

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Mirna Klobučar

**OPTIMIZACIJA UDALJENOSTI KRUŽNOG
RASKRIŽJA OD SUSJEDNOG IZ ASPEKTA
POKAZATELJA PROMETNOG TOKA I
SIGURNOSTI PROMETA**

DOKTORSKI RAD

Mentorica: prof. dr. sc. Aleksandra Deluka-Tibljaš

Komentorica: izv. prof. dr. sc. Sanja Šurdonja

Rijeka, 2025.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Mirna Klobučar

**OPTIMIZATION OF THE DISTANCE BETWEEN
THE ROUNDABOUT AND THE ADJACENT
INTERSECTION FROM THE ASPECT OF TRAFFIC
FLOW AND TRAFFIC SAFETY INDICATORS**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2025

Mentorica doktorskog rada: prof. dr. sc. Aleksandra Deluka-Tibljaš

Komentorica doktorskog rada: izv. prof. dr. sc. Sanja Šurdonja

Doktorski rad obranjen je dana _____ na Građevinskom
fakultetu u Rijeci, pred Povjerenstvom u sastavu:

1. _____

2. _____

3. _____

ZAHVALE

Izrada ovog doktorskog rada predstavlja jedan od najvećih izazova, ali ujedno i najdragocjenijih iskustava s kojima sam se dosad suočila. Kroz proteklih šest godina istraživanja, stjecanjem novih znanja i produbljivanjem razumijevanja teme, prolazila sam kroz brojne uspone i padove koji su obogatili ne samo moj akademski, već i osobni razvoj.

Posebnu zahvalnost dugujem mentorici, prof. dr. sc. Aleksandri Deluka-Tibljaš, koja je zaslužna za ideju istraživanja dosad nedovoljno istraženog područja. Njezino vodstvo, strpljenje, kontinuirana podrška te vrijedni savjeti tijekom studija i rada bili su ključni u uspješnoj realizaciji ovog doktorskog istraživanja.

Veliko hvala upućujem i komentorici, izv. prof. dr. sc. Sanji Šurdonji, čije je stručno vodstvo i usmjeravanje u području sigurnosti prometa bilo neprocjenjivo. Njezina pomoć u upoznavanju s novim softverskim alatima otvorila je nove perspektive i dala dodatnu vrijednost istraživanju.

Iskreno zahvaljujem prof. dr. sc. Ireni Ištoka Otković, koja je svojim entuzijazmom pobudila moje zanimanje za prometne mikrosimulacije i pružila mi dragocjenu podršku tijekom tromjesečne studentske mobilnosti u Osijeku.

Posebnu zahvalu zaslužuju i moje kolegice s Katedre za prometnice, Ivana i Marijana, na bodrenju, suradnji i pomoći, kako na akademskoj tako i na osobnoj razini.

Najveću zahvalnost izražavam svojoj obitelji - noni Renati, noni Etici, nonotu Marčelu, ujaku Velimiru i bratu Vedranu, čija su bezuvjetna ljubav, strpljenje i razumijevanje predstavljali neiscrpan izvor motivacije tijekom cijelog ovog puta.

Ovaj rad posvećujem svojoj mami Nives, čija je nesebična pomoć i svakodnevna podrška značajno olakšala i uljepšala ovo poglavlje mog života.

SAŽETAK

U ovome doktorskom radu je prezentirano istraživanje usmjereno na optimizaciju položaja kružnog raskrižja u odnosu na susjedno semaforizirano raskrižje s ciljem poboljšanja protočnosti i prometne sigurnosti. Postavljena su dva osnovna cilja istraživanja: (1) kvantificirati utjecaj ključnih prometnih i projektnih parametara na vrijeme putovanja duž cestovnog koridora sa semaforiziranim raskrižjima unutar kojeg je smješteno kružno raskrižje te razviti regresijski model za predikciju vremena putovanja; (2) analizirati prometnu sigurnost na segmentu cestovne mreže s jednim kružnim i jednim semaforiziranim raskrižjem te razviti regresijski model za predikciju broja konflikata.

Za formiranje baze podataka korišteni su dijelom podaci prikupljeni eksperimentalnim istraživanjima, a dijelom podaci generirani iz modela prometnih mikrosimulacija za što je korišten programski paket PTV VISSIM te za analizu konflikata Surrogate Safety Assessment Model (SSAM). Dobiveni podaci poslužili su za razvoj regresijskih modela za predikciju vremena putovanja i prometnih konflikata.

Usporednom analizom prometnih mikrosimulacija izoliranog kružnog raskrižja i kružnog raskrižja smještenog u blizini semaforiziranog raskrižja utvrđeno je da izolirano kružno raskrižje sustavno ostvaruje značajno kraće vrijeme putovanja i manji ukupan broj konflikata pri jednakim prometnim uvjetima.

Analizom je utvrđeno da pet parametara statistički značajno određuju ukupno vrijeme putovanja duž koridora: udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja, intenzitet prometa u vršnom satu, raspodjela prometa između glavnog i sporednog smjera, vanjski polumjer kružnog raskrižja i duljina crvenog vremena. Razvijeni regresijski model za predikciju vremena putovanja pokazuje visoku prediktivnu sposobnost ($R^2=0,763$), a validacija na stvarnim lokacijama potvrđuje njegovu primjenjivost za objektivno vrednovanje opravdanosti implemenacije kružnog raskrižja u postojeći koridor semaforiziranih raskrižja.

Analiza sigurnosti pokazuje porast broja konflikata pri manjem razmaku raskrižja, dok veći vanjski polumjer i dulje crveno vrijeme smanjuju broj konflikata. Regresijski model za predikciju broja konflikata ostvaruje visoku točnost ($R^2=0,801$) te je usporedbom s SSAM rezultatima na kalibriranim modelima šest segmenata potvrđena odsutnost značajnih razlika za većinu lokacija.

Znanstveni doprinos dokorskog rada sastoji se u novim spoznajama o interakciji kružnih i semaforiziranih raskrižja te izradi kvantitativnih modela koji jasno određuju utjecaj ključnih prometnih i projektnih parametara na vrijeme putovanja i prometnu sigurnost temeljenu na analizi konflikata. Praktična vrijednost oglada se u preporukama za

optimalno pozicioniranje kružnih raskrižja na semaforiziranim cestovnim koridorima radi poboljšanja protočnosti i prometne sigurnosti.

Ključne riječi: *kružno raskrižje, semaforizirano raskrižje, razmak raskrižja, vrijeme putovanja, prometni konflikti, prometne mikrosimulacije, VISSIM, SSAM; regresijski model*

ABSTRACT

This doctoral thesis presents research aimed at optimising the distance between a roundabout and an adjacent signalised intersection to improve traffic flow and traffic safety. Two primary research objectives were established: (1) to quantify the impact of key traffic and design parameters on travel time along a signalised corridor within which a roundabout is situated, and to develop a regression model for predicting travel time; (2) to analyze traffic safety on a network segment featuring one roundabout and one signalised intersection and to develop a regression model for conflict prediction.

The database used for this research consists partly of field data and partly of traffic microsimulations outputs generated using the PTV VISSIM software package; conflict analyses were conducted using the Surrogate Safety Assessment Model (SSAM). The resulting dataset supported the development of regression models for predicting both travel time and traffic conflicts.

A comparative analysis of traffic microsimulations for an isolated roundabout and a roundabout situated near a signalised intersection revealed that the isolated roundabout consistently exhibited significantly shorter travel times and fewer conflicts under identical traffic conditions.

The analysis identified five parameters statistically significant for determining travel time along the corridor: the distance between the roundabout and the signalised intersection, peak-hour traffic volume, traffic distribution between major and minor directions, the outer radius of the roundabout, and the red phase duration. The developed travel-time regression model demonstrates high predictive capability ($R^2 = 0,763$), with validation at real-world locations confirming its applicability for objectively assessing the justification of integrating a roundabout within an existing corridor of signalised intersections.

Traffic safety analysis indicates an increase in the number of conflicts with shorter intersection spacing, whereas larger outer radius and longer red signal phases reduce conflict numbers. The regression model for conflict prediction achieves high accuracy ($R^2 = 0,801$), and comparison with SSAM outputs on calibrated models of six network segments confirms no significant differences for most locations.

The scientific contribution of the doctoral thesis lies in new insights into the interaction between roundabouts and signalised intersections, as well as the development of quantitative models defining the impact of key traffic and design parameters on travel time and traffic safety, based on conflict analysis. The practical value of the research is reflected in recommendations for the optimal positioning of roundabouts within signalised traffic corridors to enhance traffic flow and safety.

Keywords: *roundabout, signalised intersection, intersection spacing, travel time, traffic conflicts, traffic microsimulation, VISSIM, SSAM, regression model.*

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
1.1. Definiranje predmeta istraživanja	2
1.2. Ciljevi i hipoteze istraživanja	4
1.3. Struktura doktorskog rada	5
2. Pregled tehničke regulative za planiranje i projektiranje kružnih raskrižja.....	8
2.1. Hrvatske smjernice za projektiranje kružnih raskrižja	9
2.2. Usporedba međunarodne tehničke regulative za projektiranje kružnih raskrižja	13
2.2.1. Stupanj razrade tehničke regulative	13
2.2.2. Urbana i izvanurbana kružna raskrižja – usporedba analiziranih smjernica	18
2.2.3. Kružna raskrižja na prometnom koridoru – usporedba analiziranih smjernica	19
2.3. Rezime – Pregled tehničke regulative za planiranje i projektiranje kružnih raskrižja	24
3. Pregled postojećih istraživanja	25
3.1. Bibliometrijska analiza	26
3.2. Prometno funkcioniranje kružnih raskrižja	31
3.2.1. Utjecajni parametri	35
3.2.2. Parametri prometnog toka – prosječno vrijeme kašnjenja	39
3.3. Kružna raskrižja u interakciji s drugim raskrižjima u mreži	42
3.4. Prometna sigurnost na kružnim raskrižjima	47
3.5. Rezime - Pregled postojećih istraživanja	52
4. Primjena prometnih mikrosimulacija u istraživanju kružnih raskrižja – Programski paket VISSIM.....	53
4.1. Pregled istraživanja kružnih raskrižja primjenom VISSIM-a.....	54
4.2. Analiza sigurnosti prometa na kružnim raskrižjima uz primjenu VISSIM-a	57
4.3. Modeli kalibracije.....	60
4.4. Rezime – Primjena prometnih mikrosimulacija u istraživanju kružnih raskrižja – Programski paket VISSIM	64
5. Metodologija istraživanja.....	65

5.1. Istraživački pristup	66
5.2. Provedba istraživanja	66
5.3. Alati i softverski paketi	70
5.3.1. Programski alat PTV VISSIM	71
5.3.2. Programski alat Surrogate Safety Assessment Model	72
5.3.3. Programski alat XLSTAT	73
5.3.4. Programski alat Neuroshell Predictor	74
5.4. Statističke metode	75
5.5. Rezime – Metodologija	84
6. Preliminarna istraživanja	85
6.1. Terenska mjerenja	86
6.1.1. Analiza količine i strukture prometa, dnevne raspodjele prometnog opterećenja i brzina	87
6.1.2. Projektni elementi analiziranih kružnih raskrižja	94
6.2. Model za predikciju vremena putovanja temeljen na različitim scenarijima ...	98
6.2.1. Prometni mikrosimulacijski model	98
6.2.2. Analiza rezultata	101
6.2.3. Statistička analiza i razvoj preliminarnog modela vremena putovanja .	107
6.2.4. Usporedba regresijskog modela i rezultata neuronskih mreža	113
6.3. Model za predikciju broja konflikata temeljen na različitim scenarijima	117
6.3.1. Analiza i interpretacija broja konflikata u 24-satnom razdoblju	118
6.3.2. Statistička analiza i razvoj preliminarnog modela broja konflikata	120
6.4. Analiza utjecaja projektnih elemenata na sigurnost prometa na kružnim raskrižjima	123
6.4.1. Prometni modeli kružnih raskrižja i potencijalni konflikti	124
6.4.2. Statistička analiza baze podataka iz modela prometnih mikrosimulacija	124
6.5. Rezime – Preliminarna istraživanja	132
7. Razvoj modela za predikciju vremena putovanja	134
7.1. Ulazni parametri modela	135
7.2. Modeli prometnih mikrosimulacija temeljeni na različitim scenarijima	137
7.3. Analiza baze podataka za razvoj modela	140
7.3.1. Analiza utjecaja ulaznih parametara modela na prosječno vrijeme kašnjenja	141

7.3.2. Analiza utjecaja ulaznih parametara modela na vrijeme putovanja	148
7.4. Matematički pristup i formulacija.....	160
7.5. Rezime - Razvoj modela za predikciju vremena putovanja	165
8. Validacija modela temeljem mjerenja na stvarnoj cestovnoj mreži	166
8.1. Eksperimentalna istraživanja	167
8.1.1. Opis analizirane prometne mreže – Grad Osijek	168
8.1.2. Analiza eksperimentalno prikupljenih podataka – Grad Osijek.....	170
8.1.3. Opis analizirane prometne mreže – Grad Poreč	174
8.1.4. Analiza eksperimentalno prikupljenih podataka – Grad Poreč	177
8.2. Validacija modela	180
8.3. Rezime – Validacija modela temeljem mjerenja na stvarnoj cestovnoj mreži.....	185
9. Razvoj modela za predikciju broja konflikata	187
9.1. Prikupljanje podataka	188
9.2. Analiza i interpretacija broja konflikata u 24-satnom razdoblju	189
9.3. Statistička analiza i razvoj modela predikcije broja konflikata	192
9.4. Usporedba modela predikcije broja konflikata s rezultatima kalibriranih mikrosimulacijskih modela u Osijeku i Poreču	197
9.4.1. Kalibracija mikrosimulacijskih modela temeljenih na stvarnim raskrižjima u Osijeku i Poreču.....	198
9.4.2. Usporedba regresijskog modela i rezultata kalibriranih modela prometnih mikrosimulacija	202
9.5. Rezime – Razvoj modela za predikciju broja konflikata.....	206
10. Zaključak	207
10.1. Znanstveni doprinos provedenog istraživanja	208
Popis literature.....	219
Popis slika	239
Popis tablica	242
Prilozi.....	245
Životopis autora	269

1. UVOD

U uvodnom poglavlju doktorskog rada definiran je predmet istraživanja te znanstveni i stručni značaj analize međuutjecaja kružnih i semaforiziranih raskrižja u urbanoj cestovnoj mreži. Precizno su formulirani ciljevi te su postavljene istraživačke hipoteze kojima se želi objektivno procijeniti utjecaj prometnih i projektnih parametara na prometnu funkcionalnost cestovnog koridora, s posebnim naglaskom na vrijeme putovanja, i prometnu sigurnost temeljenu na analizi konflikata. Također je opisan metodološki pristup istraživanju i predstavljena struktura rada, koja sustavno vodi čitatelja kroz faze istraživanja, od teorijskog pregleda do razvoja modela za predikciju vremena putovanja i ukupnog broja konflikata temeljenih na empirijskim podacima i prometnim mikrosimulacijama.

U radu se terminološki dosljedno koristi naziv „kružno raskrižje“, usklađen s hrvatskim strukovnim nazivljem, kojim se opisuje raskrižje oblikovano kružnim kolnikom na koji se priključuju najmanje tri ceste te na kojem se promet odvija u smjeru suprotnom od kretanja kazaljke na satu. Unatoč prisutnosti različitih naziva u svakodnevnoj praksi, poput rotora ili kružnog toka, u doktorskome radu primjenjuje se terminološka preciznost u skladu sa službenim tehničkim nazivljem u Republici Hrvatskoj.

1.1. Definiranje predmeta istraživanja

Kružna raskrižja su se afirmirala kao važan element urbanog prometnog planiranja i projektiranja zahvaljujući njihovom povoljnom utjecaju na protočnost i sigurnost odvijanja prometa u različitim prometnim uvjetima. Brojna istraživanja i međunarodna praksa potvrđuju učinkovitost kružnih raskrižja u pogledu povećanja protočnosti cestovne mreže i smanjenja rizika od prometnih nesreća (Gross i sur., 2013; Tollazzi, 2015; Rodegardts i sur., 2010).

Unatoč tim prednostima, integracija kružnih raskrižja u postojeću prometnu mrežu predstavlja određene izazove. Posebno su izazovi izraženi na urbanim prometnim koridorima na kojima dolazi do interakcije različitih režima upravljanja prometom, odnosno, na mjestima gdje su kružna i semaforizirana raskrižja prostorno blizu jedno drugome (Akçelik, 2014; Hallmark i sur., 2010, Fernandes i sur., 2017). Kružno raskrižje omogućuje kontinuirani prometni tok vozila s minimalnim zaustavljanjima, dok semaforizirano raskrižje uvodi periodične prekide kretanja vozila. Nedovoljna udaljenost između ovih raskrižja može uzrokovati međusobno negativno djelovanje, pri čemu kolona vozila zaustavljena ispred semaforiziranog raskrižja može dosegnuti i blokirati susjedno kružno raskrižje, što može dovesti do pogoršanja operativnih i sigurnosnih pokazatelja prometne mreže (Federal Highway Administration, 2000).

Predmet istraživanja ovog doktorskog rada jest optimizacija udaljenosti između kružnog raskrižja i susjednog semaforiziranog raskrižja, s posebnim naglaskom na pokazatelje prometnog toka i sigurnosti prometa. U urbanim prometnim koridorima, gdje su raskrižja često gusto raspoređena i uključena u koordinirani sustav upravljanja prometom, pitanje njihovog međusobnog razmaka postaje izrazito značajno.

Unatoč rastućoj važnosti ovog problema, važeća međunarodna tehnička regulativa ne daje konkretne ni detaljne preporuke za određivanje minimalne ili optimalne udaljenosti među susjednim raskrižjima različitih tipova kontrole prometa – kružnih i semaforiziranih. Većina postojećih smjernica daje tek općenite upute o tome da kružno i semaforizirano raskrižje u koridoru mogu utjecati na funkcionalnost oba raskrižja te takve slučajeve treba izbjegavati no sustavni i sveobuhvatni pristupi definiranju optimalnih razmaka nedostaju. Stoga se nameće potreba za ciljanim istraživanjem koje će se utvrditi što utječe na funkcioniranje susjednih raskrižja kada se radi o kružnom i semaforiziranom raskrižju te kako odrediti njihov optimalni razmak iz aspekta protočnosti i sigurnosti odvijanja prometa.

Pregled dosadašnje literature pokazuje da je problem međutjecaja raskrižja unutar prometnog koridora do sada istražen tek u ograničenom opsegu. Dosadašnja istraživanja kružnih raskrižja uglavnom su usmjerena na njihovu analizu kao izoliranih prometnih entiteta, pri čemu su proučavani aspekti poput kapaciteta, razine uslužnosti, prometne

sigurnosti i utjecaja ovog tipa raskrižja, u usporedbi sa drugim mogućim tipovima, na okoliš.

Postoji manji broj istraživanja koja se bave utjecajem kružnih raskrižja unutar prometnih koridora primjenom prometnih mikrosimulacija i terenskih analiza.

Hallmark i sur. (2010) analizirali su mikrosimulacijski prometne koridore u SAD-u kako bi usporedili različite scenarije: postojeće stanje sa semaforiziranim raskrižjima, unaprijeđeni semaforiski sustav te uvođenje kružnog raskrižja u semaforizirani koridor. Rezultati studije slučaja u Amesu, Iowa, pokazali su da zamjena semaforiziranog raskrižja kružnim može smanjiti prosječno vrijeme kašnjenja i vrijeme putovanja u vršnim satima, ali su slična poboljšanja postignuta i optimizacijom signalnih planova uz dodavanje trake za lijeve skretače. U drugom slučaju (Woodbury, Minnesota), implementacija dvotračnog kružnog raskrižja na koridoru (udaljenog oko 640 m od najbližeg semaforiziranog raskrižja) dovela je do smanjenja prosječnog vremena kašnjenja, no nije značajno promijenila ukupno vrijeme putovanja duž dionice.

Bared i Edara (2005) usporedili su kapacitet i prosječno vrijeme kašnjenja na kružnim raskrižjima korištenjem prometnih mikrosimulacija i analitičkih modela, uključujući scenarije gdje je kružno raskrižje smješteno unutar koridora semaforiziranih raskrižja. Uočili su da kružno raskrižje donosi prednosti u smislu protoka pri manjim prometnim opterećenjima, ali pri većem prometnom opterećenju semaforizirano raskrižje može rezultirati nešto nižim ukupnim kašnjenjem u koridoru.

Bibliometrijska analiza, prikazana u Poglavlju 3, potvrđuju kontinuirani porast primjene prometnih mikrosimulacijskih alata u području istraživanja i optimiranje prometne infrastrukture, a osobito se ističe programski alat PTV VISSIM, koji se, prema broju relevantnih znanstvenih publikacija, najviše koristi (Raju & Farah, 2021). U literaturi su postupci kalibracije i validacije prometnih mikrosimulacijskih modela jasno definirani te metodološki standardizirani. Kao primarni kriterij kalibracije najčešće se koristi vrijeme putovanja zbog svoje dostupnosti – moguće ga je utvrditi empirijski, pouzdanosti mjerenja te direktne povezanosti sa stvarnim uvjetima prometnog toka (Park & Qi, 2005; Kim, 2006; Toledo i sur., 2004; Ištoka Otković i sur., 2013; Llorca i sur., 2015).

U području prometne sigurnosti posebno se ističe Surrogate Safety Assessment Model (SSAM), alat otvorenog pristupa koji omogućava sustavnu identifikaciju i klasifikaciju konflikata generiranih mikrosimulacijom. Pouzdanost SSAM-a potvrđena je nizom validacijskih studija (Vasconcelos i sur., 2014; Giuffrè i sur., 2018, FHWA, 2008), čime se dokazala njegova primjenjivost i učinkovitost u procjeni sigurnosnih parametara simuliranog prometnog okruženja.

Predmet ovog istraživanja koncipiran je kao poveznica između postojećih normativnih smjernica, koje načelno preporučuju izbjegavanje implementacije kružnih raskrižja unutar semaforiziranih koridora, ali pritom ne definiraju jasne i mjerljive kriterije

minimalne udaljenosti, te operativnih zahtjeva prometnog sustava, koji traži ravnotežu između smanjenja vremena kašnjenja, povećanja kapaciteta prometne mreže i zadržavanja zadovoljavajućih razina prometne sigurnosti. Metodološka pouzdanost istraživanja osigurana je primjenom prometnih mikrosimulacija temeljenih na empirijski prikupljenim podacima o prometnim i projektnim parametrima prometnih koridora.

Primjenom navedene metodologije, istraživanje neposredno adresira utvrđenu prazninu u postojećoj tehničkoj regulativi i znanstvenoj literaturi, pružajući pritom doprinos produbljenom znanstvenom razumijevanju interakcije kružnih i semaforiziranih raskrižja u uvjetima prostorno ograničenih urbanih sredina. Konačni rezultat predstavlja uspostavu preporuka za unapređenje inženjerske prakse u projektiranju i upravljanju prometnim koridorima s heterogenim prometnim tokom, uz istovremeno zadovoljenje funkcionalnih zahtjeva prometnog sustava – protočnosti i sigurnosti odvijanja prometa.

1.2. Ciljevi i hipoteze istraživanja

Doktorsko istraživanje podijeljeno je u dva tematski povezana dijela. Prvi dio istraživanja usmjeren je na analizu utjecaja prometnih i projektnih parametara na vrijeme putovanja duž segmenta cestovne mreže koji obuhvaća kružno i semaforizirano raskrižje. Drugi, komplementarni, dio istraživanja usmjeren je na analizu prometne sigurnosti primjenom metode analize konflikata na istom segmentu cestovne mreže.

Komplementarnost ovih istraživanja ogleda se u jedinstvenoj bazi empirijskih podataka na kojoj se temelje istraživanja i usklađenoj metodologiji.

Sljedom navedenog, postavljeni su sljedeći ciljevi istraživanja:

Cilj 1: Utvrditi ključne prometne i projektne parametre koji statistički značajno utječu na vrijeme putovanja duž cestovnog koridora sa semaforiziranim raskrižjima unutar kojeg je smješteno kružno raskrižje, analizirati njihove korelacije te razviti i, na temelju prikupljenih empirijskih podataka, validirati model za predikciju vremena putovanja

Cilj 2: Identificirati ključne prometne i projektne parametre koji statistički značajno utječu na nastanak konflikata na odabranom segmentu cestovne mreže koji se sastoji od kružnog i semaforiziranog raskrižja, analizirati njihove korelacije te razviti model za predikciju ukupnog broja prometnih konflikata.

U skladu s definiranim ciljevima formulirane su sljedeće hipoteze istraživanja:

Hipoteza H1: Primjenom modela za predikciju vremena putovanja moguće je objektivno vrednovati opravdanost implementacije kružnog raskrižja u postojeći koridor semaforiziranih raskrižja, uzimajući u obzir prevladavajuće građevinske i prometne uvjete.

Podhipoteza H1.1: Pokazatelji prometnog toka izoliranog kružnog raskrižja povoljniji su od pokazatelja prometnog toka kružnog raskrižja integriranog u koridor sa semaforiziranim raskrižjima.

Podhipoteza H1.2: Na ukupno vrijeme putovanja značajno utječu razmak između raskrižja, prometni uvjeti i geometrija kružnog raskrižja.

Podhipoteza H1.3: Predloženi model za predikciju vremena putovanja primjenjiv je za kružna raskrižja integrirana unutar koridora sa semaforiziranim raskrižjima.

Hipoteza H2: Primjenom modela za predikciju broja konflikata moguće je pouzdano procijeniti razinu prometne sigurnosti na segmentu cestovne mreže koji se sastoji od jednog kružnog i jednog semaforiziranog raskrižja, uzimajući u obzir prevladavajuće građevinske i prometne uvjete prometne mreže.

Podhipoteza H2.1: Promjene u projektnim elementima mogu doprinijeti smanjenju rizika od prometnih nesreća kroz smanjenje broja i vrsta konflikata na kružnom raskrižju.

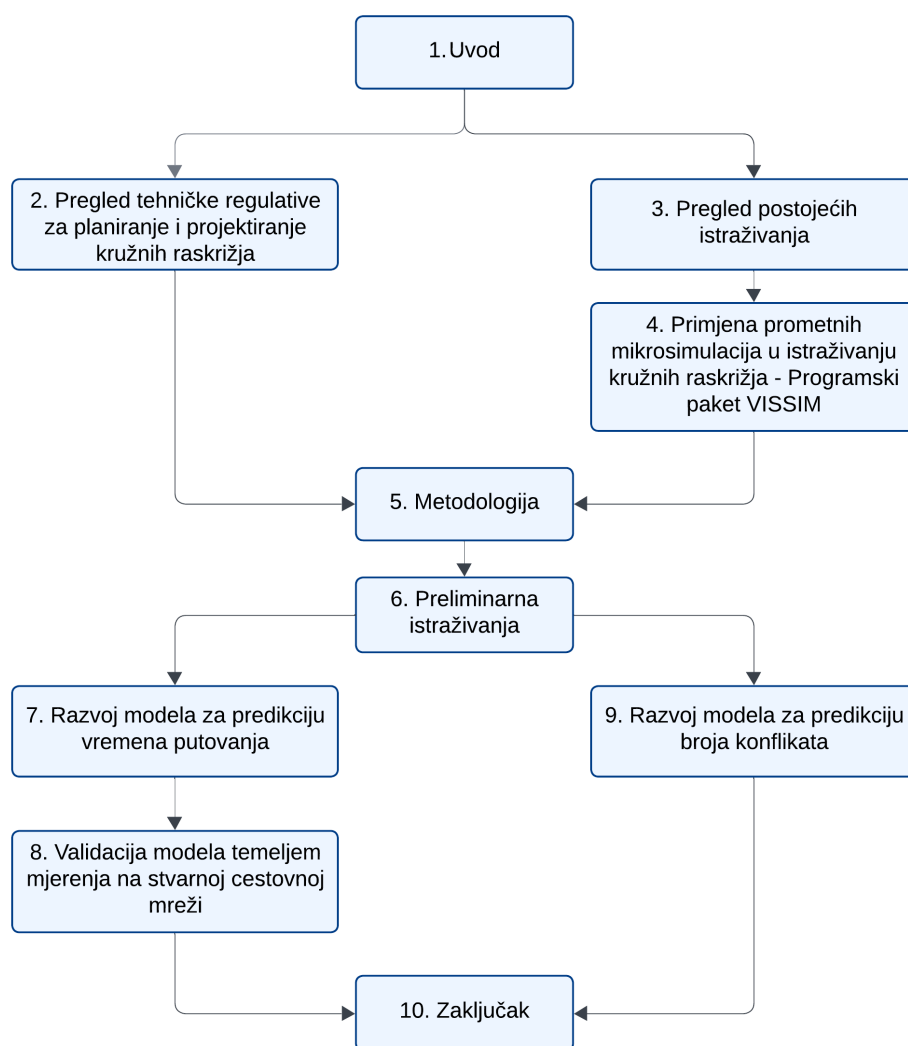
Podhipoteza H2.2: Ukupan broj konflikata na izoliranom kružnom raskrižju manji je u odnosu na kružno raskrižje smješteno u blizini semaforiziranog raskrižja.

1.3. Struktura doktorskog rada

Doktorski rad izrađen je prema pravilima i smjernicama Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, uz poštivanje principa jasnoće, sistematičnosti i znanstvene utemeljenosti. Svi korišteni stručni pojmovi prevedeni su i usklađeni s hrvatskim strukovnim nazivljem.

Doktorski rad se sastoji od naslovne stranice, zahvale, sažetka na hrvatskom i engleskom jeziku, sadržaja, razrade doktorskog rada, popisa literature, priloga, popisa slika, popisa tablica te životopisa autora.

Razrada doktorskog rada organizirana je u deset poglavlja koja sustavno uvode čitatelja u istraživanu tematiku. Shematski prikaz strukture rada prikazan je na slici 1.1.



Slika 1.1. Struktura doktorskog rada

U prvom poglavlju *Uvod* definiran je predmet istraživanja, jasno su postavljeni ciljevi i istraživačke hipoteze te je opisan metodološki okvir za provedbu istraživanja.

Drugo poglavlje *Pregled tehničke regulative za planiranje i projektiranje kružnih raskrižja* daje detaljan pregled hrvatskih i međunarodnih regulativa za projektiranje kružnih raskrižja, analizirajući njihove projektne elemente, metode analitičke procjene i primjene mikrosimulacijskih modela.

U trećem poglavlju *Pregled postojećih istraživanja* prikazana su dosadašnja znanstvena saznanja relevantna za temu doktorskog rada. Poglavlje obuhvaća bibliometrijsku analizu, prikaz rezultata istraživanja kapaciteta, vremena putovanja i prometne sigurnosti kružnih raskrižja, kao i analizu interakcije kružnih i semaforiziranih raskrižja u prometnoj mreži.

Na temelju pregleda recentnih znanstvenih istraživanja utvrđeno je da se pri analizi operativne učinkovitosti kružnih raskrižja najčešće primjenjuju prometne

mikrosimulacije. Četvrto poglavlje rada detaljno obrađuje *primjenu prometnih mikrosimulacija u istraživanjima* prometnog toka i funkcionalnosti kružnih raskrižja.

Peto poglavlje *Metodologija istraživanja* detaljno opisuje pristup istraživanju, faze provedbe, korištene alate i softverske pakete te statističke metode primijenjene u analizi baze podataka i razvoju modela.

U šestom poglavlju *Preliminarna istraživanja* prikazani su rezultati terenskih mjerenja i teorijskih istraživanja koji su bili temelj za definiranje ulaznih parametara modela. Rezultati ovog dijela istraživanja objavljeni su u radovima Klobučar i sur., 2025a i Klobučar i sur., 2025b.

Sedmo poglavlje *Razvoj modela za predikciju vremena putovanja* detaljno opisuje proces izrade modela prometnih mikrosimulacija i razvoj regresijskog modela za predikciju vremena putovanja između kružnog i semaforiziranog raskrižja.

Osmo poglavlje *Validacija modela temeljem mjerenja na stvarnoj cestovnoj mreži* prezentira rezultate eksperimentalnih istraživanja provedenih u gradovima Osijeku i Poreču te prikazuje postupak validacije razvijenog regresijskog modela za predikciju vremena putovanja na temelju stvarnih podataka vremena putovanja.

U devetom poglavlju *Razvoj modela za predikciju broja konflikata* prikazan je detaljan proces razvoja regresijskog modela za predviđanje ukupnog broja konflikata na temelju rezultata prometnih mikrosimulacija i usporedba s kalibriranim mikrosimulacijskim modelima.

Deseto poglavlje *Zaključak* daje sintezu svih dobivenih rezultata, vrednuje ostvarenje postavljenih hipoteza te pruža preporuke za daljnja istraživanja i moguću praktičnu primjenu rezultata.

2. PREGLED TEHNIČKE REGULATIVE ZA PLANIRANJE I PROJEKTIRANJE KRUŽNIH RASKRIŽJA

Kružna raskrižja u suvremenom prometnom planiranju i projektiranju predstavljaju rješenje koje uspješno integrira zahtjeve sigurnosti, kapaciteta i održivosti, zbog čega kontinuirano raste njihova primjena širom svijeta. Iako je njihova učinkovitost univerzalno prepoznata, pristupi projektiranju značajno se razlikuju među državama, što rezultira različito definiranim metodama analize primjenjivosti ovog tipa raskrižja i tehničkim smjernicama za projektiranje.

U ovom poglavlju daje se pregled odabranih nacionalnih i međunarodnih regulativa, tehničkih smjernica i preporuka za projektiranje kružnih raskrižja s naglaskom na urbani kontekst, analizirajući pritom ključne parametre koji određuju njihovu prometnu funkcionalnost i prometnu sigurnost.

2.1. Hrvatske smjernice za projektiranje kružnih raskrižja

Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja na državnim cestama (Hrvatske ceste, 2014) predstavljaju temeljni tehnički dokument za projektiranje kružnih raskrižja u Hrvatskoj s primarnim fokusom na jednostručna kružna raskrižja. Smjernice se temelje na prethodnim nacionalnim propisima iz 2002. godine te relevantnim međunarodnim standardima iz nekoliko zemalja – Slovenije, Njemačke, Nizozemske i Sjedinjenih Američkih Država. Smjernice definiraju sustavan pristup geometrijskom oblikovanju raskrižja, uključujući prometnu signalizaciju, opremu te sigurnosne aspekte. Iako su prvenstveno usmjerene na državne ceste, smjernice obuhvaćaju i preporuke za primjenu u urbanim uvjetima, gdje se očekuje značajan broj pješaka, biciklista te povećana gustoća priključaka i okolnih sadržaja.

U Smjernicama je definirano osam osnovnih skupina općih kriterija za opravdanost izvedbe kružnog raskrižja:

1. Funkcionalni kriterij
2. Prostorno-urbanistički kriterij
3. Prometni kriterij (kriterij prometnog toka)
4. Projektno-tehnički kriterij
5. Kriterij prometne sigurnost
6. Kriterij propusne moći
7. Okolišni kriterij
8. Ekonomski kriterij.

Posebno značajan za ovo istraživanje je funkcionalni kriterij koji analizira primarnu prometnu ulogu predmetnog raskrižja u cestovnoj mreži. Prema Smjernicama, potrebno je izvršiti analizu primarne prometne funkcije raskrižja, njegov položaj i ulogu unutar šire prometne mreže, lokaciju raskrižja u odnosu na urbana područja (unutar ili izvan naselja) te položaj u kontekstu prometnog koridora (niza raskrižja).

Važno je naglasiti kako Smjernice ne propisuju konkretne minimalne udaljenosti između kružnih i ostalih tipova raskrižja. Umjesto toga, ističu važnost detaljne analize položaja raskrižja u odnosu na postojeću prometnu mrežu i tokove, što omogućuje prilagodljiv pristup bez strogih ograničenja.

Prometni kriterij podrazumijeva analizu prometnih uvjeta na predmetnom raskrižju s posebnim naglaskom na ukupni prometni tok i raspodjelu prometnih tokova. Izgradnja kružnog raskrižja opravdana je na lokacijama gdje su prometna opterećenja na privozima približno ujednačena, odnosno gdje nema izražene razlike između glavnog i sporednog smjera. Ukoliko glavni prometni smjer nosi preko 75 % ukupnog prometa raskrižja, ne preporučuje se izgradnja kružnog raskrižja, osim u slučajevima kada je prevladavajući kriterij prometne sigurnosti.

Smjernice razlikuju urbana i izvanurbana kružna raskrižja. Podjela kružnih raskrižja s obzirom na lokaciju, veličinu, oblik i projektnu brzinu prikazana je u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Podjela kružnih raskrižja (Hrvatske ceste, 2014)

Tip kružnog raskrižja	Vanjski polumjer (m)	Okvirni kapacitet (voz/dan)	Projektna brzina (km/h)
Mini urbano	7,0-12,5	10 000	25
Malo urbano	11,0-17,5	15 000	30
Srednje veliko urbano	15,0-20,0	20 000	40
Srednje veliko izvanurbano	17,5-22,5	22 000	40
Veliko izvanurbano	>25	-	-

Za urbana područja posebno se ističe važnost smanjenja brzina i povećana sigurnost pješaka i biciklista. Pješački i biciklistički promet je u zoni urbanih raskrižja potrebno voditi na posebnim površinama odvojeno od tokova motornog prometa. Metodologija proračuna propusne moći primarno se zasniva na empirijskim i analitičkim metodama, a prihvaćeni su parametri iz inozemnih istraživanja (poglavito slovenske i američke smjernice).

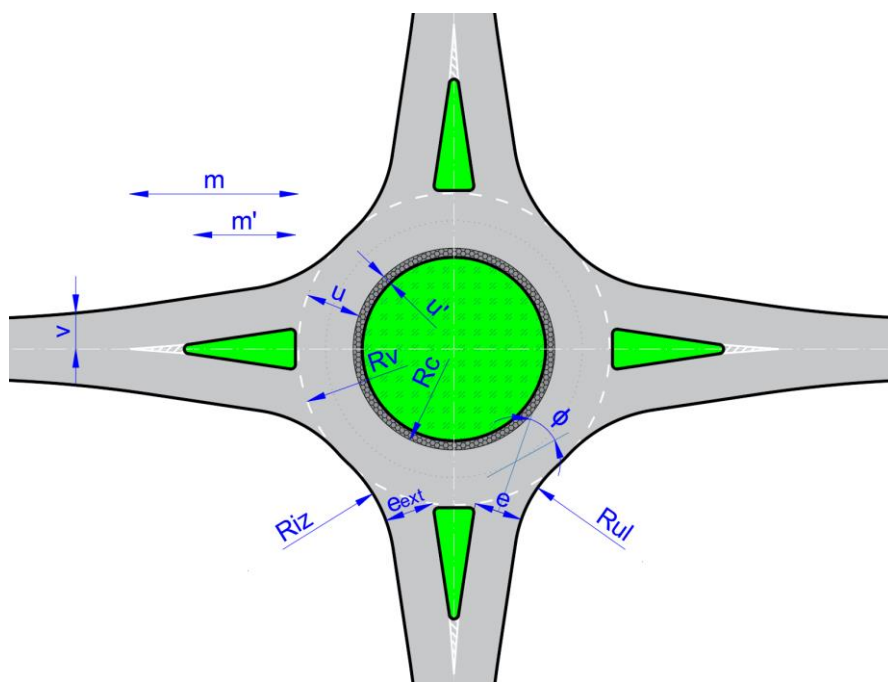
U nastavku poglavlja dana je usporedna analiza međunarodne tehničke regulative za projektiranje kružnih raskrižja. Popis analiziranih smjernica i pravilnika prikazan je u tablici 2.2.

Tablica 2.2. Popis analiziranih smjernica i pravilnika za projektiranje kružnih raskrižja

Država	Naziv pravilnika/ smjernica	Izvor	Godina izdavanja
Hrvatska (HR)	Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja na državnim cestama	Hrvatske ceste	2014
Slovenija (SI)	Tehnička specifikacija TSG-211-008:2023 – Kružna križišča	Ministarstvo za infrastrukturu	2023
Srbija (RS)	Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji	Putevi Srbije	2012
Njemačka (DEU)	Richtlinien für die Anlage von Kreisverkehren	Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV)	2006
Francuska (FRA)	Guide des carrefours urbains	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA)	2010
Engleska (UK)	Geometric design of roundabouts	National Highways	2023
Nizozemska (NLD)	Basiskkenmerken Kruispunten en Rotondes (Publicatie 315A)	Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Wegenbouw en de Verkeerstechniek (CROW)	2015

Država	Naziv pravilnika/ smjernica	Izvor	Godina izdavanja
Norveška (NOR)	N-V121: Geometrisk utforming av veg- og gatekryss	Statens vegvesen	2023
Češka (CZE)	Projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích	Ministerstvo dopravy ČR	2017
Sjedinjene Američke Države (SAD)	Roundabout: An Informational Guide	Federal Highway Administration (FHWA)	2000
	Roundabout: An Informational Guide – Second Edition	Federal Highway Administration (FHWA)	2010
	Evaluating the Performance of Corridors with Roundabouts	Transportation Research Board (TRB)	2014
	Guide for Roundabout	Transportation Research Board (TRB)	2023
Australija (AUS)	Guide to Road Design Part 4B - Roundabouts	Austroads	2023

U tablici 2.3. prikazana je usporedba preporučenih vrijednosti projektnih elemenata i prometnih parametara za srednje velika urbana kružna raskrižja prema hrvatskim i međunarodnim smjernicama. S obzirom na to da je daljnje istraživanje usmjereno upravo na raskrižja ove veličine, usporedba navedenih parametara provedena je ciljano za srednje velika urbana raskrižja. Projektni elementi jednotračnog kružnog raskrižja prikazani su na slici 2.1.



Slika 2.1. Projektni elementi jednotračnog kružnog raskrižja

Tablica 2.3. Preporuke za projektiranje srednje velikih urbanih kružnih raskrižja

Država			HR	SI	RS	DEU	FRA	UK	NLD	NOR	CZE	SAD	AUS
vanjski polumjer	R _v	m	15-20	15-20	15-20	13-20	13-18	14-20	15-30	13-20	15-20	15-30	proračun
širina kružnog kolnika	u	m	4,5-6,0	5,4-16,2	5,4-16,2	4,65-5,6	6-9	proračun	5,5	6-7	4,7-7	7,2-15	4,6-7,6
širina ulaza/izlaza	e	m	4-7	4-15	4-15	4-4,5	3-4	x	3,5-4	4-4,5	3,5-5,5	4-4,5	3,4-5
ulazni polumjer	R _{ul}	m	8-20	14,5-21	8-45	10-12	10-15	6-100	8-12	10-100	10-30	10-30 (proračun)	20-30
izlazni polumjer	R _{iz}	m	10-25	14,5-21	x	12-14	15-20	20-100	12-15	20-100	>15	proračun	20-30
polumjer centralnog otoka	R _c	m	7,5-18	x	x	7,3-12,85	>8	8-15	8-10	8-12	10-14	8-15	6-8
širina povoznog dijela	u'	m	min 1	x	x	1-2	1-2	1-2	1-3	x	1-2	1-2	1-3
uzdužni nagib	i	%	<4	x	x	<3	x	<3	4	<3	x	<4	<6
preporučena brzina	v _p	km/h	40	30-35	40	20-30	50	20-30	30	40	40	30-40	25
kapacitet (dnevni)	Q _d	voz/dan	20 000	20 000	20 000	20 000	25 000	25 000	20 000	25 000	proračun	25 000	proračun
kapacitet (vršni sat)	Q _h	voz/h	x	x	x	1200	x	x	1000-1200	2700			1200

2.2. Usporedba međunarodne tehničke regulative za projektiranje kružnih raskrižja

U ovom potpoglavlju prikazana je usporedba međunarodnih tehničkih regulativa i smjernica za projektiranje kružnih raskrižja, s posebnim naglaskom na njihove sličnosti i razlike s obzirom na stupanj razrade, tipologiju raskrižja te pristupe urbanim i izvanurbanim okruženjima. U prvom dijelu uspoređen je stupanj razrade regulative, uključujući pregled opsega i ključnih projektnih elemenata koje pojedine države obrađuju, poput projektnih parametara, metoda proračuna kapaciteta, primjene prometnih mikrosimulacija te posebnih kriterija za opravdanost primjene kružnih raskrižja. Drugi dio fokusiran je na specifičnosti projektiranja urbanih i izvanurbanih kružnih raskrižja, uz osvrt na preporučene vrijednosti vanjskog polumjera, mjere kontrole brzina te pristupe sigurnosti pješaka i biciklista. U trećem dijelu analiziraju se smjernice vezane uz primjenu kružnih raskrižja u okviru prometnih koridora, s posebnim osvrtom na minimalne međusobne udaljenosti između raskrižja i interakciju između kružnih i semaforiziranih raskrižja.

2.2.1. Stupanj razrade tehničke regulative

Međunarodne smjernice za kružna raskrižja razlikuju se po opsegu i stupnju razrade.

Hrvatske smjernice (Hrvatske ceste, 2014) uz osnovni tekst smjernica sadrže i šest dodataka te sustavno obrađuju vrste kružnih raskrižja, sigurnosne aspekte, kriterije opravdanosti, proračun kapaciteta i projektne elemente. Preporučeni tip raskrižja u hrvatskim smjernicama su jednotračna kružna raskrižja (urbana i izvanurbana).

Slovenska tehnička specifikacija *TSG-211-008:2023* također je vrlo detaljna: definira pojmove i klasifikacije (npr. po lokaciji, broju traka, vođenju prometnih tokova), daje kriterije za opravdanost gradnje, metode proračuna kapaciteta te korake za izbor i projektiranje elemenata kružnog raskrižja. U njoj su iscrpno razrađena jednotračna raskrižja, dok se višetračna rješenja obrađuju kao posebni slučajevi (prednost se daje turbo-varijantama, a velika raskrižja su izvan uobičajenih obuhvata smjernica).

Pojedine zemlje smjernice za projektiranje kružnih raskrižja ne obrađuju kroz samostalne dokumente, već ih integriraju u opće priručnike za projektiranje cesta. Takav pristup prisutan je u Republici Srbiji, gdje je u sklopu *Priručnika za projektovanje puteva* (2012) posebno poglavlje (5.3. *Kružne raskrsnice*) posvećeno kružnim raskrižjima, s detaljnim prikazom njihovih funkcionalnih elemenata te projektnih smjernica.

U kontinentalnim europskim zemljama poput Njemačke, Francuske i Nizozemske, kružna raskrižja se prvenstveno koriste kao mjera smirivanja prometa te su i projektni elementi prilagođeni toj mjeri.

Njemačka je još 1998. izdala smjernice (*Merkblatt*) koje su revidirane 2006., a trenutno se izrađuju nove preporuke (planirane 2025. godine) s obzirom na veliko iskustvo u primjeni. Njemačke smjernice srednje su duljine i strukturirane prema tipovima: definiraju mini kružna raskrižja, mala (jednotračna) i velika (dvotračna ili semaforizirana) kružna raskrižja te daju precizne grafičke i numeričke upute za svaki tip.

Francuske smjernice su sadržane unutar općeg CEREMA vodiča za urbana raskrižja (2010), gdje su kružna raskrižja obrađena usporedno s klasičnim i semaforiziranim raskrižjima. Francuski pristup tradicionalno naglašava sigurnost i protočnost kružnog raskrižja unutar urbanih sredina, uz evoluciju geometrijskih kriterija kroz godine (CERTU preporuke).

Nizozemska je jedna od zemalja pionira u projektiranju modernih kružnih raskrižja, osobito onih s višim stupnjem sigurnosti za bicikliste i pješake. 1998. standardizirala je geometriju kružnih raskrižja (CROW publikacija 126: *Eenheid in rotondes*), a 2015. izdala posebnu publikaciju 257 o turbo-kružnim raskrižjima. Nizozemske smjernice, iako relativno kraće, vrlo su praktično orijentirane i fokusirane na uniformnost geometrijskih karakteristika i prometnu sigurnost, posebice u odnosu na biciklistički promet.

Norveška rješenja uključena su u smjernice *Geometrisk utforming av veg- og gatekryss* (2023) i pokrivaju kriterije primjene kružnih raskrižja u ovisnosti o prometnom opterećenju i klasifikaciji ceste te daju konstrukcijske smjernice. Posvećuju veliku pozornost sigurnosti pješaka i biciklista, uz načela tzv. *Vision Zero* politike, koja nastoje eliminirati smrtnost u prometnim nesrećama.

Češke tehničke smjernice *TP 135* (2017) opsegom i sadržajem vrlo su slične Hrvatskim smjernicama, ali uključuju i smjernice za projektiranje turbo-kružnih raskrižja.

Anglosaksonske zemlje izdaju vrlo opsežne i samostalne priručnike. U Ujedinjenom Kraljevstvu, *DMRB CD 116 (Geometric Design of Roundabouts, 2023)* pokriva sve tipove: normalna i kompaktna kružna raskrižja, potpuno ili djelomično semaforizirana kružna raskrižja, turbo i tzv. hamburger varijante s probojem kroz središnji otok, dvostruka kružna raskrižja itd. Kružna raskrižja se uglavnom implementiraju kao mjera za povećanje kapaciteta prometne mreže, čime se dopušta veća fleksibilnost i širina granica projektnih parametara. U urbanim područjima mini ili kompaktna kružna raskrižja prepoznata su kao učinkovito rješenje.

Slično tome, američki *Guide for Roundabout* (2023) daje sveobuhvatne upute od osnovnih načela do detalja projektiranja. Priručnik daje preporuke za procjenu kapaciteta (uz modele propusnosti i sigurnosti), uz opis specifičnosti primjene u različitim okruženjima (urbanim, ruralnim) i posebnih slučajeva (npr. višetračnih kružnih raskrižja). Iako su kružna raskrižja tradicionalno bila rezervirana za izvangradske ceste, u posljednjih nekoliko desetljeća primjena urbanih kružnih raskrižja također je zabilježila porast. Američki pristup predstavlja hibridni model koji uključuje elemente različitih

međunarodnih smjernica te nudi veći broj tipova kružnih raskrižja: projektna rješenja većeg kapaciteta (za izvan gradske prometnice) usporediva su s britanskim i australskim standardima, dok su kompaktna rješenja (za lokalne i gradske ceste) sličnija njemačkim, francuskim i nizozemskim standardima. Iako američke smjernice omogućuju određenu fleksibilnost u dimenzioniranju, za urbana kružna raskrižja s vanjskim polumjerom od 15 do 20 metara daju se jasne preporuke koje se mogu usporediti s europskim standardima. Australski *Austroads Guide to Road Design Part 4B: Roundabouts* (2023) također je sveobuhvatan te daje upute vezane za geometriju, prometnu signalizaciju te integraciju pješaka i biciklista na kružnim raskrižjima. Naglašava se fleksibilnost u definiranju ključnih projektnih elemenata, što znači da projektant prilagođava dimenzije na temelju željenih brzina ulaska u kružno raskrižje. Smjericama nisu definirana ograničenja i preporuke vanjskog polumjera kružnog raskrižja.

U tablici 2.4. prikazana je usporedba međunarodnih smjernica za projektiranje kružnih raskrižja. Analiza obuhvaća vrstu i primjenu tehničke regulative, pokrivenost projektnih elemenata, definiranu tipologiju kružnih raskrižja, metode za određivanje kapaciteta, preporuke za primjenu prometnih mikrosimulacija te specifične kriterije koje je potrebno zadovoljiti pri projektiranju i izvedbi kružnog raskrižja, kao i posebnosti pojedinih nacionalnih smjernica. Zemlje u kojima je primjena tehničke regulative zakonski obvezujuća istaknute su u tablici podebljanim slovima.

Tablica 2.4. Usporedba međunarodnih smjernica za projektiranje kružnih raskrižja

Država	Vrsta / primjena	Elementi	Tipologija	Kapacitet (metode)	Mikrosimulacije	Posebni kriteriji
HR	Tehnička smjernica, preporuka za državne ceste (80 str.)	Vrlo detaljno: geometrija, kapacitet, preglednost, signalizacija i oprema razrađeni	Mini, malo urbano, srednje veliko urbano, srednje veliko izvanurbano, veliko izvanurbano. Turbo – odvojene smjernice	Analitički: austrijska, britanska (TRL), australaska (SIDRA), njemačka (Ning Wu) metoda	Da, ali nakon analitičkog proračuna	Obavezna analiza opravdanosti prije primjene.
SI	Tehnička specifikacija, zakonski obvezna (46 str.)	Vrlo detaljno: svi projektni elementi, preglednost, vert./horiz. vođenje, signalizacija	Mini, malo, srednje veliko, dvotračno, veliko, turbo	Analitički: austrijska, britanska (TRL), australaska (SIDRA), njemačka (Ning Wu) metoda	Da	Obavezna analiza opravdanosti prije primjene. Preferira se turbo-kružno raskrižje. Dvotračno kružno samo iznimno.
RS	Preporuka, poglavlje priručnika (66 str)	Sažeto: geometrija, preglednost, signalizacija i oprema	Mini, malo, srednje veliko, turbo, vrlo veliko. Jednotračna.	Analitički-austrijska, australaska i britanska metoda	Ne, ali se SIDRA Intersection preporučuje za detaljnu analizu	Obavezna analiza opravdanosti prije primjene. Ne daje smjernice za turbo raskrižja. Dvotračna kružna raskrižja dozvoljena.
DEU	Tehnička smjernica, strukovni standard (32 str.)	Sažeto ali pokriva ključno: definicije tipova, osnovne dimenzije, oslanja se na druge normativne dokumente za detalje	Mini, malo, veliko	Empirijsko-analitički: Brilon-Wu model	Da, u posebnim studijama	Obavezna analiza opravdanosti prije primjene. Preporuka: jednotračna kružna raskrižja. Turbo – Nizozemske smjernice.
FRA	Niz vodiča, nisu zakonski ali su standard (100 str.)	Vrlo detaljno	Mini, kompaktno urbano, izvanurbano, veliko	Empirijsko-analitički: model vremenskih razmaka (GIRABASE)	Ne	Preporuka: jednotračna kružna raskrižja. Nije uveden pojam turbo-kružno. Dvotračno kružno je standard.

Država	Vrsta / primjena	Elementi	Tipologija	Kapacitet (metode)	Mikrosimulacije	Posebni kriteriji
UK	Priručnik, obavezan za državne ceste + zaseban standard za mini kružna raskrižja (160 str.)	Vrlo detaljne	Mini, kompaktno, standardno, višetračno, dvostruko	Empirijski:TRL – Kimber (Arcady)	Ne, standardna praksa je korištenje ARCADY ili Rodel	Nisu definirani formalni kriteriji, ali se preporuča evaluacija pogodnosti primjene kružnog raskrižja. Kružno raskrižje se odabire ako zadovoljava LOS. Dvotračno je standard.
NLD	Skup smjernica; nisu zakon, ali široko prihvaćene (stotine stranica)	Jako detaljno, geometrija optimizirana za sigurnost	Mini, standardno, turbo	Analitički: CROW (Bovyjeva metoda)	Da	Neformalni kriteriji: KR primarno radi sigurnosti. Fokus na “samoregulaciji” – bez potrebe za semaforima ili ležećim policajcima
NOR	Priručnik, zakonski obavezno (50 str.)	Pokriva ključne elemente. Nije razrađeno kao DE/NL, ali je detaljno	Mini, jednotračno, dvotračno, turbo	Australska (SIDRA)	Ne, ali se SIDRA Intersection preporučuje za detaljnu analizu	Ne koriste mini KR. Obavezna analiza opravdanosti prije primjene
CZS	Tehnička smjernica, zakonski obavezno (60. str)	Detaljno: geometrija, preglednost, kapacitet (metode)	Mini, malo, veliko (višetračna), turbo	Analitički: HCM – model vremenskih razmaka	Ne	-
SAD	Priručnik, preporuka (400 str.)	Vrlo sveobuhvatno: svi projektni elementi, preglednost, prometna signalizacija, rasvjeta, krajobraz, odvodnja	Klasifikacija po broju voznih traka: Mini (rijetko), urbano jednotračno, urbano dvotračno, izvanurbano jednotračno, izvanurbano višetračno	Analitički: HCM – model vremenskih razmaka	Da	Obavezna analiza opravdanosti prije primjene (analiza sigurnosti i LOS).
AUS	Smjernica, obavezna u praksi kroz ugovorne zahtjeve (150 str.)	Sveobuhvatno: geometrija, proračun kapaciteta, preglednost, signalizacija	Klasifikacija po trakama: jednotračno i višetračno, mini	Australska (SIDRA Intersection)	Ne, standardno se koristi SIDRA Intersection	Obavezna analiza opravdanosti prije primjene.

2.2.2. Urbana i izvanurbana kružna raskrižja – usporedba analiziranih smjernica

Većina analiziranih zemalja eksplicitno ili implicitno primjenjuje različite pristupe projektiranju kružnih raskrižja ovisno o prometnim uvjetima, odnosno nalaze li se unutar urbanog prostora (urbano kružno raskrižje) ili izvan (izvanurbano ili ruralno kružno raskrižje).

Hrvatske, slovenske i srpske smjernice tu razliku jasno definiraju zasebnim tipološkim kategorijama, dok njemačke i francuske smjernice to čine kroz zasebne normative. Engleske smjernice ne uvode formalnu podjelu, ali nude preporuke za pojedine elemente geometrije kada se raskrižje izvodi u urbanoj sredini.

Nizozemska praksa, kroz standardizirano pravilo o prioritetu biciklista na odvojenim kružnim biciklističkim stazama—unutar naselja biciklisti u pravilu imaju prednost, izvan naselja u pravilu nemaju—implicitno razgraničava urbani i izvanurbani kontekst.

Norveške i češke smjernice naglašavaju potrebu za prilagodbom projektnih elemenata uvjetima lokacije, iako ne definiraju odvojene kategorije kružnih raskrižja. Smjernice u SAD-u i Australiji jasno razlikuju urbana i izvanurbana rješenja, odražavajući pritom razlike u prometnim uvjetima i očekivanim razinama uslужnosti.

U Njemačkoj i Francuskoj postoje zasebne smjernice za projektiranje urbanih i izvanurbanih kružnih raskrižja, dok se u drugim državama razlika ogleda u načinu dimenzioniranja raskrižja, prvenstveno kroz vanjski polumjer i način vođenja pješaka i biciklista u zoni raskrižja.

Tablica 2.5. sintetizira usporedbu urbanih i izvanurbanih kružnih raskrižja prema važećim smjernicama, s posebnim naglaskom na razlike u preporučenim vrijednostima vanjskog polumjera. Prema svim analiziranim smjernicama, izvedba mini kružnih raskrižja ne preporučuje se ako postoje prostorni uvjeti za izvedbu standardnih kružnih raskrižja, dok se u izvanurbanim područjima izvedba mini kružnih raskrižja u pravilu izbjegava.

Tablica 2.5. Usporedba međunarodnih smjernica za urbana i izvanurbana kružna raskrižja

Država	Razlika	Urbana – mini; jednotračna; višetračna	Izvanurbana – jednotračna; višetračna
Hrvatska	Da	7–12,5 m; 11–17,5 m; nije uobičajeno	17,5–22,5 m; ≥25 m
Slovenija	Da	6,5–12 m; 11–20 m; 20–35 m	17,5–22,5 m; ≥35 m
Srbija	Da	7–12,5 m; 11–20 m; 20–35 m	17,5–22,5 m; ≥35 m
Njemačka	Da	6–11 m; 13–20 m; nije uobičajeno	18–25 m; ≥25 m
Francuska	Da	7,5–12 m; 10–18 m; nije uobičajeno	17–25 m; ≥25 m
Engleska	Ne	do 14 m; 13–20 m; 20–30 m; ≥50 m	
Nizozemska	Da	do 9 m; 10–18 m; 25–30 m	18–22 m; 25–30 m
Norveška	Ne	nije primjenjivo; 10–20 m; 20–30 m (rijetko)	

Država	Razlika	Urbana – mini; jednotračna; višetračna	Izvanurbana – jednotračna; višetračna
Češka	Ne	do 12 m; 12–18 m; ≥23 m	
SAD	Da	8–12 m; 12–20 m; 20–30 m	20–28 m; 25–35 m
Australija	Da	nije primjenjivo; 10–20 m; 20–30 m	15–25 m; 25–35 m

Urbana kružna raskrižja u pravilu imaju manji vanjski polumjer (12-20 m za jednotračna raskrižja), dok izvanurbana imaju veći (17-25 m ili više). Razlog tome, naveden u smjernicama, je potreba prihvata vozila koja prilaze većim brzinama; veći vanjski polumjer omogućava manju defleksiju i veću brzinu prolaska. Međutim, kako bi se očuvala prometna sigurnost, smjernice ograničavaju brzinu u kružnom raskrižju na 30-40 km/h.

Sve analizirane smjernice naglašavaju važnost kontrole ulaznih brzina i brzina unutar kružnog raskrižja, preporučujući maksimalnu ulaznu brzinu od 50 km/h. Kod izvanurbanih kružnih raskrižja, prilazne brzine dosežu 80 do 100 km/h, stoga se predviđa duža tranzicijska zona s izraženim mjerama smirivanja prometa, poput S-krivina i produljenih razdjelnih otoka na prilazima.

Pješački i biciklistički prijelazi obavezan su element urbanih, a rjeđe i kružnih raskrižja izvan urbanih područja.

Temeljna načela projektiranja, kao što su pravila prednosti i mjere smirivanja prometa dosljedna u svim uvjetima. Međutim, urbana kružna raskrižja dodatno naglašavaju kompaktnost i integraciju mjera za sigurnost pješaka i biciklista, dok izvanurbana raskrižja karakteriziraju veće dimenzije i specifične mjere prilagođene prometu većih brzina.

2.2.3. Kružna raskrižja na prometnom koridoru – usporedba analiziranih smjernica

Tehničke smjernice i regulative europskih i svjetskih država primarno se odnose na projektiranje izoliranih kružnih raskrižja, s naglaskom na njihove projektne i tehničke elemente te usporedbu s klasičnim raskrižjima reguliranim prometnim znakovima ili prometnom svjetlosnom signalizacijom. Iako većina smjernica adresira međutjecaj raskrižja unutar šire prometne mreže ili prometnog koridora, ti su navodi uglavnom opisnog i općenitog karaktera.

U nastavku su prikazane sličnosti i razlike međunarodne tehničke regulative u načinu vrednovanja kružnih raskrižja u nizu u odnosu na izolirana kružna raskrižja, uz osvrt na prednosti i nedostatke te međutjecaj kružnog i semaforiziranog raskrižja na prometnom koridoru.

Prometni koridor definira se kao „uzak pojas definiranih granica namijenjen kretanju prometala, obično povezujući značajnija čvorišta ili regije“ (Hrvatska enciklopedija,

2025). U zakonodavnom i regulativnom okviru Republike Hrvatske pojam prometnog koridora nije službeno definiran. Međutim, u stručnoj i prostorno-planskoj praksi prometni koridor najčešće se definira kao linijski prostor predviđen za infrastrukturne zahvate, poput izgradnje prometnica i prateće infrastrukture, što se određuje prostornim planovima.

U tehničkoj regulativi država Europe i svijeta, pojmovi poput „kružna raskrižja u nizu“ i „kružna raskrižja na prometnom koridoru“ nisu nedvosmisleno definirani. U praksi, izraz „kružna raskrižja u nizu“ (eng. *roundabouts in series*) koristi se za opisivanje uzastopnog slijeda kružnih raskrižja na istoj cesti. U američke smjernicama (TRB, 2023) taj izraz definiran je kao skup od najmanje tri kružna raskrižja koja međusobno ovisno funkcioniraju na istoj gradskoj prometnici.

U istim smjernicama navedeno je da prometni koridori s kružnim raskrižjima često uključuju i druge vrste regulacije, poput nesemaforiziranih i semaforiziranih raskrižja.

Većina smjernica kružna raskrižja u nizu smatra posebnim slučajevima koji zahtijevaju detaljnu analizu zbog mogućnosti narušavanja koordinacije prometnog toka (tzv. „zeleni val“). Kružna raskrižja, za razliku od semaforiziranih, djeluju kao neovisni dijelovi prometne mreže, što može negativno utjecati na kontinuitet prometnih tokova, posebno glavnog – jače opterećenog smjera. Ovaj aspekt posebno je istaknut u hrvatskim (Hrvatske ceste, 2014), slovenskim (Ministarstvo za infrastrukturu, 2023), srpskim (Putovi Srbije, 2012), francuskim (CEREMA, 2010) i njemačkim smjernicama (FGSV, 2006).

Američke smjernice posvećuju detaljnu pozornost interakciji kružnih raskrižja u nizu i naglašavaju potrebu primjene mikrosimulacija u njihovoj analizi unutar prometne mreže, navodeći u poglavlju 6.9. *Closely Spaced Roundabouts* da je, ukoliko razmak između središta dvaju kružnih raskrižja iznosi manje od 300 metara, potrebno izvesti dvostruko kružno raskrižje (eng. *double roundabout*). U Smjernicama se navodi da dvostruka kružna raskrižja mogu smanjiti duljine kolona vozila, omogućiti bolju ravnotežu prometnih tokova te unaprijediti sigurnost i pristupačnost okolnim objektima smanjenjem brzina vozila u glavnom smjeru. Pritom je važno procijeniti očekivane duljine kolona na privozima kako bi se osigurao dovoljan prostor za čekanje vozila između raskrižja. Slično navode norveške i engleske smjernice – dvostruko kružno raskrižje preporučuje se ako je udaljenost između središta kružnih raskrižja manja od 100 m, uz minimalni dopušteni razmak od 40 m.

Njemačke smjernice dodatno upozoravaju na potencijalne probleme kod primjene kružnih raskrižja u nizu, ističući rizik od gubitka jasne percepcije hijerarhije cesta od strane vozača, zbog čega preporučuju izbjegavanje takvih projektnih rješenja.

Većina smjernica preporučuje da se na istom prometnom koridoru ne kombiniraju različiti tipovi raskrižja, posebice ne kružna i semaforizirana raskrižja. Ovakva

kombinacija smatra se izrazito nepovoljnom zbog neujednačenosti režima vožnje te značajnih poteškoća u usklađivanju prometnih tokova. Njemačke i britanske smjernice izričito naglašavaju kako je navedenu kombinaciju potrebno izbjegavati jer može dovesti do smanjenja protočnosti i povećanja prometnih zastoja.

Američke i australske smjernice nude konkretne preporuke za slučajeve kada je kombinacija kružnih i semaforiziranih raskrižja neizbježna. U takvim situacijama preporučuje se podjela koridora na zasebne podsustave, pri čemu svako semaforizirano raskrižje funkcionira s neovisnim ciklusima ili se primjenjuje djelomična semaforizacija kružnog raskrižja.

Većina smjernica ne definira eksplicitno koji je minimalni razmak između kružnih raskrižja, već se oslanja na opće kriterije poput preglednosti, potrebnog zaustavnog puta i sprječavanja stvaranja dugih kolona vozila. Hrvatske smjernice ne navode specifične minimalne razmake između kružnih raskrižja i drugih tipova raskrižja, već se preporuča detaljna analiza šire prometne mreže i uloge koju pojedina raskrižja imaju unutar prometnog koridora. Slovenske smjernice također nemaju brojčano propisane minimalne razmake u urbanim sredinama, ali jasno preporučuju da se izbjegne preblizak raspored raskrižja kako bi se očuvala preglednost i prometna funkcionalnost.

Minimalni razmaci između raskrižja u pravilu su brojčano definirani samo za standardne tipove raskrižja u izvanurbanim uvjetima, dok se za urbana područja smjernice uglavnom zadržavaju na načelnim preporukama bez eksplicitno navedenih vrijednosti.

Detaljniju analizu odnosa udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja pružaju američke smjernice. One posebno ističu da nije preporučljivo smjestiti kružno raskrižje u neposrednoj blizini postojećeg semaforiziranog raskrižja. U slučajevima kada se ipak razmatra takva lokacija, potrebno je detaljno procijeniti prometne uvjete na cijelom koridoru te opravdanost integriranja kružnog raskrižja unutar koordiniranog semaforiziranog sustava. U određenim situacijama, zamjena semaforiziranog raskrižja kružnim može se provesti podjelom koridora na dva segmenta, što potencijalno može povećati ukupnu prometnu učinkovitost oba dijela, ali i cijelog segmenta. Za takve specifične uvjete preporučuje se detaljna prometna analiza, uz primjenu prometnih mikrosimulacijskih modela kada je udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja manja od 150 m.

U tablici 2.6. sažeti su međunarodni pristupi problemu interakcije kružnih (KR) i semaforiziranih raskrižja na prometnom koridoru i definiranim minimalnim udaljenostima između raskrižja.

Tablica 2.6. Kružna raskrižja na koridoru – usporedna analiza međunarodne tehničke regulative

Država	Minimalna udaljenost do susjednog raskrižja	Interakcija KR i semaforiziranog raskrižja
HR	Nije propisano za KR.	Potrebno je provesti analizu položaja raskrižja u široj prometnoj mreži i položaj raskrižja u nizu (koridoru) ulice.
SI	Nije propisano za KR. Preporučuje se da KR ne budu preblizu, kako bi se očuvali preglednost i funkcionalnost. Najmanja dopuštena udaljenost između dvaju priključaka izvan naselja mora biti veća od dvostruke zaustavne udaljenosti za tu kategoriju ceste i brzinu	Potrebno je provesti analizu položaja raskrižja u široj prometnoj mreži i položaj raskrižja u nizu (koridoru) ulice.
RS	Nije propisano za KR. Minimalni razmak između raskrižja (na temelju računske brzine): 50km/h-150 m; 60km/h-180 m, 70km/h – 210 m, 80km/h-240 m	Nije navedeno.
DEU	Nije propisano za KR. U urbanim područjima potrebno je osigurati dovoljnu udaljenost između raskrižja za siguran razmak zaustavljanja i duljine kolone vozila. U slučaju dvaju vrlo bliskih raskrižja predlaže se . dvostruko KR ili jedno veliko KR.	U semaforiziranim koridorima, uvođenje KR negativno utječe na “zeleni val” te se takva kombinacija u pravilu izbjegava. Preporuka je ne koristiti više tipova raskrižja na jednom koridoru.
FRA	Nije propisano za KR i urbane uvjete. Raskrižja izvan naselja na temelju v85: 60-70km/h-600 m; 80-90km/h-900 m; 100-110km/h-1200 m	Nije navedeno. Francuska ima vrlo veliki broj KR koji zamjenjuje klasična raskrižja. Smjernice ističu da su KR standardno raskrižja i ne potiču upotrebu semaforiziranih raskrižja.
UK	U slučaju razmaka dva KR manjem od 100 m, preporuka je izvođenje dvostrukog KR ili velika KR. Minimalna udaljenost dvostrukog KR je 40 m.	Kružno raskrižje onemogućava formiranje kolona, čime se narušava sinkronizacija „zelenog vala“. Ako se semaforiziranog raskrižje nalazi neposredno u blizini KR, postoji rizik da kolona vozila zaustavljenih na semaforu zaustavi prometni tok u KR. Preporuka je ne koristiti više tipova raskrižja na jednom koridoru
NDL	Nije propisano za KR.	Smjernice spominju utjecaj susjednih raskrižja u kontekstu protočnosti: KR semaforiziranom koridoru onemogućava grupiranja vozila. Ne preporuča se kombinacija ove dvije vrste raskrižja u neposrednoj blizini.

Država	Minimalna udaljenost do susjednog raskrižja	Interakcija KR i semaforiziranog raskrižja
NOR	U slučaju razmaka dva KR manjem od 100 m, preporuka je izvođenje dvostrukog KR ili velika KR. Minimalna udaljenost dvostrukog KR je 40 m.	Nije navedeno.
CZS	Nije propisano za KR. Minimalni razmak raskrižja za urbane uvjete: 150 m (iznimno 70 m).	Nije navedeno.
SAD	Pri međusobnoj udaljenosti dvaju raskrižja manjoj od 500 stopa (152,4 metra) preporučuje provesti mikrosimulacijske analize radi optimizacije prometnog rješenja. U slučaju razmaka dva KR manjem od 50 m, preporuka je izvođenje jednog izduženog KR	Detaljno je analiziran međutjecaj različitih vrsta raskrižja u prometnoj mreži, osobito interakcija KR i semaforiziranog raskrižja. Vozila koja se izlaze iz semaforiziranih raskrižja stvaraju kolone, koje mogu negativno utjecati na učinkovitost kružnog raskrižja ako nailaze na privoz u kratkim intervalima. Preporučene strategije: podjela koridora na podsustave ili djelomična semaforizacija KR
AUS	Nije propisano za KR.	Prepoznat je utjecaj neuravnoteženog prometnog toka po privozima i negativni utjecaj semaforiziranog raskrižja na KR. Razvijena je praksa <i>metering</i> semafora na ulazima KR kako bi se povremeno zaustavio dominantni tok.

2.3. Rezime – Pregled tehničke regulative za planiranje i projektiranje kružnih raskrižja

Pregled međunarodnih tehničkih regulativa i smjernica za projektiranje kružnih raskrižja ukazuje na izrazitu raznolikost pristupa, od razine razrađenosti dokumentacije do kriterija primjene i odabira projektnih elemenata. Unatoč razlikama, jasno se uočavaju zajednički principi vođenja prometa i projektiranja kružnih raskrižja.

Iako većina međunarodne regulative detaljno obrađuje izolirana kružna raskrižja, uočava se da nedostaju standardi ili smjernice vezane za prihvatljivu minimalnu udaljenosti kružnih i semaforiziranih raskrižja u određenim prometnim i prostornim uvjetima.

Neke od razrađenijih smjernica, poput američkih, britanskih i norveških, prepoznaju važnost ovog problema, nudeći opće preporuke i smjernice za projektiranje dvostrukih kružnih raskrižja te integraciju kružnih raskrižja u postojeće koridore. Posebno se ističe potreba provođenja detaljne analize prometnih tokova i korištenja prometnih mikrosimulacijskih alata u cilju procjene utjecaja udaljenosti susjednih raskrižja na kapacitet, protočnost i sigurnost prometnog sustava.

Uočeni nedostatak specifičnih tehničkih kriterija za definiranje optimalne udaljenosti između kružnih raskrižja otvara prostor za detaljnije istraživanje ovoga problema, što je primarni fokus doktorskog rada.

3. PREGLED POSTOJEĆIH ISTRAŽIVANJA

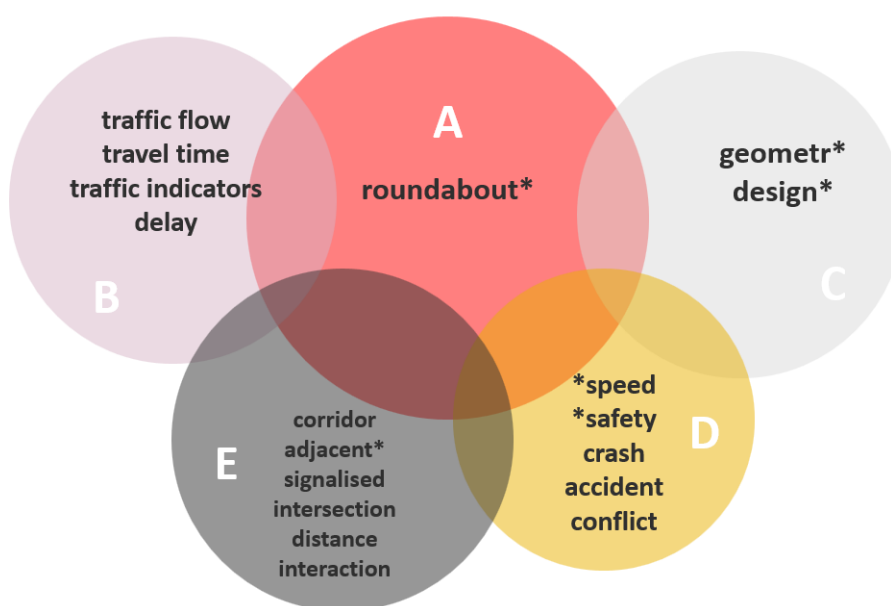
U ovom poglavlju prezentiran je pregled dostupnih znanstvenih istraživanja vezanih uz kružna raskrižja, s posebnim naglaskom na kapacitet, pokazatelje prometnog toka, projektne elemente i prometnu sigurnost. Kroz bibliometrijsku analizu znanstvene literature za razdoblje od 2000. do 2024. godine identificirani su glavni trendovi i razvojni smjerovi istraživanja.

Također se razmatra uloga kružnih raskrižja unutar cestovnih koridora te njihova interakcija sa semaforiziranim raskrižjima. Na kraju dan je pregled postojećih istraživanja vezanih za aspekt prometne sigurnosti kružnih raskrižja, s osvrtom na učestalost i vrstu prometnih nesreća te utjecaj projektnih rješenja na poboljšanje prometne sigurnosti.

3.1. Bibliometrijska analiza

U okviru ovoga istraživanja provedena je bibliometrijska analiza primjenom softverskog alata VOSviewer (VOSviewer, 2025). VOSviewer (Visualisation of Similarities) alat je otvorenog pristupa namijenjen za izradu, vizualizaciju i istraživanje bibliometrijskih karata temeljenih na analizi znanstvenih radova. Analizom su obuhvaćene sve vrste znanstvenih publikacija: izvorni znanstveni radovi, pregledni radovi, konferencijski radovi i knjige, objavljene u razdoblju od siječnja 2000. do prosinca 2024. godine. VOSviewer povezuje podatke u sustav karata temeljenih na udaljenostima, gdje udaljenost između pojedinih elemenata odražava intenzitet njihove međusobne povezanosti. Svi elementi u mreži dodijeljeni su pojedinim klasterima, pri čemu svaki element može pripadati isključivo jednom klasteru. Bitan preduvjet za kvalitetnu bibliometrijsku analizu predstavlja jasno i precizno definiranje upita za pretraživanje, što je u ovom istraživanju provedeno detaljnom specifikacijom područja interesa, vremenskog razdoblja te vrste publikacija koje su analizirane.

Slika 3.1. prikazuje proces definiranja istraživačkog upita temeljen na međusobnom presjeku pet tematskih područja, čime se sužava fokus istraživanja. Područje A odnosi se na vrstu raskrižja, tj. kružna raskrižja. Područje B obuhvaća pokazatelje prometnog toka, dok je područje C usmjereno na geometrijske značajke i projektiranje kružnih raskrižja. Nadalje, područje D usmjereno je na sigurnost prometa, uključujući brzinu, prometne konflikte i broj prometnih nesreća. Područje E analizira međusoban utjecaj kružnih i semaforiziranih raskrižja. Za potrebe ovog pregleda uzeti su u obzir publikacije na hrvatskom i engleskom jeziku.



