (predicted residual sum of squares) PRESS. Kod svih zavisnih varijabli pokazalo se da interakcije trećeg reda i naviše ne doprinose modelima. Detaljnom analizom odabrane su interakcije drugog reda koje su uključene u model.

4.3.2. Rezultati statističkog modeliranja

Rezultati regresijskog modela za sve zavisne varijable prikazani su u tablici 4.9. U tablici su navedeni svi regresijski koeficijenti kao i pripadajuće standardne devijacije.

Tablica 4.9. Rezultati statističkih modela - odnosi se na transformirane podatke

	Koeficijent (standardna devijacija koeficijenta)	
	Model 1: log(DELAY)	Model 2: NOX ^{1/2}
CONSTANT	-3.04E-01 (2.52E-02) ***	2.08E+00 (1.27E-01) ***
INTERSECT_TYPE		
ROUNDAABOUT	8.55E-01 (2.72E-02) ***	1.49E-01 (1.30E-01)
TRAFFIC_LIGHTS	2.61E+00 (2.66E-02) ***	2.42E+00 (1.54E-01) ***
HEAVY_VEHICLE		
0.1	3.49E-02 (9.31E-03) ***	1.01E+00 (1.23E-01) ***
VOLUME_RATIO		
1.5	-6.70E-02 (2.58E-02) **	-1.26E-01 (1.42E-01)
2	-1.05E-01 (2.58E-02) ***	-3.06E-01 (1.42E-01) *
VOLUME		
VOLUME	2.60E-03 (3.03E-05) ***	1.47E-02 (1.62E-04) ***
VOLUME ²	2.57E-07 (4.73E-09) ***	-1.57E-06 (4.85E-08) ***
MAJORTURN		
10_80_10	-1.03E-01 (2.76E-02) ***	-2.53E-01 (8.69E-02) **
30_60_10	4.69E-02 (2.76E-02)	-1.20E-01 (8.69E-02)
MINORTURN		
40_20_40	7.94E-02 (2.53E-02) **	3.11E-01 (8.69E-02) ***
45_30_25	-1.62E-02 (2.53E-02)	5.90E-02 (8.69E-02)
INTERSECT_TYPE × HEAVY_VEHICLE		
ROUNDAABOUT × 0.1	-2.63E-02 (8.32E-03) **	-3.41E-01 (1.16E-01) **
TRAFFIC_LIGHTS × 0.1	-2.07E-02 (8.09E-03) *	1.01E+00 (1.33E-01) ***
INTERSECT_TYPE × VOLUME_RATIO		
ROUNDAABOUT × 1.5	5.31E-02 (2.66E-02) *	2.36E-01 (1.42E-01)
TRAFFIC_LIGHTS × 1.5	1.23E-01 (2.58E-02) ***	2.53E-01 (1.63E-01)
ROUNDAABOUT × 2	6.47E-02 (2.66E-02) *	5.56E-01 (1.42E-01) ***
TRAFFIC_LIGHTS × 2	1.35E-01 (2.58E-02) ***	7.38E-01 (1.63E-01) ***
INTERSECT_TYPE × VOLUME		
ROUNDAABOUT × VOLUME	-1.65E-03 (3.04E-05) ***	-1.14E-03 (1.52E-04) ***
TRAFFIC_LIGHTS × VOLUME	-2.67E-03 (3.00E-05) ***	-2.73E-03 (1.62E-04) ***
INTERSECT_TYPE × MAJORTURN		
ROUNDAABOUT × 10_80_10	1.29E-01 (3.02E-02) ***	3.15E-01 (7.06E-02) ***
TRAFFIC_LIGHTS × 10_80_10	1.19E-01 (2.91E-02) ***	1.22E-01 (7.77E-02)
ROUNDAABOUT × 30_60_10	3.66E-02 (3.02E-02)	2.90E-01 (7.06E-02) ***

Nikola Šubić: 4. STATISTIČKI MODEL PROCJENE UTJECAJA PLANIRANIH KRUŽNIH RASKRIŽJA NA OKOLIŠ I GOSPODARSTVO

TRAFFIC_LIGHTS × 30_60_10	-8.75E-02 (2.91E-02) **	2.12E-01 (7.77E-02) **
INTERSECT_TYPE × MINORTURN		
ROUNDAABOUT × 40_20_40	-1.07E-01 (2.65E-02) ***	-2.18E-01 (7.06E-02) **
TRAFFIC_LIGHTS × 40_20_40	-9.34E-02 (2.55E-02) ***	-7.50E-02 (7.77E-02)
ROUNDAABOUT × 45_30_25	1.03E-02 (2.65E-02)	3.07E-02 (7.06E-02)
TRAFFIC_LIGHTS × 45_30_25	-1.62E-02 (2.55E-02)	1.81E-03 (7.77E-02)
HEAVY_VEHICLE × VOLUME_RATIO		
0.1 × 1.5	-3.29E-03 (4.85E-03)	-7.56E-02 (9.92E-02)
0.1 × 2	-1.41E-02 (4.85E-03) **	1.24E-01 (9.92E-02)
HEAVY_VEHICLE × VOLUME		
0.1 × VOLUME	1.39E-05 (4.22E-06) **	5.84E-03 (1.48E-04) ***
HEAVY_VEHICLE × MAJORTURN		
0.1 × 10_80_10	-1.28E-03 (4.85E-03)	1.04E-01 (4.87E-02) *
0.1 × 30_60_10	7.90E-03 (4.85E-03)	1.57E-01 (4.87E-02) **
HEAVY_VEHICLE × MINORTURN		
0.1 × 40_20_40	4.33E-03 (4.85E-03)	4.58E-02 (4.87E-02)
0.1 × 45_30_25	-2.57E-03 (4.85E-03)	3.29E-02 (4.87E-02)
VOLUME_RATIO × VOLUME		
1.5 × VOLUME	5.40E-05 (2.85E-05)	1.31E-04 (1.76E-04)
2 × VOLUME	8.68E-05 (2.85E-05) **	5.46E-04 (1.76E-04) **
VOLUME_RATIO × MAJORTURN		
1.5 × 10_80_10	-1.58E-02 (2.38E-02)	2.01E-02 (5.97E-02)
2 × 10_80_10	-2.62E-02 (2.38E-02)	-3.80E-02 (5.97E-02)
1.5 × 30_60_10	-3.08E-02 (2.38E-02)	7.44E-02 (5.97E-02)
2 × 30_60_10	-3.30E-02 (2.38E-02)	2.29E-02 (5.97E-02)
VOLUME_RATIO × MINORTURN		
1.5 × 40_20_40	2.46E-02 (1.42E-02)	-2.94E-02 (5.97E-02)
2 × 40_20_40	1.26E-02 (1.42E-02)	-1.63E-01 (5.97E-02) **
1.5 × 45_30_25	3.02E-02 (1.42E-02) *	7.81E-02 (5.97E-02)
2 × 45_30_25	3.28E-02 (1.42E-02) *	-4.33E-02 (5.97E-02)
VOLUME × MAJORTURN		
VOLUME × 10_80_10	4.52E-05 (2.76E-05)	-4.90E-05 (4.97E-05)
VOLUME × 30_60_10	-1.35E-04 (2.76E-05) ***	7.16E-05 (4.97E-05)
VOLUME × MINORTURN		
VOLUME × 40_20_40	-3.52E-05 (2.75E-05)	1.02E-05 (4.97E-05)
VOLUME × 45_30_25	6.79E-05 (2.75E-05) *	1.14E-04 (4.97E-05) *
MAJORTURN × MINORTURN		
10_80_10 × 40_20_40	5.74E-02 (2.23E-02) *	-5.82E-02 (5.97E-02)
30_60_10 × 40_20_40	1.93E-02 (2.23E-02)	-6.55E-02 (5.97E-02)
10_80_10 × 45_30_25	4.24E-02 (2.23E-02)	-4.26E-02 (5.97E-02)
30_60_10 × 45_30_25	7.49E-03 (2.23E-02)	-1.28E-01 (5.97E-02) *
INTERSECT_TYPE × VOLUME_RATIO × VOLUME		
ROUNDAABOUT × 1.5 × VOLUME	-1.85E-05 (2.81E-05)	-3.85E-04 (1.84E-04) *
TRAFFIC_LIGHTS × 1.5 × VOLUME	-1.59E-04 (2.74E-05) ***	-4.55E-04 (1.87E-04) *
ROUNDAABOUT × 2 × VOLUME	-2.24E-05 (2.81E-05)	-9.00E-04 (1.84E-04) ***
TRAFFIC_LIGHTS × 2 × VOLUME	-1.60E-04 (2.74E-05) ***	-1.14E-03 (1.87E-04) ***
INTERSECT_TYPE × VOLUME_RATIO × MAJORTURN		
ROUNDAABOUT × 1.5 × 10_80_10	1.04E-02 (2.50E-02)	
TRAFFIC_LIGHTS × 1.5 × 10_80_10	-6.80E-03 (2.43E-02)	

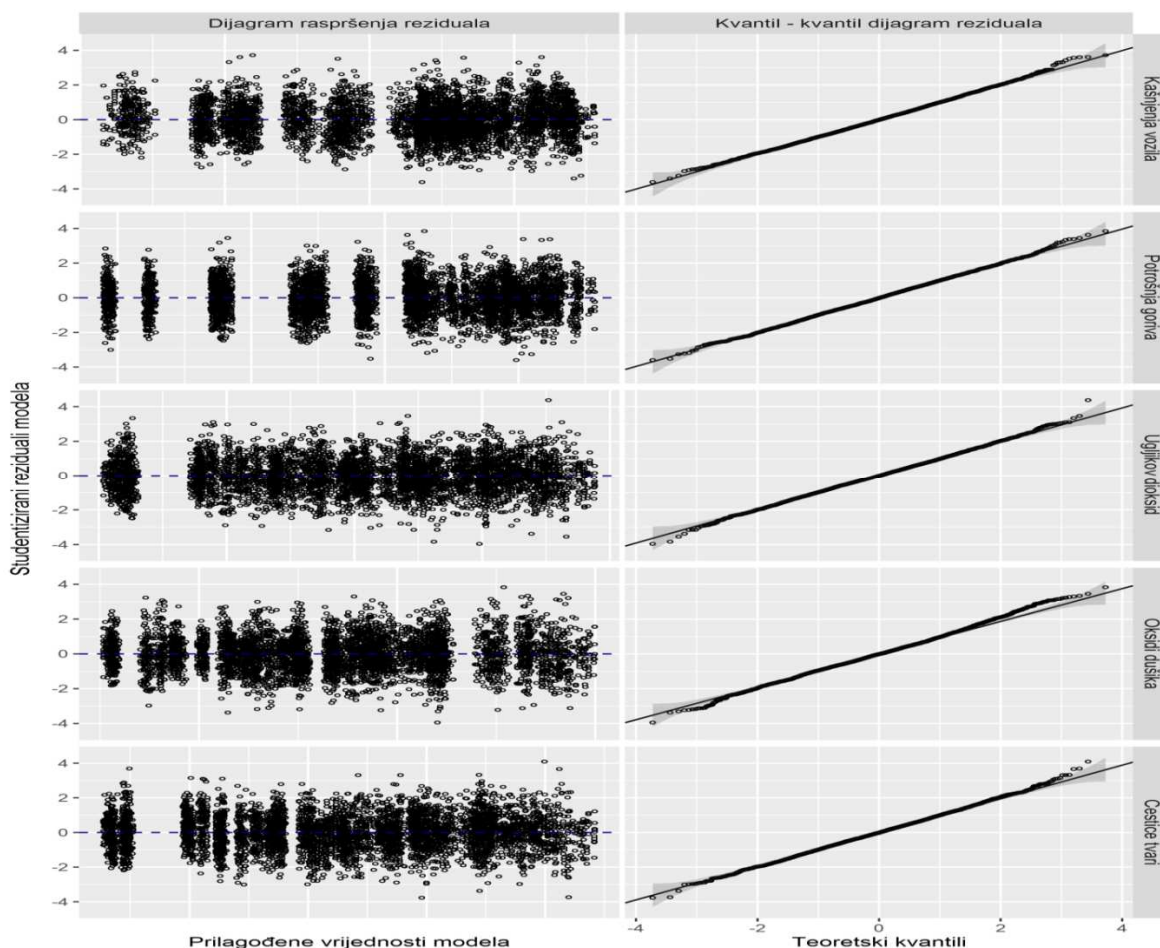
Nikola Šubić: 4. STATISTIČKI MODEL PROCJENE UTJECAJA PLANIRANIH KRUŽNIH RASKRIŽJA NA OKOLIŠ I GOSPODARSTVO

ROUNDABOUT × 2 × 10_80_10	5.18E-02 (2.50E-02) *	
TRAFFIC_LIGHTS × 2 × 10_80_10	7.83E-03 (2.43E-02)	
ROUNDABOUT × 1.5 × 30_60_10	-1.57E-02 (2.50E-02)	
TRAFFIC_LIGHTS × 1.5 × 30_60_10	9.00E-03 (2.43E-02)	
ROUNDABOUT × 2 × 30_60_10	2.95E-02 (2.50E-02)	
TRAFFIC_LIGHTS × 2 × 30_60_10	5.62E-02 (2.43E-02) *	
INTERSECT_TYPE × VOLUME × MAJORTURN		
ROUNDABOUT × VOLUME × 10_80_10	-2.31E-05 (2.81E-05)	
TRAFFIC_LIGHTS × VOLUME × 10_80_10	-5.75E-05 (2.74E-05) *	
ROUNDABOUT × VOLUME × 30_60_10	1.72E-04 (2.81E-05) ***	
TRAFFIC_LIGHTS × VOLUME × 30_60_10	2.27E-04 (2.74E-05) ***	
INTERSECT_TYPE × VOLUME × MINORTURN		
ROUNDABOUT × VOLUME × 40_20_40	1.17E-04 (2.81E-05) ***	
TRAFFIC_LIGHTS × VOLUME × 40_20_40	1.25E-04 (2.74E-05) ***	
ROUNDABOUT × VOLUME × 45_30_25	5.36E-05 (2.81E-05)	
TRAFFIC_LIGHTS × VOLUME × 45_30_25	3.61E-05 (2.74E-05)	
VOLUME_RATIO × VOLUME × MAJORTURN		
1.5 × VOLUME × 10_80_10	5.42E-06 (1.27E-05)	
2 × VOLUME × 10_80_10	-8.59E-06 (1.27E-05)	
1.5 × VOLUME × 30_60_10	6.37E-05 (1.27E-05) ***	
2 × VOLUME × 30_60_10	5.04E-05 (1.27E-05) ***	
VOLUME_RATIO × VOLUME × MINORTURN		
1.5 × VOLUME × 40_20_40	-4.61E-05 (1.22E-05) ***	
2 × VOLUME × 40_20_40	-5.35E-05 (1.22E-05) ***	
1.5 × VOLUME × 45_30_25	-5.44E-05 (1.22E-05) ***	
2 × VOLUME × 45_30_25	-7.59E-05 (1.22E-05) ***	
INTERSECT_TYPE × MAJORTURN × MINORTURN		
ROUNDABOUT × 10_80_10 × 40_20_40	-6.54E-02 (2.46E-02) **	
TRAFFIC_LIGHTS × 10_80_10 × 40_20_40	-6.94E-02 (2.35E-02) **	
ROUNDABOUT × 30_60_10 × 40_20_40	-3.54E-02 (2.46E-02)	
TRAFFIC_LIGHTS × 30_60_10 × 40_20_40	-3.65E-02 (2.35E-02)	
ROUNDABOUT × 10_80_10 × 45_30_25	-4.45E-02 (2.46E-02)	
TRAFFIC_LIGHTS × 10_80_10 × 45_30_25	-4.41E-02 (2.35E-02)	
ROUNDABOUT × 30_60_10 × 45_30_25	-3.00E-02 (2.46E-02)	
TRAFFIC_LIGHTS × 30_60_10 × 45_30_25	-1.91E-02 (2.35E-02)	
INTERSECT_TYPE × HEAVY_VEHICLE × VOLUME		
ROUNDABOUT × 0.1 × VOLUME		-2.26E-03 (1.50E-04) ***
TRAFFIC_LIGHTS × 0.1 × VOLUME		-3.23E-03 (1.53E-04) ***
HEAVY_VEHICLE × VOLUME_RATIO × VOLUME		
0.1 × 1.5 × VOLUME		-1.78E-06 (8.99E-05)
0.1 × 2 × VOLUME		-2.70E-04 (8.99E-05) **
N	5130	5130
R ²	0.99	0.99
R _{adj} ²	0.99	0.99
F-statistic	F(88, 5041) = 5537 ***	F(60, 5069) = 7270 ***

Napomena:

Regresijsko modeliranje provedeno je metodom *weighted least squares* kako bi se u obzir uzela heterogenost varijance reziduala/ * označava p – vrijednost manju od 0.05; ** označava p–vrijednost manju od 0.01; *** označava p–vrijednost manju od 0.001.

Kod mjera kašnjenja vozila i potrošnje goriva navedene zavisne varijable transformirane su prirodnim logaritmom dok su kod preostalih emisijskih mjera zavisne varijable transformirane drugim korijenom. Također, samo dvije iteracije su bile dovoljne kako bi se stabilizirali koeficijenti modela. Na dijagramu 4.3. prikazani su dijagnostički dijagrami za svih pet finalnih modela. Prvi tip dijagrama (lijevo) prikazuje raspršenje studentiziranih reziduala s obzirom na prilagođene vrijednosti. Iz prikazanog se može vidjeti je li varijanca približno homogena na cijelom rasponu predviđenih vrijednosti, kao i je li zadovoljena pretpostavka linearnosti bez zamjetnih neslučajnih oblika. Rasponi prilagođenih vrijednosti nisu bitni, već samo njihov odnos s rezidualima pa su skale na x – osi izostavljene za sve mjere. Drugi tip dijagrama (desno) je kvantil – kvantil dijagram koji daje uvid u bliskost distribucije studentiziranih reziduala teoretskoj normalnoj distribuciji. Značajna nenormalnost bi se u njemu očitovala u većem odstupanju točaka dijagrama od zadanog pravca.



Dijagram 4.3. Dijagram studentiziranih reziduala: dijagrami raspršenja (lijevo) i kvantil – kvantil dijagrami (desno)

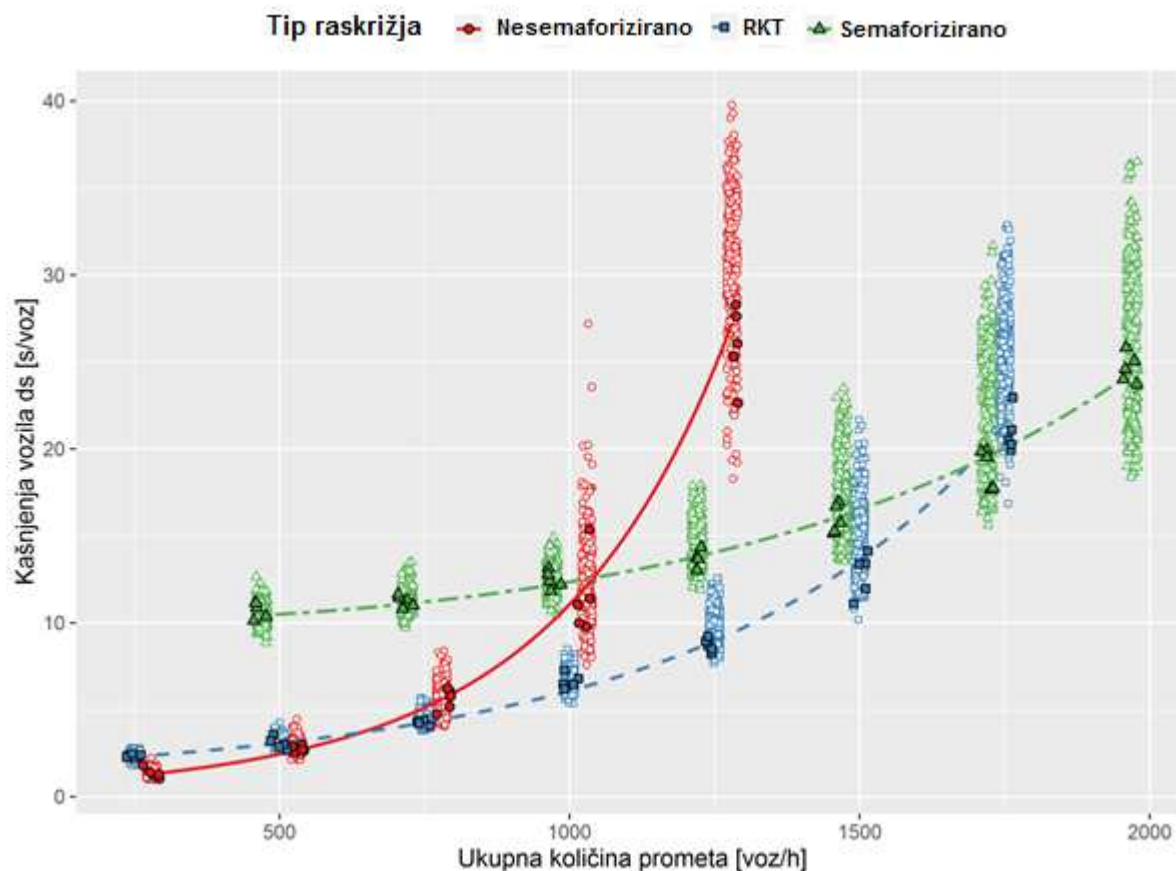
Iz dijagrama 4.3. vidljivo je da svi modeli zadovoljavaju osnovne pretpostavke regresijskog modeliranja. U dijagramima se ne očituje nikakva heterogenost varijance, a također je zadovoljena i pretpostavka linearnosti jer nema nikakvih zamjetnih odstupanja od slučajnog uzorka reziduala. Kvantil – kvantil dijagrami jako dobro prate zadane pravce te postoji eventualno manje odstupanje u nekoliko krajnjih točaka. Kod dušikovih oksida postoji malo veće odstupanje nego kod ostalih mjera, no ako se u obzir uzme veličina uzorka, kao i činjenica da navedeno odstupanje predstavlja samo malo „teže“ repove distribucije reziduala od teoretskih, a bez narušene simetrije, i taj je model prihvaćen kao valjan.

Kao prikaz rezultata modeliranja, nadalje su za svaku mjeru učinkovitosti dani dijagrami krivulja modela u ovisnosti od ukupne količine prometa (x - os), a s obzirom na tip raskrižja (boja). Na dijagramu su označeni i originalni podaci koji su zbog njihovog velikog broja blago horizontalno izmaknuti unutar svake grupe točaka kako bi se povećala preglednost. Iz istog razloga su krivulje i originalni podaci pomaknuti udesno, odnosno ulijevo, ovisno o tome na koji tip raskrižja se odnose. Budući ima puno kombinacija vrijednosti nezavisnih varijabli za koje bi se mogle prikazati krivulje modela, odabrane su osnovne vrijednosti nezavisnih varijabli koje su fiksirane u ovim dijagramima: postotak teških vozila – 2.5%, omjer količina prometa – 1:1, udjeli skretanja na glavnom smjeru – 10:80:10 i udjeli skretanja na sporednom smjeru – 25:50:25. Točke na dijagramu s bijelom unutrašnjošću označavaju sveukupne originalne podatke koji uključuju sve kombinacije nezavisnih varijabli dok istaknute točke s crnim obrubom označavaju originalne podatke koji odgovaraju osnovnim vrijednostima nezavisnih varijabli na koje se odnose krivulje. Kako je modeliranje provedeno na transformiranim zavisnim varijablama, krivulje su dobivene inverznom transformacijom predviđanja modela.

4.3.2.1. Kašnjenje vozila

Dijagram 4.4. prikazuje krivulje modela za mjeru kašnjenja vozila na raskrižjima. Iz dijagrama je vidljiva eksponencijalna priroda krivulja s obzirom na ukupnu količinu prometa što opravdava transformaciju zavisne varijable logaritmom u procesu modeliranja. Također, porastom ukupnog broja vozila povećava se i raspršenje unutar svakog tipa raskrižja. Dio tog raspršenja odgovara varijanci reziduala modela što se najbolje vidi iz istaknutih točaka koje se odnose na dane krivulje dok je dio raspršenja rezultat efekata ostalih nezavisnih varijabli te njihovih interakcija. Odnos tipova raskrižja je takav da je pri najmanjim količinama prometa

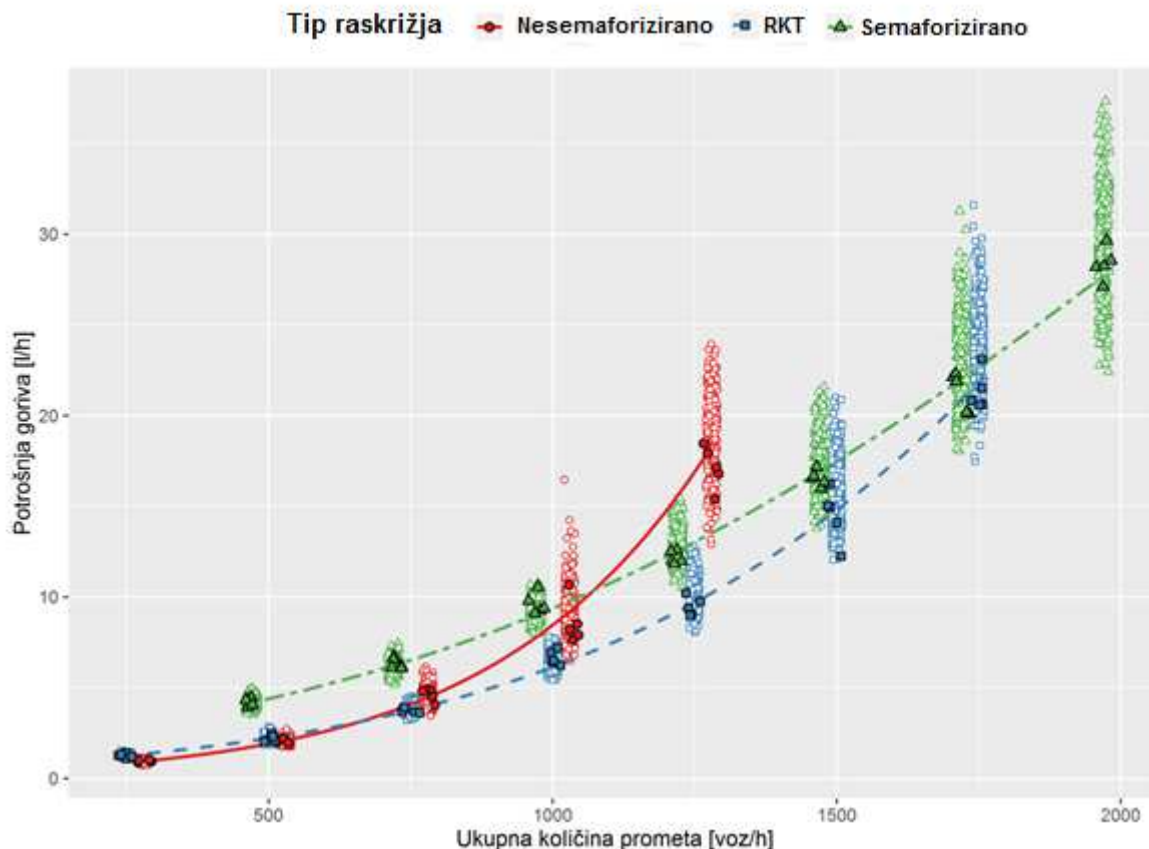
učinkovitije nesemaforizirano raskrižje, pri najvećim količinama prometa učinkovitije je semaforizirano raskrižje dok je RKT najučinkovitije pri srednjim količinama prometa.



Dijagram 4.4. Krivulje modela s podacima iz originalnog uzorka za kašnjenja vozila

4.3.2.2. Potrošnja goriva

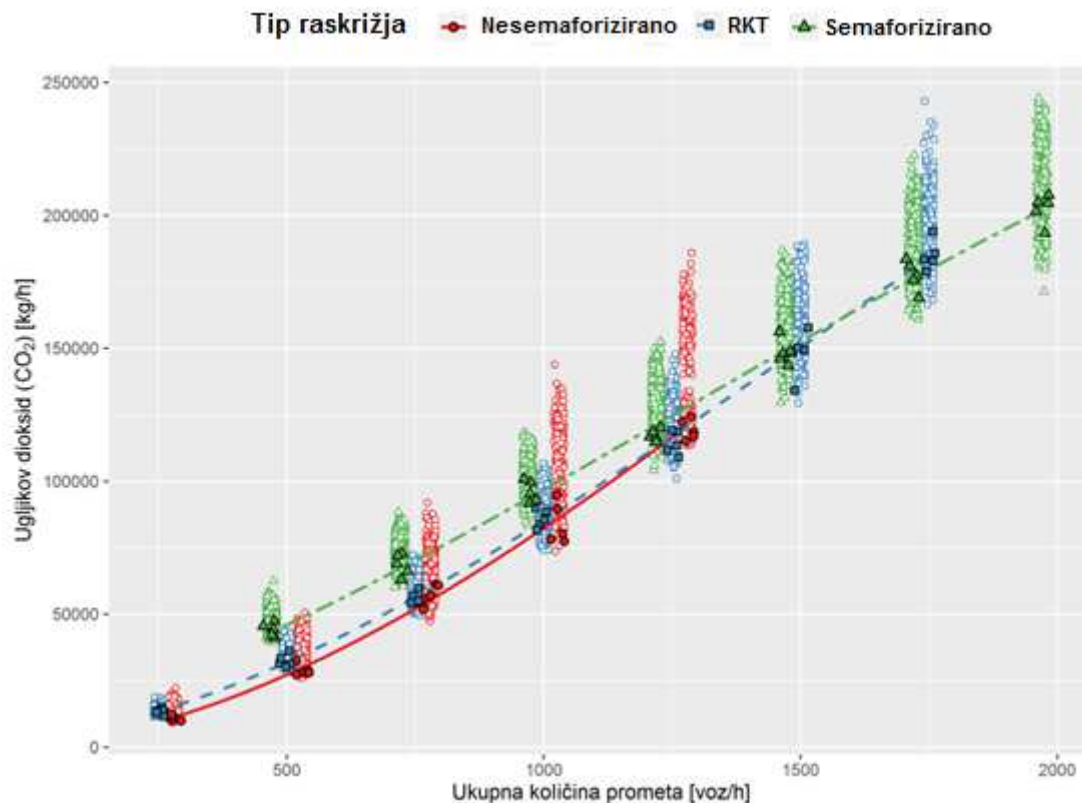
Dijagram 4.5. prikazuje krivulje modela za mjeru potrošnje goriva na raskrižjima. Iz dijagrama je također vidljiva eksponencijalna priroda krivulja s obzirom na ukupnu količinu prometa, no s manje izraženim nagibima od onih prisutnih kod kašnjenja vozila. Klasično nesemaforizirano i RKT raskrižje imaju jako bliske vrijednosti predviđanja pri manjim količinama prometa, do cca. 750 voz/h. Pri većim količinama je RKT znatno bolje rješenje od klasičnog nesemaforiziranog raskrižja, a tek pri najvećim količinama prometa semaforizirano raskrižje postaje najučinkovitije. Ostala razmatranja su slična onima navedenima za kašnjenja vozila.



Dijagram 4.5. Krivulje modela s podatcima iz originalnog uzorka za potrošnju goriva

4.3.2.3. Ugljikov dioksid

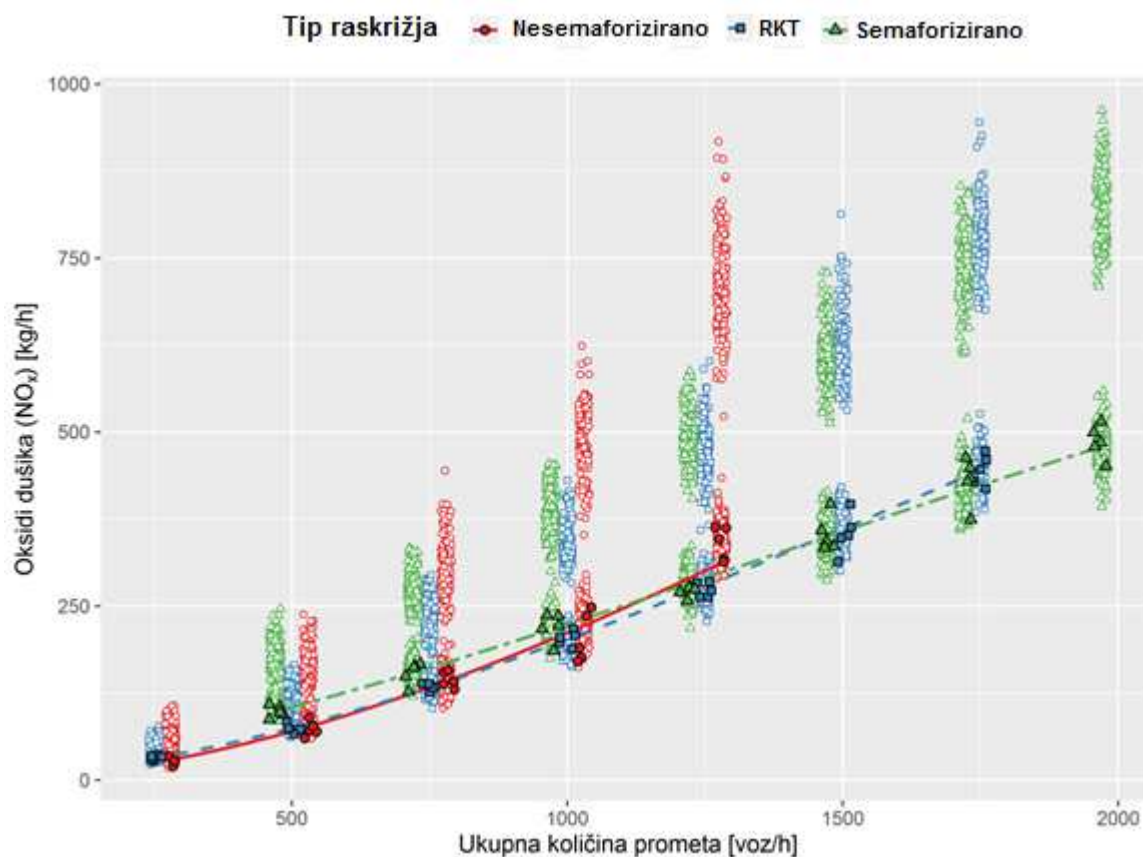
Na dijagramu 4.6. prikazane su krivulje modela za količinu ugljikovog dioksida. Iako je, kao i kod prethodnih mjera, vidljivo povećanje u raspršenju točaka kako raste ukupan promet, same krivulje nisu eksponencijalne, već samo blago zakrivljene. Ovakva prilagodba postignuta je transformacijom kvadratnim korijenom nad zavisnom varijablom te uključivanjem kvadratnog člana ukupne količine prometa. Klasično nesemaforizirano i RKT raskrižje imaju krivulje s jako bliskim vrijednostima pa područja učinkovitosti znatno variraju ovisno o kombinaciji vrijednosti ostalih nezavisnih varijabli koje utječu na pozicije krivulja. Kod klasičnog nesemaforiziranog raskrižja se pri 1.250 voz/h mogu razaznati dvije razdvojene grupe točaka koje odgovaraju postotcima teških vozila od 2.5% i 10%.