Slika 3.1. Vennov dijagram za definiranje upita

U matematičkom obliku ova se tvrdnja iskazuje jednadžbama (1)–(6):

$$TS = TSA \cap ((TSB \cap TSE) \cup (TSC \cap TSD)) \quad (1)$$

$$TSA = (\text{roundabout}^*) \quad (2)$$

$$TSB = (\text{traffic flow OR travel time OR traffic indicators OR delay}) \quad (3)$$

$$TSC = (\text{geometr}^* \text{ OR design}^*) \quad (4)$$

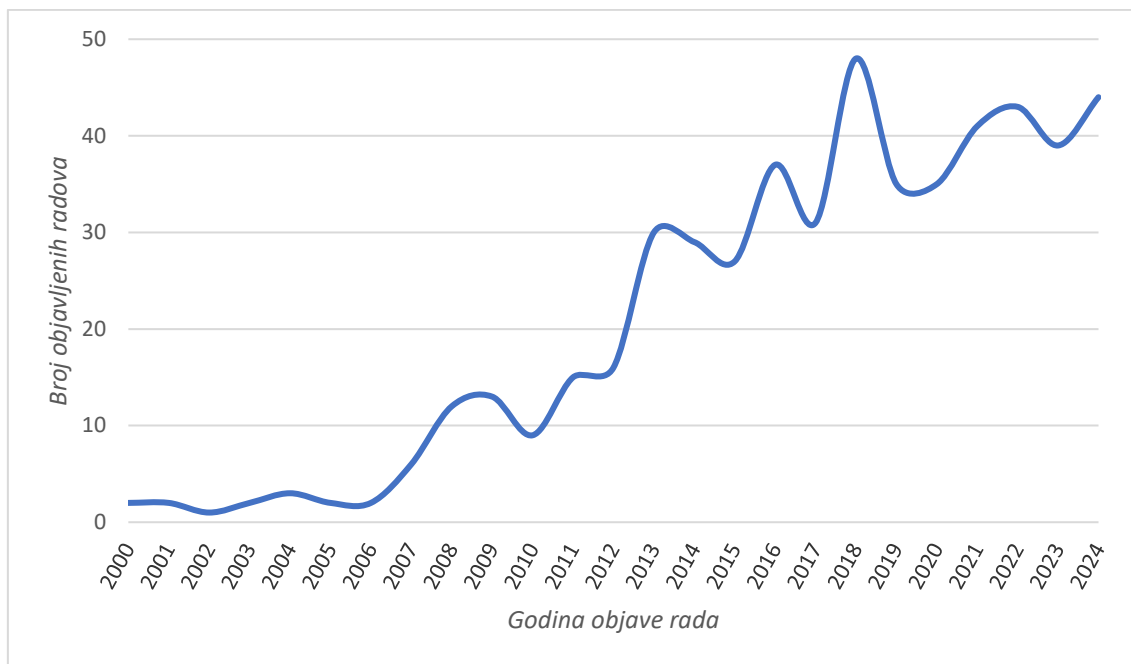
$$TSD = (*\text{speed OR } *\text{safety OR crash OR accident OR conflict}) \quad (5)$$

$$TSE = (\text{corridor OR adjacent}^* \text{ OR signalized intersection OR distance OR interaction}) \quad (6)$$

Za potrebe ovog istraživanja analizirane su dvije najveće i najpoznatije svjetske baze podataka – Scopus i Web of Science. Obje su poznate po širokom obuhvatu različitih istraživačkih područja i visokokvalitetnim radovima, što ih čini relevantnim izvorima za bibliometrijsku analizu (Pranckutė, 2021; Roy-Hubara i sur., 2019). Obje baze, nude više podbaza za multidisciplinarna istraživanja i omogućuju dubinsko pretraživanje specifičnih akademskih polja.

Nakon prve, grublje pretrage rezultata, preklopljena su odabrana područja. U bazi Scopus pronađeno je 480 publikacija, dok ih je u bazi Web of Science bilo 512. Analiza podataka ukazala je na potrebu preliminarnog čišćenja baze podataka. Kako bi se istraživanje usmjerilo na ciljanu temu, isključene su kategorije koje nisu bile relevantne, poput medicine, biologije, ekonomije, psihologije i dr. Budući da dvije baze sadržavaju velik broj publikacija, očekivano je da će se određeni radovi ponavljati. Za pojednostavljenje i ubrzanje procesa spajanja baza korišten je *open-source* program Zotero, koji pomaže u upravljanju bibliografskim podacima. Nakon što je izbrisano 32 duplicirana rada, preostalo je 530 znanstvenih radova spremnih za daljnju analizu.

Slika 3.2. prikazuje trend objave znanstvenih radova u Scopusu i WoS-u na odabranu temu. U početku je interes za ovo područje bio vrlo malen pa je tako u prvih pet godina objavljeno svega šest radova. Međutim, 2008. godine zabilježen je porast na 12 radova, a od tada se broj publikacija kontinuirano povećava. Iz slike 2.2. vidljiv je godišnji rast publikacija o optimizaciji projektiranja kružnih raskrižja iz aspekta pokazatelja prometnog toka i prometne sigurnosti, s prosječnim godišnjim porastom od 20%.



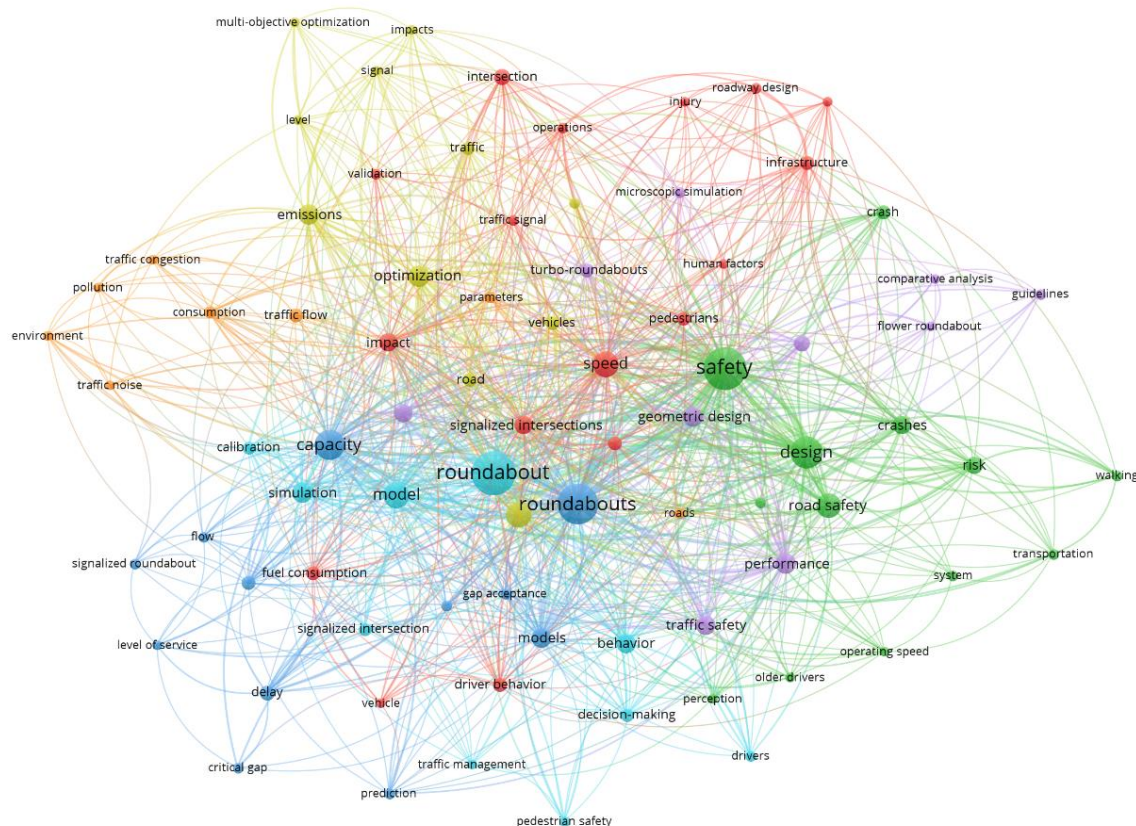
Slika 3.2. Trend objavljivanja radova po godini

Analiza se oslanja na raznoliku bazu od 66 konferencija, 113 časopisa i 6 knjiga. U tablici 3.1. istaknuto je pet časopisa s najvećim brojem znanstvenih radova koji se bave ovom temom. Dva navedena časopisa pripadaju Q1 kvartilu u svojim kategorijama, dok su preostala tri svrstana u Q2.

Tablica 3.1. Statistika časopisa

Časopis	Broj publikacija	Kvartil	h-Index	Impact Factor	Cite Score	SJR
Transportation Research Record	29	Q2	119	2,4	4,6	0,48
Accident Analysis and Prevention	12	Q1	175	5,6	9,5	1,64
Sustainability	6	Q2	125	3,9	5,0	0,66
Journal of Advanced Transportation	3	Q2	45	3,0	4,5	0,72
Transportation Research Part D – Transport and Environment	5	Q1	130	6,1	10,5	1,9

Podaci su u VOSviewer uvezeni u .ris formatu. Dobivena mrežna vizualizacija (Slika 3.3.) obuhvaća 69 čvorova razvrstanih u šest klastera, pri čemu je vidljiva snažna međusobna povezanost klastera, s ukupnim koeficijentom povezanosti (engl. *total link strength*) od 1314.



Slika 3.3. Mrežna vizualizacija ključnih riječi – klasteri (VOSviewer)

Svakoj ključnoj riječi moguće je pridružiti više atributa, uključujući „težinu“ kao nenegativnu mjeru njezine važnosti. Ključne riječi veće „težine“ u vizualizaciji su izraženije prikazane. U tablici 3.2. istaknuto je deset najčešće korištenih i ujedno najjačih ključnih riječi unutar ovoga istraživačkog područja.

Tablica 3.2. Popis ključnih riječi s najvećom "težinom"

Ključne riječi	Ponavljanja	Snaga poveznice	Prosječna godina objavljivanja
Roundabout / Roundabouts	200	454	2017
Safety	150	2250	2017
Design	82	102	2016
Simulation / Microsimulation	67	162	2019
Model	56	205	2018
Capacity	47	147	2018
Speed	39	133	2017
Signalized intersection	33	79	2018
Optimization	29	103	2014
VISSIM	10	41	2020

Analiza upućuje na to da se većina ranijih istraživanja o kružnim raskrižjima primarno usmjeravala na sigurnost prometa, kapacitet raskrižja i osnovne projektne elemente. U posljednjih je pet godina fokus istraživanja na modeliranju kružnih raskrižja, uključujući

3.2. Prometno funkcioniranje kružnih raskrižja

Unatoč činjenici da kružna raskrižja nisu novitet u teoriji i praksi prometnog planiranja i projektiranja, značajan dio dostupne literature fokusira se na kružna raskrižja kao izolirane (samostalne) dijelove prometne mreže zanemarujući interakciju s drugim – susjednim raskrižja. U nastavku je dan pregled metoda koje se koriste za prometnu analizu kružnih raskrižja te parametara koji utječu na prometni tok i prometnu sigurnost na ovoj vrsti raskrižja kada funkcioniraju izolirano.

Temeljni operativni princip modernih kružnog raskrižja jest propuštanje vozila pri ulasku, prema kojem vozila koja prilaze moraju propustiti vozila koja se već kreću kružnim kolnikom. Istraživanja pokazuju da u opisanim uvjetima prometni tok na kružnim raskrižjima u bitnome ovisi o složenom međuodnosu geometrijskih elemenata i obrasca ponašanja vozača (Akcelik, 2004; Fotini, 2022; Tollazzi, 2009).

Propusna moć kružnog raskrižja (kapacitet) definira se kao najveći broj vozila koja mogu proći u jedinici vremena kroz promatranim privoz pod određenim projektnim i prometnim uvjetima. Uobičajeno se izražava kao broj vozila u satu (Hrvatske ceste, 2014). pristupi za procjenu kapaciteta ulaza u kružno raskrižje uobičajeno se dijele u tri glavne skupine:

1. Empirijski pristupi koji rezultiraju regresijskim modelima utemeljenima na varijablama vezanima uz geometriju kružnog raskrižja i prometnim parametrima
2. Analitičke metode teorije vremenskih praznina (eng. *gap acceptance* modeli) koja se temelji na parametrima ponašanja vozača
3. Mikrosimulacijski modeli

U praksi se često koristi kombinacija ovih pristupa – empirijski podaci služe za kalibraciju analitičkih modela, dok se simulacije koriste za provjeru i analizu složenijih situacija.

Najraniji modeli kapaciteta kružnih raskrižja bili su uglavnom empirijski, razvijeni regresijskom analizom prometnog toka dobivenog terenskim istraživanjima. Primjer takvog pristupa je klasični britanski model kapaciteta koji je razvio Kimber (1980) na temelju stotina sati promatranja kružnih raskrižja u Ujedinjenom Kraljevstvu. Kimberov model izražava kapacitet kao funkciju projektnih parametara (poput efektivne širine ulaza i duljina proširenja ulaza (eng. *flare*) te ukupnog kružnog toka. Kružni tok odnosi se na vozila koja prometuju unutar kružnog raskrižja, a kojima vozila na privozima moraju ustupiti prednost. Slični empirijski modeli razvijeni su i u drugim državama, primjerice Francuskoj i Australiji, često dajući formulu oblika:

$$C = a + b \cdot e^{-c \cdot Q_c} \quad (7)$$

gdje je C kapacitet ulaza (voz/h), Q_c konfliktni tok vozila (voz/h), a, b, c empirijski utvrđeni koeficijenti koji ovise o geometriji ulaza.

Takvi modeli imaju prednost što direktno uvažavaju stvarno ponašanje vozača i geometriju kružnog raskrižja temeljeno na lokalnim uvjetima iz skupa podataka iz kojeg su dobiveni. Međutim, njihov nedostatak je ograničena primjenjivost – model kalibriran na jednoj populaciji vozača i skupu raskrižja ne mora biti točan za druge uvjete (npr. britanski model nije odmah primjenjiv u SAD-u bez prilagodbe). Unatoč tome, empirijski pristupi pružaju vrijedne makroskopske procjene i često se koriste u fazi planiranja, kada detaljni podaci još nisu dostupni.

Analitičke metode teorije vremenskih praznina nastoje modelirati proces ulaska vozila u kružno raskrižje kao stohastički proces, gdje su ključni parametri kritični razmak (eng. *critical headway*) i međuslijedni razmak (eng. *follow-up headway*). Ovi modeli polaze od činjenice da vozilo na prilazu „vidi“ dolazeće razmake između vozila u kružnom toku te ih prihvaća ili odbija ovisno o njihovom trajanju (Giuffre, 2016). Ako pretpostavimo da su kritični razmak (t_c) i međuslijedni razmak (t_f) poznati za dane uvjete (vozače), tada se kapacitet može izvesti analitički.

U najjednostavnijem slučaju jednotračnog kružnog raskrižja, formula kapaciteta ulaza glasi (Giuffre, 2016; Wonho i sur., 2018):

$$C = \frac{3600}{t_f} \cdot \left(1 - e^{-\frac{Q_c \cdot t_c}{3600}}\right) \quad (8)$$

gdje je Q_c kružni tok vozila (voz/h), a eksponencijalni član predstavlja vjerojatnost da će se pojaviti dovoljno veliki razmak za prvo vozilo; t_c kritični razmak, t_f međuslijedni razmak.

Izraz (8) proizlazi iz Poissonove pretpostavke dolaska vozila u kružno raskrižje i definicije kritičnog razmaka.

Analitički pristupi su ugrađeni u mnoge tehničke regulative. Američki HCM (*Highway Capacity Manual*, 2010 i 2016) koristi model razvijen na teoriji vremenskih praznina gdje je preporučeni kritični razmak 4,1 - 4,6 sekundi i međuslijedni razmak 2,6 - 3,1 sekunde za jednotračna kružna raskrižja, temeljenih na opsežnim terenskim istraživanjima. Ako lokalni uvjeti odstupaju, HCM dopušta prilagodbu tih parametara. Primjerice, Xu and Tian (2008) u studiji slučaja u Kaliforniji utvrdili su kritični razmak od 4,8 sekundi za jednotračna kružna raskrižja te 4,4 - 4,7 sekundi za dvotračna kružna raskrižja. Čimbenici koji utječu na ove parametre uključuju kružni tok vozila, brzinu, razinu upoznatosti vozača s lokacijom i specifične obrasce lokalnog ponašanja vozača (Xu&Tian, 2008; Hainen et. al., 2013).

Njemački teoretski model (Wu, 1997) koristi lokalno utvrđene kritične i međuslijedne razmake za izračun kapaciteta, a ugrađen je u njemačke smjernice 2015. godine. Prednost analitičkih modela je što pružaju uvid u utjecaj pojedinih parametara i što su univerzalni uz odgovarajuću kalibraciju. Ipak, pretpostavke poput eksponencijalne

distribucije razmaka ili konstantnih vrijednosti razmaka su pojednostavljene u odnosu na stvarno stanje.

U praksi su vremenski razmaci promjenjivi i ovise o mnogim faktorima (Tian i sur., 2000; Kyte i sur., 1996) te analitički modeli često trebaju kalibraciju ili korekciju da bi odgovarali stvarnim kapacitetima. Unatoč tome, oni čine temelj za razumijevanje i uključeni su u mnoge programske alate. Primjerice, u *NCHRP Report 573* (Rodegerdts i sur., 2007) kalibriran je analitički model za lokalne uvjete i ugrađen je u smjernice.

Mikrosimulacijski pristup podrazumijeva da se svako vozilo ili drugi sudionik u prometu modelira kao zasebni entitet te da se detaljno simuliraju njihove međusobne interakcije unutar prometne mreže. (Washington State DOT, 2014).

Prometne mikrosimulacije sve se češće koriste za procjenu kapaciteta kružnih raskrižja. Raju i Farah (2021) analizirali su više od 13000 znanstvenih radova objavljenih u razdoblju od 2001. do 2020. godine, pri čemu su utvrdili stalni rast interesa za mikrosimulacijske modele u prometnim istraživanjima, koji su dosegli broj od 376 radova godišnje. Najčešće korišten mikrosimulacijski alat prema broju publikacija je PTV VISSIM (523 rada), značajno nadmašujući ostale alate poput CORSIM-a (103 rada), Paramicsa (93 rada), SUMO-a (69 radova) i Aimsuna (58 radova). Primijećeni su i jasni trendovi: u prvom desetljeću analiziranog razdoblja (2000.–2010.) dominirali su stariji alati kao što su CORSIM i PARAMICS, dok je u posljednjem desetljeću vodeći alat postao VISSIM, koji je 2020. imao najveći udio publikacija u odnosu na konkurentske platforme. Mikrosimulacijski modeli podrazumijevaju detaljno modeliranje kretanja svakog pojedinog vozila kroz raskrižje u vrlo kratkim vremenskim koracima, uz implementaciju pravila vožnje (model slijeda vozila, model promjene traka) i pravila ulaska u kružno raskrižje (prema teoriji vremenskih praznina). Za kružna raskrižja, mikrosimulacijski alati (poput softvera VISSIM, Aimsun, Paramics itd.) omogućuju simuliranje složenih scenarija koji mogu uključivati više prometnih traka, pješačke prijelaze, različite tipove vozila i varijabilno ponašanje vozača. Prednost ovog pristupa je što može obuhvatiti situacije koje su izvan dosega analitičkih formula – primjerice, interakcije na dvotračnim kružnim raskrižjima gdje vozila paralelno ulaze, utjecaj distribuiranog prometnog toka, različitu strukturu prometa, utjecaj pješačkog prometa i ostalih ranjivih skupina i sl. (Raju i Farah, 2021).

U studiji provedenoj u New Delhiju (Arroju i sur., 2015) uspoređivani su različiti modeli za procjenu kapaciteta kružnih raskrižja, uključujući američki HCM, britanski TRL, indijski IRC, njemački model te prometne mikrosimulacije u VISSIM-u, pri čemu su rezultati uspoređeni s podacima prikupljenima terenskim mjerenjima. Najveću razinu pouzdanosti pokazao je mikrosimulacijski pristup u VISSIM-u, dok je među analitičkim modelima najbolju usklađenost s terenskim podacima ostvario njemački model.

Chen i Lee (2016) analizirali su dva dvotračna kružna raskrižja u SAD-u s izraženim prometnim opterećenjem u vršnim satima. Kapacitet je prvo određen terenskim

mjerenjima pomoću video-kamera, a zatim su primijenjena tri softverska alata — RODEL, SIDRA i VISSIM — čiji su rezultati uspoređeni s terenski utvrđenim vrijednostima. Analiza je pokazala da, nakon provedene kalibracije, rezultati VISSIM-a dobro odgovaraju stvarno izmjerenom kapacitetu.

Ali i Majid (2023) proveli su opsežnu usporednu analizu različitih modela procjene kapaciteta kružnih raskrižja, obuhvaćajući empirijske, analitičke i simulacijske pristupe. U analizu su uključeni modeli RODEL, SIDRA, švicarska formula, HCM metoda, VISSIM i SimTraffic. Istraživanje obuhvaća jednotračna i višetračna kružna raskrižja s različitim geometrijskim karakteristikama i prometnim opterećenjima. Rezultati pokazuju da pojedini modeli daju različite procjene kapaciteta: modeli temeljeni na teoriji prihvatanja praznina često daju niže vrijednosti, dok empirijski i mikrosimulacijski pristupi rezultiraju višim procjenama. Zaključeno je da VISSIM pruža pouzdane rezultate za jednotračna kružna raskrižja, dok je za dvotračna nužna kalibracija kako bi se osigurala pouzdanost predviđanja.

Mikrosimulacije su također pokazuju primjenjivim za ispitivanje *što-ako* scenarija, primjerice za analizu efikasnosti različitih projektnih ili prometnih rješenja. Brojne studije koristile su mikrosimulacije za procjenu inovativnih oblika kružnih raskrižja i usporedbu kružnih raskrižja sa standardnim raskrižjima (Tollazzi i sur., 2020; Giuffre i sur., 2017; Astarita i sur., 2014; Zhou i sur., 2022; Ištoka Otković i Dadić, 2009). Primjer je usporedba turbo kružnih raskrižja s klasičnim dvotračnim kružnim raskrižjem, gdje se simulacijama dobivaju njihovi fundamentalni dijagrami toka i razina uslužnosti (Al-Masaeid, 1999). Bared i Edara (2005) istražili su kapacitet jednotračnih i dvotračnih kružnih raskrižja uspoređujući rezultate mikrosimulacija (VISSIM) s empirijskim i analitičkim modelima. Zaključili su da rezultati mikrosimulacija pokazuju nešto niže vrijednosti, ali bliže stvarnim terenskim mjerenjima iz SAD-a. Mikrosimulacijske metode dopunjuju analitičke i empirijske: one mogu reproducirati empirijska zapažanja i pomoći u ekstrapolaciji izvan postojećih podataka.

Softverski alati za mikrosimulaciju, poput PTV VISSIM-a, Aimsun Next-a i S-Paramics-a, široko se primjenjuju diljem svijeta za simulaciju prometnih tokova. Zajedničko svim programskim alatima je potreba za kalibracijom ugrađenih modela ponašanja vozača kako bi simulacijski rezultati odgovarali stvarnim prometnim uvjetima. Međutim, pristupi kalibraciji razlikuju se zbog različitih koncepata i modela vožnje koje koriste navedeni alati. PTV VISSIM temelji se na psihofizičkom modelu vožnje poznatom kao Wiedemannov model, koji simulira interakciju vozila kroz percepcijske pragove vozača. Aimsun Next koristi Gippsov model kočenja zajedno s nizom specifičnih parametara koji definiraju reakcije vozača. S-Paramics primjenjuje ponešto drugačiji pristup s ograničenim skupom globalnih parametara vožnje, što pojednostavljuje kalibraciju, ali može smanjiti fleksibilnost prilagodbe različitim prometnim scenarijima (Cvitanić & Breški, 2012). Bez obzira na razlike u pristupima kalibraciji, osnovni cilj svih navedenih

alata ostaje isti – postizanje što veće razine sukladnosti simulacijskih modela s empirijskim prometnim podacima. Stoga je za kvalitetnu kalibraciju nužno primijeniti odgovarajuće metode, uvažavajući specifičnosti svakog pojedinog programskog softvera.

Provjera kapaciteta kružnih raskrižja provodi se primjenom empirijskih pristupa, analitičkih modela teorije vremenskih praznina te mikrosimulacijskih modela. Prometne mikrosimulacije imaju izrazitu prednost zbog svoje sposobnosti detaljnog modeliranja prometnih procesa na razini pojedinačnog vozila, što omogućuje istraživanje kompleksnih situacija poput interakcija na višetračnim raskrižjima, utjecaja pješackog prometa ili specifičnih ponašanja vozača. Posebno je značajna mogućnost simuliranja različitih scenarija („što-ako“ analiza), poput promjene geometrije raskrižja ili implementacije novih prometno-tehnoloških rješenja. Iterativnim pokretanjem simulacija generiraju se statistički pouzdane procjene kapaciteta, vremena čekanja i drugih parametara prometnog toka, uz mogućnost precizne kalibracije modela na lokalne uvjete.

3.2.1. Utjecajni parametri

Prema literaturi i praksi na prometni tok i kvalitetu odvijanja prometa na kružnom raskrižju utječe niz faktora: intenzitet prometnih tokova, projektni elementi raskrižja, ponašanje vozača, struktura prometnog toka, distribucija prometa, prisustvo nemotoriziranih sudionika u prometu te vanjski čimbenici kao što su primjerice vremenski uvjeti.

U nastavku je dan pregled dostupnih istraživanja vezanih za utjecaj projektnih elemenata raskrižja, prometnih uvjeta (prometnog opterećenja, strukture i distribucije prometa) te ponašanja vozača na prometnu funkcionalnost kružnih raskrižja.

3.2.1.1. Projektni elementi

Budući da je jedini element na koji projektanti mogu izravno utjecati geometrija raskrižja, brojna istraživanja posljednjih desetljeća usmjerila su se na detaljno ispitivanje utjecaja odabranih projektnih elemenata kružnih raskrižja na prometnu funkcionalnost i sigurnost kružnih raskrižja. Istraživanja Ahmada i Rastogija (2016), Zacharie (2019) te Al-Masaeida i Faddaha (1997) pokazuju da povećanje širine ulaza i povećanje broja traka značajno povećavaju kapacitet raskrižja. Prema Kimberu (1980), dodavanje druge prometne trake može udvostručiti kapacitet u odnosu na jednotračni ulaz, dok Zacharia (2019) navodi da postupno proširenje ulaza omogućuje znatno veću protočnost uz uvjet proširenja i samog kružnog kolnika. Empirijski podaci pokazuju da dodatna ulazna prometna traka kod jednotračnog kružnog raskrižja može povećati kapacitet ulaza za 25%, osobito u uvjetima velikog prometnog opterećenja (Lindenmann, 2006).

Polumjer središnjeg otoka i vanjski polumjer kružnog raskrižja također igraju značajnu ulogu. Veći vanjski polumjer, prema istraživanjima Al-Masaeida i Faddaha (1997), Ahmada i Rastogija (2016) te Polusa i Shmuelija (2011), omogućuju bolje razdvajanje prometnih tokova, što dovodi do nižih brzina kruženja i povećanja vremenskih praznina koje vozači koriste za ulazak u kružni tok. Međutim, Kimber (1980) upozorava da preveliki vanjski promjeri mogu zbuniti vozače te povećati duljinu kružnog toka, što negativno utječe na ukupne performanse. Almukdada i sur. (2021), analizirajući terenske podatke s jednotračnih kružnih raskrižja u Dohi (Katar), utvrdili su nelinearan odnos između vanjskog polumjera i kapaciteta kružnog toka. Njihovi rezultati pokazuju da povećanje vanjskog polumjera općenito dovodi do većih ulaznih kapaciteta, osobito kod manjeg prometnog opterećenja u kružnom kolniku. Međutim, kod velikog prometnog opterećenja dolazi do obratnog trenda, što upućuje na složen međuodnos vanjskog polumjera i kapaciteta. Slično tome, Vaiana i sur. (2013) proveli su analize koristeći mikrosimulacijski model VISSIM za jednotračna kružna raskrižja u Italiji te su uočili da veći vanjski polumjeri mogu prouzročiti veća kašnjenja zbog povećanih brzina vozila na kolniku kružnog toka, čime se pod određenim uvjetima potencijalno smanjuje ukupna učinkovitost kružnog toka. Mills i sur. (2015) naglašavaju da manji vanjski polumjeri mogu dovesti do smanjenih kapaciteta kružnog toka, ponajviše zbog ponašanja vozača poput pretjeranog ustupanja prednosti. Njihova usporedna analiza provedena mikrosimulacijom identificirala je kritičan bihevioralni učinak pri kojem se vozači koji prilaze kružnim tokovima manjeg polumjera skloniji pretjeranom zaustavljanju, čime se smanjuju ostvarivi ulazni kapaciteti.

Kovács (2020), u metodološkom istraživanju temeljenom na simulacijama u Mađarskoj, potvrđuje da je geometrija, a osobito vanjski polumjer, ključni parametar koji utječe na simulirane performanse kružnog raskrižja. Veći polumjer središnjeg otoka i veći vanjski polumjer mogu povećati kapacitet kružnog raskrižja smanjenjem operativne brzine (Mahesh i sur., 2016.). Promatrani središnji otoci promjera 37,5 m podnijeli su ulazne tokove 20–30 % veće od onih promjera 25 m pri sličnim prometnim uvjetima (Patnaik i sur., 2017.). Regresijski modeli kapaciteta pokazuju pozitivnu korelaciju veličine otoka i kapaciteta pri mješovitom prometu (Mahesh i sur., 2016.). Usporedne simulacije višetračnih kružnih raskrižja otkrivaju da povećanje polumjera središnjeg otoka sa 16 m na 85 m može povećati modelirani ulazni kapacitet za više od 50 % (Bhasin i Gupta, 2024.).

Širina kružnog kolnika je dodatni važan parametar koji se analizira u više istraživanja. Lindenmann (2006) pokazao je da povećanje širine kružnog kolnika može povećati kapacitet za 20-30%, posebno u slučaju dodatnog prometnog traka unutar kružnog toka. Međutim, istraživanja poput onih Prakasha (2010) upozoravaju da višetračni kružni kolnici mogu stvoriti kompleksnije interakcije i smanjiti kapacitet zbog povećanih zahtjeva za donošenje odluka vozača prilikom ulaska. Yap i sur. (2015) također potvrđuju

značaj širine kružnog kolnika kroz regresijske modele koji pokazuju značajnu korelaciju s povećanim kapacitetom, čak i kada se isključe drugi utjecaji poput širine ulaza.

Vanjski polumjer i kut ulaza su parametri koji, pokazuju istraživanja, mogu imati različite učinke ovisno o veličini i obliku raskrižja. Dok Crown (1987) i Bared i sur. (1997) sugeriraju da veći ulazni polumjeri povećavaju protočnost, Patnaik i sur. (2016) te Yap i sur. (2015) navode suprotne rezultate, s padom kapaciteta pri velikim ulaznim polumjerima. Zacharia i sur. (2019) precizno kvantificiraju ovaj efekt, pokazujući kako ulazni kut veći od približno 40° negativno utječe na kapacitet zbog smanjene defleksije vozila i posljedičnog povećanja brzina.

Duljina proširenja ulaza također je predmet brojnih istraživanja. Al-Madani i Pratelli (2014) pokazali su da kod višetračnih kružnih raskrižja, duljina proširenja od 30 do 50 metara može povećati kapacitet za približno 10%, osiguravajući bolje raspoređivanje vozila prije ulaska u kružno raskrižje.

3.2.1.2. Prometni uvjeti – prometno opterećenje, distribucija i struktura prometa

Većina suvremenih modela za procjenu kapaciteta kružnog raskrižja temelji se na analizi intenziteta konfliktnog toka vozila unutar kružnog kolnika, dok projektni elementi raskrižja imaju važnu, ali sekundarnu ulogu (HCM, 2010; Brilon i Wu, 2008; Rodegards, 2015; Kimber, 1980; Akcelik, 2017). Ulazni tok kružnog raskrižja odnosi se na intenzitet vozila koja prilaze kružnom raskrižju na pojedinom privozu, dok kružni tok obuhvaća vozila koja prometuju unutar kružnog prstena, a kojima vozila na privozima moraju ustupiti prednost. Odnos između ulaznog i kružnog toka bitan je za analizu kapaciteta privoza: porast prometnog opterećenja u kružnom toku otežava pronalazak dovoljne vremenske praznine, čime se smanjuje kapacitet ulaza (Qu i sur., 2014, Hashim i sur., 2014; Al-Madani&Saad, 2009).

Munshi (2024) je istraživanjem kružnih raskrižja u Indiji zaključio intenzitet kružnog toka ima najznačajniji negativni utjecaj na kapacitet privoza, pri čemu je taj učinak izraženiji nego kod ostalih ispitanih čimbenika poput intenziteta pješačkog prometa ili veličine središnjeg otoka.

Sličan zaključak donose i Chavada i sur. (2022), navodeći da maksimalna propusna moć privoza izravno ovisi o intenzitetu cirkulirajućeg (konfliktnog) toka: pri niskom intenzitetu konfliktnog toka vozila lakše pronalaze prihvatljive razmake za ulazak, dok povećanje tog intenziteta smanjuje raspoloživost takvih razmaka, čime dolazi do značajnog pada kapaciteta.

U skladu s navedenim, Yap i sur. (2015) su na temelju analize 35 privoza utvrdili da negativno eksponencijalna funkcija najbolje opisuje odnos ulaznog kapaciteta i konfliktnog prometnog toka, dok geometrijske karakteristike raskrižja uglavnom imaju ulogu u obliku korekcijskih faktora.

Empirijska istraživanja pokazuju kako kružna raskrižja postižu optimalne performanse u uvjetima uravnoteženih prometnih tokova, dok izražena neuravnoteženost ili naglašena vršna opterećenja mogu uzrokovati značajno smanjenje propusne moći i nastanak prometnih zagušenja (Akcelik, 2004; Krogscheepers i Roebuck, 2000). U slučajevima kada jedan od privoza dominira u ukupnom prometnom opterećenju, dolazi do pada ukupnog kapaciteta raskrižja, dok ravnomjerna raspodjela prometnog toka između svih privoza omogućava postizanje maksimalnog kapaciteta (Akcelik, 2004).

Chung i sur. (1992) proveli su simulacije koje su pokazale da obrazac dolaska vozila po privozima utječe na kapacitet privoza te da se kapacitet smanjuje s porastom neuravnoteženih tokova. Najveći kapaciteti ulaza opaženi su kod potpuno uravnoteženih tokova. Ovi nalazi kasnije su ugrađeni u SIDRA model.

Valdez i sur. (2011) analizirani su četverokrako dvotračno raskrižje pomoću alata VISSIM za različite scenarije neuravnoteženih opterećenja. Utvrdili su da dominantan promet na jednom privozu može dovesti povećanja prosječnog vremena kašnjenja i značajnog smanjenja kapaciteta.

Analiza strukture prometnog toka na kružnim raskrižjima pokazuje da teška teretna vozila i autobusi, zbog većih dimenzija i mase te slabijeg ubrzanja, zahtijevaju veće vremenske praznine, čime znatno smanjuju kapacitet kružnih raskrižja (Chevuri, 2018; Guerrieri i sur., 2019). Motocikli i mopedi, zbog manjih dimenzija i većeg ubrzanja mogu iskoristiti kraće vremenske praznine, što pozitivno utječe na protočnost prometa (Trinh i sur., 2020).

3.2.1.3. Ponašanje vozača

Ponašanje vozača utječe na kapacitet kružnog raskrižja kroz različite aspekte, a osobito kroz izbor vremenskih praznina, odnosno, brzinu uključivanja u kružni tok. Američke studije bilježe prosječne kritične razmake u rasponu od 4 do 5 sekundi (Rodegerdts i sur., 2007; Mensah i sur., 2010). Suprotno tome, istraživanja u Kataru pokazuju značajno kraće vrijednosti: 2,2 sekunde na jednotračnim te 2,4 - 2,6 sekundi na dvotračnim kružnim raskrižjima, što pripisuju agresivnijem stilu vožnje (Shaaban i Hamad, 2020). Prisutnost policije u Kataru dodatno smanjuje kritične razmake (s 2,4 na 2,1 sekundu), povećavajući kapacitet ulaza (Shaaban i Hamad, 2021).

U nordijskim zemljama (Švedska, Norveška, Danska) vozači pokazuju sklonost čekanju većih vremenskih praznina (3,7 - 4,7 sekundi), što je povezano s većim stupnjem prometne discipline i poštivanja prednosti uzrokujući takvim ponašanjem prosječno niži kapacitet. Vasconcelosa i sur. (2013) naglašavaju da izražene razlike u ponašanju vozača zahtijevaju lokalnu kalibraciju modela kapaciteta jer primjena univerzalnih vrijednosti može rezultirati znatnim pogreškama u procjeni kapaciteta kružnih raskrižja

U tablici 3.3. prikazane su razlike u kritičnim i međuslijednim razmacima u pojedinim državama.

Tablica 3.3. Kritični i međuslijedni razmak za jednotračna kružna raskrižja

Izvor	Država	Kritični razmak (s)	Međuslijedni razmak (s)
Rodegerdts i sur. (2007) – NCHRP 572	SAD	3,9 – 5,9	2,6 – 4,3
Brilon – prema HBS (2015)	Njemačka	4,1 – 4,4	2,9
Fortuijn (2009)	Nizozemska	3,2	2,1
Vasconcelos i sur. (2013)	Portugal	3,4 – 4,3	2,1 – 2,2
Shaaban i Hamad (2020)	Katar	2,3	n/p
Dahl i Lee (2012)	Kanada	3,9 – 5,3	2,1 – 4,2
Gazzarri i sur. (2012)	Italija	3,54 – 4,1	2,52 – 2,76

Psihološki i društveni čimbenici dodatno oblikuju ponašanje vozača: viša razina prometne kulture produljuje prihvatljive vremenske praznine, dok agresivnija kultura vožnje dovodi do njihovog smanjenja, povećavajući kapacitet, ali i potencijalno narušavajući sigurnost. U europskom kontekstu, prisutnost policije potiče oprez, dok primjerice u Kataru ima suprotan učinak, povećavajući brzinu uključivanja (Shaaban & Hamad, 2021).

Kapacitet kružnih raskrižja ključni je pokazatelj njihove prometne učinkovitosti te ovisi o međudjelovanju više čimbenika distribucije prometnih tokova, geometrijskih obilježja raskrižja, ponašanja vozača te strukture prometnog toka i drugih. Projektni parametri poput širine ulaza, broja prometnih traka, vanjskog polumjera, veličine središnjeg otoka i širine kružnog kolnika omogućavaju optimiranje kapaciteta, pri čemu njihov utjecaj može biti pozitivan ili negativan, ovisno o prometnim uvjetima i veličini samih parametara. U postojećim znanstvenim istraživanjima, vanjski polumjer kružnog raskrižja najčešće je analizirani projektni parametar. Ponašanje vozača, osobito kroz izbor kritičnih vremenskih praznina za uključivanje u kružni tok, značajno se razlikuje među državama zbog kulturoloških i psiholoških čimbenika, što nameće potrebu lokalne kalibracije modela kapaciteta. Heterogena struktura prometnog toka dodatno komplicira analizu kapaciteta jer različite kategorije vozila imaju različite zahtjeve u pogledu prostorno-vremenskih praznina.

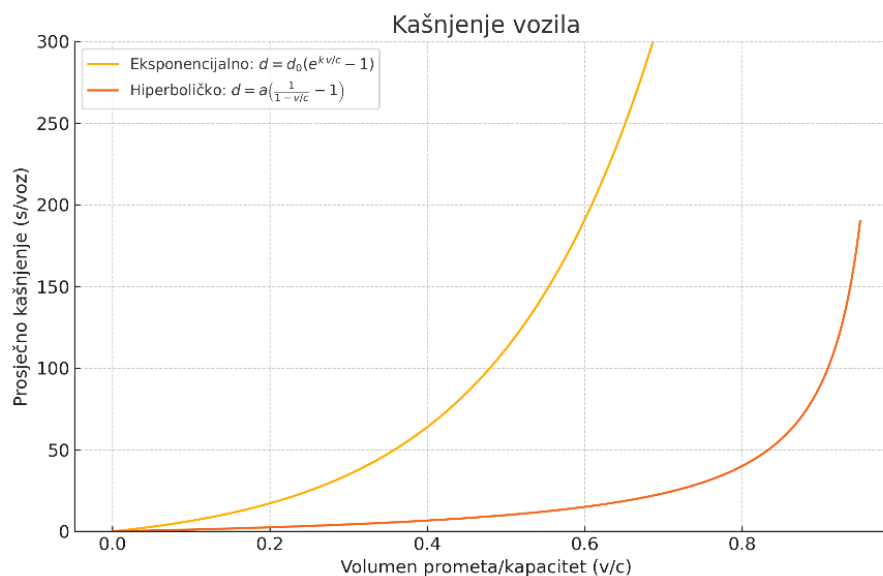
3.2.2. Parametri prometnog toka – prosječno vrijeme kašnjenja

Pokazatelj prometnog toka koji se uobičajeno koristi za analizu funkcionalnosti odvijanja prometa u kružnim tokovima je vrijeme kašnjenja što pokazuje i pregled istraživanja u nastavku.

Prosječno vrijeme kašnjenja (eng. *Vehicle Delay*) predstavlja, uz kapacitet, jedan od temeljnih pokazatelja operativne učinkovitosti kružnih raskrižja. U širem smislu, kašnjenje na raskrižjima definira se kao mjera gubitka vremena koju vozači trpe uslijed smanjenja brzine kretanja ili zaustavljanja tijekom prolaska kroz raskrižje (FHWA, 2010).

Specifično za kružna raskrižja, prosječno vrijeme kašnjenja ovisi o volumenu ulaznog prometnog toka, kapacitetu privoza, geometriji, kao i o obrascima ponašanja vozača u pogledu prihvatanja vremenskih praznina (Giuffre i sur., 2016; Codjoe i Thapa, 2021) što je dijelom objašnjeno u prethodnom poglavlju.

Matematički modeli prosječnog vremena kašnjenja najčešće opisuju eksponencijalni ili hiperbolični rast kašnjenja vozila kako se omjer volumena ulaznog toka i kapaciteta (v/c) približava vrijednosti jedan (slika 3.5). U situacijama kada omjer v/c prelazi vrijednost 1, dolazi do zasićenja privoza, pri čemu red vozila teži neograničenom rastu, a prosječno vrijeme kašnjenja teorijski postaje beskonačno, što se u praksi očituje kao iznimno duga vremena čekanja. Zbog toga se projektiranje kružnih raskrižja usmjerava prema održavanju omjera v/c ispod 0,8 u vršnim opterećenjima na najopterećenijem privozu, čime se izbjegava ulazak u zonu strmog porasta kašnjenja (Akcelik, 1980; Webster, 1958).



Slika 3.5. Utjecaj prometnog opterećenja i kapaciteta na prosječno vrijeme kašnjenja vozila

Prema *Highway Capacity Manual* (2016), prosječno kašnjenje po privozu može se analitički izraziti sljedećim modelom:

$$d = \frac{T}{Q} \cdot \frac{x}{x - 1} + \frac{W}{G} \quad (9)$$

gdje je $x = v/c$ (odnos volumena ulaznog toka i kapaciteta), Q volumen ulaznog toka (voz/s), T je vrijeme protoka (s), a W dodatno vrijeme čekanja zbog inicijalnog traženja vremenskih praznina.

U praksi, prosječno vrijeme kašnjenja po vozilu koristi se za određivanje razine uslužnosti raskrižja (LOS, eng. *Level of Service*). Standardni pragovi (prema HCM, 2010) definirani su kao: LOS A za kašnjenja do 10 sekundi, LOS B do 15 sekundi, LOS C do 25 sekundi, LOS

D do 35 sekundi, dok LOS F označava kašnjenje veće od 50 sekundi po vozilu. Iako navedene vrijednosti mogu varirati između različitih nacionalnih standarda, kašnjenja iznad 50 sekundi općenito se smatraju neprihvatljivima te ukazuju na ozbiljno zagušenje sustava.

Al-Omari i sur. (2004) proveli su istraživanje na 14 jednotračnih kružnih raskrižja u Jordanu, gdje su analizirali utjecaj prometnih i geometrijskih karakteristika na kašnjenje. Njihova višestruka regresijska analiza identificirala je širinu ulaza kao najdominantniji prediktor kašnjenja, dok je širina kružnog kolnika imala statistički najmanji utjecaj. Istovremeno, evaluacija komercijalnog softvera SIDRA pokazala je sistematsko podcjenjivanje kašnjenja pri visokim razinama saturacije. Ovo istraživanje naglasilo je važnost lokalne kalibracije modela prosječnog vremena kašnjenja.

Slični rezultati potvrđeni su i u radu Gandhija i suradnika (2012) u Iraku, gdje su razvijena tri statistička modela prosječnog vremena kašnjenja temeljem videoanalize i terenskih mjerenja. Širina ulaza, ulazni polumjer i intenzitet prometa pokazali su se kao najutjecajniji čimbenici prosječnog vremena kašnjenja.

Bargegol i sur. (2016) nadogradili su ovaj pristup primjenom neuronskih mreža u Iranu gdje su, osim prometnog opterećenja i širine ulaza, u model uključeni i drugi projektni parametri, čime je postignuta veća preciznost predikcija.

Projektni parametri, uz prometno opterećenje, kontinuirano su prepoznati kao ključni utjecajni parametri na prosječno vrijeme kašnjenja. U istraživanju Vaiana i sur. (2013) istaknuta je važnost širine razdjelnog otoka i širine kružnog kolnika u smanjenju kašnjenja, osobito pri većem prometnom opterećenju. Širi razdjelni otoci omogućuju lakši ulazak vozila i poboljšavaju sigurnost pješaka, dok je vanjski polumjer kružnog raskrižja pokazao ograničen utjecaj na kašnjenje.

Studija slučaja Nazaryan i Fang (2020) ukazuje da dodavanje prometne trake povećava kapacitet i smanjuje prosječno vrijeme kašnjenja, dok prekomjerno produljenje može imati suprotan učinak zbog povećanja brzine vozila unutar kružnog toka, što otežava prihvaćanje vremenskih praznina.

Povećanje prometnog opterećenja u kružnom toku značajno smanjuje broj raspoloživih praznina, što izravno povećava kašnjenja (Hellinge i Sindija, 2012). Važan aspekt procjene kašnjenja čini i ponašanje vozača u pogledu prihvaćanja vremenskih praznina. Povećanje kritičnog razmaka rezultira značajnim povećanjem prosječnog kašnjenja (Vaiana i sur., 2013). Ova varijabilnost dodatno potvrđuje potrebu za lokalnom kalibracijom prometnih modela.

Iako je vrijeme kašnjenja prepoznato kao jedan od ključnih pokazatelja operative učinkovitosti kružnih raskrižja, praktična primjena i terenska mjerenja prosječnog vremena kašnjenja povezana su s nizom poteškoća koje proizlaze iz složenosti same metode, velikog broja parametara koje je potrebno pratiti i analizirati, kao i osjetljivosti

rezultata na dinamičke promjene prometnih uvjeta (Ranpura i sur., 2024). Pouzdana terenska mjerenja zahtijevaju kontinuirano praćenje pojedinačnih vozila, preciznu definiciju početka i završetka mjerenja prosječnog vremena kašnjenja, kao i detaljnu rekonstrukciju idealnih uvjeta prolaska, što se u praksi rijetko može ostvariti s dovoljnom preciznošću (Li i sur., 2016).

Prosječno vrijeme kašnjenja se obično izračunava za pojedinačno raskrižje, čime se zanemaruje utjecaj ostalih elemenata mreže i njihovog međudjelovanja na ukupno vrijeme putovanja vozila. Kada vozilo prolazi kroz niz raskrižja različitog tipa (npr. kružno pa zatim semaforizirano raskrižje), pojedinačna kašnjenja izmjerena na svakom raskrižju zasebno ne prikazuju realno ukupno vrijeme koje vozilo provodi na cijeloj dionici puta (Maheshwary i sur., 2018; Bezembinder i sur., 2018).

Fokusiranje isključivo na vrijeme kašnjenja zanemaruje utjecaj duljine trase i ostvarene brzine vožnje, što može dovesti do nepotpune ili pogrešne interpretacije učinkovitosti prometnog rješenja. Moguće su situacije u kojima različiti prometni scenariji generiraju slično prosječno kašnjenje vozila, no zbog razlike u duljini trase, ukupno vrijeme putovanja značajno se razlikuje, a što analiza usmjerena samo na kašnjenje ne bi mogla identificirati (NHCRP, 2023; Yang, 2007; Rajput i sur., 2023).

Zbog navedenih razloga, u analizama temeljenima na prometnim mikrosimulacijskim modelima, osobito prilikom njihove kalibracije i validacije u realnim prometnim uvjetima, često se kao zamjenski pokazatelj koristi vrijeme putovanja (Truong & Somenahalli, 2011). Ovaj parametar se lakše i pouzdanije prikuplja terenskim mjerenjima te uspješnije opisuje stvarno prometno ponašanje korisnika na raskrižju, uzimajući u obzir i osnovno vrijeme putovanja i sva kašnjenja (Elefteriadou, 2014). S obzirom da je vrijeme putovanja glavni temelj analize, razvoja i kalibracije modela susjednih raskrižja u ovome radu isti je detaljnije obrazložen u nastavku u poglavlju 4.

Prosječno vrijeme kašnjenja vozila jedan je od ključnih pokazatelja operativne učinkovitosti kružnih raskrižja. Analitički modeli, poput onoga iz HCM-a, povezuju kašnjenje s prometnim opterećenjem, kapacitetom i vremenom čekanja za ulazak u raskrižje. Terenska mjerenja vremena kašnjenja vrlo su složena zbog velikog broja promjenjivih parametara, što potiče korištenje zamjenskih pokazatelja poput prosječnog vremena putovanja, koje pouzdanije opisuje stvarne uvjete u prometnoj mreži.

3.3. Kružna raskrižja u interakciji s drugim raskrižjima u mreži

Većina postojećih istraživanja usmjerena je na izravne usporedbe između kružnih i semaforiziranih raskrižja (Demir i Demir, 2020; Ištoka Otković i Dadić, 2009; Zhou i sur., 2022), dok je interakcija različitih tipova raskrižja unutar integriranih koridora ostala nedovoljno istražena (Isebrands i sur., 2008). Problem kružnih raskrižja u interakciji s

drugim raskrižjem je načelno adresiran u radu autora Benigar (2008) u kojem autor analizira funkcioniranje mreža kružnih raskrižja u urbanim koridorima, s naglaskom na njihov utjecaj na protočnost prometa i sigurnost. Studija ističe da primjena niza kružnih raskrižja doprinosi ujednačenju prometnih tokova, smanjenju zastoja te povećanju sigurnosti kroz kontrolu brzina. Međutim, razmak između susjednih kružnih raskrižja potrebno je optimizirati kako bi se održala cjelovitost prometnih tokova, a istovremeno izbjeglo stvaranje zagušenja. U radu se ne preporučaju optimalni razmaci, ali se naglašava da je za određivanje optimalnih razmaka nužno provoditi dinamičke prometne simulacije temeljem profila brzina i obrazaca dolaznih prometnih tokova.

Ariniello (2005) predstavlja studiju slučaja o rekonstrukciji prometnog koridora South Golden Road u predgrađu, gdje su četiri kružna raskrižja zamijenila tradicionalna semaforizirana i nesemaforizirana raskrižja. Prije rekonstrukcije, koridor je bio obilježen visokim brzinama, čestim prometnim nesrećama i otežanim kretanjem pješaka. Nakon ugradnje kružnih raskrižja, operativna brzina smanjena je sa 75 km/h na 50 km/h, dok je stopa nesreća smanjena za 88% unatoč povećanju prometnog opterećenja od 30%. Kružna raskrižja postavljena su na razmaku od 400 do 600 metara, čime se omogućilo nesmetano kretanje bez zastoja.

Implementacija kružnih raskrižja duž prometnih koridora postaje sve učestalija zbog njihovih sigurnosnih prednosti, osobito u pogledu smanjenja brzine vozila i smanjenja broja teških prometnih nesreća. Međutim, kako navode Fernandes i sur. (2015a i 2015b), iako kružna raskrižja povećavaju sigurnost, uvode operativne izazove poput česte potrebe za usporavanjem i ubrzavanjem vozila, što može negativno utjecati na emisije štetnih plinova i produženje vremena putovanja. U koridorima s uzastopno postavljenim kružnim raskrižjima izostaje mogućnost koordinirane progresije vozila, za razliku od signaliziranih koridora, što rezultira većim emisijama i većom potrošnjom goriva, osobito pri većim prometnim opterećenjima. Studija naglašava važnost pravilnog razmaka između raskrižja, budući da premala udaljenost može pogoršati prometne uvjete. Neuravnoteženost prometnih tokova između glavnih i sporednih prometnica dodatno otežava optimalne performanse (Fernandes i sur., 2015a i 2015b).

Brocchini i sur. (2025) razvili su metodološki pristup temeljen na prometnim mikrosimulacijama za sistematsku evaluaciju prometne učinkovitosti i sigurnosti koridora s nizom kružnih raskrižja. Predložena metoda validirana je pomoću dvije studije slučaja koje se razlikuju prema međusobnom razmaku raskrižja, od 385 do 1505 metara. Prva studija obuhvaća prometni koridor Via Aurelia Nord u Pisi (Italija), koji čini pet raskrižja rekonstruiranih u kružna raskrižja. Druga studija provedena je na koridoru Route de Marseille u Avignonu (Francuska), koji uključuje šest kružnih raskrižja. Za oba prometna koridora izrađeni su kalibrirani mikrosimulacijski modeli u programskom paketu Aimsun na temelju prikupljenih podataka s terena, pri čemu su ispitane različite konfiguracije raskrižja, uključujući kombinacije kružnih i semaforiziranih raskrižja.

Evaluacija sigurnosti provedena je primjenom alata SSAM, kroz analizu broja konflikata među vozilima. Dobiveni rezultati pokazuju kako rješenja koja uključuju isključivo kružna raskrižja ne osiguravaju nužno najbolji kompromis između prometne učinkovitosti, izražene putem vremena putovanja, prosječnog vremena čekanja, protočnosti i duljine kolona vozila, te prometne sigurnosti, definirane brojem konflikata. Kod koridora u Pisi optimalnom konfiguracijom s aspekta prometne učinkovitosti pokazala se kombinacija četiri kružna i jednog semaforiziranog raskrižja, dok je najveća prometna sigurnost ostvarena kombinacijom tri kružna i dva semaforizirana raskrižja. Na koridoru u Avignonu najbolje rezultate donijela je konfiguracija koja uključuje kružna raskrižja između kojih su strateški raspoređena semaforizirana raskrižja.

Implementacija kružnih raskrižja u urbanim sredinama često se susreće s izazovima vezanima uz njihovu interakciju sa susjednim raskrižjima. Preporuke iz relevantnih izvora (Federal Highway Administration, 2000; Hrvatske ceste, 2014; Tollazzi, 2015) dosljedno ukazuju na potrebu izbjegavanja postavljanja kružnih tokova između dvaju semaforiziranih raskrižja. Međutim, sustavna istraživanja koja kvantificiraju minimalne potrebne udaljenosti ili predviđaju operativne učinke različitih konfiguracija još uvijek su rijetka. Glavna funkcionalna razlika između kružnih i semaforiziranih raskrižja leži u načinu upravljanja prometom. Kružna raskrižja omogućuju kontinuiran prometni tok zbog pravila prednosti na kružnom kolniku, što je posebno učinkovito pri srednjim razinama prometnog opterećenja. Suprotno tome, semaforizirana raskrižja stvaraju periodične prekide u prometnom toku zbog vremenskog odvajanja faza, što dovodi do formiranja kolona (Hallmark i sur., 2010).

Hallmark i sur. (2010) analizirali su utjecaj kružnih tokova na prometni tok u semaforiziranim koridorima pomoću mikrosimulacija u programu VISSIM na temelju dvije studije slučaja. Prva studija u Amesu, Iowa, analizirala je koridor duž US-69 pod tri različita scenarija: optimizirani signalni plan postojećeg raskrižja, dodatak trake za lijevo skretanje te zamjena postojećeg raskrižja kružnim tokom (promjera 53,7 m, udaljenost od semaforiziranog raskrižja 481,9 m i 402,6 m). Rezultati su pokazali da kružni tok smanjuje vrijeme kašnjenja i putovanja tijekom vršnih sati, no slična poboljšanja ostvarena su i alternativnim semaforskim rješenjem s dodanom trakom za lijevo skretanje. Druga studija provedena u Woodburyju, Minnesota, pokazala je da uvođenje dvotračnog kružnog toka udaljenog 643,9 m od najbližeg semaforiziranog raskrižja smanjuje vrijeme kašnjenja od 12%, no bez značajnijih promjena u ukupnom vremenu putovanja.

Bared i Edara (2005) usporedili su kapacitete kružnih raskrižja koristeći terenska mjerenja te rezultate mikrosimulacijskih, empirijskih i analitičkih modela. Studija je obuhvatila 15 jednotračnih i 7 dvotračnih kružnih raskrižja u SAD-u. Mikrosimulacijski modeli pokazali su značajno manji kapacitet u odnosu na empirijske i analitičke modele, ali najbliži rezultatima dobivenim terenskim ispitivanjima. Rezultati su pokazali da

kružna raskrižja unutar semaforiziranog koridora smanjuju vrijeme kašnjenja i duljinu repova čekanja pri prometnim opterećenjima ispod kapaciteta kružnog raskrižja, dok pri opterećenjima blizu i iznad kapaciteta uzrokuju dulja vremena kašnjenja od semaforiziranih raskrižja.

Istraživanje Isebrands i sur. (2008) pruža procjenu šireg utjecaja kružnog raskrižja na prometne koridore. Istraživanje je provedeno pomoću softvera VISSIM za modeliranje koridorske dinamike te empirijskim studijama stvarnih koridora s implementiranim kružnim raskrižjima. Dodatno je provedena analiza uz pomoć alata RODEL i SIDRA za procjenu učinkovitosti kružnih raskrižja u uvjetima neuravnoteženih prometnih tokova. Analizirane su dvije studije slučaja. U Amesu, Iowa, modeliran je koridor Grand Avenue (pet semaforiziranih raskrižja) s jednim raskrižjem zamijenjenim kružnim raskrižjem. Rezultati su pokazali blago smanjenje zastoja, ali bez značajnog poboljšanja ukupnog vremena putovanja. Slično je u Woodburyju, Minnesota, gdje je implementacija kružnog raskrižja na mjestu četverokrakog nesemaforiziranog raskrižja na Radio Drive koridoru dovela do manjih poboljšanja prosječnog kašnjenja, dok su ukupna vremena putovanja ostala gotovo ista. Terenske studije slučaja pokazale su izraženije prednosti kružnih raskrižja. Na South Golden Roadu u Coloradu zamjena semaforiziranih raskrižja kružnim raskrižjima u nizu dovela je do smanjenja brzine za 30 %, velikog pada broja prometnih nesreća te poboljšanog pristupa poslovnim objektima. Na Lineville Roadu u okrugu Brown, Wisconsin, broj prometnih nesreća značajno se smanjio nakon ugradnje pet kružnih raskrižja u blizini školskih kampusa. U Edini, Minnesota, kružni tokovi su unaprijedili sigurnost pješaka i pristup trgovačkim centrima.

Akçelik (2014) analizira izazove modeliranja kružnih raskrižja unutar prometnih koridora, naglašavajući potrebu za mikroanalitičkim modelima temeljenima na prometnim trakama, umjesto tradicionalnih modela temeljenih na prometnim vezama, kojeg implementira u softveru SIDRA. Istraživanje ističe dva glavna problema: prvo, kolone koje nastaju na semaforiziranim raskrižjima mogu blokirati ulaze u kružna raskrižja i time smanjiti njihov kapacitet; drugo, semaforizirana raskrižja uzrokuju grupiranje vozila, čime se mijenja obrazac dolaska vozila na kružno raskrižje. Rezultati pokazuju da je kod visokih prometnih opterećenja potrebno modelirati smanjenje kapaciteta kružnog raskrižja zbog utjecaja susjednog raskrižja, što je u skladu s ostalim istraživanjima koja naglašavaju da se kružna raskrižja moraju promatrati kao zavisni elementi koridora.

Fernandes i sur. (2017) istraživali su koridor s mješovitim tipovima raskrižja, fokusirajući se na kružno raskrižje i semaforizirano raskrižje međusobno udaljenih 167 metara. Upotrebom VISSIM-a pokazali su da susjedno semaforizirano raskrižje uzrokuje povratne kolone koje značajno narušavaju učinkovitost kružnog toka, povećavajući kašnjenja, broj zaustavljanja i emisije duž koridora. Optimizacijom putem višeciljnog genetskog algoritma (NSGA-II), studija je pokazala da povećanje razmaka na približno 200 metara značajno poboljšava prometne i okolišne pokazatelje. Zamjenom semaforiziranog

raskrižja kružnim raskrižjem duljina kolona smanjena je za 64%, a emisije za 16–27%, ovisno o vrsti onečišćujuće tvari. Autori naglašavaju da, čak i uz zamjenu tipa raskrižja, neadekvatan razmak može ograničiti učinkovitost koridora, osobito pri većim prometnim opterećenjima, što predstavlja važan doprinos za ovu disertaciju.

Hallmark i sur. (2011) istražili su ulogu kružnih raskrižja unutar prometnih koridora te njihovu međusobnu interakciju sa susjednim semaforiziranim raskrižjima, s fokusom na emisije štetnih plinova. Istraživanje je pokazalo da u uvjetima umjerenog prometnog opterećenja kružna raskrižja ne ostvaruju nužno bolje rezultate od semaforiziranih ili nesemaforiziranih raskrižja. U nekim slučajevima zabilježene su veće emisije ugljičnog monoksida i dušikovih oksida, zbog učestalog usporavanja i ubrzavanja svih vozila, dok semafori usporavaju samo dio prometa. U pogledu međusobnog utjecaja kružnih raskrižja i semaforiziranih raskrižja, studija je pokazala da dovoljna udaljenost — veća od 1,2 km — omogućuje vozilima postizanje slobodnog protoka, čime se smanjuje međusobni negativni utjecaj. U suprotnom, nedovoljan razmak raskrižja može izazvati zastoje i duže kolone vozila.

Zaključno, analiza interakcije kružnih raskrižja s ostalim tipovima raskrižja unutar prometnih koridora ističe složenost njihova međudjelovanja, pri čemu učinkovitost kružnih raskrižja značajno ovisi o prometnim uvjetima, geometrijskim karakteristikama i međusobnoj udaljenosti raskrižja. Interakcija kružnih raskrižja s drugim tipovima raskrižja unutar prometnih koridora nedovoljno je istražena. Dok je većina istraživanja usmjerena na izravne usporedbe kružnih i semaforiziranih raskrižja, tek nekolicina studija analizira međusobne interakcije različitih tipova raskrižja u integriranim prometnim mrežama. Dosadašnja istraživanja ukazuju na višestruke prednosti kružnih raskrižja u pogledu smanjenja operativne brzine vozila i povećanja prometne sigurnosti, no istovremeno ističu operativne izazove poput čestog usporavanja i ubrzavanja vozila, što povećava emisije štetnih plinova i potrošnju goriva. Ključni čimbenik učinkovitosti koridora s kružnim raskrižjima je njihov međusobni razmak, jer premala udaljenost može negativno utjecati na protočnost prometa. Poseban izazov predstavlja interakcija kružnih raskrižja sa susjednim semaforiziranim raskrižjima, gdje neadekvatna udaljenost može uzrokovati zastoje i smanjenje kapaciteta kružnog toka. Mikroanalitički pristupi i prometne simulacije pokazali su se ključnim alatima za evaluaciju i optimizaciju performansi kružnih raskrižja u heterogenim prometnim koridorima, no sustavna istraživanja o optimalnim konfiguracijama još uvijek nedostaju, što ostavlja prostor za daljnja znanstvena istraživanja.

3.4. Prometna sigurnost na kružnim raskrižjima

Kružna raskrižja smatraju se jednim od najučinkovitijih prometnih rješenja za povećanje sigurnosti cestovnog prometa (Elvik, 2017; Isebrands, 2008). Jedna od najznačajnijih sigurnosnih prednosti kružnih raskrižja jest smanjenje broja konfliktnih točaka – s 32 u standardnom četverokrakom raskrižju na 8 u kružnom raskrižju. Prometne nesreće na kružnim raskrižjima rjeđe su, a najčešća vrsta sudara je sudar straga. Ova vrsta sudara općenito ima manje ozbiljne posljedice od ostalih vrsta sudara (Ambros i sur., 2016, Flannery, 2001). Posljedično, javlja se izražen problem neprijavljivanja prometnih nesreća jer sudionici često odlučuju ne prijaviti sudar kako bi izbjegli financijske i administrativne troškove. Stoga raspoloživi podaci o nesrećama često nisu potpuni te ne odražavaju stvarne sigurnosne karakteristike kružnog raskrižja. Prometni konflikti, promatrani kao neovisni događaji u teorijskim modelima, mogu se upotrijebiti za procjenu rizika i vjerojatnosti pojedinih vrsta sudara te za vrednovanje prometne sigurnosti (Gettman i Head, 2003; Howlader i sur., 2024; Tarko, 2021).

Retting i sur. (2001) proveli su istraživanje u SAD-u na 24 raskrižja koja su rekonstruirana u kružna. Rezultati su pokazali da je implementacija kružnih raskrižja dovela do smanjenja nesreća s ozbiljnim posljedicama za 76%, a ukupnog broja nesreća za 38%. Slični rezultati zabilježeni su i u drugim zemljama, uključujući Nizozemsku i Australiju, gdje je nakon rekonstrukcije u kružno raskrižje došlo do značajnog smanjenja broja nesreća (Schoon i cvan Minnen, 1994; Elvik, 2017; Ambos i sur. 2016).

Elvik (2017) je putem meta-analize 44 studije provedenih u razdoblju od 1975. do 2014. godine sintetizirao sigurnosne učinke prenamjene klasičnih raskrižja u kružna. Analizom ukupno 154 kružna raskrižja utvrđeno je da kružna raskrižja smanjuju broj nesreća sa smrtnim ishodom za 65 %, a broj nesreća s teškim posljedicama za 40 %.

Utjecaj projektnih elemenata na sigurnost odvijanja prometa na kružnom raskrižju tema je brojnih istraživanja. Manja kružna raskrižja s kompaktnom geometrijom, kako navode Kennedy i sur. (2007), pozitivno utječu na smanjenje operativnih brzina, što se povezuje sa smanjenim stopama nesreća i manjom ozbiljnošću ozljeda.

Yoshioka i sur. (2017) ističu važnost manjeg ulaznog polumjera i kuta defleksije za minimiziranje varijacija brzina na ulazima u kružno raskrižje, dok širi ulazi mogu rezultirati većim brzinama i povećanim rizikom od nesreća .

U studiji slučaja u SAD-u na 8 kružnih raskrižja, Flannery (2001) je utvrdio da kružna raskrižja imaju manje konfliktnih točaka i omogućuju niže operativne brzine od nesemaforiziranih raskrižja, što rezultira smanjenjem učestalosti i težine prometnih nesreća.

Istraživanje Mahdalova i sur. (2013) povedeno je na 104 kružnih raskrižja u Češkoj (jednotračnih i dvotračnih) i naglašava potrebu kontrole brzine na ulazima odgovarajućom geometrijom. Istraživanje je pokazalo da odabir pogrešnih projektnih

elemenata može dovesti do povećanja broja prometnih nesreća, pri čemu veličina središnjeg otoka i širina prometnog traka značajno utječu na sigurnosne ishode. Središnji otok utječe na smanjenje brzine vozila, osobito u kombinaciji s odgovarajućom defleksijom ulaza; veći otoci mogu potaknuti veće brzine i dovesti do većeg broja nesreća, što potvrđuje i istraživanje Daniels i sur., 2011. Mala kružna raskrižja s vanjskim promjerom do 30 metara prikladna su samo za lokacije s nižim operativnim brzinama, poput zona s ograničenjem brzine od 30 km/h. U izvanurbanim zonama treba predvidjeti dodatne mjere smirivanja prometa. Optimalni vanjski polumjer za jednostručna kružna raskrižja definiran je kao 40 metara u navedenom istraživanju (Mahdalova i sur., 2013). Brzina vozila značajan je čimbenik koji utječe na prometne nesreće, a kružna raskrižja svojom geometrijom djeluju kao mjera smirivanja prometa, osobito na ulazima gdje defleksija utječe na usporavanje (Choi i sur., 2011; Tibljaš i sur., 2018). Veća defleksija povećava sigurnost smanjujući konflikte između ulaznog i kružnog toka (Ahec i sur. 2016, Kennedy i sur., 2007).

Manji vanjski polumjeri dodatno djeluju na smanjenje operativnih brzina i time smanjuju rizik od nesreća (Ambros et al, 2016, Choi i sur., 2011). Suprotno mišljenje prikazano je u istraživanju Pilko i Šarić (2017) koje sugerira da kružna raskrižja s manjim vanjskim promjerom često ne pružaju dovoljnu defleksiju vozila, što dovodi do većih brzina i povećanog rizika od sudara. Širina kružnog kolnika također se pokazala kao značajan element koji negativno korelira s operativnim brzinama (Brilon, 2005), dok Kim & Choi (2013) nalaze da smanjenje širine kružnog kolnika doprinosi većem broju prometnih nesreća što implicira potrebu višekriterijske analize pri odabiru projektnih elemenata. Veći broj istraživanja ističe prosječni dnevni promet kao ključan faktor s najvećim utjecajem na stopu nesreća (Daniels i sur., 2011; Federal Highway Administration, 2000; Šenk&Ambros, 2011).

Ambros i sur. (2016) analizirali su sigurnost prometa u srednjoeuropskim državama na 72 kružna raskrižja koristeći modele predikcije prometnih nesreća te su pokazali da određeni projektni parametri značajno utječu na sigurnost. Rezultati su pokazali da je sigurnost na kružnim raskrižjima u pozitivnoj korelaciji s prometnim opterećenjem i širinom povoznog dijela, dok negativno korelira s defleksijom i ulaznim kutom. Choi i sur. (2011) u istraživanju u Južnoj Koreji naglasili su važnost geometrijskih karakteristika i ulazne brzine, utvrdivši da elementi poput broja ulaznih traka i širine ulaza značajno utječu na stopu nesreća.

Procjena sigurnosti kružnih raskrižja može se provoditi različitim pristupima, pri čemu se najčešće primjenjuju empirijske analize te mikrosimulacijski modeli. Šenk i Ambros (2011) proveli su istraživanje na uzorku od 90 kružnih raskrižja u Češkoj, primijenivši negativno binomni regresijski model za kvantificiranje sigurnosnih karakteristika kružnih raskrižja. Rezultati istraživanja pokazali su da rekonstrukcija raskrižja u kružni raskrižje značajno smanjuje broj prometnih nesreća. Analizirani model uključivao je prometne i

projektne parametre, pri čemu je utvrđeno da manja širina povoznog dijela doprinosi povećanju broja prometnih nesreća.

Novija istraživanja predlažu integrirani pristup koji objedinjuje projektne i prometne parametre, čime se postižu bolji rezultati u pogledu sigurnosti i efikasnosti prometnih tokova (Abed i Ewadh, 2021; Rella Riccardi i sur., 2022).

U skladu s Europskom direktivom 2019/1936 o sigurnosti cestovne infrastrukture, naglasak je na proaktivnoj identifikaciji rizika temeljenoj na obilježjima cestovne infrastrukture, umjesto tradicionalnog pristupa koji se oslanja isključivo na povijesne podatke o nesrećama. Rella Riccardi i sur. (2022) razvili su i validirali Safety Index (SI), kvantitativni pokazatelj za procjenu sigurnosti urbanih kružnih raskrižja. Primjenom SI-a moguće je rangirati kružna raskrižja, kao i pojedinačne prilaze, prema razini rizika te identificirati ključne sigurnosne nedostatke koji najviše pridonose vjerojatnosti nastanka nesreća. Metoda je validirana na uzorku od 50 urbanih kružnih raskrižja u Rimu, pri čemu je utvrđeno da najveći utjecaj na ukupnu razinu rizika imaju projektni elementi te neadekvatna horizontalna i vertikalna signalizacija.

Budući da se teže prometne nesreće na kružnim raskrižjima događaju rijetko, znanstvena istraživanja posežu za proaktivnim pristupom procjene sigurnosti koji uključuje analizu prometnih konflikata. Prometni konflikt definira se kao situacija u kojoj se dva ili više sudionika u prometu približavaju jedan drugome u vremenu i prostoru na način da bi sudar bio neizbježan ukoliko sudionici ne promijene smjer ili brzinu kretanja. Takve situacije zahtijevaju hitne i kritične manevre, poput naglog kočenja, ubrzanja ili skretanja, kako bi se spriječio sudar (Hydén, 1987).

Metoda analize prometnih konflikata razvijena je 1960-ih godina, a najpoznatiji oblik standardizacije predstavlja tzv. švedska metoda prometnih sukoba (Amundsen i Hydén, 1977). Izvorno su konflikti identificirani vizualno, oslanjajući se na opažanja educiranih promatrača koji su na terenu bilježili opasne situacije poput naglih kočenja ili izbjegnutih sudara. Međutim, razvoj tehnologije omogućio je objektivniji i precizniji pristup bilježenju ovih situacija korištenjem video tehnologije. Danas se prometni konflikti često analiziraju primjenom fiksnih kamera ili dronova, uz sve naprednije algoritme za automatsko izdvajanje putanja vozila iz videa.

Primjer takvog pristupa je studija Shawkyja i sur. (2023) provedena na kružnom raskrižju u Kairu, gdje su pomoću drona snimljeni tokovi vozila. Analiza prikupljenih video zapisa omogućila je identifikaciju konfliktnih situacija te precizno mjerenje pokazatelja sigurnosti, poput vremena naknadnog nailaska vozila (engl. *post-encroachment time*, PET) ili vremena do sudara (eng. *time-to-collision*). Prostorna distribucija i učestalost konflikata analizirane su s obzirom na geometrijske karakteristike kružnog raskrižja te specifičnosti ponašanja vozača. Rezultati studije pokazali su jasnu povezanost između neadekvatne geometrije te horizontalne i vertikalne signalizacije raskrižja i povećane učestalosti prometnih konflikata. St-Aubin i sur. (2015.) analizirali su promet na 40

kružnih raskrižja primjenom videozapisa, uspješno određujući trajektorije vozila s točnošću od 85 %. Ipak, metoda videoanalize ima određena ograničenja, poput smanjene kvalitete podataka uslijed ograničenog vidnog polja kamera, potrebe za kombiniranjem snimaka više kamera kod većih raskrižja, loših uvjeta osvjetljenja ili nepovoljnih vremenskih prilika. Iako se algoritmi za računalnu obradu videozapisa kontinuirano unaprjeđuju, još uvijek postoji izazov pouzdane detekcije svih sudionika u prometu, posebice biciklista i pješaka, u različitim uvjetima (Ismail i sur., 2013).

U suvremenim istraživanjima, alati poput Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) omogućavaju automatsku klasifikaciju konfliktnih situacija na temelju analize trajektorija vozila dobivenih iz videozapisa ili mikrosimulacijskih modela. Koristeći unaprijed zadane pragove sigurnosnih pokazatelja, SSAM određuje broj potencijalnih sudara tijekom promatranog razdoblja, čime se dobiva kvantitativna mjera sigurnosti kružnog raskrižja (Shawky, 2023). Primjena ovog pristupa značajno ubrzava analizu konfliktnih situacija te povećava ponovljivost i pouzdanost rezultata, omogućujući usporedbu razine prometne sigurnosti različitih prometnih rješenja.

U praksi se razvijaju statistički modeli koji povezuju učestalost prometnih konflikata s prometnim opterećenjem i projektnim elementima raskrižja, rezultirajući funkcijama sigurnosne uspješnosti (eng. Safety Performance Functions, SPF) temeljenima na konfliktima. Maji i Ghosh (2025) proveli su analizu na uzorku od 27 kružnih raskrižja u Indiji te razvili SPF modele kalibrirane na konfliktne situacije, s ciljem predviđanja očekivanog broja konflikata temeljem projektnih i prometnih obilježja lokacije. Za prikupljanje podataka korišteni su dronovi, a identifikacija konflikata provedena je pomoću softvera SSAM. Regresijski model uključuje ulazne parametre poput prometnog toka, širine kružnog kolnika, dimenzija središnjeg otoka, broja privoza i udjela motocikala u ukupnom prometu. Pokazalo se da veći središnji otoci i šire kružne kolničke trake statistički značajno smanjuju učestalost i ozbiljnost prometnih konflikata, dok veće prometno opterećenje i veće brzine vozila povećavaju vjerojatnost pojave ozbiljnih konflikata.

Drugi pristup modeliranju sigurnosti prometa na kružnim raskrižjima temelji se na primjeni mikrosimulacijskih alata (npr. PTV VISSIM, Aimsun) za analizu prometnih scenarija, nakon čega slijedi identifikacija i analiza konflikata. Saccomanno i sur. (2008) simulirali su jednake prometne uvjete za klasična semaforizirana raskrižja i kružna raskrižja kako bi usporedili učestalost konflikata te njihov intenzitet, izražen duljinom trajanja konflikta. Na uzorku od 12 različitih prometnih scenarija utvrdili su da kružna raskrižja, pri istim prometnim opterećenjima, ostvaruju dosljedno manji broj konflikata te kraće trajanje konfliktnih situacija u odnosu na semaforizirana raskrižja. Detaljan pregled literature koja koristi mikrosimulacijske modele za analizu sigurnosti prometa na kružnim raskrižjima dan je u Poglavlju 4.

U novijim istraživanjima sve je prisutnija primjena naprednijih tehnika modeliranja temeljenih na algoritmima strojnog učenja. Duan i sur. (2025) analizirali su podatke o prometnim konfliktima prikupljene bespilotnim letjelicama na kružnom raskrižju u Kini. Iz videozapisa su preuzeli precizne trajektorije vozila te identificirali konfliktne situacije. Potom su na dobivenim podacima trenirali više modela strojnog učenja (Random Forest, Support Vector Machine i XGBoost) s ciljem predviđanja konfliktnih situacija na prilazima i izlazima raskrižja na temelju trenutnog stanja prometa. Rezultati su pokazali da je model Random Forest ostvario najbolju učinkovitost, postigavši točnost predikcije visokorizičnih zona od 86 %.

U preglednom radu Li i suradnika (2024) sustavno je analizirano 105 znanstvenih istraživanja provedenih između 2000. i 2022. godine, s ciljem utvrđivanja mogućnosti primjene analize konflikata za ocjenu sigurnosti kružnih raskrižja. Autori ističu kako specifični obrasci kretanja prometnih tokova na kružnim raskrižjima rezultiraju jedinstvenim tipovima prometnih konflikata, zbog čega su postojeće metode analize konflikata, prvotno razvijene za autoceste i klasična raskrižja, neadekvatne i zahtijevaju prilagodbu posebnim obilježjima kružnih raskrižja. Čimbenici koji utječu na nastanak konflikata mogu se podijeliti u dvije ključne skupine: karakteristike infrastrukture i geometrije raskrižja te obilježja sudionika u prometu, odnosno ponašanje vozača i ostalih korisnika. Kao najznačajniji projektni parametar identificiran je vanjski polumjer kružnog raskrižja. Istraživanje ističe prednosti prometne mikrosimulacije u kombinaciji s metodom procjene sigurnosti temeljenom na surogatnim pokazateljima (SSAM). Takav pristup omogućuje provođenje analize prometnih konflikata u kontroliranim uvjetima, uzimajući pritom u obzir ponašanje vozača, lokalne prometne uvjete i geometrijske karakteristike pruža pouzdanu preliminarnu ocjenu sigurnosti kružnih raskrižja. Prednost ove metode očituje se u smanjenju troškova i vremenskih zahtjeva u odnosu na tradicionalne pristupe, istovremeno osiguravajući realističnu procjenu prometne sigurnosti predloženih projektnih rješenja.