Dijagram 4.6. Krivulje modela s podacima iz originalnog uzorka za ugljikov dioksid

4.3.2.4. Dušikov oksid

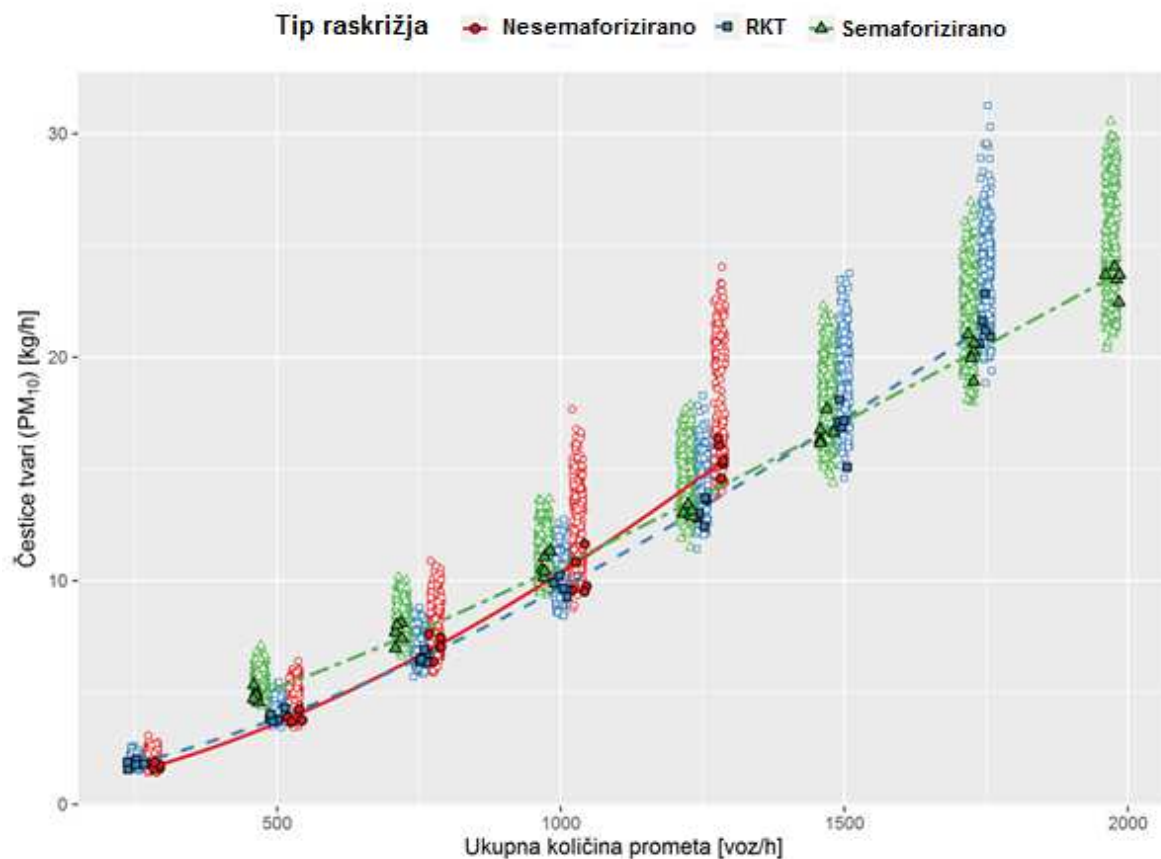
Na dijagramu 4.7. prikazane su krivulje modela za količinu dušikovih oksida na raskrižjima. Većina razmatranja za ugljikov dioksid vrijedi i ovdje. Krivulje za sva tri tipa raskrižja su vrlo bliske, no ipak je prisutna struktura područja učinkovitosti koja je zabilježena i kod prethodnih mjera. Na dijagramu su pri većem ukupnom prometu izražene dvije grupe točaka koje odgovaraju postotcima teških vozila od 2.5% i 10%. Efekt teških vozila je ovdje najveći od svih mjera učinkovitosti, a posebno je izražen kod nesemaforiziranog raskrižja.



Dijagram 4.7. Krivulje modela s podacima iz originalnog uzorka za okside dušika

4.3.2.5. Čestice tvari PM₁₀

Na dijagramu 4.8. prikazane su krivulje modela za količinu čestica tvari na raskrižjima. Priroda regresijskih krivulja je analogna ostalim emisijskim mjerama te, također, pokazuje istu strukturu područja učinkovitosti, a i ostale primjedbe uglavnom vrijede i ovdje. Efekt teških vozila nije tako izražen kao kod dušikovih oksida, već je po veličini bliži onom prisutnom kod ugljikovog dioksida.



Dijagram 4.8. Krivulje modela s podacima iz originalnog uzorka za čestice tvani

4.3.3. Analiza područja učinkovitosti: Johnson – Neyman metoda

Prethodno provedeno modeliranje opisuje povezanost između pojedine zavisne varijable i nezavisnih varijabli. Pomoću modela prikazanog u tablici 4.9. može se za bilo koju kombinaciju vrijednosti nezavisnih varijabli dati predviđanje mjera učinkovitosti. No praksa, kao i prethodno provedeno modeliranje, pokazuje da učinkovitost pojedinog tipa raskrižja u najvećoj mjeri ovisi o količini prometa na tom raskrižju. Iz tog razloga je moguće unaprijed izračunati područja granične vrijednosti količine prometa u kojima je određeni tip raskrižja statistički značajno bolji od ostalih tipova. Za izračun takvih područja u ovom radu je korištena Johnson – Neyman metoda.

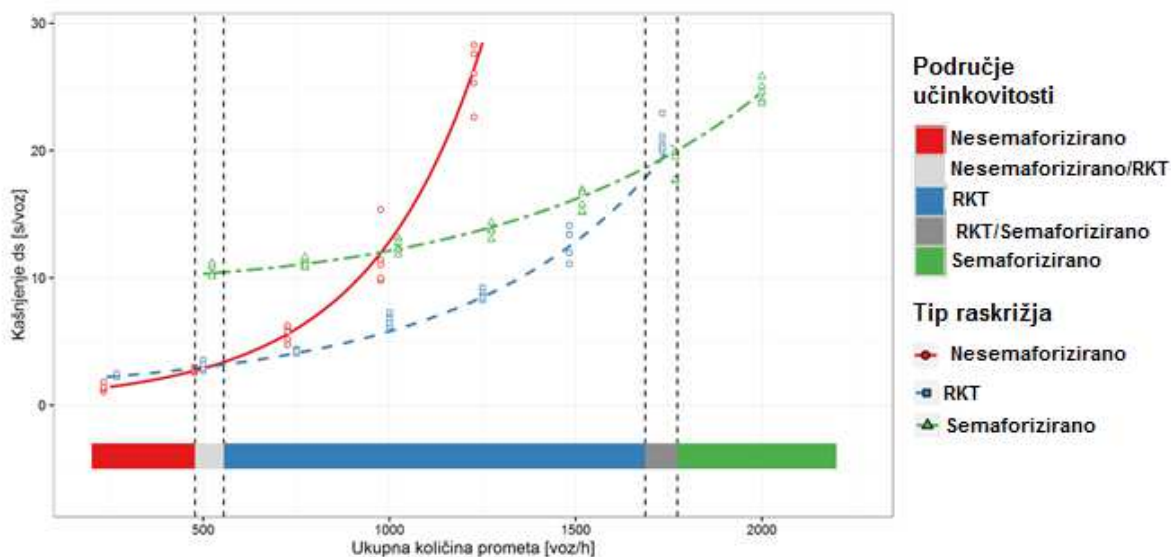
Johnson – Neyman (J-N) metoda originalno je razvijena kao proširenje ANCOVA (analiza kovarijance) za slučaj kad nagibi regresijskih linija kovarijata (kontinuirane moderatorske varijable) nisu jednaki unutar svake razine čimbenika (kategorijske varijable od interesa), odnosno kad je interakcija između moderatorske varijable i čimbenika značajna. U tom slučaju se ne mogu računati jednostavni efekti čimbenika jer oni ovisе o vrijednosti

kontinuirane moderatorske varijable. Ovom metodom mogu se izračunati područja značajnosti, odnosno intervali u rasponu moderatorske varijable u kojima efekti čimbenika jesu, odnosno nisu značajni. U samom računu J-N metode dobije se kvadratna jednadžba koja u slučaju značajne interakcije daje dvije nultočke dok kod interakcija koje nisu značajne neće biti realnih rješenja jednadžbe, odnosno regresijske linije su gotovo paralelne. Interval raspona moderatorske varijable koji se nalazi ispod manje nultočke jest područje značajne razlike za promatrani jednostavni efekt čimbenika. Isto tako, interval raspona moderatorske varijable koja se nalazi iznad veće nultočke jest područje značajne razlike za promatrani jednostavni efekt čimbenika, ali sa suprotnim predznakom. Interval između dvije nultočke jest područje neznačajnosti za promatrani jednostavni efekt čimbenika. Kako se J-N metoda provodi na osnovi računa višestruke linearne regresije, ona se može primijeniti na bilo koji slučaj višestruke linearne regresije. U sklopu višestruke linearne regresije, rezultati J-N metode mogu se usporediti s traženjem sjecišta regresijskih linija koje se odnose na razine čimbenika od interesa, no s razlikom da će određeni interval oko sjecišta biti područje gdje nema statistički značajne razlike među linijama, odnosno razinama čimbenika.

Na razmatranom slučaju moderatorska varijabla je ukupna količina prometa, a čimbenik interesa je tip raskrižja koji ima tri razine (klasično nesemaforizirano, RKT, semaforizirano) koje se međusobno uspoređuju. Provođenjem J-N metode dobivaju se područja značajnosti za svaku kombinaciju razina ostalih nezavisnih varijabli u modelu (udjeli skretanja na glavnoj cesti, udjeli skretanja na sporednoj cesti, omjer količine prometa na glavnoj u odnosu na sporednu cestu i postotak teških vozila u prometu). Kako bi se postigla razina značajnosti od 0.05 za cijelu grupu promatranih varijabli, koristi se Bonferroni korekcija razine značajnosti koja uzima u obzir sve kombinacije ostalih varijabli kao i tri usporedbe među tipovima raskrižja (razinama čimbenika od interesa). U sklopu ovakvog pristupa pomoću područja značajnosti mogu se definirati područja učinkovitosti – to su područja u kojima jedan ili više tipova raskrižja ima statistički značajno bolju učinkovitost s obzirom na mjeru učinkovitosti.

Na dijagramu 4.9. prikazana su područja učinkovitosti za jednu kombinaciju vrijednosti nezavisnih varijabli. Vrijednosti na koje su fiksirane nezavisne varijable u dijagramu su: udio teških vozila – 2.5%, omjer količina prometa – 1:1, udjeli skretanja na glavnom smjeru – 10:70:20 i udjeli skretanja na sporednom smjeru – 25:50:25. Na dijagramu je ispod krivulja modela dodan horizontalni stupčasti dijagram gdje svaka boja označava određeno područje učinkovitosti. Crvena, plava i zelena boja redom označavaju područja gdje su klasično

ne semaforizirano raskrižje, RKT ili semaforizirano raskrižje najučinkovitiji tip raskrižja. Svijetlosiva boja označava područje gdje su najučinkovitiji tipovi klasično ne semaforizirano i RKT, bez značajne razlike među njima. Isto tako, tamnosiva boja označava područje gdje su najučinkovitiji tipovi RKT i semaforizirano raskrižje. Na dijagramu gornja granica ispod koje je klasično ne semaforizirano raskrižje učinkovitije od RKT-a i semaforiziranog raskrižja jednaka je količini prometa od 478 voz/h. Za opterećenja od 478 do 555 voz/h najučinkovitiji su tipovi klasično ne semaforizirano i RKT te između njih nema značajne razlike. Od 555 do 1.687 voz/h najučinkovitiji tip je RKT. Između 1.687 i 1.773 voz/h najučinkovitiji tipovi su RKT i semaforizirano raskrižje, a iznad 1.773 voz/h najučinkovitiji tip je semaforizirano raskrižje. Navedene granice mogu se iščitati i na dijagramu 4.9., i to na prvoj stranici, u prvom stupcu i prvom retku dijagrama za mjeru kašnjenja vozila (DS).

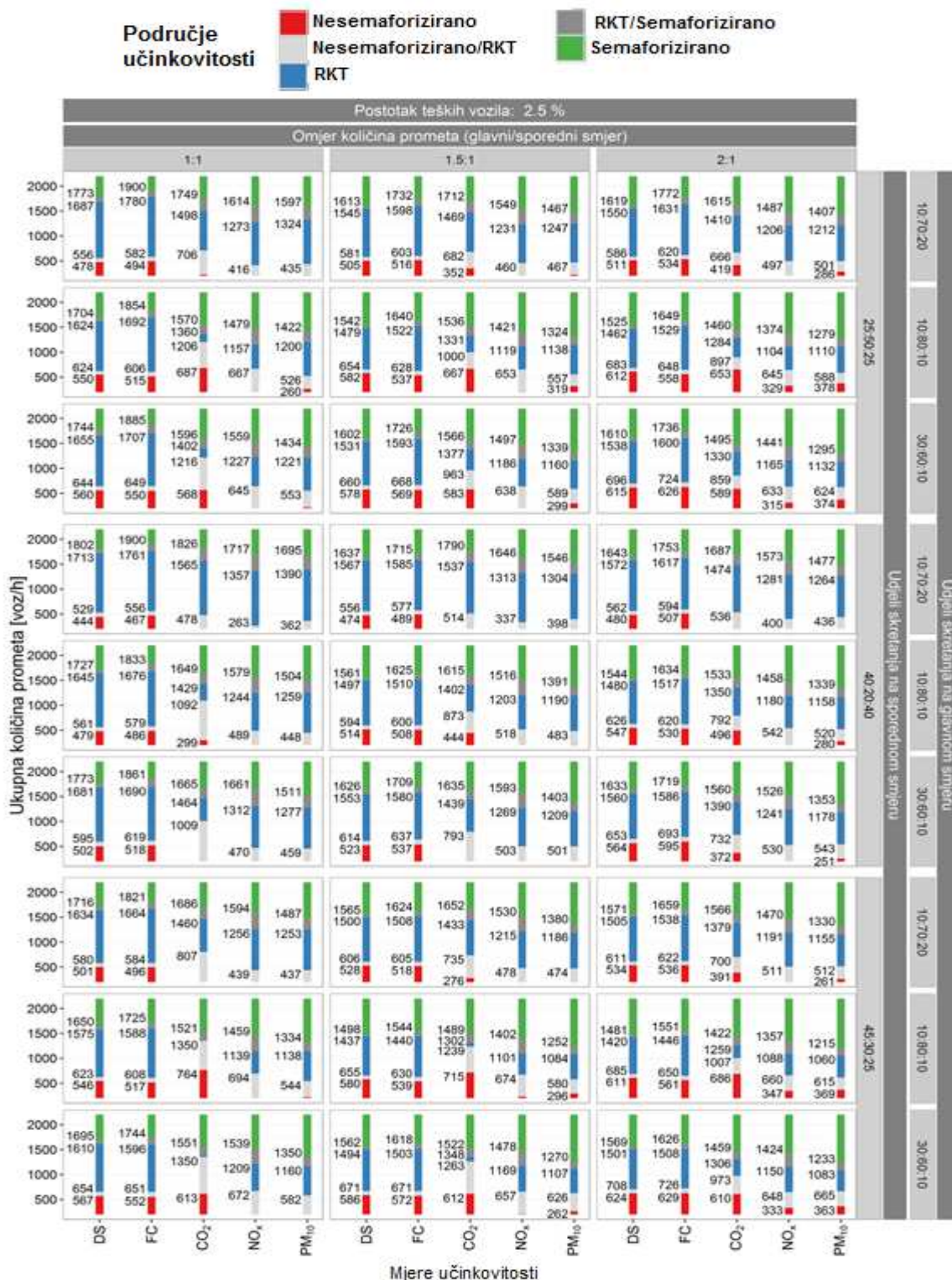


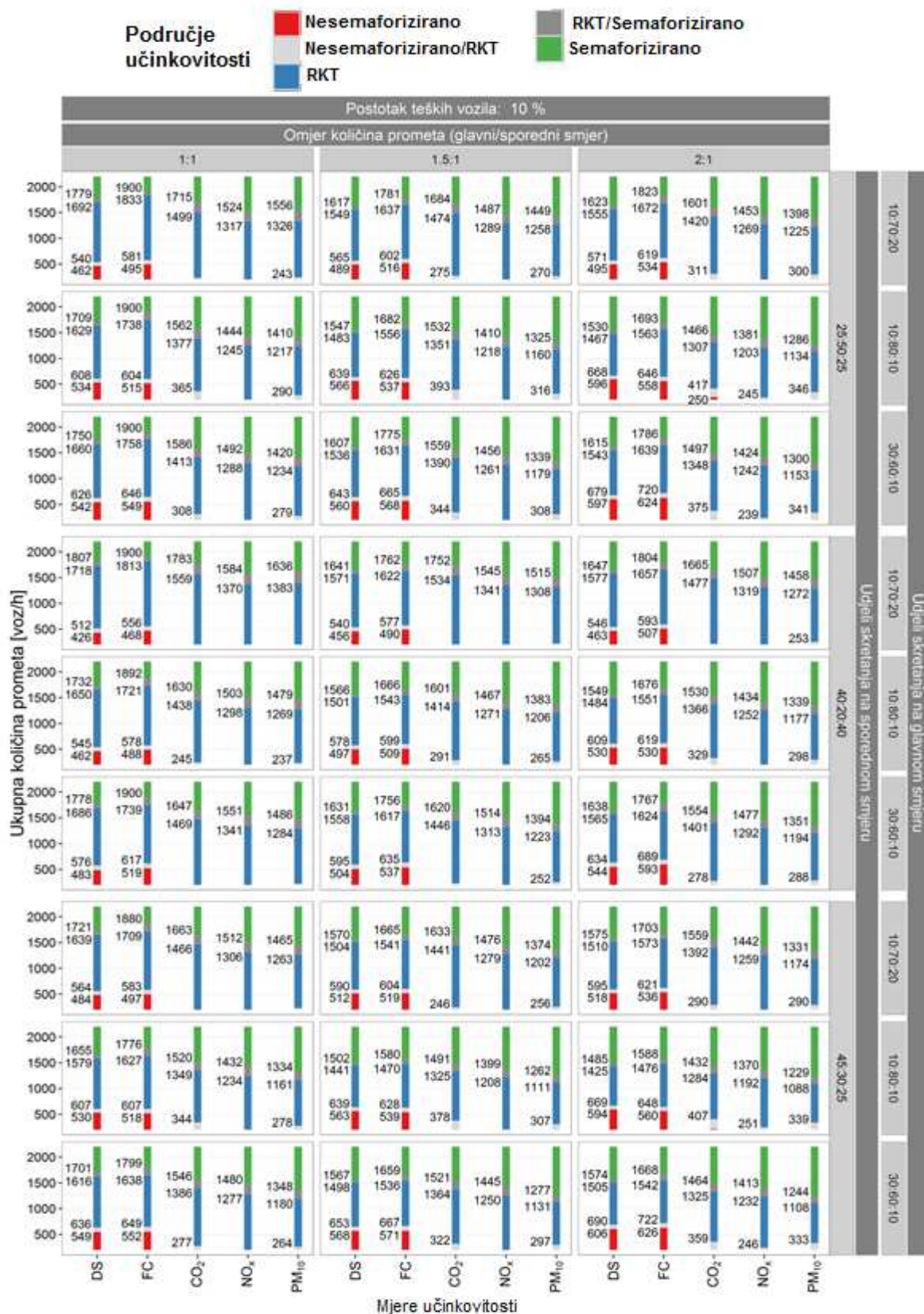
Dijagram 4.9. Krivulje modela (s podacima iz originalnog uzorka) s obzirom na tip raskrižja - s naznačenim područjima učinkovitosti

Dijagram 4.10., slično kao i dijagram 4.9., prikazuje područja učinkovitosti u kojima pojedino raskrižje ima bolje performanse u odnosu na druga dva tipa raskrižja s obzirom na mjere učinkovitosti, no u ovom slučaju prikazani su samo stupčasti dijagrami, i to za sve kombinacije nezavisnih varijabli. U slučaju da je granica područja izvan raspona količine prometa (čije granice su blago ekstrapolirane s minimalnih 250 voz/h na 200 voz/h i s maksimalnih 2.000 voz/h na 2.200 voz/h), takva granica se ne uzima u obzir. Naravno, u dijagramu se prikazuju samo područja gdje su pojedini tip ili tipovi raskrižja najbolji pa tako veća učinkovitost jednog tipa u odnosu na drugi nije prikazana na dijagramu ako je određeni

Nikola Šubić: 4. STATISTIČKI MODEL PROCJENE UTJECAJA PLANIRANIH KRUŽNIH RASKRIŽJA NA OKOLIŠ I GOSPODARSTVO

tip značajno bolji od ostala dva u tom području, odnosno prikazuju se samo područja s najvećom učinkovitošću. Dijagram je podijeljen na dvije stranice, na prvoj stranici postotak teških teretnih vozila iznosi 2.5%, a na drugoj stranici 10%.





Dijagram 4.10. Područja učinkovitosti s obzirom na tip raskrižja za sve kombinacije nezavisnih varijabli

Značajno je iz dijagrama 4.10. da klasično nesemaforizirano raskrižje za mjeru učinkovitosti dušikovog oksida, ugljikovog dioksida i čestice tvari pri nezavisnoj varijabli teških teretnih vozila od 10% nema nikakvo područje učinkovitosti u odnosu na semaforizirano i RKT raskrižje tj. nije učinkovito za navedene mjere. Kod nezavisne varijable udjela teških teretnih vozila od 2.5% klasično nesemaforizirano raskrižje za mjeru učinkovitosti dušikovog oksida i čestice tvari ima malo ili gotovo nikakvo područje učinkovitosti, a dok je područje za mjeru ugljikovog dioksida jasno definirano.

Ostale mjere učinkovitosti (kašnjenje vozila, potrošnja goriva i čestice tvari) pri nezavisnoj varijabli udjela teških teretnih vozila u prometnom toku od 2.5% nemaju značajniju razliku u području učinkovitosti od nezavisne varijable udjela teških teretnih vozila od 10%.

Iz navedenog dijagrama 4.10. može se zaključiti da nezavisna varijabla teških teretnih vozila (2.5% i 10%) utječe na područje učinkovitosti kod klasičnih nesemaforiziranih raskrižja u mjerama dušikovog oksida, ugljikovog dioksida i čestice tvari.

5. METODA PROCJENE UTJECAJA PLANIRANIH RAKRIŽJA S KRUŽNIM TOKOM PROMETA NA OKOLIŠ I GOSPODARSTVO

Izgradnji infrastrukture prethodi njezino planiranje i projektiranje, a nakon izgradnje slijedi korištenje i održavanje kojim se jamči njezina uporabljivost u predviđenom uporabnom vijeku, najčešće do 30 godina. Na temelju prognoziranja očekivanih troškova korištenjem određenog tipa infrastrukture moguće je odrediti utjecaj na okoliš i gospodarstvo sa svrhom izbora najbolje varijante rješenja uvažavajući pritom ekološke i gospodarske pokazatelje. Danas se za pomoć pri izboru opravdanosti rješenja za složene probleme, kao što su problemi vezani uz izbor određenog tipa infrastrukture u urbanim sredinama, primjenjuju i razvijaju različite metode koje se mogu izraziti u novčanim vrijednostima (analiza troškova i koristi) i vrijednostima koje se dijelom mogu, a dijelom ne mogu izraziti u novcu (višekriterijske analize).

Procjena troškova odabranog rješenja osnovni je princip tzv. održivog razvitka koji uključuje ekonomske i društvene elemente, stoga je neophodno što točnije novčano izraziti sve troškove (neposredne i/ili posredne) koji su posljedica realizacije nekog prometnog rješenja kao i vjerojatnost njihovog nastajanja kako bi se konačna odluka o prihvatljivosti zahvata za okoliš mogla donijeti sa što većom sigurnosti.

Prema iskazanim pretpostavkama i prikupljenim znanstvenim i teoretskim spoznajama u ovom poglavlju razvijena je metoda za procjenu utjecaja RKT-a na okoliš i gospodarstvo sa svrhom opravdanosti izvedbe različitih oblika raskrižja u razini uvažavajući ekološke i gospodarske kriterije. Razvijena metoda bazirana je na prognoziranju budućih troškova izraženih u novčanim vrijednostima. Osnovni cilj predložene metode je da se u početnoj fazi planskog procesa cestovnog infrastrukturnog projekta uspoređuju varijantna rješenja sa stajališta utjecaja na okoliš i gospodarstvo, odnosno unaprijedi kvaliteta odlučivanja u planiranju, projektiranju, gradnji, održavanju i rekonstrukciji prometne infrastrukture, sustava ili objekata (nesemaforizirana i semaforizirana raskrižja u razini) u skladu s održivim razvojem.

U nastavku rada opisana je metoda (definirani su ulazni podatci, elementi koji karakteriziraju metodu, prikazano je prognoziranje troškova korištenjem statističkog modela i odabrani su pokazatelji njezine opravdanosti), prikazan je njezin dijagram toka i na kraju je prikazana njezina upotreba na odabranom primjeru.

5.1. Opis metode

Metoda procjene utjecaja planiranih RKT-a na okoliš i gospodarstvo zamišljena je u svrhu da se prilikom planiranja, projektiranja ili rekonstrukcije postojećih tipova raskrižja u razini procjeni ukupni trošak pojedinog tipa raskrižja u novčanim vrijednostima tijekom njegovog uporabnog vijeka u trajanju do 30 godina na temelju razvijenog statističkog modela, s ciljem određivanja optimalnog rješenja tipa raskrižja koje je ekološki i ekonomski prihvatljivo za društvo, odnosno izabere ono raskrižje koje ima minimalni ukupni trošak.

Metoda procjene može se opisati kroz sljedeća četiri koraka:

1. Definiranje ulaznih podataka za metodu
2. Određivanje elemenata koji utječu na prognozu troškova u metodi
3. Prognoziranje očekivanih troškova primjenom razvijenog statističkog modela
4. Odabir pokazatelja opravdanosti metode

U prvom koraku definiraju se ulazni podatci za metodu. Nakon definiranja ulaznih podataka slijedi određivanje elemenata koji utječu na procjenu troškova određenog tipa raskrižja na okoliš i gospodarstvo u metodi. U trećem koraku prognoziraju se očekivani troškovi na svakom pojedinom tipu raskrižja tijekom njegovog čitavog uporabnog vijeka primjenom razvijenog statističkog modela. U četvrtom i završnom koraku jasno se definiraju pokazatelji kojima se dokazuje opravdanost metode.

5.1.1. Definiranje ulaznih podataka za metodu

Ulazni podatci za metodu mogu se podijeliti u dvije skupine: projektno-oblikovni podatci (projektno-oblikovni elementi raskrižja) i podatci o prometu (količina, struktura, omjer prometa glavni/sporedni smjer, udio skretanja glavni/sporedni smjer i postotak teških teretnih vozila). U teorijskom smislu ulazni podatci predstavljaju temelje za funkcioniranje metode, a u praktičnom smislu predstavljaju određena ograničenja primjenjivosti metode.

5.1.1.1. Projektno-oblikovni podatci

Ulazni projektno-oblikovni podatci za pojedini tip raskrižja (klasično, RKT i semaforizirano) detaljno su objašnjeni u prethodnim poglavljima 3. i 4., uz određena ograničenja primjene. Ograničenja primjene odnose se na određeni fiksni signalni plan kod semaforiziranog

raskrižja, broj prometnih trakova (na ulazu u raskrižje, na izlazu i u samom raskrižju) i dimenzije promatranog tipa raskrižja (vidi poglavlje 1. i potpoglavlje 4.1.1.).

5.1.1.2. Prometni podatci

Ulazni prometni podatci neophodni su za proračun po ovoj metodi jer predstavljaju glavni parametar za procjenu očekivanih troškova. Prometni podatci detaljno su objašnjeni u poglavlju 4. ovog doktorskog rada. Pretvorbom ulaznih prometnih podataka u prosječni godišnji dnevni promet PGDP na pojedinom tipu raskrižja moguće je za svaku godinu u promatranju (do 30 g.) predvidjeti očekivane troškove primjenom razvijenog statističkog modela.

5.1.2. Elementi utjecaja na prognozu troškova u metodi

Uzimajući u obzir uložena sredstva na početku investicijskog razdoblja, očekivane troškove kroz godine trajanja uporabnog vijeka određenog tipa raskrižja, mogu se definirati elementi koji utječu na prognozu troškova u metodi:

- visina ulaganja - investicija (planiranje, projektiranje i građenje)
- vijek trajanja - uporabni vijek raskrižja, vrijeme trajanja investicije (do 30 g.)
- troškovi tijekom uporabne eksploatacije raskrižja (troškovi investicije, održavanja, emisije štetnih ispušnih plinova, potrošnje goriva i vremena kašnjenja)
- diskontna stopa (zahtijevana stopa povrata uložениh sredstava)

5.1.2.1. Visina ulaganja - investicija

Visina ulaganja ukupna je količina novca potrebna kako bi se pokrenula i nastavila realizacija određene investicije punom dinamikom do završetka svih planiranih aktivnosti. To znači da je potrebno osigurati financiranje investicije sve do trenutka kad se određeno raskrižje može pustiti u promet. Visina ulaganja u određeni tip raskrižja popraćena je kroz troškove planiranja, projektiranja i izgradnje. Za daljnji tijek razvoja metode uvažene su cijene ulaganja prema navedenom istraživanju [68].

5.2.2.2. Vijek trajanja

Vijek trajanja (uprabni vijek) raskrižja razdoblje je tijekom kojeg raskrižje donosi koristi i troškove. Za početak vijeka trajanja uzima se vrijeme početka investiranja u određeni tip

raskrižja. Određeni tip raskrižja može davati koristi i troškove, ali pitanje je jesu li njegovi ekonomski i ekološki učinci prihvatljivi ili ne za investitora i društvo. Utjecaj vijeka trajanja na prihvatljivost projekta vrlo je velik. Duži vijek trajanja, uz pretpostavku da se ostali elementi ne mijenjaju, u načelu dovodi do njegove veće profitabilnosti jer tada do izražaja dolaze dodatne koristi kroz to produljeno razdoblje. Isto tako, kraći vijek trajanja nosi sa sobom manju profitabilnost cijelog investicijskog projekta. Procjena vijeka trajanja važna je kako bi se mogla donijeti pravilna odluka o investiranju. U pravilu infrastrukturni projekti su projekti koji su dužeg vijeka trajanja, obično se planiraju i projektiraju da zadovolje potrebe prometne potražnje u vremenskom periodu od 30 godina. Uporabni vijek infrastrukture može se definirati na dva načina: tehnički vijek i ekonomski vijek. Tehnički vijek razdoblje je tijekom kojeg se investicijski projekt odvija bez obzira na njegove ekonomske učinke. Troškovi mogu biti veći od dobiti te tada infrastrukturni projekt nije opravdan u ekonomskom smislu. Ekonomski vijek razdoblje je tijekom kojeg se očekuju pozitivne koristi. Kako bi analiza investicijskog projekta imala ekonomski smisao, obično se postavlja zahtjev da koristi i troškovi budu prihvatljivi čime se često skraćuje vijek trajanja projekta. Cjelokupni uporabni vijek građevine (raskrižja) može se podijeliti u četiri faze, a to su:

1. faza planiranja (odabir tipa raskrižja)
2. faza projektiranja i izgradnje (određivanje izgleda i izgradnja)
3. faza održavanja, upotrebe i korištenja (troškovi za društvo)
4. faza rekonstrukcije (kraj uporabnog vijeka određenog tipa raskrižja)

5.2.2.3. Troškovi tijekom uporabnog vijeka (eksploatacija) raskrižja

Tijekom svoga uporabnog vijeka svaki određeni tip raskrižja ima svoje prednosti i nedostatke, tj. u ekonomskom smislu troškove koji se mogu novčano vrednovati. Troškovi tijekom uporabne eksploatacije raskrižja odnose se na troškove prilikom planiranja, projektiranja, izgradnje i održavanja, emisije štetnih ispušnih plinova CO₂, NO_x, PM₁₀, potrošnje goriva i vremena čekanja. Za daljnji tijek razvoja metode uvažene su navedene cijene za promatrane troškove prema provedenim istraživanjima i smjernicama [66, 68].