Zaključno, brojna istraživanja potvrđuju sigurnosne prednosti kružnih raskrižja, osobito kroz smanjenje broja konfliktnih točaka, niže operativne brzine i ublažavanje posljedica prometnih nesreća u odnosu na standardna raskrižja. Sigurnosna učinkovitost izravno ovisi o odabranim projektnim elementima, poput veličine središnjeg otoka, širine kolnika, vanjskog promjera i defleksije. Dok pravilno projektirana kružna raskrižja značajno doprinose sigurnosti odvijanja prometa, neadekvatni projektni elementi mogu imati negativne posljedice te povećati rizik od sudara. Mikrosimulacijski alati, poput VISSIM-a u kombinaciji s SSAM-om, pokazuju visoku primjenjivost u analizi prometnih konflikata i predviđanju potencijalnih nesreća, ali njihova točnost zahtijeva detaljnu kalibraciju parametara ponašanja vozača i prometnog toka. Stoga je za učinkovito vrednovanje sigurnosti na kružnim raskrižjima preporučen višekriterijski pristup koji kombinira

empirijske analize s mikrosimulacijskim modelima, uz nužno uvažavanje specifičnosti pojedine lokacije.

3.5. Rezime - Pregled postojećih istraživanja

Opsežna bibliometrijska analiza znanstvene literature pokazuje kontinuirani rast interesa za istraživanja kružnih raskrižja, posebno u području prometne sigurnosti, kapaciteta i mikrosimulacijskog modeliranja. Pokazuje se da unatoč tome što su kružna raskrižja dugo prisutna u prometnoj teoriji i praksi, znatan dio istraživanja analizira njihovo izolirano djelovanje, dok interakcija kružnih raskrižja s drugim oblicima raskrižja, osobito semaforiziranim, ostaje nedovoljno istražena.

Dosadašnja istraživanja ukazuju na to da interakcija kružnih i semaforiziranih raskrižja može imati značajne implikacije na prometnu učinkovitost cijelih prometnih koridora. Premali međusobni razmaci mogu izazvati negativne posljedice poput povećanih vremena kašnjenja, dužih kolona vozila i viših emisija štetnih plinova, što može poništiti prednosti koje kružna raskrižja inače donose. Ovaj problem, prema analiziranoj dostupnoj literaturi, nije sustavno analiziran.

U metodološkom smislu, najčešće korišten pristup analizi interakcija raskrižja su prometne mikrosimulacije, a jedan od najrašireniji alat u znanstvenoj zajednici je softver PTV VISSIM. Kvaliteta rezultata dobivenih metodom prometnih mikrosimulacija uvelike ovisi o pravilnoj kalibraciji modela temeljem podataka stvarnih prometnih uvjeta i ponašanja vozača.

4. PRIMJENA PROMETNIH MIKROSIMULACIJA U ISTRAŽIVANJU KRUŽNIH RASKRIŽJA – PROGRAMSKI PAKET VISSIM

U ovom se poglavlju razmatra primjena prometnih mikrosimulacija u istraživanju kružnih raskrižja, s posebnim naglaskom na mogućnosti, ograničenja te suvremene trendove korištenja mikrosimulacijskog alata VISSIM.

Prometne mikrosimulacije razvijene su krajem 20. stoljeća kao odgovor na potrebu detaljnog analiziranja složenih prometnih uvjeta. Programski paket VISSIM postao je jedan od najčešće korištenih programa za analizu kružnih raskrižja, osobito u kontekstu procjene operativne učinkovitosti i prometne sigurnosti.

Ključnu ulogu pritom ima kalibracija modela, kojom se osigurava realističnost mikrosimulacijskih rezultata. U nastavku se navode ključni metodološki pristupi, ciljevi i parametri kalibracije, kao i kritički pregled relevantnih istraživanja objavljenih u posljednjem desetljeću.

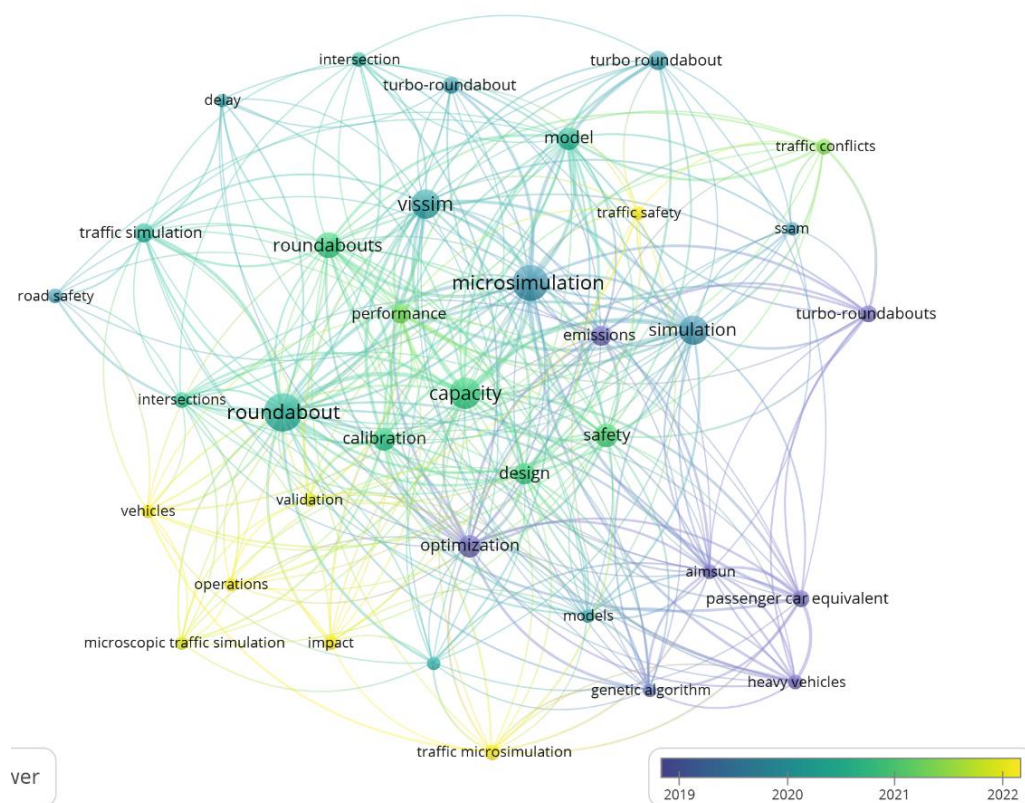
4.1. Pregled istraživanja kružnih raskrižja primjenom VISSIM-a

U posljednjem desetljeću (2015.–2025.) proveden je značajan broj istraživanja u kojima je primijenjen programski paket VISSIM (u daljnjem tekstu VISSIM) za funkcionalnu analizu kružnih raskrižja. Tematski, radovi u kojima su objavljeni rezultati istraživanja se mogu grupirati u četiri područja:

- (1) Operativna učinkovitosti kružnih raskrižja i razine uslužnosti,
- (2) Prometna sigurnost kružnih raskrižja temeljena na analizi konflikata,
- (3) Utjecaj novih tehnologija (npr. autonomnih vozila) na funkcioniranje kružnih raskrižja
- (4) Vrednovanje alternativnih geometrijskih rješenja na kružnim raskrižjima.

Metodološki, većina studija kombinira terenska mjerenja s prometnim mikrosimulacijama, čime analize, osim standardnih elemenata vezanih za geometrijske i prometne uvjete, uključuje ponašanje vozača što nadilazi mogućnosti klasičnih analitičkih proračuna.

Slika 4.1. prikazuje kronološki razvoj ključnih riječi u posljednjih deset godina na uzorku od 102 znanstvena rada u području primjene prometnih mikrosimulacija u istraživanju kružnih raskrižja. Pokazuje se da su recentnija istraživanja usmjerena na kapacitet i operativnu učinkovitost kružnih raskrižja, kalibraciju mikrosimulacijskih modela i validaciju te analizu prometne sigurnosti temeljenu na konfliktima. Prema zastupljenosti radova po zemljama, najveći broj istraživanja proveden je u SAD-u (24 rada), Italiji (20 radova), Kini (12 radova) te Portugalu i Sloveniji (po 8 radova).



Slika 4.1. Vizualizacija ključnih riječi od 2015. do 2025. godine (VOSviewer)

Brojna istraživanja provela su komparativnu analizu različitih metodoloških pristupa u procjeni kapaciteta kružnih raskrižja, uključujući analitičke, empirijske te mikrosimulacijske modele, što je detaljno elaborirano u Poglavlju 3.2. (Arroju i sur., 2015; Chen i Lee, 2016; Ali i Majid, 2023). Rezultati spomenutih studija ukazuju da prometni mikrosimulacijski modeli razvijeni u programu VISSIM pružaju pouzdane, precizne i dosljedne procjene kapaciteta kružnih raskrižja te predstavljaju prikladan alat za provedbu detaljnih analiza ove problematike.

Zhang i sur. (2015) pokazali su da prometnom mikrosimulacijom u VISSIM-u kalibriranom za lokalne uvjete dobiveni kapacitet kružnog raskrižja vrlo dobro korespondira s izmjerenim vrijednostima na terenu, što sugerira da je VISSIM primjeren za procjenu kapaciteta u heterogenim prometnim uvjetima.

LeBas (2015) je proveo usporednu analizu kružnih raskrižja i semaforiziranih raskrižja na prometnom koridoru u SAD-u, korištenjem VISSIM-a. Rezultati su pokazali da zamjena semaforiziranih raskrižja kružnim raskrižjima značajno smanjuje prosječna kašnjenja i duljine kolona, posebno u uvjetima uravnoteženog prometnog toka, dok kod visokog neuravnoteženog protoka prednost semaforiziranih raskrižja može biti izraženija.

Paul i sur. (2021) analizirali su utjecaj visokog udjela motocikala na kružnim raskrižjima u Indiji – varirajući udio motocikala od 35% do 85% u simulacijama – te istražili mogu li se odvojenim prometnim trakama za motocikle poboljšati performanse raskrižja. Njihovi

rezultati su pokazali izražen utjecaj strukture prometa na kapacitet te potvrdili da odgovarajuće kalibriran VISSIM model može precizno kvantificirati takve efekte u uvjetima heterogenog prometa.

Klos i Sobota (2019) analizirali su postojeće dvotračno kružno raskrižje te u VISSIM-u ispitali utjecaj izmjene ulazne geometrije na pokazatelje učinkovitosti. Njihova simulacijska studija pokazala je da poboljšanje ulaznih projektnih parametara može povisiti razinu uslužnosti za jednu kategoriju i smanjiti prosječno vrijeme kašnjenja na svim privozima.

U istraživanju (Nazaryan i Fang, 2020) analiziran je utjecaj duljine dodatnog ulaznog prometnog traka na prosječno vrijeme kašnjenja na dvotračnim kružnim raskrižjima upotrebom alata VISSIM. Na temelju rezultata prometnih mikrosimulacija razvijen je kinematički model koji opisuje promjenu brzine vozila u funkciji prijeđenog puta na dodatnom traku. Model kombinira analitički pristup i terenska mjerenja.

Elhassy i sur. (2020) analizirali su mogućnost rekonstrukcije postojećeg trotračnog kružnog raskrižja u Kataru u turbo-kružno raskrižje, upotrebom VISSIM-a. Istraživanje je pokazalo da standardno kružno raskrižje ima bolju razinu uslužnosti od turbo-kružnog raskrižja kod velikog prometnog opterećenja (4500 voz/h) ukazujući na značajnost prometnih mikrosimulacija u procesu definiranja novog rješenja.

Leonardi i Distefano (2023) analizirali su mogućnost povećanja kapaciteta i poboljšanja sigurnosti u urbanim područjima Italije konverzijom dvotračnih kružnih raskrižja u turbo-kružna raskrižja. Simulacije u programu VISSIM pokazale su značajna smanjenja kašnjenja vozila i povećanje protočnosti, osobito u uvjetima većeg prometnog opterećenja. Zaključeno je da turbo-raskrižja mogu efikasno povećati kapacitet i istovremeno smanjiti broj konfliktnih točaka, čime se poboljšava sigurnost sudionika u prometu.

Tollazzi i sur. (2020) proveli su komparativnu simulacijsku analizu nekoliko inovativnih varijanti kružnih raskrižja, uključujući turbo, *reduced-turbo*, *flower* i *semi-turbo* kružno raskrižje. Koristeći VISSIM mikrosimulacije, autori su usporedili performanse navedenih varijanti na temelju kapaciteta, vremena čekanja i duljine kolona vozila. Rezultati su pokazali da turbo-raskrižja pružaju najbolji omjer između povećanog kapaciteta i sigurnosti, posebno u uvjetima visokog prometnog opterećenja, dok *flower*-raskrižja mogu biti efikasnija kod specifičnih prometnih tokova s visokim udjelom desnih skretača.

Gallelli i sur. (2016) istražili su mogućnost konverzije postojećeg dvotračnog kružnog raskrižja u turbo kružno raskrižje u Italiji koristeći VISSIM. Rezultati simulacije pokazali su da turbo-varijanta znatno povećava kapacitet raskrižja, ostvarujući povećanje protočnosti između 15 % i 84 % ovisno o privozu i prometnom opterećenju. Studija je zaključila da su turbo-kružna raskrižja optimalna za rješavanje problema gužvi na postojećim prometnim čvorištima u urbanim sredinama.

Jedan od pristupa optimizaciji prometnih tokova na preopterećenim kružnim raskrižjima jest uvođenje prometne svjetlosne signalizacije. Asim (2020) je u Peshwaru analizirao četiri višetračna kružna raskrižja te testirao model potpunog semaforiziranja kružnog raskrižja u VISSIM-u. Rezultati su pokazali da potpuno semaforizirano raskrižje ima veći kapacitet i znatno manje ukupno vrijeme kašnjenja i kraće kolone u usporedbi s postojećim nesemaforiziranim kružnim raskrižjem. Istraživanje koje su proveli Osei i sur, (2019) pokazalo je da semaforizacija dvaju kružnih raskrižja u Gani može povećati kapacitet za 50 % uz osjetno smanjenje kašnjenja i duljine vremena kašnjenja.

4.2. Analiza sigurnosti prometa na kružnim raskrižjima uz primjenu VISSIM-a

Učinkovitost prometnih sustava ovisi o nizu stohastičkih parametara, zbog čega su ispitivanja u stvarnim uvjetima dugotrajna i mogu negativno utjecati na sigurnost svih sudionika u prometu (Ištoka Otković i sur., 2013).

Upotreba softvera VISSIM u kombinaciji s modelom Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) pruža vrijedan okvir za procjenu sigurnosti kružnih raskrižja simuliranjem međuodnosa vozila i predviđanjem prometnih konflikata.

Za razliku od tradicionalnih metoda procjene sigurnosti koje se oslanjaju na dugogodišnje prikupljanje podataka o prometnim nesrećama i često uključuju subjektivne procjene prometnih konflikata, SSAM omogućuje automatiziranu identifikaciju, klasifikaciju i kvantifikaciju konfliktnih situacija između vozila (FHWA, 2008; Vancencelos i sur., 2014; Kim i sur., 2018). Time se omogućuje rana identifikacija potencijalno rizičnih mjesta unutar prometnog sustava te usporedba alternativnih rješenja u fazi planiranja, bez potrebe za čekanjem stvarnih nesreća.

Postupak korištenja SSAM-a obuhvaća nekoliko koraka:

- (1) **Mikrosimulacija prometa:** Odabrani prometni scenarij simulira se u softveru za mikrosimulaciju (npr. VISSIM, AIMSUN ili Paramics). Radi osiguranja statističke pouzdanosti, simulacije se obično provode kroz više ponavljanja s različitim početnim uvjetima generiranim nasumično.
- (2) **Generiranje trajektorija vozila:** Svako pokretanje simulacije rezultira stvaranjem datoteke (.trj) koja sadrži detaljne informacije o položaju, brzini i interakciji vozila kroz vrijeme.
- (3) **Analiza trajektorija pomoću SSAM-a:** SSAM kao post-procesorski alat analizira simulacijske trajektorije te automatski identificira i klasificira prometne konflikte između vozila.

Temeljna funkcija SSAM-a je identifikacija konfliktnih situacija te izračun relevantnih surogatnih pokazatelja koji omogućuju procjenu ozbiljnosti svakog pojedinog konflikta (FHWA, 2008; Essa i Sayed, 2015).

Konflikti u SSAM-u definirani su kao situacije u kojima su dva vozila na kolizijskoj putanji te jedno od njih mora poduzeti manevar izbjegavanja (kočenje, skretanje) kako bi se izbjegao sudar. Brojem i vrstom konflikata iz simulacije može se predvidjeti relativna sigurnost različitih prometnih scenarija, što je temelj koncepta surogatnih pokazatelja sigurnosti (FHWA, 2008; Gettman i Head, 2003; Lorion i Persaud, 2015).

Ključna dva pokazatelja su vrijeme do sudara (eng. *Time-to-Collision*, TTC) i vrijeme nakon prolaska (eng. *Post-Encroachment Time*, PET) (FHWA, 2008; Essa i Sayed, 2015).

Vrijeme do sudara definira se kao minimalno preostalo vrijeme do potencijalnog sudara za dva vozila ako nastave svojim trenutačnim brzinama i putanjama.

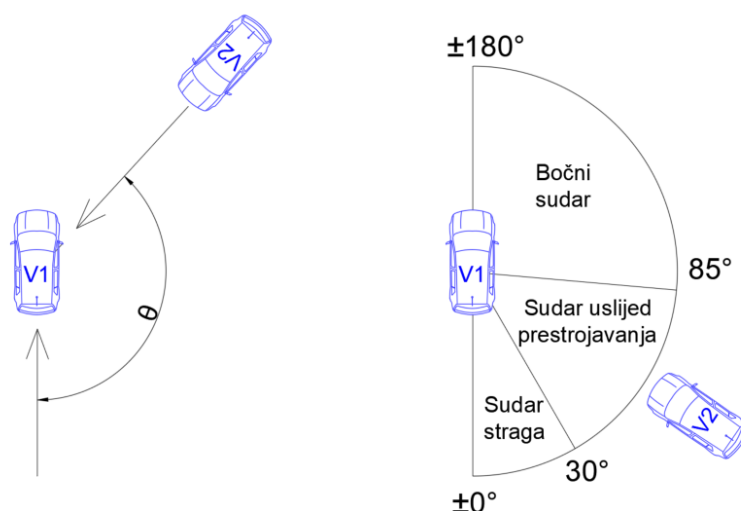
Vrijeme nakon prolaska definira se za situacije križanja putanja – to je vremenska praznina između trenutka kada prvo vozilo napusti mjesto mogućeg sudara i trenutka kada drugo vozilo stigne na to mjesto (FHWA, 2008).

Softver SSAM koristi unaprijed definirane pragove za ključne surogatne pokazatelje kako bi odredio je li interakcija vozila dovoljno rizična da bi se klasificirala kao konfliktna situacija. Prema zadanim postavkama, konflikt se registrira ako minimalna vrijednost pokazatelja TTC padne ispod 1,5 sekundi, odnosno ako vrijednost pokazatelja PET, u slučaju križanja putanja vozila, padne ispod 5 sekundi.

Ovi pragovi utemeljeni su na ranijim istraživanjima – kritična vrijednost TTC od 1,5 sekundi predložena je u radovima Sayed i sur. (1994), Haywarda (1972) te Li i sur. (2024), dok se kriterij PET-a oslanja na studije Hydéna (1987), Wua i sur. (2018) te Arafata i sur. (2021). Iako korisnik može prilagoditi vrijednosti pragova ovisno o specifičnostima analizirane situacije, u okviru ovog istraživanja korištene su programski zadane vrijednosti.

SSAM također automatski klasificira vrstu svakog konflikta na temelju geometrije međusobnog kretanja vozila, odnosno kuta između njihovih smjerova kretanja (slika 4.2.). Sukladno tom pristupu:

- (1) Ako je kut između smjerova kretanja vozila manji od 30° , konflikt se kategorizira kao sudar straga (eng. *rear-end*);
- (2) Ako je kut veći od 85° , konflikt se označava kao bočni sudar (eng. *crossing*),
- (3) Srednje vrijednosti kuta (30° – 85°) pripisuju se konfliktima uslijed prestrojavanja (eng. *lane-change*)



Slika 4.2. Vrsta sudara prema kutu između smjera kretanja vozila

Bulla-Cruz i sur. (2020) proveli su studiju procjene sigurnosti na dvotračnom kružnom raskrižju u Kolumbiji, koristeći VISSIM i SSAM. Usporedili su tri metode analize konflikata: švedsku tehniku prometnih konflikata (TCT), VISSIM simulacijski alat u kombinaciji sa SSAM-om te analizu izloženosti na temelju susreta vozila. Rezultati su pokazali da je kalibracijom faktora udaljenosti (eng. *Safety Distance*) moguće dobiti procjenu broja konflikata koji su u skladu s podacima dobivenim terenskim istraživanjima.

Giuffrè i sur. (2017) analizirali su sigurnosne i operativne aspekte alternativnih tipova kružnih raskrižja (poput turbo, *flower* i *target* kružnih raskrižja) u usporedbi sa standardnim višetrakčnim kružnim raskrižjima. Koristeći VISSIM i SSAM usporedili su broj konflikata i pokazatelje razine uslužnosti. Njihovi rezultati su pokazali da novi oblici kružnih raskrižja mogu ostvariti viši kapacitet te da je SSAM učinkovit alat za procjenu konfliktnih situacija.

Vasconcelos i sur. (2014) proveli su dvostruku validaciju rezultata SSAM-a, u urbanim prometnim uvjetima. Konceptualna faza uspoređuje broj simuliranih konflikata sa brojem prometnih nesreća koristeći tri neovisna analitička prediktivna modela. Dobivene krivulje konflikt – protok odgovaraju obliku krivulja nesreća – protok predviđenih regresijskim modelima. Terenska istraživanja provedena su na dva nesemaforizirana i dva kružna raskrižja u Coimbri, uključujući promatranje konflikata (9 sati po lokaciji) te mikrosimulacijskim modelima. Rezultati pokazuju da SSAM sustavno podcjenjuje broj konflikata, djelomice zbog strogo postavljenog praga vremena do sudara (eng. *time to collision*) i izostanka pješaka u modelu, ali vjerno reproducira dnevni ritam te prostornu distribuciju potencijalnih konflikata. To upućuje da je alat vrlo koristan za relativnu usporedbu projektnih varijanti, dok se za apsolutno kvantificiranje

rizika traži dodatna kalibracija parametara ponašanja vozača i detaljnije modeliranje pješačkih interakcija.

Istraživanje Giuffrè i sur. (2018), kroz detaljnu kalibraciju modela u alatu AIMSUN i VISSIM, istražuje može li se temeljem simuliranih konflikata (SSAM) razviti pouzdan model predviđanja stvarnih nesreća na kružnim raskrižjima. U empirijskom dijelu istraživanja obuhvaćeno je 26 kružnih raskrižja u Sloveniji – jednotračnih, dvotračnih i turbo raskrižja. Kalibracija AIMSUN-a provedena je genetskom optimizacijom triju parametara (vrijeme reakcije, minimalni razmak i koeficijent prihvatanja brzine) dok je za VISSIM ručno prilagođen Wiedemann-ov model kroz tri parametra udaljenosti. Autori su razvili linearni model s tri varijable: brojem konflikata u vršnom satu, omjerom prometnog opterećenja u vršnom satu i unutar 24 sata te vanjskim promjerom kružnog raskrižja. Model je potvrdio značajnost potencijalnih konflikata kao prediktora stvarnih nesreća. Pouzdanost modela iznosi 0,72.

Gallelli i sur. (2021) istraživali su operativne i sigurnosne učinke prenamjene opterećenog klasičnog raskrižja u kružno raskrižje u južnoj Italiji. U radu su uspoređene dvije projektne varijante: standardno višetračno kružno raskrižje i turbo-kružno raskrižje eliptičnog oblika (eng. *egg roundabout*). Operativne performanse analizirane su mikrosimulacijskim modelom u programu VISSIM, a rezultati su pokazali da turbo-kružno raskrižje ostvaruje značajno manje zastoje i kraća vremena putovanja u odnosu na standardno rješenje. Za procjenu sigurnosnih performansi korišten je alat SSAM, kojim su određeni očekivani broj konflikata te procijenjene vjerojatnosti i težine potencijalnih sudara. Između analiziranih varijanti nije utvrđena značajna razlika u sigurnosnoj razini – broj konflikata i njihove karakteristike bili su približno podjednaki.

4.3. Modeli kalibracije

Učinkovitost primjene prometnih mikrosimulacijskih modela značajno ovisi o kvalitetno provedenoj kalibraciji. Cilj kalibracije je postići što veću podudarnost između simuliranih prometnih pokazatelja (poput vremena putovanja, brzina i protoka) i stvarnih vrijednosti izmjerenih na terenu (Espejel-García i sur., 2017). Bez precizne kalibracije, rezultati simulacije mogu znatno odstupati od realnog ponašanja prometnog sustava, što model čini nepouzdanom osnovom za donošenje odluka o prometnim rješenjima (Li i sur., 2013).

Kalibracija mikrosimulacijskih modela može se provoditi ručno ili automatizirano, pri čemu su razvijene različite metodologije kalibracije u protekla dva desetljeća. Ručna kalibracija najstarija je i još uvijek široko primijenjena metoda – analitičar iterativno podešava vrijednosti ulaznih parametara (npr. parametre modela vožnje) i uspoređuje rezultate simulacije s terenskim podacima sve dok se ne postigne zadovoljavajuće poklapanje (Park i Qi, 2005).

Automatizirana kalibracija temelji se na računalnim algoritmima i optimizacijskim metodama koje sustavno pretražuju prostor parametara s ciljem smanjenja odstupanja između simuliranih i izmjerenih vrijednosti. Brojni autori razvili su računalne postupke za kalibraciju koji omogućuju znatno brže pretraživanje velikog broja kombinacija parametara u usporedbi s ručnim pristupom (Ma i Abdulhai, 2002; Park i Qi, 2005; Park i Schneeberger, 2003; Espejel-Garcia, 2017). U literaturi su korišteni različiti algoritmi poput genetskog algoritma (GA), evolucijskog algoritma, Nelder-Meadove metode, postupne analize osjetljivosti, PA-DDS metode te optimizacije rojem čestica (PSO) (Espejel-Garcia, 2017; Alimehaj Rrecaj i M. Bombol, 2015).

Ograničenja navedenih automatiziranih tehnika su ta što zahtijevaju veliki broj iteracija, pažljivo oblikovanu funkciju cilja i znatnu računalnu snagu, osobito pri kalibriranju složenijih mreža. Uspješna primjena pretpostavlja i dobro poznavanje simulacijskog alata te principa rada odabranog optimizacijskog algoritma. Stoga se u praksi ručna kalibracija i dalje često koristi, osobito kada je model relativno jednostavan ili kada analitičar želi potpunu kontrolu nad postupkom. Ručni pristup omogućuje oslanjanje na inženjersku intuiciju, npr. postupno podešavanje pojedinih parametara i praćenje njihova učinka, što nerijetko olakšava pronalaženje izvora neusklađenosti modela (Hourdakis i sur., 2003; Rajasakran, 2008).

Tijekom posljednjeg desetljeća primjena metoda umjetne inteligencije u svrhu kalibracije mikrosimulacijskih modela postala je sve učestalija među istraživačima.

Jedna od ključnih značajki VISSIM-a je primjena Wiedemannovog psihofizičkog modela praćenja vozila za simulaciju longitudinalnog kretanja vozila (eng. *car-following model*). Ovaj model, kojeg je razvio R. Wiedemann 1974., opisuje ponašanje vozača kroz različite režime vožnje i uključuje pojam sigurnosnih razmaka – razmak pri zaustavljanju i razmak pri vožnji – koje vozači održavaju u prometnom toku. Također podržava bočno kretanje vozila (pretjecanje, promjenu traka) te konfliktne situacije na mjestima križanja putanja uz primjenu odgovarajućih pravila prvenstva (Fellendorf i Vortisch, 2011). U praksi i znanstvenim istraživanjima najčešće se koriste dvije verzije Wiedemannovog modela (Wiedemann 74 i Wiedemann 99) ovisno o karakteristikama prometnog toka koji se analizira. Wiedemann 74 namijenjen je simuliranju prometnih tokova u urbanim uvjetima, primjerice na gradskim prometnicama, semaforiziranim raskrižjima te zonama s učestalim zaustavljanjima i intenzivnim interakcijama između vozila. Wiedemann 99 bolje opisuje uvjete slobodnog toka na otvorenim cestama te se najčešće koristi pri simulaciji autocesta i brzih cesta (Gunarathne i sur., 2023, Ahmed i sur, 2021).

Wiedemannov model 74 se temelji na definiranju parametara: prosječni razmak zaustavljenih vozila (eng. *average standstill distance*), dodatni dio sigurnosnog razmaka (eng. *additive part of safety distance*) i multiplikativni dio sigurnosnog razmaka (eng. *multiplicative part of safety distance*). Ova tri parametra izravno kontroliraju model razmaka između vozila u vožnji i stajanju te su u studijama identificirani kao vrlo osjetljivi

– male promjene u njihovim vrijednostima mogu znatno promijeniti simulirane rezultate (Gunarathne i sur., 2023; Lu & Wang, 2015). U kalibraciji gradske prometne mreže Jayasooriya i Bandara (2018) te Park i dr. (2006) utvrdili su da su prosječni razmak zaustavljenih vozila, dodatni i multiplikativni dio sigurnosnog razmaka među parametrima koji najviše utječu na duljinu kolona i vrijeme čekanja.

Prilikom kalibracije mikrosimulacijskih modela izrađenih u VISSIM-u nužno je precizno odrediti prometne pokazatelje iz stvarnog sustava koji će se koristiti kao kriteriji za podešavanje parametara modela. Prema dostupnoj literaturi, različiti pokazatelji koriste se kao ciljevi kalibracije, od kojih su najčešće korišteni vrijeme putovanja, brzina, protok, prosječno vrijeme kašnjenja i duljina kolone (Yaron & Liu, 2008). Neki autori provode kalibraciju na samo jedan pokazatelj, dok drugi primjenjuju višekriterijski pristup simultano nastojeći uskladiti više prometnih pokazatelja poput brzina i protoka ili vremena putovanja i duljina kolona (Ištoka Otković i sur., 2020; Yu & Fan, 2017; Fang i sur., 2022). Međutim, višekriterijska kalibracija često rezultira povećanom složnošću i računalnom zahtjevnošću. Kao rješenje za ove izazove, neki autori primjenjuju ponderiranje ciljeva ili koriste sekvencijalne postupke kalibracije.

Skabardonis i sur. (2010) predložili su kalibracijski postupak u tri koraka, kojim se prvo usklađuju kapaciteti, potom protoci i na kraju vremena putovanja.

Chiappone i sur. (2016) koristili su genetski algoritam za kalibraciju mikrosimulacijskog modela prometnog toka na dijelu autoceste A22 u Italiji, implementirajući optimizacijski pristup čija je ciljna funkcija bila minimizacija odstupanja između simuliranih i empirijskih odnosa brzina i gustoća prometa. Njihova analiza pokazala je visoku razinu slaganja rezultata potvrđenu statistikom GEH.

Cunto i Saccomanno (2008) razvili su složenu proceduru kalibracije i validacije usmjerenu na sigurnosne pokazatelje na signaliziranim raskrižjima, koristeći genetski algoritam za optimalno podešavanje parametara Wiedemannovog modela praćenja vozila u simulacijskom programu VISSIM. Njihov pristup pokazao se uspješnim u postizanju realističnih simulacija rizika od sudara straga.

Park i Qi (2005) predložili su sustavni okvir kalibracije VISSIM modela koji uključuje optimizacijske algoritme poput genetskog algoritma, s ciljem minimizacije pogreške u prosječnom vremenu putovanja kroz raskrižja. Njihova metoda uključila je statističku analizu za identifikaciju ključnih parametara.

Kim (2006) je razvio dvoetažni kalibracijski okvir za simultano optimiranje parametara ponašanja vozača i ishodišno - odredišne matrice korištenjem kombinacije genetskog algoritma i proširenog Kalmanovog filtra, pri čemu je korišten Kolmogorov-Smirnov test za procjenu slaganja simuliranih i empirijskih distribucija vremena putovanja.

Llorca i sur. (2015) su proveli detaljnu kalibraciju modela pretjecanja u ruralnim uvjetima na temelju mikroskopskih i makroskopskih pokazatelja, demonstrirajući važnost korištenja detaljnih ponašajnih podataka za preciznu kalibraciju mikrosimulacija.

Vrijeme putovanja na određenom cestovnom segmentu ili kroz prometnu mrežu jedan je od najčešće korištenih ciljeva kalibracije mikrosimulacijskih modela, jer ovaj pokazatelj integrira brojne aspekte ponašanja vozača poput odabira brzine, reakcije na vozilo ispred, ubrzavanja i usporavanja te vremena čekanja na raskrižjima. Prednost korištenja vremena putovanja za kalibraciju modela ogleda se u tome što ga je relativno jednostavno izmjeriti u stvarnim uvjetima. Za mjerenje vremena putovanja može se koristiti primjenom različite tehnologije, primjerice GPS uređaj instaliran u vozilima, Bluetooth senzora ili metoda automatskog prepoznavanja registarskih oznaka (Ištoka Otković i sur., 2013; Park & Qi, 2005; Toledo i sur., 2004).

S obzirom da je vrijeme putovanja osjetljivo kako na uvjete slobodnog prometnog toka, tako i na uvjete zagušenja, kalibracija modela prema ovom pokazatelju zahtijeva prilagodbu distribucije željenih brzina (za pravilno modeliranje slobodnog toka) te parametara ponašanja vozača (radi preciznog prikaza formiranja kolona i usporenja). Ištoka Otković i sur. (2013) naglašavaju prednost korištenja vremena putovanja kao ključnog indikatora kalibracije upravo zbog jednostavne mjerljivosti i njegove direktne povezanosti s ponašanjem vozača, posebice u kontekstu reakcijskih vremena. Razmatrano je vrijeme putovanja između dvije kontrolne točke, maksimalna duljina reda čekanja i broj zaustavljanja vozila na ulazu u kružno raskrižje. Glavni cilj istraživanja bio je utvrditi primjenjivost neuronskih mreža za kalibraciju prometnog mikrosimulacijskog modela u softveru VISSIM. Korišteni kalibracijski parametri uključivali su rezoluciju simulacije, broj promatranih vozila koja izlaze iz raskrižja, prosječni razmak zaustavljenih vozila, dodatni dio sigurnosnog razmaka, multiplikativni dio sigurnosnog razmaka, maksimalna i minimalna udaljenost promatranja u smjeru vožnje i brzina vozila. Rezultati istraživanja pokazali su visoku uspješnost kalibracije modela. Metoda je dodatno validirana primjenom na drugom kružnom raskrižju u Osijeku, kao i na prometnoj mreži u središtu Grada Rijeke (Ištoka Otković i sur., 2020), pri čemu se pokazalo kako učinkovito identificira razlike u ponašanju vozača.

I drugi autori ističu prednost vremena putovanja kao kalibracijskog kriterija. Park i Qi (2005) proveli su kalibraciju VISSIM modela semaforiziranog raskrižja minimiziranjem razlike između simuliranog i izmjerenog vremena putovanja kroz raskrižje, dok su Toledo i sur. (2004) u svom istraživanju koristili vremena putovanja na različitim rutama kao temeljni kalibracijski indikator unutar mikrosimulacijskog softvera MITSIMLab, za autoceste i urbane prometnice.

4.4. Rezime – Primjena prometnih mikrosimulacija u istraživanju kružnih raskrižja – Programski paket VISSIM

Primjena prometnih mikrosimulacija u istraživanju kružnih raskrižja pokazala se izuzetno korisnom za detaljnu analizu operativne učinkovitosti i prometne sigurnosti. Alat VISSIM, zahvaljujući svojoj fleksibilnosti i mogućnosti detaljnog modeliranja ponašanja vozača, predstavlja jedan od najčešće korištenih alata za ovu vrstu istraživanja. U posljednjem desetljeću, istraživanja primjene VISSIM-a istaknula su važnost kalibracije modela kako bi se postigla visoka razina vjerodostojnosti rezultata simulacija.

Analiza recentnih istraživanja potvrđuje da primjena mikrosimulacija pruža pouzdane rezultate u procjeni kapaciteta i operativnih performansi kružnih raskrižja, posebno kada se kombiniraju s precizno provedenim terenskim mjerenjima. Istovremeno, analizom prometne sigurnosti putem modela poput SSAM-a omogućena je proaktivna procjena sigurnosnih rizika.

Definiranje kalibracijskih ciljeva, među kojima se posebno ističe vrijeme putovanja kao indikator koji najbolje integrira ponašanje vozača u simulaciji, pokazalo se ključnim za postizanje točnosti simulacijskih rezultata. Pritom su metode kalibracije, bilo ručne ili automatizirane, dokazale svoju učinkovitost. Ručna kalibracija posebno se ističe zbog mogućnosti izravne kontrole i detaljnog razumijevanja procesa te lakšeg prepoznavanja i ispravljanja izvora neusklađenosti između modela i stvarnih uvjeta. Stoga je ručna metoda kalibracije odabrana za nastavak istraživanja.

5. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju prikazan je metodološki okvir primijenjen u istraživanju, koji obuhvaća definiranje istraživačkog pristupa, tijekom istraživanja te korištene alate i statističke metode.

Detaljno su opisani i obrazloženi ključni koraci istraživanja, od pregleda postojeće literature i tehničke regulative, terenskih mjerenja i izrade prometnih mikrosimulacijskih modela do razvoja i validacije regresijskih modela za predikciju analiziranih pokazatelja. Na kraju poglavlja dane su karakteristike i opis korištenih softverskih alata te statističkih metoda, čija primjena omogućava analizu baze podataka i donošenje znanstveno utemeljenih zaključaka.

5.1. Istraživački pristup

U ovom je istraživanju primijenjen primarno kvantitativni istraživački pristup s ciljem utvrđivanja uzročno-posljedičnih odnosa između obilježja prometnog koridora i analiziranih varijabli – vremena putovanja i ukupnog broja konflikata. Odabir kvantitativne metodologije opravdan je potrebom za objektivnim prikupljanjem numeričkih podataka, njihovom statističkom obradom te testiranjem uzročnih veza (Neuman, 2014).

Odabrani kvantitativni deduktivni pristup omogućuje pouzdano statističko dokazivanje utjecaja određenih projektnih i prometnih parametara na istraživane varijable, čime se postiže viša razina objektivnosti i omogućava generalizacija zaključaka na slične prometne sustave.

Kvalitativni pristup primijenjen je tijekom pregleda i analize postojeće tehničke regulative i znanstvenih istraživanja, s ciljem identifikacije znanstvene praznine te definiranja istraživačkih ciljeva i hipoteza.

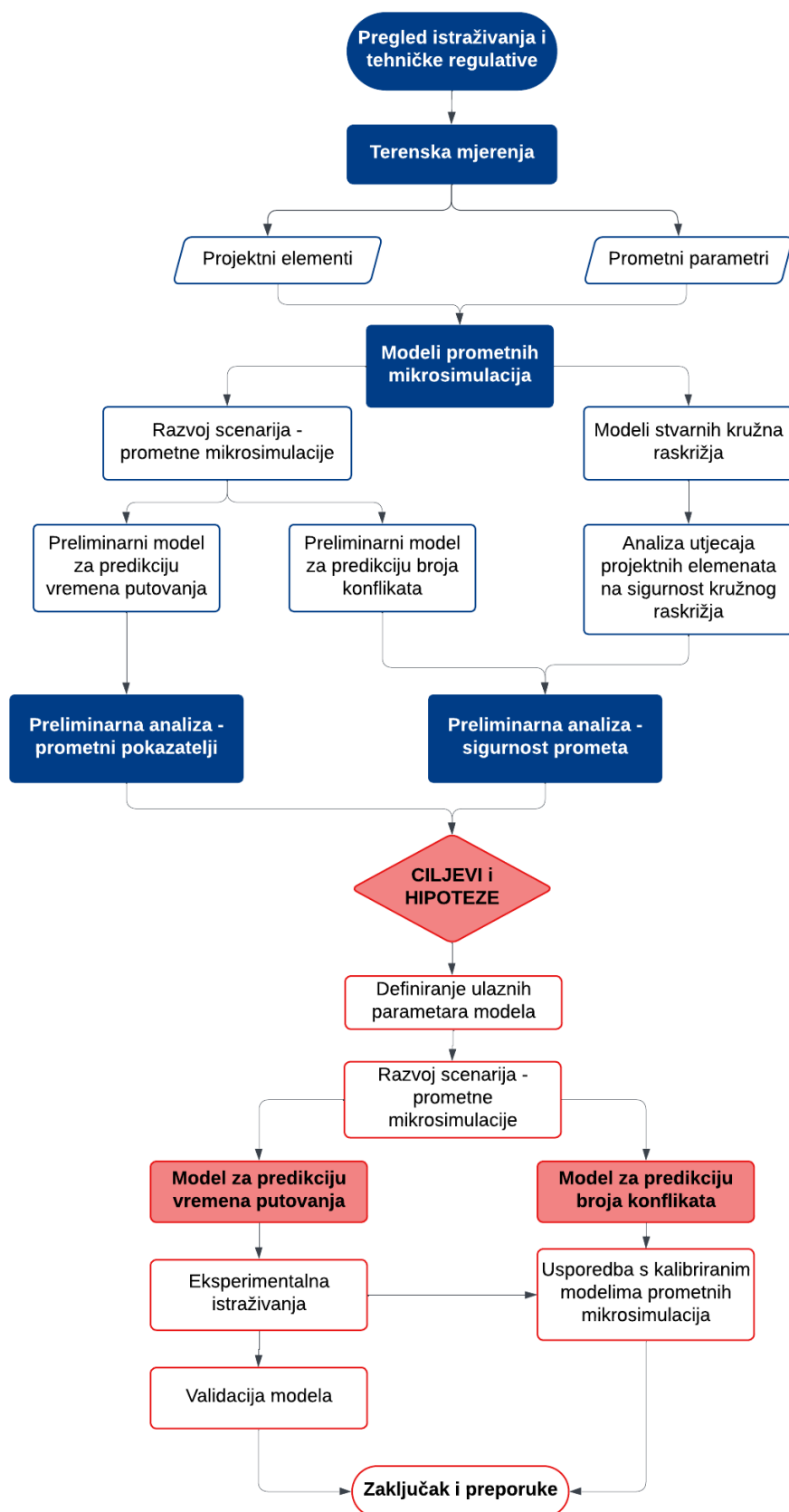
Metodološka specifičnost ovog rada očituje se u kombiniranoj primjeni empirijskih metoda, prometnih mikrosimulacija u kombinaciji s modelom procjene sigurnosti temeljenom na surogatnim pokazateljima (SSAM) te naprednih statističkih analiza. Empirijski dio obuhvatio je terenska mjerenja relevantnih prometnih i projektnih parametara te prikupljanje podataka o stvarnim vremenima putovanja vozila kroz promatrane prometne koridore. Na temelju prikupljenih podataka izrađeni su detaljni mikrosimulacijski modeli, omogućujući eksperimentalnu evaluaciju različitih scenarija u kontroliranim uvjetima.

Kao indikator prometne sigurnosti primijenjeni su prometni konflikti temeljeni na pretpostavci da veći broj i ozbiljnost konflikata impliciraju veći rizik od pojave prometnih nesreća. Primjena ovakvih surogatnih mjera sigurnosti posebno je pogodna kada nisu dostupni pouzdani podaci o stvarnim nesrećama.

5.2. Provedba istraživanja

Metodologija istraživanja temelji se na primjeni empirijskih metoda, metoda prometnih mikrosimulacija te statističkih metoda. Kao primarni alat korišten je softver PTV VISSIM koji predstavlja mikroskopski, diskretan i stohastičan model za prometnu mikrosimulaciju.

Plan istraživanja prikazan je dijagramom toka na slici 5.1, a temeljni koraci provedbe mogu se sažeti kako slijedi.



Slika 5.1. Metodologija istraživanja

1. Pregled istraživanja i tehničke regulative (detaljnije u Poglavlju 2, 3 i 4): U početnoj fazi istraživanja proveden je sveobuhvatan pregled domaćih i međunarodnih tehničkih regulativa te recentnih znanstvenih istraživanja u području planiranja i projektiranja kružnih raskrižja. Na temelju pregleda literature identificirani su ključni problemi i sumirani zaključci srodnih istraživanja.

2. Terenska mjerenja - Prikupljanje podataka (detaljnije u Poglavlju 6): U drugoj fazi istraživanja provedena su opsežna terenska mjerenja na devet jednotračnih, srednje velikih urbanih kružnih raskrižja u gradu Rijeci. Prikupljeni su detaljni podaci o njihovim projektnim elementima i prometnim parametrima. Geometrijske značajke obuhvaćale su vanjski polumjer raskrižja, širinu kružnog kolnika, širinu ulaznih i izlaznih prometnih trakova, širinu voznog traka, ulazne i izlazne polumjere, duljinu razdjelne površine, ulazni kut, uzdužni nagib privoza, polumjer središnjeg otoka te širinu povoznog dijela otoka. Prometni parametri uključivali su dnevno i vršno prometno opterećenje, strukturu i distribuciju prometa, operativne brzine te postotak vozila koja prekoračuju propisano ograničenje brzine. Prikupljeni podaci poslužili su kao baza za daljnja istraživanja i definiranje ulaznih parametara vezanih za količinu, strukturu i distribuciju prometa u prometnim mikrosimulacijskim modelima.

3. Modeli prometnih mikrosimulacija (detaljnije u Poglavlju 6): U drugoj fazi razvijeni su detaljni mikrosimulacijski modeli kružnih raskrižja primjenom softvera VISSIM. Izrađene su dvije skupine mikrosimulacijskih modela:

- (1) **Modeli temeljeni na definiranim scenarijima** Oblikovan je generički prometni mikrosimulacijski model reprezentativnog jednotračnog urbanog kružnog raskrižja srednje veličine. Na tom modelu simulirani su različiti scenariji u kojima su varirani ulazni parametri vezani za promet i razmak raskrižja za dva slučaja: izolirano kružno raskrižje te kružno raskrižje u interakciji sa semaforiziranim raskrižjem. U preliminarnim simulacijama varirana je udaljenost između promatranih raskrižja (od 40 do 120 m), prometno opterećenje u vršnom satu te omjeri raspodjele prometa na glavnom i sporednom smjeru.
- (2) **Modeli stvarnih kružnih raskrižja**: Izrađeni su prometni mikrosimulacijski modeli devet stvarnih kružnih raskrižja utemeljeni na izmjeranim geometrijskim i prometnim podacima. Ovi modeli korišteni su za analizu utjecaja projektnih elemenata na prometnu sigurnost predmetnih raskrižja.

4. Preliminarna analiza (detaljnije u Poglavlju 6): Preliminarna analiza je obuhvatila detaljnu statističku obradu dobivenih rezultata prometnih mikrosimulacija:

- (1) Uspostavljen je **preliminarni model za predikciju vremena putovanja** duž promatranog prometnog koridora koji je objavljen u znanstvenom članku (Klobučar i sur., 2025a).

(2) Iz detaljnih trajektorija vozila u VISSIM modelu identificirani su i kvantificirani konflikti primjenom alata SSAM (Surrogate Safety Assessment Model). Broj zabilježenih konflikata poslužio je kao kvantitativni pokazatelj prometne sigurnosti za svaki simulirani scenarij. Na temelju dobivenih vrijednosti razvijen je **preliminarni model za predikciju broja konflikata**.

(3) **Analiza prometne sigurnosti**: Utjecaj projektnih elemenata i operativnih brzina na sigurnost prometa analiziran je prometnom mikrosimulacijom devet kružnih raskrižja u Rijeci i primjenom SSAM-a za kvantifikaciju i kvalifikaciju potencijalnih konflikata i ozbiljnosti prometnih nesreća. Rezultati su objavljeni u članku (Klobučar i sur., 2025b).

5. Definiranje ciljeva i hipoteza istraživanja: Na temelju zaključaka definiranih pregledom stanja područja i preliminarnom analizom, formulirani su ciljevi i glavne hipoteze istraživanja. Ciljevi istraživanja i hipoteze detaljno su objašnjeni u Poglavlju 1.

6. Definiranje ulaznih parametara modela (detaljno u Poglavlju 7): U ovoj fazi identificirane su prednosti i nedostaci preliminarnih modela za predikciju vremena putovanja i broja konflikata dobivenih u prethodnim koracima. Sukladno tome, definiran je novi skup ulaznih parametara koji će se koristiti u istraživanju za razvoj modela, s ciljem poboljšanja njihove pouzdanosti.

7. Razvoj scenarija – modeli prometnih mikrosimulacija (detaljnije u Poglavlju 7): Na temelju novo definiranih ulaznih parametara modela izrađeni su modeli prometnih mikrosimulacija za različite scenarije prometnih opterećenja, geometrijske karakteristike raskrižja te parametre prometne svjetlosne signalizacije.

8. Razvoj regresijskog modela za predikciju vremena putovanja između kružnog i semaforiziranog raskrižja (detaljnije u Poglavlju 7): Na temelju opsežne baze podataka dobivene kao rezultat prometnih mikrosimulacija, primjenom višestruke linearne regresijske analize razvijen je model za predikciju vremena putovanja duž promatranog koridora u definiranim uvjetima/granicama

9. Eksperimentalna istraživanja (detaljnije u Poglavlju 8): Kako bi se provjerila pouzdanost i primjenjivost razvijenog regresijskog modela u stvarnim uvjetima, provedena su eksperimentalna (terenska) istraživanja na ciljano odabranim lokacijama u gradovima Osijeku i Poreču.

10. Validacija modela za predikciju vremena putovanja (Detaljnije u Poglavlju 8): Validacija regresijskog modela izvršena je usporedbom njegovih predikcija s rezultatima prikupljenim u stvarnim prometnim okruženjima. Model je testiran na prometnoj mreži grada Poreča te na odabranom prometnom koridoru u gradu Osijeku. Podudarnost između predviđenih i izmjerenih vremena putovanja poslužila je kao pokazatelj pouzdanosti i robusnosti modela u različitim uvjetima.

11. Razvoj regresijskog modela za predikciju ukupnog broja konflikata (detaljnije u Poglavlju 9): Iz detaljnih trajektorija vozila dobivenih prometnom mikrosimulacijom, uz pomoć alata SSAM, automatski su identificirani i kvantificirani svi zabilježeni prometni konflikti. Na temelju prikupljenih podataka o ukupnom broju konflikata u različitim scenarijima, primijenjena je višestruka linearna regresijska analiza kako bi se razvio model za predikciju broja prometnih konflikata. Ovaj model omogućuje procjenu razine prometne sigurnosti na promatranom koridoru predviđanjem očekivanog broja konflikata za dane ulazne uvjete.

12. Usporedba regresijskog modela za predikciju ukupnog broja konflikata s rezultatima kalibriranih modela prometnih mikrosimulacija u Gradu Osijeku i Poreču (detaljnije u Poglavlju 9): Rezultati regresijskog modela za predikciju broja konflikata uspoređeni su s rezultatima kalibriranih prometnih mikrosimulacijskih modela za odabrane lokacije u Osijeku i Poreču. U tu svrhu izrađeni su mikrosimulacijski modeli tih raskrižja na temelju podataka dobivenih eksperimentalnim mjerenjima te su kalibrirani usporedbom simuliranih i izmjerenih vremena putovanja između promatranog kružnog i semaforiziranog raskrižja. Nakon provedene kalibracije, predviđeni broj konflikata dobiven regresijskim modelom uspoređen je s brojem konflikata dobivenim iz kalibriranih mikrosimulacija.

Zaključak (detaljnije u Poglavlju 10): U Zaključku su sumirani najvažniji rezultati istraživanja te su izneseni konačni zaključci vezani za postavljene hipoteze i preporuke za daljnje istraživanje kao i za moguću praktičnu primjenu rezultata istraživanja.

5.3. Alati i softverski paketi

U ovom su istraživanju korišteni različiti specijalizirani softverski alati koji omogućuju detaljnu analizu prometnih tokova, procjenu prometne sigurnosti te statističku obradu podataka. Svaki od alata primijenjen je u skladu sa svojom funkcionalnošću i područjem primjene: PTV VISSIM za mikrosimulaciju prometa, SSAM za procjenu prometne sigurnosti temeljem surogatnih pokazatelja, XLSTAT za statističku analizu podataka i razvoj modela predikcije vremena putovanja i ukupnog broja konflikata te NeuroShell Predictor za izgradnju modela temeljenih na neuronskim mrežama.

Kombinirana primjena ovih alata omogućila je sveobuhvatan pristup u obradi, analizi i interpretaciji rezultata prometnih scenarija. U nastavku su detaljno opisane značajke, način korištenja i svrha svakog od navedenih softverskih paketa unutar istraživačkog procesa.

5.3.1. Programski alat PTV VISSIM

PTV VISSIM (akronim od njem. *Verkehr In Städten – SIMulationsmodell*) jedan je od vodećih softverskih paketa za prometne mikrosimulacije. Široko se primjenjuje u analizi, planiranju i optimizaciji prometnih rješenja, a izvorno ga je 1992. godine razvila njemačka tvrtka PTV AG (Fellendorf i Vortisch, 2011).

VISSIM je stohastički model utemeljen na ponašanju vozača – korištenje slučajnih brojeva (eng. *random seed*) omogućuje varijabilnost scenarija, dok se kretanje vozila upravlja behaviorističkim modelima koji oponašaju stvarne psihofizičke reakcije vozača (Washington State DOT, 2014).

Brojna istraživanja potvrđuju da je VISSIM jedan od najpoznatijih i najčešće korištenih mikrosimulacijskih alata u području prometnog inženjerstva (Raju i Farah, 2021; Saidallah i sur, 2016, Khademi i sur., 2021, Hoque i sur., 2025), što je detaljnije opisano u poglavlju 4.

U ovom istraživanju VISSIM je korišten za izradu i analizu modela prometnih mikrosimulacija raskrižja, u cilju ispitivanja utjecaja udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja na značajke prometnog toka i prometne sigurnosti.

Korištena je verzija PTV VISSIM 2023 (v23), koja uključuje najnovija poboljšanja u pogledu preciznosti modela i korisničkih mogućnosti. Konfigurirana su dva osnovna tipa scenarija:

- (1) Izolirano kružno raskrižje – simulirano bez utjecaja susjednih raskrižja,
- (2) Kružno raskrižje u blizini semaforiziranog raskrižja – simulacije u kojima je na određenoj neposrednoj udaljenosti od kružnog raskrižja postavljeno klasično semaforizirano raskrižje.

U VISSIM-u je detaljno modelirana geometrija svih scenarija, postavljeni su prometni tokovi (intenziteti prometa, struktura prometa i smjerovi kretanja), kao i odgovarajuća prometna svjetlosna signalizacija za semaforizirano raskrižje. U skladu s preporukama (PTV VISSIM, 2022), provedeno je deset simulacija (eng. *run*) za svaki scenarij, a za analizu je korištena prosječna vrijednost.

U svim provedenim mikrosimulacijama korištena je programski zadana početna vrijednost generatora slučajnih brojeva (eng. *random seed*) u iznosu 42, dok je prirast slučajnog broja (eng. *random seed increment*) u svim mikrosimulacijama iznosio 5.

Generator slučajnih brojeva je parametar u mikrosimulacijskim prometnim modelima koji definira slijed slučajnih brojeva korištenih pri modeliranju stohastičkih elemenata simulacije, poput vremenskih razmaka između vozila, varijacijama brzina te razlika u ponašanju vozača. Primjenom iste početne vrijednosti generatora slučajnih brojeva osigurava se da simulacija pri svakom izvođenju proizvede identične rezultate, čime se omogućuje ponovljivost i usporedivost rezultata ispitivanja (PTV VISSIM, 2022).

Prirast slučajnog broja određuje vrijednost za koju se početna vrijednost generatora slučajnih brojeva povećava pri svakom pokretanju simulaciju unutar jedne serije. Na taj se način omogućuje izvođenje ponavljanja istog scenarije, uzimajući u obzir stohastičku varijabilnost prometnog toka. Svako novo pokretanje simulacije koristi različiti niz slučajnih brojeva, čime se generiraju različiti uzorci dolazaka i kretanja vozila, dok osnovni model i ulazni podaci ostaju nepromijenjeni.

U ovom istraživanju korišten je prirast slučajnog broja od 5, što znači da su simulacije pokretane s vrijednostima 42, 47, 52 itd. Sukladno preporukama (PTV VISSIM, 2022), vrijednosti prirasta od 1, 5 ili 10 smatrajuse prikladnima za osiguravanje zadovoljavajuće razine stohastičke raznolikosti i reprezentativnosti rezultata.

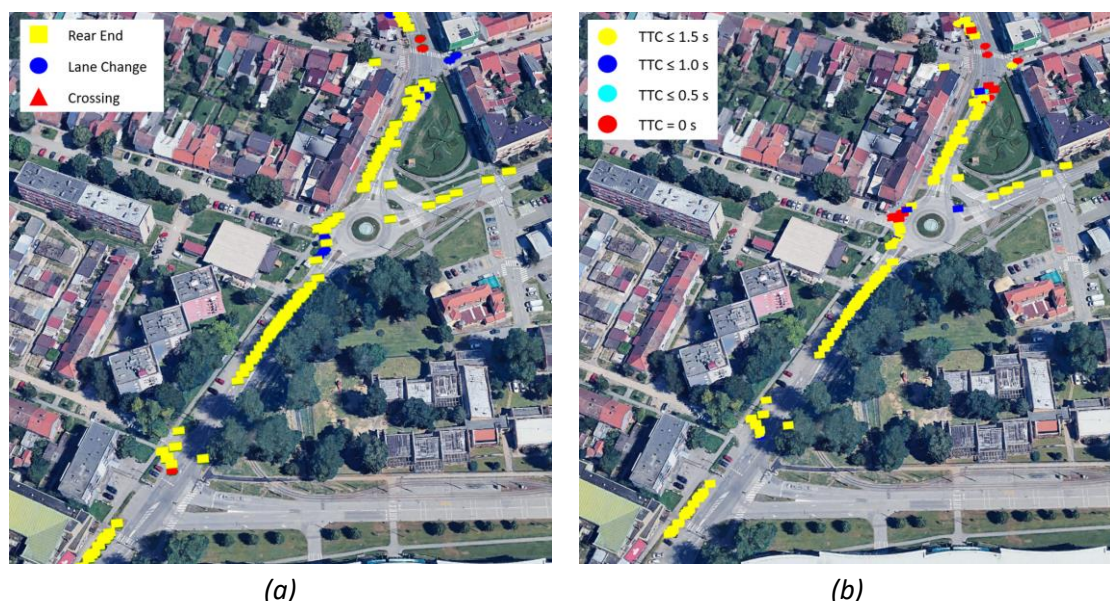
Detaljni opis izrade modela prometnih mikrosimulacija predstavljen je u Poglavlju 5 i Poglavlju 6.

5.3.2. Programski alat Surrogate Safety Assessment Model

Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) softverski je alat razvijen 2008. godine od strane američke Federalne uprave za ceste (*Federal Highway Administration*) za evaluaciju prometne sigurnosti temeljem simuliranih podataka o kretanju vozila. Dostupan je u otvorenom pristupu (FHWA, 2008).

Za svaki identificirani konflikt SSAM prikazuje detaljne informacije, uključujući vrijeme događaja, lokaciju unutar mreže, identitet sudjelujućih vozila te vrijednosti svih relevantnih surogatnih pokazatelja.

Osim numeričkih podataka, alat pruža i grafički prikaz lokacija svih zabilježenih konflikata unutar modelirane mreže, čime se olakšava identifikacija prostornih žarišta potencijalno nesigurnih interakcija. Na taj se način vizualno prikazuju prostori s povećanim sigurnosnim rizikom, odnosno mjesta na kojima bi u stvarnim uvjetima moglo doći do nesreća većeg stupnja ozbiljnosti (slika 5.2).



(a) (b)
Slika 5.2. (a) Vrsta konflikata; (b) Ozbiljnost konflikata

U okviru ove disertacije korištena je SSAM verzija 3.0, inačica otvorenog pristupa poboljšana 2017. godine. Kao ulazni podaci u SSAM-u korišteni su rezultati modela prometnih mikrosimulacija izrađenih u softveru VISSIM. Simulirani su različiti scenariji prometnih rješenja, uključujući izolirano kružno raskrižje te kružno raskrižje u blizini semaforiziranog raskrižja, uz varijacije odabranih prometnih i projektnih parametara, koji su detaljno opisani u poglavljima 5 i 6.

Izlazne trajektorije vozila iz VISSIM-a analizirane su u SSAM-u primjenom svih identificiranih konflikata te unaprijed definiranih pragova za pokazatelje TTC i PET, koji su u ovoj analizi postavljeni na 1,5 s odnosno 5 s. Broj detektiranih konflikata korišten je kao kvantitativni pokazatelj prometne sigurnosti za svaki pojedini scenarij.

Provedena je usporedba ukupnog broja konflikata među različitim scenarijima te u odnosu na referentni scenarij izoliranog kružnog raskrižja. Na temelju dobivenih rezultata izrađen je regresijski model za predikciju ukupnog broja konflikata koji je detaljno prikazan u poglavlju 9.

5.3.3. Programski alat XLSTAT

XLSTAT je statistički softverski paket razvijen 1993. godine od strane tvrtke Addinsoft (danas dio Lumivero grupacije) koji se koristi kao dodatak za Microsoft Excel.

U okviru ovog istraživanja, XLSTAT je korišten za provođenje deskriptivne statistike, uključujući izračun osnovnih mjera središnje tendencije i disperzije te grafički prikaz distribucija podataka. Također, korišten je za analizu korelacija između prometnih pokazatelja i odabranih prometnih i projektnih parametara, pri čemu je izračunat

Pearsonov koeficijent korelacije, s ciljem identifikacije linearnih međuzavisnosti među varijablama.

Nadalje, primijenjena je višestruka linearna regresijska analiza za modeliranje odnosa između zavisne varijable i više nezavisnih prediktora. XLSTAT omogućuje napredne mogućnosti u okviru regresijske analize, uključujući postupni odabir varijabli (engl. *Stepwise regression*) te provjeru multikolinearnosti pomoću statističkih pokazatelja poput tolerancije i VIF faktora. Ove su mogućnosti korištene pri razvoju regresijskih modela za predikciju vremena putovanja i broja prometnih konflikata, prikazanih u poglavljima 6 i 8.

Prije primjene inferencijalnih statističkih metoda, provedena je provjera distribucije podataka za varijable vremena putovanja i broja konflikata, korištenjem Shapiro–Wilkovog testa. Rezultati ovog testa služili su kao osnova za odabir odgovarajućih testova hipoteza u daljnjoj analizi.

Za potrebe usporedbe jednog skupa podataka (vrijeme putovanja i broj konflikata) s referentnim vrijednostima dobivenim iz regresijskih modela, korišteni su parametarski i neparametarski testovi za jedan uzorak. U slučajevima kada su pretpostavke normalnosti bile zadovoljene, primijenjen je t-test za jedan uzorak radi provjere značajnosti razlika između prosječnih vrijednosti i referentne vrijednosti. U slučajevima odstupanja od normalne distribucije, korišten je Wilcoxonov test za jedan uzorak kao neparametarska alternativa.

Analize su provedene korištenjem softverskog paketa XLSTAT Advanced, verzija 2025.1.2. Detaljan opis provedenih metoda prikazan je u Poglavlju 5.4.

5.3.4. Programski alat Neuroshell Predictor

NeuroShell Predictor je softverski paket razvijen 1996. godine od strane tvrtke Ward Systems Group, namijenjen za izgradnju prediktivnih modela temeljenih na umjetnim neuronskim mrežama. Softver je primarno namijenjen regresijskim i klasifikacijskim zadacima, s naglaskom na automatizaciju procesa modeliranja, čime omogućuje učinkovitu primjenu u istraživanjima koja uključuju kompleksne i nelinearne odnose među varijablama.

Središnja značajka NeuroShell Predictora je automatizirana konstrukcija arhitekture neuronske mreže, čime se značajno smanjuje potreba za ručnim podešavanjem parametara. Softver implementira vlastiti algoritam *TurboProp 2*, poboljšanu varijantu kaskadne korelacijske mreže, koji tijekom procesa učenja iterativno dodaje neurone u skriveni sloj sve dok se ne postigne optimalna konfiguracija modela. Nakon svakog proširenja mreže, težine se dodatno kalibriraju korištenjem metode propagacije pogreške unatrag (eng. *backpropagation*), s ciljem minimizacije srednje kvadratne pogreške na skupu za učenje (Sand i sur., 2014).

U svrhu poboljšanja robusnosti modela i smanjenja rizika od preučenosti, NeuroShell Predictor nudi mogućnost poboljšane generalizacije (eng. *enhanced generalization*).

Ova opcija uključuje primjenu tehnika regularizacije te automatsko praćenje učinka modela na validacijskom skupu podataka. Proces treniranja se zaustavlja u trenutku kada daljnje iteracije više ne doprinose poboljšanju performansi na validaciji, čime se implementira koncept ranog zaustavljanja.

Po završetku treniranja, softver automatski generira niz statističkih pokazatelja za evaluaciju uspješnosti modela. Među najvažnijim su: koeficijent determinacije (R^2), koeficijent korelacije (R), prosječna apsolutna pogreška (MAE), srednja kvadratna pogreška (MSE), korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE) te srednja apsolutna postotna pogreška (MAPE). Osim toga, NeuroShell Predictor omogućuje analizu osjetljivosti ulaznih varijabli, kojom se identificira relativna važnost svakog prediktora u formiranju izlazne vrijednosti modela.

U okviru ovog istraživanja, NeuroShell Predictor je primijenjen za izgradnju modela neuronske mreže s ciljem predikcije vremena putovanja između kružnog i semaforiziranog raskrižja. Model je razvijen na temelju skupa od 180 prometnih scenarija te je uspoređen s višestrukim regresijskim modelom radi procjene točnosti, stabilnosti i prikladnosti svakog pristupa. Usporedna analiza prikazana je u poglavlju 6.2., a rezultati su poslužili kao temelj za odabir metode u nastavku istraživanja.

5.4. Statističke metode

U istraživanju je korišten niz statističkih metoda za analizu utjecaja udaljenosti kružnog i semaforiziranog raskrižja na pokazatelje prometnog toka i sigurnosti prometa. Sve analize provedene su u softveru XLSTAT, opisanog u prethodnom poglavlju, pri čemu su korišteni podaci dobiveni iz modela prometnih mikrosimulacija i terenskim mjerenjima. U nastavku su opisane pojedine metode, njihova statistička osnova te primjena u okviru istraživanja.

Pearsonova korelacija

Pearsonov koeficijent korelacije predstavlja statističku mjeru kojom se kvantificira jačina i smjer linearne povezanosti dviju kontinuiranih kvantitativnih varijabli. Definira se kao omjer kovarijance varijabli i umnoška njihovih standardnih derivacija.

Za uzorak podataka $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ Pearsonov koeficijent korelacije izračunava se prema sljedećoj formuli (Moore i sur., 2017):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

gdje je n veličina uzorka, x_i, y_i pojedinačne vrijednosti iz uzorka te $\bar{x}$ aritmetička sredina varijable x ; analogno vrijedi i za $\bar{y}$.

Vrijednost Pearsonovog koeficijenta uvijek je u rasponu od -1 do 1. Vrijednosti blizu 0 ukazuju na izostanak linearne povezanosti, dok vrijednosti bliže -1 ili +1 upućuju na snažnu negativnu, odnosno pozitivnu korelaciju (Moore i sur., 2017). Primjena ovog koeficijenta pretpostavlja približnu normalnu raspodjelu varijabli kako bi se mogao interpretirati i testirati značaj korelacija.

Za kategorizaciju jačine linearne povezanosti, u literaturi se najčešće primjenjuje Evansova klasifikacija (Evans, 1996) koja apsolutne vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije interpretira na sljedeći način:

- < 0,20 - vrlo slaba korelacija,
- 0,20 - 0,39: slaba korelacija,
- 0,40 - 0,59: umjerena korelacija,
- 0,60 - 0,79: jaka korelacija,
- 0,80 - 1,00: izrazito jaka korelacija.

Navedena klasifikacija široko je prihvaćena u istraživačkoj praksi (Zang i sur., 2023; Krehbiel, 2004; Papageorgiou, 2022).

U okviru ovog istraživanja, Pearsonov koeficijent korelacije korišten je za procjenu linearne povezanosti između ključnih varijabli. U Poglavlju 6 analizirana je međuzavisnost prometnih pokazatelja, dok je u Poglavljima 7 i 9 primijenjen za ispitivanje odnosa između ulaznih parametara i zavisne varijable u regresijskim modelima za predikciju vremena putovanja i ukupnog broja konflikata.

Deskriptivna statistika

Metode deskriptivne statistike koriste se za kvantitativni opis osnovnih karakteristika skupa podataka. U ovom istraživanju primijenjeni su temeljni deskriptivni pokazatelji: minimalna i maksimalna vrijednost, kvantili (vrijednosti ispod kojih se nalazi 25 % podataka – prvi kvartil, 50 % – medijan, i 75 % – treći kvartil), aritmetička sredina, varijanca i standardna devijacija.

Aritmetička sredina, koja predstavlja prosjek svih zapažanja u uzorku, definira se kao (Moore i sur., 2017):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

gdje je n veličina uzorka, x_i pojedinačne vrijednosti iz uzorka.

Varijanca uzorka mjeri prosječnu kvadratnu udaljenost pojedinačnih vrijednosti od aritmetičke sredine i računa prema formuli (Moore i sur., 2017):

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (12)$$

gdje je $(n - 1)$ broj stupnjeva slobode, x_i pojedinačne vrijednosti iz uzorka te $\bar{x}$ aritmetička sredina varijable x .

Standardna devijacija predstavlja kvadratni korijen varijance. Budući da je izražena u istim mjernim jedinicama kao i izvorni podaci, omogućuje interpretaciju raspršenosti oko sredine. Manja standardna devijacija ukazuje na ujednačenost podataka, dok veća upućuje na izraženiju varijabilnost (Moore i sur., 2017).

Raspon podataka definiran je kao razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti. Kvartili i medijan (drugi kvartil) predstavljaju robusne mjere lokacije koje ne ovise o ekstremnim vrijednostima. Medijan dijeli uređeni skup podataka na dvije jednake polovice, dok kvartili razdvajaju podatke na četiri jednaka dijela – ispod prvog kvartila nalazi se 25 %, ispod medijana 50 %, a ispod trećeg kvartila 75 % opažanja.

Deskriptivna statistika primijenjena je u više faza istraživanja. Na početku, služila je za kvantitativni opis distribucije ključnih varijabli dobivenih terenskim mjerenjem kako bi se odredile granice za primjenu regresijskog modela (Poglavlje 6). Nadalje, u Poglavljima 6, 7 i 9 analizirane su distribucije prometnih pokazatelja s ciljem definiranja ciljne varijable regresijskog modela. U Poglavlju 8 deskriptivna statistika korištena je za analizu vremenskih podataka putovanja po definiranim rutama, dok je u Poglavlju 9 primijenjena za opis varijabilnosti različitih tipova prometnih konflikata.

Višestruka linearna regresija

Višestruka linearna regresija statistička je metoda koja se primjenjuje za analizu odnosa između jedne zavisne varijable i više nezavisnih (prediktorskih) varijabli. Osnovna pretpostavka ove metode je postojanje linearnog odnosa između zavisne varijable i svakog uključenog prediktora.

Matematički, model višestruke linearne regresije može se prikazati sljedećom jednadžbom (Montgomery i sur. 2015):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} \quad (13)$$

gdje je Y_i vrijednost zavisne varijable za i -to opažanje, X_{ki} vrijednost k -tog prediktora za i -to opažanje, β_0 – konstanta modela, β_k regresijski koeficijent uz k -ti prediktor koji kvantificira utjecaj pojedinih nezavisnih varijabli.

Regresijski koeficijenti se procjenjuju metodom najmanjih kvadrata, pri čemu je cilj minimizirati sumu kvadrata razlika između stvarnih i predviđenih vrijednosti zavisne varijable.

Pri primjeni višestruke linearne regresije važno je zadovoljiti sljedeće pretpostavke: linearna povezanost prediktora sa zavisnom varijablom, normalna distribucija reziduala,

konstantna varijanca reziduala (homoskedastičnost) te međusobna neovisnost opažanja (Montgomery i sur. 2015).

U slučaju većeg broja nezavisnih varijabli često se primjenjuje višestruka linearna regresija s postupnim odabirom nezavisnih varijabli (engl. *stepwise regression*). Cilj ove metode je stvaranje optimalnog modela koji uključuje samo statistički značajne varijable. Pouzdanost metode potvrđena je kroz niz istraživanja u području prometnih analiza (Isler i sur., 2024; Abu-Eisheh i sur., 2024; Zhou i sur., 2018; Simić i sur., 2016).

Metoda postupnog odabira nezavisnih varijabli integrira pristup postupnog uključivanja (engl. *forward selection*) i postupnog isključivanja (engl. *backward elimination*). Model se inicijalno formira praznim skupom varijabli, nakon čega se varijable postupno dodaju prema njihovoj statističkoj značajnosti, istodobno provjeravajući potencijalnu potrebu isključivanja prethodno uključenih varijabli ukoliko prestanu biti statistički značajne (Montgomery i sur., 2015).

Algoritam postupnog odabira u svakom koraku uključuje onu nezavisnu varijablu koja uzrokuje najveće povećanje varijance zavisne varijable, odnosno onu koja ima najveću apsolutnu vrijednost t -statistike i najnižu p -vrijednost. Paralelno, varijable čija se statistička značajnost smanji tijekom postupka (tj. njihova p -vrijednost prijeđe prag $\alpha = 0,05$) eliminiraju se iz modela. Proces se iterativno ponavlja dok više ne postoje kandidati za uključivanje ili isključivanje.

Rezultat ovog postupka je optimalan model, koji sadrži samo nezavisne varijable s dokazanim statistički značajnim utjecajem na zavisnu varijablu. Takav model omogućuje jednostavniju interpretaciju rezultata, izbjegavajući nepotrebnu složenost uz zadržavanje visoke objašnjavajuće moći (Montgomery i sur., 2015).

Metoda višestruke linearne regresije s postupnim odabirom primijenjena je u ovoj disertaciji za izgradnju prediktivnih modela kojima se kvantificira utjecaj prometnih i projektnih parametara na vrijeme putovanja (Poglavlje 7) te ukupan broj konflikata (Poglavlje 9).

Parcijalna validacija regresijskog modela

Parcijalna validacija regresijskog modela, poznata i kao validacija metodom izdvojenog testnog skupa (engl. *hold-out method*), statistički je postupak kojim se dio raspoloživih podataka izdvaja kako bi se neovisno ocijenila prediktivna sposobnost razvijenog modela (James i sur., 2021). Pri tome se cjelokupni skup podataka nasumično dijeli na dva zasebna podskupa: skup za učenje, na kojem je model kalibriran te testni (validacijski) skup, na kojem se provodi procjena točnosti i generalizacijske sposobnosti modela (Hastie i sur., 2009).

U prvom koraku, regresijski model se razvija i trenira isključivo na podacima skupa za učenje, prilagođavajući parametre modela tako da se minimizira odstupanje između

predviđenih i stvarnih vrijednosti. Nakon toga, izvedba modela ocjenjuje se na izdvojenom testnom skupu koji nije bio korišten tijekom treniranja, čime se dobiva objektivna procjena njegove sposobnosti generalizacije na neviđene podatke te se utvrđuje eventualno prekomjerno prilagođavanje trenutačnom skupu podataka (Arlot & Celisse, 2010). Glavna svrha parcijalne validacije jest pružiti nepristranu, realističnu procjenu učinkovitosti regresijskog modela prilikom predviđanja neovisnih podataka.

Metoda parcijalne validacije primijenjena je u okviru ovog istraživanja prilikom ocjene prediktivne točnosti regresijskog modela za procjenu vremena putovanja (Poglavlje 7) i ukupnog broja konflikata (Poglavlje 9).

Statistika prilagodbe regresijskog modela

Za kvantitativnu procjenu kvalitete prilagodbe regresijskog modela koriste se različiti statistički pokazatelji. U nastavku su objašnjene ključne mjere prilagodbe i pokazatelji pogreške modela višestruke linearne regresije (Montgomery i sur., 2015).

Stupnjevi slobode (DF) označavaju efektivan broj neovisnih informacija na kojima se temelji procjena varijance i drugih statističkih pokazatelja. U kontekstu višestruke linearne regresije stupnjevi slobode reziduala (pogreške) iznose $(n - k - 1)$, gdje je n broj opažanja, a k broj nezavisnih varijabli u modelu. Ova vrijednost predstavlja preostali broj neovisnih informacija nakon procjene svih parametara modela te se koristi pri računanju rezidualne varijance.

Koeficijent determinacije (R^2) pokazuje koliki udio ukupne varijance zavisne varijable objašnjava promatrani regresijski model. Vrijednosti R^2 kreću se između 0 i 1, pri čemu vrijednosti bliže jedinici ukazuju na kvalitetniju prilagodbu modela, odnosno veću objašnjenu varijabilnost zavisne varijable.

Prilagođeni R^2 je modifikacija koeficijenta determinacije koja uzima u obzir broj nezavisnih varijabli u modelu, uvodeći penalizaciju za uključivanje dodatnih nezavisnih varijabli koje ne doprinose značajno smanjenju rezidualne varijance.

Izračunava se prema sljedećoj formuli (Montgomery i sur., 2015):

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{n - 1}{n - k - 1} (1 - R^2) \quad (14)$$

gdje je n broj opažanja, $(n - k - 1)$ stupnjevi slobode, a R^2 koeficijent determinacije.

Vrijednost prilagođenog R^2 raste isključivo ako uključivanje nove varijable dovoljno smanjuje rezidualnu varijancu u odnosu na ukupnu varijancu zavisne varijable, čime se izbjegava precjenjivanje kvalitete modela zbog prekomjerne kompleksnosti.

Srednja kvadratna pogreška (MSE) kvantificira prosječnu kvadratnu razliku između stvarnih i modelom predviđenih vrijednosti zavisne varijable. Matematički se izražava kao (Montgomery i sur., 2015):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (15)$$

gdje je n broj opažanja, y_i stvarna vrijednost za opažanje i te $\hat{y}_i$ predviđena vrijednost za opažanje.

Kvadriranjem pogrešaka, MSE izražen u kvadratu jedinice mjere zavisne varijable posebno ističe veća odstupanja. Niže vrijednosti MSE-a ukazuju na bolju preciznost predviđanja modela.

Korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE) često se preferira u interpretaciji rezultata jer je izražen u istoj mjernoj jedinici kao zavisna varijabla, što omogućuje lakšu usporedbu i interpretaciju prosječne pogreške predviđanja. Ova mjera predstavlja standardnu pogrešku procjene odnosno procijenjenu standardnu devijaciju reziduala regresijskog modela.

Srednja apsolutna postotna pogreška (MAPE) koristi se za kvantificiranje relativne točnosti predviđanja modela izražene u postotku, što ju čini intuitivno razumljivom u praktičnim primjenama. Izračunava se kao aritmetička sredina apsolutnih postotnih pogrešaka (Montgomery i sur., 2015):

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|} \quad (16)$$

gdje je n broj opažanja, y_i stvarna vrijednost za opažanje i te $\hat{y}_i$ predviđena vrijednost za opažanje.

Analiza varijance (ANOVA) primjenjuje se u kontekstu višestruke linearne regresije kao statistička provjera značajnosti cjelokupnog regresijskog modela. ANOVA razlaže ukupnu varijabilnost zavisne varijable na dio objašnjen regresijskim modelom i rezidualni dio te procjenjuje statističku značajnost dobivenog modela korištenjem F -testa (Papić, 2021). F -statistika računa se kao omjer varijance objašnjene regresijskim modelom i rezidualne varijance. Testirana nul-hipoteza je da su svi regresijski koeficijenti (osim konstante) jednaki nuli, što bi značilo da model nije bolji od predviđanja temeljena na prosjeku zavisne varijable. Odbacivanje nul-hipoteze (pri p -vrijednosti nižoj od unaprijed definirane razine značajnosti, $\alpha = 0,05$) upućuje na zaključak da regresijski model statistički značajno doprinosi objašnjenju varijabilnosti zavisne varijable.

Mallowsov C_p je statistički kriterij za odabir optimalnog regresijskog modela. Koristi se za procjenu kvalitete regresijskih modela uzimajući u obzir balans između njihove složenosti (broj uključenih parametara) i sposobnosti prilagodbe podacima (točnosti modela). Cilj ovog kriterija je izabrati najbolji regresijski model s najmanjom varijancom predikcije, bez uvođenja suvišnih parametara.

Mallowsov C_p računa se prema sljedećem izrazu (Montgomery i sur., 2015):

$$C_p = \frac{SSE_p}{\hat{\sigma}^2} - (n - 2k) \quad (17)$$

gdje je SSE_p suma kvadrata reziduala za regresijski model s k parametara, $\hat{\sigma}^2$ procijenjena varijanca pogreške u punom regresijskom modelu (koji uključuje sve potencijalne nezavisne varijable), n ukupni broj opažanja, k broj parametara (uključujući konstantu). Vrijednosti C_p kriterija interpretiraju se u odnosu na broj parametar u modelu. Model se smatra optimalnim ako je C_p približno jednak broju parametara (uključujući presjek). Vrijednosti kriterija niže od broja parametara ukazuju na nedovoljnu složenost modela, dok vrijednosti značajno veće od broja parametara sugeriraju nepotrebnu složenost, što može dovesti do prekomjerne prilagodbe podacima (Montgomery i sur., 2015).

Akaikeov informacijski kriterij (AIC) je široko prihvaćen statistički pokazatelj koji se koristi u svrhu usporedbe i odabira optimalnog statističkog modela među više kandidata. Prednost ovog kriterija je u tome što istovremeno uzima u obzir prilagodbu modela podacima i njegovu složenost, potičući odabir modela koji najbolje generalizira dostupne podatke (Burnham & Anderson, 2002).

Formula za Akaikeov informacijski kriterij (AIC) za linearne regresijske modele definira se kao (Burnham & Anderson, 2002):

$$AIC = n \ln \left(\frac{SSE}{n} \right) + 2k \quad (18)$$

Gdje je n broj opažanja, SSE suma kvadrata reziduala (pogrešaka) modela, k ukupan broj parametara u modelu (uključujući konstantu).

Model s najmanjom vrijednosti AIC-a smatra se najboljim, tj. optimalnim jer pruža najbolju ravnotežu između složenosti i prilagodbe modela. Kriterij dodatno penalizira uvođenje nepotrebnih parametara, čime se izbjegava prekomjerno prilagođavanje.

Shapiro-Wilkov test normalnosti

Shapiro–Wilkov test statistička je metoda kojom se ispituje normalnost distribucije promatranog uzorka. Temelj ovog testa jest provjera nulte hipoteze (H_0) prema kojoj podaci potječu iz populacije s normalnom raspodjelom, nasuprot alternativnoj hipotezi (H_A) koja tvrdi suprotno, tj. da distribucija nije normalna.

Test se temelji na statistici W , definiranoj pomoću uređenih vrijednosti uzorka. Za uzorak veličine n , uređene vrijednosti označavaju se kao $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$.

Statistika testa W računa se prema izrazu (D'Agostino i Stephens., 1986):

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (19)$$

gdje je n veličina uzorka, x_i i -ta po redu najmanja vrijednost u uzorku, $\bar{x}$ aritmetička sredina uzorka te a_i težinski koeficijenti.

Težinski koeficijenti predstavljaju konstante određene tako da maksimalno povećavaju osjetljivost testa na odstupanja od normalnosti. Ovi koeficijenti ovise o veličini uzorka n te se izračunavaju temeljem očekivanih vrijednosti rednih statistika standardne normalne distribucije.

Brojnik u formuli predstavlja kvadrat korelacije između empirijskih vrijednosti uzorka i očekivanih vrijednosti koje bi imali uzorci iz normalne distribucije, dok nazivnik predstavlja ukupnu varijancu uzorka. Vrijednost W bliska 1 ukazuje na to da podaci slijede normalnu raspodjelu. Suprotno tome, što je W manji, to su odstupanja od normalnosti izraženija.

Za dani uzorak, izračunata vrijednost W uspoređuje se s p -vrijednosti za zadanu razinu značajnosti, u ovom istraživanju odabrana je $\alpha = 0,05$. Ako je p -vrijednost manja od 0,05, odbacuje se nulta hipoteza i zaključuje da podaci značajno odstupaju od normalne raspodjele.

Shapiro–Wilkov test poznat je po svojoj izrazitoj osjetljivosti na odstupanja od normalne raspodjele, osobito kod manjih uzoraka ($n < 50$) (Razali i Wah, 2011). Kod velikih uzoraka ($n > 1000$), test može biti preosjetljiv, detektirajući čak i minimalna odstupanja kao statistički značajna (Field, 2013). Prednost ovog testa je što vrlo učinkovito detektira različite oblike odstupanja u distribuciji podataka, poput asimetrije (engl. *skewness*) ili spljoštenosti (engl. *kurtosis*), zbog čega je preporučen kao standardni test za provjeru normalnosti (Ghasemi i Zahediasl, 2012).

U ovom istraživanju Shapiro–Wilkov test korišten je za provjeru normalnosti distribucije razlika između izmjerenih i modelom predviđenih vrijednosti vremena putovanja u postupku validacije regresijskog modela (Poglavlje 8). Ova je provjera bila nužna kako bi se potvrdilo zadovoljavaju li se uvjeti za primjenu parametarskih statističkih metoda.

Studentov t-test

Studentov t -test za jedan uzorak predstavlja parametarski statistički postupak koji se koristi za ispitivanje postoje li statistički značajne razlike između aritmetičke sredine uzorka i pretpostavljene referentne sredine populacije. Nulta hipoteza testa jest da nema značajne razlike, odnosno da je sredina populacije jednaka zadanoj (referentnoj) vrijednosti.

Test statistika t definirana je prema izrazu (Field, 2017):

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (20)$$

gdje $\bar{x}$ označava aritmetičku sredinu uzorka, μ_0 pretpostavljenu sredinu populacije, s standardni odmak uzorka, a n veličina uzorka.

Statistika t -testiranja temelji se na odnosu odstupanja sredine uzorka od pretpostavljene sredine $(\bar{x} - \mu_0)$ prema procijenjenoj standardnoj pogrešci sredine $(s/\sqrt{n})$. Pod pretpostavkom da uzorak dolazi iz populacije čije su vrijednosti približno normalno raspodijeljene, vrijednost statistike t prati Studentovu t -raspodjelu s $(n - 1)$ stupnjeva slobode (Field, 2017).

P -vrijednost testa iskazuje vjerojatnost dobivanja opažene ili ekstremnije vrijednosti testne statistike, uz uvjet da je nulta hipoteza točna. Nulta hipoteza se odbacuje ako je p -vrijednost manja od $\alpha = 0,05$, što ukazuje na statistički značajnu razliku između sredine uzorka i zadane referentne vrijednosti.

Osnovne pretpostavke za provođenje t -testa za jedan uzorak su: neovisnost opažanja unutar uzorka te približna normalnost populacije iz koje je uzorak odabran. Premda je Studentov t -test robustan na umjerena odstupanja od normalnosti, izrazita odstupanja ili značajna asimetričnost raspodjele mogu narušiti točnost zaključaka. U takvim situacijama preporuča se primjena odgovarajućih neparametrijskih testova.

U okviru doktorskog rada, Studentov t -test za jedan uzorak korišten je tijekom validacije regresijskog modela za predikciju vremena putovanja (Poglavlje 8). Za one rute za koje je Shapiro-Wilkov test potvrdio približnu normalnost razlika između modelom predviđenih i izmjerenih vrijednosti vremena putovanja, korišten je Studentov t -test kako bi se ispitalo postoji li statistički značajno odstupanje predikcija modela od empirijskih mjerenja.

Wilcoxonov test

Wilcoxonov test za jedan uzorak neparametarska je metoda statističkog zaključivanja koja se primjenjuje kao alternativa parametarskom t -testu za jedan uzorak kada promatrani podaci ne zadovoljavaju pretpostavku normalnosti distribucije (McClenaghen, 2024). Osnovni cilj ovog testa jest ispitati je li medijan promatrane populacije jednak zadanoj referentnoj vrijednosti.

Nulta hipoteza testa jest da nema statistički značajne razlike, odnosno da je medijan populacije jednak zadanoj (referentnoj) vrijednosti.

Wilcoxonov test temelji se na blažim pretpostavkama od t -testa. Zahtijeva da distribucija analizirane varijable bude kontinuirana i približno simetrična u odnosu na medijan.

Postupak Wilcoxonovog testa uključuje sljedeće korake:

- (1) Od svakog opažanja iz uzorka računa se razlika opaženih vrijednosti i hipotetskog medijana,
- (2) Opažanja kod kojih je razlika jednaka nuli isključuju se iz analize,

- (3) Za preostale razlike računaju se apsolutne vrijednosti koje se zatim rangiraju od najmanje do najveće,
- (4) Svakom rangu pridružuje se predznak prema izvornom predznaku razlike,
- (5) Test statistika W računa se kao suma rangova koji pripadaju pozitivnim razlikama.

Mala vrijednost statistike W ukazuje na značajno odstupanje od medijana.

U okviru ovog istraživanja Wilcoxonov test korišten je za ispitivanje medijana razlika između modelom predviđenog i izmjerenog vremena putovanja u procesu validacije prometnog modela (Poglavlje 8) te za ispitivanje medijana razlika između modelom predviđenog ukupnog broja konflikata te broja konflikata dobivenih primjenom prometnih mikrosimulacija (Poglavlje 9). U slučajevima kada je Shapiro-Wilkov test ukazao na značajno odstupanje od normalnosti distribucije razlika, umjesto t -testa korišten je Wilcoxonov test za procjenu sistematske pogreške modela.

5.5. Rezime – Metodologija

Pri izradi rada primijenjen je kvantitativni deduktivni pristup koji podrazumijeva prikupljanje numeričkih podataka koji se analiziraju statističkim metodama te omogućava precizno identificiranje i analizu interakcija među elementima prometnog koridora, u ovom slučaju kružnog i semaforiziranog raskrižja.

Provedba istraživanja odvijala se kroz jasno definirane korake koji su uključivali empirijska terenska mjerenja na stvarnim lokacijama, izradu detaljnih prometnih mikrosimulacijskih modela korištenjem softvera PTV VISSIM te primjenu alata SSAM za objektivnu evaluaciju prometne sigurnosti putem surogatnih mjera sigurnosti.

Statističke analize uključivale su primjenu deskriptivne statistike, Pearsonove korelacije, višestruke linearne regresije, Shapiro-Wilkovog testa te parametarskih i neparametarskih testova (Studentov t -test i Wilcoxonov test), korištenjem softverskog paketa XLSTAT. Također, korišten je NeuroShell Predictor za razvoj modela temeljenih na umjetnim neuronskim mrežama, čime je osigurana usporedna analiza i odabir optimalnog pristupa za predikciju vremena putovanja.

Kao bitan korak u izradi modela za predikciju vremena putovanja predviđena je validacija na odabranim lokacijama u Osijeku i Poreču. Provedba opisanih koraka u istraživanju omogućila je ostvarivanje ciljeva istraživanja, sustavno testiranje postavljenih hipoteza te stvaranje temelja za primjenu rezultata u području planiranja i projektiranja prometne infrastrukture.

6. PRELIMINARNA ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju prikazana su ključna preliminarna istraživanja provedena s ciljem razumijevanja utjecaja udaljenosti između kružnog raskrižja i susjednog raskrižja na prometne tokove i sigurnost prometa. Istraživanja su provedena u više faza kako bi se sveobuhvatno analizirali stvarni prometni uvjeti na odabranim lokacijama, teorijski aspekti optimizacije prometnih tokova i pokazatelja sigurnosti odvijanja prometa.

*Prva faza istraživanja obuhvaća **terenska mjerenja** na reprezentativnim primjerima srednje velikih urbanih jednotračnih kružnih raskrižja, pri čemu su detaljno analizirani prometno opterećenje, struktura i brzina vozila te raspodjela prometa po privozima. Dobiveni podaci činili su osnovu za daljnje prometne mikrosimulacije i usporedbe.*

*U drugoj fazi, kroz teorijsko istraživanje vremena putovanja, **izrađeni su prometni mikrosimulacijski modeli** koji omogućuju procjenu utjecaja različitih prometnih scenarija i razmaka između raskrižja na ključne pokazatelje protočnosti prometa, poput vremena putovanja i prosječnog vremena kašnjenja.*

*Sljedeća faza obuhvaća **teorijsko istraživanje pokazatelja sigurnosti odvijanja prometa**, u različitim scenarijima, s posebnim naglaskom na povezanost udaljenosti raskrižja i raspodjele prometnih tokova u odnosu na mogućnost pojave konflikata.*

*Na kraju, provedena je **analiza utjecaja projektnih elemenata** na sigurnost prometa na kružnim raskrižjima, pri čemu su vrednovani odabrani projektni parametri i analizirana njihova povezanost s prometnim pokazateljima i potencijalnim konfliktima.*

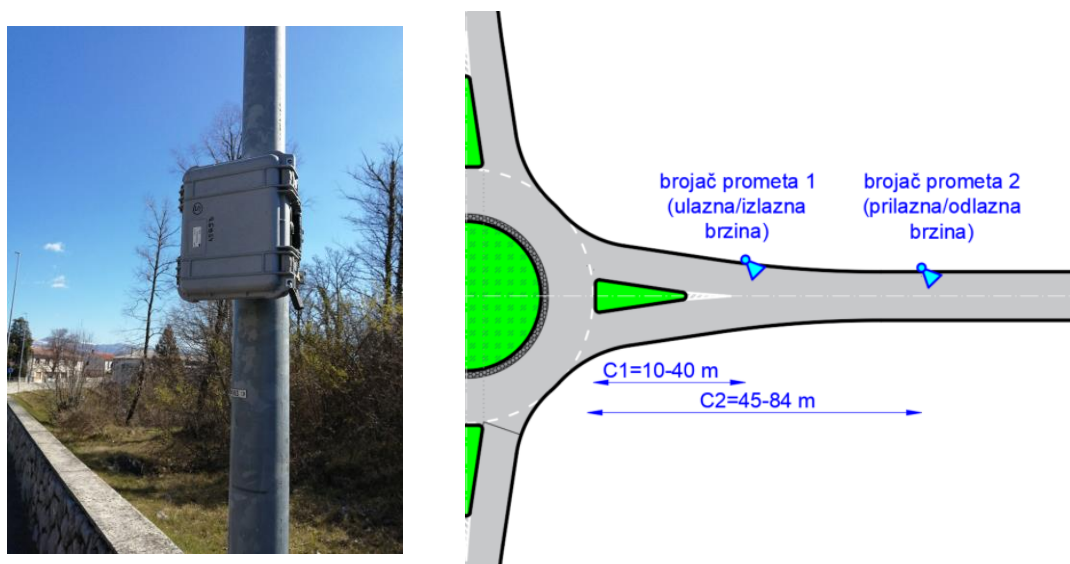
6.1. Terenska mjerenja

Terensko istraživanje provedeno je na devet jednotračnih kružnih raskrižja (oznaka KR 1-9) koja prema Hrvatskim smjernicama za projektiranje kružnih raskrižja (Hrvatske ceste, 2014) pripadaju kategoriji srednjih urbanih kružnih raskrižja (vanjski polumjer 15 do 20 metara). Ovakva kružna raskrižja najčešće se izvode na raskrižjima u urbanim područjima s većim prometnim opterećenjem. Njihovi oblikovni elementi odabrani su na način da omogućuju brzine do 40 km/h, dok se njihov kapacitet procjenjuje na oko 20 000 vozila dnevno (Hrvatske ceste, 2014).

Za potrebe preliminarne analize kapaciteta i performansi kružnih raskrižja, provedena su detaljna terenska mjerenja pomoću Datacollect SDR radarskih brojača prometa koji omogućuju precizno mjerenje:

- broja vozila – izraženo u broju vozila u odabranoj jedinici vremena
- strukture vozila - udio određene kategorije vozila u ukupnom broju vozila: osobnih vozila, kamiona, autobusa i teških teretnih vozila (TTV, duljine veće od 13 m)
- brzina u oba smjera kretanja.

Brojači su postavljeni na privozima analiziranih kružnih raskrižja, na visini od 2,20 metara, pričvršćeni na stupovima javne rasvjete ili na prometnim znakovima (slika 6.1). Podaci su prikupljeni kontinuirano tijekom 24 sata, na prosječan radni dan (srijeda i četvrtak), kako bi se obuhvatila tipična dnevna prometna opterećenja.



Slika 6.1. Brojač prometa (lijevo); Pozicija brojača prometa (desno)

Obrada podataka brojača prometa omogućuje analizu sljedećih brzina: operativne, prosječne, minimalne, maksimalne brzine, brzine koju ne prekoračuje 15 % i 50 % vozila, kao i postotka vozila koji prekoračuje ograničenje brzine.

Za daljnju analizu odabrane su dnevna operativna brzina (v_{85}), maksimalna brzina ($v_{\max}$) te postotak vozila koji prekoračuje ograničenje brzine (v_{exc}). Operativna brzina odražava realnu brzinu kretanja većine vozača, odnosno predstavlja brzinu ispod koje prometuje 85 % vozača te će biti korištena kao ključni ulazni parametar u izradi prometnih mikrosimulacijskih modela u programu VISSIM.

Maksimalna brzina i postotak vozila koji prekoračuju ograničenje brzine odabrani su jer pružaju informacije o ekstremnim brzinama i sigurnosnim rizicima u prometu. Ovi pokazatelji koriste se za procjenu utjecaja geometrijskih karakteristika kružnog raskrižja na potencijalni broj konflikata te na raspodjelu brzina vozila u užoj i široj zoni raskrižja, prikazanu u Poglavlju 6.3.

6.1.1. Analiza količine i strukture prometa, dnevne raspodjele prometnog opterećenja i brzina

Rezultati terenskih mjerenja za svako kružno raskrižje (KR) prikazani su u tablici 6.1. Za svako kružno raskrižje (KR) prikazana je struktura vozila po kategorijama, dnevno prometno opterećenje, prometno opterećenje u vršnom satu, udio dnevnog prometa u vršnom satu (VPO), raspodjela prometa na glavnom i sporednom smjeru te period prikupljanja podataka. Vrijednosti označene podebljano predstavljaju one rezultate koji odstupaju od preporuka Hrvatskih smjernica (Hrvatske ceste, 2014).

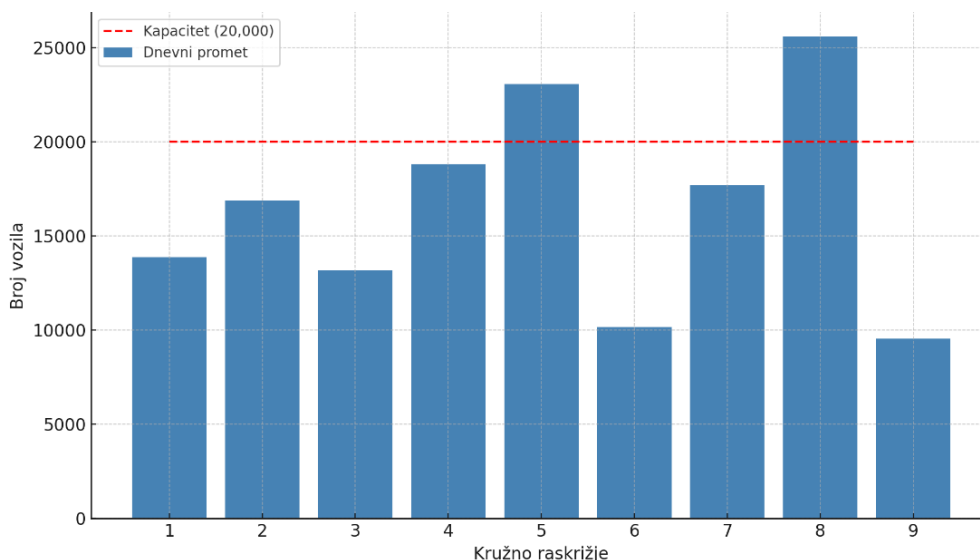
Glavnim smjerom se u ovom istraživanju definira onaj smjer kojim prolazi veće prometno opterećenje.

Tablica 6.1. Količina prometa, struktura i dnevna raspodjela prometnog opterećenja

KR	struktura vozila			dnevni promet [voz/dan]	vršni promet [voz/h]		VPO [%]	raspodjela prometa	period prikupljanja podataka
	kat.	glavni	sporedni		7–8 h	16–17 h			
1	auto	92,2%	99,2%	13 866	1122	1227	8,8	90:10	24.3. - 26.3. 2021.
	kamion	5,2%	0,3%						
	BUS	1,0%	0,5%						
	TTV	1,6%	0,0%						
2	auto	94,8%	97,2%	16 886	1263	1494	8,8	68:32	29.3. - 2.4.2021.
	kamion	3,7%	1,6%						
	BUS	1,0%	0,9%						
	TTV	0,5%	0,2%						
3	auto	97,5%	98,8%	13 167	965	1179	9,0	60:40	5.4. - 15.4. 2021.
	kamion	1,5%	0,7%						
	BUS	1,0%	0,5%						
	TTV	0,0%	0,0%						
4	auto	85,8%	96,0%	18 821	1462	1480	7,9	63:37	3.5. - 7.5. 2021.
	kamion	10,4%	2,6%						
	BUS	1,0%	1,0%						
	TTV	2,9%	0,4%						
5	auto	98,2%	94,2%	23 063	1544	1594	6,9	56:64	17.1. -21.1. 2022.
	kamion	0,5%	4,4%						
	BUS	1,0%	0,7%						
	TTV	0,3%	0,7%						
6	auto	94,8%	87,3%	10 166	752	930	9,1	89:11	24.1. -28.1. 2022.
	kamion	3,0%	10,3%						
	BUS	1,0%	1,0%						
	TTV	1,2%	1,3%						
7	auto	95,0%	4,1%	17 695	1168	963	5,4	80:20	28.11.-4.12. 2023.
	kamion	96,1%	3,9%						
	BUS	94,6%	4,4%						
	TTV	95,0%	4,1%						
8	auto	94,5%	3,2%	25 587	1467	1246	4,9	70:30	4.12.-29.12. 2023.
	kamion	95,9%	2,8%						
	BUS	95,9%	3,5%						
	TTV	94,5%	3,2%						
9	auto	98,1%	94,4%	9552	648	985	10,3	87:13	3.5.-7.5. 2021.
	kamion	0,2%	4,4%						
	BUS	1,2%	0,4%						
	TTV	0,5%	0,8%						

Podaci pokazuju da ukupna dnevna količina prometa na analiziranim kružnim raskrižjima varira u rasponu od 9552 vozila (KR9) do 25 587 vozila (KR8). Prosječna vrijednost dnevnog opterećenja među analiziranim raskrižjima iznosi 16 700 vozila. Dva raskrižja, KR5 i KR8, premašuju maksimalni kapacitet kojeg sugeriraju za ovaj tip raskrižja Hrvatske smjernice (Hrvatske ceste, 2014) od 20 000 vozila dnevno, koji je prema Hrvatskim smjernicama (Slika 6.2). U svrhu validacije prikupljenih podataka, izmjerena dnevna količina prometa uspoređena je s vrijednostima prosječnog godišnjeg dnevnog prometa (PGDP) iz službenih izvora – Izvješća o brojanju prometa na cestama Republike Hrvatske

(Hrvatske ceste, 2023) i pokazalo se da izmjerene dnevne količine prometa na analiziranim raskrižjima u pravilu odgovaraju vrijednostima PGDP-a iz službenih izvora, uz prihvatljive varijacije. Odstupanja između izmjerenih vrijednosti i službeno objavljenih podataka kreću se u rasponu od 3 % do maksimalno 8 %, što ukazuje na zadovoljavajuću usklađenost podataka te potvrđuje pouzdanost izvršenih mjerenja.



Slika 6.2. Dnevni promet u odnosu na preporučeni maksimalni kapacitet kružnog raskrižja

Analiza vremenske raspodjele dnevnog prometa pokazala je da se jutarnji vršni sat u pravilu javlja između 7:00 i 8:00 sati, dok je popodnevni vršni sat najčešće između 16:00 i 17:00 sati. Ovakav obrazac odražava tipične dnevne prometne tokove u urbanim sredinama. Daljnja analiza pokazala je da je prometno opterećenje u popodnevnom vršnom satu prosječno 1,19% veće nego u jutarnjem vršnom satu, stoga je za daljnju analizu odabran popodnevni vršni sat.

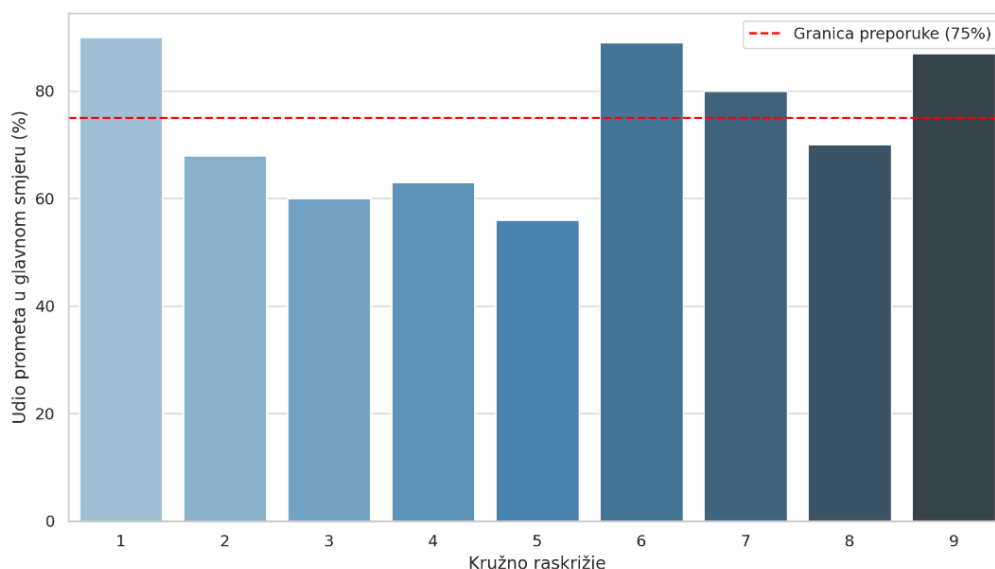
Udio dnevnog prometa u popodnevnom vršnom satu kreće se od 4,9 % do 10,3 %, s utvrđenom prosječnom vrijednosti od 7,6 %.

Struktura vozila pokazuje izrazitu dominaciju osobnih vozila, koja čine preko 85% ukupnog broja vozila na svim raskrižjima, pri čemu su KR1, KR5 i KR9 gotovo isključivo korištena od strane osobnih vozila (preko 98%). Udio kamiona, autobusa i teretnih vozila značajno varira između raskrižja, što ukazuje na specifične prometne zahtjeve pojedinih lokacija.

Strukturu prometa na glavnom smjeru u prosjeku čini 94,5% osobnih vozila, 3,5% kamiona, 1% autobusa i 1% teških teretnih vozila. Sporedni tok u prosjeku čini 95,3% osobnih vozila, 3,5% kamiona, 0,7% autobusa i 0,5% teških teretnih vozila.

Hrvatske smjernice (Hrvatske ceste, 2014) ne preporučuju uvođenje kružnoga raskrižja ako više od 75% ukupnog dnevnog prometa prolazi glavnim smjerom. Optimalna raspodjela prometnih tokova na kružnim raskrižjima podrazumijeva ravnotežu prometa

po privozima, odnosno da je prometno opterećenje po smjerovima približno jednako. Četiri analizirana raskrižja (KR1, KR6, KR7 i KR9) ne zadovoljavaju ovaj kriterij, ukazujući na potencijalne funkcionalne i sigurnosne probleme prometnog toka tih raskrižja (Slika 6.3).



Slika 6.3. Udio prometa na glavnom smjeru

Za ukupno 32 privoza analizirani su sljedeći parametri: ukupno dnevno prometno opterećenje, prosječna dnevna operativna brzina, maksimalna brzina te udio vozila koja prekoračuju ograničenje brzine.

Za svaki privoz, raspored brojača omogućio je evidentiranje četiriju karakterističnih presjeka brzina, čime su obuhvaćene faze usporavanja, ulaska u kružno raskrižje i ubrzanja pri izlasku iz kružnog raskrižja:

- Prilazna brzina: na udaljenosti 45-85 m prije ulaza u raskrižje
- Ulazna brzina: na udaljenosti 10-40 m prije ulaza u raskrižje
- Izlazna brzina: na udaljenosti 10-40 m nakon izlaza iz raskrižja
- Odlazna brzina: na udaljenosti 45-85 m nakon izlaza iz raskrižja

Rezultati terenskih mjerenja za sve privoze prikazani su u tablici 6.2., pri čemu je glavni smjer označen podebljanim slovima. Položaj svakog brojača prometa prikazan je na slici 6.1., a točne udaljenosti od ulaza u kružno raskrižje (oznake C1 i C2, u metrima) navedene su u tablici 6.2. Statistička analiza izmjerenih brzina prikazana je u tablici 6.3.

Tablica 6.2. Prikaz dnevnih brzina na analiziranim raskrižjima

KR	privoz	dnevni promet	PSL	ulazna V _{max}	ulazna V ₈₅	ulazna V _{ec}	izlazna V _{max}	izlazna V ₈₅	izlazna V _{ec}	prilazna V _{max}	prilazna V ₈₅	prilazna V _{ec}	odlazna V _{max}	odlazna V ₈₅	odlazna V _{ec}	pozicija	
																brojač C1	brojač C2
																m	m
1	1A	5318	50/50	75	50	13	92	52	21	x	x	x	x	x	x	20	x
	1B	893	50/50	69	52	20	85	57	40	65	41	2	70	42	2	31	56
	1C	7400	50/50	55	34	0	50	33	0	73	43	2	61	42	1	27	57
2	2A	4689	50/50	84	48	8	83	51	17	86	47	6	84	45	3	16	46
	2B	6596	50/40	53	29	11	66	38	12	103	55	30	91	59	49	10	67
	2C	5301	50/40	58	35	0	54	34	0	98	62	60	105	64	70	25	53
3	3A	4127	40/40	55	36	3	50	34	1	52	37	4	53	33	1	30	62
	3B	2256	40/40	72	50	66	67	49	59	66	44	31	68	49	60	31	60
	3C	4552	40/40	45	30	0	58	33	1	67	44	34	77	42	20	22	75
4	4A	2194	40/40	63	40	12	71	43	29	48	29	0	47	28	1	32	73
	4B	5502	40/40	91	56	75	91	54	89	117	80	46	124	73	24	30	82
	4C	5408	70/40	74	51	72	93	56	88	100	59	52	97	63	65	38	84
5	5A	1652	50/40	92	66	88	101	63	94	124	86	57	130	78	40	40	73
	5B	6711	70/40	48	29	0	76	36	4	103	65	74	109	67	85	33	75
	5C	6583	50/40	50	32	1	58	38	6	74	48	9	75	53	23	15	62
6	6A	4304	50/40	92	58	80	103	62	92	106	60	83	117	64	93	30	64
	6B	8366	50/40	69	38	7	71	40	13	93	48	9	91	46	5	30	70
	6C	4626	60/40	62	42	19	77	46	45	87	54	69	83	54	85	28	58
7	7A	4944	40/30	82	50	89	81	55	99	117	75	98	124	75	99	20	50
	7B	272	40/30	64	44	73	62	45	91	58	36	7	56	38	7	21	45
	7C	4380	40/30	98	62	99	83	58	99	94	59	93	81	56	90	21	46
8	8A	1023	40/30	74	43	78	94	44	71	x	x	x	x	x	x	16	x
	8B	7480	50/40	63	33	2	46	21	0	84	47	8	84	53	22	15	45
	8C	3462	50/40	55	35	4	58	38	8	41	30	0	49	32	0	12	42
9	9A	6753	40/40	76	41	17	75	45	37	68	45	37	74	46	38	20	40

KR	privoz	dnevni promet	PSL	ulazna	ulazna	ulazna	izlazna	izlazna	izlazna	prilazna	prilazna	prilazna	odlazna	odlazna	odlazna	pozicija	
				V _{max}	V ₈₅	V _{exc}	V _{max}	V ₈₅	V _{exc}	a V _{max}	a V ₈₅	V _{exc}	a V _{max}	V ₈₅	a V _{exc}	brojač C1	brojač C2
				km/h	km/h	%	km/h	km/h	%	km/h	km/h	%	km/h	km/h	%	m	m
8	8A	8028	50/40	76	40	1	69	42	2	94	58	43	96	57	45	21	45
	8B	7725	50/40	40	23	0	x	x	x	87	49	11	86	53	22	25	40
	8C	9834	50/40	64	33	2	70	43	28	79	44	3	84	49	10	22	46
9	9A	4555	50/30	76	49	93	84	49	97	90	46	5	73	47	7	31	60
	9B	806	30/30	73	44	87	68	47	90	56	41	52	66	47	78	26	51
	9C	3635	40/30	42	28	6	59	34	34	59	37	5	62	37	6	19	49
	9D	823	40/30	68	52	91	80	60	92	66	52	74	79	57	8	27	55
x – podatke nije bilo moguće prikupiti na lokaciji																	

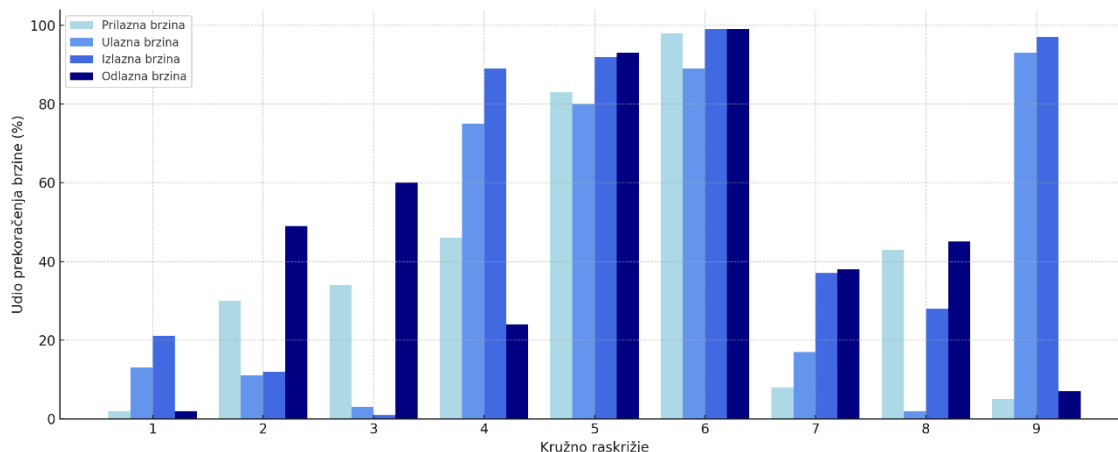
Tablica 6.3. Deskriptivna statistika – dnevne brzine

	dnevni promet	ulazna V _{max}	ulazna V ₈₅	ulazna V _{exc}	izlazna V _{max}	izlazna V ₈₅	izlazna V _{exc}	prilazna V _{max}	prilazna V ₈₅	prilazna V _{exc}	odlazna V _{max}	odlazna V ₈₅	odlazna V _{exc}
Broj opažanja	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Minimum	272,0	40,00	23,00	0,00	46,00	21,00	0,00	41,00	29,00	0,00	47,00	28,00	0,00
Maksimum	9834,0	98,00	66,00	99,00	103,00	63,00	99,00	124,00	86,00	98,00	130,00	78,00	99,00
1. kvartil	3160,5	55,00	33,75	2,00	60,50	38,00	7,00	66,00	43,25	5,25	68,50	42,75	6,25
Medijan	4657,5	68,50	41,50	12,50	71,00	45,00	34,00	85,00	47,50	30,50	82,00	51,00	22,50
3. kvartil	6624,7	76,00	50,00	75,75	83,50	53,00	89,50	97,00	58,75	55,75	94,75	58,50	63,75
Srednja vrijednost	4693,6	67,44	42,28	34,91	73,39	45,16	43,84	81,83	50,70	33,47	83,20	51,63	35,30
	629190												
Varijanca	1,7	227,16	113,43	1471,64	236,51	102,41	1490,21	472,01	183,04	978,53	495,89	160,17	1127,87
Standardna devijacija	2508,3	15,07	10,65	38,36	15,38	10,12	38,60	21,73	13,53	31,28	22,27	12,66	33,58

Srednja vrijednost od 4694 vozila dnevno po privozu, uz standardnu devijaciju od 2508 vozila dnevno po privozu ukazuje na veliku varijabilnost opterećenja. Najmanja izmjerena količina prometa iznosi 272 vozila dnevno (privoz 6B), a najveća 9834 vozila dnevno (privoz 8C).

Vrijednost prilaznih operativnih brzina kreće se između 29 km/h i 86 km/h, što dodatno potvrđuje raznolikost prometnih uvjeta. Ulazne operativne brzine variraju od 23 km/h do 66 km/h. Posebno je naglašen visok postotak prekoračenja brzina pri ulasku u kružno raskrižje. Prosječno 34 % vozila prekoračuje ograničenje brzine pri nailasku na kružno raskrižje, dok je na 10 privoza uočeno prekoračenje više od 70 %. Operativne izlazne brzine kreću se od 21 km/h do 63 km/h, vrijednosti koje su vrlo bliske ulaznim brzinama. Prosječno 45 % vozila prekoračuje ograničenje brzine u pri izlasku iz kružnog raskrižja, dok na 10 privoza više od 90 % vozila vozi iznad ograničenja. Odlazna operativna brzina izmjerena je između 28 km/h i 78 km/h, dok prosječno 35 % vozila prekoračuje ograničenje brzine.

Statističkom obradom podataka o brzinama (tablica 6.3) uočeno je da srednja vrijednost operativnih brzina varira između 42 km/h i 51 km/h. Analiza srednjih vrijednosti može dati pogrešnu sliku stvarne prometne situacije, obzirom da se na velikom broju privoza razvija značajno veća operativna brzina (do 86 km/h) i dolazi do značajnih prekoračenja propisanih brzina (slika 6.4). Iz toga razloga, u nastavku istraživanja analize utjecaja projektnih elemenata na brzinu i potencijalni broj konflikata, korištena je stvarna operativna brzina na svakom privozu kod modela stvarnih raskrižja. U teorijskom dijelu istraživanja korištena je izmjerena operativna brzina kojom prolazi 85% vozila.



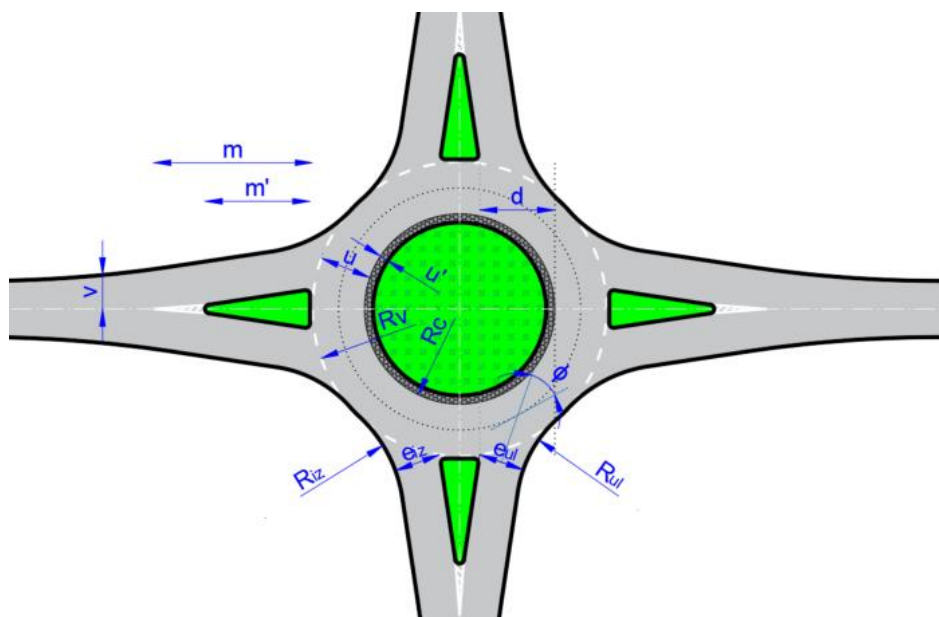
Slika 6.4. Usporedba udjela vozila koja prekoračuju dozvoljenu brzinu - analizirano po raskrižjima

6.1.2. Projektni elementi analiziranih kružnih raskrižja

Za prikupljanje podataka o projektnim elementima analiziranih kružnih raskrižja korištena je dostupna projektna dokumentacija ustupljena od Županijske uprave za ceste. Za daljnju analizu odabrani su projektni elementi za koje Hrvatske smjernice (Hrvatske ceste, 2014) propisuju preporučene i granične vrijednosti (tablica 6.4, slika 6.1), a to su:

- vanjski polumjer kružnog raskrižja [m] (R_v)
- širina kružnog kolnika [m] (u)
- širina ulaza i izlaza [m] (e_{ul} , e_{iz})
- ulazni i izlazni polumjer [m] (R_{ul} , R_{iz})
- širina voznog traka [m] (v)
- duljina razdjelne površine [m] (m)
- ulazni kut [°] (ϕ)
- defleksija [m] (d)
- duljina razdjelnog otoka [m] (m')
- polumjer središnjeg otoka, uključujući voznu površinu [m] (R_c)
- širina povoznog dijela središnjeg otoka [m] (u')
- uzdužni nagib privoza [%] (i)

Projektni elementi analiziranih raskrižja označeni su na slici 6.5. i prikazani u tablici 6.4. Vrijednosti koje odstupaju od preporuka Hrvatskih smjernica označene su podebljano. Sva analizirana raskrižja kategorizirana su kao srednje velika urbana kružna raskrižja. Vanjski polumjer kružnog raskrižja u promatranom uzorku od 9 kružnih raskrižja kretao se između 15 i 19 metara.



Slika 6.5. Projektni elementi jednotračnog kružnog raskrižja

Tablica 6.4. Projektni elementi analiziranih kružnih raskrižja

KR	privoz	Rv	u	e _{ul}	R _{ul}	e _{iz}	R _{iz}	v	m	φ	d	m'	Rc	u'	i
Preporuke		13,5-22,5	4,5-6,0	4-7	8-20	4-7	10-25	3,0-3,5	15-50	20-40	/	max 25	7,5-18	min 1	13,5-22,5
1	1A	15	8,25	4,8	14	5,6	16	4	20,0	38	1,1	12,5	6,75	1,75	4
	1B			5,3	12	4,0	15	3	13,7	37	x	10,5			-9
	1C			6,1	14	6,4	18	3,25	19,5	40	12,1	11,6			1
2	2A	16	7,0	5,2	19	6,5	14	3	31,0	31	x	16,7	9	2,0	-7
	2B			5,0	16	5,9	16	3,5	129,0	35	6,4	15,9			-1
	2C			4,6	13	4,8	16	3,25	149,0	36	7,6	8,7			1
3	3A	18	7,0	5,0	14	7,6	14	3,25	24,5	38	11,3	15,5	9	2,0	-10
	3B			5,6	14	6,7	16	3,5	92,4	42	8	53,5			-2
	3C			4,8	14	8,0	14	3,6	25,7	34	9,4	13,4			5
	3D			5,3	11	5,6	15	3,5	96,0	40	7,4	17,0			3
4	4A	16	6,5	5,6	18	5,8	18	3	55,2	37	7,5	20,0	11,5	1,5	2
	4B			6,9	16	4,6	18	3	66,5	46	12,1	18,6			-7
	4C			5,6	18	5,8	18	3,5	52,9	38	12,5	17,9			-1
	4D			5,9	16	5,6	16	3,5	43,1	42	7,8	20,0			5
5	5A	16	7,0	5,8	14,6	4,7	16	3	25,0	42	8,4	11,0	9	1,5	0
	5B			5,2	14	5,3	14,6	3,5	39,0	39	8,2	20,5			0
	5C			4,5	14	4,5	16	3,5	30,0	33	6,6	15,0			-2
	5D			5,4	15	5,4	16	3,5	40,0	38	6,3	21,0			4
6	6A	15	6,5	5,2	12,5	6,5	21	3,5	50,0	42	6,7	25,0	8,5	2	7
	6B			5,4	12,6	4,9	15	3	21,5	22	6,9	13,4			0
	6C			5,6	18	6,5	11,1	3,3	50,0	38	7,0	17,5			-5
	6D			4,4	24	4,5	18,5	3	11,5	46	6,3	6,2			0
7	7A	17,5	6,5	5,6	17	6,4	18	3,2	5,0	40	14,3	5,0	11	2,5	-3
	7B			6,2	19	5,5	16	3	21,0	41,5	x	13,5			-5
	7C			5,5	16	6,0	19	3,2	19,0	40	4,7	13,0			3

KR	privoz	Rv	u	e _{ul}	R _{ul}	e _{iz}	R _{iz}	v	m	φ	d	m'	Rc	u'	i
Preporuke		13,5-22,5	4,5-6,0	4-7	8-20	4-7	10-25	3,0-3,5	15-50	20-40	/	max 25	7,5-18	min 1	13,5-22,5
8	8A	19	7	5,8	15	5,8	16	4	31,0	41	11,0	14,5	12	2	3
	8B			5,6	22,3	6,4	16	3,5	37,5	33	8,5	14,7			-8
	8C			6,4	15	5,7	22,3	3,5	35,5	44	9,9	14,5			-7
9	9A	15	6	4,9	11	5,6	15	4,2	48,6	35	4,9	13,5	9	2	11
	9B			4,9	14	5,3	11	3,38	26,1	42	7,4	13,5			0
	9C			6,9	17	5,3	14	3,8	95,0	55	10,4	12,6			-10
	9D			4,6	14	5,3	21	3,7	6,0	36	6,0	0,0			-1
Srednja vrijednost		16,6	6,9	5,4	14,2	5,7	16,2	3,3	44	38	8,1	15,5	9,5	1,9	-0,9
x – podatke nije bilo moguće prikupiti na lokaciji															

Širina kružnog kolnika na analiziranom uzorku raskrižja se kreće se u rasponu od 6 do 8,3 metra. Vrijednosti sustavno prelaze preporučeni raspon od 4,5 do 6 metara. Za širinu ulaza vrijednosti se kreću između 4,4 i 6,9 metara a za izlazne širine između 4 i 8 metara. Oba elementa nalaze se unutar preporučenih granica (4 do 7 metara), uz uočene više vrijednosti kod izlaznih traka. Vrijednosti ulaznih polumjera kreću se od 11 do 24 metra, dok je kod izlaznih polumjera ta vrijednost između 11 i 22,3 metra. Sukladno Hrvatskim smjernicama (Hrvatske ceste, 2014), preporuka je izvođenje većih izlaznih polumjera, kako bi se omogućilo brže i sigurnije napuštanje kružnog kolnika.

Raspon širine voznog traka na privozu iznosi od 3 do 4,2 metra. Odstupanje od preporučenih širina (od 3 do 3,5 metra) uočena je na šest privoza.

Značajna varijabilnost uočena je kod duljine razdjelne površine, gdje vrijednosti variraju od 5 do 149 metara. Na deset privoza duljina razdjelne površine nije u skladu s preporukama (od 15 do 50 metara). Ulazni kut pokazuje raspon od 22° do 55°, sa srednjom vrijednošću 38,8°. Većina vrijednosti je unutar preporučenog raspona od 20° do 40°, ali su prisutni i veći ulazni kutovi, i to na deset privoza. Defleksija, kao mjera zakrivljenosti putanje vozila kroz raskrižje, pokazuje izrazitu varijabilnost – od 1,1 do 53,5 metara, uz srednju vrijednost 8,2 metra. Vrijednosti polumjera središnjeg otoka iznose 6,75 i 12 metara (srednja vrijednost 9,5 metra). Širina povoznog dijela iznosi 1,5, 1,75 ili 2 m, Uzdužni nagibi privoza variraju od -10% do +11%. Ova varijabilnost je očekivana zbog topografskih specifičnosti grada Rijeke.

Provedena terenska mjerenja na devet jednotračnih kružnih raskrižja u Gradu Rijeci pokazala su izrazitu varijabilnost dnevnog prometnog opterećenja i neravnomjernu raspodjelu prometnih tokova na odabranim raskrižjima. Četiri analizirana raskrižja imaju izrazito dominantan glavni smjer koji preuzima više od 75 % ukupnog dnevnog prometnog opterećenja. Analiza strukture prometa pokazuje dominantnu zastupljenost osobnih vozila (> 85 %), uz primjetne razlike u udjelu teretnih vozila među pojedinim lokacijama.

Analizom projektnih elemenata utvrđeno je da većina vrijednosti odgovara preporukama iz važećih Hrvatskih smjernica (Hrvatske ceste, 2014). U preporučenim rasponima nalaze se vanjski polumjeri kružnih raskrižja, širine ulaza i izlaza, ulazni i izlazni polumjeri, kao i dimenzije središnjih otoka i širina povoznog dijela središnjeg otoka. Odstupanja od preporučenih vrijednosti uočena su kod širine kružnog kolnika, širine voznog traka na privozu, duljine razdjelne površine i ulaznog kuta.

Rezultati terenskih mjerenja pružaju važnu početnu bazu podataka o stvarnim prometnim uvjetima, strukturi vozila i karakteristikama brzina na kružnim raskrižjima. Dobiveni podaci služili su kao osnova za daljnja teorijska istraživanja i razvoj modela prometnih mikrosimulacija, izrađenih korištenjem prosječnih vrijednosti projektnih i prometnih parametara stvarnih raskrižja, što je detaljno prikazano u poglavlju 6.2.

Također, ova baza podataka korištena je za analizu utjecaja projektnih elemenata na sigurnost prometa na kružnim raskrižjima, čiji su rezultati predstavljeni u poglavlju 6.4.

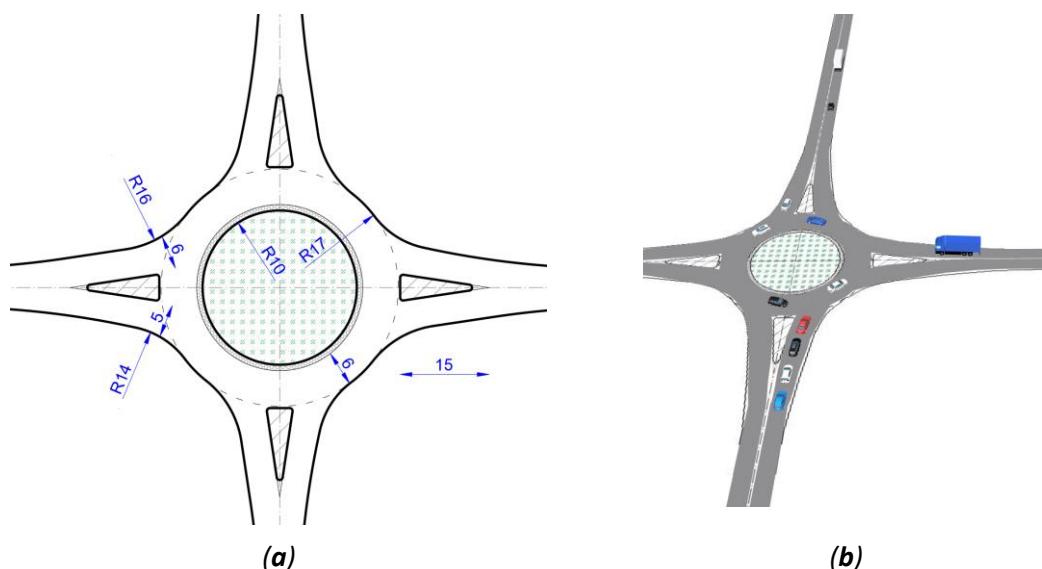
6.2. Model za predikciju vremena putovanja temeljen na različitim scenarijima

Analizom tehničke regulative i dostupnih znanstvenih istraživanja, detaljnije prikazanom u poglavlju 2 i 3, utvrđeno je da većina istraživanja promatra kružna raskrižja kao izolirane jedinice, često zanemarujući njihovu interakciju sa susjednim raskrižjima. Kako bi se utvrdio utjecaj susjednog semaforiziranog raskrižja na kružno raskrižje, provedeno je preliminarno istraživanje optimalne udaljenosti kružnog i semaforiziranog raskrižja na koridoru.

Mikrosimulacijski modeli razvijeni u programu VISSIM korišteni su za istraživanje različitih scenarija koje uključuju, kako izolirana kružna raskrižja, tako i kružna raskrižja u interakciji sa semaforiziranim raskrižjima. Na temelju dobivenih rezultata uspostavljen je preliminarni regresijski model za predviđanje vremena putovanja na temelju vršnog prometnog opterećenja, raspodjele prometa i udaljenosti između raskrižja. Nakon kalibracije, točnost predviđanja modela potvrđena je korištenjem standardnih analiza i izdvajanjem dijela podataka za validaciju. Metodologija istraživanja detaljno je objašnjena u poglavlju 5. Pri definiranju različitih prometnih uvjeta – scenarija korišteni su rezultati terenskih mjerenja prikazani u prethodnom poglavlju (6.1.).

6.2.1. Prometni mikrosimulacijski model

Mikrosimulacijski model izrađen je za reprezentativni primjer srednje velikog jednotračnog urbanog kružnog raskrižja s vanjskim polumjerom od 17 metara (slika 6.6). Veličina vanjskog polumjera određena je kao aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti stvarnih kružnih raskrižja analiziranih u Poglavlju 6.1. Pri izradi prometnog mikrosimulacijskog modela korišteni su prosječni projektni i prometni parametri dobiveni analizom navedenih raskrižja, koji su detaljno prikazani u tablici 6.5.



Slika 6.6. (a) Projektni elementi mikrosimulacijskog modela; (b) VISSIM model

Prema Hrvatskim smjernicama (Hrvatske ceste, 2014), ograničenje brzine unutar kružnog raskrižja ove veličine iznosi 40 km/h. Ograničenje brzine na glavnom smjeru iznosi 50 km/h, a na sporednom 40 km/h. Svi privozi modelirani su kao dvotračni dvosmjerni, širine prometne trake 3,25 m, uzdužnog nagiba 0%. Radi dobivanja jednostavnijih i relevantnijih rezultata, korišten je optimalan položaj osi privoza pod pravim kutom, bez pješačkih prijelaza (prikazano na slici 6.6).

Tablica 6.5. Projektni i prometni parametri mikrosimulacijskog modela

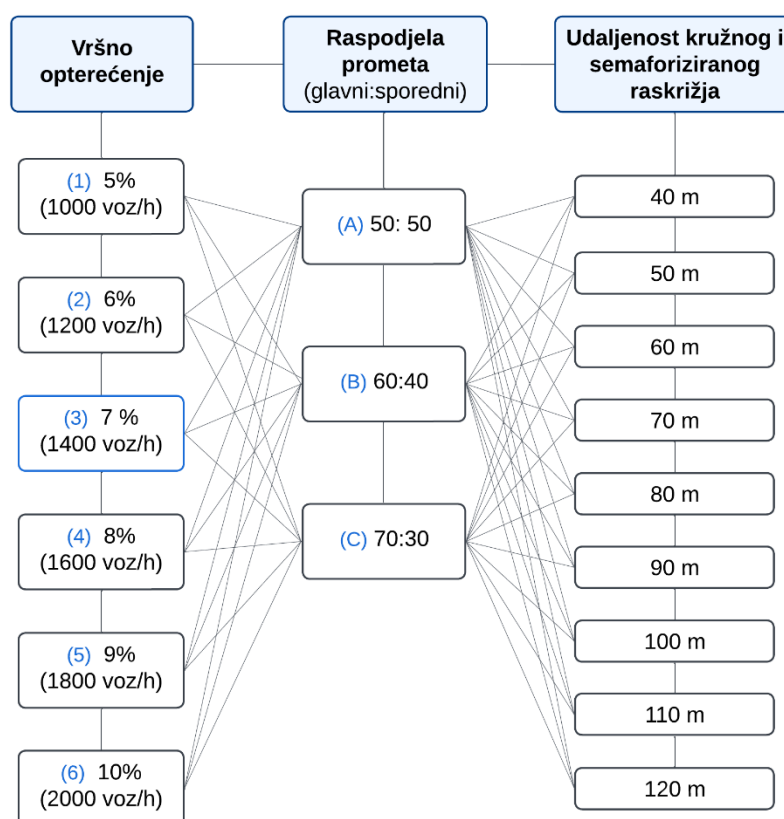
Broj privoza	Vanjski polumjer	Širina kružnog kolnika	Ulazni polumjer	Izlazni polumjer	Struktura vozila		
	m	m	m	m	kategorija	glavni	sporedni
4	17	6	15	16	auto	94,5%	95,3%
					kamion	3,5%	3,5%
					BUS	1,0%	0,7%
					TTV	1,0%	0,5%

Uzimajući u obzir različite raspodjele prometnih tokova zabilježene terenskim mjerenjima (koje se kreću u omjerima od 56:44 do 90:10 i prikazane su u tablici 6.1), razmotrene su tri moguće raspodjele prometnog toka na glavnom i sporednom smjeru – 70:30, 60:40 i 50:50. Navedene raspodjele predstavljaju tipične scenarije neuravnoteženog i uravnoteženog prometnog toka u skladu s ograničenjima Hrvatskih smjernica (Hrvatske ceste, 2014). Omjer 50:50, iako se rjeđe bilježi, služi kao referentna točka za optimalne scenarije.

Temeljem analize udjela dnevnog prometnog opterećenja u vršnome satu (prikazano u tablici 6.1), u analizu su, kao opterećenje vršnog sata, uključene vrijednosti od 5%, 6%, 7%, 8%, 9% i 10% maksimalnog kapaciteta srednje velikog urbanog kružnog raskrižja (20

000 voz/dan), što odgovara vršnim prometnim opterećenjima od 1000 voz/h, 1200 voz/h, 1400 voz/h, 1600 voz/h, 1800 voz/h i 2000 voz/h.

Grafički prikaz usvojenih parametara prikazan je na slici 6.7. Kombinacijom ulaznih parametara generirano je ukupno 180 scenarija modela prometnih mikrosimulacija, čiji rezultati su bili temelj za daljnju analizu i razvoj regresijskih modela.



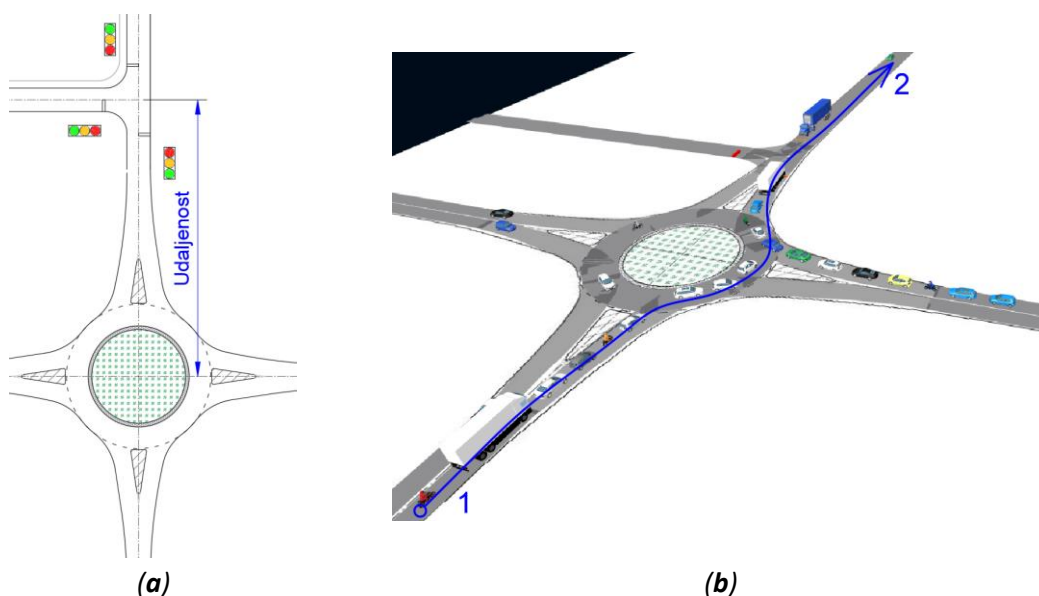
Slika 6.7. Ulazni parametri preliminarnog modela

U skladu s preporukama (PTV GROUP, 2022), provedeno je deset simulacija za svaki scenarij, a za analizu je korištena prosječna vrijednost. Ukupno je provedeno 180 simulacija izoliranog kružnog raskrižja te 1620 simulacija za analizu utjecaja semaforiziranog raskrižja na susjedno kružno raskrižje. Cjelokupno trajanje jedne mikrosimulacije iznosilo je 75 minuta, pri čemu su prvih 15 minuta predstavljale fazu inicijalizacije, dok je preostalih 60 minuta služilo za daljnju analizu.

U Poglavlju 5.2.2. prikazani su rezultati analize izoliranog kružnog raskrižja, a u Poglavlju 5.2.3. analiza utjecaja semaforiziranog raskrižja na prometne pokazatelje susjednog kružnog raskrižja.

U prvom je koraku izrađen mikrosimulacijski model za izolirano kružno raskrižje, a u slijedećem je u prometnu mrežu integrirano trokrako semaforizirano raskrižje. Razmatrane su različite udaljenosti između središta kružnog i semaforiziranog raskrižja

od 40 do 120 metara, kako je prikazano na slici 6.8. Minimalna udaljenost od 40 metara utvrđena je kao prag za uklapanje projektnih elemenata oba raskrižja. Gornja granica od 120 metara definirana je proizvoljno, a svrha odabira bila je osigurati dovoljno širok interval za detaljnu analizu prometnih uvjeta. Unutar navedenog raspona definirano je ukupno deset različitih udaljenosti, što omogućuje sustavno praćenje i preliminarno vrednovanje utjecaja promjene udaljenosti na ključne prometne parametre.



Slika 6.8. (a) Prometna mreža modela; (b) VISSIM model kružnog i semaforiziranog raskrižja

Određivanje optimalne duljine ciklusa semafora ovisi o nizu faktora – prometnom opterećenju, geometriji raskrižja i specifičnim uvjetima lokacije (Li i sur., 2004; Builenko i sur., 2018). Uobičajeno se duljina ciklusa u kojem su predviđene dvije faze zelenog svjetla kreće između 60 i 90 sekundi (Hrvatske ceste, 2001). U cilju utvrđivanja optimalnog ciklusa, semaforizirano je raskrižje u ovom slučaju analizirano u programu SIDRA Intersection (SIDRA Solutions, 2024.).

Najviša razina uslužnosti postignuta je pri ciklusu od 60 sekundi. Utvrđeno je zeleno svjetlo prve faze u trajanju od 33 sekunde te zeleno svjetlo druge faze u trajanju od 17 sekundi. Gubici unutar faze obuhvaćaju žuto svjetlo u trajanju od 2 sekunde, crveno-žuto svjetlo od 2 sekunde te sve-crveno svjetlo u trajanju od 1 sekunde.

6.2.2. Analiza rezultata

Analiza rezultata podijeljena je prema provedenim fazama istraživanja:

- (1) analiza izoliranog kružnog raskrižja;
- (2) utjecaj semaforiziranog raskrižja na kružno raskrižje;
- (3) statistička analiza i razvoj modela.

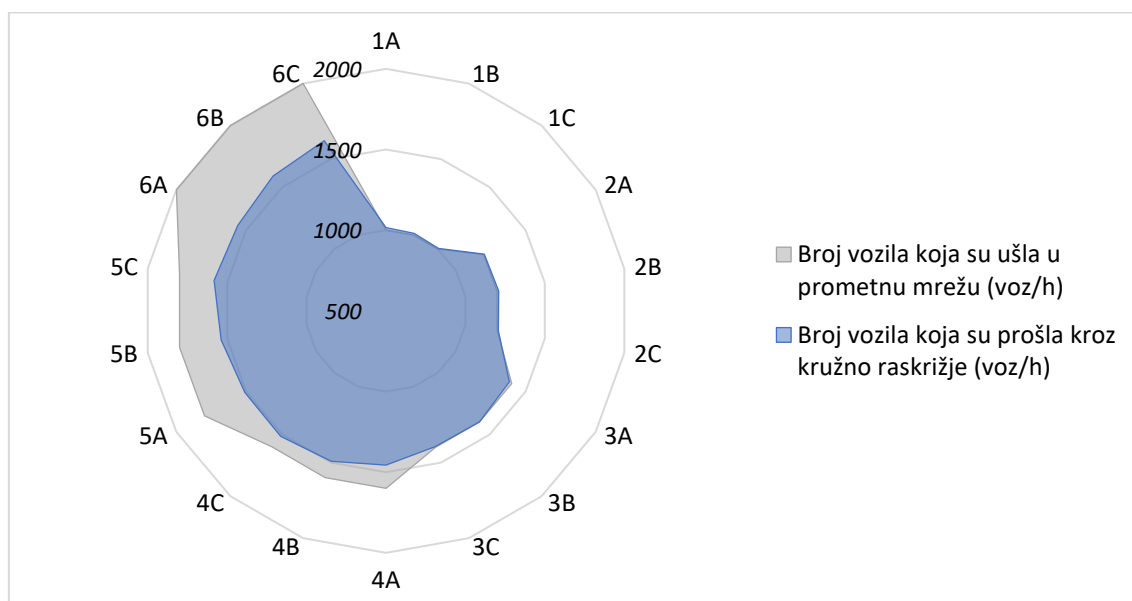
Rezultati mikrosimulacija obuhvaćaju sljedeće prometne pokazatelje (Prilog A):

- prosječnu i maksimalnu duljinu reda čekanja (Q_{Len} , Q_{LenMax}) [m],
- broj vozila koja su prošla kroz kružno raskrižje ($VehPass$) [voz],
- razinu uslužnosti (LOS),
- prosječno vrijeme kašnjenja po vozilu ($VehDelay$) [s/voz],
- kašnjenje pri zaustavljanju ($StopDelay$) [s/voz],
- broj zaustavljanja po vozilu ($Stops$) [/],
- emisiju ugljikova monoksida ($EmissCO$) [g],
- potrošnju goriva ($Fuel$) [gal]
- vrijeme putovanja od kružnog do semaforiziranog raskrižja [s].

Vrijeme putovanja analizirano je za rutu između definiranih točaka 1 i 2 (Slika 6.8b), međusobno udaljenih 300 metara. Duljina analizirane dionice odabrana je kako bi se detaljno obuhvatili svi relevantni segmenti kretanja vozila u uvjetima međusobnog utjecaja kružnog i semaforiziranog raskrižja. Odabrana duljina omogućuje precizno mjerenje vremena putovanja, uključujući fazu usporenja vozila pri približavanju kružnom raskrižju, prolazak kroz kružno raskrižje, ubrzanje vozila nakon izlaska iz kružnog raskrižja te dodatno usporenje, zaustavljanje i prolazak kroz semaforizirano raskrižje. Također, dionica omogućava analizu utjecaja različitih udaljenosti između raskrižja (40 – 120 m), osiguravajući pritom dovoljnu varijabilnost podataka za detaljnu statističku obradu.

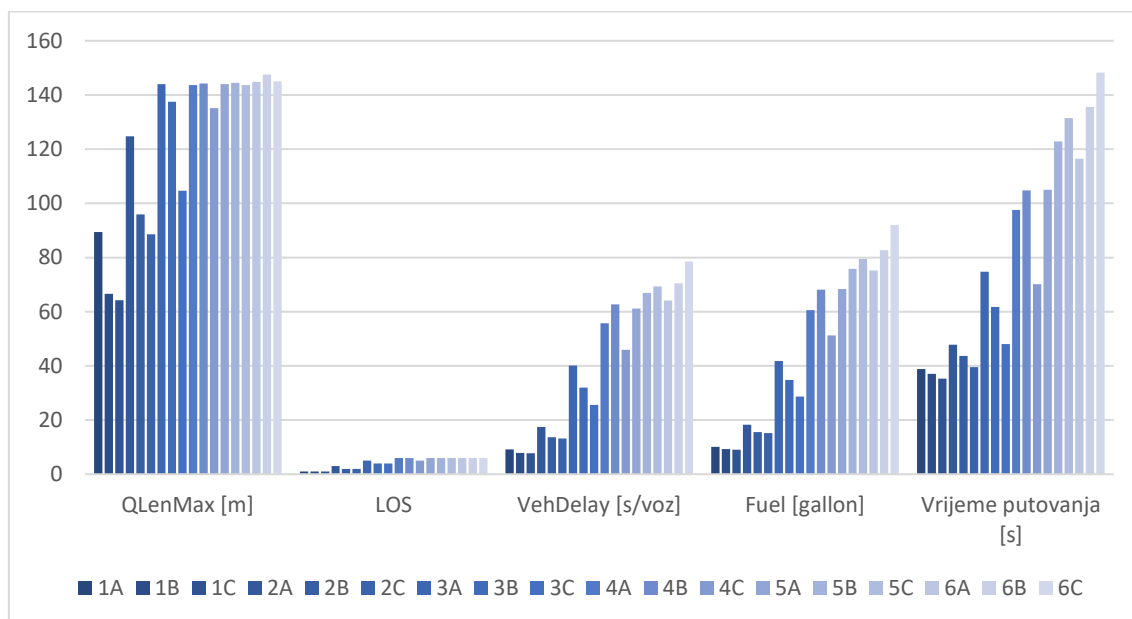
6.2.2.1. Analiza rezultata prometnih mikrosimulacija - izolirano kružno raskrižje

Rezultati pokazuju da pri manjim vršnim prometnim opterećenjima (5-7 %) sva vozila koja ulaze u prometnu mrežu uspijevaju proći kroz kružno raskrižje tijekom vršnog sata (Slika 6.9). Međutim, pri većim vršnim opterećenjima (9-10 %) premašuje se kapacitet kružnog raskrižja te između 15 i 22 % vozila nije u mogućnosti proći kroz kružno raskrižje unutar sat vremena.



Slika 6.9. Kapacitet izoliranog kružnog raskrižja u različitim scenarijima

Analiza prosječne duljine čekanja pokazuje da prosječna duljina reda čekanja, a osobito njegova maksimalna vrijednost, značajno rastu s povećanjem vršnog prometnog opterećenja. Pri manjem prometnom opterećenju (5-6 % dnevnog prometa u vršnom satu) prosječna duljina reda čekanja gotovo je zanemariva (2-10 m). Međutim, u scenarijima većeg prometnog opterećenja, redovi čekanja postaju osjetno duži – 35 do 69 metara. Usporedba prometnih pokazatelja za scenarije izoliranih kružnih raskrižja prikazana je na slici 6.10. Oznake 1A do 6C, prikazane na slikama 6.9 i 6.10., odnose se na scenarije definirane na slici 6.7.



Slika 6.10. Usporedba prometnih pokazatelja kod različitih scenarija izoliranog kružnog raskrižja

Pri manjem prometnom opterećenju (5-6 % dnevnog prometa u vršnom satu) prosječna vremena kašnjenja kraća su od 10 s/voz, što odgovara razini usluznosti A (TRB, 2010). Pri većim vršnim opterećenjima (9-10 % dnevnog opterećenja), vrijednosti prosječnih vremena kašnjenja značajno rastu (> 60 s/voz) te se razina usluznosti smanjuje na razinu F.

Vrijeme putovanja (na definiranoj ruti od 300m) pri manjim prometnim opterećenjima (5-6 %) varira između 35 i 50 sekundi. Pri većim vršnim opterećenjima (9-10 %) vrijeme putovanja značajno se povećava – 116 do 207 sekundi. Analiza utjecaja distribucije prometa pokazuje da pri manjem prometnom opterećenju (5-6 %) neuravnotežena raspodjela prometnog toka (70:30) dovodi do duljih prosječnih redova čekanja u odnosu na uravnoteženu raspodjelu (50:50). Međutim, kada je prometno opterećenje veliko (9-10 %), scenariji s ravnomjernom raspodjelom prometa po smjerovima (50:50) pokazuju više vrijednosti svih prometnih pokazatelja u usporedbi sa scenarijima gdje je raspodjela prometa po smjerovima 70:30.

6.2.2.2. Kružno raskrižje u interakciji sa semaforiziranim raskrižjem

Analiza utjecaja blizine semaforiziranog raskrižja na susjedno kružno raskrižje temeljila se na analizi dva odabrana prometna pokazatelja: prosječno vrijeme kašnjenja vozila i vrijeme putovanja. Pregled dosadašnjih istraživanja (Poglavlje 3) potvrdio je da ova dva pokazatelja omogućuju pouzdanu analizu prometnih tokova u različitim uvjetima.

Analiza korelacija prometnih pokazatelja napravljena je na temelju rezultata mikrosimulacijskih scenarija pri različitom prometnom opterećenju, raspodjeli prometa na glavnom i sporednom smjeru te odabranim različitim udaljenostima kružnog i semaforiziranog raskrižja. Rezultati analize korelacije su prikazani u tablici 6.6.

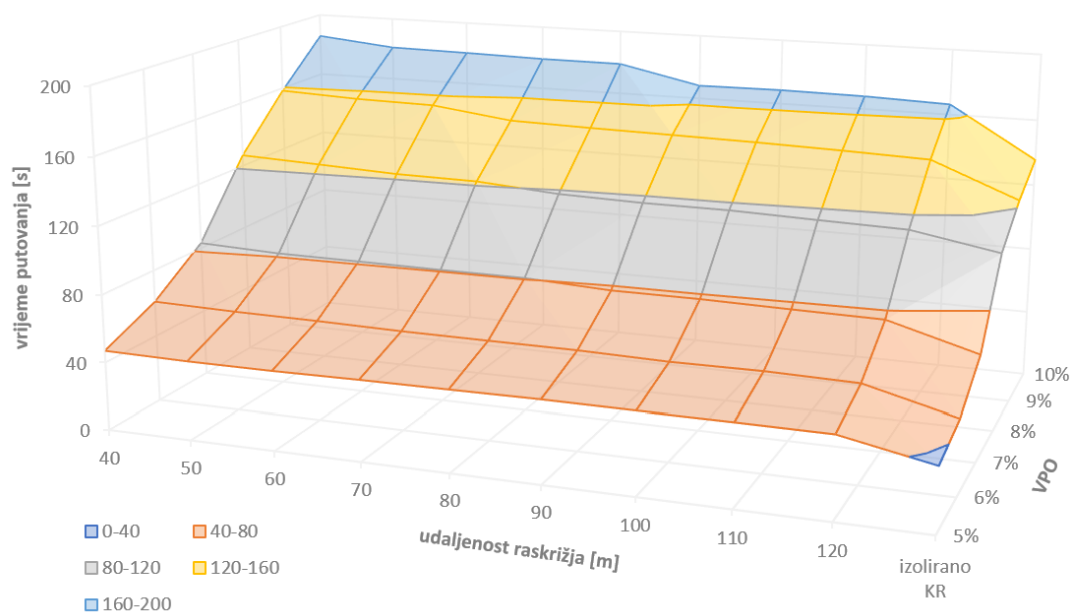
Tablica 6.6. Korelacijska matrica prometnih pokazatelja

Prometni pokazatelj	QLen	QLenMax	Veh Pass	LOS	Veh Delay	Stop Delay	Stops	EmissCO	Fuel	Vrijeme putovanja
QLen	1	0,846	0,887	0,932	0,991	0,962	0,998	0,998	0,998	0,962
QLenMax	0,846	1	0,926	0,924	0,841	0,790	0,860	0,859	0,859	0,796
VehPass	0,887	0,926	1	0,949	0,867	0,809	0,900	0,904	0,904	0,829
LOS	0,932	0,924	0,949	1	0,927	0,884	0,941	0,938	0,938	0,858
VehDelay	0,991	0,841	0,867	0,927	1	0,988	0,989	0,988	0,988	0,954
StopDelay	0,962	0,790	0,809	0,884	0,988	1	0,956	0,955	0,955	0,926
Stops	0,998	0,860	0,900	0,941	0,989	0,956	1	0,999	0,999	0,965
EmissCO	0,998	0,859	0,904	0,938	0,988	0,955	0,999	1	1,000	0,968
Fuel	0,998	0,859	0,904	0,938	0,988	0,955	0,999	1,000	1	0,968
Vrijeme putovanja	0,962	0,796	0,829	0,858	0,954	0,926	0,965	0,968	0,968	1

Iz korelacijske matrice prometnih pokazatelja dobivenih prometnim mikrosimulacijama vidljivo je da su vrijeme putovanja i prosječno kašnjenje vozila u snažnoj pozitivnoj korelaciji s ostalim prometnim pokazateljima. Ovi rezultati upućuju na to da promjene u uvjetima prometovanja koje uzrokuju veća prosječna kašnjenja i dulja vremena putovanja istodobno dovode do proporcionalnih promjena i u ostalim prometnim pokazateljima. Primjerice, vrijeme putovanja pokazuje korelacijske koeficijente veće od 0,95 s većinom navedenih pokazatelja (npr. s prosječnom duljinom kolone čekanja 0,96, s brojem zaustavljanja 0,97, a s emisijama i potrošnjom goriva 0,97). Slično tome, prosječno vrijeme kašnjenja vozila također je, očekivano, gotovo savršeno korelirano s duljinom kolone (0,99) te s brojem zaustavljanja (0,99), kao i s ostalim pokazateljima.

U nastavku je analiziran utjecaj odabranih ulaznih parametara na vrijeme putovanja i prosječno vrijeme kašnjenja vozila u prometnom toku.