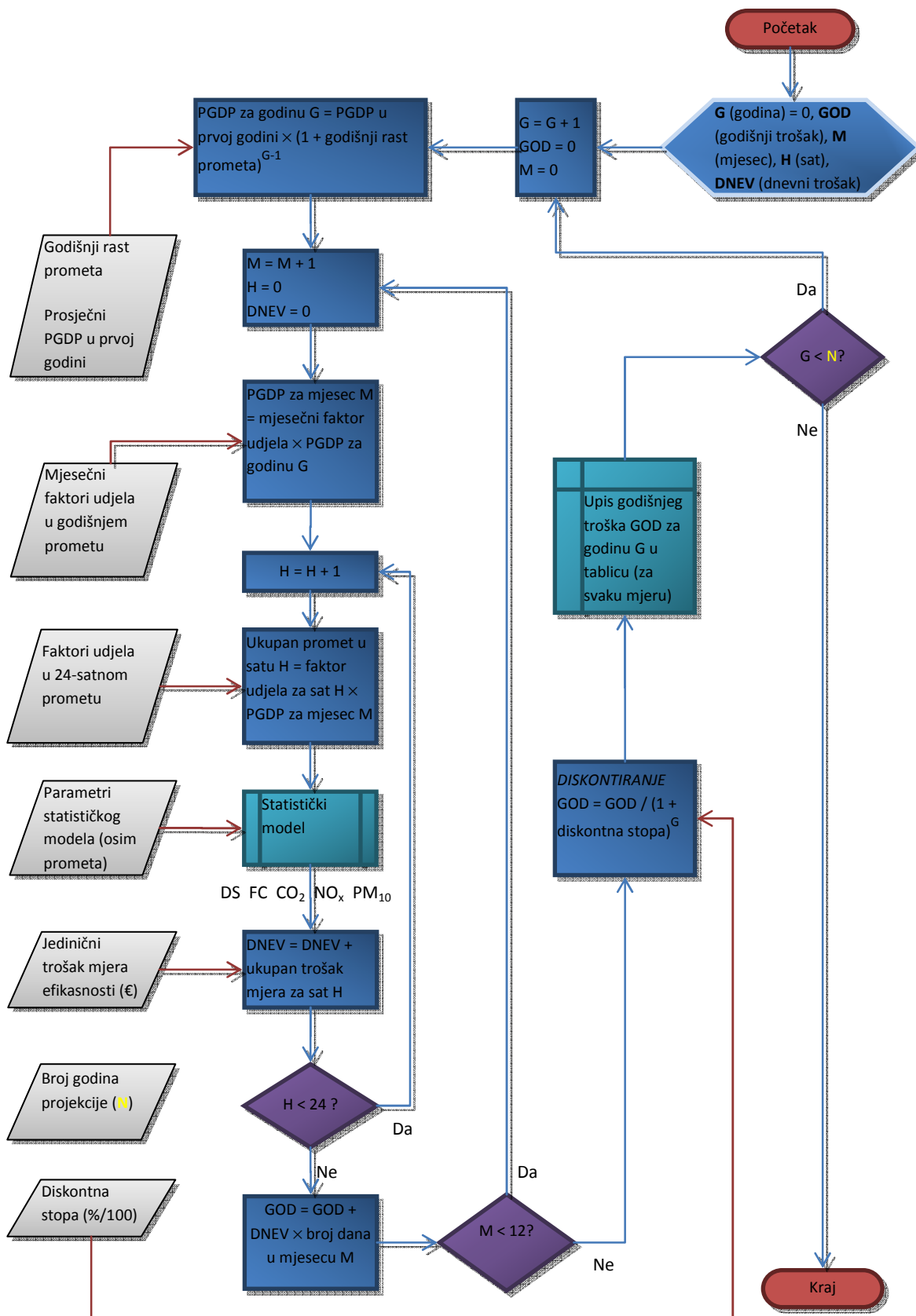
5.2.2.4. Diskontna stopa

Diskontna stopa je stopa koja se uzima kao ciljana stopa prema kojoj se mjeri opravdanost investicije. To može biti kamatna stopa na oročena sredstva u banci, stopa povrata kod

ulaganja u neku drugu gospodarsku djelatnost ili pak kamatna stopa na posuđeni novac ako se najveći dio ili cijela investicija financira kreditom. Diskontna stopa trebala bi biti jednaka stvarnoj kamatnoj stopi na tržištu kapitala, a ujedno i najmanja stopa povrata ispod koje investitor smatra kako mu se ne bi isplatilo uložiti novac. Prema novim smjernicama EU-a za investicijske studije u infrastrukturi diskontna stopa iznosi 5%. U Španjolskoj su određene vrijednosti diskontne stope u iznosu od 6% za prometne projekte, a u Francuskoj od 8% [78].

5.1.3. Primjena razvijenog statističkog modela u svrhu prognoze

Za prognozu očekivanih troškova (CO₂, NO_x, PM₁₀, potrošnje goriva i vremena čekanja) za svaki tip raskrižja tijekom njegovog vijeka eksploatacije (do 30 g.) primijenjen je razvijen statistički model iz tablice 4.9. Korištenjem statističkog modela na pojedinom tipu raskrižja moguće je za svaku godinu promatranja prognozirati njegove očekivane troškove što predstavlja osnovu za novu metodu. S obzirom da je statistički model baziran na prometnim podacima iz jednog vršnog sata, potrebno je statistički model prilagoditi godišnjoj razini kako bi se sve potrebne vrijednosti (kg/god., l/god., h/god., €/god.) mogle novčano izraziti tijekom promatrane godine. Kako bi se statistički model prilagodio na godišnjoj razini (metodi procjene) potrebno je na temelju vršnog sata procijeniti PGDP. Za tu procjenu primijenjena su znanstvena istraživanja i iskustva pojedinih autora [79, 80] o procjenama PGDP-a iz promatranog vršnog sata pri kratkim intervalima brojanja prometa (brojanja 1 – 2 h) uzimajući u obzir čimbenike neravnomjernosti tijekom 24-satnog protoka (neravnomjernost protoka) i mjesečne čimbenike udjela u godišnjem prometu. Na dijagramu 5.1. prikazan je proces prognoziranja očekivanih troškova prouzročenih razinama mjera učinkovitosti na pojedinom tipu raskrižja.



Dijagram 5.1. Proces prognoziranja očekivanih troškova

Na dijagramu 5.1. su sivim paralelogramima prikazani ulazni parametri procesa, a plavim pravokutnicima prikazani su izračuni i manipulacije varijablama. Plavi šesterokut predstavlja inicijalizaciju i opis korištenih varijabli, plavo zelenom bojom prikazani su eksterni procesi statističkog modela te radnja upisa rezultata u tablicu dok je ljubičasti romb točka odluke na osnovi navedenog uvjeta. Početak i kraj procesa obojani su crvenom bojom. Prognoziranje troškova (mjera učinkovitosti) temelji se na parametru PGDP-a. Prvo se postavlja PGDP za prvu godinu projekcije te se PGDP za svaku sljedeću godinu dobije primjenom parametra godišnjeg rasta prometa. Svaka je godina podijeljena na 12 mjeseci te svaki mjesec ima pridružen parametar čimbenika udjela u godišnjem PGDP-u, odnosno prosječan dnevni promet u pojedinom mjesecu koji može biti veći ili manji od PGDP-a za godinu. Samo zbroj prosječnih dnevnih prometa za svih 12 mjeseci treba biti jednak godišnjem PGDP-u. Za svaki dan unutar mjeseca uzima se isti prosječni dnevni promet. Kako statistički model računa mjere učinkovitosti - troškove za sat vremena prometa, potrebno je naći količine prometa za svaki sat u danu. Za tu svrhu koristi se ulazni parametar čimbenika udjela pojedinog sata u dnevnom (24 h) prometu. Dobivena količina prometa za sat zajedno s ostalim parametrima (koje je definirao korisnik) primjenjuje se u statističkom modelu što rezultira količinama svih pet mjera učinkovitosti za zadani sat. Primjenom jediničnog troška mjera učinkovitosti dobivaju se troškovi za svaku mjeru te se oni pridodaju ukupnom dnevnom trošku, posebno za svaku mjeru. Ova procedura ponavlja se 24 puta, jednom za svaki sat, što rezultira troškovima za 24 h. Troškovi za cijeli mjesec dobiju se jednostavnim množenjem dnevnih troškova s brojem dana u dotičnom mjesecu. Kako bi se dobili troškovi za cijelu godinu, sve opisano ponavlja se za svaki mjesec u godini, s različitim prosječnim dnevnim prometom u mjesecu te se troškovi u mjesecu međusobno zbrajaju. Dobiveni troškovi u godini se zatim diskontiraju primjenom diskontne stope. Ovisno o zadanom broju godina (N) za koje se projiciraju troškovi u budućnosti, isti postupak se ponavlja za svaku godinu s jedinom razlikom u ulaznom parametru PGDP-u. Dakle, u opisanom procesu postoje tri petlje ugniježdene jedna unutar druge: unutarnja koja računa satne troškove (24 ponavljanja), srednja koja računa mjesečne troškove (12 ponavljanja) i vanjska koja računa godišnje troškove (N ponavljanja). Na dijagramu zbog preglednosti nije uključeno računanje troška investicije i troškova održavanja raskrižja, no ovi iznosi se jednostavno dodaju izračunatim troškovima u odgovarajućim godinama (uz diskontiranje). Sve koristi se paralelno računaju za sva tri tipa raskrižja kako bi se izravno mogli usporediti.

5.1.4. Pokazatelji opravdanosti metode

Za opravdanost predložene metode mogu se primijeniti različiti ekonomski pokazatelji poput: troškova, neto sadašnje vrijednosti, interne stope profitabilnosti, indeksa profitabilnosti i analize osjetljivosti. Obzirom da se u ovom doktorskom radu prikazuje utjecaj RKT-a na okoliš i gospodarstvo kroz novčane vrijednosti troškova, za pokazatelje opravdanosti predložene metode odabrani su ukupni trošak raskrižja i analiza osjetljivosti.

- **Ukupni trošak raskrižja**; smatra se ukupnim novčanim iznosom korištenja određenog tipa raskrižja u periodu njegovog uporabnog vijeka;
- **Analiza osjetljivosti (SA, engl. Sensitivity Analysis)**; služi za provjeru vrijednosti troškova ako se dogode neočekivana odstupanja vezana za utjecajne čimbenike u metodi (diskontnu stopu, promjenu cijena na tržištu, itd.).

5.1.4.1. Troškovi raskrižja

Troškovi raskrižja (podjela troškova i njihova objašnjenja) detaljno su objašnjeni u poglavlju 2.3.2. ovog dokorskog rada dok su njihove novčane vrijednosti argumentirane u svjetskim istraživanjima [62, 68, 70]. Osnovna zamisao metode je da se svi troškovi koji se promatraju za svaki tip raskrižja u određenom vremenskom periodu sumiraju kao ostvareni ukupni trošak raskrižja. Ostvareni ukupni trošak u vremenskom periodu promatranja (uporabni vijek raskrižja) za svaki tip raskrižja može se zapisati u obliku jednadžbe:

$$C_t^{TOT} = BC_K + C_0 + \left[\sum_{T=1}^N \left(\sum_i d_s \cdot C_s + p_g \cdot C_g + CO_2 \cdot C_{CO_2} + NO_x \cdot C_{NO_x} + PM_{10} \cdot C_{PM_{10}} \right)_T \right] / (1+r)^T \text{ [€]} \quad (5.1)$$

Gdje je: C_t^{TOT} - ukupni trošak raskrižja [€], BC_K - trošak investicije raskrižja [€], C_0 - trošak održavanja [€], C_s - jedinični trošak kašnjenja [€], C_g - jedinični trošak goriva [€], C_{CO_2} - jedinični trošak emisije ugljikovog dioksida [€], C_{NO_x} - jedinični trošak emisije dušikovih oksida [€], $C_{PM_{10}}$ - jedinični trošak emisije krutih čestica [€], d_s - kašnjenje [h/god], p_g - potrošnja goriva [l/god], CO_2 - emisija ugljikovog dioksida [kg/god] NO_x - emisija dušikovog

oksida [kg/god] PM_{10} - emisija krutih čestica [kg/god], r – diskontna stopa [%], T - period promatranja i i - godina.

Raskrižje koje bi ostvarilo minimalni ukupni trošak u vremenskom periodu promatranja predstavljalo bi optimalno rješenje tipa raskrižja koje je ekološki i ekonomski prihvatljivo za društvo.

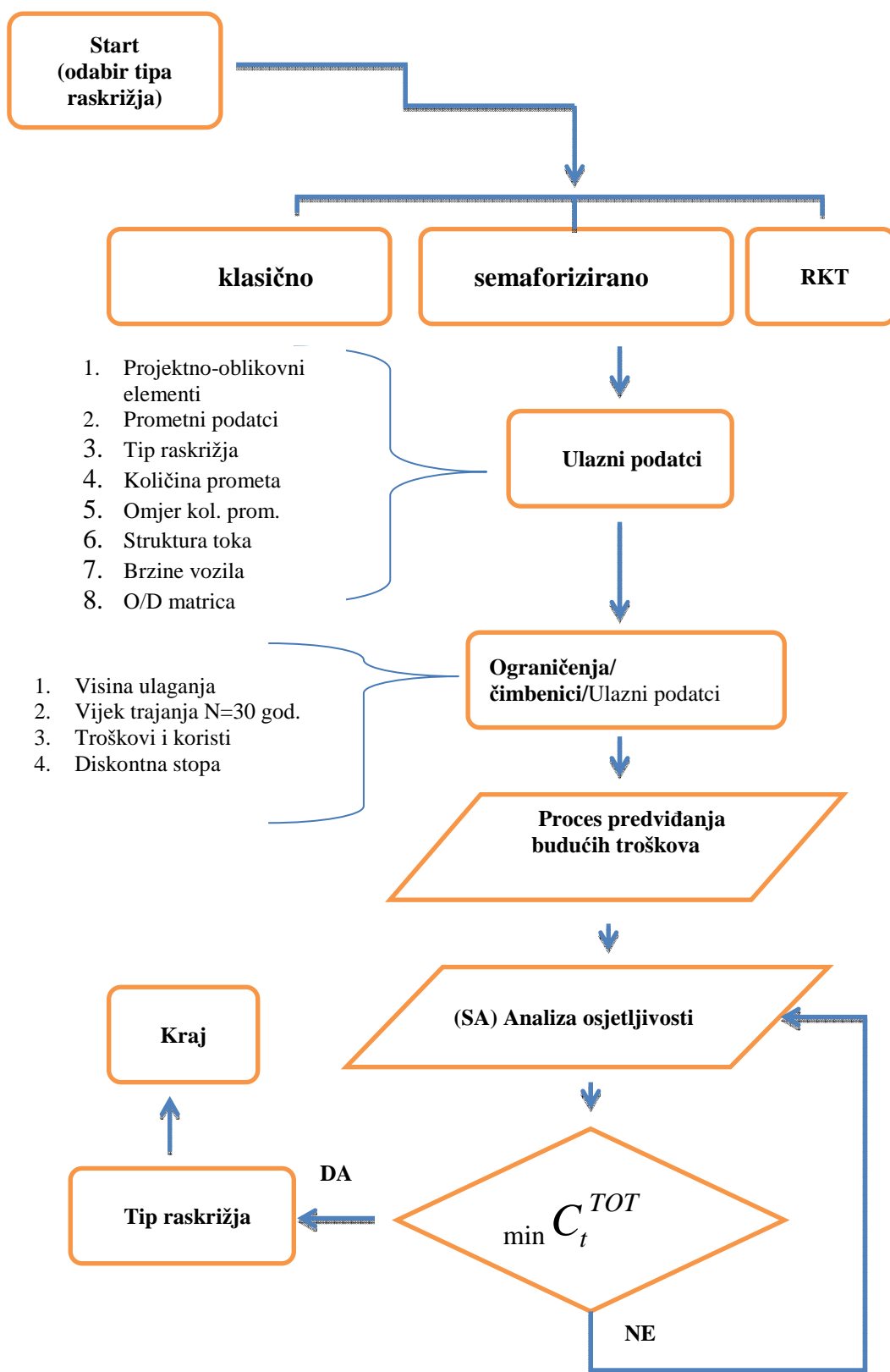
5.1.4.2. Analiza osjetljivosti (SA)

Svaki odabir određenog tipa raskrižja popraćen je određenom nesigurnošću i rizicima koji se javljaju zbog različitih okolnosti (promjena prometne potražnje, promjene cijena troškova, subjektivni razlozi itd...). Kako bi se pažljivije mogla ocijeniti opravdanost pojedinog tipa raskrižja, u tu svrhu izrađuje se analiza osjetljivosti stohastičke varijacije čimbenika temeljem koje se izračunava ukupni ostvareni trošak raskrižja. Analizira se promjena ostvarenog ukupnog troška raskrižja ako se promijene elementi utjecaja u metodi (visina ulaganja, diskontna stopa, vijek trajanja i pojedinačni troškovi). Uobičajeno je da se pri analizi osjetljivosti elementi utjecaja promijene za neki postotak. Npr. +/- 5, 10 ili 15% visina ulaganja, diskontna stopa ili pojedinačni troškovi.

5.2. Dijagram toka metode procjene utjecaja planiranih RKT-a na okoliš i gospodarstvo

Uvažavajući navedene postupke za razvoj metode procjene utjecaja planiranih RKT-a na okoliš i gospodarstvo na dijagramu 5.2. prikazan je dijagram toka predložene metode. Dijagram toka sastoji se od definiranja cilja, ulaznih podataka koje sustav dobiva ili daje u okruženje, postavljenih ograničenja, odnosno elemenata koji utječu na krajnji rezultat, procesa koji transformiraju ulazne podatke u izlazne rezultate i odabira prihvatljivog prometnog rješenja (analiza osjetljivosti) između semaforiziranog, klasičnog i RKT-a. Dijagram toka započinje definicijom cilja, a to je odabir tipa raskrižja (klasično, semaforizirano i RKT), zatim slijedi unos ulaznih podataka (projektno-oblikovnih i prometnih podataka), nakon postavljenih ulaznih podataka postavljaju se ograničenja, odnosno definiraju elementi utjecaja u metodi sa svojim novčanim vrijednostima. Nakon što su postavljena ograničenja računaju se očekivani troškovi raskrižja primjenom statističkog modela. Kad su očekivani troškovi izračunati na temelju postavljenih ulaznih parametara i ograničenja pristupa se procesu SA-analizi osjetljivosti te se nakon provedene analize izračunava posebno za svako raskrižje ostvareni ukupni trošak. Raskrižje koje ima minimalni ostvareni ukupni trošak predstavlja odabrani tip raskrižja i kraj dijagrama toka. Ukoliko ne postoji raskrižje s minimalnim

troškom, pristupa se ponovno analizi osjetljivosti (SA) ali s promijenjenim elementima utjecaja.



Dijagram 5.2. Dijagram toka metode procjene utjecaja RKT-a na okoliš i gospodarstvo

5.3. Primjena metode procjene utjecaja planiranih RKT-a na okoliš i gospodarstvo

Na primjeru raskrižja na lokacijama V₅ (Vinkovci), V₇ (Split) i V₈ (Varaždin) prikazat će se primjena predložene metode prema opisanom dijagramu toka (vidi dijagram 5.2). Vremenski period promatranja postavljen je na 30 godina, uz pretpostavku da toliko iznosi uporabni vijek raskrižja.

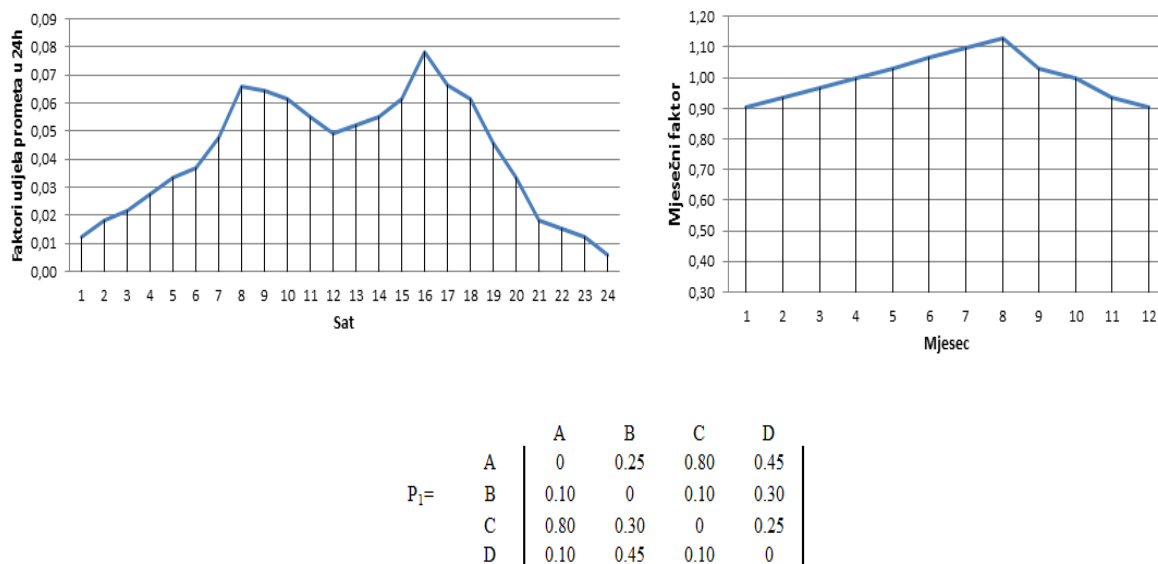
5.3.1. Ulazni podatci

Projektno-oblikovni elementi prethodnog i postojećeg stanja za odabrana raskrižja na lokacijama V₅, V₇ i V₈ navedeni su u prethodnim poglavljima 3. i 4. dok su predloženi prometni podatci prikazani u tablici 5.1. Pješački tok zabilježen je kao zanemariv ($Q_{ped} = 0$ ped/h) zbog ograničenja istraživanja.

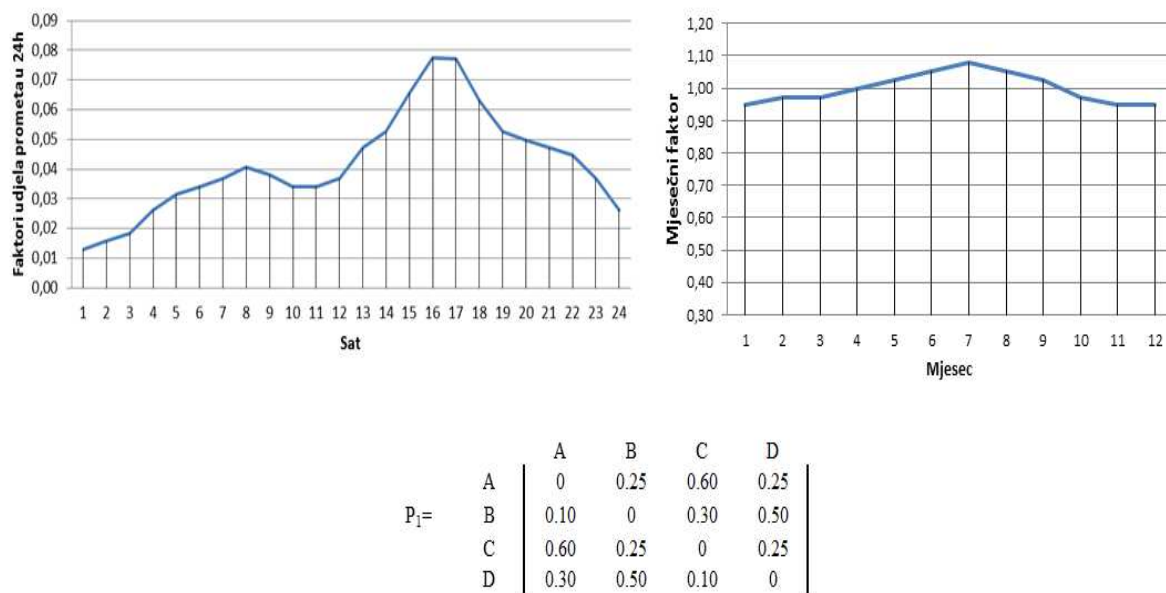
Tablica 5.1. Ulazni prometni podatci za odabrana raskrižja V₅, V₇ i V₈

PROM. PODATCI	Lokacija raskrižja	Vinkovci V₅		
	Tip raskrižja	Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
	PGDP	15.500		
	Godišnje povećanje voz/h [%]	1.0%		
	Omjer glavni/sporedni smjer	1:1.0		
	% HV	2.5%		
	O/D Matrica Distribucija 24h	Slika 5.1		
	Lokacija raskrižja	Split V₇		
	Tip raskrižja	Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
	PGDP	19.000		
	Godišnje povećanje voz/h [%]	1.0%		
	Omjer glavni/sporedni smjer	1:1.0		
	% HV	2.5%		
	O/D Matrica Distribucija 24h	Slika 5.2		
	Lokacija raskrižja	Varaždin V₈		
	Tip raskrižja	Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
	PGDP	10.000		
	Godišnje povećanje voz/h [%]	1.0%		
	Omjer glavni/sporedni smjer	1:1.0		
	% HV	2.5%		
	O/D Matrica Distribucija 24h	Slika 5.3		

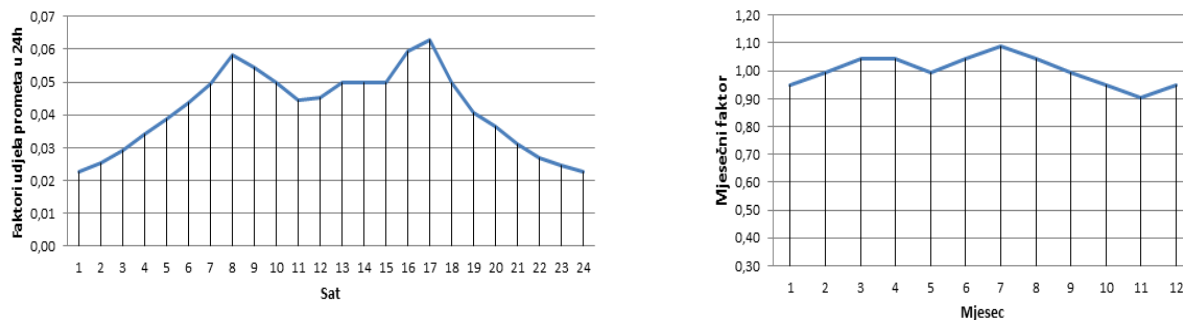
Satne distribucije u jednom danu, mjesečni čimbenici i O/D matrica za odabrano raskrižje V_5 prikazane su na slici 5.1., za raskrižje V_7 prikazane su na slici 5.2., i za lokaciju V_8 prikazane su na slici 5.3. Po O/D matrici glavni pravci kretanja su sjever - jug (AC) i jug - sjever (CA), a sporedni istok - zapad (DB) i zapad - istok (BD) (vidi sliku 4.1.).



Slika 5.1. Prikaz satne distribucije, mjesečnih čimbenika i O/D matrice za lokaciju V_5



Slika 5.2. Prikaz satne distribucije, mjesečnih čimbenika i O/D matrice za lokaciju V_7



Slika 5.3. Prikaz satne distribucije, mjesečnih čimbenika i O/D matrice za lokaciju V₈

5.3.2. Elementi utjecaja

Elementi utjecaja u metodi prikazani su u postotnim i novčanim vrijednostima. Novčana i postotna vrijednost pojedinog elementa utjecaja za sva odabrana raskrižja ima istu vrijednost i prikazana je u tablici 5.2., prema dosadašnjim istraživanjima i preporukama [66, 68, 77].

Tablica 5.2. Novčane vrijednosti pojedinog elementa utjecaja za odabrana raskrižja V₅, V₇ i V₈

ELEMENTI UTJECAJA	Lokacija raskrižja	Vinkovci V ₅ , Split V ₇ i Varaždin V ₈		
	Tip raskrižja	Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
	Cijena investicije [€]	0	1.000.000	60.000
	Interna stopa povrata	5%		
	Troškovi održavanja [€/god]	500	1.000	4.000
	Troškovi šteta-koristi			
	Kašnjenje vozila d _s [h]	10 €/h		
	Potrošnja goriva [l]	1 €/l		
	Ugljikov dioksid (CO ₂) [kg]	0.04 €/kg		
	Oksidi dušika (NO _x) [g]	0.0044 €/g		
	Čestice tvari (PM ₁₀) [g]	0.087 €/g		

5.3.3. Analiza osjetljivosti (SA)

Za analizu osjetljivosti predložena je promjena elemenata utjecaja u metodi za visinu troškova održavanja, diskontnu stopu i vrijednost investicije. Promjena određenog elementa za

određenu postotnu vrijednost prikazana je u tablici 5.3., i za sva odabrana raskrižja iznosi istu vrijednost.

Tablica 5.3. Analiza osjetljivosti za odabrana raskrižja V₅, V₇ i V₈

Lokacija raskrižja		Vinkovci V ₅ , Split V ₇ i Varaždin V ₈
SA ANALIZA	Cijena investicije [€]	+5%
	Interna stopa povrata	+1%
	Troškovi održavanja	+5%
SVI TIPOVI RASKRIŽJA		

5.3.4. Analiza rezultata na odabranim lokacijama

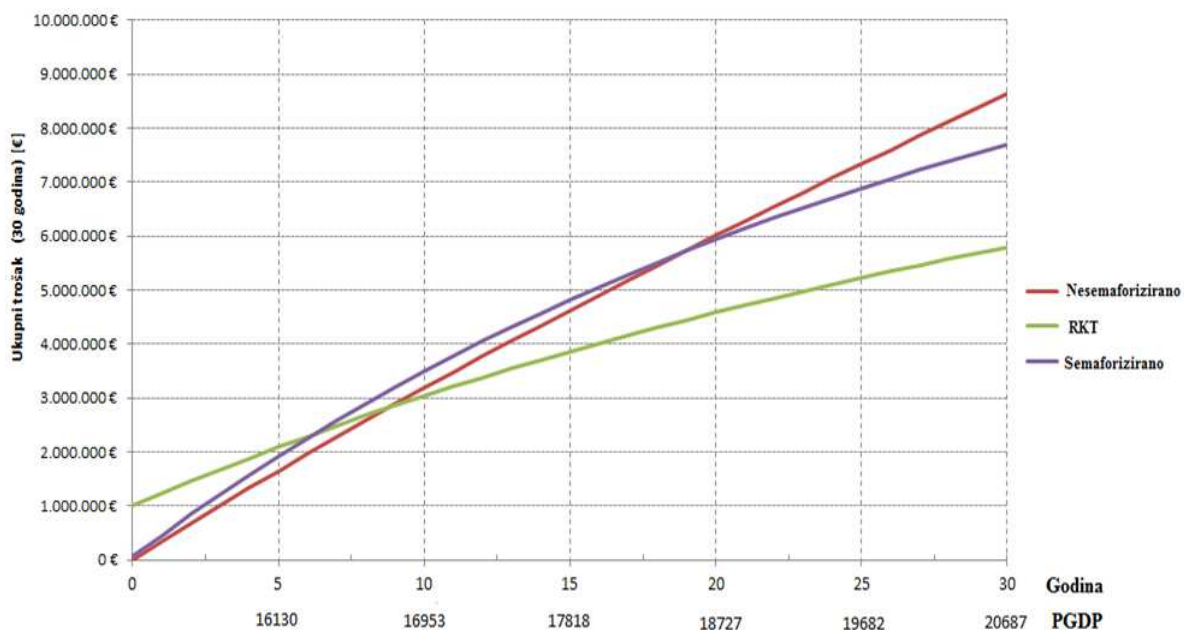
U tablici 5.4. prikazani su rezultati (bez i sa SA-analizom osjetljivosti) troškova i odabira prihvatljivog tipa raskrižja na odabranim lokacijama V₅, V₇ i V₈ primjenom predložene metode u vremenskom periodu promatranja od 30 g.

Tablica 5.4. Prikaz rezultata na odabranim lokacijama V₅, V₇ i V₈

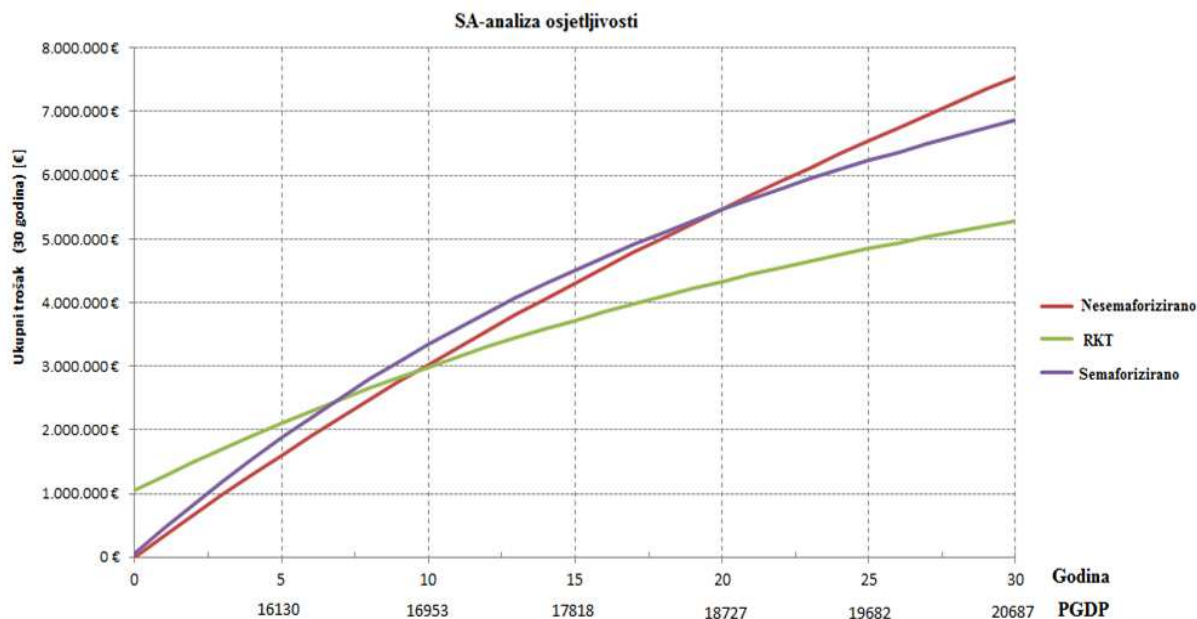
	Lokacija raskrižja	Vinkovci V ₅			Vinkovci V ₅ (SA analiza)		
		Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano	Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
Troškovi u 30 g.	Tip raskrižja						
	Trošak investicije [€]	0	1.000.000	60.000	0	1.050.000	63.000
	Godišnji trošak održavanja /god [€]	500	1.000	4.000	525	1.050	4.200
	Kašnjenje vozila d _i [€]	4.388.726,15	1.846.949,96	3.511.271,50	3.801.251,98	1.623.797,12	3.112.656,89
	Potrošnja goriva [f€]	3.744.157,80	2.430.979,28	3.459.937,60	3.285.155,69	2.149.251,93	3.069.927,31
	Ugljikov dioksid (CO ₂) [f€]	316.256,46	321.148,07	366.180,60	280.491,88	284.979,29	325.528,99
	Oksidi dušika (NO _x) [€]	90.659,66	84.004,94	93.031,98	80.389,91	74.536,04	82.688,56
	Čestice tvari (PM ₁₀) [€]	88.032,32	81.110,64	88.064,14	78.079,51	71.987,06	78.280,93
	C _t ^{TOT} [€]	8.642.832,40	5.794.192,89	7.698.485,82	7.541.118,96	5.286.051,44	6.858.082,69
Odabir raskrižja		RKT			RKT		
	Lokacija raskrižja	Split V ₇			Split V ₇ (SA analiza)		
		Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano	Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
Troškovi u 30 g.	Tip raskrižja						
	Trošak investicije [€]	0	1.000.000	60.000	0	1.050.000	63.000
	Godišnji trošak održavanja /god [€]	500	1.000	4.000	525	1.050	4.200
	Kašnjenje vozila d _i [€]	9.695.375,60	2.919.949,44	4.635.903,48	4.608.034,60	2.084.187,18	3.854.003,94
	Potrošnja goriva [f€]	5.731.893,79	3.339.930,33	4.497.720,95	4.010.876,09	2.703.729,83	3.843.650,73
	Ugljikov dioksid (CO ₂) [f€]	422.847,30	416.316,63	467.549,88	370.124,28	365.539,84	414.860,09
	Oksidi dušika (NO _x) [€]	120.372,24	109.339,74	119.201,07	105.128,18	95.880,18	105.563,35
	Čestice tvari (PM ₁₀) [€]	115.059,85	104.962,96	112.628,41	100.143,10	91.727,45	99.418,24
	C _t ^{TOT} [€]	16.100.548,78	7.920.499,10	10.013.003,78	9.210.056,25	6.422.564,47	8.506.496,35
Odabir raskrižja		RKT			RKT		
	Lokacija raskrižja	Varaždin V ₈			Varaždin V ₈ (SA analiza)		
		Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano	Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
Troškovi u 30 g.	Tip raskrižja						
	Trošak investicije [€]	0	1.000.000	60.000	0	1.050.000	63.000
	Godišnji trošak održavanja /god [€]	500	1.000	4.000	525	1.050	4.200
	Kašnjenje vozila d _i [€]	564.404,42	535.948,15	1.820.811,42	507.546,15	503.273,61	1.656.851,51
	Potrošnja goriva [f€]	1.071.509,08	1.090.966,76	1.984.460,96	966.133,68	987.257,67	1.774.403,81
	Ugljikov dioksid (CO ₂) [f€]	159.729,53	160.198,04	224.553,91	144.858,86	145.174,30	204.158,80
	Oksidi dušika (NO _x) [€]	45.504,37	41.362,79	56.674,75	41.418,73	37.981,30	51.590,94
	Čestice tvari (PM ₁₀) [€]	45.066,59	42.507,55	55.162,00	40.539,67	38.419,51	49.482,69
	C _t ^{TOT} [€]	1.901.213,98	2.900.983,28	4.321.663,04	1.716.247,09	2.793.606,38	3.925.487,75
Odabir raskrižja		Klasično			Klasično		

Iz tablice 5.4. može se zaključiti da na odabranoj lokaciji V₅, RKT ostvaruje minimalni ukupni trošak C_t^{TOT} [€] ($5.794.192,89 \text{ €} \div 5.286.051,44 \text{ €}$ - SA analiza) u vremenskom periodu promatranja te kao takvo predstavlja optimalni tip raskrižja. Također na lokaciji V₇, RKT predstavlja optimalni tip raskrižja s ostvarenim minimalnim ukupnim troškom C_t^{TOT} [€] ($7.920.499,10 \text{ €} \div 6.422.564,47 \text{ €}$ - SA analiza) u vremenskom periodu promatranja. Jedino nesemaforizirano raskrižje na lokaciji V₈, ostvaruje minimalni ukupni trošak C_t^{TOT} [€] ($1.901.213,98 \text{ €} \div 1.716.247,09 \text{ €}$ - SA analiza) u vremenskom periodu promatranja te kako takvo predstavlja optimalni tip raskrižja na navedenoj lokaciji.

Izlazni rezultati na odabranim lokacijama mogu se prikazati i kao funkcija PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu promatranja (vidi grafikone 5.1., 5.2., i 5.3.). Prema navedenoj funkciji iz grafikona 5.1. vidljivo je da u vremenskom periodu promatranja na lokaciji V₅, RKT ostvaruje minimalni ukupni trošak za razliku od drugih tipova raskrižja.



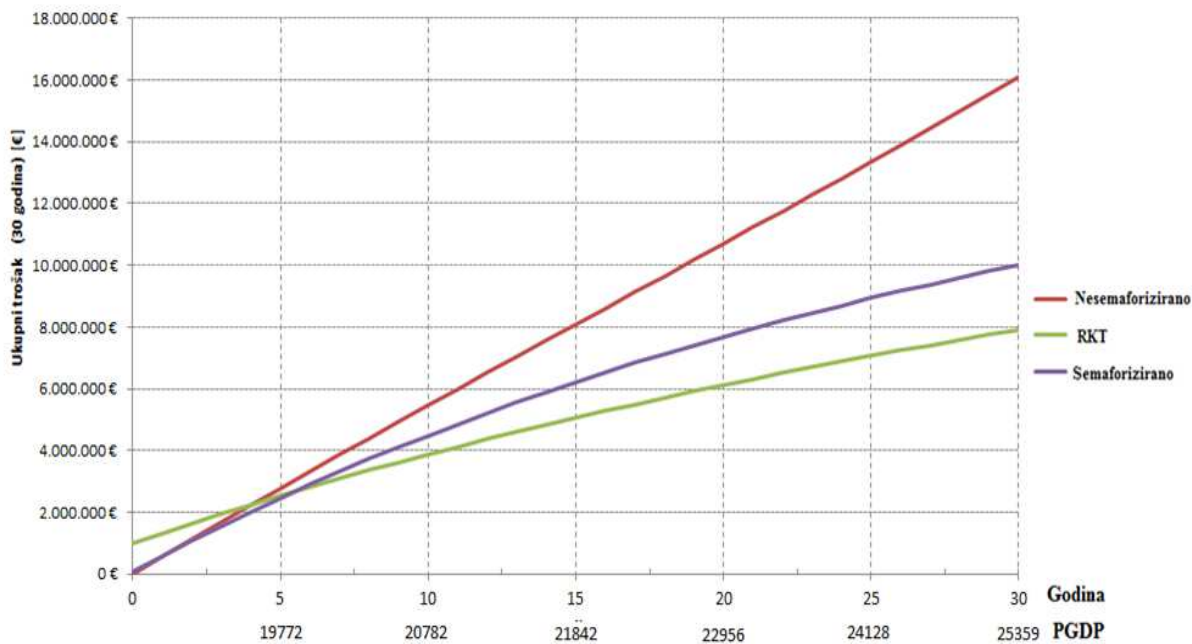
Grafikon 5.1.a) Ukupni trošak bez primjene SA-analize



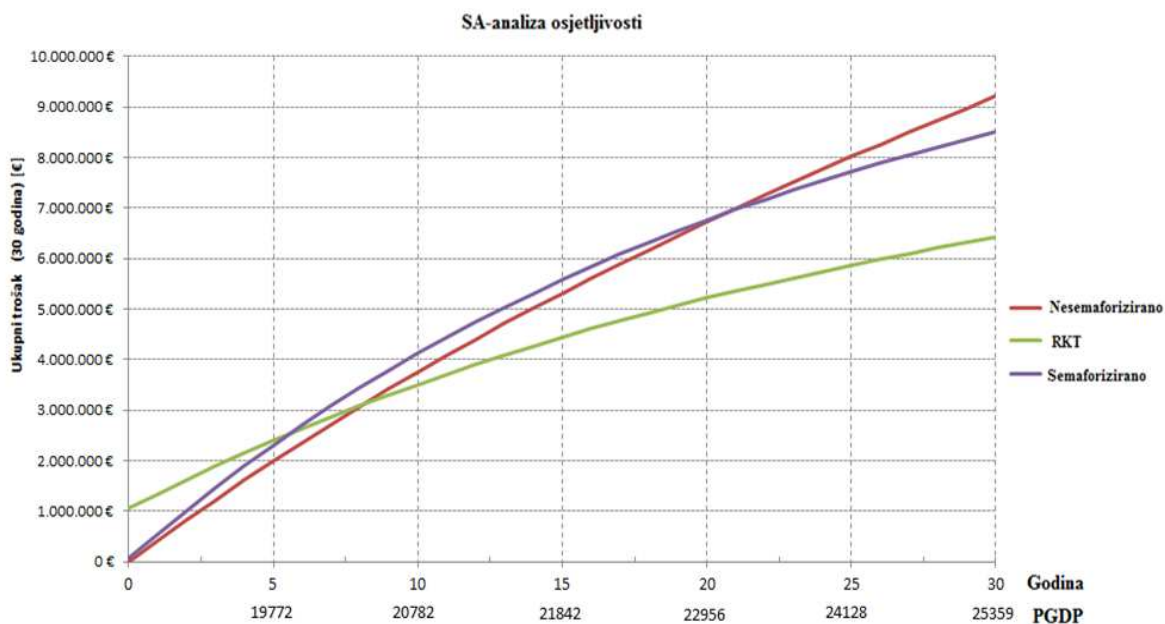
Grafikon 5.1.b) Ukupni trošak kod primjene SA-analize

Grafikon 5. 1. Prikaz funkcije PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu promatranja na lokaciji V₅

Iz grafikona 5.2. vidljivo je da u vremenskom periodu promatranja na lokaciji V₇, RKT također ostvaruje minimalni ukupni trošak za razliku od drugih tipova raskrižja.



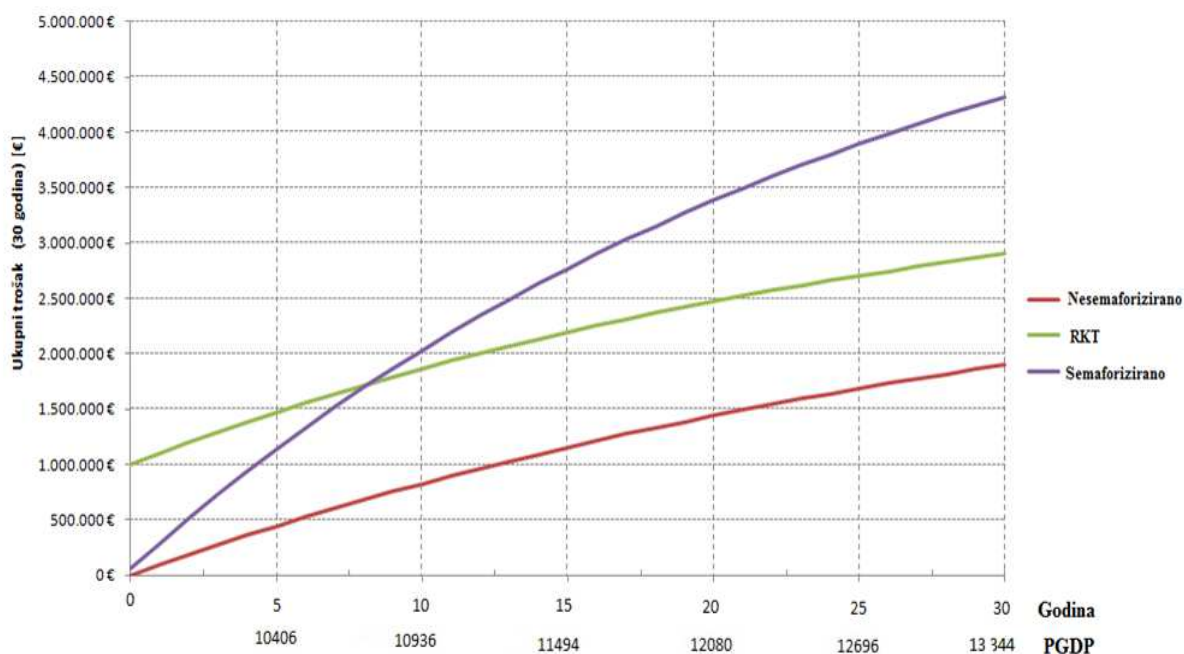
Grafikon 5.2.a) Ukupni trošak bez primjene SA-analize



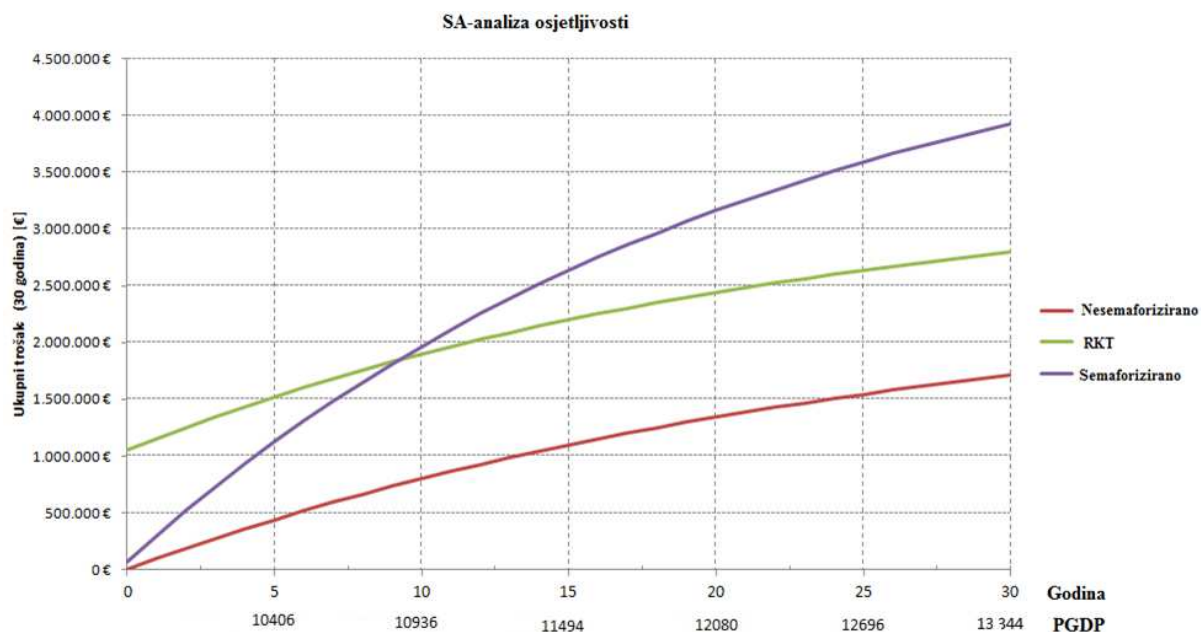
Grafikon 5.2.b) Ukupni trošak kod primjene SA-analize

Grafikon 5.2. Prikaz funkcije PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu promatranja na lokaciji V₇

Iz grafikona 5.3. vidljivo je da u vremenskom periodu promatranja nesemaforizirano raskrižje na lokaciji V₈ ostvaruje minimalni ukupni trošak za razliku od drugih tipova raskrižja.



Grafikon 5.3.a) Ukupni trošak bez primjene SA-analize



Grafikon 5.3.b) Ukupni trošak kod primjene SA-analize

Grafikon 5.3. Prikaz funkcije PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu promatranja na lokaciji V₈

Ako se pogledaju pojedinačni troškovi poput emisije štetnih ispušnih plinova, kašnjenja i potrošnje goriva na odabranim lokacijama (vidi tablicu 5.4) bez primjene analize osjetljivosti (SA) vidljivo je da na lokaciji V₅, RKT ostvaruje minimalne pojedinačne troškove kod kašnjenja, potrošnje goriva, emisije NO_x i PM₁₀, a nesemaforizirano raskrižje kod emisije CO₂. Kod lokacije V₇, RKT u svim pojedinačnim troškovima ostvaruje minimalne troškove u odnosu na semaforizirano i nesemaforizirano raskrižje. Nesemaforizirano raskrižje na lokaciji V₈, ostvaruje minimalne pojedinačne troškove kod potrošnje goriva i emisije CO₂, a RKT kod kašnjenja i emisije NO_x i PM₁₀.

Primjenom (SA) analize osjetljivosti na lokaciji V₅, RKT ostvaruje minimalne pojedinačne troškove kod kašnjenja, potrošnje goriva, emisije NO_x i PM₁₀, a nesemaforizirano raskrižje kod emisije CO₂. Kod lokacije V₇, RKT u svim pojedinačnim troškovima ostvaruje minimalne troškove u odnosu na semaforizirano i nesemaforizirano raskrižje. Nesemaforizirano raskrižje na lokaciji V₈, ostvaruje minimalne pojedinačne troškove kod potrošnje goriva i emisije CO₂, a RKT kod kašnjenja i emisije NO_x i PM₁₀. U svim pogledima semaforizirano raskrižje ostvaruje maksimalne troškove te u ovom konkretnom slučaju nije optimalno.

Na temelju analize rezultata na odabranim lokacijama može se zaključiti da će se određeni tip raskrižja u pojedinim troškovima pokazati kao najbolje rješenje, a u nekima kao neodgovarajuće rješenje. U ovom konkretnom promatranom slučaju dokazano je preko

promatrane lokacije V₈ (Varaždin) da nije uvijek nužno da će RKT ostvarivati minimalne troškove te predstavljati optimalni tip raskrižja koji je prihvatljiviji za okoliš i gospodarstvo. Ostvarenje minimalnih troškova na odabranim lokacijama određeno je količinom prometa stoga se može pretpostaviti da pri malim količinama prometa nesemaforizirano raskrižje najučinkovitije, a pri srednjim količinama prometa RKT.

6. VERIFIKACIJA METODE PROCJENE UTJECAJA PLANIRANIH KRUŽNIH RASKRIŽJA NA OKOLIŠ I GOSPODARSTVO

Kako bi predložena metoda procjene utjecaja RKT-a na okoliš i gospodarstvo našla svoju praktičnu primjenu, bilo ju je potrebno verificirati. U ovom poglavlju predložena metoda verificirana je kroz postavljene scenarije na promatranom raskrižju koje se nije pokazalo kao najbolje prometno rješenje (prilikom terenskog istraživanja). Funkcioniranje metode praćeno je kroz postavljene scenarije na temelju variranja ulaznih prometnih podataka i elemenata utjecaja. Osnovna svrha ove verifikacije je odgovor na pitanje je li metoda dovoljno dobra i pouzdana za predviđeni oblik korištenja? Svrha ove verifikacije ujedno je i utvrđivanje točnosti postavljenih hipoteza ovog doktorskog rada. U nastavku rada opisan je postupak verifikacije koji se sastoji od odabira raskrižja, definiranja - postavljanja scenarija i analiza rezultata po pojedinom scenariju.

6.1. Odabir raskrižja

Za verifikaciju predložene metode odabrano je raskrižje koje se nalazi na lokaciji V₁ (Kutina) na temelju analize prethodnog i postojećeg stanja iz prethodnog poglavlja 3. (vidi tablicu 3.15).

6.2. Definiranje scenarija

Predviđanje prometne potražnje i stanja na tržištu (povećanje troškova) neizvjesno je, upitno i teško predvidljivo te predstavlja problem za projektiranje budućih raskrižja. Neophodno je stoga predloženu metodu testirati na buduće neizvjesnosti, odnosno vidjeti njezine rezultate kad se dogode značajnije promjene. Za ovakvu pretpostavku odabrana su tri tipa scenarija za promatrano raskrižje:

- prvi tip scenarija odnosi se na postojeće stanje - postojeći scenarij (present scenario);
- drugi tip scenarija odnosi se na srednje povećanje ulaznih podataka i elemenata utjecaja – srednji scenarij (middle scenario);
- treći tip scenarija odnosi se na visoko povećanje ulaznih podataka i elemenata utjecaja – visokoočekivani scenarij (high scenario).

6.2.1. Postojeći scenarij S_{1p} (present scenario)

Prema stvarnim prikupljenim ulaznim podacima i postavljenim pretpostavkama za odabrano raskrižje postavljen je scenarij postojećeg stanja S_{1p} . Scenarij postojećeg stanja S_{1p} prikazan je u tablici 6.1. SA-analiza te satna distribucija, mjesečni čimbenici i O/D matrica kod ovog i ostalih promatranih scenarija ostaju nepromijenjeni (vidi sliku 6.1. i sliku 4.1.). Razlog tome je postavljanje istih početnih uvjeta za sve scenarije, a ujedno i smanjeni broj kombinacija uvođenjem različitih vrijednosti. Težilo se što jednostavnijem pristupu.

6.2.2. Scenariji srednjih vrijednosti S_{2s} – srednji scenarij (middle scenario)

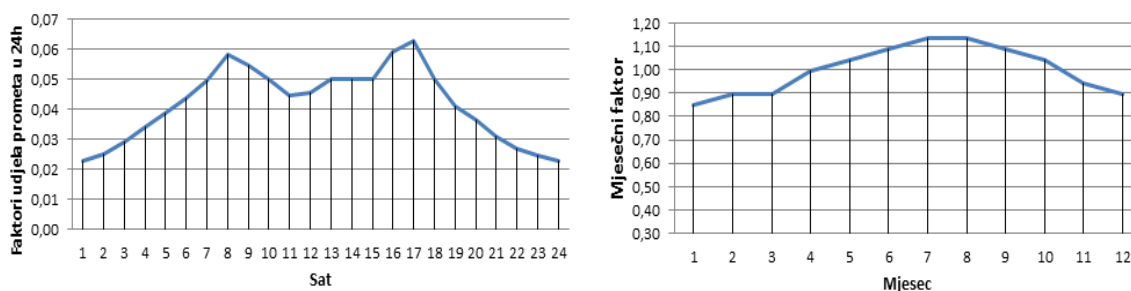
Na postojeći scenarij S_{1p} nadovezan je scenarij srednjih vrijednosti S_{2s} koji se odnosi na povećanje ulaznih prometnih podataka za PGDP, godišnje povećanje vozila i postotak teških teretnih vozila te povećanje elementa utjecaja u metodi za cijenu investicije, internu stopu te troškove održavanja, kašnjenja i potrošnje goriva. Scenarij S_{2s} prikazan je u tablici 6.1.

6.2.3. Scenariji visokih vrijednosti S_{3h} – (high scenario)

Scenarij visokih vrijednosti S_{3h} nadovezuje se na scenarij srednjih vrijednosti S_{2s} . Kod ovog scenarija primjenjuju se ista pravila kao i kod prethodnih scenarija (vidi tablicu 6.1. i sliku 6.1.).

Tablica 6.1. Prikaz scenarija S_{1p} , S_{2s} , S_{3h}

Scenariji		S_{1p}			S_{2s}			S_{3h}		
Lokacija raskrižja		Kutina V ₁			Kutina V ₁			Kutina V ₁		
PROMETNI PODATCI	Tip raskrižja	Klasično	Kružno	Semafor	Klasično	Kružno	Semafor	Klasično	Kružno	Semafor
	PGDP	10.000			15.000			20.000		
	Godišnje povećanje količine voz [%]	1.0%			1.5%			2.0%		
	Omjer glavni/sporedni smjer	1:1.0			1:1.0			1:1.0		
	% HV	2.5%			5%			10%		
	Distribucija 24h i Mjesečni faktori	slika 6.1 a			slika 6.1 a			slika 6.1 a		
	O/D Matrica	slika 6.1 b			slika 6.1 b			slika 6.1 b		
ELEMENTI UTJECAJA	Cijena investicije [€]	0	1000000	60000	0	1100000	70000	0	1200000	80000
	Interna stopa povrata	5%			7%			9%		
	Troškovi održavanja [€/god]	500	1000	4000	1000	1500	4500	1500	2000	5000
		Troškovi šteta-koristi			Troškovi šteta-koristi			Troškovi šteta-koristi		
	Kašnjenje vozila d _s [h]	10 €/h			20 €/h			30 €/h		
	Potrošnja goriva [l]	1 €/l			1,5 €/l			2 €/l		
	Ugljikov dioksid (CO ₂) [kg]	0.04 €/kg			0.04 €/kg			0.04 €/kg		
	Oksidi dušika (NO _x) [g]	0.0044 €/g			0.0044 €/g			0.0044 €/g		
Čestice tvari (PM ₁₀) [g]	0.087 €/g			0.087 €/g			0.087 €/g			
SA ANALIZA	Cijena investicije [€]	+5%								
	Interna stopa povrata	+1%								
	Troškovi održavanja	+5%								
Za sve tipove raskrižja										



6.1 a

		A	B	C	D
S_{1p}	A	0	0.45	0.70	0.25
	B	0.10	0	0.10	0.30
	C	0.70	0.25	0	0.45
	D	0.20	0.30	0.20	0

6.1 b

Slika 6.1. Prikaz satne distribucije, mjesečnih čimbenika i O/D matrice za scenarije S_{1p} , S_{2s} , S_{3h}

6.2.3. Analiza rezultata

Za svaki odabrani tip scenarija u tablicama 6.2. ÷ 6.4. i na grafikonima 6.1 ÷ 6.3. sažeto su prikazani rezultati (bez primjene i primjenom SA - analize osjetljivosti) troškova i odabira prihvatljivog tipa raskrižja primjenom predložene metode. U tablici 6.2. i na grafikonu 6.1. prikazani su rezultati za odabrani postojeći scenarij S_{1p} , u tablici 6.3. i na grafikonu 6.2. za srednji scenarij S_{2s} i u tablici 6.4. i na grafikonu 6.3. za scenarij visokih vrijednosti S_{3h} .

Tablica 6.2. Prikaz rezultata za scenarij S_{1p}

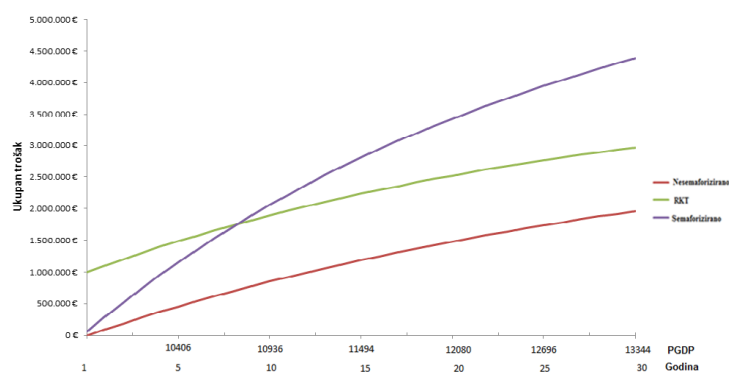
Scenarij		S_{1p}			S_{1p} (SA)		
Lokacija raskrižja		Kutina V ₁			Kutina V ₁		
Tip raskrižja		Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano	Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
Troškovi u 30. g.	Trošak investicije [€]	0	1.000.000	60.000	0	1.050.000	63.000
	Godišnji trošak održavanja /god [€]	500	1.000	4.000	525	1.050	4.200
	Kašnjenje vozila d _i [€]	589.096,05	572.496,95	1.867.439,18	518.116,66	506.854,72	1.659.792,04
	Potrošnja goriva [[€]	1.101.242,63	1.115.240,10	1.996.924,34	975.083,73	991.199,93	1.776.632,93
	Ugljikov dioksid (CO ₂) [[€]	163.706,95	163.950,70	229.689,26	145.252,09	145.527,41	204.310,99
	Oksidi dušika (NO _x) [€]	46.819,35	42.900,43	58.056,52	41.537,11	38.077,11	51.636,50
	Čestice tvari (PM ₁₀) [€]	45.786,87	43.341,48	55.650,78	40.646,45	38.502,78	49.512,75
	C_t^{TOT} [€]	1.961.651,86	2.967.929,65	4.387.760,07	1.736.386,03	2.801.661,95	3.930.885,22
	Odabir raskrižja		Nesemaforizirano			Nesemaforizirano	

Iz tablice 6.2. vidljivo je da za odabrani postojeći scenarij S_{1p} (present scenario), nesemaforizirno raskrižje ostvaruje minimalni ukupni trošak C_t^{TOT} [€] (1.961.651,86 € ÷ 1.736.386,03 € SA – analiza osjetljivosti) u vremenskom periodu promatranja te kao takvo

Nikola Šubić: 6. VERIFIKACIJA METODE PROCJENE UTJECAJA PLANIRANIH KRUŽNIH RASKRIŽJA NA OKOLIŠ I GOSPODARSTVO

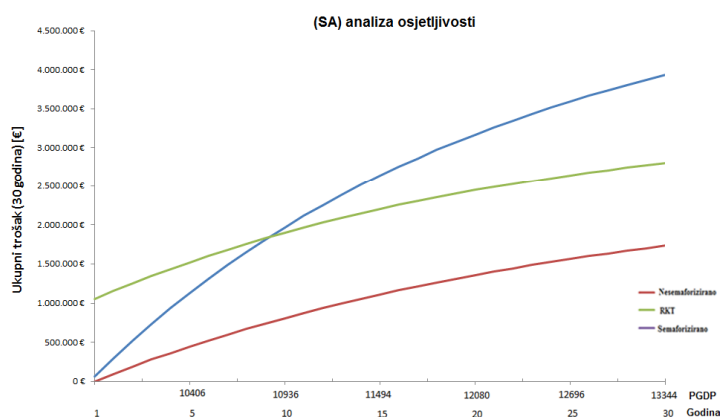
predstavlja optimalni tip raskrižja koje je ekološki i ekonomski prihvatljivo za društvo. U pogledu pojedinačnih troškova nesemaforizirano raskrižje ostvaruje minimalne troškove kod potrošnje goriva i emisije CO₂, a RKT kod kašnjenja i emisije NO_x i PM₁₀ bez primjene i s promjenom (SA) analize osjetljivosti. Na grafikonu 6.1. prikazani su rezultati metode kao funkcija PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu promatranja za scenarij S_{1p}.

Godina	PGDP	Tip raskrižja		
		Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
Trošak investicije (€)		0	1.050.000	63.000
Godišnji trošak održavanja (€)		525	1.050	4.200
0		0	1.000.000	60.000
1	10000	97.111	1.104.336	295.239
2	10100	191.280	1.204.991	521.779
3	10201	282.576	1.302.082	739.919
4	10303	371.117	1.395.755	949.986
5	10406	456.986	1.486.127	1.152.275
6	10510	540.273	1.573.323	1.347.088
7	10615	621.096	1.657.482	1.534.744
8	10721	699.527	1.738.706	1.715.489
9	10828	775.638	1.817.999	1.889.288
10	10936	849.529	1.892.783	2.057.309
11	11045	921.249	1.965.834	2.218.861
12	11155	990.901	2.036.373	2.374.514
13	11267	1.058.572	2.104.505	2.524.518
14	11380	1.124.315	2.170.309	2.669.063
15	11494	1.188.187	2.233.864	2.808.353
16	11609	1.250.273	2.295.269	2.942.612
17	11725	1.310.615	2.354.590	3.072.005
18	11842	1.369.286	2.411.910	3.196.728
19	11960	1.426.314	2.467.289	3.316.940
20	12080	1.481.797	2.520.822	3.432.889
21	12201	1.535.770	2.572.587	3.544.606
22	12323	1.588.300	2.622.597	3.652.376
23	12446	1.639.414	2.670.965	3.756.297
24	12570	1.689.165	2.717.732	3.856.517
25	12696	1.737.604	2.762.959	3.953.178
26	12823	1.784.774	2.806.704	4.046.423
27	12951	1.830.717	2.849.019	4.136.375
28	13081	1.875.498	2.889.970	4.223.184
29	13212	1.919.123	2.929.587	4.306.934
30	13344	1.961.652	2.967.930	4.387.760



Grafikon 6.1.a) Bez primjene SA-analize

Godina	PGDP	Tip raskrižja		
		Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
Trošak investicije (€)		0	1.050.000	63.000
Godišnji trošak održavanja (€)		525	1.050	4.200
0		0	1.050.000	63.000
1	10000	96.224	1.153.411	296.258
2	10100	188.659	1.252.244	518.818
3	10201	277.435	1.346.692	731.154
4	10303	362.726	1.436.967	933.755
5	10406	444.668	1.523.252	1.127.066
6	10510	523.403	1.605.733	1.311.530
7	10615	599.095	1.684.603	1.487.595
8	10721	671.859	1.760.018	1.655.633
9	10828	741.812	1.832.133	1.816.019
10	10936	809.092	1.901.113	1.969.138
11	11045	873.785	1.967.080	2.115.290
12	11155	936.027	2.030.193	2.254.839
13	11267	995.936	2.090.592	2.388.115
14	11380	1.053.596	2.148.392	2.515.394
15	11494	1.109.094	2.203.706	2.636.953
16	11609	1.162.538	2.256.661	2.753.083
17	11725	1.213.999	2.307.352	2.864.014
18	11842	1.263.570	2.355.889	2.970.001
19	11960	1.311.307	2.402.355	3.071.259
20	12080	1.357.320	2.446.866	3.168.043
21	12201	1.401.667	2.489.502	3.260.551
22	12323	1.444.428	2.530.354	3.348.989
23	12446	1.485.653	2.569.493	3.433.537
24	12570	1.525.408	2.606.997	3.514.379
25	12696	1.563.757	2.642.943	3.591.690
26	12823	1.600.758	2.677.402	3.665.641
27	12951	1.636.465	2.710.438	3.736.385
28	13081	1.670.950	2.742.126	3.804.091
29	13212	1.704.234	2.772.512	3.868.874
30	13344	1.736.386	2.801.662	3.930.885



Grafikon 6.1.b) Primjenom SA-analize

Grafikon 6.1. Prikaz funkcije PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu od 30 godina za scenarij S_{1p} na lokaciji V₁

Iz grafikona 6.1. može se zaključiti da u vremenskom periodu promatranja nesemaforizirano raskrižje ostvaruje minimalni ukupni trošak za razliku od drugih tipova raskrižja. Ukoliko se stave u odnos RKT i semaforizirano raskrižje, RKT će početi ostvarivati minimalne troškove nakon devete (9) ÷ desete (10) (SA) godine, odnosno pri PGDP-u od 10828 ÷ 10936 (SA) u odnosu na semaforizirano raskrižje.