Na slici 6.11 prikazan je relativni odnos između vremena putovanja, udjela dnevnog prometa u vršnom satu (VPO) te udaljenosti kružnog i semaforiziranog raskrižja. Pri tome je izdvojen udio prometa na glavnom smjeru od 60 %, koji je utvrđen kao najčešći na analiziranim kružnim raskrižjima temeljem terenskih mjerenja. Navedeni prikaz moguće je generirati za sve scenarije.



Slika 6.11. Utjecaj postotka dnevnog prometnog opterećenja u vršnom satu i udaljenosti između raskrižja na vrijeme putovanja za udio prometa na glavnom smjeru 60 %

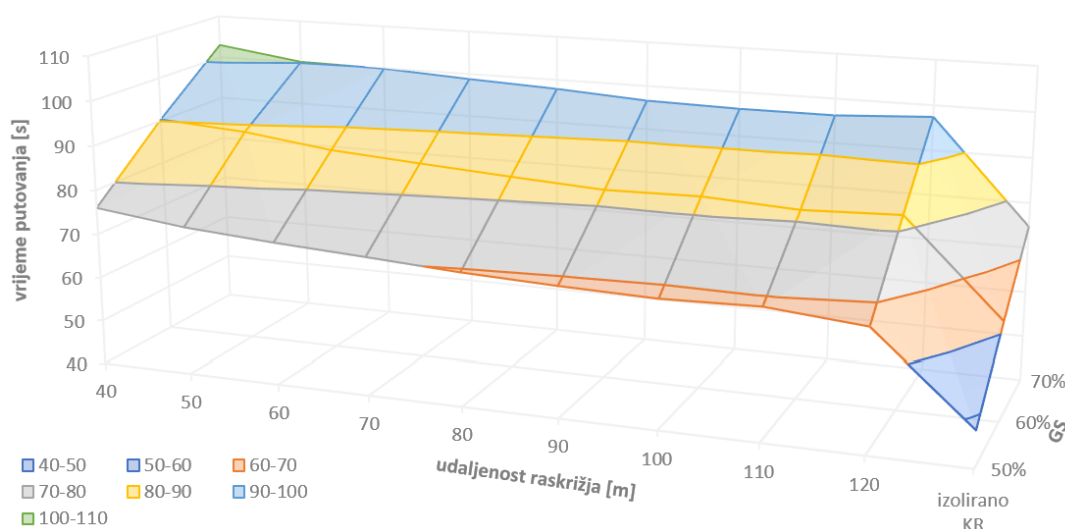
Prometno opterećenje: Pri manjim prometnim opterećenjima (5-6 % dnevnog prometa) vrijeme putovanja i vrijeme kašnjenja prosječno su 29 % veći od rezultata izoliranih scenarija pri istim prometnim uvjetima. Vrijeme putovanja iznosi 47 do 62 sekundi (ovisno o scenariju), a prosječno vrijeme kašnjenja je manje od 10 s/voz. Pri srednjim prometnim opterećenjima (7-8 % dnevnog prometa) počinju se javljati značajnija usporenja. Vrijeme putovanja povećava se prosječno 100%, prosječno vrijeme kašnjenja povećava se do 50 s/voz. Primjerice, za scenarij 4 (8% dnevnog opterećenja), vrijeme putovanja poraste na 100-130 s, a kašnjenje prelazi 50 s/voz. Pri većim prometnim opterećenjima (9-10 % dnevnog opterećenja) vrijeme putovanja je 3 do 4 puta duže nego u scenarijima izoliranog kružnog raskrižja (150-180 s/voz). Prosječno vrijeme kašnjenja iznosi 70 do 80 s/voz. U scenarijima s 10% dnevnog opterećenja 15-20% vozila nije uspjelo proći kroz kružno raskrižje. Porast vršnog prometnog opterećenja povećava vrijeme putovanja i prosječno vrijeme kašnjenja. Taj porast nije linearan već eksponencijalan – u scenarijima s 5-7 % dnevnog prometnog opterećenja u vršnom satu rast prometnih pokazatelja je postupan, dok u scenarijima s 8-10 % dnevnog prometnog opterećenja u vršnom satu dolazi do eksponencijalnog rasta prometnih pokazatelja.

Udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja: Pokazuje se da razmak raskrižja bitno utječe na odabrane prometne pokazatelje. U scenarijima pri udaljenosti raskrižja od 40 m, vrijeme putovanja bilo je 20-40% duže od scenarija izoliranih kružnih raskrižja. Primjerice, pri manjim prometnim opterećenjima (5-6%), vrijeme putovanja poraslo je s 38 s (izolirano raskrižje) na 48 s u scenarijima pri udaljenosti raskrižja od 40 m. Kod većih prometnih opterećenja (9-10%), vrijeme putovanja bilo je prosječno 30% dulje nego u

izoliranim scenarijima (npr. porast sa 116 s na 155 s). Sličan trend vrijedi i za prosječno vrijeme kašnjenja, prosječno vrijeme kašnjenja 3 puta je veće nego u scenarijima slobodnog toka. Povećanjem udaljenosti između raskrižja smanjuje se vrijeme putovanja i prosječno vrijeme kašnjenja. Scenariji pri udaljenosti raskrižja od 70 metara u scenarijima sa srednjim prometnim opterećenjem pokazuju 20-30% kraće vrijeme putovanja. U scenarijima s većim prometnim opterećenjem, povećanje razmaka s 40 m na 70 m smanjilo je prosječno kašnjenje za prosječno 15 sekundi po vozilu.

Dodatnim povećanjem udaljenosti raskrižja (> 100 m), vrijednosti prometnih pokazatelja su povoljniji. Ipak, niti najveći ispitani razmak (120 m) nije u potpunosti eliminirao međutjecaj – vremena putovanja i prosječna vremena kašnjenja veća su od onih u slučaju scenarija izoliranih raskrižja. Kod manjeg prometnog opterećenja razlika je zanemariva (< 5%), dok je kod scenarija s većim prometnim opterećenjem vrijeme putovanja 10-15 % duže nego kod scenarija izoliranih raskrižja.

Na slici 6.12. prikazan je relativni odnos između vremena putovanja, udjela prometa na glavnom smjeru (GS) te udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja. Izdvojeni su scenariji s udjelom dnevnog prometnog opterećenja u vršnom satu od 7 %, što odgovara prosječnoj vrijednosti utvrđenoj analizom terenskih mjerenja prometnog opterećenja na promatranim raskrižjima (Poglavlje 6.1.).



Slika 6.12. Utjecaj udjela prometa na glavnom smjeru (GS) i udaljenosti između raskrižja na vrijeme putovanja (za udio od 7% PGDP-a u vršnom satu)

Raspodjela prometa: Ravnomjerna raspodjela prometa (50:50) povoljna je u uvjetima manjeg opterećenja. Pri manjem prometnom opterećenju (5-6 % dnevnog opterećenja) i udaljenosti između raskrižja većoj od 80 metara, prosječna kašnjenja manja su od 20 s/voz, a vremena putovanja najniža su među promatranim scenarijima. Primjerice, za 5 % dnevnog opterećenja, scenarij 70:30 imao je 15% dulje vrijeme putovanja od scenarija 50:50. Pri srednjem prometnom opterećenju (7-8 %), razlike među scenarijima 70:30,

60:40 i 50:50 se povećavaju. Scenarij s 8% dnevnog opterećenja ima do 40% duže vrijeme putovanja nego scenarij 50:50. Međutim, pri većim prometnim opterećenjima (9-10 % dnevnog opterećenja) i malim udaljenostima između raskrižja (40-60 m) vrijednosti vremena putovanja i prosječnog vremena kašnjenja eksponencijalno rastu. Scenariji s uravnoteženim tokovima (50:50) imali su veća prosječna kašnjenja i dulje vrijeme putovanja nego scenariji s neujednačenim tokom. Primjerice, pri 10% dnevnog opterećenja, vrijeme putovanja bilo je 25-30% dulje u scenariju raspodjele prometa 50:50 nego u scenariju 70:30. Niža razina prometnog opterećenja (5-6 % dnevnog opterećenja) rezultira kraćim vremenima putovanja i minimalnim kašnjenjima, dok povećanje vršnog prometnog opterećenja eksponencijalno povećava vrijednosti prometnih pokazatelja. Iako brojna istraživanja upućuju na to da neravnomjerna raspodjela prometa negativno utječe na operativu učinkovitost kružnog raskrižja (Akcelik, 2004; Krogscheepers i Roebuck, 2000; Chung i sur., 1992), dobiveni rezultati mogu se objasniti činjenicom da semaforizirano raskrižje favorizira glavni smjer i omogućuje mu bolju protočnost, što posebno dolazi do izražaja pri velikim prometnim opterećenjima.

Utjecaj raspodjele prometa ovisan je o prometnom opterećenju. Kod manjeg prometnog opterećenja (5-8 %), uravnoteženi tokovi smanjuju vrijeme putovanja i prosječno vrijeme kašnjenja. Međutim, pri većem prometnom opterećenju (9-10%), uravnoteženi promet može uzrokovati 20-30% veća prosječna vremena kašnjenja, a povoljnijim se prometnim uvjetima pokazuje ukoliko je jedan od smjerova jače prometno opterećen.

Povećanjem udaljenosti između raskrižja prometni pokazatelji postaju povoljniji, odnosno njihove se vrijednosti smanjuju. Međutim, u scenarijima s udaljenošću od 120 m između raskrižja vrijednosti prometnih parametara su i dalje značajno veće u odnosu na scenarije izoliranih kružnih raskrižja pri jednakim prometnim uvjetima.

6.2.3. Statistička analiza i razvoj preliminarog modela vremena putovanja

Razvoj modela vremena putovanja između kružnog i semaforiziranog raskrižja u određenim prometnim uvjetima temelji se na podacima prikupljenim kroz analizu različitih scenarija detaljno opisanih u prethodnom poglavlju (Poglavlje 6.2.2.).

Provedena je statistička analiza primjenom nekoliko metoda:

- (1) Deskriptivnom analizom (tablica 6.7.) prikazana je varijabilnost prometnih pokazatelja, u svrhu određivanja ciljne varijable modela,
- (2) Pearsonov test korelacije primijenjen je za ispitivanje međuodnosa odabranih ulaznih parametara,
- (3) Razvijen je višestruki linearni regresijski model metodom postupnog odabira, s ciljem izdvajanja i kvantifikacije utjecaja statistički značajnih ulaznih parametara modela.

Detaljni opis svih navedenih metoda prikazan je u prethodnom poglavlju.

U svim analizama usvojen je prag statističke značajnosti od 5% ($\alpha=0,05$), što znači da se rezultati s p -vrijednošću manjom od 0,05 smatraju statistički značajnima.

U nastavku su prikazani dobiveni rezultati tih analiza te njihova interpretacija.

Tablica 6.7. Deskriptivna statistika prometnih pokazatelja

	QLen	QLenMax	VehDelay	StopDelay	Vrijeme putovanja
Broj opažanja	180	180	180	180	180
Minimum	1,870	51,162	7,710	2,060	35,226
Maksimum	73,020	168,048	101,319	57,923	207,406
1. kvartil	6,173	103,998	17,203	6,462	56,248
Medijan	37,080	141,276	52,937	23,776	97,436
3. kvartil	55,730	145,593	74,564	35,611	145,080
Srednja vrijednost	32,842	126,060	48,103	22,714	102,991
Varijanca	573,768	903,605	833,518	239,465	2463,044
Standardna devijacija	23,953	30,060	28,871	15,475	49,629

Provedena deskriptivna analiza ukazuje na izraženu varijabilnost analiziranih prometnih pokazatelja. Vrijeme putovanja, kao središnji pokazatelj ovog istraživanja, ima medijan od 97,44 sekundi, što je vrlo blizu aritmetičkoj sredini (102,99 sekundi). Distribucija pokazuje širok raspon (više od 170 sekundi između minimalne i maksimalne vrijednosti), a standardna devijacija od gotovo 50 sekundi ističe znatnu varijabilnost vremena putovanja u različitim scenarijima. Vrijeme putovanja imalo je najveću standardnu devijaciju i varijancu te je odabrano kao ciljna varijabla za daljnji razvoj modela za predikciju vremena putovanja.

U daljnjoj analizi ispitan je utjecaj odabranih ulaznih parametara na vrijeme putovanja (tablica 6.8).

Tablica 6.8. Korelacijska matrica modela

	Vršno prometno opterećenje	Postotak prometa na glavnom smjeru	Udaljenost	Vrijeme putovanja
Vršno prometno opterećenje [voz/h]	1	0,000	0,000	0,941
Postotak prometa na glavnom smjeru [%]	0,000	1	0,000	-0,048
Udaljenost raskrižja [m]	0,000	0,000	1	-0,145
Vrijeme putovanja [s]	0,941	-0,048	-0,145	1

Rezultati Pearsonovog testa korelacije pokazali su snažnu pozitivnu korelaciju između vršnog prometnog opterećenja i vremena putovanja (0,941). Veće prometno opterećenje u vršnom satu rezultira duljim vremenom putovanja. Udaljenost između

kružnog raskrižja i semaforiziranog raskrižja ima umjerenu negativnu korelaciju (-0,145) – manja udaljenost doprinosi duljem vremenu putovanja.

Na temelju ovih analiza, pristupilo se razvoju modela za predikciju vremena putovanja primjenom višestruke linearne regresije. Korištena je metoda postupnog odabira prediktora (eng. *stepwise regression*), pri čemu se u model uključuju varijable koje zadovoljavaju kriterij statističke značajnosti ($p < 0,05$ za ulazak u model), dok se manje značajne varijable eliminiraju uz kriterij $p > 0,1$. Ovakav iterativan postupak dodavanja i isključivanja prediktora provodi se dok se za sve varijable, čime je osigurano da u konačnom modelu ostanu samo najutjecajniji prediktori.

Analizirana su tri modela različite složenosti (s jednom, dvije ili tri nezavisne varijable), a njihovi pokazatelji preciznosti i složenosti prikazani su u tablici 6.9.

Tablica 6.9. Odabir varijabli modela

Br. varijabli	Varijable	MSE	R^2	Prilagođeni R^2	Mallow C_p	Akaikeov AIC
1	Vršno prometno opterećenje	282,48	0,886	0,885	45,24	1017,84
2	Vršno prometno opterećenje/ Udaljenost raskrižja	231,68	0,907	0,906	6,43	983,14
3	Vršno prometno opterećenje/ Postotak prometa na glavnom smjeru/ Udaljenost raskrižja	227,27	0,909	0,908	4,00	980,67

Najbolji model pokazao se onaj s tri nezavisne varijable – vršno prometno opterećenje, postotak prometa na glavnom smjeru i udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižje. Razvijeni model pokazuje najnižu srednju kvadratnu pogrešku ($MSE = 227,27$) i najviši koeficijent determinacije ($R^2 = 0,909$). Također, Mallowsov statistički kriterij C_p za taj model iznosi 4, što je jednako broju parametara modela uključujući konstantu i ukazuje na dobru ravnotežu prilagodbe i jednostavnosti modela. U usporedbi s jednostavnijim modelima, Akaikeov informacijski kriterij ($AIC = 980,67$) je najmanji upravo u ovom modelu s tri prediktora, čime se potvrđuje veća snaga predikcije uključivanjem sve tri varijable. Kao što je i očekivano iz matrice korelacije, prometno opterećenje u vršnom satu objašnjava većinu varijabilnosti, što je u skladu s prijašnjim istraživanjima (TRB, 2010; Brilon i Wu, 2008; Kimber, 1980; Akcelik, 2017).

Udaljenost i postotak prometa na glavnom smjeru daju dodatnu, inkrementalnu vrijednost, čime se preciznije predviđa vrijeme putovanja.

Detaljni pokazatelji prilagodbe konačnog regresijskog modela prikazani su u tablici 6.10.

Tablica 6.10. Statistika prilagodbe regresijskog modela

Broj opažanja	180
Zbroj težina	180
Stupnjevi slobode (DF)	176
R^2	0,909
Prilagođeni R^2	0,908
MSE	227,277
RMSE	15,076
MAPE	14,710

Model s tri ulazna parametra pokazuje odličnu statističku prilagodbu: objašnjava 90,9% varijabilnosti vremena putovanja ($R^2 = 0,909$), dok je vrijednost prilagođenog koeficijenta determinacije 0,908. Srednja kvadratna pogreška (MSE) iznosi 227,277 s, a pripadajući korijen srednje kvadratne greške (RMSE) je približno 15,1 s. Relativna pogreška predikcije također je niska – srednja apsolutna pogreška (MAPE) iznosi 14,7%. Ovi pokazatelji upućuju na dobru prediktivnu sposobnost modela i relativno malu prosječnu pogrešku u procjeni vremena putovanja.

Analiza varijance (ANOVA) potvrđuje da je model statistički pouzdan i dobro prilagođen. F-statistika modela iznosi 587,95, uz p -vrijednost $< 0,0001$.

U tablici 6.11. prikazani su procijenjeni parametri regresijskog modela: vrijednosti koeficijenata uz svaki prediktor, njihove standardne pogreške, t -statistike te p -vrijednosti.

Tablica 6.11. Procijenjeni parametri višestruke linearne regresije za vrijeme putovanja

Izvor	Vrijednost	Standardna pogreška	t	p -vrijednost	Donja granica (95%)	Gornja granica (95%)
Presjek	-79,741	9710	-8,212	$<0,0001$	-98,903	-60,578
Vršno prometno opterećenje	0,136	0,003	41,456	$<0,0001$	0,130	0,143
Postotak prometa na glavnom smjeru	-28,977	13,762	-2,106	0,037	-56,137	-1,817
Udaljenost raskrižja	-0,026	0,004	-6,388	$<0,0001$	-0,034	-0,018

Najveći utjecaj na vrijeme putovanja ima prometno opterećenje (koeficijent 0,136), što znači da se vrijeme putovanja povećava za približno 0,136 sekundi s povećanjem prometnog opterećenja za jedno vozilo na sat. Visoka t -vrijednost od 41,456 i vrlo niska p -vrijednost ($<0,0001$) potvrđuju izrazitu statističku značajnost ove varijable.

Opterećenje glavnog smjera ima negativan koeficijent (-28,977), što sugerira da povećanje ovog parametra za jedinicu rezultira smanjenjem vremena putovanja za gotovo 29 sekundi. Ovaj prediktor je statistički značajan na razini $p = 0,037$.

Udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja također ima negativan koeficijent (-0,026), što pokazuje da se povećanjem udaljenosti smanjuje vrijeme putovanja. Ovaj prediktor također pokazuje visoku statističku značajnost s t -vrijednosti od -6,388 i p -vrijednosti manje od 0,0001.

Na temelju provedene statističke analize definiran je preliminarni model predikcije vremena putovanja, izražen jednadžbom (21):

$$\text{Vrijeme putovanja} = -79.741 + 0.136 \cdot VPO - 28.977 \cdot GS - 0.026 \cdot D \quad (21)$$

gdje su:

- *Vrijeme putovanja* (s) – vrijeme putovanja potrebno da vozilo prijeđe dionicu od 300 m od kružnog do semaforiziranog raskrižja, u rasponu od 40-120 m
- *VPO* (voz/h) – vršno prometno opterećenje, u rasponu 1000-2000 voz/h
- *GS* (/) – udio vozila na glavnom smjeru izražen kao decimalni broj, u rasponu 0,5-0,7
- *D* (m) – udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja, u rasponu 40-120 m

Kako bi se dodatno procijenila točnost i prediktivna sposobnost regresijskog modela, provedena je neovisna validacija korištenjem izdvojenog skupa od 30 dodatnih mikrosimulacijskih scenarija. Ti scenariji nisu bili dio izvornih 180 korištenih u razvoju modela. Umjesto toga, generirani su s nasumično dodijeljenim prometnim opterećenjima u vršnom satu, udjelom prometa na glavnom smjeru i udaljenostima između kružnog i semaforiziranog raskrižja, a sve unutar utvrđenih istraživačkih parametara (Prilog B). Vremena putovanja iz izdvojenog skupa prometnih mikrosimulacija zatim su uspoređena s predviđenim vremenima putovanja iz jednadžbe preliminarnog modela vremena putovanja (izraz 21).

Deskriptivna statistika predviđenog vremena putovanja i metričke performanse za izdvojeni skup podataka prikazani su u tablici 6.12.

Tablica 6.12. Deskriptivna statistika predviđenog vremena putovanja na izdvojenom skupu

Statistika	Predviđeno vrijeme putovanja [s]
Broj opažanja	30
Minimum	38,469
Maksimum	172,372
1. kvartil	64,644
Medijan	99,854
3. kvartil	141,315
Srednja vrijednost	101,158

Statistika	Predviđeno vrijeme putovanja [s]
Varijanca	1902,823
Standardna devijacija	43,621
RMSE	11,58
MAPE	9,53

Rezultati su potvrdili da regresijski model daje pouzdane rezultate unutar definiranih raspona ulaznih parametara. Srednja kvadratna pogreška (RMSE) za izdvojeni skup iznosila je 11,58 što je nešto niže od RMSE-a za podatke iz učenja, koji je iznosio 15,08. Također, srednja apsolutna pogreška (MAPE) iznosila je 9,53%, što ukazuje na visoku preciznost modela u procjeni vremena putovanja. Ova konzistentnost upućuje na to da se regresijski model učinkovito generalizira na nove podatke i da nije došlo do pretjerane prilagodbe, odnosno da se vrijeme putovanja vozila može utvrditi na temelju tri prediktora – vršnog prometnog opterećenja, udjela prometa na glavnom smjeru i udaljenosti kružnog i semaforiziranog raskrižja.

Rezultati ove analize pokazuju da je prometno opterećenje ima najveći utjecaj na vrijeme putovanja. Povećanje prometnog opterećenja u vršnom satu (s 5% na 10% dnevnog prometnog opterećenja) negativno utječe na sve prometne pokazatelje, što rezultira duljim redovima čekanja, duljim prosječnim vremenom kašnjenja, višim stopama zaustavljanja, povećanom emisijom i produljenim prosječnim vremenom putovanja. Rezultati pokazuju da scenariji izoliranih kružnih raskrižja imaju znatno povoljnije prometne pokazatelje za iste prometne uvjete od kružnih raskrižja u blizini semaforiziranih raskrižja. Ta razlika osobito se ističe na kratkim udaljenostima između raskrižja (40 do 60 metara), gdje dolazi do značajnog povećanja prosječnog vremena kašnjenja i prosječnog vremena putovanja za sva prometna opterećenja. Međutim, s povećanjem udaljenosti između raskrižja prometni pokazatelji postaju povoljniji, odnosno njihove se vrijednosti postupno smanjuju.

Preliminarni regresijski model za predikciju vremena putovanja, temeljen na bazi podataka iz modela prometnih mikrosimulacija, pokazao je vrlo visoku prediktivnu moć od 90,9%, ali su uočena i određena ograničenja kao i mogućnosti za daljnjim poboljšanjem: udaljenost raskrižja od 120 metara nije se pokazala dostatnom jer su na toj udaljenosti prometni pokazatelji značajno veći od onih kod izoliranih kružnih raskrižja pri istim prometnim uvjetima, a uočena je i potreba za uključivanjem različitih duljina ciklusa rada semafora u završni model.

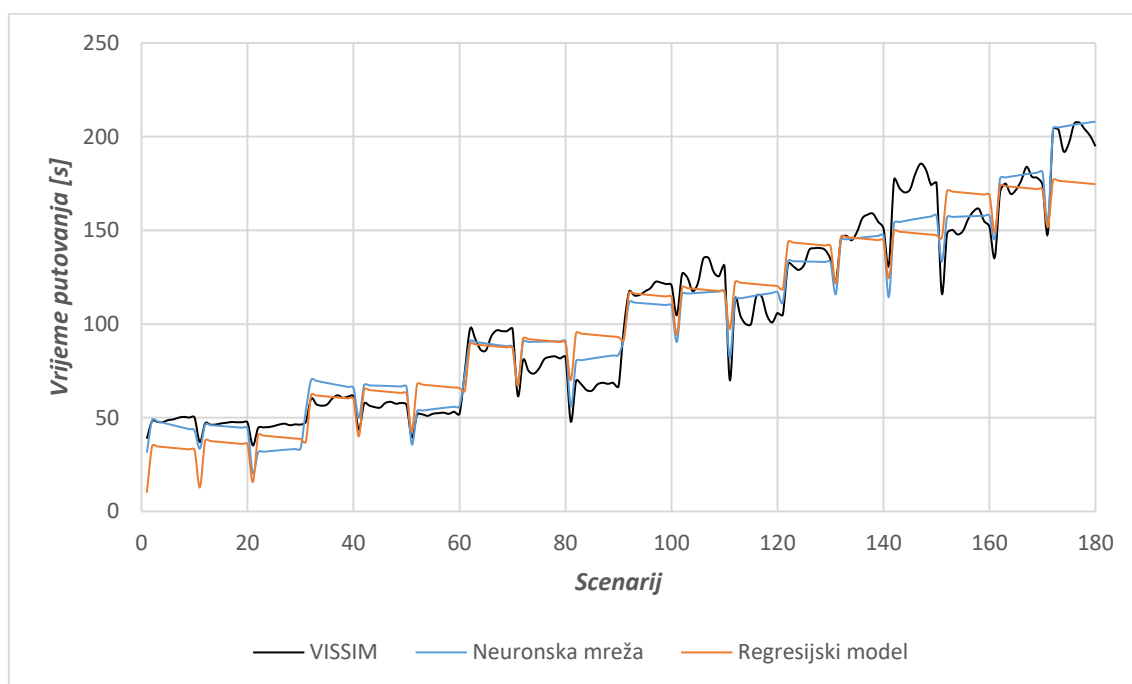
Rezultati ovog istraživanja objavljeni su u znanstvenom radu (Klobučar i sur., 2025a), kojem su prethodila konferencijska priopćenja (Klobučar i sur., 2022) i (Klobučar i sur., 2024).

6.2.4. Usporedba regresijskog modela i rezultata neuronskih mreža

Na istom skupu podataka na kojem je razvijen regresijski model opisan u poglavlju 6.2.3. razvijen je model temeljen na metodi neuronskih mreža (NN). Cilj je bio analizirati može li fleksibilniji, nelinearni model poboljšati preciznost predikcije vremena putovanja unutar koridora između kružnog i semaforiziranog raskrižja te na temelju usporedbe prednosti i nedostataka ova dva modela odabrati metodu za razvoj konačnog modela. Za analizu je korišten softver NeuroShell Predictor.

Neuronska mreža automatski je testirala različit broj neurona u skrivenom sloju, u rasponu 1 do 80, pri čemu je optimalna konfiguracija ostvarena sa 74 neurona u skrivenom sloju. Za fino podešavanje unutarnjih težina mreže korišten je algoritam povratne propagacije (eng. *backpropagation*), s ciljem minimizacije srednje kvadratne pogreške na skupu za učenje. Dodatno je korištena metoda poboljšanja generalizacije radi sprječavanja preučenosti modela. Treniranje skupa za učenje je nastavljeno sve dok su se na validacijskom skupu podataka uočavala poboljšanja statističkih mjera.

Po završetku treniranja, predviđene vrijednosti neuronske mreže uspoređene su s rezultatima dobivenim iz prometnih mikrosimulacija, kao i s predikcijama regresijskog modela (slika 6.13). Rezultati su prikazani u Prilogu C.



Slika 6.13. Usporedba rezultata mikrosimulacija, neuronskih mreža i regresijskog modela

Analiza rezultata pokazuje da neuronska mreža dosljedno prati mjerenja iz mikrosimulacija, što se odražava u umjerenim rezidualima. Uspješno predviđa izuzetno niske i visoke stvarne vrijednosti, čime pokazuje sposobnost učenja nelinearnih odnosa i interakcija koji su u linearnoj regresiji bili teže uočljivi. Nadalje, model predviđa smjer promjena u skladu sa stvarnim trendom kroz čitav skup podataka: u svim slučajevima

kada je stvarna vrijednost bila iznad (ili ispod) prosječne vrijednosti uzorka, predviđena vrijednost neuronske mreže također je bila iznad (ili ispod) tog prosjeka.

Deskriptivna statistika i usporedba dobivenih rezultata neuronskih mreža, prometnih mikrosimulacija i regresijskog modela prikazana je u tablici 6.13.

Tablica 6.13. Deskriptivna statistika

Statistika	VISSIM	Neuronska mreža	Regresijski model
Broj scenarija	180	180	180
Minimum	35,230	20,356	9,975
Maksimum	207,410	207,996	176,731
Medijan	97,440	90,742	94,741
Srednja vrijednost	102,991	102,991	102,401
Varijanca	2463,019	2351,587	2227,741
Standardna devijacija	49,629	48,493	47,199
Koeficijent asimetrije (Pearson)	0,403	0,370	-0,009
Test normalnosti: Shapiro-Wilkov test			
<i>W</i>	0,914	0,954	0,940
<i>p</i> -vrijednost	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Nivo značajnosti (α)	0,05	0,05	0,05
Zaključak	Nemaju normalnu distribuciju	Nemaju normalnu distribuciju	Nemaju normalnu distribuciju
Mann-Whitneyev test			
<i>p</i> -vrijednost	x	0,952	0,920
Nivo značajnosti (α)	x	0,05	0,05

Rezultati pokazuju da su srednje vrijednosti vremena putovanja gotovo identične za sve modele: prometne mikrosimulacije i neuronska mreža u vrijednosti od 102,99 s, a regresijski model u vrijednosti 102,40 s. Vrijednosti medijana su vrlo usklađene – mikrosimulacije 97,44, neuronska mreža 90,74, a regresijski model 94,74. Ovakva podudarnost centralnih vrijednosti sugerira da regresijski model i neuronska mreža uspješno repliciraju centralnu tendenciju vremena putovanja. Obzirom da je medijan manje osjetljiv na ekstremne vrijednosti, usklađenost medijana između modela dodatno potvrđuje njihovu sposobnost pouzdane procjene vremena putovanja na analiziranom skupu.

Regresijski model daje niži minimalni i maksimalni rezultat od ostalih, ali je standardna devijacija vrlo slična za sva tri slučaja (mikrosimulacije 49,63, neuronska mreža 48,49, regresija 47,20). Regresijski model ima manje ekstremne vrijednosti te posljedično daje simetričnu raspodjelu (koef. asimetrije -0,009) nasuprot blagoj asimetriji mikrosimulacija i neuronskim mreža (0,403 i 0,370).

Za provjeru pretpostavke normalne (Gaussove) raspodjele, proveden je Shapiro-Wilkov test normalnosti na razini značajnosti 5% ($\alpha = 0,05$) za sva tri skupa podataka. Nulta hipoteza (H_0) pretpostavlja normalnost raspodjele, a alternativna hipoteza tvrdi

suprotno. Budući da su p -vrijednosti u sva tri slučaja značajno manje od 0,05 ($p < 0,001$), nulta hipoteza se odbacuje za sve skupove podataka, tj. nijedan od njih nije normalno raspodijeljen. U praktičnoj primjeni, odstupanje od normalne distribucije nije neuobičajeno za prometne podatke i ne isključuje mogućnosti razvoja regresijskog modela (Susilawati i sur., 2013; Lumley i sur., 2002).

Za usporedbu dva nezavisna uzorka primijenjen je Mann-Whitneyev U neparametrijski test, kako bi se provjerilo imaju li regresijski model i neuronska mreža istu distribuciju kao rezultati prometnih mikrosimulacija. Nulta hipoteza (H_0) pretpostavlja da dva skupa imaju istu distribuciju, a alternativna hipoteza tvrdi suprotno. Budući da je p -vrijednost (regresija 0,92 i neuronska mreža 0,95) mnogo veće od odabranog praga značajnosti ($\alpha=0,05$), nulta hipoteza se ne odbacuje što znači da nema razlike u raspodjeli rezultata. To sugerira da obje metode, regresijska i neuronske mreže, daju iste prosječne rezultate i sličnu disperziju.

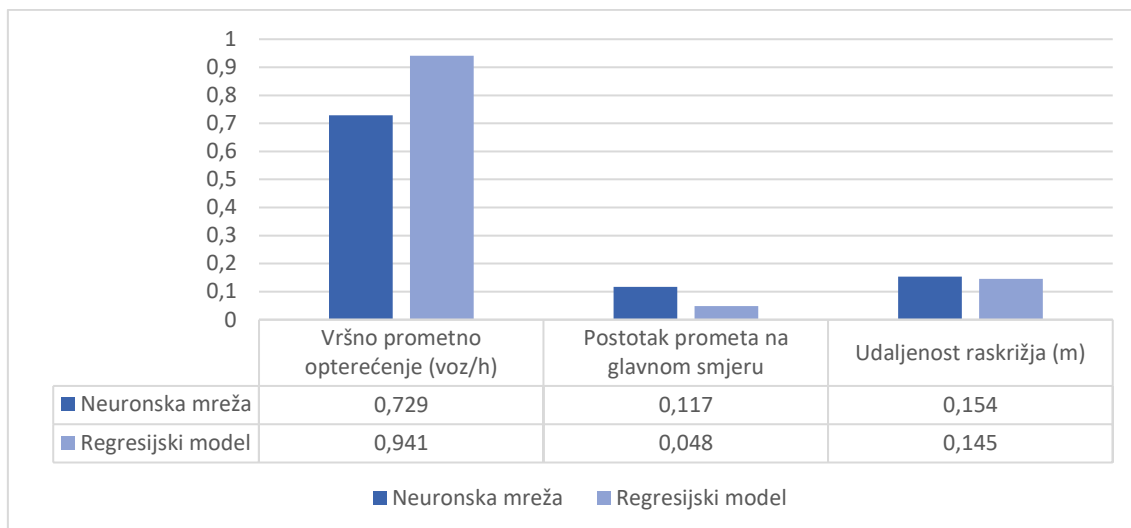
U tablici 6.14. prikazana je usporedba statistike prilagodbe regresijskog modela i neuronske mreže. Neuronska mreža prikazuje dvije skupine statistika performansi: vrijednosti postignute prije korištenja poboljšane generalizacije i vrijednosti nakon njezine primjene.

Tablica 6.14. Usporedba statistika prilagodbe regresijskog model i neuronske mreže

	NN - Učenje	NN - Generalizacija	Regresijski model
R^2	0,961	0,961	0,909
Prosječna pogreška	8,047	8,107	9,710
Korelacija R	0,980	0,980	0,953
MSE	95,997	96,836	227,277
RMSE	9,798	9,841	15,076
MAPE	x	9,72 %	14,70 %
% u rasponu	100%	100%	
% isti predznak	100%	100%	

U oba slučaja neuronska mreža ostvaruje visoku prediktivnu moć, ali neznatno bolju od regresijskog modela (NN 0,98, regresija 0,95). Prosječna pogreška niska je u sva tri slučaja – (NN učenje = 8,05, NN generalizacija = 8,10, regresija = 9,7). Srednja kvadratna pogreška nešto je bolja kod neuronske mreže (9,84 s) u usporedbi s regresijskim modelom (15,07 s). Srednja apsolutna pogreška prihvatljiva je u oba modela, ali je neuronska mreža daje bolje rezultate (9,72 % u odnosu na 14,70%).

Na slici 6.14. prikazana je usporedba utjecaja odabranih prediktora na vrijeme putovanja u neuronskoj mreži i u regresijskom modelu.



Slika 6.14. Utjecaj odabranih prediktora na vrijeme putovanja- usporedba neuronskih mreža i regresijskog modela

Neuronska mreža daje veći značaj varijabli koja opisuju raspodjelu prometa na glavnom i sporednom smjeru (NN = 0,117, regresija = 0,048), manji značaj varijabli koja opisuje količinu prometa u vršnom satu (NN = 0,723, regresija = 0,941), dok udaljenosti kružnog i semaforiziranog raskrižja ima sličnu značajnu vrijednost kod oba modela (NN = 0,154, regresija=0,145). Neuronska mreža daje apsolutne vrijednosti doprinosa varijabli, a regresijski model pokazuje negativan doprinos udjela prometa na glavnom smjeru i udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja.

Iako neuronska mreža ostvaruje marginalno bolje rezultate u pojedinim statističkim mjerama (blago veća W vrijednost, manji MAPE), regresijski model se pokazao izrazito stabilnim i pouzdanim.

Obje metode pokazale su se stabilne na ispitivanom skupu podataka i nisu pokazale znakove preučenosti. Regresijski model, unatoč nešto većim rezidualima, pokazao se pogodan i dovoljno precizan za predikciju vremena putovanja te ga je opravdano koristiti za daljnje analize i donošenje zaključaka u okviru ovog istraživanja.

Rezultati usporedbe predviđenih vrijednosti neuronske mreže i linearnog regresijskog modela sa mikrosimulacijskim rezultatima pokazuju kako oba modela pružaju zadovoljavajuću razinu točnosti u procjeni vremena putovanja. Iako neuronska mreža nešto bolje prati stvarne vrijednosti, posebice u ekstremnim područjima, regresijski model također ostvaruje prihvatljive rezultate, što potvrđuju umjereni reziduali i usporedive vrijednosti opisnih statistika poput srednje apsolutne devijacije i varijance. Prednost regresijskog modela leži u njegovoj jednostavnijoj interpretabilnosti i transparentnosti rezultata. Dok neuronska mreža zbog svoje složenosti omogućuje modeliranje nelinearnih interakcija među varijablama, interpretacija njezinih unutarnjih odnosa znatno je zahtjevnija. Nasuprot tome, linearni regresijski model pruža jasnu sliku

o utjecaju pojedinačnih varijabli na predviđenu vrijednost, što olakšava razumijevanje temeljnih procesa te je stoga pogodniji za praktičnu primjenu i donošenje odluka.

S obzirom na navedeno, za daljnju analizu odabran je linearni regresijski model, koji pruža dobar kompromis između točnosti predikcija, jednostavnosti interpretacije rezultata i praktične primjene modela.

6.3. Model za predikciju broja konflikata temeljen na različitim scenarijima

U okviru teorijskog istraživanja modela za predikciju vremena putovanja, opisanog u poglavlju 6.2., prometni mikrosimulacijski modeli korišteni su i za analizu sigurnosti prometa na kružnim raskrižjima. Iako se učinkovitost kružnog raskrižja često vrednuje prema prometnim uvjetima tijekom vršnih sati, početni rezultati ukazali su da takav pristup ne osigurava dovoljan broj konflikata za pouzdanu statističku analizu.

Kako bi se omogućila robusnija procjena sigurnosti, provedene su dodatne simulacije koje su obuhvatile 24-satni interval, što je omogućilo prikupljanje reprezentativnog uzorka konflikata i bilježenje širih obrazaca ponašanja vozača.

Korištenje dnevnog prometnog opterećenja, umjesto oslanjanja isključivo na podatke unutar vršnih sati, u skladu je s rezultatima postojećih studija sigurnosti prometa na kružnim raskrižjima (Bulla-Cruz i sur., 2020; Giuffre i sur., 2018). Ova metodologija također je u skladu s tradicionalnim pristupima procjene sigurnosti koji se oslanjaju na dnevne ili godišnje podatke o prometnim nesrećama (Daniels i sur., 2011; FHWA, 2010). Ovakav pristup, karakteriziran ravnomjernom vremenskom raspodjelom prometa u svrhu modeliranja, pojednostavljuje simulaciju, a istovremeno učinkovito bilježi pojavu konflikata, uključujući i razdoblja izvan vršnih sati koja bi inače mogla biti zanemarena.

Analiza je provedena za dnevno prometno opterećenje od 20 000 vozila, što odgovara preporučenom kapacitetu za srednje velika urbana kružna raskrižja prema Hrvatskim smjernicama (Hrvatske ceste, 2014). Analizirani su različiti scenariji uključujući raspodjele prometa između glavnog i sporednog smjera (70:30, 60:40 i 50:50) te varijacije u udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja (od 40 do 120 metara). Za potrebe simulacije korišten je alat PTV VISSIM, koji je omogućio modeliranje prometa u 24-satnom intervalu, uz preporučeni broj od deset simulacija po scenariju (PTV GROUP, 2022).

Izlazni podatak simulacije bile su trajektorije za svako vozilo (u standardiziranom .trj formatu), koje su zatim analizirane korištenjem alata SSAM (Surrogate Safety Assessment Model). SSAM omogućuje automatsku identifikaciju i klasifikaciju prometnih konflikata temeljem parametara kao što su kut konflikta i relativni položaj vozila, detaljno opisanom u poglavlju 3. Konflikti su klasificirani prema tipu: sudar straga

(eng. *rear-end*), bočni sudar (eng. *crossing*) te sudar uslijed prestrojavanja (eng. *lane-change*).

Ukupan broj konflikata za svaki tip, prikupljen tijekom 24-satnog intervala, činio je osnovu za daljnju analizu sigurnosti. U okviru istraživanja ukupno je analizirano 30 scenarija, pri čemu je svaka simulacija trajala 24 sata i 15 minuta (15 minuta inicijalizacije prometnog toka i 24 sata analiziranih podataka).

6.3.1. Analiza i interpretacija broja konflikata u 24-satnom razdoblju

Ukupan broj konflikata, kao i klasifikacija prema vrstama konflikata, prikazani su u tablici 6.15.

Tablica 6.15. Broj potencijalnih konflikata prema tipu

Raspodjela prometa	Udaljenost raskrižja [m]	Ukupno konflikata	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar uslijed prestrojavanja
70:30	izolirano KR	979	0	954	25
70:30	40	1828	130	1509	188
70:30	50	1788	97	1579	111
70:30	60	1797	97	1614	86
70:30	70	1886	97	1713	76
70:30	80	1992	97	1831	64
70:30	90	1979	99	1826	54
70:30	100	1960	94	1808	58
70:30	110	1953	101	1800	52
70:30	120	1939	96	1791	52
60:40	izolirano KR	816	0	789	26
60:40	40	1648	118	1354	176
60:40	50	1675	93	1453	129
60:40	60	1701	95	1515	91
60:40	70	1819	96	1622	101
60:40	80	1802	96	1623	83
60:40	90	1804	91	1643	70
60:40	100	1765	91	1607	67
60:40	110	1807	92	1655	60
60:40	120	1778	92	1629	58
50:50	izolirano KR	778	0	745	32
50:50	40	1567	117	1288	162
50:50	50	1556	95	1358	103
50:50	60	1630	94	1448	88
50:50	70	1714	94	1541	79
50:50	80	1737	94	1569	74
50:50	90	1727	94	1567	66
50:50	100	1716	94	1557	66
50:50	110	1711	92	1560	60
50:50	120	1703	87	1552	64

Rezultati pokazuju kako je ukupan broj zabilježenih konflikata najviši u scenarijima u kojima je prometni tok snažno neuravnotežen u korist glavnog smjera (omjer 70:30), pri

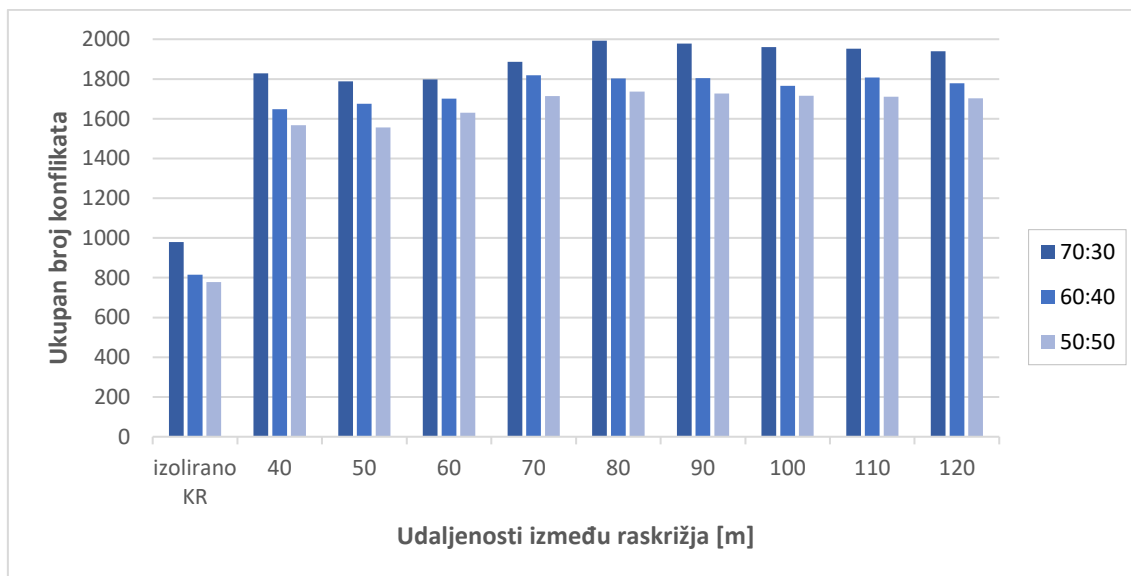
čemu se većina konflikata odnosi na sudare straga. U slučaju izoliranog kružnog raskrižja s prometnom raspodjelom 70:30, zabilježeno je ukupno 979 konflikata, od čega su gotovo svi (954) bili sudar straga. Uvođenjem semaforiziranog raskrižja na udaljenosti od 40 metara broj konflikata se gotovo udvostručuje – na 1828, s izraženim porastom u kategoriji bočnih sudara (130) koji uzrokuju teške prometne nesreće te sudar uslijed prestrojavanja (188). Ovaj trend se održava do udaljenosti od 80 do 90 metara, nakon čega ukupni broj konflikata blago opada, što ukazuje na moguće stabiliziranje prometnih tokova pri većim udaljenostima između raskrižja. Iako sudari straga i dalje čine većinu u svim scenarijima, njihov udio relativno opada s povećanjem udaljenosti između raskrižja.

Sličan obrazac opažen je i kod ostalih prometnih raspodjela. Za omjer 60:40, broj konflikata izoliranog kružnog raskrižja iznosi 816, dok uvođenjem semaforiziranog raskrižja na udaljenost od 40 metara vrijednost raste na 1648. Kod prometne raspodjele 50:50, ukupan broj konflikata značajno je manji nego kod neuravnoteženog prometnog toka (778 kod izoliranog raskrižja), ali je i dalje vidljiv značajan porast u interakciji raskrižja u prometnoj mreži (1567 kod najkraće udaljenosti).

Podaci pokazuju da je najveći udio konflikata sustavno zabilježen kod scenarija s neuravnoteženim prometnim tokom (70:30) i malim udaljenostima između raskrižja (40 do 60 metara), prikazano na slici 6.15. Suprotno tome, scenariji s ravnomjernijom raspodjelom prometa i većim razmakom između raskrižja rezultirali su manjim ukupnim brojem konflikata.

Ukupan broj konflikata pri gornjoj granici udaljenosti između raskrižja od 120 metara pokazuje značajno veće vrijednosti od izoliranog raskrižja, sugerirajući da je i pri toj udaljenosti još uvijek značajan međutjecaj raskrižja. Scenariji izoliranih kružnih raskrižja pokazuju značajno manji broj konflikata od scenarija pri interakciji kružnog i semaforiziranog raskrižja, pri istim prometnim uvjetima.

U svim scenarijima sudari straga čine više od 90% ukupnog broja potencijalnih konflikata.



Slika 6.15. Broj potencijalnih konflikata po scenarijima

6.3.2. Statistička analiza i razvoj preliminarnog modela broja konflikata

Razvoj preliminarnog modela broja konflikata temelji se na podacima dobivenim analizom različitih prometnih scenarija, koji su detaljno opisani u prethodnom potpoglavlju.

Provedena je statistička analiza korištenjem sljedećih metoda:

- (1) Deskriptivna analiza korištena je za prikaz varijabilnosti pojave različitih tipova konflikata te za utvrđivanje ciljne varijable regresijskog modela
- (2) Pearsonov test korelacije primijenjen radi ispitivanja međusobnih odnosa između prediktorskih varijabli, konkretno: raspodjele prometnih tokova na glavnom i sporednom smjeru te udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja
- (3) Višestruka linearna regresija provedena je metodom postupnog odabira varijabli, s ciljem identifikacije značajnih utjecaja na broj konflikata.

Deskriptivna statistika za sve vrste konflikata prikazana je u tablici 6.16.

Tablica 6.16. Deskriptivna statistika konflikata unutar 24-satnog perioda

	Postotak prometa na glavnom smjeru	Udaljenost raskrižja	Ukupni broj konflikata	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar prestrojavanje
Broj opažanja	30	30	30	30	30	30
Minimum	0,500	40,000	778,000	0,000	745,333	24,667
Maksimum	0,700	1000,000	1992,000	130,333	1831,000	188,333
1. kvartil	0,500	60,000	1681,750	91,833	1467,333	58,417
Medijan	0,600	85,000	1750,833	94,333	1567,833	68,500

	Postotak prometa na glavnom smjeru	Udaljenost raskrižja	Ukupni broj konflikata	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar prestrojanje
3. kvartil	0,700	110,000	1815,917	96,917	1639,250	90,250
Srednja vrijednost	0,600	172,000	1685,144	87,767	1516,656	80,722
Varijanca	0,007	79423,448	92126,204	959,511	73385,942	1581,058
Standardna devijacija	0,083	281,822	303,523	30,976	270,898	39,763

Najveću varijabilnost pokazuje ukupan broj konflikata, što je vidljivo iz širokog raspona vrijednosti (778 do 1992) i visoke standardne devijacije (303,5) te je daljnja analiza usmjerena na ukupan broj potencijalnih konflikata unutar 24 sata. Korelacijska analiza (tablica 6.17) otkriva snažnu negativnu korelaciju između razmaka raskrižja i broja konflikata (-0,906), dok utjecaj neuravnoteženosti prometnog toka ostaje umjeren, ali pozitivan (0,309).

Tablica 6.17. Korelacijska matrica modela

	Postotak prometa na glavnom smjeru	Udaljenost	Ukupni broj konflikata
Postotak prometa na glavnom smjeru	1	0,000	0,309
Udaljenost	0,000	1	-0,906
Ukupni broj konflikata	0,309	-0,906	1

Na temelju provedenih analiza pristupilo se razvoju regresijskog modela za predikciju ukupnog broja konflikata. Za kvantifikaciju utjecaja odabranih varijabli na ukupan broj konflikata primijenjena je višestruka linearna regresija. Metodom postupnog uključivanja, u konačnom modelu zadržane su obje nezavisne varijable: postotak prometa na glavnom smjeru i udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja. Postupak je analogan onome za razvoj modela za predikciju vremena putovanja opisanog u prethodnom potpoglavlju. Analizirana su dva modela složenosti (s jednom ili dvije ulazne varijable), a njihovi pokazatelji preciznosti i složenosti prikazani su u tablici 6.18.

Tablica 6.18. Odabir varijabli modela

Br. varijabli	Varijable	MSE	R^2	Prilagođeni R^2	Mallow C_p	Akaike AIC
1	Udaljenost raskrižja	17037,256	0,821	0,815	32,166	294,225
2	Postotak prometa na glavnom smjeru/ Udaljenost raskrižja	8201,374	0,917	0,911	3,000	273,201

Najbolji model pokazao se onaj s dva prediktora – postotak prometa na glavnom smjeru i udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja. Razvijeni model pokazuje najnižu

srednju kvadratnu pogrešku i najviši koeficijent determinacije ($R^2 = 0,917$). Također, Mallowsov statistički kriterij C_p za taj model iznosi 3, što je idealna vrijednosti (broj parametara modela uključujući konstantu) i ukazuje na dobru ravnotežu prilagodbe i jednostavnosti modela.

Detaljni pokazatelji prilagodbe konačnog regresijskog modela prikazani su u tablici 6.19.

Tablica 6.19. Statistika prilagodbe regresijskog modela

Broj scenarija	30
Zbroj težina	30
Stupnjevi slobode (DF)	27
R^2	0,917
Prilagođeni R^2	0,911
MSE	8201,374
RMSE	90,561
MAPE	4,487

Dobiveni model objašnjava 92% ukupne varijabilnosti ($R^2 = 0,917$), uz srednju kvadratnu pogrešku od približno 90 konflikata i prosječnu apsolutnu pogrešku manju od 5%, pokazujući model iznimno dobrim u predviđaju broja konflikata u 24-satnom periodu.

U tablici 6.20. prikazani su parametri regresijskog modela: vrijednosti koeficijenata uz svaki prediktor, njihove standardne pogreške, t -statistike te p -vrijednosti.

Tablica 6.20. Parametri modela

Izvor	Vrijednost	Standardna pogreška	t	p -vrijednost	Donja granica (95%)	Gornja granica (95%)
Presjek	1174,73	123,05	9,54	<0,0001	922,26	1427,21
Postotak prometa na glavnom smjeru (%)	1130,50	202,50	5,58	<0,0001	715,00	1545,99
Udaljenost raskrižja (m)	-0,97	0,06	-16,35	<0,0001	-1,09	-0,85

Na temelju provedene statističke analize, definiran je preliminarni model predikcije ukupnog broja konflikata unutar 24 sata, izražen jednadžbom (22):

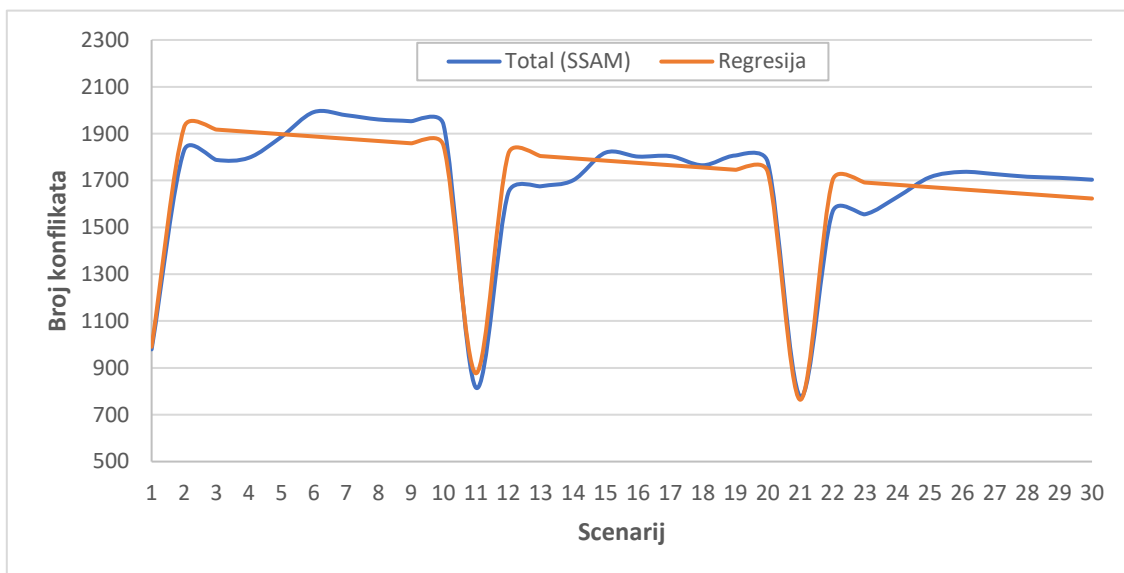
$$Konflikti_{24} = 1174,738 + 1130,5 \cdot GS - 0,9761 \cdot D \quad (22)$$

gdje su:

- $Konflikti_{24}$ – ukupan broj konflikata unutar 24 sata na segmentu prometne mreže koji se sastoji od kružnog i semaforiziranog raskrižja,
- GS (/) – udio vozila na glavnom smjeru izražen kao decimalni broj, u rasponu 0,5-0,7
- D (m) - udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja, u rasponu 40-120 m

Model daje pouzdane rezultate unutar definiranih raspona ulaznih parametara, dok je za rezultate dobivene izvan tog područja potrebno provesti dodatnu validaciju prije njihove primjene.

Usporedba ukupnog broja konflikata dobivenih regresijskim modelom i rezultata SSAM-a prikazana je na slici 6.16.



Slika 6.16. Usporedba ukupnog broja konflikata – SSAM i regresijski model

Usporedba regresijskih vrijednosti i rezultata dobivenih analizom u alatu SSAM pokazala je visoku razinu slaganja kroz cijeli raspon opažanih podataka, pri čemu nisu utvrđena sustavna odstupanja u obliku precjenjivanja ili podcjenjivanja. Time je potvrđena primjenjivost modela za preliminarnu procjenu prometne sigurnosti koridora koji obuhvaća kružno i semaforizirano raskrižje. Dobiveni rezultati ukazuju na značaj analize međusobnog utjecaja ova dva tipa raskrižja te predstavljaju polazište za daljnje istraživanje sigurnosnih obilježja kružnih raskrižja smještenih u neposrednoj blizini semaforiziranih raskrižja.

Rezultati ovog istraživanja prezentirani su na konferenciji (Klobučar i sur., 2025c).

6.4. Analiza utjecaja projektnih elemenata na sigurnost prometa na kružnim raskrižjima

Jedna od ključnih prednosti kružnih raskrižja jest značajno smanjenje broja konfliktnih točaka – s primjerice 32 na standardnom četverokrakom raskrižju, na 8 u četverokrakom kružnom raskrižju. Budući da prometne nesreće na kružnim raskrižjima najčešće imaju blaže posljedice i uglavnom završavaju s manjom materijalnom štetom veliki broj takvih nesreća se ne prijavljuje pa je službena statistika prometnih nesreća na kružnim

raskrižjima u pravilu nepotpuna i ne odražava stvarno stanje. Iz tog razloga, u ovom dijelu istraživanju za analizu stanja sigurnosti na kružnim raskrižjima analizirani su potencijalni konflikti, koji za posljedicu mogu imati prometnu nesreću.

Za razliku od tradicionalnih pristupa koji se oslanjaju na povijesne podatke o nesrećama, ovo istraživanje koristi kombinaciju prometnih mikrosimulacija i modela procjene sigurnosti na temelju zamjenskih pokazatelja (SSAM). Potencijalni konflikti, kao teorijski nezavisni događaji u modelima, mogu se koristiti za procjenu rizika i vjerojatnosti različitih vrsta sudara, kao i za evaluaciju prometne sigurnosti (Gettman i Head, 2003; Howlader i sur., 2004; Tarko, 2021).

Brojna istraživanja potvrdila su da je brzina ključan faktor koji utječe na operativnu učinkovitost i prometnu sigurnost (Mahdalova i sur., 2013; Flannery, 2001; Choi i sur., 2011; Ambros i sur., 2016). Učestalost prometnih nesreća ovisi o brojnim faktorima, uključujući geometriju samog kružnog raskrižja (Daniels i sur., 2011; Johnson, 2023). Pojedina istraživanja naglašavaju važnost pravilnog odabira projektnih elemenata ulaza i izlaza, ističući ih kao najučestalije lokacije pojave konflikata (Novak i sur., 2018; Polders i sur., 2015).

Cilj ovog dijela istraživanja je sveobuhvatno analizirati odnos između geometrije kružnog raskrižja, brzine vozila i prometne sigurnosti.

6.4.1. Prometni modeli kružnih raskrižja i potencijalni konflikti

Na temelju terenskih mjerenja provedenih na devet srednje velikih urbanih kružnih raskrižja u Gradu Rijeci, detaljno opisanih u poglavlju 6.1., izrađeni su prometni mikrosimulacijski modeli korištenjem programskog alata VISSIM. Pri izradi modela uzeti su u obzir projektni i prometni parametri dobiveni terenskim istraživanjem, uključujući dnevno prometno opterećenje, strukturu prometnog toka, ulazne i izlazne brzine vozila te brzine na prilaznim i odlaznim prometnim trakama. Kao reprezentativna prosječna brzina u prometnim mikrosimulacijskim modelima primijenjena je dnevna operativna brzina (v_{85}) za svako pojedino raskrižje.

Provedene su mikrosimulacije u trajanju 24 sata, a za svaki model izvršeno je deset simulacija kako bi se postigli što točniji rezultati. Za daljnju analizu korištena je srednja vrijednost dobivenih rezultata. Mikrosimulacije su generirale trajektorije vozila kroz kružna raskrižja, koje su zatim korištene za procjenu broja potencijalnih konflikata pomoću programa SSAM. Ukupno je provedeno 90 mikrosimulacija.

6.4.2. Statistička analiza baze podataka iz modela prometnih mikrosimulacija

Na temelju prikupljenih podataka o broju konflikata, provedena je statistička analiza primjenom sljedećih metoda:

- (1) Pearsonov koeficijent korelacije primijenjen je za ispitivanje međuodnosa projektnih elemenata raskrižja, dnevnih prometnih opterećenja, brzina vozila po privozima i broja potencijalnih konflikata,
- (2) Višestruka linearna regresija provedena je metodom postupnog odabira prediktora, s ciljem identifikacije značajnih varijabli na broj konflikata.

Metodologija statističke analize opisana je u Poglavlju 5.

Rezultati korelacije dnevnog prometnog opterećenja, analiziranih brzina, projektnih parametara i broja konflikata prikazani su u tablici 6.21. i 6.22.

Tablica 6.21. Korelacijska matrica – dnevno prometno opterećenje, brzine, broj konflikata

Varijable	dnev no opt.	ulazn a $v_{\max}$	ulazn a v_{85}	ulazn a v_{exc}	izlazn a $v_{\max}$	izlazn a v_{85}	izlazn a v_{exc}	prilaz na $v_{\max}$	prilaz na v_{85}	prilaz na v_{exc}	odlaz na $v_{\max}$	odlaz na v_{85}	odlaz na v_{exc}	sudar straga	sudar prestr oj.	bočn i suda r	ukup ni br. konfli kata
dnevno opt.	1	-0,09	-0,44	-0,52	-0,16	-0,41	-0,50	0,47	0,36	0,01	0,44	0,27	0,04	0,86	0,23	0,07	0,85
ulazna $v_{\max}$	-0,09	1	0,87	0,72	0,75	0,82	0,68	0,44	0,43	0,41	0,42	0,41	0,33	-0,10	0,11	0,26	-0,07
ulazna v_{85}	-0,44	0,87	1	0,83	0,77	0,92	0,79	0,27	0,34	0,41	0,25	0,34	0,33	-0,39	0,04	0,24	-0,35
ulazna v_{exc}	-0,52	0,72	0,83	1	0,71	0,87	0,96	0,18	0,21	0,39	0,11	0,27	0,38	-0,51	-0,04	0,22	-0,46
izlazna $v_{\max}$	-0,16	0,75	0,77	0,71	1	0,89	0,75	0,52	0,51	0,43	0,50	0,47	0,37	-0,11	0,16	0,39	-0,07
izlazna v_{85}	-0,41	0,82	0,92	0,87	0,89	1	0,88	0,32	0,38	0,44	0,32	0,41	0,41	-0,34	0,05	0,26	-0,30
izlazna v_{exc}	-0,50	0,68	0,79	0,96	0,75	0,88	1	0,22	0,25	0,44	0,16	0,31	0,43	-0,48	0,02	0,28	-0,43
prilazna $v_{\max}$	0,47	0,44	0,27	0,18	0,52	0,32	0,22	1	0,94	0,64	0,94	0,88	0,59	0,49	0,33	0,58	0,52
prilazna v_{85}	0,36	0,43	0,34	0,21	0,51	0,38	0,25	0,94	1	0,80	0,94	0,95	0,73	0,44	0,34	0,60	0,48
prilazna v_{exc}	0,01	0,41	0,41	0,39	0,43	0,44	0,44	0,64	0,80	1	0,68	0,81	0,94	0,11	0,22	0,42	0,13
odlazna $v_{\max}$	0,44	0,42	0,25	0,11	0,50	0,32	0,16	0,94	0,94	0,68	1	0,90	0,62	0,55	0,41	0,59	0,58
odlazna v_{85}	0,27	0,41	0,34	0,27	0,47	0,41	0,31	0,88	0,95	0,81	0,90	1	0,81	0,37	0,28	0,60	0,41
odlazna v_{exc}	0,04	0,33	0,33	0,38	0,37	0,41	0,43	0,59	0,73	0,94	0,62	0,81	1	0,13	0,12	0,33	0,14
sudar straga	0,86	-0,10	-0,39	-0,51	-0,11	-0,34	-0,48	0,49	0,44	0,11	0,55	0,37	0,13	1	0,38	0,07	0,99
sudar prestr. oj.	0,23	0,11	0,04	-0,04	0,16	0,05	0,02	0,33	0,34	0,22	0,41	0,28	0,12	0,38	1	0,53	0,47
bočni sudar	0,07	0,26	0,24	0,22	0,39	0,26	0,28	0,58	0,60	0,42	0,59	0,60	0,33	0,07	0,53	1	0,15
ukupni br. konflikata	0,85	-0,07	-0,35	-0,46	-0,07	-0,30	-0,43	0,52	0,48	0,13	0,58	0,41	0,14	0,99	0,47	0,15	1

Tablica 6.22. Korelacijska matrica – dnevno prometno opterećenje, projektni elementi i broj konflikata

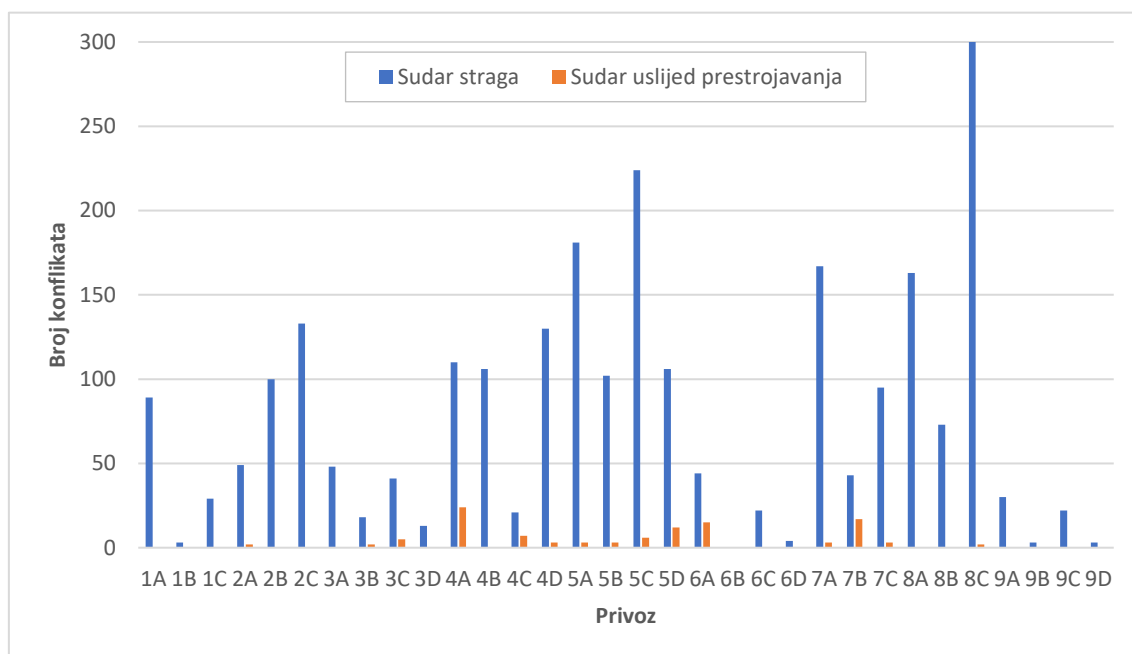
Variable	Rv	u	e _{ul}	R _{ul}	e _{iz}	R _{iz}	v	m	φ	m'	Rc	i	u'	dnevno opt.
ulazna v _{max}	-0,04	-0,20	-0,11	0,09	0,12	0,09	-0,06	0,11	-0,13	0,40	0,07	0,03	-0,10	-0,09
ulazna v ₈₅	-0,17	-0,19	-0,17	-0,07	-0,02	0,03	-0,12	0,07	-0,20	0,37	-0,13	-0,03	-0,24	-0,44
ulazna v _{exc}	-0,39	-0,52	-0,23	-0,09	-0,05	-0,03	0,09	0,16	-0,13	0,36	-0,20	0,01	-0,07	-0,52
izlazna v _{max}	-0,04	-0,20	-0,07	0,08	-0,16	0,08	0,08	0,26	-0,10	0,51	0,11	0,09	-0,47	-0,16
izlazna v ₈₅	-0,18	-0,24	-0,12	-0,01	-0,13	0,07	-0,01	0,15	-0,09	0,42	-0,06	-0,05	-0,30	-0,41
izlazna v _{exc}	-0,37	-0,52	-0,13	-0,10	-0,10	-0,01	0,15	0,23	-0,04	0,39	-0,18	0,07	-0,15	-0,50
prilazna v _{max}	0,14	-0,02	-0,02	0,25	0,07	0,35	0,14	0,46	-0,08	0,46	0,27	0,30	-0,49	0,47
prilazna v ₈₅	0,13	-0,11	-0,07	0,27	0,03	0,38	0,12	0,39	-0,05	0,41	0,29	0,30	-0,48	0,36
prilazna v _{exc}	-0,07	-0,31	-0,22	0,09	0,03	0,15	0,23	0,26	0,02	0,38	0,07	0,37	-0,29	0,01
odlazna v _{max}	0,25	-0,03	-0,07	0,28	0,00	0,41	0,12	0,36	-0,04	0,39	0,40	0,21	-0,45	0,44
odlazna v ₈₅	0,13	-0,18	-0,02	0,20	0,00	0,45	0,14	0,39	0,10	0,39	0,33	0,29	-0,42	0,27
odlazna v _{exc}	-0,08	-0,27	-0,10	0,06	0,00	0,18	0,25	0,31	0,18	0,39	0,07	0,34	-0,23	0,04
sudar straga	0,46	0,26	0,16	0,31	-0,06	0,36	-0,06	0,08	0,15	0,09	0,54	0,07	-0,22	0,86
sudar prestroj.	0,30	-0,02	0,06	0,35	0,17	0,35	-0,10	-0,07	0,04	0,37	0,33	0,25	-0,21	0,23
bočni sudar	0,17	-0,28	0,08	0,18	0,20	0,37	0,02	0,28	0,12	0,47	0,24	0,35	-0,35	0,07
ukupni br. konflikata	0,48	0,22	0,18	0,32	-0,06	0,42	-0,06	0,08	0,17	0,13	0,58	0,11	-0,24	0,85

Utvrđena je umjereno negativna korelacija između dnevnog prometnog opterećenja i ulaznih odnosno izlaznih brzina na pojedinim privozima: s porastom prometnog opterećenja, brzine vozila se smanjuju. Snažna pozitivna korelacija između ulazne, izlazne i odlazne brzine upućuje na to da veće brzine na ulazu rezultiraju sličnom dinamikom kretanja vozila dalje kroz raskrižje.

Veći ulazni polumjeri pokazuju tek slabu korelaciju s operativnim brzinama, dok veća širina kružnog kolnika smanjuje udio vozila koja prekoračuju ograničenje. Izlazni polumjer ima umjereno pozitivnu korelaciju s izlaznim i odlaznim brzinama, što znači da raskrižja s većim izlaznim polumjerima omogućuju postizanje većih brzina pri napuštanju kružnog toka. Vanjski polumjer umjereno je negativno povezan s udjelom vozila koja prekoračuju brzinu, dok polumjer središnjeg otoka pozitivno korelira s izlaznom brzinom. Duljina razdjelnog otoka pokazuje umjerenu pozitivnu korelaciju sa svim analiziranim brzinama, a širina povoznog dijela negativno korelira s izlaznim brzinama.

Očekivano, ukupni broj potencijalnih konflikata pokazuje snažnu pozitivnu korelaciju sa dnevnim prometnim opterećenjem (0,85). Prilazna brzina umjereno pozitivno korelira sa svim vrstama konflikata, dok ulazna brzina pokazuje negativu umjerenu korelaciju u slučaju sudara straga. Vanjski polumjer kružnog raskrižja pokazao se kao najutjecajniji projektni element – veći vanjski polumjer može dovesti do većeg broja potencijalnih konflikata.

Na slici 6.17. prikazan je broj konflikata po privozima kružnih raskrižja, klasificiranim prema vrsti konflikta.

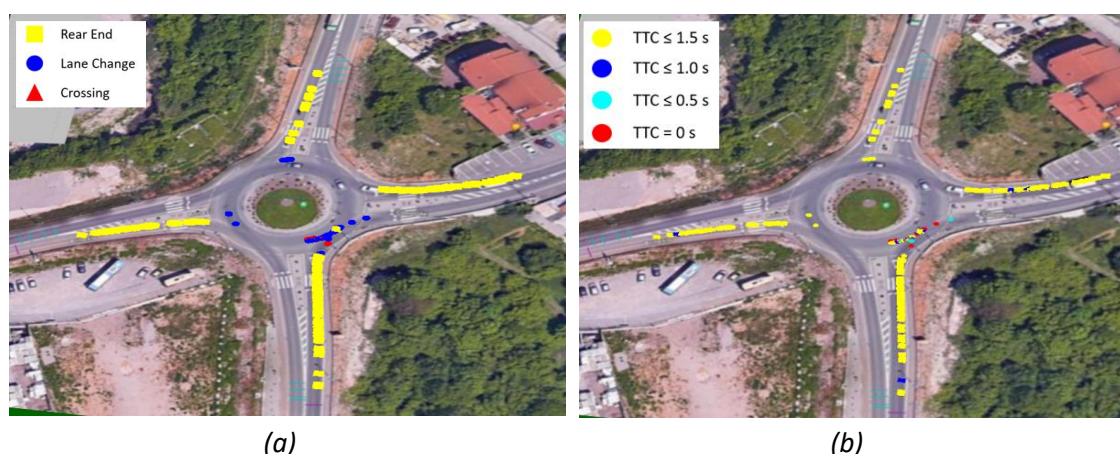


Slika 6.17. Broj potencijalnih konflikata po privozima

Sudari uslijed prestrojanja pretežito nastaju unutar kružnog kolnika, što se može povezati s odstupanjem njegove širine od preporuka Hrvatskih smjernica (Hrvatske ceste, 2014). Najčešći su sudari straga, evidentirani na svim privozima, dok su sudari uslijed prestrojanja rjeđi, ali i dalje prisutni.

Bočni sudari pojavili su se na samo 2 analizirana raskrižja u vrlo malom broju (< 5) te nisu uključeni u daljnju analizu.

Na slici 6.18. prikazan je grafički prikaz iz alata SSAM gdje je vidljiva prostora raspodjela pojedinih vrsta konflikata te ozbiljnosti svakog konflikta, na primjeru raskrižja KR5.



Slika 6.18. (a) Vrsta konflikta; (b) Ozbiljnost konflikta – SSAM model kružnog raskrižja 5

Za kvantificiranje utjecaja projektnih parametara na broj konflikata primijenjena je višestruka linearna regresija sa postupnim uključivanjem prediktora. Analizirana su tri regresijska modela: ukupni broj potencijalnih konflikata, konflikti koji mogu dovesti do sudara straga te konflikti uslijed prestrojanja.

U tablici 6.23. prikazani su rezultati višestruke linearne regresije za analizu ukupnog broja konflikata: vrijednosti koeficijenata uz svaku varijablu, njihove standardne pogreške, t -statistike te p -vrijednosti.

Tablica 6.23. Rezultati višestruke linearne regresije za predviđanje ukupnog broja konflikata

Varijabla	Vrijednos t	Standard na pogreška	t	p- vrijednos t	Donja granica (95%)	Gornja granica (95%)
Presjek	-143,854	101,062	-1,423	0,167	-351,99	64,28
vanjski polumjer	17,831	6,442	2,768	0,010	4,56	31,09
širina kružnog kolnika	0,000	0,000				
širina ulaza	0,000	0,000				
ulazni polumjer	0,000	0,000				
širina izlaza	-33,108	9,673	-3,423	0,002	-53,031	-13,18
izlazni polumjer	0,000	0,000				

Varijabla	Vrijednos t	Standard na pogreška	t	p- vrijednos t	Donja granica (95%)	Gornja granica (95%)
širina prometne trake na prilazu	0,000	0,000				
duljina razdjelne površine	0,000	0,000				
ulazni kut	0,000	0,000				
duljina otoka	0,000	0,000				
polumjer središnjeg otoka	0,000	0,000				
uzdužni nagib privoza	0,000	0,000				
povozni dio	0,000	0,000				
dnevno prometno opterećenje	0,026	0,003	7,548	<0,0001	0,019	0,03

Model za ukupni broj konflikata pokazuje značajnu sposobnost predikcije, s R^2 od 0,78 i prilagođenim R^2 od 0,76. Značajni parametri koji utječu na ukupan broj konflikata su vanjski polumjer i prometno opterećenje, u pozitivnoj korelaciji te širina izlaza u negativnoj korelaciji.

U tablici 6.24. prikazani su rezultati višestruke linearne regresije za analizu konflikata koji mogu dovesti do sudara straga: vrijednosti koeficijenata uz svaku varijablu, njihove standardne pogreške, t -statistike te p -vrijednosti.

Tablica 6.24. Rezultati višestruke linearne regresije za predviđanje sudara straga

Varijabla	Vrijednos t	Standard na pogreška	t	p- vrijednos t	Donja granica (95%)	Gornja granica (95%)
Presjek	115,439	90,237	1,279	0,214	-71,701	302,579
vanjski polumjer	0,000	0,000				
širina kružnog kolnika	0,000	0,000				
širina ulaza	-25,537	14,341	-1,781	0,089	-55,279	4,205
ulazni polumjer	-10,786	4,485	-2,405	0,025	-20,088	-1,485
širina izlaza	-20,315	8,622	-2,356	0,028	-38,196	-2,434
izlazni polumjer	0,000	0,000				
širina prometne trake na prilazu	0,000	0,000				
duljina razdjelne površine	0,000	0,000				
ulazni kut	0,000	0,000				
duljina otoka	0,000	0,000				
polumjer središnjeg otoka	26,089	6,611	3,946	0,001	12,378	39,800
uzdužni nagib privoza	-5,285	1,718	-3,077	0,006	-8,847	-1,723
povozni dio	0,000	0,000				
dnevno prometno opterećenje	0,028	0,003	8,785	<0,0001	0,021	0,034

Model za konflikte koji mogu dovesti do sudara straga pokazuje značajnu sposobnost predikcije, s R^2 od 0,853 i prilagođenim R^2 od 0,813. Rezultati upućuju na to da je dnevno prometno opterećenje glavni prediktor konfliktnih situacija. Veće vrijednosti ulaznog polumjera i širine izlaza te uzdužnog nagiba privoza negativno utječu na broj ovih konflikata, dok veći polumjer središnjeg otoka utječe pozitivno.

U tablici 6.25. prikazani su rezultati višestruke linearne regresije za analizu konflikata koji mogu dovesti do sudara uslijed prestrojavanja: vrijednosti koeficijenata uz svaku varijablu, njihove standardne pogreške, t -statistike te p -vrijednosti.

Tablica 6.25. Rezultati višestruke linearne regresije za predviđanje sudara uslijed prestrojavanja

Varijabla	Vrijednos t	Standard na pogreška	t	p- vrijednos t	Donja granica (95%)	Gornja granica (95%)
Presjek	6,204	14,899	0,416	0,681	-24,482	36,890
vanjski polumjer	0,000	0,000				
širina kružnog kolnika	0,000	0,000				
širina ulaza	1,282	0,479	2,676	0,013	0,295	2,268
ulazni polumjer	0,000	0,000				
širina izlaza	0,000	0,000				
izlazni polumjer	-6,240	3,478	-1,794	0,085	-13,404	0,924
širina prometne trake na prilazu	0,000	0,000				
duljina razdjelne površine	0,000	0,000				
ulazni kut	0,000	0,000				
duljina otoka	0,000	0,000				
polumjer središnjeg otoka	0,646	0,215	3,000	0,006	0,203	1,090
uzdužni nagib privoza	0,000	0,000				
povozni dio	0,000	0,000				
dnevno prometno opterećenje	0,000	0,000				

Model za konflikte nastale uslijed prestrojavanja pokazuje manju prediktivnu sposobnost, s R^2 od 0,368 i prilagođenim R^2 od 0,292. U ovom modelu, povećanje širine ulaza i polumjera središnjeg otoka povezani su s povećanjem broja ove vrste konflikata.