Za odabrani scenarij srednjih vrijednosti S_{2s} (middle scenario) prema tablici 6.3. vidljivo je da RKT ostvaruje minimalni ukupni trošak C_t^{TOT} [€] (6.445.000,55 € ÷ 5.916.811,02 € - SA analiza osjetljivosti) u vremenskom periodu promatranja te kao takvo predstavlja optimalni tip raskrižja. U pojedinačnim troškovima RKT u svim parametrima učinkovitosti ostvaruje minimalne troškove u odnosu na druge tipove raskrižja.

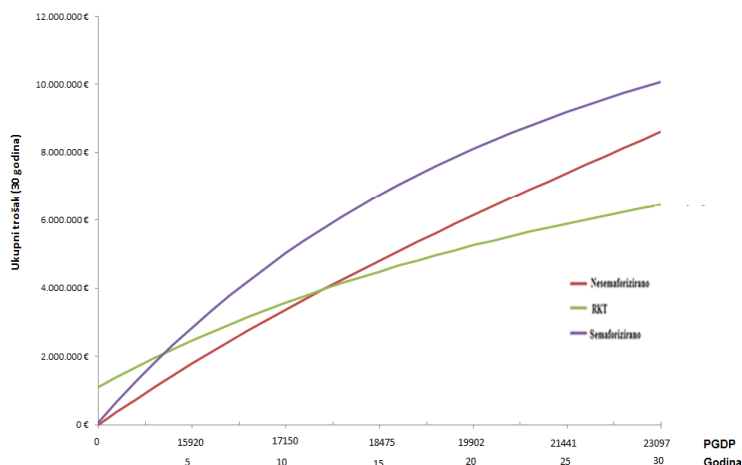
Tablica 6.3. Prikaz rezultata za scenarij S_{2s}

Scenariji		S_{2s}			S_{2s} (SA)		
Lokacija raskrižja		Kutina V ₁			Kutina V ₁		
Troškovi u 30. g.	Tip raskrižja	Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano	Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
	Trošak investicije [€]	0	1.100.000	70.000	0	1.155.000	73.500
	Godišnji trošak održavanja /god [€]	1.000	1.500	4.500	1.050	1.575	4.725
	Kašnjenje vozila d _i [€]	4.530.592,59	2.332.393,37	5.361.316,30	3.948.737,18	2.069.423,88	4.802.496,01
	Potrošnja goriva [[€]	3.600.829,52	2.568.289,61	4.026.128,42	3.185.052,74	2.293.749,67	3.610.728,35
	Ugljikov dioksid (CO ₂) [[€]	276.080,32	255.249,99	310.857,85	247.220,87	228.683,38	279.308,84
	Oksidi dušika (NOx) [€]	96.185,19	78.326,36	93.320,92	78.273,57	63.777,68	76.213,93
	Čestice tvrti (PM ₁₀) [€]	75.557,68	65.741,23	75.584,69	67.665,33	58.926,42	67.914,90
	C_t^{TOT} [€]	8.609.245,30	6.445.000,55	10.072.208,18	7.558.449,70	5.916.811,02	9.051.912,02
	Odabir raskrižja		RKT			RKT	

Ako se pogledaju rezultati metode kao funkcija PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu promatranja za scenarij S_{2s} iz grafikona 6.2. primjetno je da će RKT ostvarivati minimalne troškove u odnosu na semaforizirano raskrižje nakon 4 ÷ 4 (SA) godine, odnosno pri PGDP-u od 15685 ÷ 15685 (SA). U odnosu na nesemaforizirano raskrižje, RKT će nakon 12 ÷ 14 (SA) godine, odnosno pri PGDP-u od 17668 ÷ 18202 (SA) ostvarivati minimalne troškove. Za sve vrijednosti PGDP-a do 17407 ÷ 18202 (SA) u ovom scenariju S_{2s} , nesemaforizirano raskrižje ostvarivat će minimalne troškove.

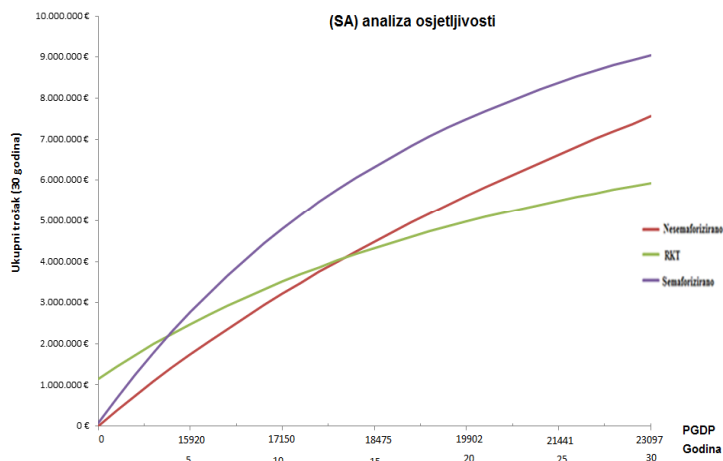
Nikola Šubić: 6. VERIFIKACIJA METODE PROCJENE UTJECAJA PLANIRANIH KRUŽNIH RASKRIŽJA NA OKOLIŠ I GOSPODARSTVO

Godina	PGDP	Tip raskrižja		
		Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
Trošak investicije (€)		0	1.100.000	70.000
Godišnji trošak održavanja (€)		1.000	1.500	4.500
0	0	0	1.100.000	70.000
1	15000	376.909	1.395.309	680.367
2	15225	743.767	1.678.510	1.261.505
3	15453	1.101.315	1.950.275	1.815.017
4	15685	1.449.824	2.211.072	2.342.198
5	15920	1.790.027	2.461.556	2.844.575
6	16159	2.122.127	2.702.110	3.323.244
7	16401	2.446.558	2.933.201	3.779.393
8	16647	2.763.804	3.155.325	4.214.232
9	16897	3.074.268	3.368.896	4.628.817
10	17150	3.378.216	3.574.278	5.024.119
11	17407	3.676.139	3.771.907	5.401.164
12	17668	3.968.374	3.962.134	5.760.856
13	17933	4.255.170	4.145.281	6.104.034
14	18202	4.536.983	4.321.715	6.431.571
15	18475	4.813.992	4.491.709	6.744.202
16	18752	5.086.672	4.655.602	7.042.701
17	19033	5.355.204	4.813.631	7.327.721
18	19318	5.620.029	4.966.125	7.600.003
19	19608	5.881.328	5.113.303	7.860.134
20	19902	6.139.363	5.255.392	8.108.691
21	20201	6.394.566	5.392.678	8.346.306
22	20504	6.647.136	5.525.360	8.573.493
23	20812	6.897.458	5.653.672	8.790.783
24	21124	7.145.749	5.777.802	8.998.650
25	21441	7.392.333	5.897.945	9.197.553
26	21763	7.637.466	6.014.287	9.387.937
27	22089	7.881.442	6.126.999	9.570.209
28	22420	8.124.532	6.236.246	9.744.759
29	22756	8.367.006	6.342.190	9.911.969
30	23097	8.609.245	6.445.001	10.072.208



Grafikon 6.2.a) Bez primjene SA-analize

Godina	PGDP	Tip raskrižja		
		Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
Trošak investicije (€)		0	1.155.000	73.500
Godišnji trošak održavanja (€)		1.050	1.575	4.725
0	0	0	1.155.000	73.500
1	15000	372.963	1.447.239	677.948
2	15225	732.639	1.724.921	1.248.180
3	15453	1.079.962	1.988.944	1.796.335
4	15685	1.415.391	2.239.585	2.324.026
5	15920	1.739.813	2.478.890	2.773.761
6	16159	2.053.597	2.706.219	3.226.520
7	16401	2.357.316	2.922.608	3.654.051
8	16647	2.651.580	3.128.696	4.057.903
9	16897	2.936.908	3.325.039	4.439.449
10	17150	3.213.680	3.512.128	4.799.952
11	17407	3.482.473	3.690.511	5.140.695
12	17668	3.743.714	3.860.649	5.462.821
13	17933	3.997.729	4.022.962	5.767.388
14	18202	4.245.057	4.177.904	6.055.461
15	18475	4.485.929	4.325.833	6.327.958
16	18752	4.720.860	4.467.158	6.585.808
17	19033	4.950.094	4.602.193	6.829.818
18	19318	5.174.090	4.731.316	7.060.848
19	19608	5.393.075	4.854.811	7.279.610
20	19902	5.607.341	4.972.961	7.486.790
21	20201	5.817.311	5.086.085	7.683.102
22	20504	6.023.209	5.194.432	7.869.152
23	20812	6.225.402	5.298.268	8.045.538
24	21124	6.424.115	5.397.817	8.212.804
25	21441	6.619.651	5.493.304	8.371.469
26	21763	6.812.254	5.584.943	8.522.025
27	22089	7.002.187	5.672.928	8.664.926
28	22420	7.189.695	5.757.448	8.800.602
29	22756	7.375.012	5.838.681	8.929.466
30	23097	7.558.450	5.916.811	9.051.912



Grafikon 6.2.b) Primjenom SA-analize

Grafikon 6. 2. Prikaz funkcije PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu od 30 godina za scenarij S_{2s} na lokaciji V_1

Nikola Šubić: 6. VERIFIKACIJA METODE PROCJENE UTJECAJA PLANIRANIH KRUŽNIH RASKRIŽJA NA OKOLIŠ I GOSPODARSTVO

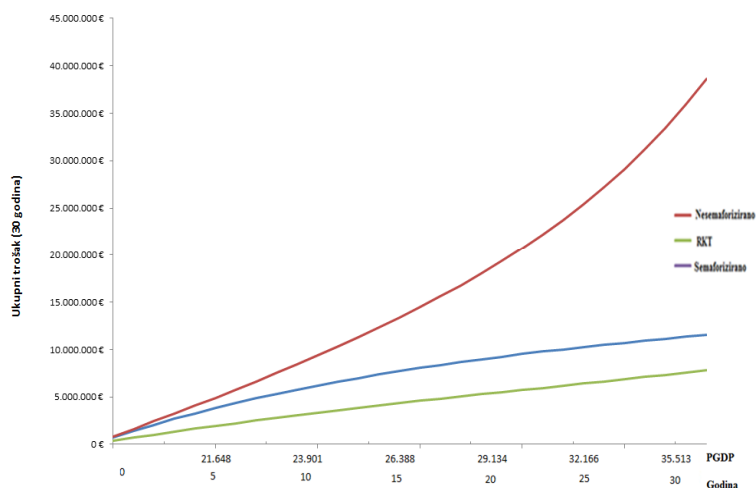
Kod scenarija visokih vrijednosti S_{3h} (high scenario), RKT ostvaruje minimalni ukupni trošak C_t^{TOT} [€] (15.050.470,60 € ÷ 13.552.600,73 € - SA- analiza osjetljivosti) u vremenskom periodu promatranja te kao takvo predstavlja optimalni tip raskrižja. Također, RKT u pojedinačnim troškovima kod svih parametara učinkovitosti ostvaruje minimalne troškove u odnosu na druge tipove raskrižja (vidi tablicu 6.4).

Tablica 6.4. Prikaz rezultata za scenarij S_{3h}

Scenariji		S_{3h}			S_{3h} (SA)		
Lokacija raskrižja		Kutina V ₁			Kutina V ₁		
Tip raskrižja		Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano	Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
Troškovi u 30. g.	Trošak investicije [€]	0	1.200.000	80.000	0	1.260.000	84.000
	Godišnji trošak održavanja /god [€]	1.500	2.000	5.000	1.575	2.100	5.250
	Kašnjenje vozila d _i [€]	38.618.087	7.794.496	11.527.410	32.649.935,93	6.858.983,94	10.354.521,39
	Potrošnja goriva [€]	11.799.916	5.401.700	7.103.975	10.353.267,80	4.833.520,78	6.407.264,23
	Ugljikov dioksid (CO ₂) [€]	433.792,73	355.708,64	394.442,34	391.863,98	321.566,33	357.762,57
	Oksidi dušika (NO _x) [€]	207.111,73	144.733,64	157.198,23	186.912,35	130.726,79	142.511,32
	Čestice tvori (PM ₁₀) [€]	119.387,44	93.831,88	99.318,23	107.782,82	84.802,91	90.022,91
	C_t^{TOT} [€]	51.223.294,72	15.050.470,60	19.512.344,20	43.737.012,88	13.552.600,73	17.593.582,42
Odabir raskrižja		RKT			RKT		

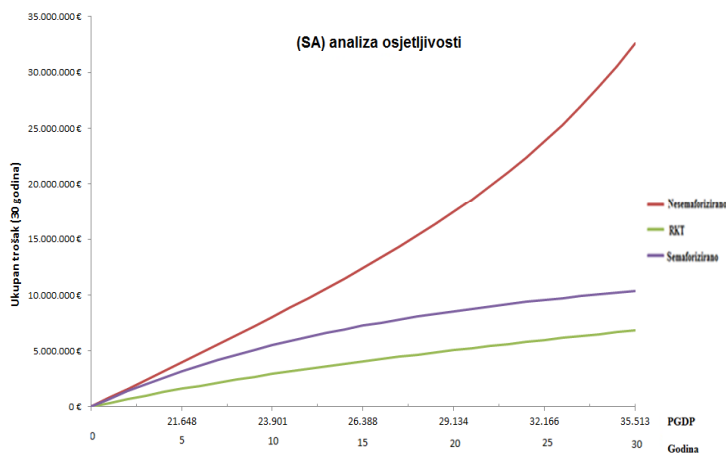
RKT će ostvarivati minimalne troškove u odnosu na semaforizirano raskrižje nakon 2 ÷ 1 (SA) godine, odnosno pri PGDP-u od 20000 ÷ 20400 (SA). U odnosu na nesemaforizirano raskrižje, RKT će nakon 3 ÷ 2 (SA) godine., odnosno pri PGDP-u od 20808 ÷ 20400 (SA) ostvarivati minimalne troškove, što je vidljivo na grafikonu 6.3.

Godina	PGDP	Tip raskrižja		
		Nesemaforizirano	RKT	Semaforizirano
Trošak investicije (€)		0	1.200.000	80.000
Godišnji trošak održavanja (€)		1.500	2.000	5.000
0		0	1.200.000	80.000
1	20000	1.353.619	1.911.123	1.334.957
2	20400	2.094.397	2.593.166	2.520.586
3	20808	4.025.579	3.248.032	3.641.362
4	21224	5.350.079	3.877.446	4.701.417
5	21648	6.670.142	4.482.773	5.704.290
6	22081	7.988.195	5.065.381	6.653.421
7	22523	9.307.598	5.626.815	7.552.296
8	22973	10.631.179	6.168.311	8.403.912
9	23432	11.962.026	6.691.090	9.211.151
10	23901	13.303.465	7.196.318	9.976.703
11	24379	14.658.684	7.685.113	10.703.140
12	24867	16.031.549	8.158.504	11.392.779
13	25364	17.425.903	8.617.549	12.047.919
14	25871	18.845.445	9.063.089	12.670.529
15	26388	20.295.652	9.496.198	13.262.699
16	26916	21.781.466	9.917.704	13.826.203
17	27454	23.308.172	10.328.457	14.362.776
18	28003	24.882.367	10.729.348	14.874.086
19	28563	26.510.535	11.121.112	15.361.600
20	29134	28.200.504	11.504.562	15.826.784
21	29717	29.961.863	11.880.518	16.270.995
22	30311	31.803.528	12.249.699	16.695.500
23	30917	33.736.393	12.612.790	17.101.439
24	31535	35.774.114	12.970.642	17.490.020
25	32166	37.931.799	13.323.992	17.862.277
26	32809	40.225.619	13.673.571	18.219.220
27	33465	42.676.192	14.020.149	18.561.782
28	34134	45.307.024	14.364.618	18.890.939
29	34817	48.146.470	14.707.821	19.207.538
30	35513	51.223.295	15.050.471	19.512.344



Grafikon 6.3.a) Bez primjene SA-analize

Godina	PGDP	Tip raskrižja		
		Nesemafortizirano	RKT	Semafortizirano
Trošak investicije (€)	0	0	1.260.000	84.000
Godišnji trošak održavanja (€)	1.575	2.100	5.250	
0	0	0	1.260.000	84.000
1	20000	1.341.402	1.264.777	1.327.844
2	20400	2.658.016	2.634.611	2.492.354
3	20808	3.953.337	3.271.933	3.583.226
4	21224	5.230.455	3.878.941	4.605.686
5	21648	6.491.738	4.457.438	5.564.267
6	22081	7.739.666	5.009.188	6.463.307
7	22523	8.977.531	5.536.078	7.307.077
8	22973	10.208.040	6.039.664	8.099.295
9	23432	11.434.070	6.521.451	8.843.483
10	23901	12.658.635	6.982.858	9.542.904
11	24379	13.884.546	7.425.227	10.200.640
12	24867	15.115.140	7.849.788	10.819.464
13	25364	16.353.645	8.257.769	11.402.074
14	25871	17.603.070	8.650.175	11.950.809
15	26388	18.867.891	9.028.194	12.468.060
16	26916	20.151.994	9.392.770	12.955.888
17	27454	21.459.449	9.744.845	13.416.270
18	28003	22.795.323	10.085.370	13.851.082
19	28563	24.164.442	10.415.146	14.261.983
20	29134	25.572.613	10.735.016	14.650.594
21	29717	27.026.928	11.045.812	15.018.406
22	30311	28.533.725	11.348.259	15.366.804
23	30917	30.100.761	11.643.040	15.697.034
24	31535	31.737.783	11.930.953	16.010.367
25	32166	33.455.413	12.212.684	16.307.908
26	32809	35.264.804	12.488.898	16.590.715
27	33465	37.180.259	12.760.277	16.859.760
28	34134	39.217.903	13.027.573	17.116.026
29	34817	41.397.110	13.291.487	17.360.375
30	35513	43.737.013	13.552.601	17.593.582



Grafikon 6.3.b) Primjenom SA-analize

Grafikon 6.3. Prikaz funkcije PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu od 30 godina za scenarij S_{3h} na lokaciji V_1

Iz odabranih scenarija S_{2s} , S_{3h} , i njihovih rezultata izraženih u novčanim vrijednostima dokazano je da RKT-i pozitivno utječu na održivi prometni sustav s gledišta ekologije (emisija štetnih ispušnih plinova) i gospodarstva (kašnjenje/vremenski gubitci i potrošnja goriva) u odnosu na ostale tipove raskrižja u razini. Temeljem provedenog istraživanja na karakterističnim raskrižjima određen je i dokazan pozitivan utjecaj RKT-a na okoliš i gospodarstvo, te je time i potvrđena prva hipoteza doktorskog rada.

Pri manjim količinama PGDP-a, RKT ne pridonosi smanjenju troškova, već ima negativni utjecaj na održivi prometni sustav za razliku od ostalih tipova raskrižja što je i dokazano po scenariju S_{1p} . Iz navedenog proizlazi da se radna hipoteza H_2 ne može prihvatiti u cijelosti već samo djelomično. Nije uvijek nužno, tj. da će u određenim prometnim situacijama (uvjetima) RKT imati manji negativni utjecaj na održivi prometni sustav od ostalih tipova raskrižja.

Na temelju navedenih rezultata može se zaključiti da je predložena metoda funkcionalna i pouzdana za predviđeni oblik korištenja.

7. ZAKLJUČCI I PREPORUKE

Razvoj metode kojom bi se omogućila procjena utjecaja RKT-a na okoliš i gospodarstvo u skladu s održivim razvojem bila je osnovna svrha ovog doktorskog rada. Za stvaranje metode bilo je potrebno prikupiti dosadašnje spoznaje vezane za RKT te provesti terenska istraživanja kako bi se prikupili relevantni ulazni podaci za analizu prethodnog i sadašnjeg stanja na odabranim raskrižjima i temeljem toga razvio statistički model.

Prema prikupljenim znanstvenim spoznajama RKT-i značajno smanjuju količinu emisije štetnih ispušnih plinova (CO , CO_2 , NO_x , CH_4) i potrošnju goriva u odnosu na semaforizirana i nesemaforizirana raskrižja dok prema nekim istraživanjima [46, 52] povećavaju emisiju štetnih ispušnih plinova. Duljina repa čekanja (Q_{95}), stupanj zasićenja (x) i prosječno vrijeme čekanja vozila na raskrižju (d_s) manji su u odnosu na ostale tipove raskrižja u razini (zbog nepotrebnih zaustavljanja vozila). Provedenom analizom promatranih raskrižja uz primjenu statističkih testova Shapiro-Wilk, T test i Wilcoxon u odnosu na prethodna izvedena stanja (nesemaforizirana i semaforizirana raskrižja) donesen je zaključak u ovom doktorskome radu da su u većini slučajeva RKT-i pridonijeli smanjenju broja prometnih nesreća, posljedičnih troškova i poboljšanja u promatranim učinkovitostima. Na pojedinim lokacijama RKT-i koji su zamijenili nesemaforizirana i semaforizirana raskrižja u razini prema sadašnjim prometnim podacima pokazali su se kao neodgovarajuće rješenje za rekonstrukciju.

Nakon prikupljenih podataka i analize prethodnog i sadašnjeg stanja na promatranim raskrižjima, pristupilo se razvoju statističkog modela kojim se procjenjuje utjecaj planiranih RKT-a na okoliš i gospodarstvo. Statistički model razvijen je temeljem definiranja eksperimenta, provedbe mikrosimulacija i statističkog modeliranja. Za svaku promatranu mjeru učinkovitosti provedena je analiza pri kojoj je dokazano da učinkovitost pojedinog tipa raskrižja u najvećoj mjeri ovisi o količini prometa na tom raskrižju. Odnos tipova raskrižja je takav da je pri najmanjim količinama prometa najučinkovitije nesemaforizirano raskrižje, pri najvećim količinama prometa najučinkovitije je semaforizirano raskrižje dok je RKT-e najučinkovitije pri srednjim količinama prometa. Primjenom razvijenog modela omogućeno je izračunavanje područja značajnosti, odnosno određivanje graničnih vrijednosti u kojima su mjere učinkovitosti značajne, odnosno nisu značajne za pojedini tip raskrižja.

Na temelju razvijenog statističkog modela, a s ciljem određivanja optimalnog tipa raskrižja koje je ekološki i ekonomski prihvatljivo za društvo, uslijedio je razvoj metode za procjenu

utjecaja planiranih RKT-a na okoliš i gospodarstvo. Metoda procjena razvijena je kroz četiri bazna koraka: definiranje ulaznih podataka za metodu, određivanje čimbenika koji utječu na procjenu troškova u metodi, prognoziranje očekivanih troškova, primjenu razvijenog statističkog modela i odabir pokazatelja opravdanosti metode. Navedena metoda omogućava procjenu ukupnog troška pojedinog tipa raskrižja u novčanim vrijednostima tijekom njegovog uporabnog vijeka u trajanju do 30 godina te odabir raskrižja s najmanjim ukupnim troškovima.

Nakon razvoja metode pristupilo se njezinoj verifikaciji. Verifikacija predložene metode napravljena je kroz proizvoljno postavljene scenarije na promatranom raskrižju koje se nije pokazalo kao najbolje prometno rješenje prilikom terenskog istraživanja. Na temelju variranja ulaznih prometnih podataka i elemenata utjecaja preko postavljenih scenarija praćeno je funkcioniranje metode. Analizom dobivenih rezultata dokazano je da RKT-i pozitivno utječu na održivi prometni sustav s gledišta ekologije (emisija štetnih ispušnih plinova) i gospodarstva (vremenski gubitci/kašnjenje i potrošnja goriva) u odnosu na nesemaforizirana i semaforizirana raskrižja u razini. Pri manjim količinama PGDP-a, RKT ne pridonosi smanjenju ukupnih troškova, već ima negativni utjecaj na održivi prometni sustav. Na temelju navedenih analiza i rezultata zaključeno je kako je predložena metoda pouzdana za predviđeni oblik korištenja te se prihvaća postavljena hipoteza H_1 u cijelosti kao osnovana, a hipoteza H_2 kao djelomično osnovana.

Na temelju navedenih postupaka i spoznaja može se izraziti znanstveni doprinos ovog doktorskog rada u:

- metodologiji određivanja kritičnih vremenskih praznina na RKT-ima;
- izradi statističkog modela za procjenu utjecaja RKT-a na okoliš i gospodarstvo;
- definiranju područja granične vrijednosti količine prometa u kojima je određeni tip raskrižja statistički značajno bolji od ostalih tipova;
- razvoju metode za procjenu utjecaja planiranih RKT-a na okoliš i gospodarstvo;
- određivanju utjecaja pojedinog tipa raskrižja (RKT, semaforiziranog i nesemaforiziranog) na okoliš i gospodarstvo.

Predložena metoda prvenstveno je namijenjena prometnim stručnjacima, ali može poslužiti i drugima ekspertima (građevinarima, ekonomistima i ekolozima) u pogledima:

- planiranja novih raskrižja;
- rekonstrukcije postojećeg tipa raskrižja u drugi tip raskrižja;
- izrade ekonomske ili ekološke studije;
- određivanja funkcionalnosti pojedinog tipa raskrižja u različitim prometnim uvjetima;
- vrednovanja varijantnih rješenja raskrižja.

S obzirom na pretpostavke na kojima se temelji metoda procjene utjecaja RKT-a na okoliš i gospodarstvo i ograničenu veličinu uzorka, te rezultate provedenog istraživanja daju se smjernice za daljnja istraživanja:

- proširenje modela i metode za ostale tipove kružnih raskrižja (dvotračna-višetračna, turbo i „*flower*“), njihove projektno-oblikovne elemente (vanjski promjer ≥ 45 m, *bypassi*, ulazni/radijusi, itd.) i troškove (prometnih nesreća, potrošnje el. energije itd.)
- ponašanje motoriziranih (kritične vremenske praznine i vremena slijeđenja) i nemotoriziranih sudionika u prometu (kretanje pješaka i biciklista - njihova struktura, brzina), u različitim vremenskim (kiša, snijeg, led, vjetar, itd.) i prostornim uvjetima (urbana sredina, izvanurbana sredina, neposredna blizina škole, bolnica i trgova);
- razvoj simulacijskog programskog alata za opravdanost odabira određenog tipa raskrižja na temelju navedenih proširenja i nadopune te primjene relevantnih rezultata daljnjih znanstvenih istraživanja usko povezanih s ovom problematikom.

LITERATURA

- [1] Tollazzi, T.: *Kružna raskrižja*, IQ Plus, Kastav, 2007.
- [2] Kittelson & Associates Inc. *Modern Roundabouts*
<http://roundabout.kittelson.com/Roundabouts/List/US>, Accessed May 2014 2014 [cited 2014 26 April].
- [3] Guichet B. *French Roundabouts Today*. Proceedings of 2nd Transportation Research Board National Roundabout Conference; 2008 May 18-21; Kansas City, Missouri, United States. 2008.
- [4] Roundabouts USA. *History of the Modern Roundabout*.
<http://www.roundaboutsusa.com/history.html>, Accessed May 2014 2014 [cited 2014 26 April].
- [5] *Highway Capacity Manual 2010*, (HCM2010). Transportation Research Board.
- [6] Tenekeci, G., Montgomery, F., & Wainaina, S. (2010). Roundabout capacity in adverse weather and light conditions. *Transport*, 163(TR1), 29–39.
- [7] Marlow, M., & Maycock, G. (1982). SR724 The effect of Zebra crossings on junction entry capacities. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- [8] CERTU, *Carrefours urbains Guide*, Lyon, France, 1999.
- [9] Yap YH, Gibson HM, Waterson BJ. An International Review of Roundabout Capacity Modelling. *Transport Reviews*. 2013 2013/09/01;33(5):593-616.
- [10] Crown, R.B., 1987. Rodel-an alternative approach to roundabout design. *Highways & Transportation* 34 (10), 12-19.
- [11] Flannery, A., Jeffrey, P.K., Natarajan, G., et al., 2005. Queuing delay models for single-lane roundabouts. *Civil Engineering and Environmental Systems* 22 (3), 133-150.
- [12] Kimber, R. M. (1980). LR942 The traffic capacity of roundabouts. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- [13] Akcelik, R., 2007. A review of gap-acceptance capacity models. In: 29th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR), Adelaide, 2007.
- [14] Wu, N., 2006. Capacity enhancement and limitation at roundabouts with double-lane or flared entries. In: *The 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service*, Yokohama, 2006.
- [15] Kimber, R. M. (1980). LR942 The traffic capacity of roundabouts. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- [16] Guichet B, editor *Roundabouts in France: Development, safety, design, and capacity*. 1997; Proceedings of the third international symposium on intersections without traffic signals (pp.100-105); 1997, July 21-23, Portland, Oregon. USA.

- [17] Troutbeck, R.J.: Estimating the Critical Acceptance Gap from Traffic Movements, Research Report 92-5, Physical infrastructure centre, Queensland University of Technology, 1992.
- [18] Troutbeck, R. J. (1989). SR45 evaluating the performance of a roundabout. Vermont South: Australian Road Research Board.
- [19] Wu, N. (2001). A universal procedure for capacity determination at unsignalized (priority-controlled) intersections. *Transportation Research Part B: Methodological*, 35(6), 593–623.
- [20] Ryder, P. (2001). Interim advice note (IAN 36/01): The use and application of microsimulation traffic models. London: Highways Agency.
- [21] Paramics Microsimulation. (2011). S-Paramics (Parallel Microscopic Traffic Simulator). Edinburgh: SIAS Limited.
- [22] TSS-Transport Simulation Systems. (2011). Aimsun (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks). Barcelona: Transport Simulation Systems.
- [23] Group. (2011). Vissim (Verkehr In Staˆdten — SIMulationsmodell). Karlsruhe: PTV.
- [24] Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J., & Krajzewicz, D. (2011). SUMO— Simulation of Urban MObility. Berlin: German Aerospace Center, Institute of Transportation Systems.
- [25] Abou-Senna, H., Radwan, E., Westerlund, K., Cooper, C.D., 2013. Using a traffic simulation model (VISSIM) with an emissions model (MOVES) to predict emissions from vehicles on a limited-access highway. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 63 (7), 819–831.
- [26] Šraml, M.; Jovanovi, G.: Mikrosimulacije u prometu (radni udžbenik s primjenom VISSIM-a), Univerza v Mariboru, Maribor, 2014.
- [27] Roads and Maritime Services (2013) *Traffic Modelling Guidelines*, Sydney, NSW
- [28] Austroads (2006) Research Report AP-R286/06 *Use and Application of Micro Simulation Traffic Models*, Austroads Incorporated, Sydney.
- [29] Federal Highway Administration: Roundabouts: An Informational Guide FHWA-RD- 00-067, USDOT, FHWA, USA, 2000.
- [30] Traffic Analysis Handbook A Reference for Planning and Operations. Florida Department of Transportation, Florida, US, 2014.
- [31] Wu, N. “An Approximation for the Distribution of Queue Lengths at Unsignalized Intersections.” In *Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity* (ed. R. Akçelik), Sydney, Australia. Australian Road Research Board, 1994.
- [32] Mandavilli S, Rys MJ, Russell ER. Environmental impact of modern roundabouts. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2008;38(2):135-42.
- [33] Golubić, J., *Promet i okoliš*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999
- [34] Demir, Emrah, Bektas, Tolga and Laporte, Gilbert 2014. A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research* 237 (3), pp. 775-793

- [35] Dekker, J Bloemhof, and I Mallidis. Operations Research for green logistics—An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219(3):671–679, 2012.
- [36] Katsis P, Ntziachristos L, G. M. Description of new elements in COPERT 4 v10.0. Thessaloniki (Greece): EMISIA SA; Dec. 2012 71 p. Report No: 12.RE.012.V1 2012.
- [37] USEPA. Methodology for developing modal emission rates for EPA’s multi-scale motor vehicle & equipment emission system. Prepared by North Carolina State University for USEPA, Ann Arbor, MI, August, EPA420. 2002.
- [38] Coelho MC, Farias TL, Roupail NM. A Numerical Tool for Estimating Pollutant Emissions and Vehicles Performance in Traffic Interruptions on Urban Corridors. *International Journal of Sustainable Transportation*. 2009 2009/06/23;3(4):246-62.
- [39] USEPA. Methodology for developing modal emission rates for EPA’s multi-scale motor vehicle & equipment emission system. Prepared by North Carolina State University for USEPA, Ann Arbor, MI, August, EPA420. 2002.
- [40] R. Smit, R. Smokers, and E. Rabe, “A new modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+,” *Transportation research. Part D, Transport and environment*, vol. 12, 2007, pp. 414–422.
- [41] EPA. Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) User Guide for MOVES2010b . Washington, DC: United States Environmental Protection Agency (EPA); 2012, June 2012; p. 202. Report No: EPA-420-B-12-001b 2012.
- [42] Ahn K, Rakha H, Trani A, Van Aerde M. Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels. *Journal of Transportation Engineering*. 2002;128(2):182-90.
- [43] N. E. Ligterink, R. De Lange, and E. Schoen. Refined vehicle and driving-behavior dependencies in the VERSIT+ emission model. In *Proceedings of the ETAPP Symposium*, pages 177–186, Toulouse, France, 2009.
- [44] A. Ciskos and I. Varga. Real-time modeling and control objective analysis of motorway emissions. In *Proceedings of the 15th Edition of the Euro Working Group on Transportation*, Paris, France, September 2012.
- [45] EnViVer manual (2010), TNO, Netherlands.
- [46] Varhelyi, A., 2002. The Effects of Small Roundabouts on Emissions and Fuel Consumption: A Case Study. Elsevier Science Ltd, Sweden.
- [47] Zuger, P., A. Porchet, and D. Burch. (2001). Roundabouts: Fuel Consumption, Emissions of Pollutants, Crossing Times. Presented at Swiss Transport Research Conference: Emissions, Ascona, Switzerland.