Dnevno prometno opterećenje pokazalo se kao najznačajniji parametar koji utječe na brzinu vozila u kružnim raskrižjima, što je u skladu s ranijim istraživanjima (Daniels i sur., 2011; Šenk i Ambros, 2011, Novak i sur., 2018). Korelacijska analiza upućuje na to da veće ulazne brzine često rezultiraju većim izlaznim i odlaznim brzinama. Sudari straga pokazali su se najčešćim oblikom konflikta, što potvrđuju i rezultati drugih istraživanja (Polders i sur., 2015.; Burdett i sur., 2021.). Rezultati regresijske analize pokazuju da je dnevno prometno opterećenje najsnažniji prediktor konflikata svih vrsta, u skladu s

istraživanjima Danielsa i sur. (2011) te FHWA (2010). Veći vanjski polumjer može dovesti do većeg broja konflikata, dok veća širina izlaza može imati pozitivan utjecaj na prometnu sigurnost. Rezultati istraživanja potvrdili su važnost projektnih elemenata za prometnu sigurnost kružnih raskrižja te služe kao temelj za definiranje projektnih elemenata za daljnje istraživanje.

Rezultati ovog istraživanja objavljeni su u znanstvenom radu (Klobučar i sur., 2025b).

6.5. Rezime – Preliminarna istraživanja

Provedena eksperimentalna istraživanja na devet srednje velikih jednotračnih urbanih kružnih raskrižja u okolici Grada Rijeke osigurala su pouzdanu početnu bazu podataka o dnevnim i satnim prometnim opterećenjima, strukturi i raspodjeli vozila te operativnim brzinama, čime su definirani referentni geometrijski i prometni ulazni parametri za izradu prometnih mikrosimulacijskih modela. Provedeno je ukupno 1800 mikrosimulacija koje su sustavno kombinirale različita vršna opterećenja, raspodjele prometa na glavnom i sporednom smjeru i međusobne udaljenosti kružnog i semaforiziranog raskrižja. Rezultati simulacija potvrdili su da vršno prometno opterećenje, udaljenost između raskrižja i raspodjela prometnih tokova značajno utječu na vrijeme putovanja; preliminarni regresijski model za predikciju vremena putovanja s navedena tri prediktora pokazao je visoku točnost ($R^2 = 0,91$).

Posebno su kritične male udaljenosti između raskrižja (40–60 m), pri kojima eksponencijalno rastu prosječna vremena kašnjenja i vrijeme putovanja, dok se udaljenost od 120 m pokazala nedostatnom za postizanje stabilnih uvjeta prometa te je uočena potreba za uvrštavanjem ciklusa semafora u završni model.

Usporedba linearnog regresijskog modela i neuronske mreže pokazala je neznatno bolju točnost neuronske mreže, no bez značajne razlike. Stoga je, zbog jednostavnije interpretacije rezultata i transparentnosti utjecaja pojedinih prediktora, linearni model odabran kao optimalno rješenje za predviđanje vremena putovanja.

Za procjenu sigurnosti prometa razvijen je preliminarni model koji na temelju udjela prometa na glavnom smjeru i udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja objašnjava 92 % varijabilnosti ukupnog broja konflikata ($R^2 = 0,92$), pri čemu se dnevno prometno opterećenje potvrdilo kao najsnažniji pojedinačni prediktor konflikata svih vrsta.

Preliminarna istraživanja definirala su ključne ulazne parametre za model predikcije vremena putovanja i broja konflikata, potvrdila su važnost razmaka između kružnog i semaforiziranog raskrižja te identificirala ograničenja postojećih regresijskih analiza.

Navedeni rezultati predstavljaju temelj za razvoj naprednijeg modela koji će obuhvatiti širi skup varijabli s ciljem optimiranja protočnosti i sigurnosti kružnog raskrižja u urbanoj prometnoj mreži.

7. RAZVOJ MODELA ZA PREDIKCIJU VREMENA PUTOVANJA

U ovom poglavlju prikazan je razvoj regresijskog modela koji kvantificira utjecaj odabranih prometnih i projektnih parametara na vrijeme putovanja između kružnog i semaforiziranog raskrižja.

*U prvom koraku definirani su **ulazni parametri modela**, temeljeni na preliminarnim istraživanjima, opisanim u Poglavlju 6.*

*Drugi korak obuhvaća izradu **modela prometnih mikrosimulacija** za različite scenarije prometnih opterećenja, geometrijske karakteristike raskrižja te parametre prometne svjetlosne signalizacije.*

*U trećem koraku provedena je detaljna analiza utjecaja ulaznih parametara na ključne **prometne pokazatelje**.*

*U četvrtom koraku je primijenjena višestruka linearna regresijska analiza temeljena na bazi podataka prometnih mikrosimulacija kako bi se izdvojili najznačajniji ulazni parametri i izradio **model predikcije vremena putovanja**. Dobiveni model omogućuje procjenu očekivanog vremena putovanja za zadane uvjete u prometnoj mreži te pruža podlogu za optimizaciju udaljenosti kružnog i semaforiziranog raskrižja*

U nastavku poglavlja detaljno je opisan odabir ulaznih parametara, postupak izrade prometnih mikrosimulacijskih scenarija i statistička analiza rezultata.

Regresijski model potom je validiran u stvarnim prometnim uvjetima, na temelju rezultata eksperimentalnih istraživanja u Gradu Osijeku i Poreču, što je prikazano u poglavlju 8.

7.1. Ulazni parametri modela

Ulazni parametri za razvoj modela definirani su na temelju rezultata preliminarnih istraživanja koja su detaljno obrazložena u poglavlju 6.

Preliminarnim istraživanjima utvrđeno je da je količina prometa najznačajniji utjecajni faktor na prometne pokazatelje kružnog raskrižja, što je u skladu s dosadašnjim znanstvenim istraživanjima (Macioszek, 2014; FHWA, 2010; Avşar i sur., 2024; Rodgers i sur., 2021). Međutim, značajan utjecaj pokazuju i udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja te raspodjela prometa na glavnom i sporednom smjeru.

U preliminarnom modelu predikcije vremena putovanja, koji je koristio tri ulazna parametra (vršno prometno opterećenje, raspodjelu prometa na glavnom i sporednom smjeru i udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja), postignuta je visoka točnost ($R^2=0,91$), ali su uočena i određena ograničenja. Pokazalo se da su male udaljenosti raskrižja (40-60 metara) posebno kritične, dok je i na najvećoj analiziranoj udaljenosti od 120 metara primjetan negativni utjecaj susjednog semaforiziranog raskrižja na kružno raskrižje. Stoga je, na temelju preliminarnog modela, formiran novi okvir modela predikcije vremena putovanja koji razmatra veći raspon udaljenosti – od 40 metara do 160 metara između kružnog i semaforiziranog raskrižja.

Analiza terenskih istraživanja, opisana u poglavlju 5.1., pokazala je da se na određenim analiziranim kružnim raskrižjima javlja izrazito neravnomjerna raspodjela prometa – do 80% ukupnog prometa prolazi glavnim smjerom. Preliminarnim istraživanjem utvrđeno je da raspodjela prometa na glavnom i sporedno smjeru značajno utječe na vrijeme putovanja vozila. Sukladno tome, u novi model uvedene su dodatne varijacije raspodjele prometa te model sada obuhvaća četiri raspodjele prometnog toka na glavnom i sporednom smjeru: 80:20, 70:30, 60:40 i 50:50.

Prometno opterećenje u vršnom satu zadržano je na razinama korištenim u preliminarnom modelu. Razmatra se šest različitih prometnih opterećenja, od 5% do 10% preporučenog maksimalnog kapaciteta srednje velikog urbanog kružnog raskrižja (procijenjenog na 20 000 vozila dnevno). To odgovara vršnim prometnim opterećenjima od 1000, 1200, 1400, 1800 i 2000 vozila na sat. Ove vrijednosti predstavljaju tipične razine opterećenja tijekom vršnog sata i omogućuju procjenu ponašanja modela pri različitim intenzitetima prometa.

Preliminarna istraživanja pokazala su da, uz prometno opterećenje, na ukupni broj konflikata značajno utječe i vanjski polumjer kružnog raskrižja, što je u skladu s dosadašnjem znanstvenim istraživanjima (Poglavlja 3 i 4). Sukladno tome, u prošireni model uveden je i ovaj projektni element – analizirana su kružna raskrižja s vanjskim polumjerom od 12 metara, 17 metara i 22 metra. Vrijednosti vanjskih polumjera odabrane su na temelju provedenih preliminarnih i eksperimentalnih istraživanja, budući da su sva analizirana kružna raskrižja unutar tih raspona dimenzija. Uvođenje

vanjskog polumjera kao ulaznog parametra model može bolje obuhvatiti utjecaj geometrije raskrižja na protočnost i sigurnost kružnog raskrižja.

Eksperimentalna istraživanja provedena u Osijeku i Poreču, koja su opisana u ovom poglavlju, dodatno su istaknula važnost duljine ciklusa semafora, posebno duljine trajanja crvenog vremena na susjednom semaforiziranom raskrižju. Utvrđeno je da dulje trajanje crvene faze može dovesti do stvaranja kolona vozila koja mogu privremeno blokirati prometni tok unutar kružnog raskrižja. Na temelju tih zapažanja, navedeni parametar uključen je u istraživački model kroz razmatranje triju scenarija: trajanje crvenog vremena od 17 sekundi (uz ukupni ciklus od 60 sekundi), 22 sekunde (uz ukupni ciklus od 65 sekundi) i 27 sekundi (uz ukupni ciklus od 70 sekundi).

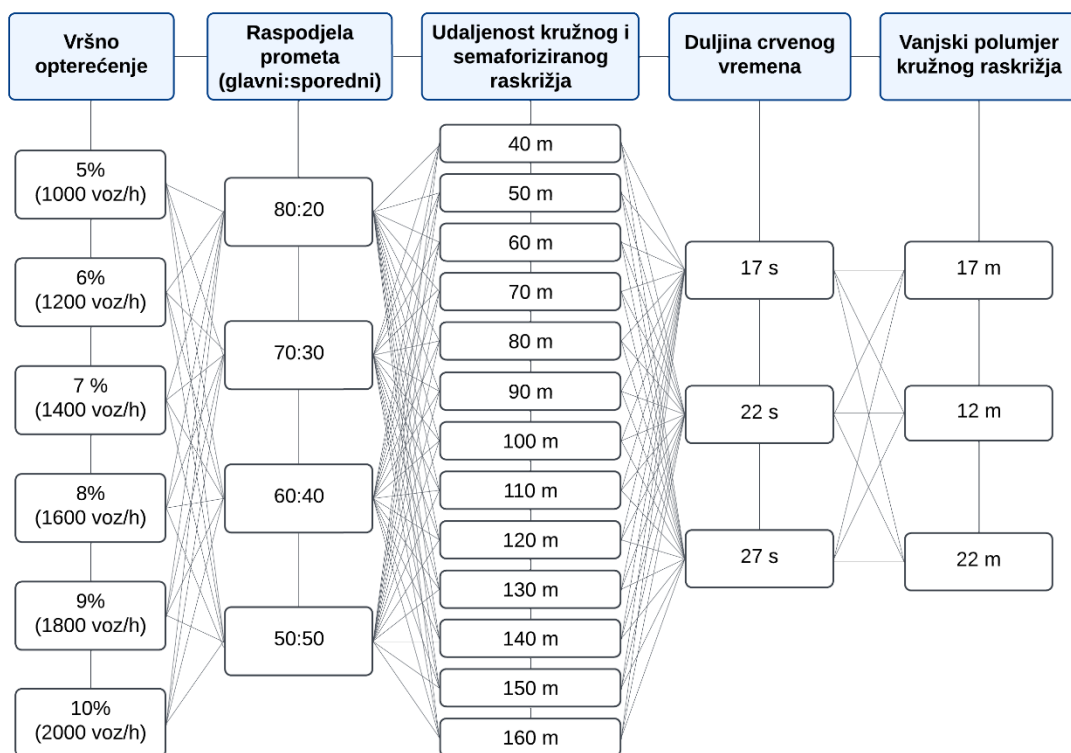
U konačnici je za daljnju analizu odabrano pet osnovnih parametara:

- (1) Prometno opterećenje u vršnom satu
- (2) Raspodjela prometa na glavnom i sporednom smjeru
- (3) Udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja
- (4) Vanjski polumjer kružnog raskrižja
- (5) Uvjeti rada prometne svjetlosne signalizacije na semaforiziranom raskrižju

Za svaki parametar definirane su, temeljem postojećih znanstvenih istraživanja (Poglavlje 3) i preliminarnih istraživanja (Poglavlje 5), vrijednosti ulaznih parametara kako slijedi:

- (1) Prometno opterećenje u vršnom satu: 1000 voz/h, 1200 voz/h, 1400 voz/h, 1600 voz/h, 1800 voz/h i 2000 voz/h
- (2) Raspodjela prometa na glavnom i sporednom smjeru: 80:20, 70:30, 60:40, 50:50
- (3) Udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja: 40 – 160 m sa inkrementom od 10 m
- (4) Vanjski polumjer kružnog raskrižja: 12 m, 17 m i 22 m
- (5) Duljina crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju: 17 s, 22 s i 27 s

Grafički prikaz svih usvojenih parametara prikazan je na slici 7.1.



Slika 7.1. Ulazni parametri modela

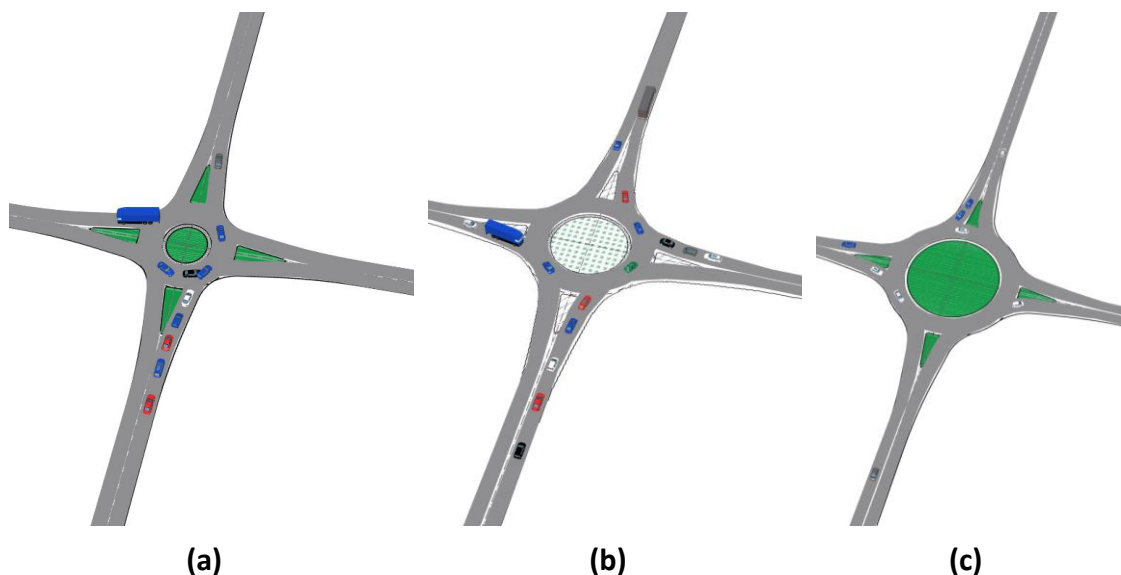
Kombinacijom ulaznih parametara generirano je ukupno 2880 scenarija modela prometnih mikrosimulacija, čiji rezultati su bili temelj za daljnju analizu i razvoj regresijskih modela.

7.2. Modeli prometnih mikrosimulacija temeljeni na različitim scenarijima

Razvoj modela prometnih mikrosimulacija proveden je kroz sljedeće faze:

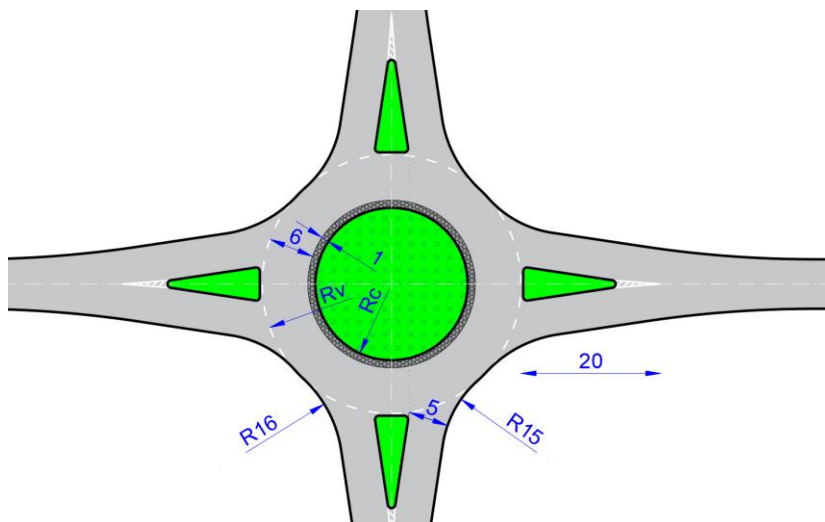
- (1) Izrada modela izoliranog kružnog raskrižja
- (2) Variranje ulaznih parametara u modelima prometnih mikrosimulacija izoliranih raskrižja, uključujući vršno prometno opterećenje, raspodjela prometa na glavnom i sporednom smjeru i vanjski polumjer kružnog raskrižja – prema slici 7.1.
- (3) Integracija semaforiziranog raskrižja s kružnim raskrižjem unutar jedinstvenog prometnog mikrosimulacijskog modela
- (4) Variranje ulaznih parametara (scenariji) za prometni mikrosimulacijski model prometnog koridora koji uključuje kružno i semaforizirano raskrižje (Slika 7.1.)

U okviru istraživanja razvijeni su prometni mikrosimulacijski modeli jednotračnih kružnih raskrižja s tri različite veličine vanjskog polumjera (12 m, 17 m i 22 m), što je prikazano na slici 7.2.



Slika 7.2. VISSIM modeli raskrižja: (a) $R_v = 12\text{ m}$; (b) $R_v = 17\text{ m}$; (c) $R_v = 22\text{ m}$

Projektne elemente, odabrani temeljem terenskih mjerenja stvarnih raskrižja, prikazani su na slici 7.3. i u tablici 7.1.



Slika 7.3. Projektne elemente modela prometnih mikrosimulacija

Pri tome je definirana brzina na glavnom smjeru postavljena na 50 km/h, a na sporednom smjeru na 40 km/h, što odgovara prosječnim operativnim brzinama analiziranih stvarnih raskrižja, detaljnije prikazano u Poglavlju 6.1. Brzina vozila unutar kružnog toka definirana je na 40 km/h. Svi privozi modelirani su kao dvotračni dvosmjerni, širine prometne trake 3,25 m, uzdužnog nagiba 0%.

Tablica 7.1. Količina prometa, struktura prometa i projektni elementi modela prometnih mikrosimulacija

KR	Broj privoza	Vanjski polumjer	Polumjer središnjeg otoka	Širina kružnog kolnika	Ulazni polumjer	Izlazni polumjer	Struktura vozila		
		R_v [m]	R_c [m]	m	m	m	klasa	glavni	sporedni
Model 1	4	12	5	6	15	16	auto	94,5%	95,3%
Model 2		17	10				kamion	3,5%	3,5%
Model 3		22	15				BUS	1,0%	0,7%
							TTV	1,0%	0,5%

Vrijeme putovanja analizirano je unutar vršnog sata te su provedene prometne mikrosimulacije u trajanju 75 minuta: prvih 15 minuta predstavljalo je inicijalizacijsko razdoblje tijekom kojeg je promet postupno uveden u mrežu, dok je preostalih 60 minuta bilo namijenjeno samoj simulaciji.

U prvom koraku su provedene prometne mikrosimulacije za različite scenarije za izolirano kružno raskrižje – varirani su ulazni parametri kako je ranije navedeno. Ukupno je provedeno 720 simulacija.

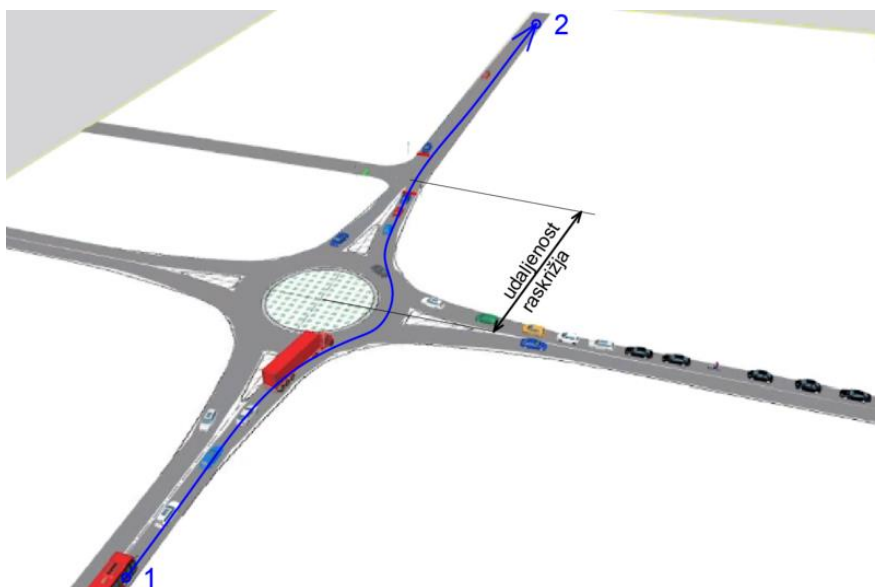
U drugom koraku u prometnu mrežu integrirano je trokrako kružno raskrižje, pri čemu je udaljenost između središta kružnog i semaforiziranog raskrižja varirana u rasponu od 40 do 160 metara (prema podacima sa slike 7.1.). Minimalna udaljenost od 40 m utvrđena je kao donja granica za uklapanje projektnih elemenata oba raskrižja, dok je maksimalna vrijednosti od 160 metara definirana temeljem preporuka američkih smjernica (FHWA, 2010). Prema ovim smjernicama, za udaljenosti manje od 500 stopa (152,4 m) između kružnog i semaforiziranog raskrižja nužno je provesti detaljnu mikrosimulacijsku analizu radi optimizacije prometnog rješenja.

Semaforizirano raskrižje modelirano je s tri različite duljine signalnog ciklusa: 60 sekundi (crveno svjetlo - 17 s), 65 sekundi (crveno svjetlo - 22 s) i 70 sekundi (crveno svjetlo - 27 s). Zbog opsežnog obima prikupljenih podataka (2808 scenarija), u Prilogu D je dan primjer sažetog prikaza rezultata modela prometnih mikrosimulacija, dok cjelovita baza podataka dostupna u digitalnom repozitoriju Sveučilišta u Rijeci.

Cjeloviti skup rezultata obuhvaća sljedeće prometne pokazatelje:

- prosječnu i maksimalnu duljinu reda čekanja (Q_{Len} , Q_{LenMax}) [m],
- broj vozila koja su prošla kroz kružno raskrižje ($VehPass$) [voz],
- razinu uslužnosti (LOS),
- prosječno vrijeme kašnjenja vozila ($VehDelay$) [s/voz],
- kašnjenje pri zaustavljanju ($Stop Delay$) [s/voz],
- broj zaustavljanja po voz ($Stops$) [/],
- emisiju ugljikova monoksida ($EmissCO$) [g],
- potrošnju goriva ($Fuel$) [gal],
- vrijeme putovanja između kružnog i semaforiziranog raskrižja [s].

Vrijeme putovanja analizirano je za rutu između definiranih točaka 1 i 2, međusobno udaljenih 300 metara (Slika 7.4.).



Slika 7.4. Definirana ruta za prikupljanje podataka o vremenu putovanja vozila

7.3. Analiza baze podataka za razvoj modela

Baza podataka je formirana na temelju rezultata prometnih mikrosimulacija. Statističkom analizom baze podataka ispitan je utjecaj ulaznih parametara modela na odabrane prometne pokazatelje – vrijeme putovanja i prosječno vrijeme kašnjenja.

Analiza se sastoji od sljedećih koraka:

- (1) Pearsonov test korelacije za ispitivanje međuočnosa prometnih pokazatelja
- (2) Analiza utjecaja ulaznih parametara modela na prosječno vrijeme kašnjenja
- (3) Analiza utjecaja ulaznih parametara modela na vrijeme putovanja

Prvi korak uključivao je analizu korelacija prometnih pokazatelja, kako bi se ocijenio njihov međuočnos. Rezultati su prikazani u tablici 7.2., gdje je su podebljano istaknute vrijednosti korelacija vremena putovanja s ostalim prometnim pokazateljima.

U literaturi postoje općenito prihvaćeni pragovi za kategorizaciju vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije kao male, srednje ili velike. Najčešće se koristi Evansova klasifikacija (Evans, 1996) koja definira sljedeća tumačenja apsolutne vrijednosti koeficijenata korelacije: < 0,20 vrlo slaba korelacija; 0,20-0,39 slaba korelacija; 0,40-0,59 umjerena korelacija; 0,60-0,79 jaka korelacija te 0,8-1,00 izrazito jaka korelacija, korištena u istraživanjima (Zang i sur., 2023; Krehbiel, 2004; Papageorgiou, 2022).

Tablica 7.2. Korelacijska matrica prometnih pokazatelja

Prometni pokazatelj	Qlen	Qlen Max	LOS	StopDelay	Stops	Emission CO	Fuel	VehDelay	Vrijeme putovanja
Qlen	1	0,790	0,867	0,820	0,950	0,864	0,864	0,907	0,877
QlenMax	0,790	1	0,801	0,581	0,749	0,677	0,677	0,692	0,655
LOS	0,867	0,801	1	0,817	0,933	0,906	0,906	0,913	0,815
StopDelay	0,820	0,581	0,817	1	0,893	0,906	0,906	0,966	0,777
Stops	0,950	0,749	0,933	0,893	1	0,949	0,949	0,974	0,915
Emission CO	0,864	0,677	0,906	0,906	0,949	1	1,000	0,953	0,821
Fuel	0,864	0,677	0,906	0,906	0,949	1,000	1	0,953	0,821
VehDelay	0,907	0,692	0,913	0,966	0,974	0,953	0,953	1	0,880
Vrijeme putovanja	0,877	0,655	0,815	0,777	0,915	0,821	0,821	0,880	1

Korelacijska matrica prometnih pokazatelja pokazuje bliske vrijednosti onima dobivenim preliminarnim istraživanjem, prikazanom u poglavlju 6. Vrijeme putovanja u snažnoj je pozitivnoj korelaciji s ostalim prometnim pokazateljima. Ovi rezultati upućuju na to da promjene u uvjetima prometovanja koje uzrokuju veću duljinu vremena putovanja istodobno dovode do proporcionalnih promjena i u ostalim prometnim pokazateljima koji utječu na kvalitetu odvijanja prometa.

7.3.1. Analiza utjecaja ulaznih parametara modela na prosječno vrijeme kašnjenja

Analiza postojećih istraživanja pokazala je da je prosječno vrijeme kašnjenja vozila, uz kapacitet, jedan od temeljnih pokazatelja operativne učinkovitosti kružnih raskrižja te ujedno i najčešće analizirani prometni pokazatelj (Federal Highway Administration, 2010; Flannery, 1998; Demir i Demir, 2020; Damaskou i Kehagia, 2017). U literaturi se prosječno vrijeme kašnjenja identificira kao primarna mjera učinkovitosti raskrižja, prema kojoj se određuje razina usluznosti.

U nastavku su izloženi zaključci provedenog istraživanja o utjecaju pojedinih ulaznih parametara na prosječno vrijeme kašnjenja vozila. Zbog opsežne baze podataka, za svaki analizirani parametar prikazan je reprezentativni grafički primjer, koji je moguće generirati za sve scenarije.

Povećanjem razmaka između kružnih raskrižja (od 40 m na 160 m) primjetno se smanjuje prosječno vrijeme kašnjenja po vozilu za svaku zadanu razinu prometnog opterećenja. Pri srednjem vršnom opterećenju (1600 voz/h), povećanje udaljenosti s 40 m na 120 m smanjuje prosječno kašnjenje za 40%, a do 160 m vidljiv je dodatni pad od 21%. To predstavlja smanjenje prosječnog vremena kašnjenja za 61%. Sličan silazni trend vidljiv je i za ostale razine opterećenja.

Najveće smanjenje prosječnog vremena kašnjenja ostvaruje se pri inicijalnom rastu udaljenosti raskrižja. Povećanje udaljenosti s 40 m na 80–100 m donosi izrazito veliki pad kašnjenja (više od 50%). Daljnje povećanje udaljenosti iznad otprilike 120 m i nadalje do 160 m ima sve manji efekt (10-20 % ovisno o scenariju). U svim scenarijima, izolirana kružna raskrižja imaju najmanje prosječno vrijeme kašnjenja (prosječno 70% manja u odnosu na scenarije za udaljenost raskrižja od 40 m).

Kod manjeg prometnog opterećenja (1000 voz/h) povećanje udaljenosti između raskrižja s 40 m na 160 m smanjuje prosječno vrijeme kašnjenja za 30-50 %, ovisno o scenariju. Pri srednjem prometnom opterećenju (1600 voz/h) prosječno vrijeme kašnjenja smanjuje se za 45-60 %. Kod najvećeg prometnog opterećenja (2000 voz/h) prosječno vrijeme kašnjenja smanjuje se za 50-60%.

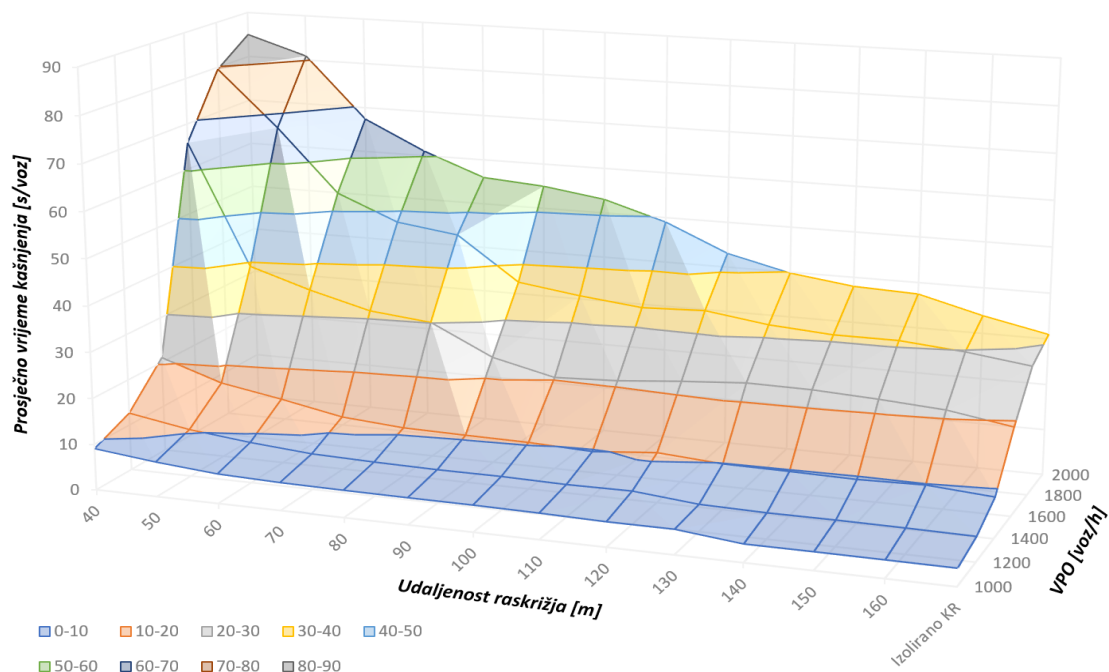
Veće vršno prometno opterećenje rezultira dužim prosječnim kašnjenjem vozila, za sve scenarije. Pri udaljenosti raskrižja od 40 m i velikom prometnom opterećenju (2000 voz/h), prosječno vrijeme kašnjenja je 60-80 % veće od scenarija s umjerenim prometnim opterećenjem (1400-1600 voz/h). Veća udaljenost između raskrižja smanjuje vrijeme kašnjenja, ali postotna razlika ostaje velika (prosječno 50-60 %).

Zbog složenosti i velikog obima prikupljenih podataka, rezultati su u nastavku istraživanja prikazani grafičkim 3D prikazima. Ovi prikazi jasno ilustriraju relativne odnose između prosječnog vremena kašnjenja, udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja te odabranog ulaznog parametra. Za grafičku analizu odabran je reprezentativni primjer definiran vršnim prometnim opterećenjem od 1400 voz/h (što čini 7 % dnevnog prometnog opterećenja tijekom vršnog sata), vanjskim polumjerom kružnog raskrižja od 17 m, udjelom prometa na glavnom smjeru od 60 % te duljinom crvenog vremena od 17 s. Vrijednosti reprezentativnih ulaznih parametara odabrane su na temelju analize provedenih terenskih mjerenja (Poglavlje 6.1.). Odabrano vršno prometno opterećenje predstavlja prosječnu vrijednost utvrđenu tijekom terenskih istraživanja, dok je vanjski polumjer kružnog raskrižja određen kao aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti analiziranih raskrižja. Udio prometa na glavnom smjeru od 60 % utvrđen je kao najčešće zabilježen tijekom terenskih mjerenja, a duljina crvenog vremena od 17 s određena je kao optimalna za opisane prometne uvjete temeljem analize u programu SIDRA Intersection.

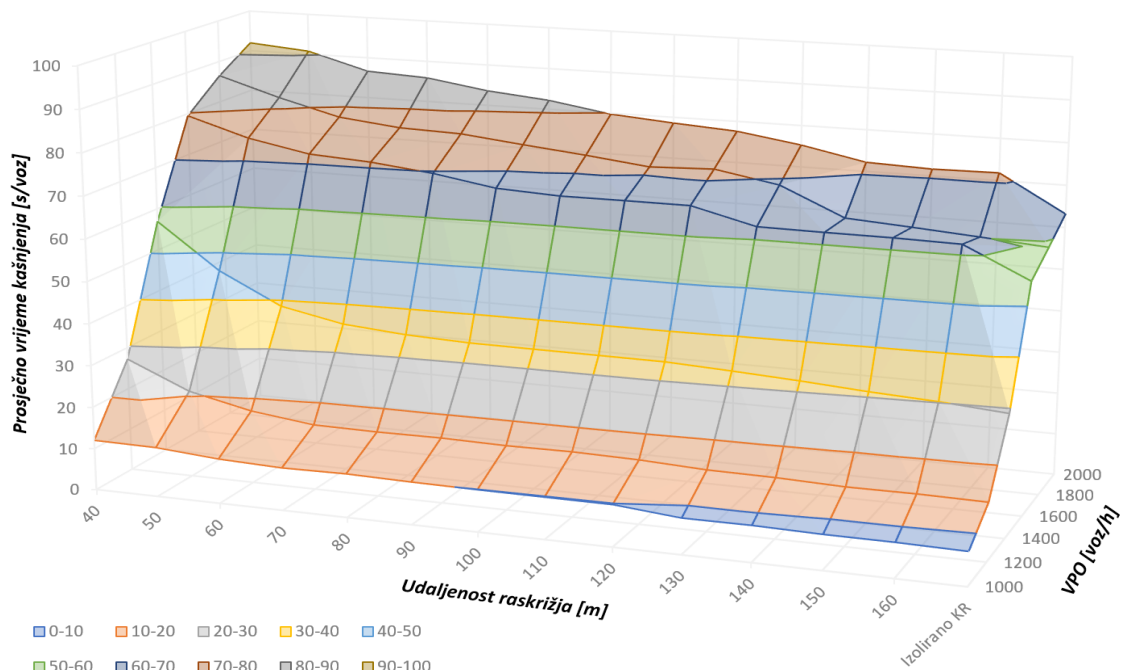
Grafički 3D prikazi pružaju pregledan i jasan uvid u međuovisnost analiziranih parametara te mogu poslužiti kao praktičan alat u preliminarnoj fazi projektiranja kružnih raskrižja na semaforiziranom koridoru.

Vršno prometno opterećenje: Uzimajući u obzir rezultate pregleda relevantne literature i provedene preliminarne analize, utvrđeno je da su vršno prometno opterećenje i vanjski polumjer kružnog raskrižja najutjecajniji parametri koji definiraju njegovu funkcionalnost. Stoga su na slikama 7.5., 7.6. i 7.7. prikazani relativni odnosi između vršnog prometnog opterećenja, udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja i

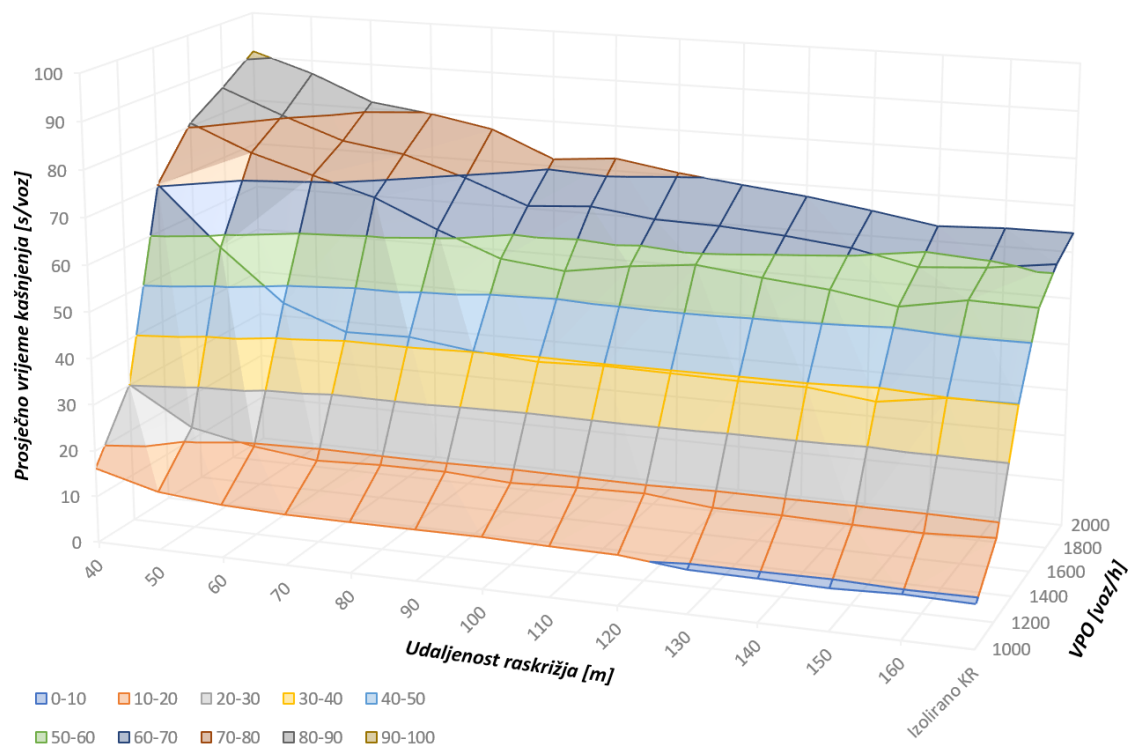
prosječnog vremena kašnjenja vozila, zasebno za tri analizirane vrijednosti vanjskog polumjera (12 m, 17 m i 22 m). Prikazani rezultati odnose se na reprezentativne scenarije s udjelom prometa od 60 % u glavnom smjeru (GS) i trajanjem crvenog vremena od 17 s (cs).



Slika 7.5. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja ($R_v=12$ m, $GS=60\%$, $cs=17s$)



Slika 7.6. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja ($R_v=17$ m, $GS=60\%$, $cs=17s$)



Slika 7.7. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja ($R_v=22$ m, $GS=60\%$, $cs=17s$)

Pri malim udaljenostima raskrižja (40 m), kašnjenja su najveća u svim scenarijima. Povećanje udaljenosti na 80 m donosi bitno smanjenje prosječnog vremena kašnjenja, prosječno za 30 %. Kod većih udaljenosti (130 m i više), prosječno vrijeme kašnjenja približava se vrijednostima izoliranih kružnih raskrižja, koja u svim scenarijima imaju najmanje prosječno vrijeme kašnjenja.

U scenarijima s vanjskim polumjerom od 12 m, povećanje razmaka od 40 m na 160 m, smanjuje prosječno vrijeme kašnjenja za 59 %, a kod najvećeg vanjskog polumjera (22 m) za 56 %.

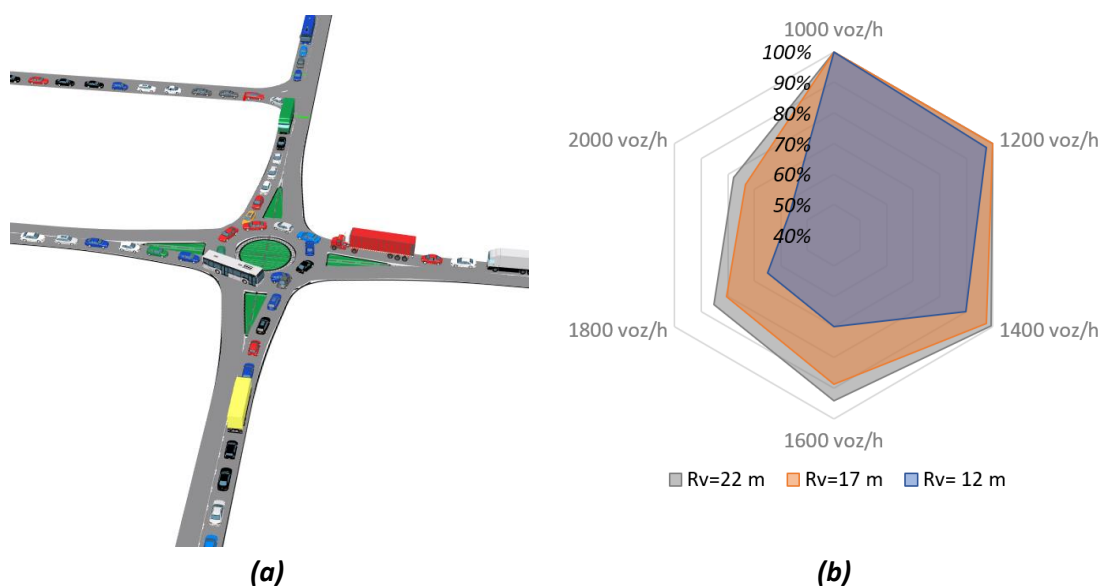
Utjecaj veličine vanjskog polumjera kružnog raskrižja pokazao se nelinearan. Analiza usporedbe pokazuje da su scenariji s vanjskim polumjerom od 17 m rezultirali najvećim kašnjenjem, dok su scenariji s najmanjim vanjskim polumjerom (12 m) pokazali najmanje kašnjenje, pri vršnom opterećenju većem od 1200 voz/h. Scenariji s vanjskim polumjerom od 22 m pokazali su nešto bolje rezultate od scenarija s vanjskim polumjerom 17 m.

Povećanje polumjera s 12 m na 17 m povećava prosječno vrijeme kašnjenja, dok daljnje povećavanje na 22 m smanjuje vrijeme kašnjenja. Ovaj obrazac vrijedi na različitim udaljenostima. Pri maloj udaljenosti (40 m) prosječno vrijeme kašnjenja povećava se za prosječno 65 % s povećanjem vanjskog polumjera s 12 m na 17 m. Sličan odnos vidljiv je i na većim razmacima, za udaljenost raskrižja od 160 m, scenariji s vanjskim polumjerom 12 m imaju prosječno 40 % manje prosječno vrijeme kašnjenja u odnosu na scenarije s

vanjskim polumjerom od 17 m. Scenariji s vanjskim polumjerom 22 m imaju prosječno 25 % manje prosječno vrijeme kašnjenja od scenarija s vanjskim polumjerom od 17 m.

Nelinearnost porasta vremena kašnjenja uspoređujući scenarije s vanjskim polumjerom 12 m i 17 m može se objasniti time da kod malih kružnih raskrižja ($R_v=12$ m) u većem broju simulacija dolazi do zasićenja toka, kao što je prikazano na slici 7.8. Pri vršnom opterećenju od 1400 voz/h, 70% prometa na glavnom smjeru i pri duljini crvenog vremena od 17 s, u 7 od 10 provedenih prometnih mikrosimulacija scenarija dolazi do zastoja prometnog toka. U tim slučajevima, prosječno vrijeme kašnjenja u VISSIM-u se računa samo za vozila koja su prošla prije zastoja.

Na slici 7.8b prikazan je postotak vozila koja uspješno prolaze kroz prometnu mrežu u ovisnosti o vršnom prometnom opterećenju i vanjskom polumjeru kružnog raskrižja. Prikazane vrijednosti predstavljaju prosjek rezultata svih analiziranih scenarija, pri čemu su varirani trajanje crvenog svjetla na semaforiziranom raskrižju (17–22 s), udio prometnog toka na glavnom smjeru (50–80 %) te udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja (40–160 m).



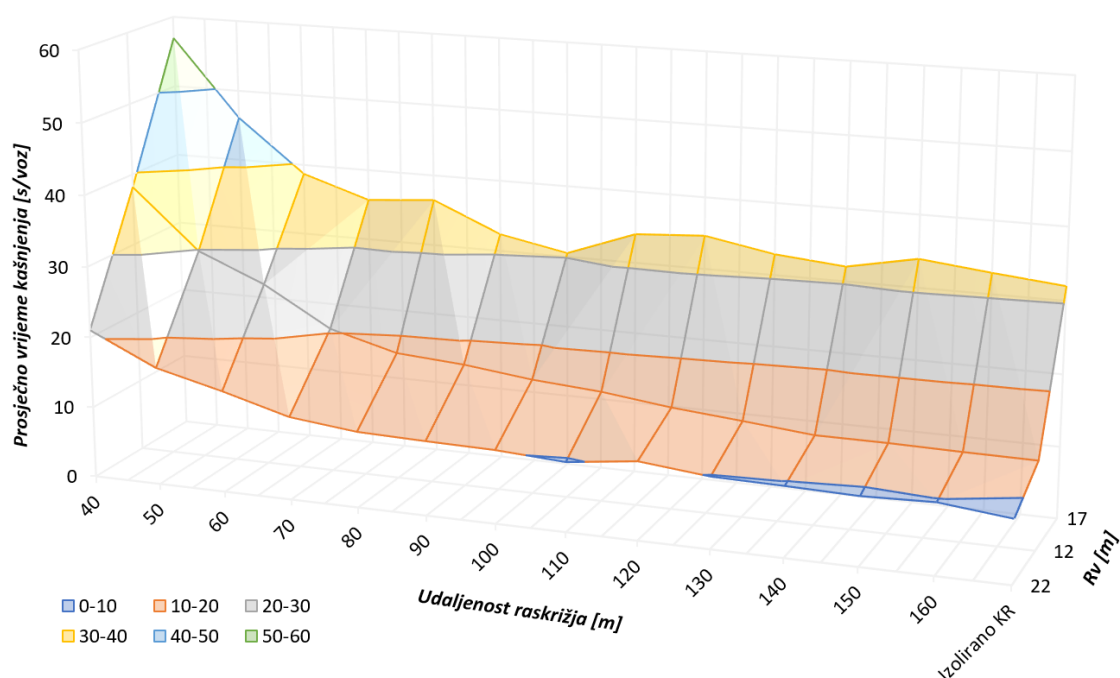
Slika 7.8. (a) Zastoj prometnog toka u scenarijima s vanjskim polumjerom 12 m ; (b) Prosječan postotak vozila koja su prošla kroz prometnu mrežu

Pri vršnom prometnom opterećenju većem od 1600 voz/h, utjecaj vanjskog polumjera kružnog raskrižja značajno dolazi do izražaja. U scenarijima s najmanjim vanjskim polumjerom od 12 m, 30 % vozila nije prošlo kroz prometnu mrežu, dok se kod većih polumjera (17 m i 22 m) taj udio smanjuje na prosječno 9 %.

Porastom vršnog prometnog opterećenja razlika postaje još izraženija. Pri opterećenju od 1800 voz/h, u scenarijima s vanjskim polumjerom od 12 m, 35 % vozila nije uspjelo proći kroz prometnu mrežu. Za vanjski polumjer od 17 m taj se udio smanjuje na 20 %, a kod najvećeg analiziranog polumjera od 22 m na 15 %.

Pri maksimalno analiziranom vršnom prometnom opterećenju od 2000 voz/h, 44 % vozila nije prošlo kroz prometnu mrežu u scenarijima s vanjskim polumjerom od 12 m. Povećanjem polumjera, situacija se poboljšava: za vanjski polumjer od 17 m ovaj se udio smanjuje na 27 %, a za polumjer od 22 m na 22 % vozila koja nisu uspjela proći kroz mrežu.

Na slici 7.9. prikazan je grafički prikaz kombiniranog utjecaja vanjskog polumjera kružnog raskrižja (R_v) i udaljenosti između raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja. Prikazani rezultati odnose se na reprezentativni primjer s vršnim prometnim opterećenjem od 1400 voz/h, udjelom prometa od 60% na glavnom smjeru, i duljinu vremena crvenog svjetla od 17 s.



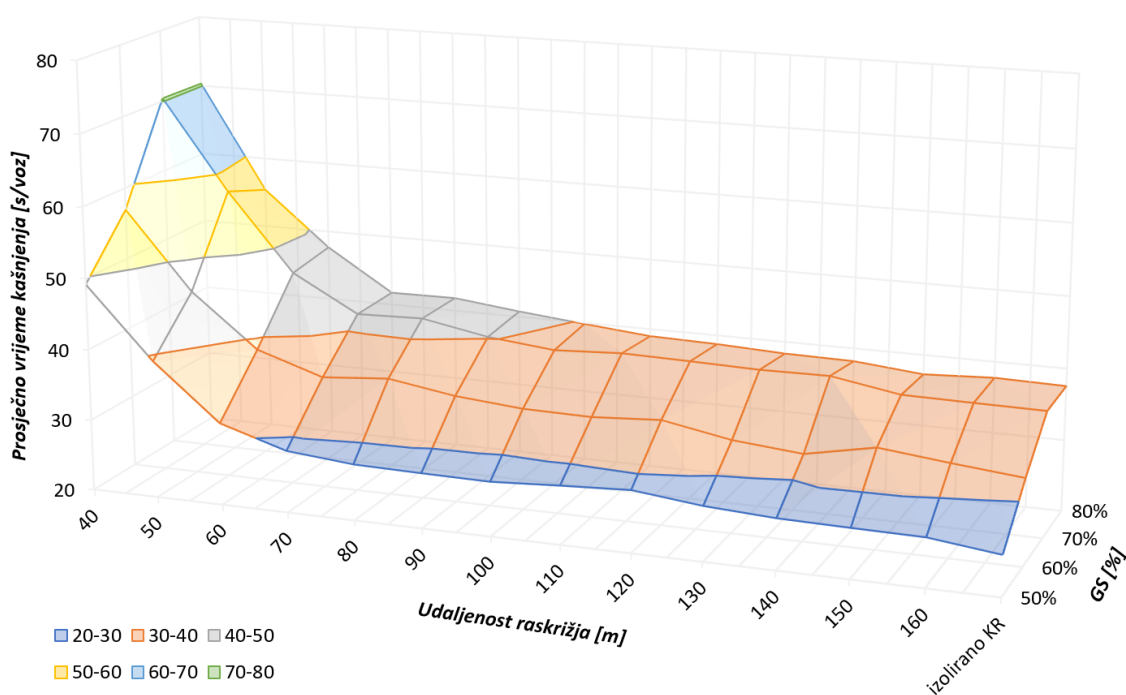
Slika 7.9. Utjecaj vanjskog polumjera (R_v) i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja ($VPO=1400$ voz/h, $GS=60\%$, $cs=17s$)

Udio prometa na glavnom smjeru: Pri manjim prometnim opterećenjima (1000-1200 voz/h) vidljiv je porast prosječnog vremena kašnjenja povećanjem udjela prometa na glavnom smjeru. Prosječno vrijeme kašnjenja u scenarijima s 80% prometa na glavnom smjeru veće je za prosječno 35 % u odnosu na scenarije s 50 % prometa.

Kod srednjeg prometnog opterećenja (1400-1600 voz/h), prosječno vrijeme kašnjenja značajno je veće nego kod malih prometnih opterećenja, u svim scenarijima (4 puta veće u prosjeku). Prosječno vrijeme kašnjenja smanjuje se povećanjem udjela prometa na glavnom smjeru, ali je porast manji – prosječno povećanje 34 %.

Za veće prometno opterećenje (1600-2000 voz/h), trend je suprotan onom kod malog prometnog opterećenja – povećanje udjela prometa na glavnom smjeru dovodi do

smanjenja prosječnog vremena kašnjenja. U scenarijima s 50% prometa na glavnom smjeru, za vršno prometno opterećenje od 2000 voz/h, prosječno vrijeme kašnjenja 32 % je veće od scenarija s istim prometnim uvjetima uz 80 % prometa na glavnom smjeru. Slika 7.10. grafički prikazuje kombinirani utjecaj udjela prometa na glavnom smjeru (GS) i udaljenosti između kružnog i semaforiziranog na prosječno vrijeme kašnjenja vozila. Rezultati su prikazani za reprezentativni primjer s vršnim prometnim opterećenjem od 1400 voz/h, pri čemu udio prometa na glavnom smjeru iznosi 60 %, a vanjski polumjer kružnog raskrižja 17 m.



Slika 7.10. Utjecaj udjela prometa na glavnom smjeru (GS) i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja (VPO=1400 voz/h, $R_v=17$ m, $cs=17$ s)

Povećanje duljine crvenog svjetla uzrokuje porast prosječnog vremena kašnjenja. U sljedećim primjerima prikazan je postotni porast prosječnog vremena kašnjenja za isti vanjski polumjer i udaljenost raskrižja od 40 m, pri povećanju crvenog vremena sa 17 na 22 s:

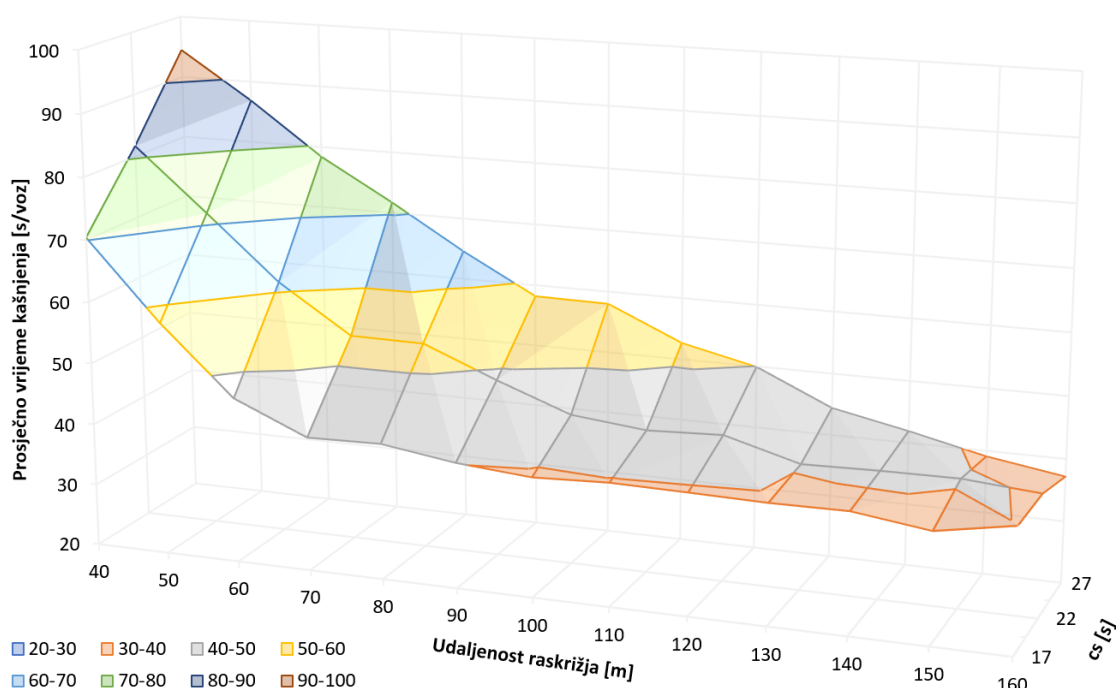
- Vanjski polumjer 12 m - porast za 18 %
- Vanjski polumjer 17 m - porast za 12 %
- Vanjski polumjer 22 m - porast za 16 %

Scenariji izoliranog kružnog raskrižja imaju znatno manja prosječna vremena kašnjenja. Za scenarije s vanjskim polumjerom 12 m, izolirana kružna raskrižja imaju prosječno 60% manje prosječno vrijeme kašnjenja od scenarija s udaljenosti raskrižja od 40 m.

Najveća vremena kašnjenja zabilježena su u scenarijima s udaljenostima raskrižja od 40 m. Porastom udaljenosti između raskrižja (120 m i više), vremena kašnjenja gotovo su

ista scenarijima s izoliranim raskrižjima. Kod udaljenosti raskrižja od 120 m, povećanje crvenog vremena sa 17 s na 22 s povećalo je prosječno vrijeme kašnjenja za manje od 1% u scenarijima 100-1600 voz/h.

Slika 7.11. prikazuje kombinirani utjecaj duljine crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju (cs) i udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja. Prikazani rezultati odnose se na reprezentativne scenarije s vršnim prometnim opterećenjem od 1400 voz/h, udjelom prometa od 60% na glavnom smjeru i vanjskim polumjerom od 17 m.



Slika 7.11. Utjecaj duljine crvenog vremena (cs) i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja (VPO=1400 voz/h, GS=60%, Rv=17m)

7.3.2. Analiza utjecaja ulaznih parametara modela na vrijeme putovanja

Vrijeme putovanja predstavlja ukupno vrijeme potrebno vozilu za prolazak određene dionice prometne mreže, uključujući i vrijeme vožnje i prosječno vrijeme kašnjenja koji se pojavljuju na ruti (Turner i sur., 1998). Kraće vrijeme putovanja izravno ukazuje na bolju protočnost i veću učinkovitost prometnog sustava, jer implicira manje prekida i kašnjenja u kretanju vozila. Stoga se vrijeme putovanja često koristi kao ključni pokazatelj uspješnosti prometnih rješenja, osobito pri analizi i optimizaciji prometnih tokova na razini cjelokupne mreže (NCHF, 2015; Yang, 2007; Sohounou i sur., 2021; Chen i sur., 2025; Samaranayake i sur., 2024).

U nastavku su prikazani zaključci provedenog istraživanja kojim je utvrđen utjecaj pojedinih ulaznih parametara na vrijeme putovanja. Rezultati analize prikazani su

grafičkim 3D prikazima za reprezentativni primjer definiran vršnim prometnim opterećenjem od 1400 voz/h (što čini 7 % dnevnog prometnog opterećenja tijekom vršnog sata), vanjskim polumjerom kružnog raskrižja od 17 m, udjelom prometa na glavnom smjeru od 60 % te duljinom crvenog vremena od 17 s. Analogni prikazi mogu se generirati za sve provedene scenarije.

Vršno prometno opterećenje: Veće vršno prometno opterećenje značajno utječe na povećanje vremena putovanja vozila duž promatrane rute duljine 300 m. U slučaju izoliranog kružnog raskrižja, bez utjecaja semaforiziranog raskrižja, porast prometnog opterećenja rezultira višestrukim povećanjem vremena putovanja. Za malo kružno raskrižje (vanjskog polumjera 12 m), povećanje prometnog opterećenja s 1000 na 2000 voz/h dovodi do prosječnog povećanja vremena putovanja od 190 %. U slučaju srednje velikog izoliranog raskrižja (vanjskog polumjera 17 m), povećanje vremena putovanja iznosi približno 300 %.

Najizraženiji utjecaj na vrijeme putovanja vidljiv je kada se razmatra zajednički učinak prometnog opterećenja i razmaka između kružnog i semaforiziranog raskrižja. Dok su u scenarijima izoliranih raskrižja zabilježena najkraća vremena putovanja pri istim prometnim uvjetima, smanjenjem razmaka između kružnog i semaforiziranog raskrižja dolazi do izrazitog produljenja vremena putovanja. Za razmak od 50 m, povećanje prometa s 1000 na 2000 voz/h rezultira prosječnim povećanjem vremena putovanja od 378 %. Kod većih razmaka između raskrižja (≥ 140 m), ovaj utjecaj i dalje je značajan, iako manje izražen u relativnom smislu. Tako je pri udaljenosti od 140 m porast prometnog opterećenja s 1000 na 2000 voz/h uzrokovao prosječno povećanje vremena putovanja od 320 %.

Manja udaljenost između raskrižja značajno utječe na povećanje vremena putovanja, osobito pri većim prometnim opterećenjima. Pri manjim prometnim opterećenjima (1000–1200 voz/h), smanjenje udaljenosti između raskrižja ima relativno ograničen utjecaj. Kod intenziteta od 1000 voz/h, smanjenje udaljenosti sa 160 m na 40 m rezultiralo je prosječnim povećanjem vremena putovanja od prosječno 5 %.

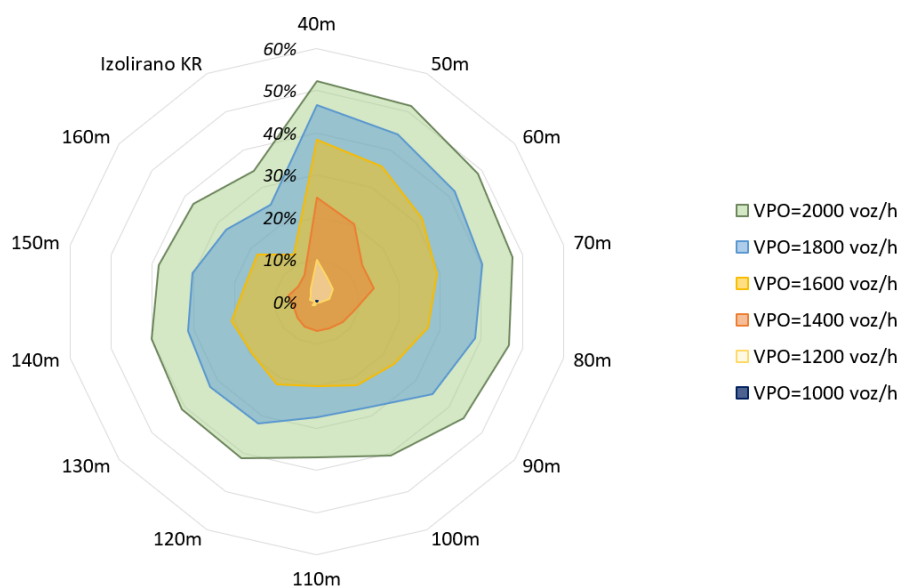
Međutim, kod većim prometnih opterećenja (≥ 1800 voz/h), utjecaj smanjenja udaljenosti između raskrižja postaje izrazito izražen. U scenarijima s vršnim prometnim opterećenjem od 2000 voz/h, smanjenje razmaka između raskrižja sa 160 m na 40 m povećalo je vrijeme putovanja za prosječno 43 %. Također, značajnije smanjenje vremena putovanja zabilježeno je tek kod udaljenosti većih od 140 m između kružnog i semaforiziranog raskrižja.

Posebna je pojava zabilježena pri većim prometnim opterećenjima (≥ 1800 voz/h) za udaljenosti raskrižja od 80 do 100 m, gdje dolazi do povećanja vremena putovanja u usporedbi s manjim udaljenostima (40–50 m), nakon čega slijedi postupno smanjenje vremena putovanja za udaljenosti iznad 110 m. Navedeni trend može se objasniti otežanim uključivanjem vozila u kružni tok i potpunim zastojem prometnog toka – na

udaljenostima manjim od 80 m, prosječno 46 % vozila nije uspjelo proći analiziranom rutom jer se nije uspjelo uključiti u kružni tok. U tim slučajevima, vrijeme putovanja u VISSIM-u se računa samo za vozila koja su prošla prije zastoja, dok vozila koja stoje u redu čekanja za ulazak u kružni tok nisu uključena u analizu, što može rezultirati smanjenim prosječnim vremenom putovanja.

U scenarijima s većim prometnim opterećenjem i većim razmakom između raskrižja (≥ 110 m) znatno je manji postotak vozila koja nisu prošla analiziranom rutom (32 %). Navedeno je detaljnije objašnjeno u nastavku.

Slika 7.12 prikazuje prosječni postotak vozila koja se nisu uspjela proći kroz prometnu mrežu tijekom vršnog sata, u ovisnosti o vršnom prometnom opterećenju (VPO) i udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja. Rezultati predstavljaju prosječne vrijednosti svih analiziranih scenarija.



Slika 7.12. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja (VPO) i udaljenosti kružnog i semaforiziranog raskrižja na postotak vozila koja nisu uspjela proći kroz prometnu mrežu unutar vršnog sata

Pri manjim vršnim prometnim opterećenjima od 1000 do 1200 vozila po satu prometni tok odvija se nesmetano, pri čemu gotovo sva vozila prolaze kroz analiziranu prometnu mrežu. Izuzetak predstavlja scenarij s vršnim opterećenjem od 1200 voz/h pri manjim razmacima između kružnog i semaforiziranog raskrižja (40 i 50 m), gdje se pokazalo da 10 % vozila nije uspjelo ući u kružni tok.

S povećanjem vršnog prometnog opterećenja na 1400 voz/h dolazi do porasta udjela vozila koja nisu uspjela ući u kružni tok. Prosječno 10 % vozila ostaje blokirano, dok u scenarijima s manjim razmakom između raskrižja (40 i 50 m) taj postotak raste na prosječnih 22 %.

Daljnijim povećanjem vršnog prometnog opterećenja na 1600 voz/h značajno raste udio blokiranih vozila. U prosjeku, 24 % vozila ne uspijeva ući u kružni tok, dok kod minimalnih razmaka između raskrižja (40–50 m) taj postotak iznosi 37 %.

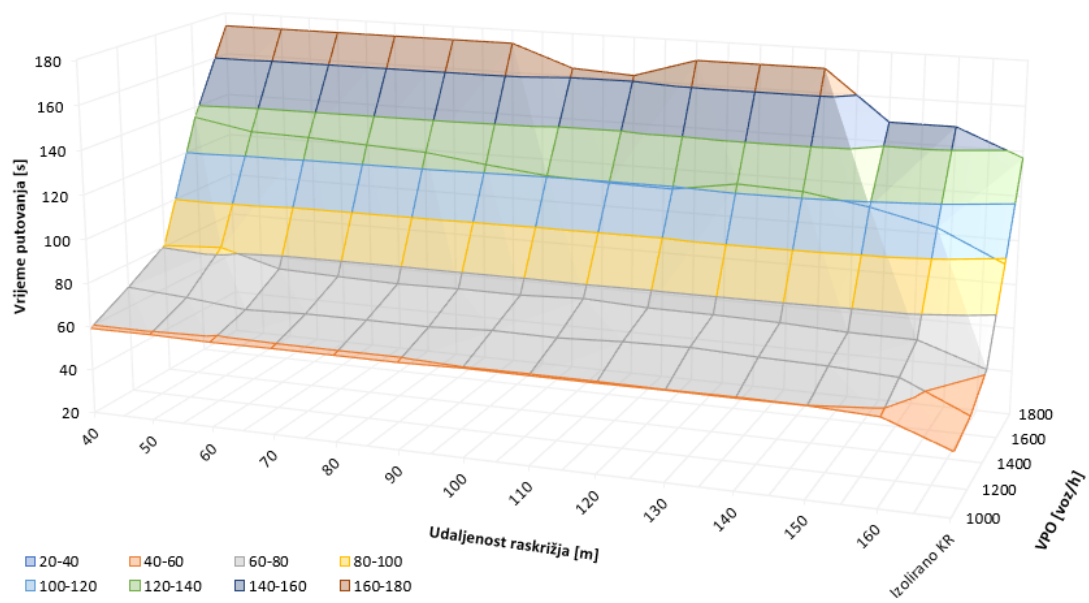
Kod vršnog prometnog opterećenja od 1800 voz/h, u prosjeku 34 % vozila ne prolazi kroz prometnu mrežu, pri čemu se za najmanje razmake između raskrižja (40–50 m) postotak vozila koja ostaju blokirana povećava na 45 %.

Najveće analizirano prometno opterećenje od 2000 voz/h rezultira izrazito nepovoljnim uvjetima u prometnoj mreži. Prosječno 43 % vozila ne uspijeva ući u kružni tok, dok za najmanje razmake između raskrižja (40–50 m) taj postotak doseže 52 %.

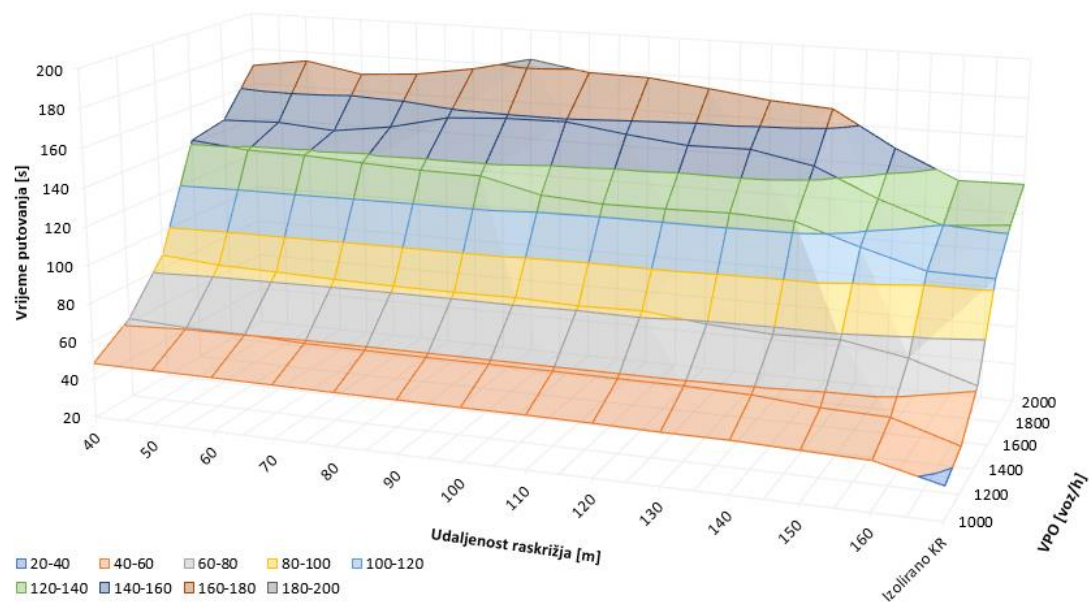
Najkritičniji uvjeti odvijanja prometa ustanovljeni su u scenarijima s najmanjim analiziranim razmacima između kružnog i semaforiziranog raskrižja (40–50 m). U takvim okolnostima prosječno 46 % vozila ostaje blokirano u prometnoj mreži, a dodatno izražen problem javlja se pri minimalnom definiranom vanjskom polumjeru kružnog toka od 12 m. Sve navedeno upućuje da razmak semaforiziranog od kružnog raskrižja značajno utječe na kapacitet kružnog raskrižja koji je u tim uvjetima manji od kapaciteta izoliranog raskrižja u istim prometnim uvjetima.

Na slikama 7.13., 7.14. i 7.15. prikazani su rezultati analize relativnih odnosa između vršnog prometnog opterećenja, udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja te prosječnog vremena putovanja za tri analizirane vrijednosti vanjskog polumjera kružnog raskrižja (12 m, 17 m i 22 m). Rezultati se odnose na reprezentativne scenarije u kojima udio prometa u glavnom smjeru iznosi 60 %, a trajanje crvenog signala na semaforiziranom raskrižju 17 sekundi.

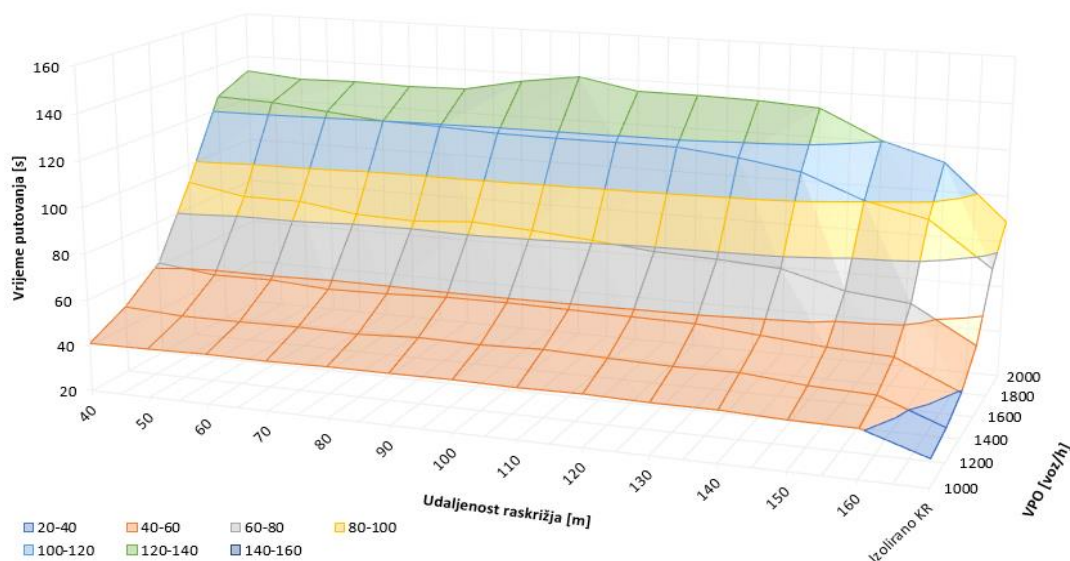
Za scenarije s najmanjim analiziranim polumjerom (12 m) i najvećim vršnim prometnim opterećenjem od 2000 voz/h, rezultati nisu prikazani (Slika 7.13.) jer je pri svim analiziranim udaljenostima između raskrižja došlo do potpunog zasićenja prometnog toka, što je onemogućilo prikupljanje relevantnih podataka.



Slika 7.13. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja i udaljenosti raskrižja na vrijeme putovanja ($R_v=12$ m, $GS=60\%$, $cs=17s$)



Slika 7.14. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja i udaljenosti raskrižja na vrijeme putovanja ($R_v=17$ m, $GS=60\%$, $cs=17s$)



Slika 7.15. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja i udaljenosti raskrižja na vrijeme putovanja ($R_v=22$ m, $GS=60\%$, $cs=17s$)

Vanjski polumjer kružnog raskrižja: Na temelju rezultata uočeno je da povećanje vanjskog polumjera kružnog raskrižja smanjuje vrijeme putovanja vozila. U usporedbi s izoliranim kružnim raskrižjem, prisutnost semaforiziranog raskrižja u svim promatranim scenarijima dovodi, očekivano, do povećanja vremena putovanja.

Kod minimalnog razmaka između raskrižja od 40 metara, najmanji analizirani polumjer kružnog raskrižja (12 m) pri manjem prometnom opterećenju (1000–1200 voz/h) rezultira povećanjem ukupnog vremena putovanja za prosječno 26 % u odnosu na izolirano raskrižje. S porastom prometnog opterećenja postotno povećanje se smanjuje, no apsolutne vrijednosti vremena putovanja ostaju relativno visoke. Za veće primijenjene vanjske polumjere (17 m i 22 m) također je zabilježeno povećanje vremena putovanja, u prosjeku između 20 % i 30 %, ovisno o intenzitetu prometnog opterećenja. Kod većeg razmaka između raskrižja (160 m), porast vremena putovanja u odnosu na izolirano raskrižje nešto je niži u usporedbi s kraćim razmakom od 40 m. Za najmanji promatrani polumjer (12 m) pri manjem prometnom opterećenju, vrijeme putovanja veće je za približno 22 %. Kod najvećeg analiziranog vanjskog polumjera (22 m), povećanje vremena putovanja smanjuje se na raspon od 13 % do 18 % pri različitim prometnim opterećenjima.

U uvjetima manjeg prometnog opterećenja (1000–1200 voz/h), najveći promatrani polumjer (22 m) kod izoliranog kružnog raskrižja ostvaruje oko 5 % kraće vrijeme putovanja u odnosu na najmanji polumjer (12 m). Međutim, u scenarijima koji uključuju semaforizirano raskrižje, ukupno vrijeme putovanja približava se vrijednostima izmjerenima za izolirani slučaj.

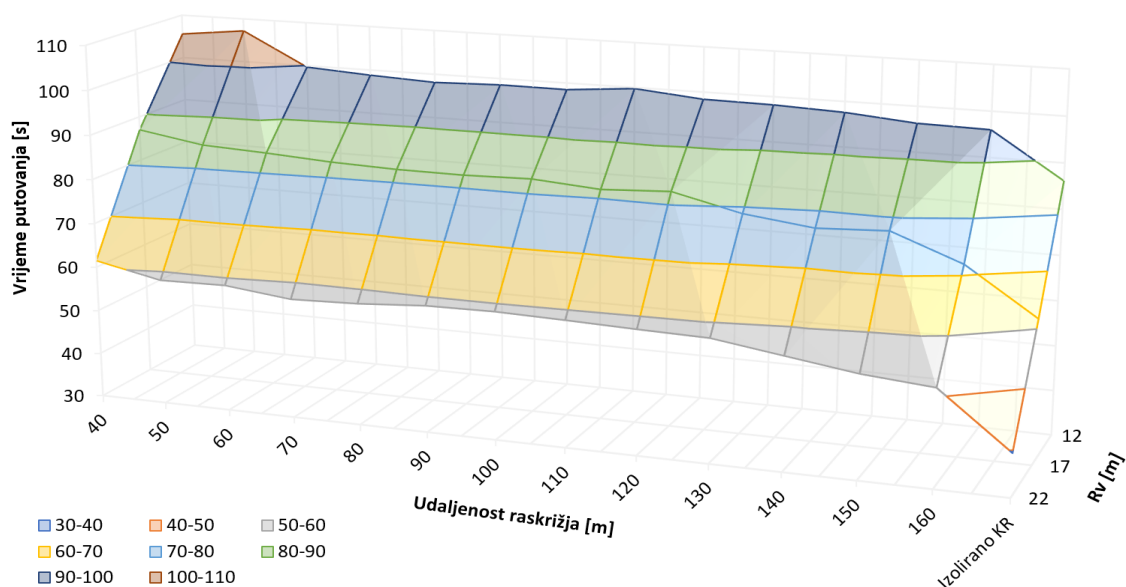
S povećanjem prometnog opterećenja (1400–1600 voz/h) raste i vrijeme putovanja, a razlike uvjetovane veličinom kružnog raskrižja postaju izraženije. U izoliranim

scenarijima, vrijeme putovanja je kod polumjera od 22 m kraće za približno 8 % u odnosu na najmanji polumjer (12 m). Srednji polumjer (17 m) također pokazuje poboljšanje, smanjujući vrijeme putovanja u prosjeku za oko 6 % u odnosu na najmanji polumjer.