- [48] M. C. Coelho, T. L. Farias, and N. M. Roupail, "Effects of roundabout operations on pollutant emissions," *Transport. Res. D Tr.E*, vol.11, issue 5, pp. 333-343, 2006.
- [49] Hallmark, Shauna and Abhisek Mudgal. (2011). Comparison of Emissions at Roundabouts Compared to Traditional Traffic Control. Proceedings of the 2011 Annual Meeting of the Air and Waste Management Association. Orlando, Florida. June.
- [50] Decký, M., Krokker, A., Píala, J.: *Zmena hlukových imisíí vplyvom rekonštrukcie priesečných križovatiek na kruhové objazdy* [Noise pollution varied by the influence of intersections reconstruction to roundabouts] *Silnice a železnice*, 3. ročník, 1/2008, Praha, Czech Republic.
- [51] Chevallier, E., Can, A., Nadji, M., Leclercq, L.: *Improving noise assessment at intersections by modeling traffic dynamics*, *Transportation Research Part D*, 2009, vol. 14, no. 7, pp. 100 – 110.
- [52] Chamberlin R, Swanson B, Talbot E, editors. Analysis of MOVES and CMEM for Evaluating the Emissions Impact of an Intersection Control Change. Paper 11-0673, Proceedings of 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board; 2011 January 23-27; Washington, DC, United States.
- [53] Rakha HA, Jackson M, editors. Are Roundabout Environmentally Friendly? An Evaluation for Uniform Approach Demands. Paper 12-0789, Proceedings of 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board; 2012 January 22-26; Washington, DC, United States.
- [54] Corriere, F., Guerrieri, M., Ticali, D., Messineo, A., 2013a. Estimation of air pollutant emissions in Flower roundabouts and in conventional roundabouts. *Arch. Civil Eng.* 59 (2), 229–246.
- [55] Vasconcelos L, Silva AB, Seco AM, Fernandes P, Coelho MC. Turbo-Roundabouts: A multi-criteria assessment on intersection capacity, safety and emissions. Accepted for presentation in the 93rd Annual Conference of the Transportation Research Board; 2014 January 12-16; Washington, DC, United States.
- [56] Guerrieri, M.; Corriere, F.; Lo Casto, B.; Rizzo, G. A model for evaluating the environmental and functional benefits of "innovative" roundabouts. // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 39, 2015, pp. 1-16.
- [57] Fortuijn L, *Turbo Roundabouts*, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2096, (2009), 16–24, DOI 10.3141/2096-03.
- [58] T. Tollazzi, M. Rencelj, S. Turnsek, *New Type of Roundabout: Roundabout with "Depressed" Lanes for Right Turning - "Flower Roundabout"*, *Promet – Traffic & Transportation*, Vol. 23, 2011, No. 5, 353-358.
- [59] Tollazzi, T., Jovanović, G., Rencelj, M., 2013. New type of roundabout: dual one-lane roundabouts on two levels with right-hand turning bypasses – "Target roundabout". *Promet Traffic Transp.* 25 (5).

- [60] Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja na državnim cestama“ (06.07.2015.)
<http://www.hrvatske-cesta.hr/default.aspx?id=202>
- [61] Akcelik and Associates. Sidra Intersection User Guide (for Version 6). Melbourne: Australia; 2013, Akcelik and Associates Pty Ltd.
- [62] Dijkstra A, Marchesini P, Bijleveld F, Kars V, Drolenga H, van Maarseveen M. Do Calculated Conflicts in Microsimulation Model Predict Number of Crashes? Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2010 12/01/;2147(-1):105-12.
- [63] Zheng D, Qin X, editors. Negotiation-Based Conflict Exposure Methodology in Roundabout Crash Pattern Analysis. Paper 10-1616, Proceedings of the 89th Annual Meeting of Transportation Research Board; 2010; January 10-14; Washington DC, United States.
- [64] Chen Y, Persuad B, Lyon C, editors. Effect of Speed on Roundabout Safety Performance: Implications for Use of Speed as Surrogate Measure. Paper 11-2846, Proceedings of 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board; 2011; January 22-26; Washington, DC, United States.
- [65] Pu L, Joshi R. Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) - Software User Manual. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation McLean, VA, United States; 2008 May. 100 p. Report No.: FHWA-HRT-08-050: 2008.
- [66] Directive 2009/33/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles.
- [67] Ricardo-AEA (2014), Update of the Handbook on External Costs of Transport Final Report European Commission.
- [68] Mauro, R., Cattani, M., 2012. Functional and economic evaluations for choosing road intersection layout. *Promet Traffic Transp.* 24 (5), 441–448, 10.7307/ptt, v24i5, 1180.
- [69] Schoon C, Van Minnen J. Accidents at roundabouts II: Second investigation into the safety of roundabouts especially for cyclists and moped riders [in Dutch]. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid (SWOV), rapport R-93-16. Leidschendam; 1993.
- [70] Niederhauser M.E., B.A. Collins and E.J. Myers, "The Use of Roundabouts: Comparison with Alternate Design Solutions," *Compendium of Technical Papers*, 67th Annual Meeting, Institute of Transportation Engineers, Boston (August 1997).
- [71] Persaud, B.N.; Retting, R.A.; Garder, P.E.; and Lord, D. 2001. Safety effect of roundabout conversions in the United States: empirical Bayes observational before-after study. *Transportation Research Record* 1751:1-8. Washington, DC: Transportation Research Board.
- [72] Rodegerdts et al. "Roundabouts in the United States," NCHRP, Report 572, 2007.

- [73] Tollazzi T, Tesoriere G, Guerrieri M, Campisi T, Environmental, functional and economic criteria for comparing “target roundabouts” with one- or two-level roundabout intersections, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, (2015), 330–344.
- [74] Cvitanić D. (2000) Modeliranje kapaciteta i razine usluge nesemaforiziranih raskrižja. Magistarski rad Split. Sveučilište u Splitu Građevinski fakultet.
- [75] Vasconcelos, A. L. P., Á. J. M. Seco, and A. M. C. B. Silva. Comparison of procedures to estimate critical headways at roundabouts. *Promet – Traffic & Transportation*, Vol. 25, No. 1, 2013, pp. 43-53.
- [76] KYTE, M. TIAN, MIR, HAMEEDMANSOOR, KITTELSON, VANDEHEY, ROBINSON, BRILON, BONZIO, WU, TROUTBECK (1996.): *Capacity and Level of Service at Unsignalized Intersections, Final Report, Volume 1 – Two way Stop-Controlled Intersections*; . Final Report for National Cooperative Highway Research Program Project 3-46.
- [77] AUSTROADS (2010). Guide to Road Design Part 4A: Unsignalised and Signalised Intersections. AGRD04A-10. Association of Australian State Road and Transport Authorities, Sydney.
- [78] Guide to cost-benefit analysis of Investment projects *Struktural* <http://www.docstoc.com/docs/3445352/Guide-to-COST-BENEFIT-ANALYSIS-of-investment-projects-Structural> (09.02.2015.)
- [79] Project Traffic Forecasting Procedure, Florida Department of Transportation, Topic No. 525-030-120, June 21, 2000.
- [80] Project Appraisal Guidelines - Unit 16.2 Expansion Factors for Short Period Traffic Counts, National Roads Authority, August 2012.

POPIS ILUSTRACIJA

Popis slika

Slika 1.1. Plan istraživanja	5
Slika 2.1. Prikaz Widemannovog modela [23]	13
Slika 2.2. Prikaz kretanja toka kroz pojedine oblike raskrižja [32]	16
Slika 2.3. Struktura emisijskog modela EnViVer [45].....	19
Slika 3.1. Lokacija odabranih kružnih raskrižja.....	28
Slika 4.1. Tipovi raskrižja	53
Slika 4.2. Izlazni rezultati emisijskog modela.....	65
Slika 5.1. Prikaz satne distribucije, mjesečnih čimbenika i O/D matrice za lokaciju V ₅	94
Slika 5.2. Prikaz satne distribucije, mjesečnih čimbenika i O/D matrice za lokaciju V ₇	94
Slika 5.3. Prikaz satne distribucije, mjesečnih čimbenika i O/D matrice za lokaciju V ₈	95
Slika 6.1. Prikaz satne distribucije, mjesečnih čimbenika i O/D matrice za scenarije S _{1p} , S _{2s} , S _{3h}	104

Popis tablica

Tablica 3.1. Izdvojeni privozi za procjenu kritične vremenske praznine, vremena slijeđenja i brzine vozila na promatranim raskrižjima.....	30
Tablica 3.2. Rezultati procjene kritičnih vremenskih praznina.....	31
Tablica 3.3. Rezultati procjene kritičnih vremenskih praznina.....	32
Tablica 3.4. Procjena brzina vozila na promatranim RKT-ima u RH.....	33
Tablica 3.5. Projektno-oblikovni elementi promatranih raskrižja.....	34
Tablica 3.6. Troškovi izgradnje promatranih raskrižja	35
Tablica 3.7. Prikaz broja prometnih nesreća prije i poslije izgradnje RKT-a na promatranim lokacijama	36
Tablica 3.8. Troškovi materijalnih i nematerijalnih šteta na promatranim raskrižjima	37
Tablica 3.9. Simulacijski rezultati za prethodno stanje.....	39
Tablica 3.10. Simulacijski rezultati sadašnjeg stanja	39
Tablica 3.11. Broj prometnih nesreća u promatranom vremenskom periodu na promatranim raskrižjima.....	41
Tablica 3.12. Rezultati t testa za broj prometnih nesreća prije i poslije izgradnje promatranih RKT-a (SPSS-program)	41

Tablica 3.13. Deskriptivna statistika broja prometnih nesreća prije i poslije izgradnje promatranih RKT-a (SPSS-program).....	42
Tablica 3.14. Prosječna razlika između prethodnog i sadašnjeg stanja za promatrane pokazatelje učinkovitosti na promatranim raskrižjima	45
Tablica 3.15. Usporedba prethodnog i sadašnjeg stanja promatranih parametara za svaku lokaciju promatranih raskrižja.....	45
Tablica 3.16. Rezultati provedenih statističkih testova za dokazivanje statističke značajnosti između prethodnih i sadašnjih stanja pokazatelja učinkovitosti na promatranim raskrižjima	46
Tablica 3.17. Godišnje uštede na troškovima održavanja.....	47
Tablica 3.18. Usporedba materijalnih i nematerijalnih troškova prije i poslije izgradnje promatranih RKT-a u analiziranom vremenskom periodu promatranja	48
Tablica 3.19. Vrijednost eksternih troškova za prethodno i sadašnje stanje na promatranim raskrižjima.....	49
Tablica 3.20. Rezultati provedenih statističkih testova za dokazivanje statističke značajnosti između prethodnih i sadašnjih stanja novčanih troškova na promatranim raskrižjima	50
Tablica 4.1. O/D matrica prometnog toka u postotcima	54
Tablica 4.2. Rezultati GEH metode za modelirani tip RKT-a	58
Tablica 4.3. RMSNE metoda na reprezentativnom raskrižju temeljem mjerenih i simuliranih brzina na privozima.....	59
Tablica 4.4. Rezultati GEH metode za modelirani tip nesemaforiziranog raskrižja.....	60
Tablica 4.5. Rezultati GEH metode za modelirani tip semaforiziranog raskrižja.....	60
Tablica 4.6. Struktura grupe vozila po godinama	61
Tablica 4.7. Udio vrste goriva po promatranim grupama vozila	62
Tablica 4.8. Starost vozila po promatranim grupama vozila.....	63
Tablica 4.9. Rezultati statističkih modela - odnosi se na transformirane podatke	68
Tablica 5.1. Ulazni prometni podatci za odabrana raskrižja V_5 , V_7 i V_8	93
Tablica 5.2. Novčane vrijednosti pojedinog elementa utjecaja za odabrana raskrižja V_5 , V_7 i V_8	95
Tablica 5.3. Analiza osjetljivosti za odabrana raskrižja V_5 , V_7 i V_8	96
Tablica 5.4. Prikaz rezultata na odabranim lokacijama V_5 , V_7 i V_8	96
Tablica 6.1. Prikaz scenarija S_{1p} , S_{2s} , S_{3h}	103
Tablica 6.2. Prikaz rezultata za scenarij S_{1p}	104
Tablica 6.3. Prikaz rezultata za scenarij S_{2s}	106

Tablica 6.4. Prikaz rezultata za scenarij S_{3h}	108
--	-----

Popis grafikona

Grafikon 3.1. Frekvencijska distribucija broja prometnih nesreća prije i poslije izgradnje promatranih RKT-a (SPSS-program).....	43
Grafikon 4.1. Prikaz simuliranih i mjerenih brzina na RKT-u.....	58
Grafikon 4.2. Promjena broja vozila prema apsolutnim vrijednostima emisijskih razina za vozila pogonjena benzinskim i dizelskim motorom.....	64
Grafikon 5. 1. Prikaz funkcije PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu promatranja na lokaciji V_5	98
Grafikon 5.2. Prikaz funkcije PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu promatranja na lokaciji V_7	99
Grafikon 5.3. Prikaz funkcije PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu promatranja na lokaciji V_8	100
Grafikon 6.1. Prikaz funkcije PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu od 30 godina za scenarij S_{1p} na lokaciji V_1	105
Grafikon 6. 2. Prikaz funkcije PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu od 30 godina za scenarij S_{2s} na lokaciji V_1	107
Grafikon 6.3. Prikaz funkcije PGDP-a i ukupnog troška u vremenskom periodu od 30 godina za scenarij S_{3h} na lokaciji V_1	109

Popis dijagrama

Dijagram 3.1. Box-plot dijagram broja prometnih nesreća prije i poslije rekonstrukcije RKT-a (SPSS-program).....	44
Dijagram 4.1. Plan metodoloških koraka.....	51
Dijagram 4.2. Plan modeliranja prometnog i emisijskog modela.....	56
Dijagram 4.3. Dijagram studentiziranih reziduala: dijagrami raspršenja (lijevo) i kvantil – kvantil dijagrami (desno).....	71
Dijagram 4.4. Krivulje modela s podacima iz originalnog uzorka za kašnjenja vozila.....	73
Dijagram 4.5. Krivulje modela s podacima iz originalnog uzorka za potrošnju goriva.....	74
Dijagram 4.6. Krivulje modela s podacima iz originalnog uzorka za ugljikov dioksid.....	75
Dijagram 4.7. Krivulje modela s podacima iz originalnog uzorka za okside dušika.....	76

Dijagram 4.8. Krivulje modela s podacima iz originalnog uzorka za čestice tvari	77
Dijagram 4.9. Krivulje modela (s podacima iz originalnog uzorka) s obzirom na tip raskrižja - s naznačenim područjima učinkovitosti.....	79
Dijagram 4.10. Područja učinkovitosti s obzirom na tip raskrižja za sve kombinacije nezavisnih varijabli	81
Dijagram 5.1. Proces prognoziranja očekivanih troškova.....	88
Dijagram 5.2. Dijagram toka metode procjene utjecaja RKT-a na okoliš i gospodarstvo.....	92

ŽIVOTOPIS

Nikola Šubić je rođen 18. siječnja 1984. godine u Zagrebu. Osnovnu i srednju školu (Škola za cestovni promet) pohađao je u Zagrebu. Studirao je na Prometnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, na cestovnom smjeru. Tijekom studiranja na Katedri za cestovne prometnice obavljao je poslove demonstrature i sudjelovao u izradi projekata i elaborata. Diplomirao je 2007. godine na temu "Prijedlog rekonstrukcije i prometno-sigurnosne optimizacije kružnog raskrižja Avenija Dubrovnik - Remetinečka cesta u Zagrebu" i stekao zvanje diplomiranog inženjera prometa. Postdiplomski doktorski studij Tehnološki sustavi u prometu i transportu upisao krajem 2008. godine na istoimenom fakultetu.

Od 2008. godine zaposlen u poduzeću Hrvatska osiguravajuća kuća d.d., u svojstvu procjenitelja, na poslovima šteta gdje radi do sada. Krajem 2013. godine postaje stalni sudski vještak za cestovni promet, tehniku i procjenu vrijednosti motornih vozila prema imenovanju Županijskog suda u Zagrebu. Poslove vezane uz vještačenja obavlja kontinuirano do sada. Od 2014. godine član je udruge HSUESV (Hrvatska strukovna udruga eksperata i sudskih vještaka). Autor je više znanstvenih radova na temu sigurnosti prometa i propusne moći raskrižja s kružnim tokom prometa.

POPIS RADOVA

- **Znanstveni radovi u drugim časopisima**

- [1] Pilko, Hrvoje; Brčić, Davor; Šubić, Nikola. Study of vehicle speed in the design of roundabouts. // *Građevinar: časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera*. 66 (2014), 5; 407-416.
- [2] Šubić, Nikola; Legac, Ivan; Pilko, Hrvoje. Analysis of Capacity of Roundabouts in the City of Zagreb according to HCM C-2006 and Ning Wu methods. // *Tehnički vjesnik: znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku*. 19 (2012) , 2; 451-457.

- **Znanstveni radovi objavljeni u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom**

- [3] Šubić, Nikola; Lučić Marko; Zulumović Tomislav. Impact of new built roundabouts on environmental in city of Vinkovci // *Road and Rail Infrastructure III, Proceedings of the Conference CETRA 2014* / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2014. 825-833.
- [4] Pilko, Hrvoje; Brčić, Davor; Šubić, Nikola. Speed as an Element for Designing Roundabouts// *Proceedings of the 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2012* / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2012. 981-988.
- [5] Šubić, Nikola; Pilko, Hrvoje; Tepeš, Krunoslav. Application of Crash Prediction Models for Roundabouts in the City of Zagreb // *Conference proceedings Transport, Maritime and Logistics Science, 15th ICTS 2012* / Zanne, Marina; Bajec, Patricija (ur.). Portorož : Fakulteta za pomorstvo in promet, 2012. 1-12.
- [6] Legac, Ivan; Pilko, Hrvoje; Šubić, Nikola. Analysis of Traffic Safety on Roundabout Jadranska avenue - Avenue Dubrovnik in Zagreb // *Conference proceedings Transport, Maritime and Logistics Science, 14th ICTS 2011* / Zanne, Marina ; Bajec, Patricija (ur.). Portorož: Fakulteta za pomorstvo in promet, 2011.
- [7] Pilko, Hrvoje; Božić, Nikola; Šubić, Nikola. Analysis of Roundabout Capacities in the City of Zagreb using Swiss Method SN 640 024 // *Conference proceedings Transport, Maritime and Logistics Science, 14th ICTS 2011* / Zanne, Marina; Bajec, Patricija (ur.). Portorož: Fakulteta za pomorstvo in promet, 2011.
- [8] Matulin, Marko; Pilko, Hrvoje; Šubić, Nikola. Utjecaj upravljanja mobilnošću korisnika na modalnu razdiobu putovanja// *13. mednarodno posvetovanje o prometni znanosti Promet, pomorstvo in logistika: zbornik referatov = 13th International Conference on Transport Science Transport, maritime and logistics science (ICTS 2010) : conference*

proceedings / Zanne, Marina; Bajec, Patricija (ur.). Portorož: Fakulteta za pomorstvo in promet, 2010.

- [9] Šubić, Nikola; Pilko, Hrvoje; Matulin, Marko. Analiza kapaciteta kružnih raskrižja u gradu Zagrebu // *13. mednarodno posvetovanje o prometni znanosti Promet, pomorstvo in logistika: zbornik referatov = 13th International Conference on Transport Science Transport, maritime and logistics science (ICTS 2010 : conference proceedings* / Zanne, Marina; Bajec, Patricija (ur.). Portorož : Fakulteta za pomorstvo in promet, 2010.
- [10] Legac, Ivan; Pilko, Hrvoje; Šubić, Nikola. Introduction on Roundabouts in Croatia - Preliminary Experiences // *Proceedings on 16th IRF World Congress, Lisboa*. 2010.

• **Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom**

- [11] Legac, Ivan; Šubić, Nikola; Pilko, Hrvoje. Komparativna analiza propusne moći kružnih raskrižja u Gradu Zagrebu // *Zbornik radova Peti hrvatski kongres o cestama* / Rukavina, Tatjana (ur.). Zagreb: Hrvatsko društvo za ceste Via-vita, 2011.
- [12] Legac, Ivan; Šubić, Nikola; Pilko, Hrvoje. Analiza kapaciteta kružnih raskrižja u gradu Zagrebu // *Ceste 2010.*. Zagreb, 2010. 111-121.

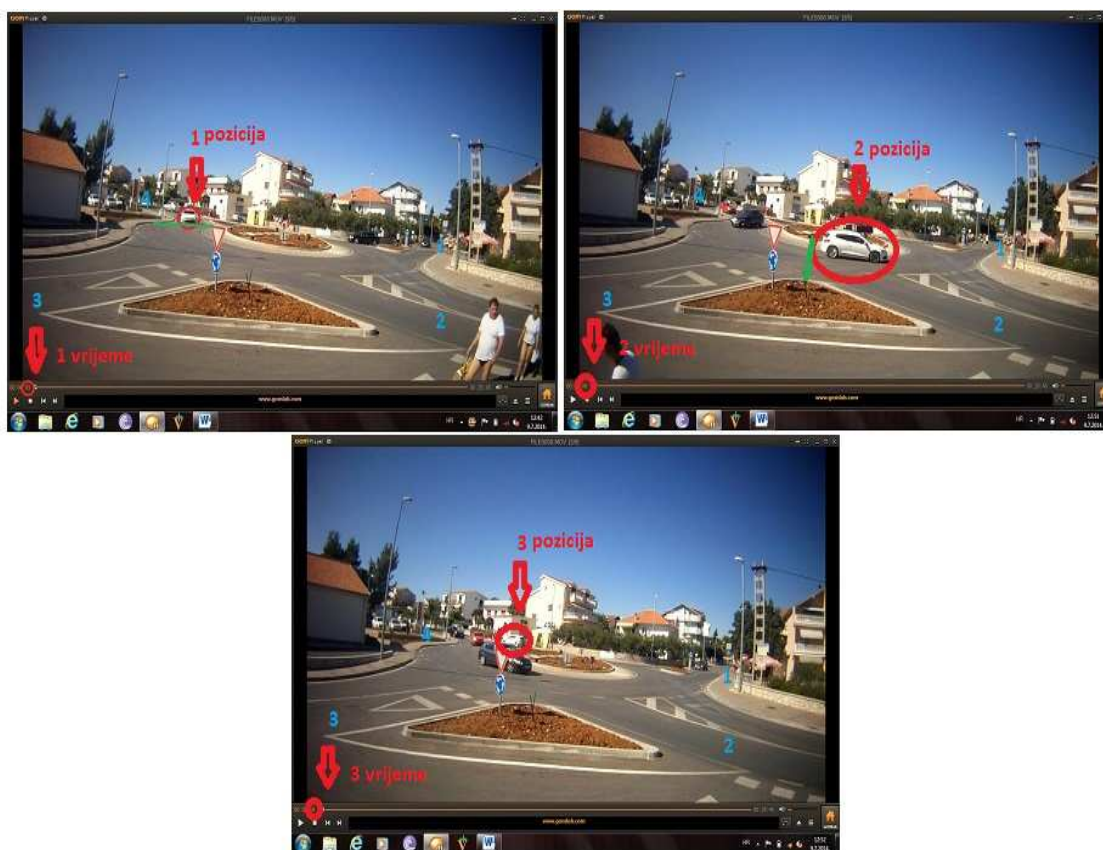
• **Projekti i studije**

- [13] Legac, Ivan; Hozjan, Dubravka; Ivanković, Božidar; Pilko, Hrvoje; Novačko, Luka; Šubić, Nikola; Lanović, Zdenko; Batur, Goran i ostali. Prometna analiza i unapređenje sigurnosti i protočnosti u raskrižjima s kružnim tokom prometa, 2009.

PRILOZI

Prilog 1. Izdvajanje prometnih podataka o vršnom satu, intenzitetu i strukturi prometa

Za izdvajanje prometnih podataka o vršnom satu, intenzitetu i strukturi prometa napravljeno je brojanje prometa na promatranim RKT-ima iz videoanalize prikupljenih videozapisa korištenjem besplatnog programskog paketa GOM Playera 2.2 (GOM LAB. 2014). Videozapisi su analizirani kao svaka pojedinačna slika u videu kako bi se omogućilo praćenje svakog pojedinačnog vozila kroz raskrižje. Na slici P.1. prikazana je videoanaliza praćenja pojedinačnog vozila na lokaciji raskrižja V₆. Iz slike P.1. vidljivi su sljedeći potrebni prometni podatci: jedno vozilo (količina), osobni automobil (struktura), ulazni privoz 4 i izlazni privoz 4 (tok kretanja).



Slika P.1. Prikaz praćenja pojedinačnog vozila kroz programski paket GOM Player 2.2 na lokaciji promatranog raskrižja V₆

Prilikom pregleda videozapisa u razdoblju od dva karakteristična sata za jutarnji i popodnevni vremenski interval, svako pojedinačno vozila zabilježeno je u posebnim tablicama za brojanje prometa (vidi tablicu P.1.). U posebnim tablicama za brojanje prometa kretanje vozila na svim ulaznim privozima udesno označeno je oznakom R, ulijevo L, ravno T i polukružno okretanje

oznakom U, pješački promet na svakom privozu označen je oznakom P. Privozi su označeni prema sjevernoj strani svijeta u smjeru kazaljke na satu tako da je privoz 1 uvijek na sjevernoj strani, privoz 2 na istočnoj strani, privoz 3 na južnoj strani i privoz 4 na zapadnoj strani svijeta, ovisno o broju privoza. Od dva karakteristična sata određen je jedan vršni sat za jutarnji i popodnevni interval brojanja kao najveći broj vozila koji prolazi promatranim raskrižjem u uzastopnih 60 minuta. Brojana vozila svrstana su u pet kategorija: osobna vozila, teretna vozila, autobusi, motocikli i bicikli, a u tablicama prikazan je njihov udio po privozima. Faktor vršnog sata (FVS) za svaki privoz posebno je izračunat kao omjer satnog opterećenja i maksimalnog opterećenja unutar jednog sata (15-minutno opterećenje) i u tablicama je označen oznakom FVS.

Za potrebe istraživanja odabran je jedan određeni vršni sat za jutarnji ili popodnevni interval brojanja, a koji je ovisan o maksimalnoj količini prometa na raskrižju. Brojanje prometa za svako promatrano raskrižje prikazano je u tablici P.1.

Brojanje prometa

Kružno raskrižje na lokaciji V6

Vrijeme snimanja 6:00-8:00h i 15:00-17:00h

Datum snimanja: 31.07.2013

	PRIVOZ 1 (S)					PRIVOZ 2 (I)					PRIVOZ 3 (J)					PRIVOZ 4 (Z)					ΣP	ΣP				
	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ			P	Σ		
6:00-6:15	2	11	2	0	15	7	7	3	2	0	12	5	0	5	2	0	7	7	0	1	1	0	2	7	36	26
6:15-6:30	5	10	1	1	17	2	7	0	2	0	9	1	1	12	7	0	20	17	1	1	0	0	2	4	48	24
6:30-6:45	1	9	0	0	10	2	9	3	5	0	17	1	1	17	4	0	22	6	0	1	0	0	1	8	50	17
6:45-7:00	4	10	0	1	15	12	11	1	4	0	16	6	0	28	14	0	42	9	0	1	0	0	1	8	74	35
ukupno	12	40	3	2	57	23	34	7	13	0	54	13	2	62	27	0	91	39	1	4	1	0	6	27	208	102
7:00-7:15	4	18	2	0	24	11	7	2	7	0	16	9	0	26	9	0	35	8	0	2	0	0	2	25	77	53
7:15-7:30	5	18	0	1	24	17	8	1	7	0	16	7	0	29	8	0	37	6	0	0	0	0	0	10	77	40
7:30-7:45	7	15	2	3	27	25	11	2	11	0	24	11	0	39	17	1	57	10	0	2	1	0	3	10	111	56
7:45-8:00	4	29	4	1	38	30	10	2	13	0	25	20	0	32	10	0	42	16	1	1	3	0	5	14	110	80
ukupno	20	80	8	5	113	83	36	7	38	0	81	47	0	126	44	1	171	40	1	5	4	0	10	59	375	229

	PRIVOZ 1 (S)					PRIVOZ 2 (I)					PRIVOZ 3 (J)					PRIVOZ 4 (Z)					ΣP	ΣP					
	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ			P	Σ			
15:00-15:15	7	46	4	1	58	29	21	2	9	0	32	19	0	31	12	0	43	12	0	2	0	0	2	14	135	74	
15:15-15:30	11	30	1	0	42	44	19	2	7	1	29	19	0	31	24	0	55	16	0	2	0	0	2	15	128	94	
15:30-15:45	10	35	4	1	50	54	29	2	12	0	43	23	0	30	15	0	45	17	0	1	0	0	1	25	139	119	
15:45-16:00	11	39	2	4	56	15	28	3	12	0	43	0	0	42	18	0	60	1	1	1	1	0	3	0	162	16	
ukupno	39	150	11	6	206	142	97	9	40	1	147	61	0	134	69	0	203	46	1	6	1	0	8	54	564	303	
16:00-16:15	5	40	2	1	48	20	18	1	5	0	24	15	0	25	10	0	35	9	0	4	2	0	6	10	113	54	
16:15-16:30	8	25	1	1	35	30	18	1	6	0	25	10	0	20	22	0	42	7	0	2	1	0	3	15	105	62	
16:30-16:45	7	27	4	3	41	50	27	3	15	0	45	18	0	29	16	0	45	15	0	1	0	0	1	22	132	105	
16:45-17:00	3	30	1	3	37	10	25	2	13	0	40	1	0	45	20	0	65	1	0	0	0	0	0	0	1	142	12
ukupno	23	122	8	8	161	110	88	7	39	0	134	44	0	119	68	0	187	32	0	7	3	0	10	47	492	233	

Vršni sat 7:00-8:00h

	PRIVOZ 1 (S)					PRIVOZ 2 (I)					PRIVOZ 3 (J)					PRIVOZ 4 (Z)					ΣP	ΣP				
	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ			P	Σ		
7:00-7:15	4	18	2	0	24	11	7	2	7	0	16	9	0	26	9	0	35	8	0	2	0	0	2	25	77	53
7:15-7:30	5	18	0	1	24	17	8	1	7	0	16	7	0	29	8	0	37	6	0	0	0	0	0	10	77	40
7:30-7:45	7	15	2	3	27	25	11	2	11	0	24	11	0	39	17	1	57	10	0	2	1	0	3	10	111	56
7:45-8:00	4	29	4	1	38	30	10	2	13	0	25	20	0	32	10	0	42	16	1	1	3	0	5	14	110	80
ukupno	20	80	8	5	113	83	36	7	38	0	81	47	0	126	44	1	171	40	1	5	4	0	10	59	375	229
privoz %	18%	71%	7%	4%		44%	9%	47%	0%		0%	74%	26%	1%		10%	50%	40%	0%							
ukupno %	5%	21%	2%	1%	30%	36	10%	2%	10%	0%	22%	21	0%	34%	12%	0%	46%	17	0%	1%	1%	0%	3%	26		
fvs	0,74					0,81					0,75					0,50					0,84					

auto	14	65	3	4	86	25	5	28	0	58	0	99	40	1	140	1	3	4	0	8					292
%auta	70%	81%	38%	0	76%	69%	71%	74%	0	72%	0%	79%	91%	0	82%	100%	60%	100%	0	80%					78%
teretno	3	7	3	1	14	8	0	4	0	12	0	8	2	0	10	0	0	0	0	0					36
%teretno	15%	9%	38%	0	12%	22%	0	11%	0	15%	0	6%	5%	0	6%	0	0	0	0	0%					10%
motocikl	1	2	0	0	3	3	1	3	0	7	0	9	1	0	10	0	2	0	0	2					22
%motoci.	5%	3%	0	0	3%	8%	14%	8%	0	9%	0	7%	2%	0	6%	0	40%	0	0	20%					6%
bus	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					3
%busa	0	4%	0	0	3%	0	0	0	0	0%	0	0	0	0	0%	0	0	0	0	0%					1%
bic	2	3	2	0	7	0	1	3	0	4	0	10	1	0	11	0	0	0	0	0					22
%bic	10%	4%	25%	0	6%	0	14%	8%	0	5%	0	8%	2%	0	6%	0	0	0	0	0%					6%

Vršni sat 15:00-16:00h

	PRIVOZ 1 (S)					PRIVOZ 2 (I)					PRIVOZ 3 (J)					PRIVOZ 4 (Z)					ΣP	ΣP				
	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ			P	Σ		
15:00-15:15	7	46	4	1	58	29	21	2	9	0	32	19	0	31	12	0	43	12	0	2	0	0	2	14	135	74
15:15-15:30	11	30	1	0	42	44	19	2	7	1	29	19	0	31	24	0	55	16	0	2	0	0	2	15	128	94
15:30-15:45	10	35	4	1	50	54	29	2	12	0	43	23	0	30	15	0	45	17	0	1	0	0	1	25	139	119
15:45-16:00	11	39	2	4	56	15	28	3	12	0	43	0	0	42	18	0	60	1	1	1	1	0	3	0	162	16
ukupno	39	150	11	6	206	142	97	9	40	1	147	61	0	134	69	0	203	46	1	6	1	0	8	54	564	303
privoz%	19%	73%	5%	3%		66%	6%	27%	1%		0%	66%	34%	0%		13%	75%	13%	0%							
ukupno %	7%	27%	2%	1%	37%	47	17%	2%	7%	0%	26%	20	0%	24%	12%	0%	36%	15	0%	1%	0%	0%	1%	18		
fvs	0,89					0,85					0,85					0,67					0,87					

auto	30	123	5	6	164	76	5	32	1	114	0	107	63	0	170	0	3	1	0	4					452
%auta	77%	82%	45%	100%	80%	78%	56%	80%	100%	78%	0%	80%	91%	0	84%	0	50%	100%	0	50%					80%
teretno	2	11	0	0	13	2	0	0	0	2	0	6	1	0	7	0	0	0	0	0					22
%teretno	5%	7%	0	0	6%	2%	0	0	0	1%	0	4%	1%	0	3%	0	0	0	0	0%					4%
motocikl	7	13	4	0	24	15	3	7	0	25	0	13	5	0	18	1	1	0	0	2					69
%motoci.	18%	9%	36%	0	12%	15%	33%	18%	0	17%	0	10%	7%	0	9%	100%	17%	0	0	25%					12%
bus	0	1	1	0	2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					3
%busa	0	1%	9%	0	1%	1%	0	0	0	1%	0	0	0	0	0%	0	0	0	0	0%					1%
bic	0	2	1	0	3	3	1	1	0	5	0	8	0	0	8	0	2	0	0	2					18
%bic	0	1%	9%	0	1%	3%	11%	3%	0	3%	0	6%	0	0	4%	0	33%	0	0	25%					3%

Brojanje prometa

Kružno raskrižje na lokaciji V₈

Vrijeme snimanja 6:00-8:00h i 15:00-17:00h

Datum snimanja:

	PRIVOZ 1 (S)					PRIVOZ 2 (I)					PRIVOZ 3 (J)					PRIVOZ 4 (Z)					Σ	ΣP				
	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ						
6:00-6:15	3	9	4	0	16	7	7	14	6	0	27	1	1	20	4	0	25	3	7	4	2	0	13	3	81	14
6:15-6:30	4	12	7	1	24	8	16	34	13	0	63	2	8	29	16	0	53	1	22	7	6	0	35	3	175	14
6:30-6:45	14	16	12	1	43	8	29	46	37	0	112	3	15	68	35	0	118	8	30	26	3	0	59	7	332	26
6:45-7:00	14	24	19	0	57	6	6	43	23	0	72	3	6	57	27	0	90	10	27	18	5	1	51	7	270	26
ukupno	35	61	42	2	140	29	58	137	79	0	274	9	30	174	82	0	286	22	86	55	16	1	158	20	858	80

	PRIVOZ 1 (S)					PRIVOZ 2 (I)					PRIVOZ 3 (J)					PRIVOZ 4 (Z)					Σ	ΣP				
	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ						
7:00-7:15	10	32	8	0	50	5	19	41	16	2	78	0	9	29	15	0	53	5	20	16	17	0	53	3	234	13
7:15-7:30	12	17	16	2	47	14	18	32	31	0	81	3	14	46	17	0	77	7	24	22	3	0	49	23	254	47
7:30-7:45	14	36	14	1	65	23	23	47	46	1	117	3	12	54	21	0	87	9	43	30	6	0	79	38	348	73
7:45-8:00	10	22	18	3	53	15	22	29	17	0	68	1	16	43	21	0	80	5	33	27	15	0	75	0	276	21
ukupno	46	107	56	6	215	57	82	149	110	3	344	7	51	172	74	0	297	26	120	95	41	0	256	64	1112	154

Vršni sat 7:00-8:00h

	PRIVOZ 1 (S)					PRIVOZ 2 (I)					PRIVOZ 3 (J)					PRIVOZ 4 (Z)					Σ	ΣP					
	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ							
7:00-7:15	10	32	8	0	50	5	19	41	16	2	78	0	9	29	15	0	53	5	20	16	17	0	53	3	234	13	
7:15-7:30	12	17	16	2	47	14	18	32	31	0	81	3	14	46	17	0	77	7	24	22	3	0	49	23	254	47	
7:30-7:45	14	36	14	1	65	23	23	47	46	1	117	3	12	54	21	0	87	9	43	30	6	0	79	38	348	73	
7:45-8:00	10	22	18	3	53	15	22	29	17	0	68	1	16	43	21	0	80	5	33	27	15	0	75	0	276	21	
ukupno	46	107	56	6	215	57	82	149	110	3	344	7	51	172	74	0	297	26	120	95	41	0	256	64	1112	154	
privoz %	21%	50%	26%	3%		24%	43%	32%	1%			17%	58%	25%	0%			47%	37%	16%	0%						
ukupno %	4%	10%	5%	1%	19%	37	7%	13%	10%	0%	31%	5	5%	15%	7%	0%	27%	17	11%	9%	4%	0%	23%	42			
fvs					0,83						0,74						0,85						0,81				0,80

auto	44	101	51	5	201	77	142	107	3	329	51	163	67	0	281	116	88	40	0	244					1055	
%auta	96%	94%	91%	83%	93%	94%	95%	97%	100%	96%	0%	95%	91%	0	95%	97%	93%	98%	0	95%						95%
teretno	2	6	5	1	14	4	3	1	0	8	0	8	6	0	14	2	4	0	0	6					42	
%teretno	4%	6%	9%	17%	7%	5%	2%	1%	0	2%	0	5%	8%	0	5%	2%	4%	0	0	2%						4%
motocikl	0	0	0	0	0	1	2	2	0	5	0	0	1	0	1	2	0	1	0	3					9	
%motoci.	0%	0%	0	0	0%	1%	1%	2%	0	1%	0	0%	1%	0	0%	2%	0%	2%	0	1%					1%	
bus	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	2	0	0	2					4	
%busa	0	0%	0	0	0%	0	1%	0	0	0%	0	0	0	0	0%	0	2%	0	0	1%					0%	
bic	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1					2	
%bic	0%	0%	0%	0	0%	0	1%	0%	0	0%	0	0%	0%	0	0%	0	1%	0	0	0%					0%	

Vršni sat 15:00-16:00h

	PRIVOZ 1 (S)					PRIVOZ 2 (I)					PRIVOZ 3 (J)					PRIVOZ 4 (Z)					Σ	ΣP					
	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ	L	T	R	U	Σ							
15:00-15:15	33	53	28	0	114	9	17	30	14	0	61	1	10	64	27	0	101	19	22	30	13	1	66	32	342	61	
15:15-15:30	35	40	25	2	102	5	19	28	8	0	55	2	12	38	19	0	69	11	19	38	7	0	64	7	290	25	
15:30-15:45	19	51	52	0	122	3	14	27	18	0	59	0	7	33	30	0	70	13	25	33	7	1	66	13	317	29	
15:45-16:00	12	42	22	1	77	13	19	29	15	0	63	0	10	35	23	0	68	7	12	31	18	0	61	11	269	31	
ukupno	99	186	127	3	415	30	69	114	55	0	238	3	39	170	99	0	308	50	78	132	45	2	257	63	1218	146	
privoz%	24%	45%	31%	1%		29%	48%	23%	0%			13%	55%	32%	0%			30%	51%	18%	1%						
ukupno %	8%	15%	10%	0%	34%	21	6%	9%	5%	0%	20%	2	3%	14%	8%	0%	25%	34	6%	11%	4%	0%	21%	43			
fvs					0,85						0,94						0,76							0,97			0,89

auto	96	183	127	3	409	65	108	55	0	228	38	161	97	0	296	74	120	43	2	239					1172	
%auta	97%	98%	100%	100%	99%	94%	95%	100%	0%	96%	0%	95%	98%	0	96%	95	91%	96%	100%	93%						96%
teretno	3	2	0	0	5	1	0	0	0	1	1	4	2	0	7	1	3	2	0	6					19	
%teretno	3%	1%	0	0	1%	1%	0	0	0	0%	3%	2%	2%	0	2%	1%	2%	4%	0	2%						2%
motocikl	0	0	0	0	0	3	3	0	0	6	0	4	0	0	4	3	1	0	0	4					14	
%motoci.	0%	0%	0%	0	0%	4%	3%	0%	0	3%	0	2%	0%	0	1%	4%	1%	0	0	2%					1%	
bus	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1					2	
%busa	0	0%	0%	0	0%	0%	1%	0	0	0%	0	0	0	0	0%	0	0	0	0	0%					0%	
bic	0	1	0	0	1	0	2	0	0	2	0	1	0	0	1	0	7	0	0	7					11	
%bic	0	1%	0%	0	0%	0%	2%	0%	0	1%	0	1%	0	0	0%	0	5%	0	0	3%						1%

Brojanje prometa

Kružno raskrižje na lokaciji V9

Vrijeme snimanja 6:00-8:00h i 15:00-17:00h

Datum snimanja: 23.7.2013

	PRIVOZ 1 (S)					P	PRIVOZ 2 (I)					P	PRIVOZ 3 (J)					P	PRIVOZ 4 (Z)					P	Σ	ΣP
	L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ			
6:00-6:15	3	19	6	0	28	3	3	2	2	0	7	4	1	21	5	0	27	2	1	14	3	0	18	3	80	12
6:15-6:30	4	33	5	2	44	2	3	2	3	0	8	1	5	47	14	1	67	1	10	9	4	1	24	6	143	10
6:30-6:45	12	46	11	0	69	3	6	3	11	0	20	5	4	73	39	0	116	2	11	25	5	0	41	5	246	15
6:45-7:00	13	28	6	0	47	1	5	9	5	0	19	5	7	61	20	0	88	0	8	30	7	0	45	2	199	8
ukupno	32	126	28	2	188	9	17	16	21	0	54	15	17	202	78	1	298	5	30	78	19	1	128	16	668	45

	PRIVOZ 1 (S)					P	PRIVOZ 2 (I)					P	PRIVOZ 3 (J)					P	PRIVOZ 4 (Z)					P	Σ	ΣP
	L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ			
7:00-7:15	7	43	19	0	69	1	4	4	11	0	19	7	7	62	33	0	102	0	11	24	6	0	41	8	231	16
7:15-7:30	14	52	8	0	74	2	12	7	8	0	27	8	6	71	22	0	99	0	17	18	7	0	42	3	242	13
7:30-7:45	12	57	13	1	83	1	9	6	12	0	27	7	8	111	46	0	165	3	15	29	11	0	55	6	330	17
7:45-8:00	17	61	16	0	94	4	4	10	9	0	23	7	6	96	36	0	138	0	19	26	7	0	52	9	307	20
ukupno	50	213	56	1	320	8	29	27	40	0	96	29	27	340	137	0	504	3	62	97	31	0	190	26	1110	66

Vršni sat 7:00-8:00h

	PRIVOZ 1 (S)					P	PRIVOZ 2 (I)					P	PRIVOZ 3 (J)					P	PRIVOZ 4 (Z)					P	Σ	ΣP
	L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ			
7:00-7:15	7	43	19	0	69	1	4	4	11	0	19	7	7	62	33	0	102	0	11	24	6	0	41	8	231	16
7:15-7:30	14	52	8	0	74	2	12	7	8	0	27	8	6	71	22	0	99	0	17	18	7	0	42	3	242	13
7:30-7:45	12	57	13	1	83	1	9	6	12	0	27	7	8	111	46	0	165	3	15	29	11	0	55	6	330	17
7:45-8:00	17	61	16	0	94	4	4	10	9	0	23	7	6	96	36	0	138	0	19	26	7	0	52	9	307	20
ukupno	50	213	56	1	320	8	29	27	40	0	96	29	27	340	137	0	504	3	62	97	31	0	190	26	1110	66
privoz %	16%	67%	18%	0%			30%	28%	42%	0%		5%	67%	27%	0%			33%	51%	16%	0%					
ukupno %	5%	19%	5%	0%	29%	12	3%	2%	4%	0%	9%	44	2%	31%	12%	0%	45%	5	6%	9%	3%	0%	17%	39		
fvs					0,85						0,89						0,76						0,86			0,84

auto	44	182	45	1	272		26	19	33	0	78		22	299	122	0	443		54	75	25	0	154		947
%auta	88%	85%	80%	100%	85%		90%	70%	83%	0	81%		0%	88%	89%	0	88%		87%	77%	81%	0	81%		85%
teretno	5	13	8	0	26		2	6	5	0	13		4	20	13	0	37		6	15	5	0	26		102
%teretno	10%	6%	14%	0	8%		7%	22	13%	0	14%		15%	6%	9%	0	7%		10%	15%	16%	0	14%		9%
motocikl	1	13	2	0	16		1	1	1	0	3		1	18	2	0	21		1	3	1	0	5		45
%motoci.	2%	6%	4%	0	5%		3%	4%	3%	0	3%		0	5%	1%	0	4%		2%	3%	3	0	3%		4%
bus	0	4	1	0	5		0	0	0	0	0		0	1	0	0	1		0	3	0	0	3		9
%busa	0	2%	2%	0	2%		0	0	0	0	0%		0	0%	0	0	0%		0	3%	0	0	2%		1%
bic	0	1	0	0	1		0	1	1	0	2		0	2	0	0	2		1	1	0	0	2		7
%bic	0	0%	0	0	0%		0	4%	3%	0	2%		0	1%	0	0	0%		2%	1%	0	0	1%		1%

Vršni sat 15:00-16:00h

	PRIVOZ 1 (S)					P	PRIVOZ 2 (I)					P	PRIVOZ 3 (J)					P	PRIVOZ 4 (Z)					P	Σ	ΣP
	L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ			
15:00-15:15	15	85	13	3	116	1	9	8	11	0	28	8	11	56	18	0	85	0	13	18	13	0	44	3	273	12
15:15-15:30	14	102	17	3	136	2	11	12	7	0	30	15	13	45	16	1	75	0	17	18	13	0	48	6	289	23
15:30-15:45	16	82	14	0	112	6	18	6	11	0	35	9	11	56	18	2	87	0	10	28	5	0	43	3	277	18
15:45-16:00	16	78	14	0	108	1	17	3	8	0	28	2	5	60	16	0	81	0	12	19	12	0	43	1	260	4
ukupno	61	347	58	6	472	10	55	29	37	0	121	34	40	217	68	3	328	0	52	83	43	0	178	13	1099	57
privoz %	13%	74%	12%	1%			45%	24%	31%	0%		12%	66%	21%	1%			29%	47%	24%	0%					
ukupno %	6%	32%	5%	1%	43%	18	5%	3%	3%	0%	11%	60	4%	20%	6%	0%	30%	0	5%	8%	4%	0%	16%	23		
fvs					0,87						0,86						0,94						0,93			0,95

auto	51	308	51	6	416		49	24	33	0	106		39	180	59	3	281		48	68	38	0	154		957
%auta	84%	89%	88%	100%	88%		89%	83%	89%	0%	88%		98%	83%	87%	100%	86%		92%	82%	88%	0	87%		87%
teretno	6	16	0	0	22		5	3	2	0	10		1	13	2	0	16		3	3	3	0	9		57
%teretno	10%	5%	0	0	5%		9%	10%	5%	0	8%		3%	6%	3%	0	5%		6%	4	7	0	5%		5%
motocikl	4	16	5	0	25		1	2	2	0	5		0	12	4	0	16		1	8	2	0	11		57
%motoci.	7%	5%	9%	0	5%		2%	7%	5%	0	4%		0	6%	6%	0	5%		2%	10%	5%	0	6%		5%
bus	0	1	2	0	3		0	0	0	0	0		0	1	0	0	1		0	4	0	0	4		8
%busa	0	0%	3%	0	1%		0	0	0	0	0%		0	0%	0	0	0%		0	5%	0	0	2%		1%
bic	0	6	0	0	6		0	0	0	0	0		0	11	3	0	14		0	0	0	0	0		20
%bic	0	2%	0%	0	1%		0	0	0	0	0%		0	5%	4%	0	4%		0	0	0	0	0%		2%

Brojanje prometa

Kružno raskrižje na lokaciji V10

Vrijeme snimanja 6:00-8:00h i 15:00-17:00h

Datum snimanja: 29.5.2013

	PRIVOZ 1 (S)					P	PRIVOZ 2 (I)					P	PRIVOZ 3 (J)					P	PRIVOZ 4 (Z)					P	Σ	ΣP
	L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ			
6:00-6:15	1	0	20	0	21	0	0	63	0	0	63	0	6	0	0	0	6	0	9	20	0	1	30	1	120	1
6:15-6:30	3	0	20	0	23	1	0	87	5	1	93	1	2	0	0	0	2	3	9	29	0	0	38	1	156	6
6:30-6:45	4	0	40	0	44	0	0	121	3	0	124	1	4	0	1	0	5	2	13	28	1	0	42	5	215	8
6:45-7:00	1	0	33	0	34	0	0	131	6	0	137	0	7	1	0	0	8	6	9	39	1	1	50	9	229	15
ukupno	9	0	113	0	122	1	0	402	14	1	417	2	19	1	1	0	21	11	40	116	2	2	160	16	720	30
7:00-7:15	4	0	37	0	41	0	0	130	4	0	134	0	3	0	1	0	4	1	21	24	1	1	47	2	226	3
7:15-7:30	7	0	45	0	52	1	0	145	6	0	151	0	4	0	1	0	5	2	20	38	3	2	63	5	271	8
7:30-7:45	3	0	52	0	55	0	0	146	4	0	150	3	2	1	0	0	3	0	23	45	0	0	68	5	276	8
7:45-8:00	6	0	55	0	61	0	1	146	6	0	153	4	7	0	0	0	7	0	36	49	3	3	91	3	312	7
ukupno	20	0	189	0	209	1	1	567	20	0	588	7	16	1	2	0	19	3	100	156	7	6	269	15	1085	26

	PRIVOZ 1 (S)					P	PRIVOZ 2 (I)					P	PRIVOZ 3 (J)					P	PRIVOZ 4 (Z)					P	Σ	ΣP
	L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ			
15:00-15:15	8	1	54	0	63	0	1	114	5	0	120	0	9	3	2	0	14	7	54	132	8	1	195	10	392	17
15:15-15:30	11	2	42	0	55	0	3	138	8	0	149	0	8	5	4	0	17	6	65	150	14	4	233	11	454	17
15:30-15:45	13	1	38	0	52	0	0	90	13	0	103	0	5	2	4	0	11	5	55	143	9	4	211	8	377	13
15:45-16:00	16	3	43	0	62	0	0	67	14	0	81	0	4	2	2	0	8	12	69	141	9	2	221	16	372	28
ukupno	48	7	177	0	232	0	4	409	40	0	453	0	26	12	12	0	50	30	243	566	40	11	860	45	1595	75
16:00-16:15	9	0	37	0	46	0	1	79	0	0	80	0	4	2	0	0	6	8	64	145	7	2	218	11	350	19
16:15-16:30	13	2	43	0	58	1	1	95	12	0	108	0	5	3	4	0	12	7	53	166	8	4	231	18	409	26
16:30-16:45	9	0	38	0	47	0	1	128	14	0	143	0	11	2	3	0	16	5	69	150	11	2	232	8	438	13
16:45-17:00	13	0	49	0	62	0	2	114	10	0	126	0	6	0	4	0	10	12	65	114	8	1	188	18	386	30
ukupno	44	2	167	0	213	1	5	416	36	0	457	0	26	7	11	0	44	32	251	575	34	9	869	55	1583	88

Vršni sat 7:00-8:00h

	PRIVOZ 1 (S)					P	PRIVOZ 2 (I)					P	PRIVOZ 3 (J)					P	PRIVOZ 4 (Z)					P	Σ	ΣP
	L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ			
7:00-7:15	4	0	37	0	41	0	0	130	4	0	134	0	3	0	1	0	4	1	21	24	1	1	47	2	226	3
7:15-7:30	7	0	45	0	52	1	0	145	6	0	151	0	4	0	1	0	5	2	20	38	3	2	63	5	271	8
7:30-7:45	3	0	52	0	55	0	0	146	4	0	150	3	2	1	0	0	3	0	23	45	0	0	68	5	276	8
7:45-8:00	6	0	55	0	61	0	1	146	6	0	153	4	7	0	0	0	7	0	36	49	3	3	91	3	312	7
ukupno	20	0	189	0	209	1	1	567	20	0	588	7	16	1	2	0	19	3	100	156	7	6	269	15	1085	26
privoz %	10%	0%	90%	0%			0%	96%	3%	0%			84%	5%	11%	0%			37%	58%	3%	2%				
ukupno %	2%	0%	17%	0%	19%	4	0%	52%	2%	0%	54%	27	1%	0%	0%	0%	2%	12	9%	14%	1%	1%	25%	58		
fvs	0,86						0,96						0,68						0,74						0,87	

auto	18	0	174	0	192		1	511	14	0	526		16	1	2	0	19		91	130	6	5	232		969
%auta	90%	0%	92%	0	92%		100%	90%	70%	0	89%		0%	100%	100%	0	100%		91%	83%	86%	83%	86%		89%
teretno	2	0	13	0	15		0	52	5	0	57		0	0	0	0	0		8	22	1	1	32		104
%teretno	10%	0%	7%	0	7%		0	9%	25%	0	10%		0	0	0	0	0%		8	14	14	0	12%		10%
motocikl	0	0	1	0	1		0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		0	1	0	0	1		2
%motoci.	0	0	1%	0	0%		0	0	0	0	0%		0	0	0	0	0%		0	1%	0	0	0%		0%
bus	0	0	1	0	1		0	3	1	0	4		0	0	0	0	0		1	3	0	0	4		9
%busa	0	0	1%	0	0%		0	1%	5%	0	1%		0	0	0	0	0%		1	2%	0	0	1%		1%
bic	0	0	0	0	0		0	1	0	0	1		0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		1
%bic	0	0	0	0	0%		0	0%	0	0	0%		0	0	0	0	0%		0	0	0	0	0%		0%

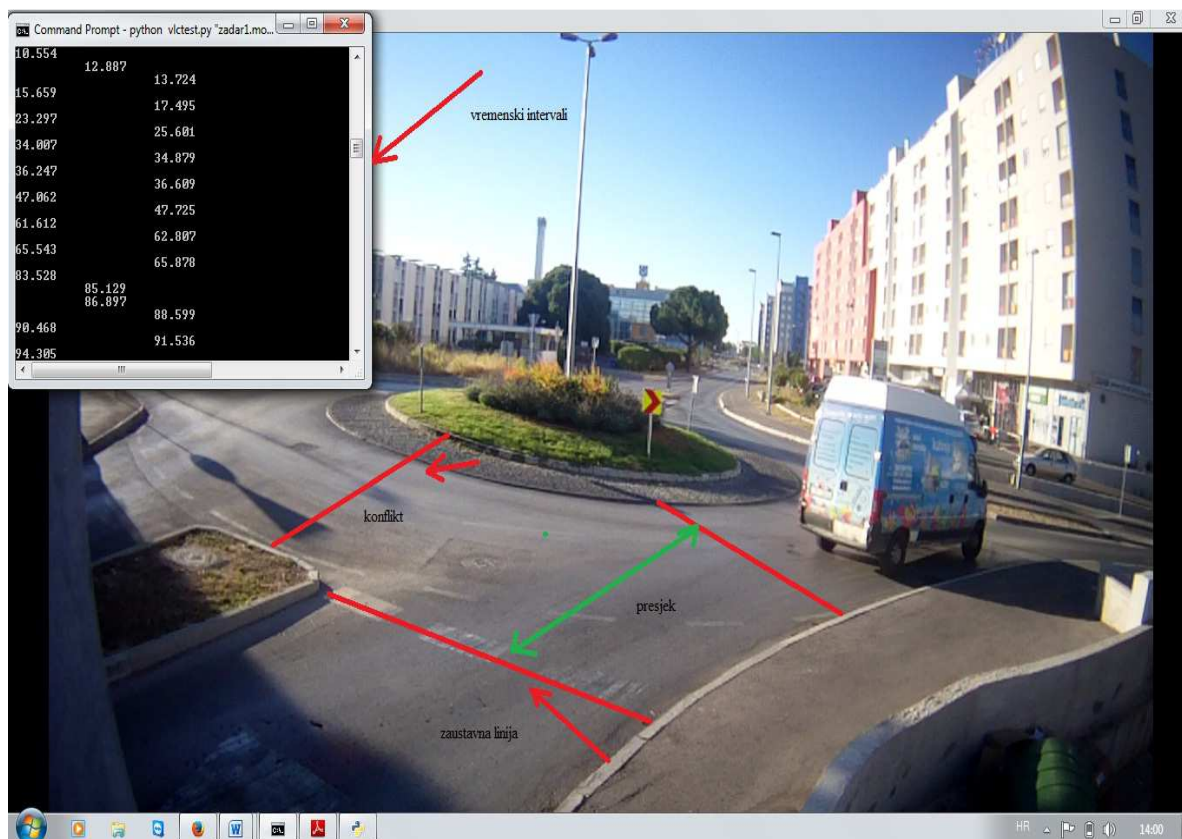
Vršni sat 15:00-16:00h

	PRIVOZ 1 (S)					P	PRIVOZ 2 (I)					P	PRIVOZ 3 (J)					P	PRIVOZ 4 (Z)					P	Σ	ΣP
	L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ		L	T	R	U	Σ			
15:00-15:15	8	1	54	0	63	0	1	114	5	0	120	0	9	3	2	0	14	7	54	132	8	1	195	10	392	17
15:15-15:30	11	2	42	0	55	0	3	138	8	0	149	0	8	5	4	0	17	6	65	150	14	4	233	11	454	17
15:30-15:45	13	1	38	0	52	0	0	90	13	0	103	0	5	2	4	0	11	5	55	143	9	4	211	8	377	13
15:45-16:00	16	3	43	0	62	0	0	67	14	0	81	0	4	2	2	0	8	12	69	141	9	2	221	16	372	28
ukupno	48	7	177	0	232	0	4	409	40	0	453	0	26	12	12	0	50	30	243	566	40	11	860	45	1595	75
privoz%	21%	3%	76%	0%			1%	90%	9%	0%			52%	24%	24%	0%			28%	66%	5%	1%				
ukupno %	3%	0%	11%	0%	15%	0	0%	26%	3%	0%	28%	0	2%	1%	1%	0%	3%	40	15%	35%	3%	1%	54%	60		
fvs	0,92						0,76						0,74						0,92						0,88	

auto	43	4	165	0	212		4	368	36	0	408		23	8	11	0	42		218	512	33	9	772		1434
%auta	90%	57%	93%	0%	91%		100%	90%	90%	0%	90%		0%	67%	92%	0	84%		90%	90%	83%	82%	90%		90%
teretno	5	0	5	0	10		0	26	4	0	30		2	0	0	0	2		17	28	6	0	51		93
%teretno	10%	0%	3%	0	4%		0%	6%	10%	0	7%		8%	0%	0%	0	4%		7%	5%	15%	0	6%		6%
motocikl	0	2	3	0	5		0	7	0	0	7		1	2	1	0	4		6	16	0	2	24		40
%motoci.	0%	29%	2%	0	2%		0%	2%	0%	0	2%		4%	17%	8%	0	8%		2%	3%	0	0	3%		3%
bus	0	0	2	0	2		0	6	0	0	6		0	0	0	0	0		2	6	0	0	8		16
%busa	0	0%	1%	0	1%		0%	1%	0	0	1%		0	0	0	0	0%		1%	1%	0	0	1%		1%
bic	0	1	2	0	3		0	2	0	0	2		0	2	0	0	2		0	4	1	0	5		12
%bic	0	14%	1%	0	1%		0%	0%	0%	0	0%		0	17%	0	0	4%		0	1%	3%	0	1%		1%

Prilog 2. Programsko pomagalo i izdvajanje vremena slijeđenja, brzina vozila i kritične vremenske praznine

Programsko pomagalo programirano je u programskom jeziku Python (verzija 2.7.9) i knjižnici (library) Pygame gdje je korištenjem aplikacije VLC media playera omogućeno korisniku kod gledanja videozapisa bilježenje posebnih događaja i radnji na promatranom raskrižju primjenom određenih slova na tipkovnici računala (vidi sliku P.2.). Zabilježene posebne radnje preko tipkovnice posebno su evidentirane u tekstualne baze (ekstenzija .txt), a odnose se na vremenske intervale: dolaska vozila na zaustavnu crtu (slovo A), konflikt s vozilom u kružnom kolniku (slovo S), ulaska vozila u kružni kolnik (slovo D) i prolaska vozila kroz određeni presjek raskrižja (slovo Q za prolazak prednjeg kraj vozila, slovo E za prolazak istog vozila (Q) kroz promatrani presjek i slovo W za prolazak sljedećeg prednjeg kraj vozila kroz promatrani presjek). Na temelju prikupljenih vremenskih intervala koji su zabilježeni te njihovom obradom moguće je uz primjenu statističkih metoda izdvojiti vrijeme slijeđenja, brzine vozila (na ulazu, u kružnom kolniku i na izlazu) te procijeniti kritičnu vremensku prazninu.



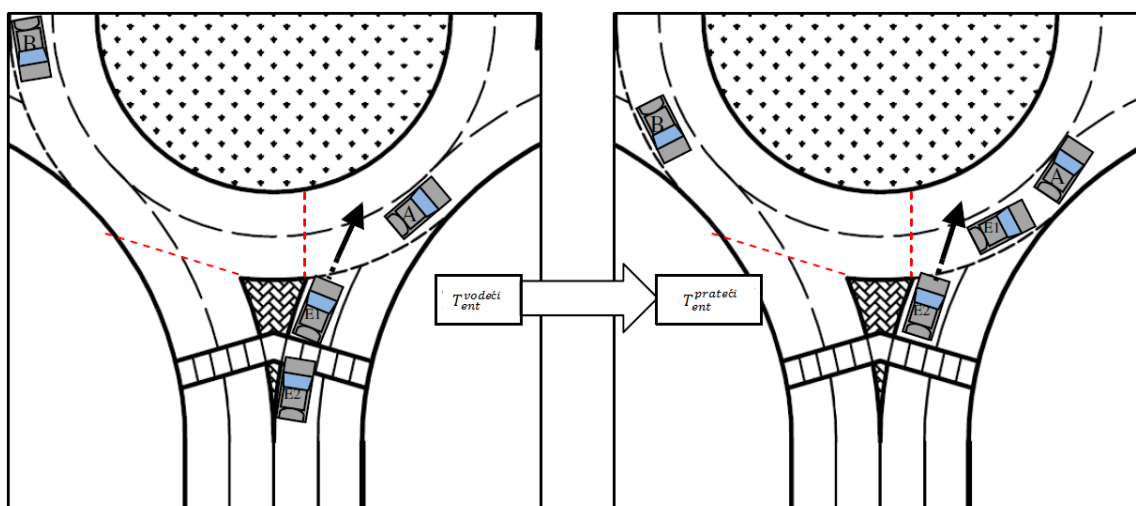
Slika P.2. Prikaz radne površine programskog pomagala

Vrijeme slijeđenja

Vrijeme slijeđenja definirano je kao vremenska razlika između dva uzastopna vozila koja ulaze u kružni kolnik koristeći istu vremensku prazninu u kružnom kolniku. Za izračun vremena slijeđenja može se upotrijebiti formula:

$$t_f = T_{ent}^{prateći} - T_{ent}^{vodeći} \quad (1)$$

gdje je: t_f - vrijeme slijeđenja [s], $T_{ent}^{prateći}$ - vrijeme pratećeg vozila (drugog) na ulasku [s], $T_{ent}^{vodeći}$ - vrijeme vodećeg vozila (prvog) na ulasku [s], $T_{ent}^{vodeći}$ i $T_{ent}^{prateći}$ trebali bi biti unutar iste vremenske praznine. Detaljniji prikaz vremena slijeđenja popraćen je na slici P.3.



Slika P.3. Vrijeme slijeđenja t_f [s]

Na temelju navedenog proizlazi da je korištenjem programskog pomagala moguće izdvojiti vrijeme slijeđenja bilježenjem vremenskih intervala vozila (Q i W) u tekstualnim bazama (.txt) po formuli:

$$t_f = W - Q \quad (2)$$

gdje je: t_f - vrijeme slijeđenja [s], W - vrijeme pratećeg vozila (drugog) na ulasku [s], Q - vrijeme vodećeg vozila (prvog) na ulasku [s]. Vrijeme slijeđenja na promatranom raskrižju predstavlja aritmetičku sredinu svih prikupljenih vremena slijeđenja.