Blizina semaforiziranog raskrižja (40 m) dodatno utječe na povećanje vremena putovanja, a razlike između najvećeg (22 m) i najmanjeg (12 m) kružnog raskrižja očituju se smanjenjem vremena putovanja u korist većeg polumjera, u prosjeku za oko 5 %. Kod većeg razmaka između raskrižja od 160 m, vanjski polumjer od 22 m omogućuje smanjenje vremena putovanja od 8 % do 10 % u odnosu na najmanji polumjer, dok srednji polumjer (17 m) također ostvaruje smanjenje vremena, približavajući se rezultatima najvećeg polumjera.

Pri najvećem analiziranom prometnom opterećenju (1800–2000 voz/h), izolirani scenariji s najvećim vanjskim polumjerom (22 m) ostvaruju smanjenje vremena putovanja od 15 % do 20 % u usporedbi s najmanjim polumjerom (12 m). Kod razmaka od 40 m između raskrižja, scenariji s većim polumjerom (22 m) rezultiraju prosječno 15 % kraćim vremenom putovanja u odnosu na najmanji polumjer. Kod razmaka od 160 m, najveći vanjski polumjer omogućuje prosječno smanjenje vremena putovanja od oko 10 % u odnosu na najmanji polumjer.

Slika 7.16. prikazuje kombinirani utjecaj vanjskog polumjera kružnog raskrižja (R_v) i udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja na vrijeme putovanja vozila. Prikazani rezultati odnose se na reprezentativne scenarije s vršnim prometnim opterećenjem od 1400 voz/h, pri čemu glavni smjer obuhvaća 60 % ukupnog prometnog toka, a trajanje crvenog svjetla na semaforiziranom raskrižju iznosi 17 sekundi.



Slika 7.16. Utjecaj vanjskog polumjera (R_v) i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja (VPO=1400 voz/h, GS=60%, cs=17s)

Raspodjela prometa: Podaci pokazuju da povećanje udjela prometa na glavnom smjeru s 50 % na 80 % ima nelinearan utjecaj na vrijeme putovanja, a smjer tog utjecaja ovisi primarno o intenzitetu prometnog opterećenja.

Pri manjem i srednjem prometnom opterećenju (do 1600 voz/h), veći udio prometa na glavnom smjeru produljuje vrijeme putovanja, što je u skladu sa rezultatima istaživanja (Akcelik, 2004). Za izolirano kružno raskrižje s vršnim prometnim opterećenjem od 1600 voz/h, povećanje udjela prometa na glavnom smjeru sa 50 % na 80 % dovodi do produljenja vremena putovanja od 25 %. Za scenarije s dodatnim semaforiziranim raskrižjem, porast vremena putovanja ovisi o udaljenosti između raskrižja: kod razmaka od 160 m vrijeme putovanja prosječno raste za 31 %, dok kod razmaka od 40 m taj porast iznosi prosječno 38 %.

Međutim, kod većeg prometnog opterećenja (≥ 1800 voz/h) javlja se suprotan trend. U scenarijima neravnomjerne raspodjela prometa, vrijeme putovanja je kraće. Povećanje udjela prometa na glavnom smjeru na izoliranom kružnom raskrižju pri intenzitetu od 2000 voz/h rezultira smanjenjem vremena putovanja za 31 %.

Ravnomjerna raspodjela prometa na svim privozima pri većem prometnom opterećenju rezultira povećanjem konfliktnog toka unutar kružnog raskrižja. U scenarijima s ravnomjernom raspodjelom prometa svi privozi su izrazito prometno opterećeni što može dovesti do zasićenja prometnog toka. Smanjenje udjela prometa na sporednom smjeru može omogućiti veće vremenske praznine vozilima s glavnog smjera za uključivanje u kružni tok. Obzirom da je promatrana ruta isključivo na glavnom smjeru, smanjenje prometnog opterećenja na sporednom smjeru može dovesti do lakšeg uključivanja vozila s glavnog smjera što može dovesti do smanjenja vremena putovanja.

U scenarijima s udaljenošću između raskrižja 160 m, porast udjela prometa na glavnom smjeru izaziva prosječno povećanje vremena putovanja od 35 %, dok se kod minimalne udaljenosti od 40 m javlja smanjenje vremena putovanja od prosječno 38 %, kod većih prometnih opterećenja (≥ 1800 voz/h). Navedeni trend prethodno je objašnjen – pri većim prometnim opterećenjima i manjem razmaku između raskrižja značajan broj vozila ne uspije se uključiti u kružni tok i proći definiranom rutom, što može dovesti do pogrešnih rezultata.

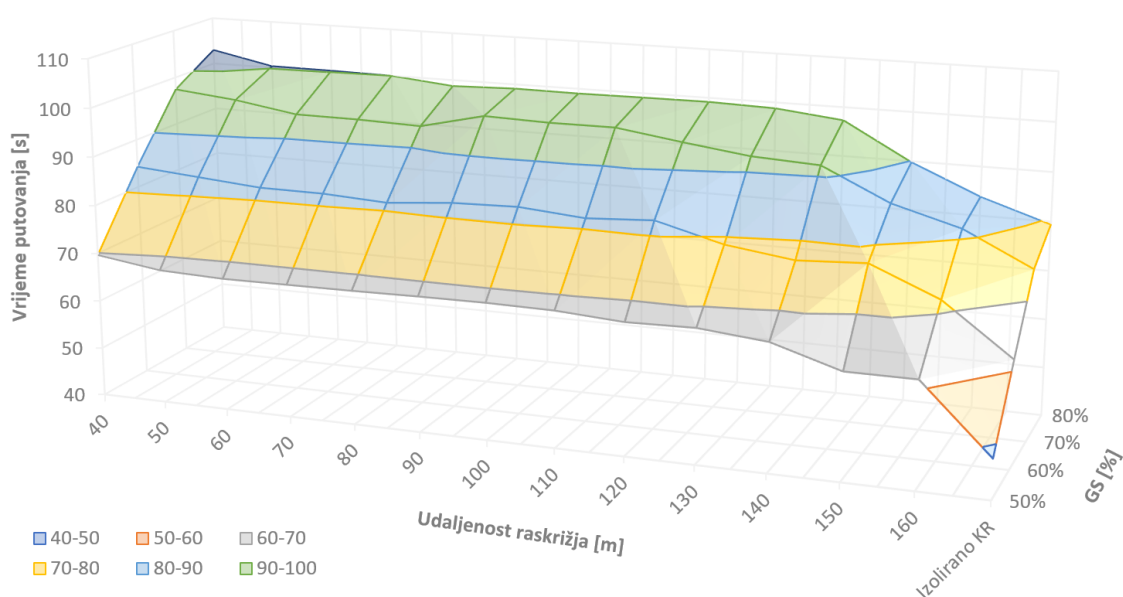
U svim scenarijima s implementiranim semaforiziranim raskrižjem primjetno je dulje vrijeme putovanja u odnosu na izolirana kružna raskrižja, pri istim prometnim uvjetima, pri čemu veličina tog porasta ovisi o međusobnom razmaku raskrižja te intenzitetu i raspodjeli prometnog toka. Pri manjem prometnom opterećenju (1000 voz/h) vrijeme putovanja raste za oko 20 %, bez obzira na udaljenost između raskrižja (40 m ili 160 m). Porastom prometnog opterećenja, utjecaj udaljenosti između raskrižja na vrijeme putovanja postaje izraženiji. Pri usvojenom srednjem prometnom opterećenju i uravnoteženoj raspodjeli prometa (50 %), scenariji s malom udaljenošću raskrižja (40 m)

imaju 61 % veće vrijeme putovanja u usporedbi s izoliranim kružnim raskrižjem. Kod veće udaljenosti (160 m) povećanje vremena putovanja znatno je manje – prosječno 20 %.

U uvjetima većeg prometnog opterećenja (2000 voz/h) i uravnoteženog prometa (50 %), scenariji s udaljenošću raskrižja od 40 m pokazuju 38 % dulje vrijeme putovanja u odnosu na izolirano kružno raskrižje, dok pri udaljenosti od 160 m povećanje iznosi prosječno 22 % u odnosu na scenarij s izoliranim kružnim raskrižjem.

Kod većeg prometnog opterećenja (2000 voz/h) i povećanog udjela prometa na glavnom smjeru (80 %), relativne razlike u vremenima putovanja su manje izražene. Pri najmanjoj udaljenosti između raskrižja (40 m), vrijeme putovanja je u prosjeku za 32 % veće nego kod izoliranog raskrižja, dok je kod veće udaljenosti (160 m) vrijeme putovanja prosječno 18 % u odnosu na izolirani scenarij.

Slika 7.17. prikazuje kombinirani utjecaj udjela prometa na glavnom smjeru (GS) i udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja na vrijeme putovanja. Rezultati se odnose na reprezentativne scenarije definirane vršnim prometnim opterećenjem od 1400 voz/h, trajanjem crvenog vremena od 17 s te vanjskim polumjerom kružnog raskrižja od 17 m.



Slika 7.17. Utjecaj udjela prometa na glavnom smjeru (GS) i udaljenosti raskrižja na vrijeme putovanja (VPO=1400 voz/h, $cs=17s$, $Rv=17m$)

Duljina trajanja crvenog vremena: Rezultati očekivano pokazuju da je najkraće vrijeme putovanja ostvareno kada je kružno raskrižje izolirano, bez utjecaja semaforiziranog raskrižja, u svim scenarijima.

Produženje trajanja crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju znatno povećava ukupno vrijeme putovanja vozila. U simulacijama se razmatra nekoliko duljina crvenog

vremena (17 s, 22 s i 27 s), i zabilježen je jasan trend: što je crveno svjetlo duže, to je vrijeme putovanja između ova dva raskrižja duže.

Kod kraćeg crvenog vremena (17 s), vrijeme putovanja poraslo je za prosječno 25–35% u odnosu na scenarij izoliranog raskrižja.

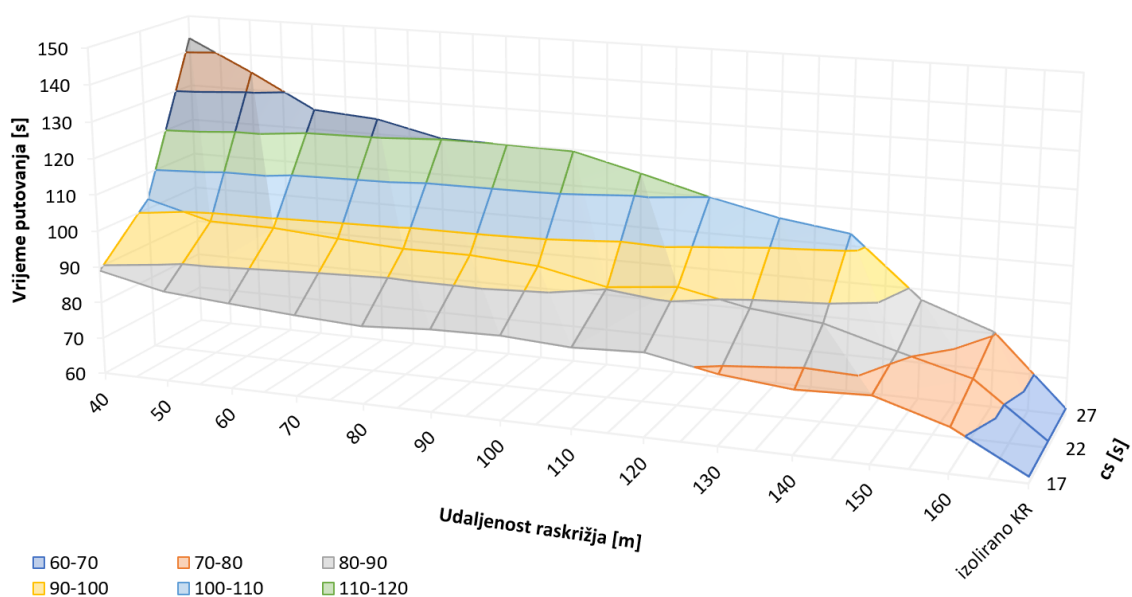
Za dulje trajanje crvenog vremena (22 s), povećanje vremena putovanja se kreće oko 35–45% u odnosu na scenarij izoliranog raskrižja, a u nepovoljnijim kombinacijama scenarijima doseže i do 50%.

Najduže crveno vrijeme (27 s) rezultira najvećim povećanjem vremena putovanja – ukupno vrijeme putovanja bilo je približno 45–60% dulje od scenarija izoliranih raskrižja.

Kombinirani učinak duljine trajanja crvenog vremena i razmaka raskrižja pokazuje da se negativni utjecaji mogu zbrajati. Prema rezultatima provedenih mikrosimulacija, najnepovoljnija situacija javlja se pri kombinaciji duljeg trajanja crvenog vremena i manjeg razmaka između raskrižja (27 s i 40 m), pri čemu se vrijeme putovanja produljuje za više od 60 % u odnosu na izolirani scenarij. Dulje trajanje crvenog vremena generira dulju kolonu čekanja, a u slučaju nedostatnog razmaka između raskrižja to može dovesti do prelijevanja kolone vozila (eng. *queue spillback*) te posljedično do blokiranja kružnog toka unutar kružnog raskrižja. Istodobno, dulje trajanje crvenog vremena uzrokuje grupiranje vozila (eng. *platoon*) koja potom istodobno pristižu na privoz kružnog raskrižja što može nepovoljno utjecati na protočnost ulaza u raskrižje.

Scenariji s kraćim crvenim vremenom i velikim razmakom između raskrižja približavaju se vrijednostima scenarija izoliranih raskrižja, u istim prometnim uvjetima. Maksimalni ispitani razmak od 160 m, uz najkraću duljinu ispitanog crvenog vremena nije se u potpunosti približio rezultatima scenarija izoliranih raskrižja, ali je vrijeme putovanja bitno smanjeno.

Slika 7.18. prikazuje kombinirani utjecaj duljine crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju (cs) i udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja na vrijeme putovanja. Prikazani rezultati odnose se na reprezentativne scenarije s vršnim prometnim opterećenjem od 1400 voz/h, udjelom prometa od 60% na glavnom smjeru i vanjskim polumjerom kružnog raskrižja od 17 m.



Slika 7.18. Utjecaj duljine crvenog vremena (cs) i udaljenosti raskrižja na vrijeme putovanja (VPO=1400 voz/h, GS=60%, Rv=17m)

Provedenom analizom baze podataka dobivene prometnim mikrosimulacijama različitih scenarija istražen je utjecaj ulaznih parametara modela na odabrane prometne pokazatelje – prosječno vrijeme kašnjenja i vrijeme putovanja. Pearsonovom korelacijom utvrđena je izrazito snažna pozitivna korelacija između vremena putovanja i drugih prometnih pokazatelja (vrijednosti koeficijenta korelacije između 0,78 i 0,92), što implicira proporcionalne promjene ostalih pokazatelja uslijed povećanja vremena putovanja i prosječnog vremena kašnjenja.

Analiza utjecaja ulaznih parametara na prosječno vrijeme kašnjenja pokazala je da povećanje razmaka između kružnog i semaforiziranog raskrižja značajno smanjuje prosječno vrijeme kašnjenja vozila. Pri povećanju udaljenosti raskrižja sa 40 m na 120 m, vrijeme kašnjenja smanjuje se za do 40 %, dok dodatni porast udaljenosti na 160 m dovodi do ukupnog smanjenja kašnjenja od 50 do 61 %, ovisno o intenzitetu prometnog opterećenja (1000–2000 voz/h). Izolirana kružna raskrižja pritom ostvaruju prosječno 70 % manja kašnjenja u odnosu na scenarije s najmanjim razmakom raskrižja (40 m). Nadalje, veličina vanjskog polumjera kružnog raskrižja pokazala se nelinearnom s obzirom na utjecaj na kašnjenje: najmanji analizirani polumjer (12 m) rezultirao je najmanjim kašnjenjima u odnosu na veće polumjere (17 m i 22 m), pri čemu je kašnjenje u scenarijima s polumjerom 17 m prosječno 40–65 % veće nego kod najmanjeg polumjera (12 m). Pri najvećem prometnom opterećenju (2000 voz/h) mali polumjer (12 m) značajno povećava rizik zasićenja prometnog toka, s oko 44 % vozila koja nisu uspjela proći kroz mrežu.

Analiza vremena putovanja vozila potvrdila je da veće vršno prometno opterećenje značajno produljuje ukupno vrijeme putovanja duž promatrane dionice od 300 m. U

scenarijima s najkraćim razmacima između raskrižja (40 m), povećanje prometnog opterećenja s 1000 na 2000 voz/h povećava vrijeme putovanja u prosjeku za 378 %, dok kod većih razmaka (≥ 140 m) taj porast iznosi prosječno oko 320 %. Kod najvišeg analiziranog prometnog opterećenja (≥ 1800 voz/h) smanjenje udaljenosti između raskrižja značajno povećava vrijeme putovanja – smanjenje razmaka sa 160 m na 40 m rezultira povećanjem vremena putovanja do 43 %.

Rezultati pokazuju da povećanje vanjskog polumjera kružnog raskrižja skraćuje vrijeme putovanja vozila, osobito u uvjetima većeg prometnog opterećenja. U usporedbi s izoliranim kružnim raskrižjem, prisutnost semaforiziranog raskrižja u svim scenarijima povećava ukupno vrijeme putovanja. Najveći negativni utjecaj semaforiziranog raskrižja uočen je kod najmanjeg razmaka od 40 m, gdje najmanji analizirani polumjer (12 m) rezultira povećanjem vremena putovanja od približno 26 % pri manjem prometnom opterećenju, dok se kod većih polumjera (17 m i 22 m) povećanje kreće između 20 % i 30 %. Kod većeg razmaka (160 m) povećanje vremena putovanja je manje izraženo (13–22 %), a utjecaj polumjera kružnog raskrižja postaje značajniji s rastom prometnog opterećenja. Najveći analizirani polumjer (22 m) u izoliranim uvjetima omogućava 5–8 % kraće vrijeme putovanja u odnosu na najmanji polumjer (12 m). Kod srednjeg polumjera (17 m) zabilježeno je smanjenje vremena putovanja za približno 6 % u usporedbi s najmanjim polumjerom.

Utjecaj raspodjele prometnog toka je nelinearan. Pri manjem prometnom opterećenju (≤ 1600 voz/h) povećanje udjela prometa na glavnom smjeru (s 50 % na 80 %) povećava vrijeme putovanja za oko 25–38 %, dok se kod većih prometnih opterećenja (≥ 1800 voz/h) javlja suprotan učinak, pri čemu povećanje udjela glavnog smjera smanjuje vrijeme putovanja za prosječno 31 %. To može biti posljedica smanjenja konfliktnog toka i omogućavanja većih praznina za ulazak vozila s glavnog smjera u kružni tok.

Produljenje crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju ima izrazito negativan utjecaj na prometne pokazatelje, osobito na vrijeme putovanja. Produženje crvenog vremena sa 17 s na 27 s povećava vrijeme putovanja između 45 % i 60 %, s najizraženijim povećanjem u scenarijima s manjim udaljenostima između raskrižja (40 m). Pri udaljenosti raskrižja od 120 m i više, utjecaj produljenja crvenog vremena postaje minimalan.

Zbog složenosti pouzdane validacije prosječnog vremena kašnjenja u stvarnim prometnim uvjetima, za daljnji razvoj regresijskog modela odabran je pokazatelj vremena putovanja, koji će biti prikazan u nastavku doktorskog rada.

7.4. Matematički pristup i formulacija

U okviru analize provedena je višestruka linearna regresija s ciljem određivanja utjecaja odabranih nezavisnih varijabli na zavisnu varijablu – vrijeme putovanja od kružnog do semaforiziranog raskrižja na dionici od 300 metara (izraženo u sekundama), temeljeno na rezultatima prometnih mikrosimulacija.

Analiziran je utjecaj pet ulaznih parametara modela:

- Prometno opterećenje u vršnom satu (voz/h)
- Udio prometa na glavnom smjeru (/)
- Udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja (m)
- Vanjski polumjer kružnog raskrižja (m)
- Trajanje crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju (s)

Metodologija statističke obrade podataka istovjetna je provedenoj preliminarnim istraživanjem (Poglavlje 6) i sastoji se od dva koraka:

- (1) Pearsonov test korelacije primijenjen je za ispitivanje međuodnosa ulaznih parametara modela
- (2) Razvijen je višestruki linearni regresijski model metodom postupnog odabira, s ciljem izdvajanja i kvantifikacije utjecaja statistički značajnih prediktora

U nastavku su prikazani dobiveni rezultati tih analiza te njihova interpretacija.

Prvi korak uključivao je analizu korelacije među varijablama kako bi se uspostavili hijerarhijski odnosi među ulaznim parametrima modela i mogući problemi multikolinearnosti (Tablica 7.3). Podebljano je istaknut Pearsonov koeficijent korelacije vremena putovanja s ulaznim parametrima modela.

Tablica 7.3. Korelacijska matrica modela

	Vršno prometno opterećenje je	Postotak prometa na glavnom smjeru	Duljina crvenog vremena	Vanjski polumjer	Udaljenost raskrižja	Vrijeme putovanja
Vršno prometno opterećenje [voz/h]	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,762
Postotak prometa na glavnom smjeru [%]	0,000	1	0,000	0,000	0,000	0,072
Duljina crvenog vremena [s]	0,000	0,000	1	0,000	-0,627	0,291
Vanjski polumjer [m]	0,000	0,000	0,000	1	0,000	-0,294
Udaljenost raskrižja [m]	0,000	0,000	-0,627	0,000	1	-0,121
Vrijeme putovanja [s]	0,762	0,072	0,291	-0,294	-0,121	1

Analiza pokazuje da prometno opterećenje u vršnom satu ima snažnu pozitivnu korelaciju s vremenom putovanja (0,762), što je u skladu s preliminarnim rezultatima (Poglavlje 6).

Visoka korelacija sugerira da veće prometno opterećenje značajno produljuje vrijeme putovanja. Vanjski polumjer kružnog raskrižja pokazuje umjerenu negativnu korelaciju s vremenom putovanja (-0,294) - veći vanjski polumjer povezan je s kraćim vremenom putovanja. Trajanje crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju pozitivno korelira s vremenom putovanja (0,291). Udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja pokazuje negativnu korelaciju (-0,121), što sugerira da manji razmak između raskrižja može dovesti do duljeg vremena putovanja zbog međusobnog utjecaja raskrižja. Udio prometa na glavnom smjeru pokazuje slabu pozitivnu korelaciju s vremenom putovanja (0,072). Iako relativno slab, ovaj odnos sugerira da scenariji u kojima glavni smjer nosi veći udio ukupnog prometnog opterećenja mogu imati dulje vrijeme putovanja.

Postupkom linearne regresije primjenom metode postupnog odabira varijabli algoritam je postupno uključivao prediktorske varijable u model na temelju njihovog doprinosa objašnjenju varijance vremena putovanja. Analizirano je ukupno pet regresijskih modela različitih razina složenosti. U tablici 7.4 prikazani su pokazatelji njihove preciznosti i složenosti: srednja kvadratna pogreška (MSE), koeficijent determinacije (R^2), prilagođeni koeficijent determinacije, Mallowsov C_p te Akaikeov informacijski kriterij (AIC).

Mallowsov C_p je statistička mjera koja se koristi za procjenu kvalitete regresijskih modela, odnosno za postizanje optimalne ravnoteže između preciznosti i složenosti modela. Izračunava se usporedbom rezidualne pogreške modela koji koristi odabrani podskup prediktorskih varijabli s pogreškom potpunog modela koji uključuje sve dostupne varijable. Dobro definiran model ima vrijednost C_p približno jednaku ukupnom broju parametara modela (zbroj nezavisnih varijabli i konstante) (Montgomery i sur., 2012).

Akaikeov informacijski kriterij (AIC) statistička je mjera za usporedbu različitih regresijskih modela kako bi se odabrao optimalni model za opisivanje skupa podataka. AIC vrednuje relativnu kvalitetu modela razmatrajući preciznost prilagodbe podacima i složenost modela (broj parametara). Svaka dodatna varijabla povećava složenost modela, ali može smanjiti vrijednost AIC-a samo ako značajno doprinosi poboljšanju njegove preciznosti. Manja vrijednost AIC-a ukazuje na bolji model (Burnham i Anderson, 2002).

Tablica 7.4. Odabir varijabli modela

Br. var	Varijable	MSE	R^2	Prilagođeni R^2	Mallows C_p	Akaike AIC
1	Vršno prometno opterećenje	1661,14	0,58	0,58	2218,12	21357,95
2	Vršno prometno opterećenje/ vanjski polumjer	1320,23	0,66	0,66	1173,25	20697,41

Br. var	Varijable	MSE	R^2	Prilagođeni R^2	Mallows Cp	Akaike AIC
3	Vršno prometno opterećenje/ vanjski polumjer/ duljina crvenog vremena	983,98	0,75	0,75	143,40	19851,82
4	Vršno prometno opterećenje/ vanjski polumjer/ duljina crvenog vremena/ udaljenost	959,00	0,75	0,75	67,83	19778,76
5	Vršno prometno opterećenje/ vanjski polumjer/ duljina crvenog vremena/ udaljenost/ postotak prometa na glavnom smjeru	938,49	0,76	0,76	6,00	19717,49

Model s pet varijabli (konačni model) pokazuje najnižu srednju kvadratnu grešku (MSE=938,49) i najviši koeficijent determinacije ($R^2=0,76$). Mallowsov statistički kriterij za ovaj model iznosi 6 i jednak je broju parametara u modelu (5 nezavisnih varijabli i konstanta), što ukazuje na dobru ravnotežu između prilagodbe i jednostavnosti modela. Također, Akaikeov informacijski kriterij (AIC=19717,49) najniži je za konačni model, potvrđujući da je model s pet varijabli optimalan. Nakon provedene analize, sve razmatrane varijable uključene su u model.

Kako bi se dodatno procijenila točnost i prediktivna sposobnost regresijskog modela, korištena je parcijalna validacija metodom izdvajanja testnog skupa (eng. *hold-out method*). Cjeloviti skup podataka nasumično je podijeljen na skup za učenje (2400 scenarija) i validacijski skup (480 scenarija). Na skupu za učenje provedeno je treniranje modela, dok se validacijski skup koristio za procjenu konačne sposobnosti modela na neviđenim podacima. Ovakva metoda osigurava realniju procjenu pogreške na budućim podacima i smanjuje rizik od prekomjerno prilagođenim modelom podacima skupa za treniranje modela.

Pokazatelji prilagodbe konačnog regresijskog modela prikazani su u tablici 7.5.

Tablica 7.5. Statistika prilagodbe regresijskog modela

	Skup za učenje	Validacijski skup
Broj scenarija	2440	480
Zbroj težina	2440	480
Stupnjevi slobode (DF)	2394	474
R^2	0,763	0,768
Prilagođeni R^2	0,763	0,764
MSE	938,490	800,551
RMSE	30,635	28,683
MAPE	21,058	20,683

Koeficijent determinacije konačnog modela iznosi 0,763, što znači da model objašnjava 76,3% varijabilnosti u zavisnoj varijabli (vremenu putovanja). Ova visoka vrijednost R^2 pokazuje da linearna kombinacija od pet odabranih prediktora vrlo dobro opisuje

ponašanje vremena putovanja u simuliranim uvjetima. Preostali dio varijabilnosti (23,7%) može se pripisati drugim čimbenicima koji nisu obuhvaćeni modelom ili stohastičnosti prometnog sustava (varijacije ponašanja vozača, utjecaj manje značajnih faktora itd.).

U tablici 7.6. prikazan je rezultat analize varijance (ANOVA). ANOVA je statistički test kojim se utvrđuje postoje li značajne razlike u srednjem vremenu putovanja pod različitim razinama ispitanih skupina. Koristi se kada se uspoređuju tri ili više skupina – u ovom slučaju različite kombinacije vršnog prometnog opterećenja, vanjskog polumjera, duljine crvenog vremena i udaljenosti raskrižja (Papić, 2021). Njome se može utvrditi razlikuju li se aritmetičke sredine tih skupina na statistički značajan način. Nul-hipoteza ANOVA testa je da nema razlike u srednjim vremenima putovanja između različitih uvjeta, a alternativna je da barem jedna odstupa. ANOVA ispituje tu hipotezu uspoređujući varijabilitet različitih grupa s varijabilitetom unutar grupa. ANOVA generira *F*-statistiku (*F*-vrijednost) i pripadnu *p*-vrijednost. Na temelju njih procjenjuje je li uočena razlika u ishodu (vremenu putovanja) vjerojatno stvarna ili bi mogla nastati slučajno.

F-vrijednost računa se kao omjer srednjeg kvadrata modela i srednjeg kvadrata pogreške. Što je *F*-vrijednost veća, to je vjerojatnije da je opaženi utjecaj varijabli stvaran, a ne da je posljedica slučajne varijacije.

Tablica 7.6. Analiza varijance

Izbor varijacije	Stupnjevi slobode (DF)	Suma kvadrata	Srednji kvadrat	F-vrijednost	Pr > F
Model	5,000	7486737,600	1497347,520	1545,043	<0,0001
Pogreška	2394,000	2320096,736	969,130		
Ukupno (korig.)	2399,000	9806834,336			

F-test ANOVA za cijeli model pokazao je vrijednost $F = 1854,233$ s $p < 0,0001$, što potvrđuje da je model u cjelini statistički značajan, odnosno da postoji mala vjerojatnosti (manja od 0,01%) da je visoka razina prediktivnosti vremena putovanja slučajna. Standardna pogreška procjene (RMSE) iznosi 30,635 sekundi. U kontekstu prosječnog vremena putovanja (114 sekundi prema deskriptivnim statistikama), ova pogreška je umjerena. Kada se razmotri MAPE = 21,058, vidljivo je da je prosječna apsolutna pogreška oko 21% u odnosu na stvarne vrijednosti.

U istraživanjima se najčešće kao mjerilo pogreške modela koristi srednja apsolutna postotna pogreška (MAPE). U području opće prognostike (npr. predviđanja prometa ili potražnje), često se koristi skala koju je predložio Lewis (1982.) za interpretaciju MAPE vrijednosti < 10% – vrlo točno predviđanje (visoka preciznost), 10–20% – dobro predviđanje (prihvatljiva točnost), 21–50% – umjereno točno predviđanje, 50% – neprecizno predviđanje (neprihvatljivo visoka pogreška).

U prometnim istraživanjima koja se bave analizom vremena putovanja, kao prihvatljiv kriterij točnosti predikcije najčešće se navodi prag relativne pogreške od 20 %. Toppen i Wunderlich (2003) preporučuju raspon pogreške od 13 % do 21 % za primjenu modela vremena putovanja u naprednim sustavima informiranja putnika.

Dobivene metrike pokazuju da model generalizira dobro: vrijednosti R^2 , RMSE i MAPE na validacijskom skupu vrlo su slične (i bolje) od onih na trening skupu. Na validacijskom skupu model objašnjava 76% varijance vremena putovanja, s prosječnom pogreškom od 28,683 sekundi i relativnom pogreškom od 20,683%. Ovako usklađeni rezultati u skupu za učenje i validaciju pokazuju da je model stabilan i da dobro predviđa nepoznate podatke, bez vidljivog prekomjernog prilagođavanja.

U tablici 7.7. prikazani su procijenjeni parametri regresijskog modela: vrijednost koeficijenata uz svaki prediktor, njihove standardne pogreške, t -statistika te p -vrijednosti.

Tablica 7.7. Rezultati višestruke linearne regresije za predviđanje vremena putovanja

Izvor	Vrijednost	Standardna pogreška	t	p -vrijednost
Presjek	-89,215	5,896	-15,130	<0,0001
Vršno prometno opterećenje	0,140	0,002	83,971	<0,0001
Postotak prometa na glavnom smjeru	-40,792	5,106	-7,989	<0,0001
Duljina crvenog vremena	4,227	0,138	30,543	<0,0001
Vanjski polumjer	-4,524	0,140	-32,355	<0,0001
Udaljenost raskrižja	0,044	0,005	-8,809	<0,0001

Na temelju provedene statističke analize, definiran je model predikcije vremena putovanja, izražen jednadžbom (23):

$$VP = -89,215 + 0,140 \cdot VPO - 40,792 \cdot GS + 4,227 \cdot CS - 4,524 \cdot R_V - 0,044 \cdot D \quad (23)$$

gdje su:

- VP (s) – vrijeme putovanja potrebno da vozilo prijeđe dionicu od 300 m od kružnog do semaforiziranog raskrižja
- VPO (voz/h) – vršno prometno opterećenje, u rasponu od 1000 – 2000 voz/h
- GS (/) – udio vozila na glavnom smjeru izražen kao decimalni broj, u rasponu 0,5-0,7
- CS (s) – duljina crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju, u rasponu 17–27 s
- R_V (m) – vanjski polumjer kružnog raskrižja, u rasponu 12 – 22 m
- D (m) – udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja, u rasponu 40 do 160 m

Model osigurava pouzdane rezultate unutar definiranih raspona ulaznih parametara, dok za primjenu izvan navedenih granica valjanost rezultata treba dodatno provjeriti.

U istraživanju su razvijeni i detaljno analizirani prometni mikrosimulacijski modeli jednotračnih kružnih raskrižja različitih odabranih veličina (vanjskih polumjera od 12 m, 17 m i 22 m). Provedena analiza, bazirana na višestrukoj linearnoj regresiji, pokazala je da vršno prometno opterećenje ima najznačajniji pozitivan utjecaj na vrijeme putovanja, dok povećanje vanjskog polumjera kružnog raskrižja značajno smanjuje to vrijeme. Dulje trajanje crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju dovodi do produljenja vremena putovanja, dok smanjenje udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja također negativno utječe na vrijeme putovanja.

Konačni regresijski model predikcije vremena putovanja pokazao je visoku prediktivnu sposobnost (R^2 od 76,3 %), stabilnost rezultata te umjerenu apsolutnu pogrešku (21,058 %). Rezultati pokazuju da razvijeni model učinkovito opisuje utjecaj ključnih prometnih i projektnih parametara na vrijeme putovanja između kružnog i semaforiziranog raskrižja.

7.5. Rezime - Razvoj modela za predikciju vremena putovanja

U ovom poglavlju prikazan je cjelovit postupak razvoja regresijskog modela za kvantifikaciju utjecaja ključnih prometnih i projektnih parametara na vrijeme putovanja između kružnog i semaforiziranog raskrižja na temelju rezultata dobivenih prometnim mikrosimulacijama.

Rezultati pokazuju izražen utjecaj vršnog prometnog opterećenja, udaljenosti između raskrižja, vanjskog polumjera kružnog raskrižja, udjela prometa na glavnom smjeru i trajanja crvenog svjetla na susjednom semaforiziranom raskrižju na dva ključna prometna pokazatelja: prosječno vrijeme kašnjenja i ukupno vrijeme putovanja vozila.

Posebno je istaknuta kritičnost kraćih udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja, osobito u uvjetima velikog prometnog opterećenja, gdje značajno dolazi do izražaja negativan međusobni utjecaj ova dva raskrižja. Istodobno, rezultati su pokazali da veći vanjski polumjer kružnog raskrižja pozitivno utječe na smanjenje vremena putovanja i povećanje ukupne protočnosti cestovnog koridora, posebno pri visokim intenzitetima prometa.

Provedena regresijska analiza rezultirala je višestrukim linearnim modelom koji pokazao visoku prediktivnu sposobnost, objašnjavajući 76,3 % varijabilnosti vremena putovanja. Validacija na nezavisnom skupu podataka potvrdila je stabilnost i preciznost modela, uz prihvatljivu prosječnu apsolutnu pogrešku od 21,058%.

Sljedeći korak istraživanja odnosi se na validaciju razvijenog modela temeljem u realnih prometnim uvjetima na odabranim segmentima prometne mreže u gradovima Osijeku i Poreču.

8. VALIDACIJA MODELA TEMELJEM MJERENJA NA STVARNOJ CESTOVNOJ MREŽI

Cilj ovog poglavlja je prezentirati postupak validacije regresijskog modela za predikciju vremena putovanja. Kako bi se utvrdila pouzdanost i primjenjivost modela u stvarnim prometnim uvjetima, provedena su eksperimentalna istraživanja na ciljano odabranim lokacijama u gradovima Osijeku i Poreču. Ti su gradovi odabrani zbog specifičnih obilježja urbane sredine i prometnog sustava unutar kojeg su istražene lokacije na kojima su kružna raskrižja implementirana u blizini semaforiziranih raskrižja, što je omogućilo analizu različitih uvjeta interakcije između kružnih i semaforiziranih raskrižja. Podaci o vremenu putovanja unutar stvarne cestovne mreže korišteni su za provjeru valjanosti razvijenog modela.

8.1. Eksperimentalna istraživanja

Eksperimentalna istraživanja provedena su s ciljem validacije razvijenog regresijskog modela za predikciju vremena putovanja između kružnog i semaforiziranog raskrižja, prikazanog u Poglavlju 7. Prikupljeni podaci su služili kao relevantna baza podataka za kalibraciju mikrosimulacijskih modela stvarnih prometnih mreža (detaljnije u Poglavlju 9).

Odabrane su lokacije na kojima su kružno i semaforizirano raskrižje smješteni na način da postoji međuočutjecaj na odvijanje prometa.

Odabrane lokacije nalaze se u dva grada – Osijek i Poreč i uključuju ukupno četiri kružna raskrižja smještena u blizini semaforiziranih raskrižja.

Lokacija u Gradu Osijeku poslužila je za validaciju regresijskog modela na kružnom raskrižju smještenom na prometnom koridoru između dva semaforizirana raskrižja, na kojem prevladava lokalni promet (Slika 8.1.)

U Gradu Poreču (Slika 8.4.) su za validaciju modela odabrana tri kružna raskrižja unutar segmenta prometne mreže između semaforiziranih raskrižja. Budući da je Poreč turistički grad, značajan udio prometa na ovim raskrižjima čine turisti, što pridonosi raznolikosti ponašanja vozača. Sve odabrane lokacije analizirane su tijekom ljetnih mjeseci (srpnja, kolovoza i rujna).

Za prikupljanje podataka o projektnim elementima raskrižja korištena je dostupna projektna dokumentacija, ustupljena od Grada Osijeka i Grada Poreča. Analizirani su projektni parametri odabrani fazi u preliminarnih istraživanja (Poglavlje 6):

- vanjski polumjer kružnog raskrižja [m] (R_v)
- širina kružnog kolnika [m] (u)
- širina ulaza i izlaza [m] (e_{ul} , e_{iz})
- ulazni i izlazni polumjer [m] (R_{ul} , R_{iz})
- širina voznog traka [m] (v)
- duljina razdjelne površine [m] (m)
- ulazni kut [°] (Φ)
- defleksija [m] (d)
- duljina razdjelnog otoka [m] (m')
- polumjer središnjeg otoka, uključujući voznu površinu [m] (R_c)
- širina povoznog dijela središnjeg otoka [m] (u')

Prometni parametri prikupljeni su terenskim mjerenjima korištenjem radarskih brojača prometa Datacollect SDR, čime je osigurano prikupljanje podataka bez ometanja prometnog toka. Podaci su kontinuirano prikupljeni tijekom 24 sata, na prosječan radni dan (utorak, srijeda ili četvrtak), u oba smjera. Dobiveni podaci pružaju detaljan uvid u dnevno prometno opterećenje, promet tijekom jutarnjeg i popodnevnog vršnog sata te strukturu vozila.

Radi određivanja vremena putovanja na rutama između unaprijed definiranih kontrolnih točaka provedena su terenska mjerenja. Rute obuhvaćaju putovanje vozila kroz kružno raskrižje i susjedno semaforizirano raskrižje ukupne duljine 300 metara što predstavlja uvjete za koje je razvijen regresijski model. Mjerenja su provedena praćenjem kretanja osobnog vozila pomoću GPS aplikacije koja je pružila precizne podatke o vremenu putovanja između kontrolnih točaka. Svaka ruta testirana je s najmanje petnaest prolazaka vozila radi povećanja pouzdanosti rezultata. Vrijeme putovanja vozila služilo je za validaciju regresijskog modela vremena putovanja te za kalibraciju simulacijskih modela i usporedbu s regresijskim modelom broja konflikata.

U nastavku su detaljno prikazani rezultati ovih eksperimentalnih istraživanja.

8.1.1. Opis analizirane prometne mreže – Grad Osijek

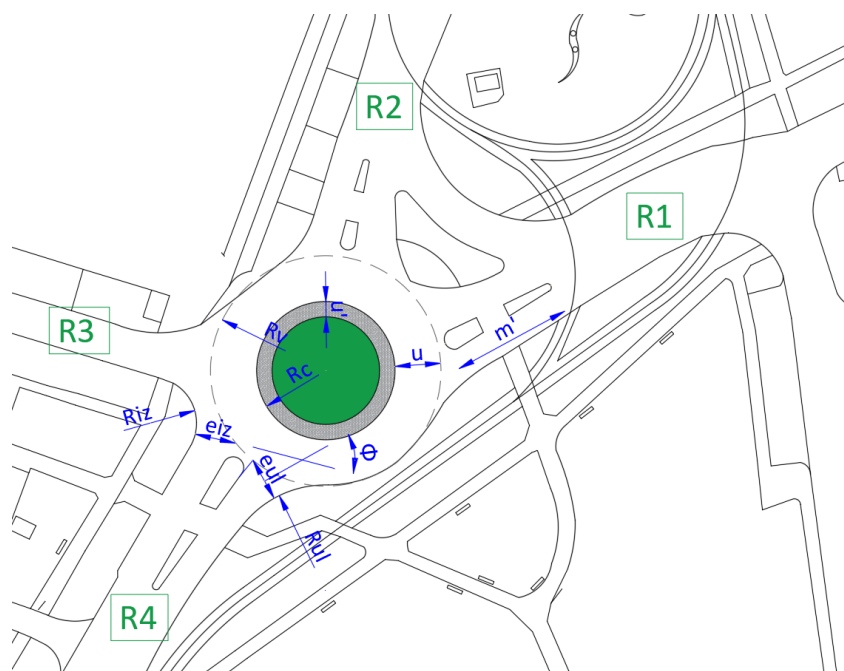
Na cestovnoj mreži Grada Osijeka eksperimentalna istraživanja su provedena unutar koridora semaforiziranih raskrižja duž Vinkovačke ceste u gradu Osijeku (Slika 8.1).

Analizirano je jedno kružno i dva semaforizirana raskrižja:

- Kružno raskrižje (četverokrako) – raskrižje Vinkovačke ceste te Drinske i Bosutske ulice
- Semaforizirano raskrižje A (četverokrako) – raskrižje Vinkovačke ceste te Koranske i Neretvanske ulice
- Semaforizirano raskrižje B (trokrako) – raskrižje Vinkovačke ceste i Gacke ulice

Razmaci između raskrižja su sljedeći:

- Semaforizirano raskrižje A – udaljeno 122 metra od kružnog raskrižja
- Semaforizirano raskrižje B – udaljeno 178 metara od kružnog raskrižja



Slika 8.2. Projektni elementi – situacija (Grad Osijek)

Tablica 8.1. Projektni elementi kružnog raskrižja u Osijeku

Privoz	Rv	u	e _{ul}	R _{ul}	e _{iz}	R _{iz}	v	m	φ	d	m'	Rc	u'
Preporuke	13,5- 22,5	4,5- 6,0	4-7	8- 20	4-7	10- 25	3- 3,5	15- 50	20- 40	/	/	7,5- 18	min 1
R1	15	6	6,3	11	4,3	25	3	34	40	6,3	15,6	9	2
R2			4,9	12	6	17	3,25	25	36	1,2	11,7		
R3			5,5	6	4,6	15	2,6	0	29	8,5	0		
R4			5,7	14	5,4	6	3,25	53	40	5,2	20		

8.1.2. Analiza eksperimentalno prikupljenih podataka – Grad Osijek

U ovom slučaju za prikupljanje podataka o prometnom toku korišteno je 8 brojača prometa koji su raspoređeni u zoni raskrižja, a njihovi su položaji označeni žutim trokutima na slici 8.1.

Ukupno dnevno prometno opterećenje analiziranog kružnog raskrižja iznosi 16 149 vozila, što je niže od preporučenog maksimalnog dnevnog kapaciteta definiranog Hrvatskim smjernicama za ovu kategoriju raskrižja (20 000 voz/dan).

Rezultati terenskih mjerenja prikazani su u tablici 8.2. Podebljanim je slovima označen glavni smjer, privozi s većim prometnim opterećenjem. Tablica prikazuje strukturu vozila prema kategorijama (%), dnevno prometno opterećenje (voz/dan), prometno opterećenje u vršnom satu (voz/h), postotak dnevnog prometa u vršnom satu (%) te raspodjelu prometa na glavnom i sporednom smjeru tijekom vršnog sata.

Tablica 8.2. Količina prometa, struktura i dnevna raspodjela prometnog opterećenja

Privoz	Struktura vozila			Prometno opterećenje	Promet u vršnom satu (voz/h)		Promet u vršnom satu (%)	Raspodjela
	OV	kamion	TTV		voz/dan	7-8 h	15-16 h	
A1	jednosmjerni privoz – odvoz (nisu prikupljeni podaci)							
A2	93,1%	5,1%	1,8%	7002	498	301	4,3%	88:12
A3	97,8%	2,2%	0,0%	892	65	70	7,8%	
R1	93,3%	6,0%	0,7%	3263	164	228	7,0%	72:28
R2	79,6%	19,6%	0,8%	6064	255	400	6,6%	
R3	100,0%	0,0%	0,0%	1222	94	60	4,9%	
R4	94,6%	4,7%	0,7%	5870	468	359	6,1%	
B1	97,8%	1,8%	0,4%	3571	246	160	4,5%	79:21
B2	95,6%	3,4%	0,6%	6607	434	469	7,1%	
OV – osobno vozilo, TTV – teško teretno vozilo								

OV – osobno vozilo, TTV – teško teretno vozilo

Najveća količina prometa prolazi privozima R2 i R4 što ga čini glavnim smjerom. Prometno opterećenje na glavnom smjeru u vršnom popodnevnom satu iznosi 759 vozila. Analiza vremenske raspodjele prometa pokazala je da se jutarnji vršni sat javlja između 7:00 i 8:00, dok je popodnevni vršni sat između 15:00 i 16:00. S obzirom na to da je popodnevni vršni sat opterećeniji za 6,7 % u odnosu na jutarnji, odabran je kao referentni za daljnju analizu. Tijekom popodnevnog vršnog sata kroz kružno raskrižje prošlo je ukupno 1047 vozila, što čini 6,4% ukupnog dnevnog opterećenja. Odnos opterećenja između glavnog i sporednog smjera iznosi 72:28.

Tijekom popodnevnog vršnog sata provedena su mjerenja radi određivanja vremena putovanja na dvije rute između unaprijed definiranih kontrolnih točaka (Slika 8.3.). Obje rute, A i B, bile su duljine 300 m.



Slika 8.3. Rute za terensko mjerenje vremena putovanja

Duljina ciklusa na semaforiziranom raskrižju A iznosi 90 sekundi, pri čemu duljina crvenog vremena prve faze traje 25 sekundi. Duljina ciklusa na semaforiziranom raskrižju B iznosi 90 sekundi, pri čemu duljina crvenog vremena prve faze traje 21 sekundu.

U tablici 8.3. prikazani su vremenski intervali pojedinih svjetlosnih signala na semaforiziranim raskrižjima za prvu fazu tijekom koje se odvija promet u glavnom smjeru. Tablica sadrži podatke o ukupnoj duljini ciklusa (C) te pojedinačna trajanja zelenog (z), crveno-žutog (cž), crvenog (c) i žutog (ž) svjetlosnog intervala.

Tablica 8.3. Duljine svjetlosnih vremena i opis ruta

Semaforizirano raskrižje	Ciklus semafora (s)					Udaljenost raskrižja (m)	Ruta	Duljina rute (m)
	C	z	cž	cs	ž			
A	90	60	2	25	2	122	A	300
B	90	64	2	21	2	178	B	300

Vrijeme putovanja vozila izmjereno je na temelju 15 pojedinačnih prolazaka vozila kroz kružno i semaforizirano raskrižje za svaku analiziranu rutu (A i B), a dobiveni rezultati prikazani su u tablici 8.4.

Tablica 8.4. Vrijeme putovanja prema terenskim mjerenjima

Br. prolaska	Vrijeme putovanja (s)	
	Ruta A	Ruta B
1	64	53
2	39	27
3	66	34
4	60	44
5	60	81
6	33	33
7	67	42
8	34	44
9	32	32
10	77	41
11	69	43
12	70	38
13	36	42
14	70	42
15	69	51
Prosječno	56,40	43,13

Rezultati deskriptivne statistike vremena putovanja vozila prikazani su u tablici 8.5., s ciljem usporedbe dviju različitih ruta. Prosječno vrijeme prolaska na ruti A iznosi 56,40 sekundi, dok je na ruti B kraće i iznosi 43,13 sekundi. Medijan vremena prolaska na ruti A (64 s) značajno je veći od medijana rute B (42 s), što ukazuje da je većina vozila na ruti B ostvarila brže prolaskе. Standardna devijacija na ruti A (16,39 s) viša je nego na ruti B (12,53 s), što ukazuje na veću varijabilnost, odnosno veći raspon prolaska na ruti A.

Tablica 8.5. Deskriptivna statistika: vremena putovanja – mjerenja u Osijeku

	Ruta A	Ruta B
Broj opažanja	15	15
Minimum	32,000	27,000
Maksimum	77,000	81,000
1. kvartil	37,500	36,000
Medijan	64,000	42,000
3. kvartil	69,000	44,000
Srednja vrijednost	56,400	43,133
Varijanca	268,829	157,124
Standardna devijacija	16,396	12,535

8.1.3. Opis analizirane prometne mreže – Grad Poreč

Drugi analizirani segment prometne mreže nalazi se u Gradu Poreču i obuhvaća tri četverokraka kružna raskrižja u neposrednoj blizini semaforiziranih raskrižja, kao što je prikazano na slici 8.4. Promatrani segment prometne mreže nalazi se u području pretežito stambene namjene, neposredno uz staru gradsku jezgru, trgovački centar te glavno gradsko parkiralište.

Analizirana su tri kružna raskrižja i dva semaforizirana raskrižja:

- Kružno raskrižje 1 (u daljnjem tekstu KR1) – raskrižje Državne ceste 75 i Vukovarske ulice
- Kružno raskrižje 2 (u daljnjem tekstu KR2) – raskrižje Ulice Županije Somogy i Vukovarske ulice
- Kružno raskrižje 3 (u daljnjem tekstu KR3) – raskrižje Ulice Županije Somogy i Ulice Karla Huguesa
- Semaforizirano raskrižje A (u daljnjem tekstu SR A) – raskrižje Državne ceste 75, Partizanske ulice i Ulice Maura Gioseffia
- Semaforizirano raskrižje B (u daljnjem tekstu SR B) – raskrižje Ulice Županije Somogy i Vukovarske ulice



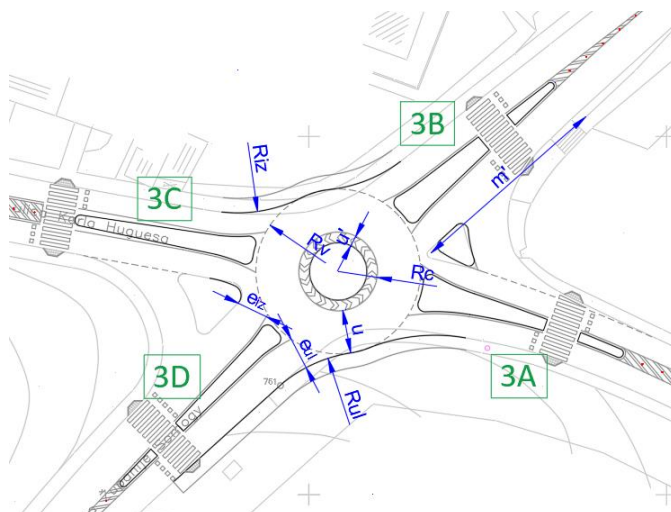
Slika 8.4. Analizirani dio prometne mreže u gradu Poreču

U ovom slučaju, razmaci između raskrižja su sljedeći:

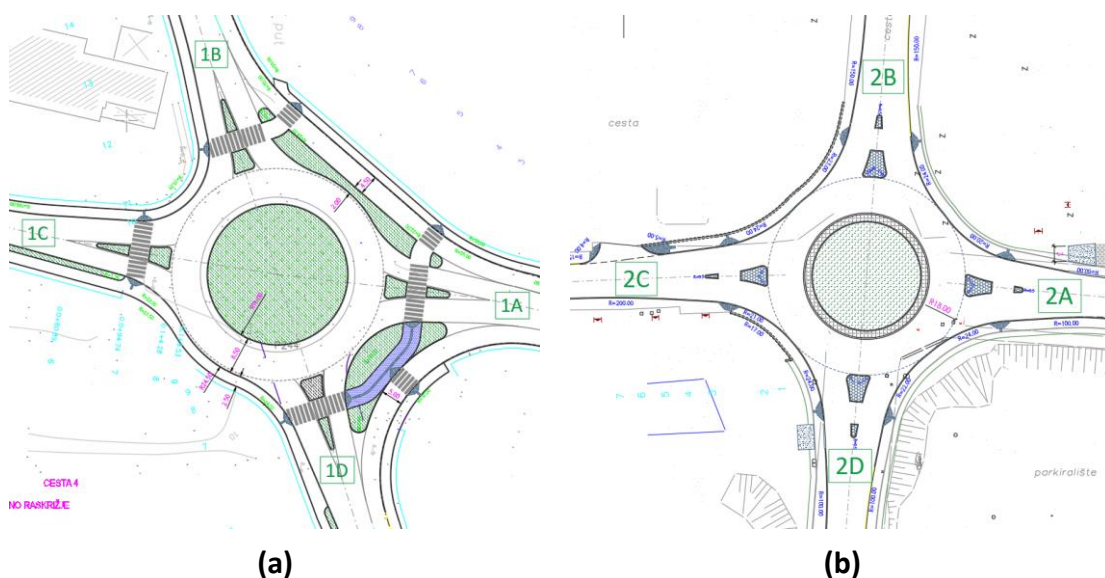
- KR1 – udaljeno 226 metara od SR A te 302 metara od SR B
- KR2 – udaljeno 230 metara od SR A te 125 metara od SR B
- KR 3 – udaljeno 201 metar od SR B

KR1 ima vanjski polumjer od 24 metra, što prelazi gornju granicu srednje velikih urbanih kružnih raskrižja prema Hrvatskim smjernicama (vanjski polumjer 15 do 20 metara). KR 2 s vanjskim polumjerom od 18 metara pripada kategoriji srednje velikih urbanih kružnih raskrižja. KR 3 ima vanjski polumjer od 11,5 metara, čime spada u kategoriju malih urbanih kružnih raskrižja.

Iz projektne dokumentacije izdvojeni su relevantni projektni elementi za kružna raskrižja, koji su označeni na primjeru KR3 na slici 8.5. Na slici 8.6. prikazana je situacija i oznake privoza za kružna raskrižja KR1 i KR2. Pregled svih prikupljenih projektnih elemenata kružnih raskrižja prikazan je u tablici 8.6., pri čemu su podebljano istaknuti oni elementi koji odstupaju od preporučenih vrijednosti prema Hrvatskim smjernicama (Hrvatske ceste, 2014).



Slika 8.5. Projektni elementi – Kružno raskrižje 3 (Grad Poreč)



Slika 8.6. Projektni elementi: (a) Kružno raskrižje KR1; (b) Kružno raskrižje KR2 (Grad Poreč)

Tablica 8.6. Projektni elementi kružnih raskrižja u Gradu Poreču

KR	Privoz	Rv	u	e _{ul}	R _{ul}	e _{iz}	R _{iz}	v	m	ϕ	m'	Rc	u'
Preporuke		13,5-22,5	4,5-6,0	4-7	8-20	4-7	10-25	3-3,5	15-50	20-40	max 25	7,5-18	min 1
1	1A	24	6,5	5,6	22,0	5,9	16,0	3,5	15,0	32,0	24,5	17,5	1,5
	1B			6,0	15,5	6,4	23,8	3,5	17,6	22,0	24,5		
	1C			5,7	22,0	6,7	15,5	3,3	17,6	24,5	24,5		
	1D			5,3	16,0	6,4	24,0	3,5	17,5	31,0	24,5		
2	2A	18	6,5	5,1	20,0	5,5	24,0	3,5	25,0	34,0	13,0	11,5	1,7
	2B			5,1	23,0	5,5	24,0	3,5	30,0	32,0	15,0		
	2C			5,1	21,0	5,3	24,0	3,0	26,0	33,0	11,4		
	2D			5,1	22,0	5,3	24,0	3,5	40,0	35,0	11,5		
3	3A	11,5	6,0	3,3	10,0	3,3	25,0	3,0	80,0	18,0	15,0	5,5	1,5
	3B			3,9	20,0	4,5	5,0	3,3	60,0	17,6	28,0		
	3C			3,3	13,0	3,3	20,0	3,3	83,0	45,3	36,0		
	3D			4,8	20,0	5,2	x	3,5	66,0	27,3	30,0		

8.1.4. Analiza eksperimentalno prikupljenih podataka – Grad Poreč

Za prikupljanje podataka o prometnom toku u Gradu Poreču korišteno je 12 brojača prometa koji su postavljeni na svim privozima kružnih raskrižja KR1, KR2 i KR3.

Rezultati provedenih terenskih mjerenja prikazani su u tablici 8.7. Podebljanim slovima izdvojeni su glavni smjerovi, odnosno privozi koji ostvaruju najveće prometno opterećenje. U Tablici su prikazani podaci o sadržava strukturi vozila prema kategorijama (%), dnevnom prometnom opterećenju (voz/dan), prometnom opterećenju tijekom vršnog sata (voz/h), postotku dnevnog prometnog opterećenja u popodnevnom vršnom satu (%) te raspodjeli prometa između glavnog i sporednog smjera u razdoblju vršnog sata.

Tablica 8.7. Količina prometa, struktura i dnevna raspodjela prometnog opterećenja – mjerenja u Gradu Poreču

KR	Privoz	Struktura vozila			Dnevno opterećenje voz/dan	Vršno opterećenje [voz/h]		Udio prometa 15-16 h	Raspodjela prometa
		OV	kamion	TTV		7-8 h	15-16 h		
KR1	1A	96,6%	3,3%	0,2%	5959	197	403	6,8%	55:45
	1B	92,4%	7,3%	0,3%	7537	335	483	6,4%	
	1C	97,4%	2,5%	0,1%	6258	213	351	5,6%	
	1D	96,7%	2,8%	0,5%	7974	332	424	5,3%	
KR2	2A	98,8%	1,2%	0,0%	3542	202	218	6,2%	61:39
	2B	97,3%	2,7%	0,0%	2208	132	141	6,4%	
	2C	97,7%	2,3%	0,0%	3139	193	275	8,8%	
	2D	98,1%	1,7%	0,1%	5063	312	357	7,1%	
KR3	3A	96,7%	2,7%	0,6%	1842	98	120	6,5%	63:37
	3B	97,2%	2,7%	0,1%	3541	273	294	8,3%	
	3C	97,2%	2,0%	0,8%	4196	301	322	7,7%	
	3D	97,4%	2,5%	0,1%	2697	221	251	9,3%	

OV – osobno vozilo, TTV – teško teretno vozilo

Kružno raskrižje KR1 bilježi najveći dnevni promet od ukupno 27 728 vozila. U popodnevnom vršnom satu kroz ovo raskrižje prošlo je 1661 vozilo, što iznosi oko 6 % ukupnog dnevnog prometa. Na kružnom raskrižju KR2 izmjereno je dnevno prometno opterećenje od 13 953 vozila, pri čemu je u popodnevnom vršnom satu zabilježeno 991 vozilo, odnosno 7,1 % dnevnog prometa. Kroz kružno raskrižje KR3 tijekom dana prošlo je 12 277 vozila, od čega 987 vozila u popodnevnom vršnom satu, što predstavlja 8 % ukupnog dnevnog opterećenja.

Prikaz brzina na analiziranim raskrižjima prikazan je u tablici 8.8.

Tijekom popodnevnog vršnog sata provedena su mjerenja radi određivanja vremena putovanja na četiri rute duljine 300 metara, između unaprijed definiranih kontrolnih točaka (Slika 8.7.).

Analizirane su sljedeće rute:

- Ruta 1: od kružnog raskrižja KR1 prema semaforiziranog raskrižju SR A
- Ruta 2: od kružnog raskrižja KR2 prema semaforiziranog raskrižju SR A
- Ruta 3: od kružnog raskrižja KR3 prema semaforiziranog raskrižju SR B
- Ruta 4: od kružnog raskrižja KR2 prema semaforiziranog raskrižju SR B



Slika 8.7. Rute na kojima je mjereno vrijeme putovanja

Duljina ciklusa na semaforiziranom raskrižju SR A iznosi 60 sekundi, pri čemu duljina crvenog vremena prve faze traje 25 sekundi, a druge faze 35 s. Duljina ciklusa na semaforiziranom raskrižju SR B iznosi 70 sekundi, pri čemu duljina crvenog vremena prve faze traje 25 sekundi.

U tablici 8.8. prikazani su vremenski intervali pojedinih svjetlosnih signala na semaforiziranim raskrižjima za svjetlosnu fazu tijekom koje se odvija promet na promatranim rutama. Tablica sadrži podatke o ukupnoj duljini ciklusa (C) te pojedinačna trajanja zelenog (z), crveno-žutog (cz), crvenog (c) i žutog (ž) svjetlosnog intervala.

Tablica 8.8. Duljine svjetlosnih vremena i opis ruta

Ruta	Duljina rute [m]	Udaljenost KR-semaforizirano [m]	Semaforizirano raskrižje	Ciklus semafora [s]				
				C	z	cž	cs	ž
1	300	226	A	60	30	2	25	2
2	300	230		60	20	2	35	2
3	300	201	B	70	40	2	25	2
4	300	125		70	40	2	25	2

Vrijeme putovanja izmjereno je na temelju 15 pojedinačnih prolazaka vozila kroz kružno i semaforizirano raskrižje za svaku analiziranu rutu, a dobiveni rezultati prikazani su u tablici 8.9.

Tablica 8.9. Vrijeme putovanja prema terenskim mjerenjima

Br. prolaska	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4
1	55	62	53	107
2	102	103	103	74
3	43	58	54	62
4	102	57	102	54
5	40	102	31	70
6	44	71	78	48
7	42	104	74	54
8	38	59	71	69
9	96	106	45	57
10	98	51	39	54
11	46	84	83	52
12	53	102	87	48
13	95	58	91	47
14	72	105	39	55
15	95	102	103	54
Prosječno	68,06	81,60	70,20	60,33

Rezultati deskriptivne statistike vremena putovanja za četiri analizirane rute prikazani su u tablici 8.10. Prosječna vremena putovanja iznose 68,06 s za Rutu 1, 81,60 s za Rutu 2, 70,20 s za Rutu 3 i 60,33 s za Rutu 4. Na Rutama 1 i 3 uočena je pozitivna asimetrija distribucije, što se očituje razlikom između aritmetičke sredine i medijana te ukazuje na prisutnost duljih, rjeđih putovanja. Varijabilnost putovanja također varira – Ruta 1 ima najvišu standardnu devijaciju (26,60 s), a Ruta 4 najnižu (15,32 s), pri čemu varijance prate isti obrazac.

Tablica 8.10. Deskriptivna statistika vremena putovanja

	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4
Broj opažanja	15	15	15	15
Minimum	38,000	51,000	31,000	47,000
Maksimum	102,000	106,000	103,000	107,000
1. kvartil	43,500	58,500	49,000	53,000
Medijan	55,000	84,000	74,000	54,000
3. kvartil	95,500	102,500	89,000	65,500
Srednja vrijednost	68,067	81,600	70,200	60,333
Varijanca	707,781	501,400	628,171	234,810
Standardna devijacija	26,604	22,392	25,063	15,323

Ekperimentalna istraživanja provedena su kako bi se validirao regresijski model za predikciju vremena putovanja te stvorila kvalitetna osnova za razvoj simulacijskih modela stvarnih prometnih mreža. U istraživanju su analizirana četiri kružna raskrižja u Osijeku i Poreču, gradovima koji predstavljaju dva različita urbana scenarija: Osijek kao grad srednje veličine s umjerenim prometom i Poreč kao turistički grad s izraženom sezonskom varijabilnošću. Odabrana raskrižja razlikuju se prema geometrijskim karakteristikama (vanjski polumjer od 11,5 do 24 metra), prometnom opterećenju, udaljenosti od semaforiziranih raskrižja te trajanju ciklusa semafora i crvenog svjetla. Prosječno vrijeme putovanja, mjereno na ruti duljine 300 m i izračunato na temelju 15 pojedinačnih prolazaka vozila, pokazalo se kao relevantan pokazatelj stvarnih uvjeta jer obuhvaća utjecaje različitog broja pješaka, vozila, rada semafora te drugih nepredviđenih okolnosti koje se mogu pojaviti na promatranoj ruti, a odgovara simuliranim – stohastičkim uvjetima koje koristi VISSIM.

8.2. Validacija modela

Cilj validacije bio je utvrditi postoje li značajne razlike između modeliranih i stvarnih vremena putovanja, odnosno potvrditi da model ne pokazuje statistički značajna odstupanja u predviđanju vremena putovanja na ruti duljine 300 m.

Postupak validacije sastojao se od nekoliko koraka:

- (1) Terenska mjerenja putovanja na svakoj ruti, prikazana u Poglavlju 8.1.;
- (2) Predikcija regresijskog modela: Za svaku rutu izračunato je predviđeno vrijeme putovanja pomoću linearnog regresijskog modela, opisanog u Poglavlju 7;
- (3) Izračun odstupanja izmjerenih i modelom predviđenih vremena;
- (4) Testiranje normalnosti razlika Shapiro-Wilkovim testom;
- (5) Primjenu odgovarajućih statističkih testova za usporedbu (Studentov t-test ili Wilcoxonov test).

Validacija razvijenog regresijskog modela provedena je usporedbom modelom predviđenih vremena putovanja s izmjerenim vremenima na odabranim rutama utvrđenim eksperimentalnim istraživanjima. Za validaciju je odabrano ukupno šest ruta, od kojih su četiri (Rute 1-4) definirane na području Grada Poreča, a dvije (Rute A i B) na području Grada Osijeka. Sve rute bile su jednake duljine od 300 m, što je u skladu s definiranim okvirom regresijskog modela (Izraz 23).

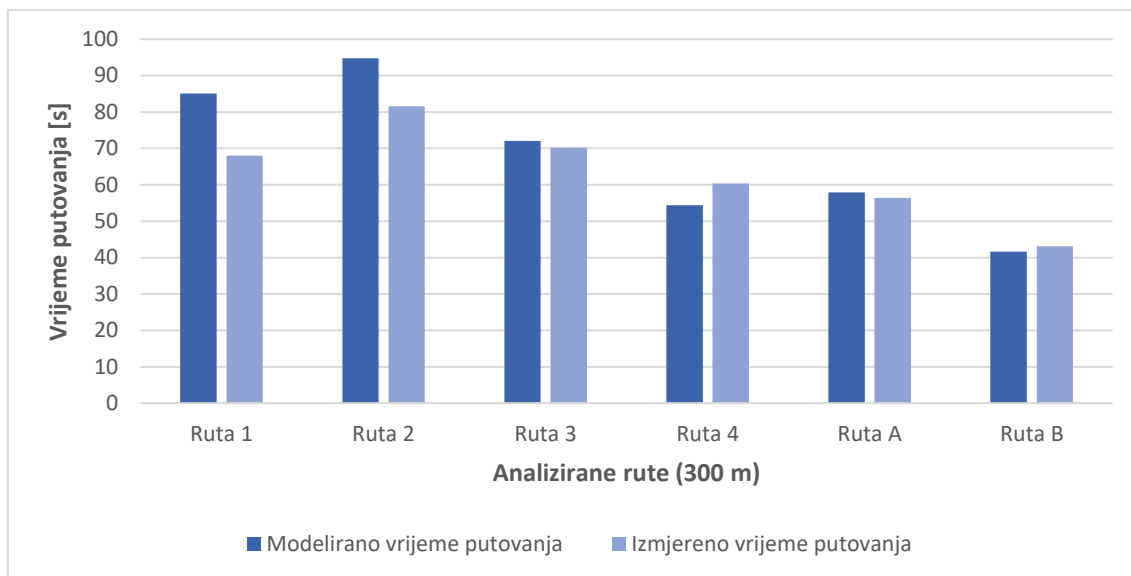
Na temelju izmjerenih parametara u stvarnim uvjetima – uključujući geometrijske karakteristike raskrižja, količina prometa u vršnom satu, udio prometa na glavnom smjeru, duljinu crvenog vremena na susjednom semaforiziranom raskrižju te razmaka kružnog i semaforiziranog raskrižja, izračunata su očekivana vremena putovanja.

Tablica 8.11. prikazuje ulazne vrijednosti nezavisnih varijabli za svaku analiziranu rutu, definirane u skladu s Izrazom (23) te pripadajuća vremena putovanja proračunata regresijskim modelom. Podebljano su istaknute vrijednosti onih ulaznih parametara koje izlaze izvan definiranog raspona pojedinog parametra u regresijskom modelu.

Tablica 8.11. Predviđeno vrijeme putovanja regresijskim modelom i pripadni ulazni parametri modela

	Poreč				Osijek	
	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4	Ruta A	Ruta B
Regresijski model – vrijeme putovanja [s]	85,11	94,77	72,05	54,36	57,89	41,60
Terensko mjerenje – vrijeme putovanja [s]	68,06	81,60	70,20	60,33	56,40	43,13
Promet u vršnom satu [voz/h]	1661	991	987	991	1047	1047
Udio prometa na glavnom smjeru [/]	0,55	0,61	0,56	0,61	0,73	0,73
Duljina crvenog vremena [s]	25	35	25	25	25	22
Vanjski polumjer kružnog raskrižja [m]	24	14	11,5	14	15	15
Udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja [m]	226	230	125	201	122	178

Na slici 8.8. prikazana je usporedba izmjerenog i predviđenog vremena putovanja proračunatog prema razvijenom regresijskom modelu. Za kvantitativnu ocjenu odstupanja primijenjeni su statistički testove kako je opisano u nastavku.



Slika 8.8. Usporedba izmjerenog i modelom predviđenog vremena putovanja

Prije odabira statističkog testa za usporedbu izmjerenih i proračunatih vremena putovanja, provjerena je pretpostavka normalnosti raspodjele razlika između izmjerenih i predviđenih vremena putovanja za svaku rutu. Za analizu je korišten Shapiro-Wilkov test normalnosti. Shapiro-Wilkov test ispituje nultu hipotezu da podaci (u ovom slučaju, razlike između modelom predviđenog i izmjerenog vremena) potječu iz populacije koja ima normalnu distribuciju (D'Agostino i Stephens., 1986). Ovaj je test odabran jer ima visoku snagu i pouzdan je za manje uzorke, s obzirom da je u ovom slučaju uzorak bio 15 prolazaka rutom. Prvi korak bio je određivanje W -statistike koja mjeri koliko se uzorak podudara s normalnom distribucijom.

Test normalnosti je ključan jer Studentov t -test pretpostavlja normalnu raspodjelu (ili barem približnu normalnost) vrijednosti razlika. Stoga je Shapiro-Wilkovim testom provjereno jesu li te pretpostavke ispunjene za svaku pojedinu rutu prije primjene t -testa. Tablica 8.12. prikazuje rezultate Shapiro-Wilkovog testa normalnosti za sve rute, uz navedene vrijednosti testne statistike (W), pripadajuće p -vrijednosti te zaključak o ispunjenju kriterija normalnosti (DA = razlike slijede normalnu raspodjelu, NE = razlike odstupaju od normalne raspodjele) na razini značajnosti 0,05.

Tablica 8.12. Rezultati Shapiro-Wilkovog testa normalnosti

	W	p	Kriterij normalnosti ispunjen
Ruta 1	0,807	0,005	NE
Ruta 2	0,797	0,003	NE
Ruta 3	0,922	0,207	DA
Ruta 4	0,747	<0,001	NE
Ruta A	0,819	0,007	NE
Ruta B	0,806	0,004	NE

Rezultati prikazuju da jedino za Rutu 3 p -vrijednost prelazi prag od 0,05 ($p = 0,207$), što znači da se za tu rutu ne može odbaciti hipoteza da razlike potječu iz normalne distribucije. Distribucija razlika između izmjerenog i modelom predviđenog vremena na Rutu 3 može se smatrati približno normalnom. Za sve ostale rute p -vrijednosti Shapiro–Wilkovog testa su manje od 0,05 što znači da postoje statistički značajna odstupanja od normalnosti. Stoga je za Rutu 3 opravdano koristiti parametarski pristup (t -test), dok se za ostale rute primjenjuje neparametarski pristup (Wilcoxonov test).

Za skup podataka koji zadovoljava pretpostavku normalnosti korišten je Student t -test za jedan uzorak (eng. *One-Sample t-test*). Riječ je o parametarskom testu koji ispituje razlikuje li se prosječna vrijednost uzorka značajno od određene (poznate ili pretpostavljene) vrijednosti populacije (u ovom slučaju, modelom predviđeno i izmjereno vrijeme za istu rutu) (Field, 2017).

Za skup podataka čija raspodjela odstupa od normalne primijenjen je Wilcoxonov neparametarski test. Ovaj test ispituje postoje li statistički značajne razlike između medijana promatranog uzorka i referentne vrijednosti. Wilcoxonov test analogan je t -testu, ali umjesto usporedbe srednjih vrijednosti, temelji se na medijanu razlika između modelom predviđenih i izmjerenih vremena (McClenaghan, 2024).

U tablici 8.13. prikazan je rezultat provedenih testova za svaku ispitanu rutu. Navedeni su tip primijenjenog testa, vrijednost testne statistike, stupnjevi slobode (DF, za t -test), p -vrijednost testa, procijenjena lokacijska razlika između modelom predviđenog i izmjerenog vremena te veličina efekta uz pripadajuću standardnu pogrešku.

Lokacijska razlika predstavlja procjenu srednje ili medijalne razlike izmjerenog i modelom predviđenog vremena putovanja: kod t -testa to je aritmetička sredina razlika, dok je kod Wilcoxon testa prikazana Hodges-Lehmannova procjena medijana razlike. Pozitivan predznak lokacijske razlike znači da je model podcijenio vrijeme putovanja, dok negativan predznak znači da je model precijenio vrijeme putovanja. Veličina efekta izražena je Cohenovim d za Studentov t -test, dok je za Wilcoxonov test uparenih uzoraka izražena rang-biserijalnom korelacijom. Veličina efekta kvantitativno iskazuje magnitude opažene razlike između uspoređivanih uzoraka: prema Cohenu (1988), vrijednosti oko 0,2 tumače se kao mali efekt, oko 0,5 kao srednji, a 0,8 ili više kao veliki efekt, pri čemu predznak ukazuje na smjer razlike. Rang-biserijalna korelacija pritom predstavlja neparametarsku veličinu efekta temeljenu na rangovima razlika između parova opažanja, a vrijednosti bliže ± 1 ukazuju na izraženiju razliku između promatranih skupina.

Tablica 8.13. Rezultati provedenih statističkih testova za usporedbu modelom predviđenih i stvarnih vremena putovanja.

Ruta	Test	Statistička vrijednost	DF	<i>p</i> -vrijednost	Lokacijska razlika (s)	Veličina efekta	SE veličina
Ruta 1	Wilcoxon	23,000		0,038	-15,469	-0,617	0,285
Ruta 2	Wilcoxon	29,000		0,083	-13,770	-0,517	0,285
Ruta 3	Student	-0,286	14	0,779	-1,850	-0,074	0,259
Ruta 4	Wilcoxon	77,000		0,348	3,640	0,283	0,285
Ruta A	Wilcoxon	56,000		0,842	-3,390	-0,067	0,285
Ruta B	Wilcoxon	63,000		0,887	0,400	0,050	0,285

Za Rutu 3 korišten je parametarski Studentov *t*-test, pri čemu je dobivena vrijednost *t* = -0,286 uz *p* = 0,779. Vrlo visoka *p*-vrijednost upućuje da nema statistički značajne razlike između modelom predviđenog i izmjerenog vremena putovanja. Prosječna razlika iznosi -1,85 s (minimalno precjenjivanje od strane modela), a nizak Cohenov *d* od -0,074 potvrđuje zanemarivu razliku. Stoga se može zaključiti kako je modelom na Rutu 3 vrlo precizno predviđeno vrijeme putovanja.

Ruta 4 nije pokazala statistički značajnu razliku između modelom predviđenog i izmjerenog vremena putovanja (Wilcoxonov test, *p*=0,348). Hodges-Lehmannova procjena medijana razlike iznosi +3,640 s, što ukazuje na blago podcjenjivanje vremena putovanja u modelu (predviđeno vrijeme kraće je za 9 % od stvarno izmjerenog). Međutim, ova razlika nije statistički značajna, a veličina efekta (*r*=0,283) sugerira tek malo odstupanje. Iako udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja na Rutu 4 (201 m) prelazi granice regresijskog modela, to nije rezultiralo značajnim odstupanjem između simuliranih i izmjerenih vrijednosti vremena putovanja.

Ruta A također ne pokazuje značajnu razliku modelom predviđenog i izmjerenog vremena putovanja (*p* = 0,842); medijan razlika je -3,390 s (model malo precjenjuje vrijeme), a veličina efekta *r* = -0,067 je praktički nula, što znači da model vrlo dobro predviđa stvarno vrijeme putovanja.

Ruta B pokazuje gotovo savršeno podudaranje modela i mjerenja – *p* = 0,887 (nema razlike), medijan razlika +0,400 s, uz zanemarivu veličinu efekta *r* = 0,050. Iako udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja na Rutu B (201 m) izlazi izvan granica regresijskog modela, ova činjenica nije uzrokovala statistički značajna odstupanja između simuliranog i izmjerenog vremena putovanja.

Za Rutu 2 proveden je Wilcoxonov test čiji rezultat (*p* = 0,083) pokazuje da na razini značajnosti od 0,05 nema statistički značajne razlike između modelom predviđenog i izmjerenog vremena putovanja. Procijenjeni medijan razlika od -13,770 s ukazuje na tendenciju modela da precijeni vrijeme putovanja za približno 16 %. Utvrđena rang-

biserijalna korelacija od $-0,517$ potvrđuje umjereno odstupanje simuliranih rezultata od mjerenja. Iako Ruta 2 odstupa od granica parametara regresijskog modela, zbog dužeg trajanja crvenog vremena (35 s) na semaforiziranom raskrižju, nije utvrđena statistički značajna razlika u rezultatima.