Brzine vozila (na ulazu, u kružnom kolniku i na izlazu)

Brzine vozila na određenim dijelovima raskrižja (na ulazu, u kružnom kolniku i na izlazu) izdvojene su korištenjem programskog pomagala. Svaki promatrani dio raskrižja određen je u vidu promatranih presjeka (crta) koji imaju određenu duljinu s [m] te na kojima se bilježe vremenski intervali dolaska prednjeg kraja vozila na prvu crtu presjeka i vremenski intervali prolaska istog promatranog vozila kroz drugu crtu presjeka (vidi sliku P.2.). Na taj način moguće je odrediti brzinu vozila na određenim presjecima po formuli

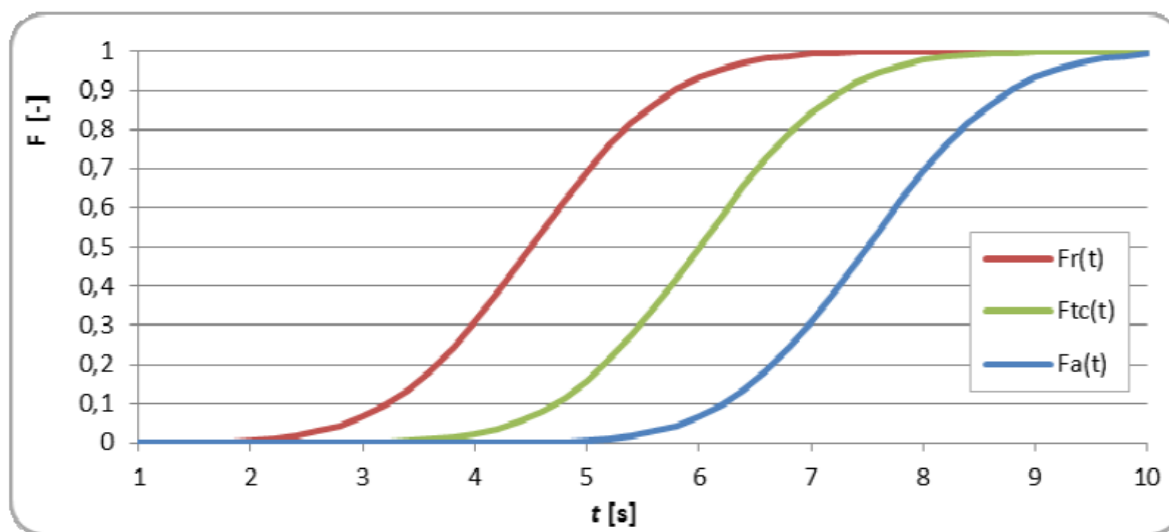
$$v = \frac{s}{E - Q} \quad (3)$$

gdje je : v – brzina vozila [m/s], s – duljina između promatranih presjeka, E – vrijeme dolaska prednjeg kraja vozila na drugu crtu presjeka [s], Q - vrijeme dolaska prednjeg kraja vozila na prvu crtu presjeka [s]. Brzina vozila (na ulazu, kružnom kolniku i na izlazu) na promatranom raskrižju predstavlja aritmetičku sredinu svih prikupljenih brzina.

Procjena kritične vremenske praznine

Kritična vremenska praznina (t_c) nije izravno mjerljiva karakteristika ponašanja vozača te je njenu vrijednost potrebno procijeniti iz mjerljivih vrijednosti odbačenih (r_i) i prihvaćenih (a_i) vremenskih praznina za svakog vozača i . U procjeni kritičnih praznina korištena je metoda najveće vjerodostojnosti (MLE – Maximum Likelihood Estimation). Ova metoda temelji se na pretpostavci da se svi vozači na sporednom toku (privozu) ponašaju konzistentno. To znači da će svaki vozač na sporednom toku odbaciti svaku prazninu koja je manja od njegove kritične vremenske praznine te će prihvatiti prvu prazninu koja je veća od kritične praznine. Iz tog razloga, vozači za koje je $a_i < r_i$ izbacuju se iz daljnjeg razmatranja. Cilj metode u širem smislu je pronaći funkciju distribucije $F(t)$ kritičnih praznina, što u praktičnom smislu znači procijeniti očekivanje distribucije kritičnih praznina, $E(t_c)$. Vjerodostojnost da se kritična praznina vozača i nalazi između r_i i a_i jednaka je $F(a_i) - F(r_i)$. Kako bi svi vozači imali jednak utjecaj na finalnu distribuciju bez obzira na broj odbačenih praznina, za svakog vozača se u obzir uzima samo najveća odbačena praznina. Također, u obzir se uzimaju samo vozači koji su odbacili barem jednu prazninu. Pod navedenim pretpostavkama, distribucija kritične praznine leži između distribucija najvećih odbačenih i prihvaćenih praznina (vidi sliku P.4). Za korištenje MLE metode potrebno je definirati parametrijsku distribuciju praznina te se kao najbolja pokazala prilagodba log-normalnoj distribuciji. S tom pretpostavkom, prvo se sve

odbačene i prihvaćene praznine transformiraju prirodnim logaritmom te se dobivene vrijednosti analiziraju pod pretpostavkom normalne distribucije.



Slika P.4. Teorijska funkcija distribucije za prihvaćenu prazninu $F_a(t)$, maksimalnu odbaćenu prazninu $F_r(t)$ i kritičnu prazninu $F_{tc}(t)$

Optimalni procjenitelji parametara (očekivanje μ i standardna devijacija σ) su one vrijednosti parametara za koje se maksimizira funkcija vjerodostojnosti L^* ,

$$L^* = \prod_{i=1}^N [F(a_i) - F(r_i)] \quad (4)$$

gdje je: N - broj konzistentnih vozača u uzorku, L - funkcija najveće vjerodostojnosti, a_i - logaritam prihvaćene praznine vozača i , r_i - logaritam maksimalne odbaćene praznine vozača i , $F(a_i) - F(r_i)$ - kumulativna raspodjela funkcije za normalnu distribuciju. Zbog veće učinkovitosti optimizacije koristi se logaritam vjerodostojnosti L koji postiže maksimum za iste vrijednosti parametara kao i originalna funkcija vjerodostojnosti, a glasi:

$$L = \prod_{i=1}^n \ln[F(a_i) - F(r_i)] \quad (5)$$

Rješavanje optimizacijskog problema započinje računanjem parcijalnih derivacija logaritma funkcije vjerodostojnosti po μ i σ , što rezultira dvjema jednadžbama koje ovise o uzorku prihvaćenih i odbaćenih praznina te o nepoznatim parametrima:

$$\begin{cases} -\sum_{i=1}^n \frac{f(a_i) - f(r_i)}{F(a_i) - F(r_i)} = 0 \\ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n \frac{(a_i - \mu) \cdot f(a_i) - (r_i - \mu) \cdot f(r_i)}{F(a_i) - F(r_i)} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

gdje je: $f(a_i), f(r_i)$ – funkcija gustoće vjerojatnosti za normalnu distribuciju s parametrima μ i σ^2 . Parametri μ i σ^2 mogu se izračunati primjenom numeričkih interakcijskih tehnika. Potom sredina $E(t_c)$ i varijanca $D(t_c)$ kritične praznine može biti izvedena iz jednadžbi:

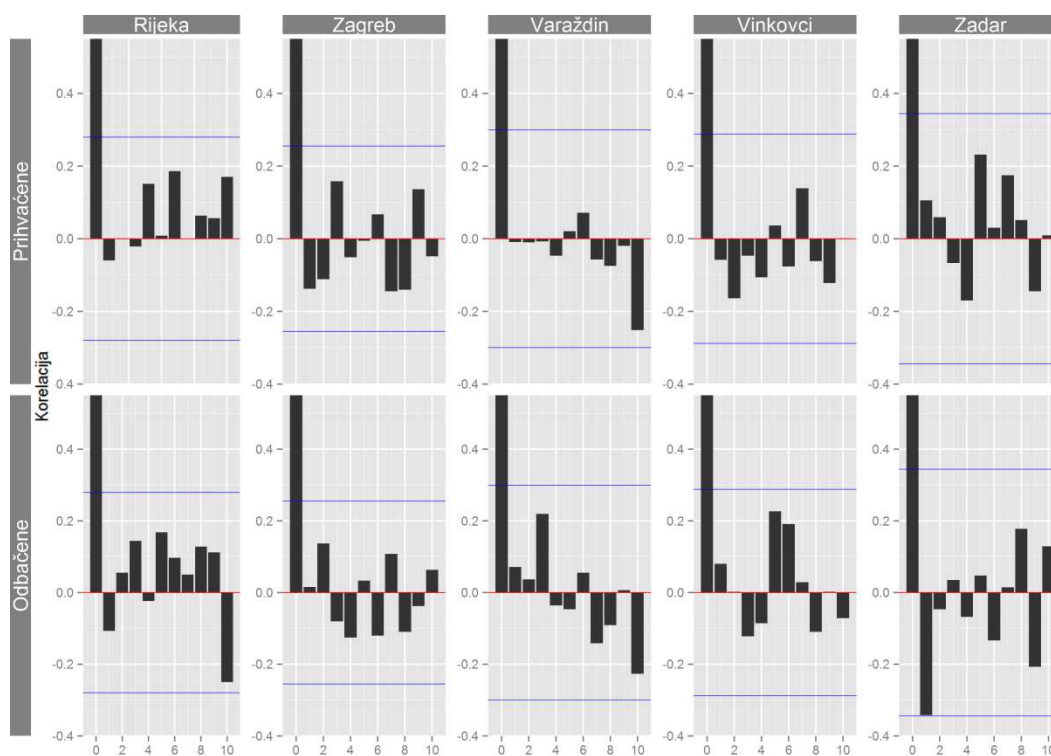
$$E(t_c) = e^{\mu+0,5\sigma^2} \quad (7)$$

$$D(t_c) = E(t_c)^2 \cdot (e^{\sigma^2} - 1) \quad (8)$$

Za potrebe ovog doktorskog rada u programskom paketu Mathematica napravljen je algoritam za procjenu kritične vremenske praznine metodom MLE (vidi u nastavku rada primjer algoritma za grad Rijeku). Pritom je korištena Newton-Raphsonova metoda rješavanja parcijalne derivacije jednadžbe (6) koja je rezultat primjene navedene metode procjene. Primjenom programskog pomagala zabilježeni su vremenski intervali dolaska vozila na ulaz u kružni kolnik (slovo A), konflikt vozila u kružnom kolniku, prolazak vozila kroz postavljeni presjek u kružnom kolniku (slovo S) i ulaz vozila koje čeka na ulasku u kružni kolnik (slovo D), a koji su kasnije poslužili za prikupljanje prihvaćenih i odbačenih vremenskih praznina. Postupak dobivanja prihvaćenih i odbačenih vremenskih praznina iz zabilježenih vremenskih intervala detaljno je objašnjen u istraživanju⁴.

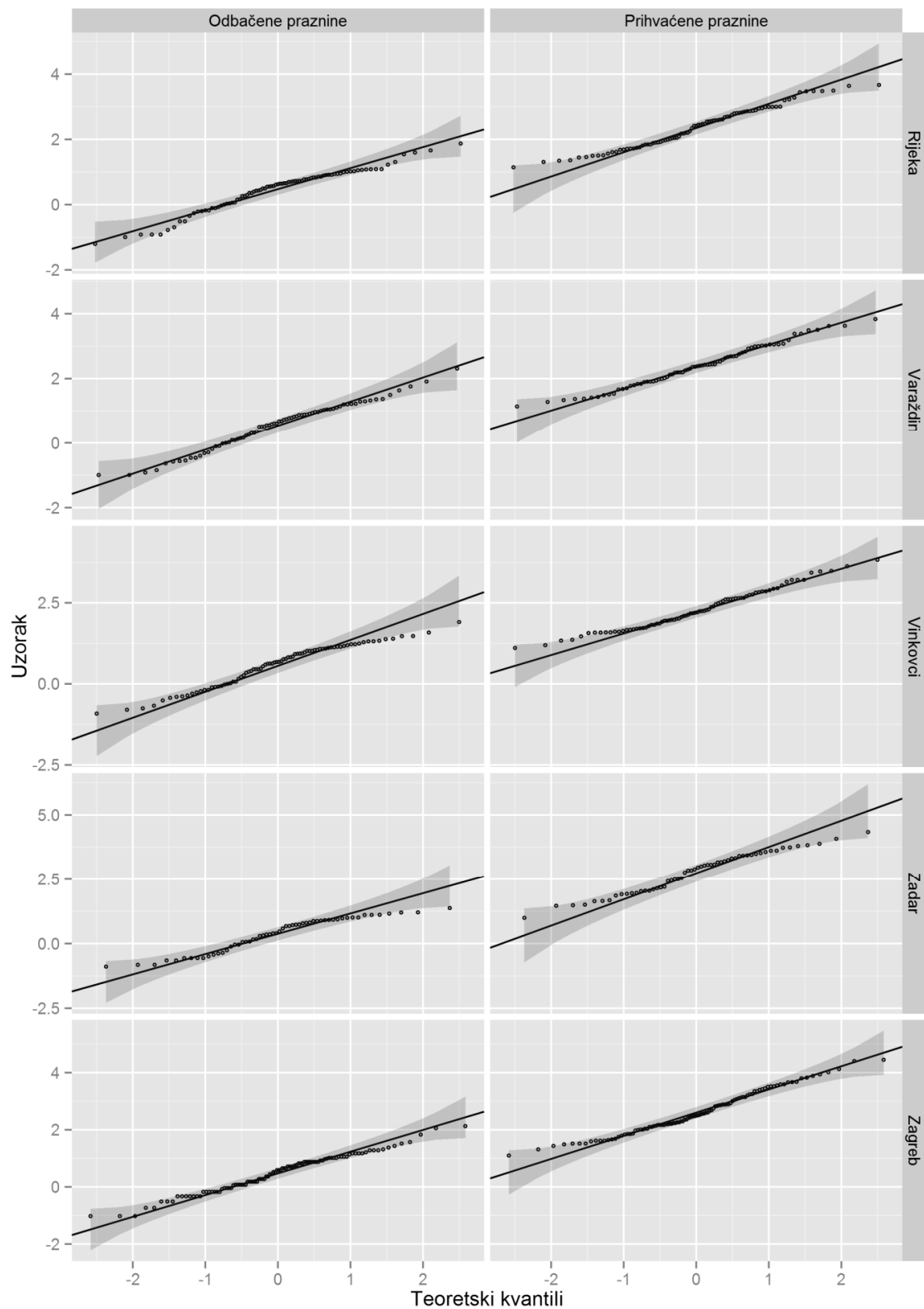
Kako bi se mogla primijeniti prethodno opisana MLE metoda, prikupljeni podaci (prihvaćenih i odbačenih praznina) moraju zadovoljiti pretpostavku međusobne nekoreliranosti podataka te pretpostavku normalnosti. Pomoću ACF (auto-korelacijska funkcija) dijagrama provjereno je postoji li korelacija između praznina, s vremenskim pomacima (lag) od 1 do 10 te nisu pronađene značajne vremenske korelacije uz razinu značajnosti 0.01. ACF dijagrami su prikazani na dijagramu P.5. gdje plava horizontalna linija predstavlja granicu značajnosti. Korelacija za nulti pomak je uvijek jednaka 1 pa zbog bolje preglednosti nije prikazan cijeli raspon korelacija od -1 do 1.

⁴Rodegerdts, L., Blogg, M., Wemple, E., Myers, E., et al.: *Roundabouts in the United States* - NCHRP Report 572, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2007.

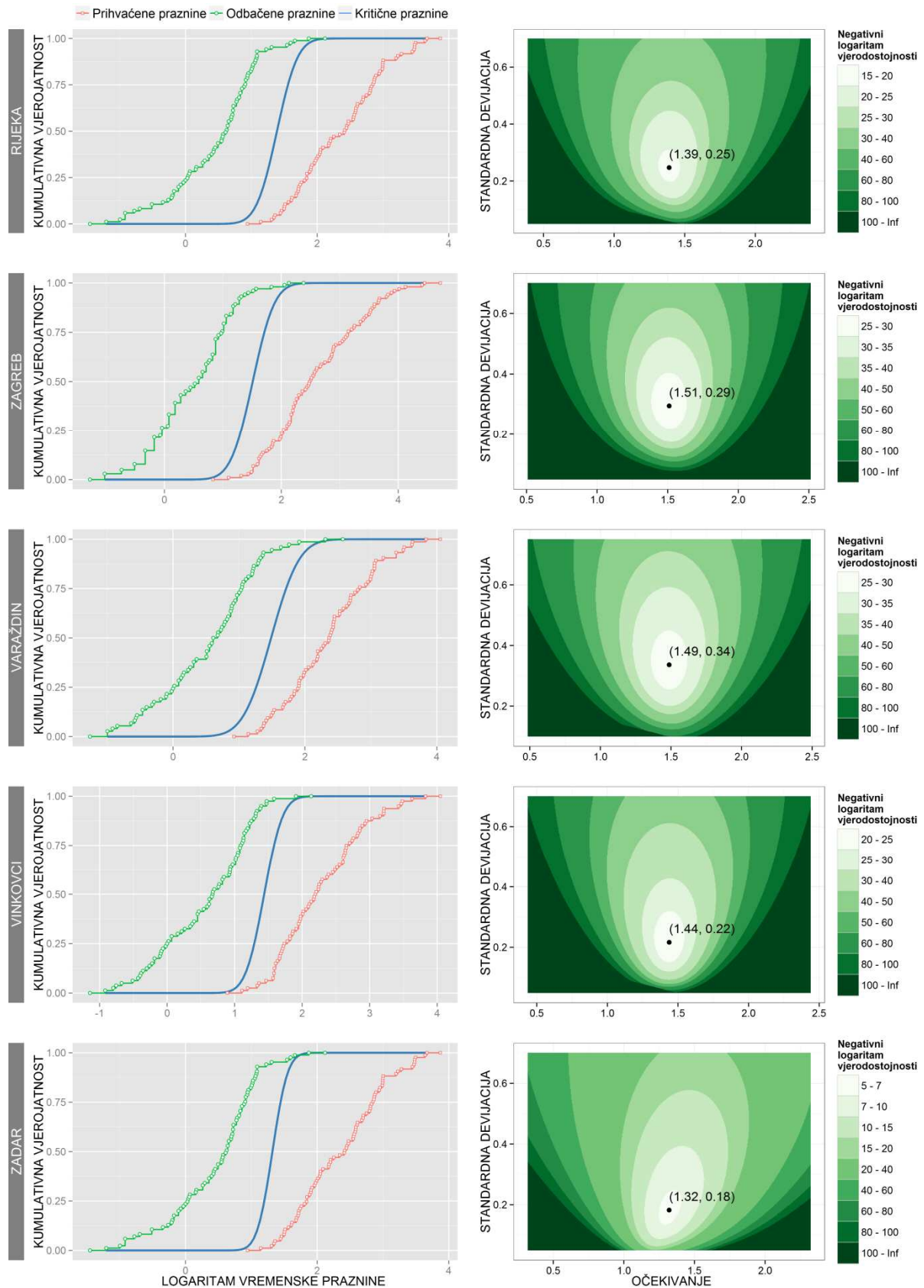


Dijagram P.5. ACF dijagrami logaritma prihvaćenih i odbačenih praznina po gradovima

Normalnost logaritma prihvaćenih i odbačenih praznina provjerena je kvantil–kvantil dijagramima s dodanom pouzdanosti od 95% što je prikazano na dijagramu P.6. Vidljivo je da su logaritmirane praznine približno normalno distribuirane za sve promatrane gradove. Kako bi se dobila bolja predodžba o distribuciji praznina, kreirani su dijagrami kumulativnih distribucija za logaritme odbačenih, prihvaćenih i kritičnih praznina za sve gradove (dijagram P.7, lijevi stupac). Distribucije odbačenih i prihvaćenih praznina su empirijske dok je krivulja kritičnih praznina teoretski normalna, s parametrima μ i σ . Iz dijagrama je uočljivo kako se distribucija kritičnih praznina nalazi desno od odbačenih praznina, a lijevo od prihvaćenih praznina, gdje je lokacija krivulje kritičnih praznina određena parametrom μ . Nagib krivulje kritičnih praznina, koji predstavlja raspršenost distribucije, određen je parametrom σ . Budući je opisana MLE metoda aproksimativna, u ocjeni točnosti rezultata koriste se i dijagrami kontura vrijednosti negativnog logaritma funkcije vjerodostojnosti (dijagram P.7., desni stupac). U dijagramima su nijansama zelene boje prikazane navedene vrijednosti tako da točke ravnine (μ, σ) sa svjetlijom nijansom imaju veću vrijednost logaritma funkcije vjerodostojnosti. Točke (μ, σ) koje optimiziraju funkciju vjerodostojnosti također su označene na dijagramu. Iz dijagrama je vidljivo da logaritam funkcije vjerodostojnosti nema anomalija te da su rezultati dobiveni numeričkim algoritmom zaista maksimumi navedene funkcije.



Dijagram P.6. Normalni kvantil – kvantil dijagrami logaritma prihvaćenih i odbačenih praznina po gradovima



Dijagram P.7. Dijagrami kumulativnih distribucija logaritmiranih praznina (lijevo) i dijagrami kontura negativnog logaritma funkcije vjerodostojnosti (desno)

Primjer algoritma za procjenu kritične vremenske praznine za grad Rijeku u programskom paketu Mathematica

```
<< Statistics`NormalDistribution`
```

```
R={1.09,0.92,-0.92,1.08,0.92,0.64,0.86,0,0.55,1.02,-  
0.26,0.49,1.31,0.94,-0.51,1.05,0.4,0.72,-  
0.51,1.03,0.78,0.26,0.43,-0.07,0.55,-0.92,0.89,-  
0.92,0.69,0.99,0.04,0.91,-1.2,-0.78,0.71,-0.99,0.07,0.63,-  
0.34,-0.2,0.86,-  
0.69,1.06,0.36,0.49,1.09,0.77,0.17,0.66,0.83,1.09,1.66,-  
0.17,0.66,-0.11,0.57,0.43,0.57,0.61,-0.21,-0.17,-  
0.11,1.87,0.45,0.96,0.82,0.64,0.73,0.29,0.77,1.54,0.72,0.06,0.  
7,1.23,0.26,0.83,0.36,0.16,1.6,1.01,0.94,0.03,-0.03,0.73};
```

```
A={2.88,3.28,1.61,2.2,2.58,3.64,2.41,1.89,2.94,1.62,3,3.5,1.8  
1,2.7,3.45,2.42,2.55,2.34,2.45,1.9,2.55,1.84,2.81,2.81,1.46,1.  
91,2.95,3.48,2.8,2.47,2.75,  
1.99,2.83,3.2,1.92,3,3.67,2.01,1.85,2.61,2.89,2.85,3,1.56,2.48  
,1.5,2.99,1.72,3,1.14,3.48,2.87,2.68,1.35,2.56,2.7,1.96,1.76,2  
.18,1.85,1.44,1.36,3.23,1.69,3.47,2.09,2.18,2.04,1.71,2.2,2.59  
,2.25,2.59,1.74,1.72,1.68,1.98,2.05,1.5,2.45,2.05,2.61,2.86,1.  
51,1.31};
```

```
Sigma=0.5;  
Ni=3;  
DiffSigma=100;
```

```
n=85;
```

```
While[DiffSigma>0.0000001,
```

```
Eq1=100;  
Eq2=100;  
SigmaPrevious=Sigma;
```

```
(* calculation of Ni *)
```

```
Print["Calculation of ni"];  
Print["Sigma=",Sigma];
```

```
While[Abs[Eq1]>0.0001,  
Ni0=Ni;  
ndist=NormalDistribution[Ni,Sigma];  
Eq1=Sum[(PDF[ndist,R[[i]]]-
```

```
PDF[ndist,A[[i]])]/
```

```
(CDF[ndist,A[[i]]]-
```

```
CDF[ndist,R[[i]]]),{i,1,n}];
```

```
Print["Eq1=",Eq1];
```

```

                (* calculation of secant *)

ndist=NormalDistribution[Ni+0.00001,Sigma];
                Eqld=Sum[(PDF[ndist,R[[i]]]-
PDF[ndist,A[[i]]])/
                (CDF[ndist,A[[i]]]-
CDF[ndist,R[[i]]]),{i,1,n}];

                DerEq1=(Eqld-Eq1)/0.00001;

                DeltaNi=-Eq1/DerEq1;
                Ni=Ni0+DeltaNi;
                Print["Ni=",Ni]      ];

(* calculation of Sigma *)

Print["Calculation of sigma"];
Print["Ni=",Ni];

While[Abs[Eq2]>0.0001,
    Sigma0=Sigma;
    Print["Sigma0=",Sigma0];
    ndist=NormalDistribution[Ni,Sigma];
    Eq2=Sum[((R[[i]]-Ni)*PDF[ndist,R[[i]]]-
(A[[i]]-Ni)*PDF[ndist,A[[i]]])/
    (CDF[ndist,A[[i]]]-
CDF[ndist,R[[i]]]),{i,1,n}];
    Eq2=(Eq2)^2;
    Print["Eq2=",Eq2];

                (* calculation of secant *)

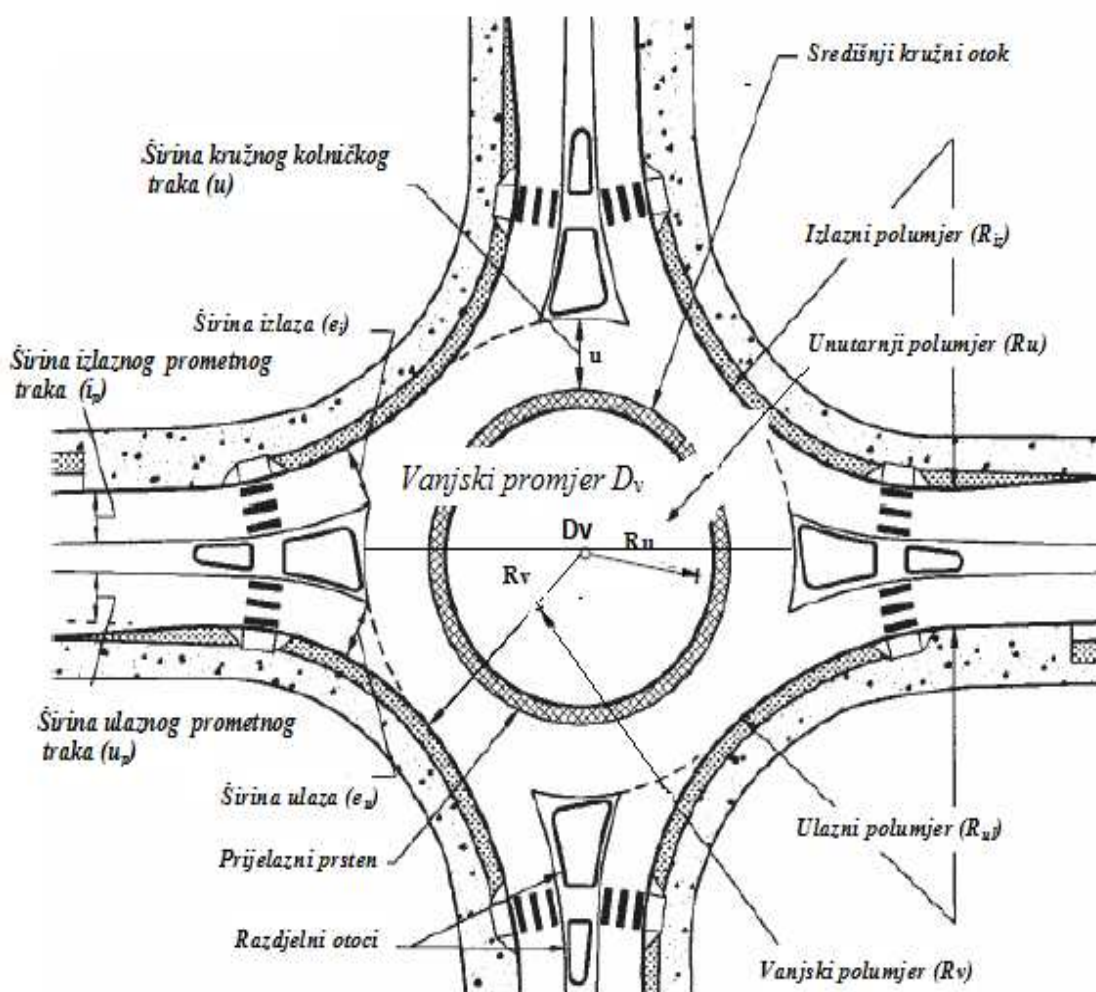
ndist=NormalDistribution[Ni,Sigma+0.00001];
                Eq2d=Sum[((R[[i]]-Ni)*PDF[ndist,R[[i]]]-
(A[[i]]-Ni)*PDF[ndist,A[[i]]])/
                (CDF[ndist,A[[i]]]-
CDF[ndist,R[[i]]]),{i,1,n}];
                Eq2d=(Eq2d)^2;
                DerEq2=(Eq2d-Eq2)/0.00001;
                DeltaSigma=-Eq2/DerEq2;
                Print["DeltaSigma=",DeltaSigma];
                Sigma=Sigma0+DeltaSigma;
                Print["Sigma=",Sigma]      ];

                DiffSigma=Abs[SigmaPrevious-Sigma]      ];
OcekivanjeTc=2.71828^(Ni+0.5*Sigma^2);
VarTc=(OcekivanjeTc)^2*(2.71828^(Sigma^2)-1);
Print["OcekivanjeTc=",OcekivanjeTc];
Print["VarTc=",VarTc];

```

Prilog 3. Projektno-oblikovni elementi RKT-a

Projektno-oblikovni elementi RKT-a čine jedinstvenu cjelinu oblikovnih karakteristika raskrižja koji imaju važnu ulogu u poboljšanju sigurnosti i operative učinkovitosti samog raskrižja, a mogu se navoditi samo u nekim preporučenim granicama, koje proizlaze iz prometno-sigurnosnih ili prometno-tehnoloških razloga. Pojmovi i veličine koje opisuju RKT odnose se na građevinsko oblikovanje raskrižja, a sadrže sve projektno-oblikovne elemente raskrižja koji su prikazani na slici P.8.



Slika P.8. Projektno-oblikovni elementi RKT-a

Projektno-oblikovni elementi definirani su kako slijedi:

Širina kružnog kolničkog traka (u) [m]: predstavlja širinu između vanjskog ruba kolnika i središnjeg otoka. Namijenjena je za kretanje vozila do njihovog željenog izlaza.

Vanjski (R_v) i unutarnji polumjer (R_u) [m]: vanjski polumjer je širina između vanjskih rubova kružnog kolnika, a unutarnji polumjer predstavlja širinu između unutarnjih rubova središnjeg otoka uključujući i širinu prozornog dijela središnjeg otoka. Bitni su elementi za prozornost i brzinu kretanja vozila kroz raskrižje.

Širina ulaza (e_u) / izlaza (e_i) [m]: je širina ulaska / izlaska u obliku uljevka; mjeri se pravokutno od ulaznog / izlaznog polumjera do presjeka produžetka desnog ruba otoka za pješake ako je izvedeno, ako ne onda do prometnog otoka i tlocrtne oznake koja označuje vanjski rub kružnog raskrižja. Elementi su koji utječu na sigurnost i propusnu moć raskrižja, a koriste se prilikom dimenzioniranja ulaznih i izlaznih privoza

Ulazni polumjer (R_{ul}) / izlazni polumjer (R_{iz}) [m]: su minimalni polumjer zakrivljenosti izvan pločnika. Značajniji su elementi koji utječu na prometnu sigurnost RKT-a. Prilikom dimenzioniranja izlaznih i ulaznih polumjera potrebno je osigurati brže pražnjenje vozila iz kružnog kolnika, te smanjiti mogućnost naleta na pješaka pri izlasku i ulasku vozila u raskrižje.

Širina ulaznog (u_p) / izlaznog prometnog traka (i_p) [m]: predstavlja širinu za ulaz / izlaz. Koristi se za usmjeravanje prometnog toka i standardnih je veličina (2,5 - 4,0m).

Prijelazni prsten: nalazi se između kružnog kolnika i središnjeg otoka, omogućavajući lakši prolaz duljih vozila. Izvodi se od različitog materijala (npr. od betonskih elemenata) i/ili u drugoj boji nasuprotnoj boji kolnika, te u poprečnom nagibu oko 4,0% i širine od 1,5 do 2,0 m.

Ulazni kut (Φ) [$^\circ$]: je kut koji određuju tangente na središnjicu ulaznog traka i kružnog traka, na mjestu gdje središnjica ulaznog traka presijeca vanjski polumjer RKT-a, odnosno na mjestu gdje produžetak prve tangente presijeca središnjicu kružnog traka.

Središnji kružni otok: nalazi se u samom središtu raskrižja, a u oblikovnom i funkcionalnom pogledu trebao bi ispunjavati bitne zahtjeve, kao što su: omogućavanje prepoznavanja kružnog raskrižja u prometnoj mreži, naglašavanje prekida trase sa svojstvima slobodnog toka, omogućavanje obilaženja vozila (ako je izveden kao prozoran), osiguravanje mjesta za postavljanje prometnih znakova i rasvjete i osiguravanje prostora za posebna oblikovanja i krajobrazna uređenja.

Razdjelni otoci: nalaze se na ulaznim i izlaznim privozima, a služe za razdvajanje ulaznih i izlaznih prometnih tokova te za odmaranje pješaka i biciklista. Moraju biti prilagođeni veličini raskrižja i brzinama na ulazu i izlazu. Preporučljivo je da se na velikim kružnim raskrižjima koriste otoci oblika lijevka, a na malima trokutastog oblika. U projektno-oblikovnom pogledu, razdjelne otoke treba postaviti okomito na kružni kolnik, a najmanja širina ne smije biti ispod 1,60 m. Za slučaj prijelaza pješaka, razdjelni otok mora imati širinu minimalno 2,00 m, a za bicikliste minimalno 2,50 m.

Preporučljive vrijednosti projektno-oblikovnih elemenata RKT-a sažeto su prikazane u tablici P.9.

Tablica P.9. Preporučljive vrijednosti projektno-oblikovnih elemenata RKT-a [60]

ELEMENT	SIMBOL	MJERNA JEDINICA	PREPORUČLJIVE DIMENZIJE
vanjski polumjer	R_v	[m]	11,00-45,00
širina kružnog traka	u	[m]	5,40-10,50
širina voznog traka	u_p	[m]	2,75-3,50
širina ulaza	e_v	[m]	4,00-10,00
ulazni polumjer	R_{ul}	[m]	8,00-25,00
ulazni kut	Φ	[°]	20,00-40,00