Ruta 1 se nalazi izvan parametarskih granica regresijskog modela, obzirom na vanjski polumjer kružnog raskrižja od 24 m. Rezultat Wilcoxonovog testa za Rutu 1 pokazao je p -vrijednost od 0,038, što je statistički značajno na razini od 0,05 te implicira značajnu razliku između modelom predviđenog i izmjerenog vremena putovanja. Negativna medijan razlika od $-15,469$ s ukazuje na precjenjivanje stvarnog vremena putovanja od strane modela u prosjeku za oko 25 %. Veličina efekta od $-0,617$ pokazuje srednje izraženo odstupanje modela od mjerenja. Budući da je vanjski polumjer kružnog raskrižja ranije identificiran kao drugi najutjecajniji parametar regresijskog modela (Poglavlje 7), može se zaključiti da je veći polumjer kružnog raskrižja od onog za koji je model razvijen rezultirao je većom greškom kod predikcije vremena putovanja.

Predikcije vremena putovanja na rutama 3, 4, A i B pokazale su visoku preciznost, s obzirom da im je srednja apsolutna postotna pogreška manja od 10 %. Ruta 2, sa srednjom apsolutnom postotnom pogreškom od 16 %, zadovoljava kriterij prihvatljive točnosti.

Jedino je Ruta 1 pokazala srednju apsolutnu postotnu pogrešku od 25% što je iznad preporučenog praga. Budući da je Ruta 1 karakterizirana vanjskim polumjerom kružnog raskrižja od 24 m, što je izvan parametarskih granica primijenjenog regresijskog modela, primjenjivost modela očekivano je, izvan granica za koje je razvijen, upitna i generira veću pogrešku u procjeni vremena putovanja.

Validacijom razvijenog regresijskog modela za predikciju vremena putovanja na odabranim rutama u Poreču i Osijeku utvrđena je njegova zadovoljavajuća točnost. Statističkim testovima potvrđeno je da na većini analiziranih ruta ne postoje značajna odstupanja između izmjerenih i predviđenih vremena putovanja. Četiri od ukupno šest ruta (Rute 3, 4, A i B) pokazale su vrlo visoku preciznost s pogreškama ispod 10 %, dok je Ruta 2 s pogreškom od 16 % još uvijek unutar prihvatljivog raspona. Jedino je Ruta 1 pokazala značajnu razliku od 25 %, što može biti posljedica primjene modela izvan definiranog raspona ulaznih parametara.

8.3. Rezime – Validacija modela temeljem mjerenja na stvarnoj cestovnoj mreži

U ovom poglavlju prikazana je validacija razvijenog regresijskog modela za predviđanje vremena putovanja između kružnih i semaforiziranih raskrižja čiji je razvoj detaljno

opisan u poglavlju 7. Validacija je provedena na temelju eksperimentalnih mjerenja na odabranim lokacijama u Gradu Osijeku i Poreču.

Detaljna analiza izmjerenih podataka pokazala je značajne razlike u prometnim karakteristikama između odabranih gradova. Grad Osijek, kao srednje velika urbana sredina, odlikuje se stabilnim prometnim uvjetima s umjerenim opterećenjem tijekom cijele godine. Nasuprot tome, prometni uvjeti u Poreču obilježeni su izraženom sezonskom varijabilnošću zbog utjecaja turističkog prometa tijekom ljetne sezone. Također su utvrđene varijacije geometrijskih karakteristika analiziranih kružnih raskrižja čiji vanjski polumjeri variraju od 11,5 m do 24 m.

Preciznost regresijskog modela validirana je usporedbom predviđenih i izmjerenih vremena putovanja na ukupno šest ruta duljine 300 metara. Primjenom statističkih testova (Studentov t-test i Wilcoxonov test) potvrđena je visoka razina pouzdanosti modela za većinu analiziranih ruta. Pogreške ispod 10 % utvrđene su na četiri rute (3, 4, A i B), što potvrđuje izvrsnu točnost modela. Ruta 2 pokazala je prihvatljivo odstupanje od 16 %, unatoč manjim prekoračenjima raspona ulaznih parametara. Najveće odstupanje (25 %) zabilježeno je na Ruti 1, gdje je vanjski polumjer kružnog raskrižja od 24 m značajno izvan inicijalno definiranog područja primjene modela, što ukazuje na ograničenja njegove primjene kod raskrižja većih dimenzija.

Provedeno istraživanje potvrđuje pouzdanost regresijskog modela za predikciju vremena putovanja u većini realnih prometnih situacija, no preporučuje se oprez pri njegovoj primjeni za raskrižja čiji parametri prelaze granice modela.

9. RAZVOJ MODELA ZA PREDIKCIJU BROJA KONFLIKATA

U ovom poglavlju opisan je razvoj regresijskog modela za predikciju ukupnog broja prometnih konflikata na prometnim koridorima koji se sastoje od kružnog i semaforiziranog raskrižja.

Model je razvijen na temelju baze podataka iz modela prometnih mikrosimulacija, pri čemu su analizirani brojni scenariji definirani različitim prometnim i projektnim parametrima.

Cilj analize bio je identificirati ključne parametre koji imaju statistički značajan utjecaj na pojavu prometnih konflikata te kvantificirati njihov utjecaj pomoću regresijskog modela. U nastavku su prikazani postupci prikupljanja podataka, statistička analiza rezultata, razvoj modela te usporedba prediktivnih sposobnosti razvijenog modela s kalibriranim mikrosimulacijskim modelima temeljenim na stvarnim uvjetima u gradovima Osijeku i Poreču.

9.1. Prikupljanje podataka

Prometni mikrosimulacijski modeli, korišteni pri izradi modela predikcije vremena putovanja (Poglavlje 7), ujedno su poslužili za prikupljanje podataka o broju potencijalnih konflikata u analiziranim scenarijima. Iako se učinkovitost kružnih raskrižja često vrednuje prometnim uvjetima tijekom vršnih sati, preliminarni rezultati ovog istraživanja pokazali su da takav pristup ne osigurava dostatan broj zabilježenih konflikata za pouzdanu statističku analizu. Kako bi se omogućila robusnija procjena sigurnosti, provedene su dodatne simulacije u trajanju od 24 sata. Time je prikupljen reprezentativan uzorak prometnih konflikata i zabilježeni su širi obrasci ponašanja vozača.

Primjena dnevnog prometnog opterećenja u skladu je s nalazima prijašnjih studija sigurnosti prometa na kružnim raskrižjima (Bulla-Cruz i sur., 2020; Giuffre i sur., 2018). Odabrana metodologija također je usklađena s tradicionalnim pristupima procjene prometne sigurnosti koji se oslanjaju na dnevne ili godišnje podatke o prometnim nesrećama (Daniels i sur., 2011; FHWA, 2010). Ovakav pristup, koji pretpostavlja ravnomjernu raspodjelu prometnog opterećenja tijekom cijelog dana, pojednostavljuje simulaciju te istodobno učinkovito bilježi pojavu konflikata, uključujući i razdoblja izvan vršnih sati koja bi inače mogla biti zanemarena.

Analiza u simulacijskom modelu provedena je za dnevno prometno opterećenje od 20 000 vozila, što odgovara preporučenom kapacitetu srednje velikih urbanih kružnih raskrižja prema Hrvatskim smjernicama (Hrvatske ceste, 2014).

Razmotreni su različiti scenariji definirani sljedećim ulaznim parametrima mikrosimulacijskih modela:

- Raspodjela prometa na glavnom i sporednom smjeru – omjeri 80:20, 70:30, 60:40 i 50:50
- Udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja – raspon od 40 m do 160 m
- Vanjski polumjer kružnog raskrižja – 12 m, 17 m i 22 m
- Duljina crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju – 17 s, 22 s i 27 s

Za provedbu prometnih mikrosimulacija korišten je softver PTV VISSIM. U skladu s preporukama, za svaki je scenarij provedeno deset neovisnih ponavljanja mikrosimulacija (PTV Group, 2022). Svako je ponavljanje generiralo zasebnu *.trj datoteku s numeričkim zapisom trajektorija vozila (identitet vozila, položaj, brzinu i vremensku oznaku po koraku simulacije).

Svaka *.trj datoteka obrađena je u alatu Surrogate Safety Assessment Model (SSAM), kojim su automatski identificirani i klasificirani prometni konflikti. Prometni konflikt definiran je kao situacija u kojoj bi, bez reakcije vozača, došlo do sudara, a identifikacija i klasifikacija se temelji na surogatnim sigurnosnim mjerama i tipu interakcije, sukladno metodološkom okviru alata (Gettman i Head, 2003).

Iz rezultata SSAM-a izdvojene su ključne metrike: ukupan broj konflikata te broj konflikata prema tipu - bočni sudar, sudar strana i sudar uslijep prestrojavanja. Time je za svaki scenarij dobiven skup od deset numeričkih vrijednosti za svaki tip konflikta, kao i za ukupan broj konflikata, na temelju kojih je izračunata prosječna vrijednost broja konflikata po scenariju. Takav pristup eksplicitno uvažava stohastičku prirodu mikrosimulacija i omogućava kvantifikaciju varijabilnosti unutar pojedinog scenarija.

Ukupan broj konflikata za svaki tip, prikupljen tijekom 24-satnog intervala, činio je osnovu za daljnju analizu sigurnosti. U okviru istraživanja ukupno je analizirano 480 scenarija, pri čemu je svaka simulacija trajala 24 sata i 15 minuta (15 minuta inicijalizacije prometnog toka i 24 sata analiziranih podataka).

Rezultati su prikazani u Prilogu E.

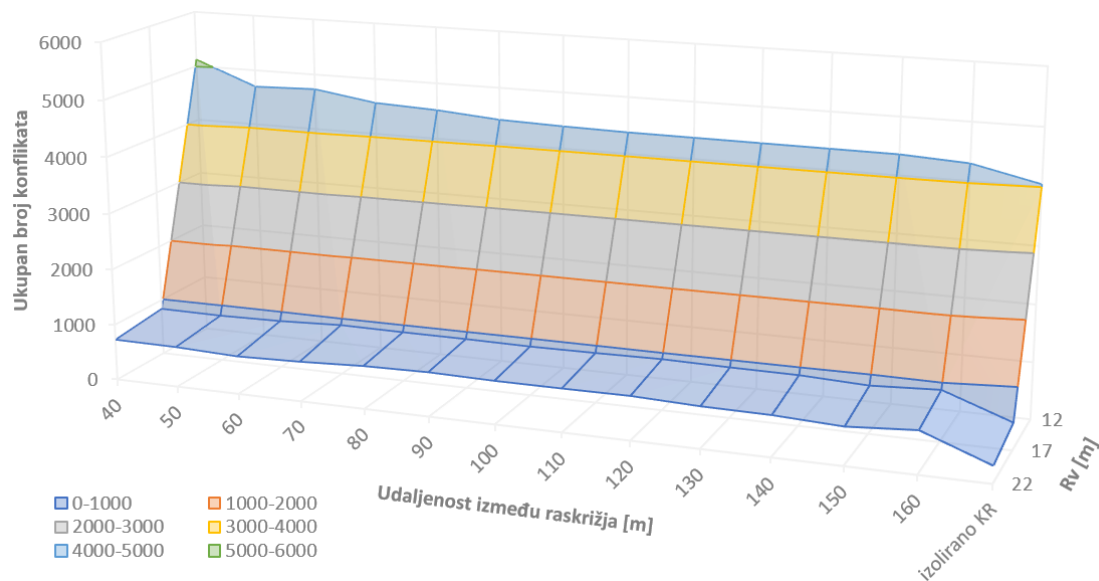
9.2. Analiza i interpretacija broja konflikata u 24-satnom razdoblju

Na temelju baze podataka dobivene iz VISSIM-a i SSAM-a, provedena je detaljna analiza kojom je ocijenjen utjecaj promatranih parametara na ukupan broj konflikata unutar analiziranih scenarija.

Rezultati pokazuju izražen utjecaj udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja na broj konflikata koji je osobito vidljiv kod raskrižja manjeg vanjskog polumjera, $R=12\text{m}$. Scenariji koji obuhvaćaju izolirana kružna raskrižja pokazali su sustavno manji broj konflikata u odnosu na scenarije s međusobno bliskim raskrižjima. Kod minimalne analizirane udaljenosti između raskrižja od 40 m, zabilježen je porast ukupnog broja konflikata u rasponu od 40 % do 60 %, pri čemu je taj utjecaj najizraženiji kod raskrižja s vanjskim polumjerom od 12 m.

Kod raskrižja većih dimenzija (vanjski polumjer 17 i 22 m) također je prisutan negativan utjecaj manjeg međurazmaka raskrižja, s povećanjem broja konflikata uglavnom između 20 % i 40 %.

Slika 9.1 prikazuje kombinirani utjecaj vanjskog polumjera kružnog raskrižja (R_v) i udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja na ukupni broj konflikata. Prikazani rezultati odnose se na scenarije s udjelom prometa od 70 % na glavnom smjeru i trajanjem crvenog vremena na semaforu od 22 sekunde.



Slika 9.1. Utjecaj vanjskog polumjera i udaljenosti između raskrižja na ukupan broj konflikata (GS=70%, cs=22s)

Kod kružnih raskrižja s najmanjim analiziranim vanjskim polumjerom (12 m), povećanje udaljenosti raskrižja s minimalnih 40 m na maksimalnih 160 m rezultira smanjenjem ukupnog broja konflikata u rasponu od približno 8 % do 15 %. Primjerice, za scenarij s udjelom glavnog prometnog toka od 70 % i trajanjem crvenog vremena semafora od 22 s, broj konflikata smanjuje se s 5122 (udaljenost 40 m) na 4404 (udaljenost 160 m), što predstavlja smanjenje od oko 14 %.

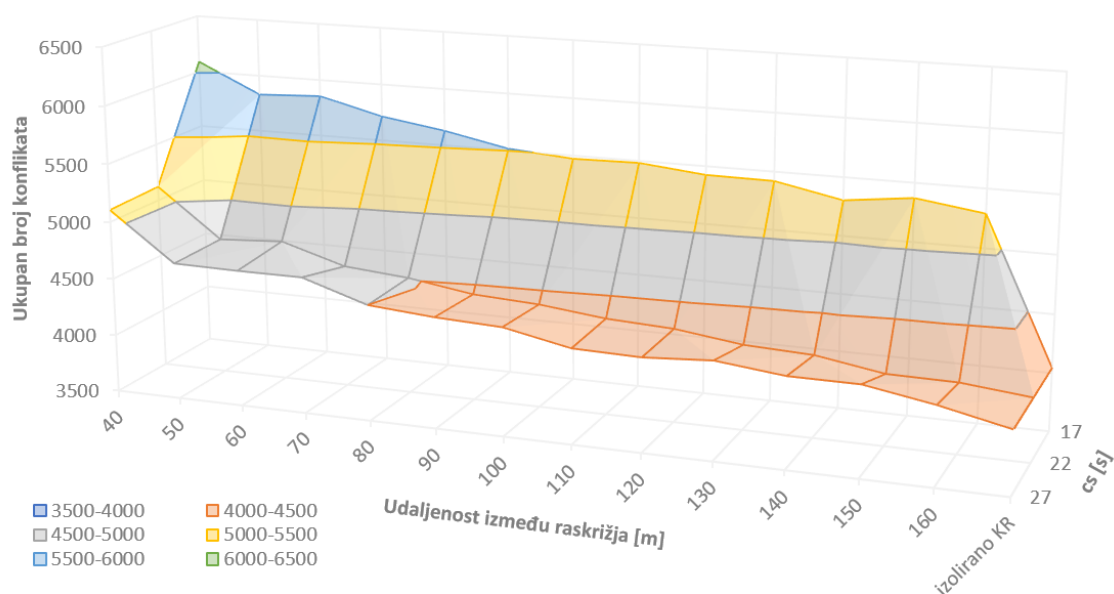
Kod kružnih raskrižja srednje veličine (vanjski polumjer 17 m), utjecaj povećanja udaljenosti između raskrižja na broj konflikata manje je izražen, krećući se u rasponu od 5 % do 10 %. U slučaju 70-postotnog udjela glavnog prometnog toka i crvenog vremena semafora od 22 s, broj konflikata smanjuje se s 904 (40 m) na 834 (160 m), što odgovara smanjenju od oko 7 %. Sličan intenzitet smanjenja konflikata zabilježen je i kod raskrižja većih dimenzija (vanjski polumjer 22 m).

Detaljnija analiza pokazuje da veličina vanjskog polumjera kružnog raskrižja ima dominantan utjecaj na broj konflikata. Preciznija kvantifikacija ovog utjecaja prikazana je korelacijskom analizom u poglavlju 9.3. Promjena vanjskog polumjera s najmanjeg (12 m) na srednji (17 m) donosi izrazito značajno smanjenje broja konflikata, i to u rasponu od 75 % do 90 %. U slučaju izoliranog raskrižja s 70-postotnim udjelom glavnog smjera, broj konflikata smanjuje se s 4044 (Rv=12 m) na 472 (Rv=17 m), što predstavlja smanjenje od približno 88 %.

Daljnjim povećanjem vanjskog polumjera kružnog raskrižja sa 17 m na 22 m postiže se dodatno smanjenje broja konflikata, u rasponu od 20 % do 35 %, no intenzitet ovog smanjenja znatno je manji nego u prethodnom koraku. Kod udaljenosti od 40 m i trajanja

crvenog vremena od 17 s, broj konflikata smanjuje se sa 773 ($R_v=17$ m) na 535 ($R_v=22$ m), odnosno za dodatnih 31 %.

Na slici 9.2 prikazan je kombinirani utjecaj trajanja crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju (cs) i udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja na ukupan broj konflikata za scenarije s udjelom glavnog prometnog toka od 70 % i vanjskim polumjerom kružnog raskrižja od 12 m.

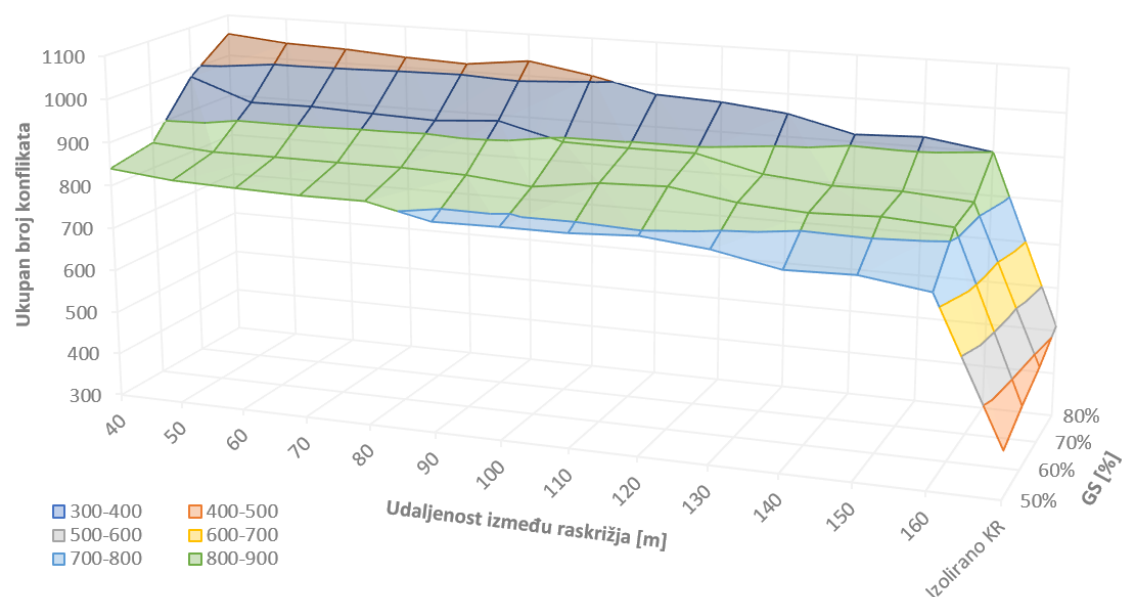


Slika 9.2. Utjecaj duljine crvenog vremena i udaljenosti između raskrižja na ukupan broj konflikata ($GS=70\%$, $R_v=12m$)

Na malim kružnim raskrižjima (vanjski polumjer 12 m), produljenje crvenog vremena s 17 na 22 sekunde rezultira jasnim smanjenjem broja konflikata, u rasponu od 10 % do 20 %. Primjerice, pri udaljenosti raskrižja od 40 m i 70-postotnom udjelu prometa na glavnom smjeru, broj konflikata smanjuje se s 6088 (za 17 s crvenog vremena) na 5122 (za 22 s crvenog vremena), što predstavlja pad od približno 16 %. Daljnje produljenje crvenog vremena s 22 na 27 sekundi donosi dodatno smanjenje konflikata, ali slabijeg intenziteta, prosječno oko 10 %.

Kod većih kružnih raskrižja (vanjskog polumjera 17 i 22 m), utjecaj trajanja crvenog vremena znatno je manje izražen, a smanjenje broja konflikata u prosjeku iznosi oko 5 %.

Na slici 9.3. prikazan je kombinirani utjecaj udjela prometa na glavnom smjeru (GS) i udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja na ukupan broj konflikata. Prikazani su rezultati scenarija za duljinu crvenog vremena od 17 s te vanjskim polumjerom kružnog raskrižja od 17 m.



Slika 9.3. Utjecaj udjela prometa na glavnom smjeru (GS) i udaljenosti između raskrižja na ukupan broj konflikata ($cs=17$, $Rv=17m$)

Smanjenje udjela prometa na glavnom smjeru s 80 % na 50 % u slučaju manjih raskrižja (12 m) uzrokuje povećanje konflikata u prosjeku od 20–30 %. Izolirano raskrižje pokazuje porast broja konflikata s 3407 (80% prometa na glavnom smjeru) na 4329 (50 % prometa na glavnom smjeru) što je rast od 27 %.

Na raskrižjima većih polumjera (17 i 22 m), ravnomjerno raspoređen promet po smjerovima (50% prometa na glavnom mjeru) dovodi do smanjenja broja konflikata za prosječno 10 %.

9.3. Statistička analiza i razvoj modela predikcije broja konflikata

Razvoj modela za predikciju broja konflikata temelji se na analizi rezultata niza prometnih scenarija opisanih u prethodnim poglavljima. Statistička obrada podataka obuhvaćala je sljedeće metode.

- (1) Deskriptivna analiza korištena je za utvrđivanje karakteristika varijabilnosti pojave različitih tipova konflikata te za utvrđivanje ciljne varijable regresijskog modela
- (2) Pearsonov test korelacije primijenjen je za ispitivanje međuodnosa ulaznih parametara modela na sve vrste konflikata
- (3) Višestruka linearna regresija provedena je metodom postupnog odabira prediktora, s ciljem identifikacije statistički značajnih parametara modela koji imaju direktan utjecaj na broj konflikata.

Deskriptivni statistički pokazatelji za sve analizirane vrste konflikata prikazani su u tablici 9.1.

Tablica 9.1. Deskriptivna statistika konflikata unutar 24-satnog perioda

	Udaljeno st raskrižja	Postotak prometa na glavnom smjeru	Duljina crvenog vremena	Vanjski polumjer	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar uslijed prestroj avanja	Ukupni broj konflikata
Broj opažanja	480	480	480	480	480	480	480	480
Minimum	40,00	0,50	0,00	12,00	0,000	284	3	288
Maksimum	1000,00	0,80	27,00	22,00	1915	1425	3619	6440
Srednja vrijednost	122,50	0,65	21,45	17,00	502,06	756	915,16	2174,21
Standardna devijacija	145,44	0,11	5,30	4,08	674,90	178,17	1275,12	2020,42

U svim scenarijima sudari straga čine više od 90% ukupnog broja potencijalnih konflikata. Najveću varijabilnost pokazuje ukupan broj konflikata, što je vidljivo iz širokog raspona vrijednosti (288 do 6440) i visoke standardne devijacije (2020,42). Ukupan broj konflikata objedinjuje sve vrste konflikata, pružajući cjelovitiju sliku prometne sigurnosti na kružnom raskrižju. Budući da različiti parametri mogu različito utjecati na pojedine vrste konflikata, analiziranje ukupnog broja konflikata omogućava identifikaciju parametara koji imaju najizraženiji sveukupni utjecaj te je daljnji razvoj modela usmjeren na ukupan broj konflikata unutar 24 sata.

U tablici 9.2. prikazana je analiza korelacija parametara modela i pojedinih vrsta konflikata.

Tablica 9.2. Korelacijska matrica

Parametri	Udaljenost raskrižja	Postotak prometa na gl. smjeru	Duljina crv. vremena	Vanjski polumjer	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar uslijed prestrojavanja	Ukupni broj konflikata
Udaljenost raskrižja	1	0,00	-0,63	0,00	-0,01	-0,37	-0,02	-0,29
Postotak prometa na glavnom smjeru	0,000	1	0,00	0,00	-0,05	0,19	-0,07	-0,10
Duljina crvenog vremena	-0,63	0,00	1	0,00	-0,04	0,24	-0,03	0,16
Vanjski polumjer	0,00	0,00	0,00	1	-0,85	-0,56	-0,85	-0,81
Bočni sudar	-0,01	-0,05	-0,04	-0,85	1	0,36	0,99	0,90
Sudar straga	-0,37	0,19	0,24	-0,56	0,36	1	0,38	0,74
Sudar uslijed prestrojavanja	-0,02	-0,07	-0,03	-0,85	0,99	0,38	1	1,00
Ukupni broj konflikata	-0,29	-0,10	0,16	-0,81	0,90	0,74	1,00	1

Povećanje udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja pokazuje umjereno negativan utjecaj na pojavu konflikata tipa sudara straga, dok je njegov utjecaj na bočne sudare i konflikte nastale uslijed prestrojavanja gotovo zanemariv. Raspodjela prometnog toka, odnosno povećanje udjela vozila koja prometuju glavnim smjerom, pozitivno djeluje na smanjenje broja sudara straga. Duljina trajanja crvenog vremena na susjednom semaforiziranom raskrižju također ima umjereno pozitivan utjecaj na smanjenje sudara straga, ali pritom nema značajan utjecaj na bočne sudare i konflikte uslijed prestrojavanja.

Najznačajniji parametar koji utječe na povećanje razine prometne sigurnosti jest veličina vanjskog polumjera kružnog raskrižja koji pokazuje izrazito negativan utjecaj na sve analizirane vrste konflikata.

Na temelju provedenih analiza pristupilo se razvoju modela za predikciju broja konflikata. Višestrukom linearnom regresijom istražen je utjecaj odabranih parametara na ukupan broj konflikata. Analiza je provedena metodom postupnog uključivanja, pri čemu je model formiran na temelju značajnosti ulaznih varijabli. Postupak je detaljno opisan u poglavlju 4.3.3.

Ispitane su četiri nezavisne varijable: udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja, raspodjela prometa na glavnom i sporednom smjeru, duljina crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju i vanjski polumjer kružnog raskrižja. Kao zavisna varijabla analiziran je ukupni broj konflikata. Podaci korišteni za analizu podijeljeni su u skup za učenje od 384 scenarija te validacijski skup od 96 scenarija.

Metoda postupnog uključivanja rezultirala je konačnim modelom koji uključuje tri statistički značajna ulazna parametra: udaljenost raskrižja, duljina crvenog vremena te vanjski polumjer raskrižja. Parametar raspodjele prometa na glavnom i sporednom smjeru isključen je iz završnog modela jer nije pokazao značajan doprinos objašnjenju varijance ukupnog broja konflikata. Parametri dobivenog regresijskog modela prikazani su u tablici 9.3.

Tablica 9.3. Rezultati višestruke linearne regresije za predviđanje broja konflikata

Izvor	Koeficijent	Standardna pogreška	t	p-vrijednost
Presjek	5020,477	145,404	34,528	<0,0001
Udaljenost raskrižja (m)	-0,942	0,184	-5,114	<0,0001
Postotak prometa na glavnom smjeru (%)	0,000	0,000		
Duljina crvenog vremena (s)	-14,260	4,777	-2,985	0,003
Vanjski polumjer (m)	-190,123	4,895	-38,841	<0,0001

Sva tri parametra imaju negativne regresijske koeficijente, što znači da povećanje bilo kojeg od parametra utječe na smanjenje broja konflikata (uz iste prometne uvjete).

Vanjski polumjer kvantitativno je najjači faktor, a udaljenost raskrižja i duljina crvenog vremena pokazuju slabije, ali i dalje značajne negativne utjecaje.

Analizirana su tri modela složenosti (s jednim, dva i tri ulazna parametra), a njihovi pokazatelji preciznosti i složenosti prikazani su u tablici 9.4.

Tablica 9.4. Odabir broja parametara regresijskog modela

Br. varijabli	Varijable	MSE	R^2	Prilagođeni R^2	Mallowov C_p	Akaike AIC
1	Vanjski polumjer	162365,094	0,787	0,787	26,019	4609,074
2	Udaljenost raskrižja / Vanjski polumjer	155878,772	0,796	0,795	10,779	4594,412
3	Udaljenost raskrižja / Duljina crvenog vremena / Vanjski polumjer	152708,505	0,801	0,799	3,872	4587,513

Model s tri parametra (konačni model) pokazuje najnižu srednju kvadratnu grešku ($MSE=152708,505$) i najviši koeficijent determinacije ($R^2=0,801$), što znači da 80,1 % varijance ukupnog broja konflikata objašnjavaju uključeni parametri modela. Preostali dio (19,9 %) varijance ostaje neobjašnjen regresijskim modelom (pripisuje se drugim neuključenim utjecajima ili nasumičnoj pogrešci). Prilagođeni R^2 iznosi 0,799, gotovo identičan R^2 , što znači da dodavanje parametara modela nije narušilo učinkovitost regresijskog modela s obzirom na broj parametara. Visoki koeficijent determinacije ukazuje da model vrlo dobro pristaje podacima i da postoji snažna linearna veza između parametara modela.

Kako bi se dodatno procijenila točnost i prediktivna sposobnost regresijskog modela, korištena je parcijalna validacija metodom izdvajanja testnog skupa (eng. *hold-out* validacija). Na skupu za učenje provedeno je učenje modela, dok se validacijski skup koristio za procjenu konačne sposobnosti modela na neviđenim podacima. Ovakva metoda osigurava realniju procjenu pogreške na budućim podacima i smanjuje rizik od pretjeranog prilagođavanja modela podacima skupa za treniranje modela.

Pokazatelji prilagodbe konačnog regresijskog modela prikazani su u tablici 9.5.

Tablica 9.5. Statistika prilagodbe regresijskog modela

Statistika	Skup za učenje	Validacijski skup
Broj scenarija	384	96
Zbroj težina	384	96
Stupnjevi slobode (DF)	380	92
R^2	0,801	0,795
Prilagođeni R^2	0,799	0,793
MSE	152708,505	158211,561
RMSE	390,779	397,758
MAPE	34,538	36,082

Validacijski skup pokazuje R^2 od 0,795 (prilagođeni $R^2 = 0,739$), što je gotovo jednako visoko objašnjenje varijance kao i skupa za učenje. Srednja kvadratna pogreška predikcije na validaciji (MSE = 158212) i pripadni RMSE (397,758) vrlo su bliski vrijednostima skupa za učenje (MSE = 152708,505; RMSE = 390,779). Prosječna apsolutna pogreška iznosi 36,1% na validacijskom skupu (naspram 34,5% na skupu za učenje). Rezultati pokazuju da regresijski model nema problema s prenaučenošću te da dobro generalizira – prediktivne relacije između parametara zadržavaju sličnu jačinu i na validacijskim podacima.

U kontekstu analize sigurnosti prometa, gdje varijabilnost konflikata može biti izrazito velika (što potvrđuje visoka standardna devijacija ukupnog broja konflikata: 2020,42 uz prosjek od 2174,21), ovakva vrijednost MAPE-a nije neuobičajena.

Primjerice, u istraživanju (Li i sur., 2023) gdje je korišteno strojno učenje za predviđanje broja konflikata postignuta je točnost MAPE od 36,99%. U radu (Li i sur., 2016) razvijen je linearni regresijski model koji predviđa složeni indeks rizika uz MAPE 25,9 %.

Na temelju provedene statističke analize, definiran je model predikcije ukupnog broja konflikata, izražen jednadžbom (24):

$$\textbf{Konflikti} = 5020,476 - 0,942 \cdot D - 14,259 \cdot CS - 190,123 \cdot R_v \quad (24)$$

gdje su:

- *Konflikti* – ukupan broj konflikata na prometnom koridoru uključujući kružno i semaforizirano raskrižje (razvijen za dnevno prometno opterećenje od 20 000 voz/dan)
- *D* (m) – udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja, u rasponu 40-160 m
- *CS* (s) – duljina crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju, u rasponu 17–27 s
- *R_v* (m) – vanjski polumjer kružnog raskrižja, u rasponu 12 – 22 m

Model osigurava pouzdane rezultate unutar definiranih raspona ulaznih parametara, dok za primjenu izvan navedenih granica valjanost rezultata treba dodatno provjeriti.

Rezultati analize pokazuju da veća udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja smanjuje broj potencijalnih konflikata – na najmanjoj razmatranoj udaljenosti (40 m) zabilježeno je 40–60% više konflikata, osobito kod malih kružnih raskrižja ($R_v = 12m$). Kao najsnažniji parametar izdvaja se veličina kružnog raskrižja: povećanje vanjskog polumjera s 12 m na 17 m smanjuje broj konflikata za 75–90 %, a daljnji rast na 22 m donosi dodatno smanjenje od 20–35%. Također, dulje trajanje crvenog svjetla na susjednom semaforu pridonosi smanjenju konflikata (do 20 % u slučaju malog kružnog raskrižja), dok se utjecaj raspodjele prometa po smjerovima pokazao značajnim samo kod manjih raskrižja (manji udio prometa na glavnom smjeru dovodi do 20–30 % više konflikata).

Konačni regresijski model predikcije ukupnog broja konflikata, validiran na nezavisnom skupu podataka, pokazao je visoku prediktivnu sposobnost ($R^2 = 0,801$), stabilnost rezultata te umjerenu apsolutnu pogrešku (34,53 %). Rezultati pokazuju da razvijeni model učinkovito opisuje utjecaj ključnih prometnih i projektnih parametara na ukupan broj konflikata prometnom koridoru kružnog i semaforiziranog raskrižja.

9.4. Usporedba modela predikcije broja konflikata s rezultatima kalibriranih mikrosimulacijskih modela u Osijeku i Poreču

Kako bi se usporedili rezultati regresijskog modela za predikciju broja konflikata, detaljno opisanog u poglavlju 9.3., s rezultatima prometnih mikrosimulacijskih modela izrađenih za gradove Osijek i Poreč, provedena je kalibracija prometnih mikrosimulacijskih modela na temelju izmjerenih vremena putovanja, prikazanih u poglavlju 8.4.

Kalibracija modela sastoji se od pet koraka (Ištoka Otković i sur., 2023):

- (1) Analiza konteksta razmatranog problema
- (2) Odabir ulaznih parametara mikrosimulacijskog modela
- (3) Definiranje izlaznih varijabli mikrosimulacijskog modela (prometnih parametara) koje će se uspoređivati s izmjerenim podacima
- (4) Uspostava baze izmjerenih vrijednosti za svaki promatrani parametar
- (5) Izrada preliminarne simulacijskog modela koji će poslužiti kao početna osnova za kalibraciju.

U programu VISSIM, dva tipa parametara – mjerljivi i nemjerljivi (odnosno oni koje je teško izmjeriti) – značajno utječu na rezultate simulacije. Mjerljivi parametri uključuju količinu prometa, raspodjelu i strukturu prometa, prometnu regulaciju, brzinu vozila te dinamička svojstva prometnog toka. Točnost ovih parametara prikupljenih na terenu ključna je jer izravno utječe na pouzdanost modela.

Za potrebe ove analize odabrani su sljedeći parametri za kalibraciju:

- Prirast slučajnog broja (eng. *Random seed increment*)
- Prosječni razmak zaustavljenih vozila (eng. *Average standstill distance, m*) – početna (zadana) vrijednost je 2
- Dodatni dio sigurnosnog razmaka (eng. *Additive part of the desired safety distance, m*) – početna vrijednost je 2
- Multiplikativni dio sigurnosnog razmaka (eng. *Multiplicative part of the desired safety distance, m*) – početna vrijednost je 3

Prirast slučajnog broja određuje veličinu koraka kojim se mijenja vrijednost generatora slučajnih brojeva, što dovodi do generiranja različitih vrijednosti stohastičkim varijablama matematičkih modela simulatora.

Ostala tri parametra odnose se na ponašanje vozača definirano Wiedemann 74 modelom slijedenja vozila, koji je prikladan za simulaciju urbanih prometnih mreža. Prosječni razmak zaustavljenih vozila označava udaljenost koju vozači održavaju između svog i vozila ispred u uvjetima potpunog zaustavljanja, što je odraz lokalne navike vozača. Tijekom procesa kalibracije vrijednosti ovog parametra varirane su u rasponu od 1 do 3 m.

Dodatni dio sigurnosnog razmaka odnosi se na konstantni dio sigurnosne udaljenosti koju vozači održavaju neovisno o brzini vozila te predstavlja minimalnu sigurnosnu distancu u vožnji, neovisno o brzini. Ovaj je parametar tijekom kalibracije variran u rasponu od 1 do 5 m.

Multiplikativni dio sigurnosnog razmaka opisuje dio sigurnosne udaljenosti koji je ovisan o brzini vožnje. Vrijednost ovog parametra množi se s brzinom vozila, određujući time dodatni razmak koji vozači održavaju ovisno o brzini kojom se kreću. Tijekom kalibracije parametar je variran u rasponu od 1 do 6.

Navedeni parametri ponašanja vozača izravno reguliraju modele razmaka između vozila tijekom vožnje i stajanja, a istraživanja su pokazala njihovu izrazitu osjetljivost – čak i manje promjene njihovih vrijednosti mogu značajno utjecati na rezultate simulacije (Gunarathne i sur., 2023; Lu i Wang, 2015). Također, studije provedene na kalibraciji gradskih prometnih mreža (Jayasooriya i Bandara, 2018; Park i sur., 2006) ukazuju na to da prosječni razmak zaustavljenih vozila, aditivni i multiplikativni dio željenog sigurnosnog razmaka najviše utječu na duljinu formiranih kolona i vremena čekanja vozila.

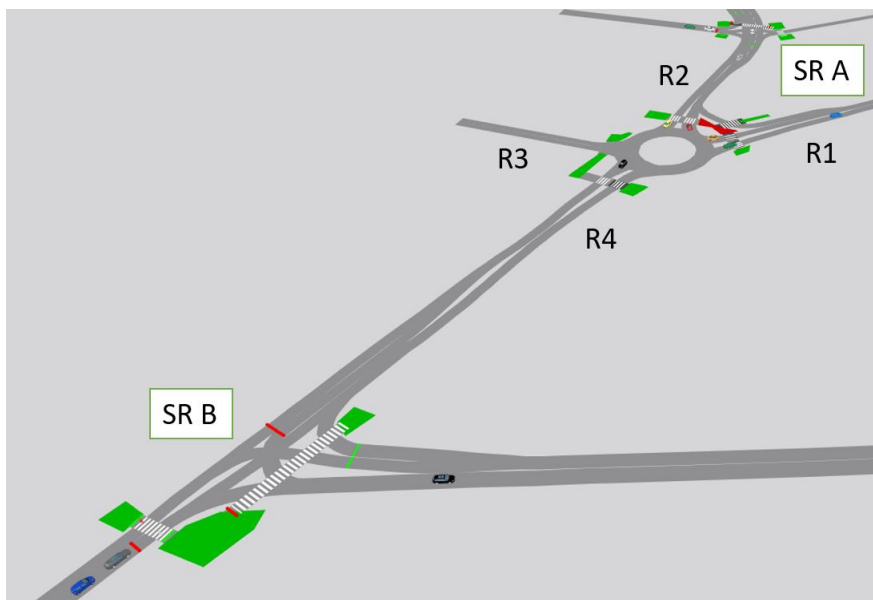
Vrijeme putovanja odabrano je kao temeljni pokazatelj kalibracije jer integrira niz ključnih elemenata ponašanja vozača, uključujući željene brzine, reakcijska vremena, interakcije između vozila i formiranje kolona, pružajući sveobuhvatnu sliku dinamike prometnog toka. Dodatna prednost ovog pokazatelja je njegova relativno jednostavna i precizna mjerljivost. Istraživanja potvrđuju učinkovitost vremena putovanja kao kalibracijskog kriterija u različitim prometnim uvjetima, pri čemu ovaj pokazatelj jasno odražava funkcionalnu učinkovitost prometnog sustava i omogućuje pouzdano vrednovanje kvalitete simulacijskog modela (Ištoka Otković i sur., 2013; Park i Qi, 2005; Toledo i sur., 2004).

9.4.1. Kalibracija mikrosimulacijskih modela temeljenih na stvarnim raskrižjima u Osijeku i Poreču

Na temelju eksperimentalnih istraživanja provedenih u gradovima Osijeku i Poreču, detaljno opisanih u poglavlju 8, izrađeni su mikrosimulacijski modeli odabranih segmenata prometne mreže. Kako bi se dobili što relevantniji podaci, mikrosimulacijski modeli potom su kalibrirani na temelju vremena putovanja.

Analizirano je ukupno jedno kružno raskrižje u Gradu Osijeku te tri kružna raskrižja u Gradu Poreču.

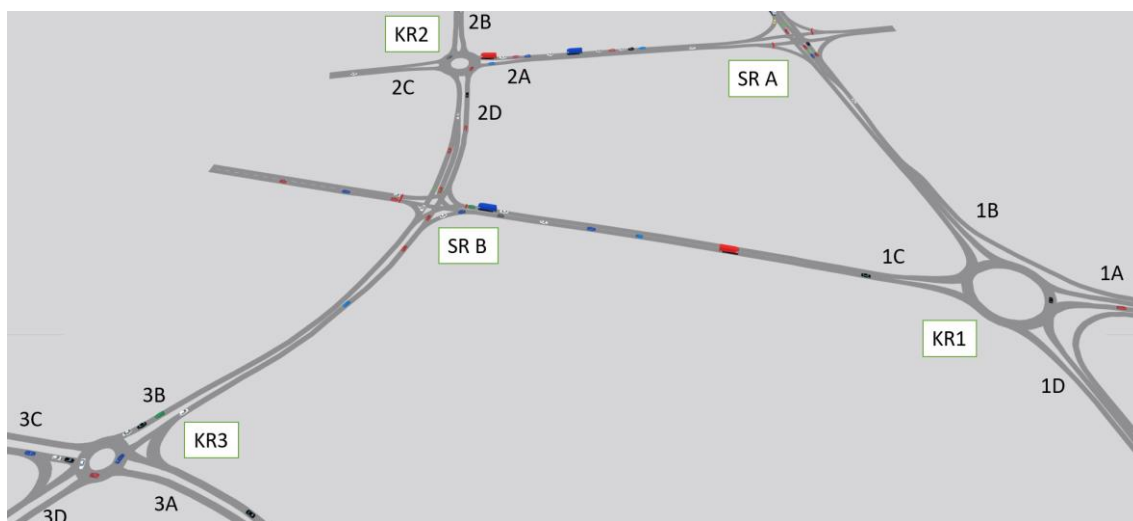
Mikrosimulacijski model prometnog koridora u Osijeku prikazan je na slici 9.4. Analizirano kružno raskrižje, vanjskog polumjera 15 metara, smješteno je između dva semaforizirana raskrižja: SR A na udaljenosti od 122 m i SR B na udaljenosti od 178 m.



Slika 9.4. Mikrosimulacijski model prometnog koridora u Gradu Osijeku

U Poreču je izrađen mikrosimulacijski model dijela gradske prometne mreže prikazan na slici 9.5., pri čemu su analizirana sljedeća kružna raskrižja:

- KR1, vanjskog polumjera 24 m, udaljeno 226 m od semaforiziranog raskrižja SR A,
- KR2, vanjskog polumjera 18 m, udaljeno 230 m od semaforiziranog raskrižja SR A te 125 m od semaforiziranog raskrižja SR B,
- KR3, vanjskog polumjera 11,5 m, udaljeno 201 m od semaforiziranog raskrižja SR B.



Slika 9.5. Mikrosimulacijski model prometne mreže u Gradu Poreču

Izrada modela prometnih mikrosimulacija postojećeg stanja temeljila se na digitalnoj ortofoto podlozi te projektnoj dokumentaciji koju su ustupili Grad Osijek i Grad Poreč. Operativna brzina, struktura prometnog toka i dnevno prometno opterećenje utvrđeni su provođenjem terenskih mjerenja te analizom podataka dobivenih s brojača prometa (Poglavlje 8).

Ključni ulazni parametri korišteni pri izradi modela prometnih mikrosimulacija prikazani su u tablici 9.6., uključujući vanjski polumjer analiziranih kružnih raskrižja, dnevno prometno opterećenje, raspodjelu prometnih tokova na glavnom i sporednom smjeru, strukturu prometnog toka te izmjerene operativne brzine.

Tablica 9.6. Vanjski polumjer, količina prometa, prometna raspodjela, struktura prometa i operativna brzina analiziranih raskrižja

KR	Privoz	Rv	Prometno opterećenje	Raspodjela prometa	Struktura prometa			V85
		m	voz/dan	glavni: sporedni	OV	kamion	TTV	km/h
Grad Osijek								
KR	R1	15	3263	72:28	93,3%	6,0%	0,7%	56
	R2		6064		79,6%	19,6%	0,8%	48
	R3		1222		100,0%	0,0%	0,0%	27
	R4		5870		94,6%	4,7%	0,7%	46
Grad Poreč								
KR1	1A	24	5959	55:45	96,6%	98,5%	2,5%	64
	1B		7537		92,4%	165,1%	4,8%	48
	1C		6258		97,4%	74,2%	1,1%	52
	1D		7974		96,7%	67,5%	9,0%	52
KR2	2A	18	3542	61:39	98,8%	21,8%	0,0%	32
	2B		2208		97,3%	45,5%	0,0%	36
	2C		3139		97,7%	37,8%	0,0%	29
	2D		5063		98,1%	27,9%	1,7%	36
KR3	3A	11,5	1842	63:37	96,7%	51,0%	9,2%	45
	3B		3541		97,2%	34,4%	1,7%	53
	3C		4196		97,2%	27,9%	10,6%	41
	3D		2697		97,4%	30,8%	0,8%	53

Za potrebe provođenja mikrosimulacija korišten je softverski alat PTV VISSIM. Za svaki scenarij modela prometnih mikrosimulacija provedeno je deset simulacija. Kao izlazni podatak simulacije dobivene su trajektorije kretanja vozila spremljene u standardiziranom formatu (.trj), koje su dalje analizirane primjenom alata SSAM (eng. *Surrogate Safety Assessment Model*). Rezultat analize sigurnosti bio je ukupan broj konflikata, prikupljen tijekom 24-satnog perioda simulacije. Svaka pojedinačna simulacija trajala je ukupno 24 sata i 15 minuta, od čega je prvih 15 minuta korišteno za inicijalizaciju prometnog toka, dok su preostalih 24 sata obuhvaćala podatke za analizu sigurnosti.

Kalibracija modela prometnih mikrosimulacija iterativan je postupak određivanja optimalnih vrijednosti ulaznih parametara modela. Kalibracija se temeljila na usporedbi simuliranih i izmjerenih vremena putovanja između kružnog i semaforiziranog raskrižja. Terenska mjerenja izvršena su na ukupno šest ruta duljine 300 metara, dvije u Gradu Osijeku te četiri u Gradu Poreču, pri čemu je za svaku rutu provedeno 15 pojedinačnih mjerenja. Detalji o postupku mjerenja i dobivenim rezultatima prikazani su u poglavlju 8. Odabrana duljina od 300 metara odgovara duljini korištenoj pri razvoju regresijskog modela.

Kriterij kalibracije modela određen je jednadžbom (25) (Ištoka Otković, 2013):

$$\left| \frac{T_{MOD} - T_{MEAS}}{T_{MEAS}} \right| \leq 5\% \quad (25)$$

pri čemu je T_{MOD} srednja vrijednost modelom predviđenog vremena putovanja između referentnih točaka, a T_{MEAS} srednja vrijednost izmjerenog vremena putovanja između referentnih točaka. Model se smatra kalibriranim kada zadovolji navedeni uvjet.

Rezultati usporedbe vremena putovanja prikazani su u tablici 9.7., s relativnim odstupanjima u rasponu od 0,50 % do 4,79 %, što potvrđuje dobru usklađenost simulacijskog modela s terenskim podacima.

Tablica 9.7. Usporedba rezultata vremena putovanja mikrosimulacijskih modela i terenskih mjerenja

	Osijek			Poreč		
	Ruta A	Ruta B	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4
TMEAS (s)	56,4	43,13	68,06	81,6	70,2	60,33
TMOD (s)	53,7	41,3	64,9	82,01	73,2	59,3
Relativno odstupanje	4,79%	4,24%	4,64%	0,50%	4,27%	1,71%

Optimalne vrijednosti ulaznih parametara ponašanja vozača korištene za kalibraciju navedene su u tablici 9.8.

Tablica 9.8. Ulazni parametri ponašanja vozača - VISSIM

Parametar	Početni	Osijek – kalibrirani	Poreč - kalibrirani
Prirast slučajnog broja	1	9	6
Prosječni razmak zaustavljenih vozila (m)	2	2,5	2,8
Dodatni dio sigurnosnog razmaka (m)	2	1,8	2,7
Multiplikativni dio sigurnosnog razmaka (m)	3	3,7	3,5

9.4.2. Usporedba regresijskog modela i rezultata kalibriranih modela prometnih mikrosimulacija

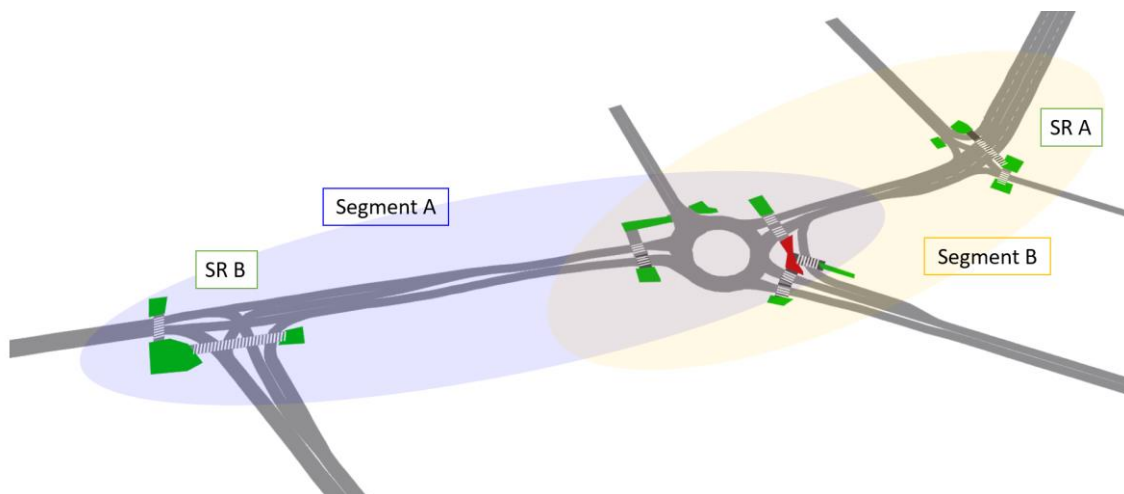
Usporedba predviđenog broja konflikata temeljem regresijskog modela s brojem konflikata dobivenim iz kalibriranih prometnih mikrosimulacija provedena je radi provjere pouzdanosti analitičkog pristupa te utvrđivanja razlika između analitičkog i simulacijskog modeliranja.

Regresijski model razvijen je za prometni koridor koji se sastoji od jednog kružnog i jednog semaforiziranog raskrižja te za dnevno prometno opterećenje od 20 000 vozila. Iz tog je razloga kalibrirane mikrosimulacijske modele u Osijeku i Poreču bilo potrebno prilagoditi okvirima regresijskog modela.

Usporedba je provedena kroz sljedeće korake:

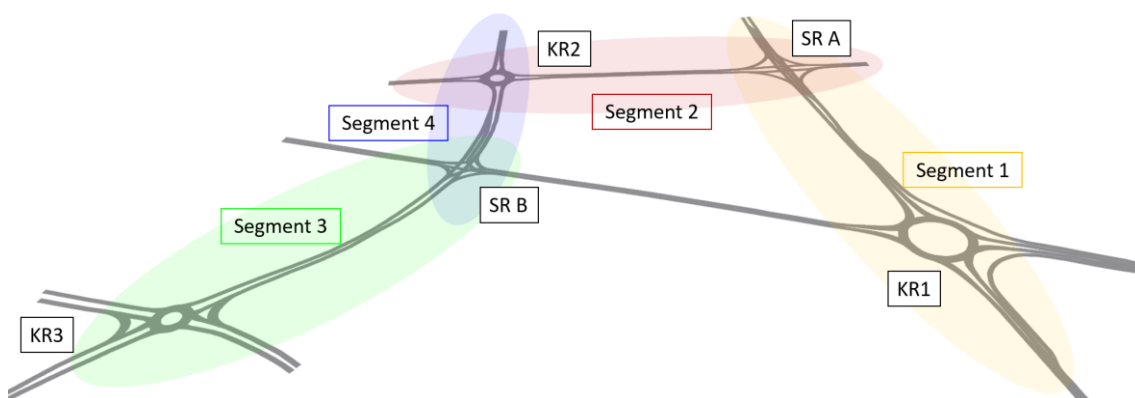
- (1) **Segmentacija modela** – Kalibrirani mikrosimulacijski modeli prometne mreže u Poreču i koridora u Osijeku podijeljeni su na segmente koji obuhvaćaju jedno kružno i jedno semaforizirano raskrižje
- (2) **Prilagodba prometnog opterećenja** – U svim analiziranim segmentima prometno opterećenje prilagođeno je vrijednosti od 20 000 voz/dan kako bi odgovaralo pretpostavkama regresijskog modela.
- (3) **Predikcija regresijskim modelom** – Za svaki segment izračunat je očekivani broj konflikata temeljen na regresijskom modelu (Izraz 24)
- (4) **Izračun odstupanja** – Utvrđene su razlike između analitički predviđenog broja konflikata i broja konflikata dobivenog primjenom modela procjene sigurnosti pomoću surogatnih pokazatelja (SSAM)
- (5) **Testiranje normalnosti razlika** – Normalnost raspodjele dobivenih razlika ispitana je primjenom Shapiro-Wilkova testa.
- (6) **Statistička analiza** – Provedeni su odgovarajući statistički testovi radi usporedbe rezultata i procjene značajnosti razlika.

Na mikrosimulacijskom prometnom modelu koridora u Osijeku analizirana su dva segmenta, prikazana na slici 9.6. Segment A sastoji se od kružnog raskrižja i semaforiziranog raskrižja SR A, dok segment B obuhvaća kružno raskrižje i semaforizirano raskrižje SR B.



Slika 9.6. Analizirani segmenti prometnog koridora u Gradu Osijeku

Na mikrosimulacijskoj prometnoj mreži grada Poreča analizirana su četiri segmenta, prikazana na slici 9.7. Segment 1 obuhvaća kružno raskrižje KR1 i semaforizirano raskrižje SR A, a segment 2 kružno raskrižje KR2 i semaforizirano raskrižje SR A. Segment 3 sastoji se od kružnog raskrižja KR3 i semaforiziranog raskrižja SR B, dok segment 4 povezuje kružno raskrižje KR2 sa semaforiziranim raskrižjem SR B.



Slika 9.7. Analizirani segmenti prometne mreže u Gradu Poreču

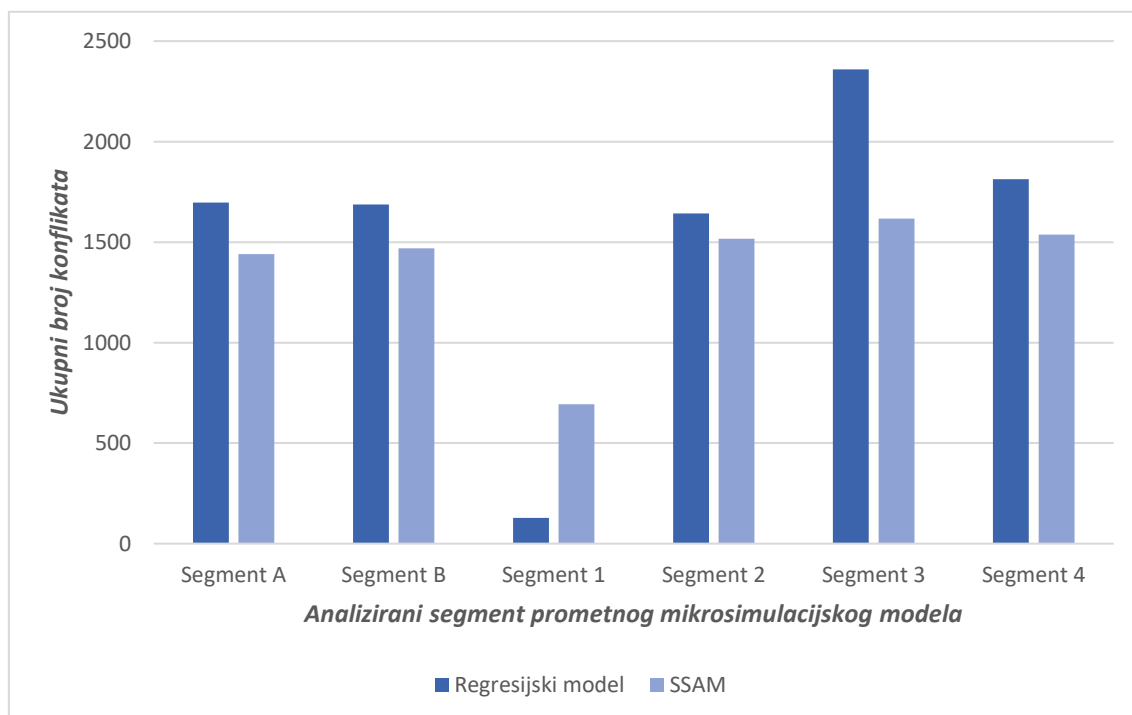
Na temelju izmjerenih parametara u stvarnim uvjetima – uključujući geometrijske karakteristike raskrižja, duljinu crvenog svjetla na susjednom semaforu te razmaka kružnog i semaforiziranog raskrižja, izračunat je očekivani broj konflikata (Izraz 24).

Tablica 9.9 prikazuje ulazne parametre korištene u usporedbi regresijskog modela i rezultata mikrosimulacija za analizirane segmente. Vrijednosti parametara koje izlaze izvan raspona primjene regresijskog modela su istaknute podebljano.

Tablica 9.9. Ulazni parametri za usporedbu regresijskog modela i rezultata mikrosimulacija

	Osijek		Poreč			
	Segment A	Segment B	Segment 1	Segment 2	Segment 3	Segment 4
Regresijski model – ukupni broj konflikata	1697	1687	128	1643	2360	1813
Duljina crvenog vremena [s]	25	22	25	35	25	25
Vanjski polumjer kružnog raskrižja [m]	15	15	24	14	11,5	14
Udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja [m]	122	178	226	230	125	201

Slika 9.8. prikazuje usporedbu analitički procijenjenog broja konflikata pomoću regresijskog modela i broja konflikata utvrđenog primjenom modela procjene sigurnosti pomoću surogatnih pokazatelja (SSAM).



Slika 9.8. Usporedba broja prometnih konflikata predviđenih modelom s brojem konflikata utvrđenih softverskim alatom SSAM

Prije usporedbe rezultata primjenom statističkih testova, ispitana je pretpostavka normalnosti raspodjele ukupnog broja konflikata za svaki segment. Za ispitivanje normalnosti primijenjen je Shapiro-Wilkov test koji provjerava nultu hipotezu da uzorak dolazi iz populacije s normalnom raspodjelom.

Rezultati Shapiro-Wilkovog testa za sve segmente, uključujući W-statistike, p-vrijednosti te zaključak o normalnosti raspodjele podataka, prikazani su u tablici 9.10.

Tablica 9.10. Rezultati Shapiro-Wilkovog testa normalnosti

Segment	<i>W</i>	<i>p</i>	Kriterij normalnosti ispunjen
Segment A	0,831	0,035	NE
Segment B	0,789	0,011	NE
Segment 1	0,644	0,000	NE
Segment 2	0,786	0,010	NE
Segment 3	0,642	0,000	NE
Segment 4	0,759	0,005	NE

Rezultati Shapiro-Wilkovog testa pokazali su da za sve analizirane segmente postoji statistički značajno odstupanje distribucije podataka od normalnosti ($p < 0,05$). Slijedom toga, za sve je segmente primijenjen neparametarski pristup, odnosno Wilcoxonov test za jedan uzorak.

Rezultati za svaki promatrani segment prikazani su u tablici 9.11., uključujući: Wilcoxonovu statistiku *V*, standardiziranu vrijednost testa statistike *Z* te razinu značajnosti testa (*p*-vrijednost).

Tablica 9.11. Rezultati Wilcoxonovog neparametarskog testa za jedan uzorak

Segment	<i>V</i>	<i>Z</i>	<i>p</i> -vrijednost
Segment A	12	-1,529	0,126
Segment B	9	-1,835	0,067
Segment 1	55	2,752	0,006
Segment 2	10	-1,735	0,083
Segment 3	0	-2,752	0,006
Segment 4	10	-1,734	0,083

Wilcoxonov test pokazuje da na segmentima A, B, 2 i 4 nema statistički značajne razlike između broja prometnih konflikata dobivenih primjenom modela procjene sigurnosti pomoću surogatnih pokazatelja (SSAM) i onih predviđenih regresijskim modelom.

Negativne vrijednosti *Z*-statistike u navedenim segmentima ukazuju na to da SSAM model sustavno daje nešto niže procjene broja konflikata u odnosu na regresijski model, ali se utvrđene razlike ne mogu statistički potvrditi kao značajne. Srednja apsolutna postotna pogreška (MAPE) između SSAM rezultata i rezultata regresijskog modela iznosi između 7,97 % i 15,22 %, što upućuje na vrlo dobro slaganje ova dva pristupa.

Segmenti 1 i 3 nalaze se izvan parametarskih granica regresijskog modela, obzirom na vanjski polumjer kružnog raskrižja. Segment 1 uključuje kružno raskrižje KR1 vanjskog polumjera 24 m, a segment 2 kružno raskrižje KR3 vanjskog polumjera 11,5 m.

Na ovim segmentima uočene su statistički značajne razlike između broja konflikata na temelju SSAM-a i regresijskog modela.

Na segmentu 1 vidljiva je pozitivna vrijednost Z statistike ($Z = 2,752$), što znači da SSAM predviđa značajno viši broj konflikata nego regresijski model. Obrnuto, u segmentu 3 negativna vrijednost Z statistike ($Z = -2,752$) ukazuje da SSAM daje značajno niže procjene konflikata u usporedbi s regresijskim modelom.

Budući da je vanjski polumjer kružnog raskrižja ranije identificiran kao najutjecajniji parametar regresijskog modela (poglavlje 9.3.), odstupanje vanjskog polumjer kružnog raskrižja od okvira modela, na ovim segmentima rezultiralo je povećanom pogreškom u procjeni broja konflikata.

Provedena usporedba pokazuje vrlo dobru usklađenost regresijskog modela predikcije broja konflikata s rezultatima kalibriranih mikrosimulacijskih modela za gradove Osijek i Poreč, uz prihvatljivu razinu odstupanja. Statističkom analizom utvrđeno je da nema značajne razlike između analitičkog pristupa (regresijskog modela) i mikrosimulacijskog pristupa (SSAM modela) kada su ispunjeni uvjeti primjene regresijskog modela.

9.5. Rezime – Razvoj modela za predikciju broja konflikata

Ovo poglavlje opisuje detaljan pristup prikupljanju, analizi i interpretaciji podataka o prometnim konfliktima dobivenih iz modela prometnih mikrosimulacija.

Cilj istraživanja bio je procijeniti utjecaj različitih prometnih i projektnih parametara na sigurnost kružnih raskrižja u neposrednoj blizini semaforiziranih raskrižja. Rezultati pokazuju kako udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja značajno utječe na broj konflikata, osobito kod malih kružnih raskrižja. Veličina vanjskog polumjera kružnog raskrižja ima dominantan utjecaj na smanjenje ukupnog broja konflikata, dok duljina crvenog vremena na susjednom semaforu pridonosi dodatnom, ali manje izraženom smanjenju konflikata.

Na temelju statističke analize razvijen je regresijski model za predikciju broja konflikata koristeći tri ulazna parametra: udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja, duljinu crvenog vremena na semaforu i vanjski polumjer kružnog raskrižja. Dobiveni regresijski model pokazao je visoku preciznost i dobru generalizacijsku sposobnost na nezavisnom validacijskom skupu, uz koeficijent determinacije od 0,801 i srednju apsolutnu pogrešku od 34,538 %.

Provedena usporedba rezultata regresijskog modela s rezultatima kalibriranih mikrosimulacijskih modela izrađenih za gradove Osijek i Poreč dodatno potvrđuje valjanost analitičkog pristupa. U većini slučajeva utvrđeno je vrlo dobro slaganje između predikcija analitičkog modela i rezultata dobivenih mikrosimulacijama. Statistička analiza pokazala je kako ne postoje značajne razlike između analitičkog pristupa i mikrosimulacijskih rezultata uz uvjet da su ispunjeni uvjeti primjene regresijskog modela.

10. ZAKLJUČAK

U ovom se poglavlju sažimaju ključni rezultati doktorskog istraživanja te se interpretira njihov znanstveni doprinos, kao i primjenjivost u unapređenju planiranja i projektiranja kružnih raskrižja. Poseban naglasak stavljen je na potvrdu postavljenih ciljeva i hipoteza, kao i na identificiranje novih spoznaja o utjecaju projektnih i prometnih parametara na učinkovitost prometnog toka i sigurnost kružnog raskrižja u integraciji sa semaforiziranim raskrižjem. Uz sintezu glavnih znanstvenih doprinosa, ukratko su prikazana ograničenja istraživanja te su definirani pravci daljnjih istraživanja, čime se otvara prostor za produbljivanje i proširenje istraživanja vezanih za interakciju kružnih raskrižja sa susjednim.

10.1. Znanstveni doprinos provedenog istraživanja

Premda su kružna raskrižja dobro poznat i široko primjenjivan tip raskrižja u teoriji i praksi prometnog planiranja i projektiranja, dosadašnja istraživanja većinom ih analiziraju kao izolirane dijelove prometne mreže zanemarujući njihovu interakciju sa susjednim raskrižjima i utjecaj tih interakcija na funkcionalnost cjelokupne cestovne mreže.

Pregledom stanja područja utvrđeno je da, iako se u dostupnoj tehničkoj regulativi i znanstvenim istraživanjima detektira problem prometnog funkcioniranja kružnih raskrižja koja su u interakciji sa drugim raskrižjima, ovaj problem nije sustavno istražen. U dostupnoj literaturi nisu pronađena istraživanja koja se bave analizom parametara koji utječu na funkcioniranje kružnih raskrižja u interakciji sa susjednim niti problemom optimiranja razmaka između kružnog i susjednog raskrižja iz aspekta protočnosti i sigurnosti odvijanja prometa.

Temeljem navedenog ovo je istraživanje usmjereno na dva komplementarna pod-cilja:

- (1) Utvrditi ključne prometne i projektne parametre koji statistički značajno utječu na vrijeme putovanja duž cestovnog koridora sa semaforiziranim raskrižjima unutar kojeg je smješteno kružno raskrižje, analizirati njihove korelacije te razviti i, na temelju prikupljenih empirijskih podataka, validirati model za predikciju vremena putovanja
- (2) Utvrditi ključne prometne i projektne parametre koji statistički značajno utječu na nastanak konflikata na odabranom segmentu cestovne mreže koji se sastoji od kružnog i semaforiziranog raskrižja, analizirati njihove korelacije te razviti model za predikciju ukupnog broja prometnih konflikata.

Istraživanje se temelji na kombinaciji eksperimentalnih istraživanja i istraživanja temeljenog na modelu prometnih mikrosimulacija. Za prometne mikrosimulacije korišten je programski paket PTV VISSIM, a za analizu prometne sigurnosti softverski alat Surrogate Safety Assessment Model (SSAM). Za obradu podataka generiranih istraživanjima korištene su statističke metode koje omogućavaju objektivnu kvantifikaciju utjecaja projektnih i prometnih parametara na funkcioniranje promatranog koridora iz aspekta protočnosti i sigurnosti odvijanja prometa.

U početnoj fazi istraživanja provedena su terenska mjerenja na devet jednotračnih kružnih raskrižja srednje veličine na području Grada Rijeke. Podaci prikupljeni tijekom mjerenja korišteni su kao temelj za daljnju analizu te za definiranje ulaznih parametara vezanih uz količinu, strukturu i raspodjelu prometa u prometnim mikrosimulacijskim modelima.

Glavnom dijelu istraživanja prethodila je detaljna preliminarna analiza koja je uključivala statističku obradu rezultata prometnih mikrosimulacija temeljenih na prikupljenim terenskim podacima. Na temelju provedene analize razvijen je preliminarni regresijski

model za predviđanje vremena putovanja duž cestovnog koridora koji uključuje kružno i semaforizirano raskrižje. Primjenom alata SSAM, na temelju trajektorija vozila dobivenih iz VISSIM modela identificirani su i kvantificirani prometni konflikti te je razvijen preliminarni model za predviđanje broja konflikata na analiziranom segmentu cestovne mreže. Korištenje prometnih konflikata kao surogatne mjere prometne sigurnosti metodološki je opravdano jer omogućava proaktivnu procjenu sigurnosnih rizika na cestovnoj mreže prije nastanka stvarnih prometnih nesreća. Ovakav pristup osobito je prikladan u uvjetima kada je raspoloživa baza podataka o stvarnim prometnim nesrećama ograničena ili nedovoljno pouzdana za provođenje statistički pouzdane analize sigurnosti.

Na temelju zaključaka izvedenih iz pregleda stanja istraživanog područja i provedene preliminarne analize, formulirani su ciljevi istraživanja i glavne istraživačke hipoteze (Poglavlje 1). Istovremeno su identificirane ključne prednosti i nedostaci preliminarno razvijenih regresijskih modela, što je omogućilo da se za nastavak istraživanja definira unaprijeđeni skup ulaznih parametara, kako slijedi:

- (1) Prometno opterećenje u vršnom satu: 1000 voz/h, 1200 voz/h, 1400 voz/h, 1600 voz/h, 1800 voz/h i 2000 voz/h (izračunato kao udio prometa maksimalnog kapaciteta srednje velikih urbanih kružnih raskrižja)
- (2) Raspodjela prometa na glavnom i sporednom smjeru: 80:20, 70:30, 60:40, 50:50
- (3) Udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja: 40 – 160 m sa inkrementom od 10 m
- (4) Vanjski polumjer kružnog raskrižja: 12 m, 17 m i 22 m
- (5) Duljina crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju: 17 s, 22 s i 27 s

Kombinacijom ulaznih parametara generirano je ukupno 2880 scenarija modela prometnih mikrosimulacija. U skladu s preporukama (PTV GROUP, 2022), provedeno je deset simulacija za svaki scenarij, a za analizu je korištena prosječna vrijednost.

Dobiveni rezultati služili su za formiranje opsežne baze podataka, koja je bila temelj za razvoj dvaju regresijskih modela: modela za predikciju vremena putovanja koji služi za ocjenu kvalitete odvijanja prometnih tokova u definiranim uvjetima i modela za predikciju broja konflikata koji služi procjeni uvjeta sigurnosti odvijanja prometa. Istražen je detaljno i utjecaj definiranih parametara prometnog toka na vrijeme kašnjenja no ovaj parametar se nije pokazao prikladnim kao temelj za razvoj modela kojim bi se ocijenili uvjeti odvijanja prometa na cestovnom koridoru zbog potencijalno vrlo složene validacije modela.

Model za predikciju vremena putovanja je razvijen i validiran temeljem mjerenja provedenih u stvarnim prometnim uvjetima na 6 cestovnih koridora, za duljinu putovanja na odabranim točkama ispred i iza analiziranih raskrižja ukupne duljine 300 m. Rezultati modela za predikciju broja konflikata su uspoređeni s rezultatima SSAM

analize na kalibriranim prometnim mikrosimulacijskim modelima 6 cestovnih segmenata.

Model za predikciju vremena putovanja

Za potrebe ovoga dijela istraživanja definirana je jedna glavna hipoteza te tri pod-hipoteze kojima se detaljnije ispituju ključni elementi istraživačkog problema.

Pod-hipoteza H1.1: Pokazatelji prometnog toka izoliranog kružnog raskrižja povoljniji su od pokazatelja prometnog toka kružnog raskrižja integriranog u koridor sa semaforiziranim raskrižjima.

U usporedbi s cestovnim koridorom u kojem su kružno i semaforizirano raskrižje u interakciji, izolirano kružno raskrižje pokazuje sustavno povoljnije prometne parametre u istim prometnim uvjetima. Pri tome je prosječno vrijeme kašnjenja u scenarijima s izoliranim kružnim raskrižjem najkraće te iznosi u prosjeku 157 % manje u odnosu na scenarije gdje je udaljenost raskrižja 40 m (minimalna analizirana udaljenost) te 12 % manje u odnosu na scenarije s udaljenošću raskrižja od 160 m (maksimalna analizirana udaljenost).

Najveće smanjenje prosječnog vremena kašnjenja ostvaruje se povećanjem inicijalne udaljenosti raskrižja. Povećanjem udaljenosti raskrižja s 40 m na raspon od 80 do 100 m dolazi do značajnog smanjenja prosječnog vremena kašnjenja, većeg od 50 %. Dodatno povećanje udaljenosti raskrižja od 120 m do maksimalnih 160 m rezultira manjim poboljšanjima (od 10 do 20 %, ovisno o promatranom scenariju).

Sličan trend opažen je i kod prosječnog vremena putovanja. Scenariji s izoliranim kružnim raskrižjem pokazuju najmanje vrijeme putovanja, pri čemu je ono u prosjeku 39 % kraće u odnosu na scenarije sa semaforiziranim raskrižjem udaljenim 40 m, odnosno 15 % kraće u odnosu na scenarije sa semaforiziranim raskrižjem udaljenim 160 m. Istraživanje je u cijelosti potvrdilo postavljenu pod-hipotezu.

Pod-hipoteza H1.2: Na ukupno vrijeme putovanja značajno utječu razmak između raskrižja, prometni uvjeti i geometrija kružnog raskrižja.

Rezultati provedene statističke analize baze podataka generirane kroz različite scenarije prometnih mikrosimulacija jasno ukazuju na postojanje statistički značajnog utjecaja svih analiziranih ulaznih parametara na vrijeme putovanja: vršnog prometnog opterećenja, vanjskog polumjera kružnog raskrižja, trajanja crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju, udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja te postotka prometa na glavnom smjeru.

Vršno prometno opterećenje istaknulo se kao najutjecajniji parametar na vrijeme putovanja, za koji je utvrđena visoka pozitivna korelacija ($r = 0,762$). Dobiveni rezultat potvrđuje nalaze dosadašnjih istraživanja (Macioszek, 2014; FHWA, 2010; Avşar i sur.,

2024; Rodgers i sur., 2021), prema kojima povećano prometno opterećenje izravno produljuje vrijeme putovanja. Vanjski polumjer kružnog raskrižja ima umjerenu negativnu korelaciju s vremenom putovanja ($r = -0,294$), što upućuje da povećanje polumjera kružnog raskrižja pridonosi smanjenju vremena putovanja. Udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja iskazuje slabiju negativnu korelaciju ($r = -0,121$), što implicira da kraći razmak između raskrižja može rezultirati povećanjem vremena putovanja. Trajanje crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju pokazuje umjerenu pozitivnu korelaciju ($r = 0,291$), sugerirajući kako dulje crveno vrijeme povećava ukupno vrijeme putovanja kroz analizirani cestovni segment.

Najizraženiji utjecaj na vrijeme putovanja vidljiv je kada se razmatra zajednički učinak prometnog opterećenja i razmaka između kružnog i semaforiziranog raskrižja. Dok su u scenarijima izoliranih raskrižja zabilježena najkraća vremena putovanja pri istim prometnim uvjetima, smanjenjem razmaka između kružnog i semaforiziranog raskrižja dolazi do izrazitog produljenja vremena putovanja. Za razmak od 40 m, povećanje prometa s 1000 na 2000 voz/h rezultira prosječnim povećanjem vremena putovanja od 378 %. Kod većih razmaka između raskrižja (≥ 140 m), ovaj utjecaj i dalje je značajan, iako manje izražen u relativnom smislu. Tako je pri udaljenosti od 140 m porast prometnog opterećenja s 1000 na 2000 voz/h uzrokovao prosječno povećanje vremena putovanja od 320 %. U uvjetima manjeg prometnog opterećenja (1000-1200 voz/h), najveći promatrani polumjer (22 m) kod izoliranog kružnog raskrižja ostvaruje oko 5 % kraće vrijeme putovanja u odnosu na najmanji polumjer (12 m). S povećanjem prometnog opterećenja (1400–1600 voz/h) raste i vrijeme putovanja, a razlike uvjetovane veličinom kružnog raskrižja postaju izraženije. U izoliranim scenarijima, vrijeme putovanja je kod polumjera od 22 m kraće za približno 8 % u odnosu na najmanji polumjer (12 m). Srednji polumjer (17 m) također pokazuje poboljšanje, smanjujući vrijeme putovanja u prosjeku za oko 6 % u odnosu na najmanji polumjer.

Rezultati istraživanja su pokazali da je utjecaj raspodjele prometnog toka nelinearan - pri manjem analiziranom prometnom opterećenju (≤ 1600 voz/h) povećanjem udjela prometa na glavnom smjeru (s 50 % na 80 %) povećava se vrijeme putovanja za oko 25–38 %, dok se kod viših opterećenja (≥ 1800 voz/h) javlja suprotan učinak, pri čemu povećanjem udjela prometnog opterećenja na glavnom smjeru smanjuje vrijeme putovanja za prosječno 31 %. To može biti posljedica smanjenja konfliktnog toka i omogućavanja većih praznina za ulazak vozila s glavnog smjera u kružni tok.

Istraživanja su pokazala da produljenje crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju ima negativan utjecaj na vrijeme putovanja. Produženje crvenog vremena sa 17 s na 27 s povećava vrijeme putovanja između 45 % i 60 %, s najizraženijim povećanjem u scenarijima s manjim udaljenostima između raskrižja (40 m). Pri udaljenosti raskrižja od 120 m i više, utjecaj produljenja crvenog vremena postaje minimalan.

Istraživanjima je potvrđena pod-hipoteza te su jasno identificirani parametri prometnog toka koji utječu na vrijeme putovanja u koridoru kružnog i semaforiziranog raskrižja – količina i raspodjela prometa te duljina crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju.

Pod-hipoteza H1.3: *Predloženi model za predikciju vremena putovanja primjenjiv je za kružna raskrižja integrirana unutar koridora sa semaforiziranim raskrižjima.*

Na temelju baze podataka provedenih prometnih mikrosimulacija (ukupno 2880 scenarija) razvijen je višestruki regresijski model za predikciju vremena putovanja kako slijedi:

$$VP = -89,215 + 0,140 \cdot VPO - 40,792 \cdot GS + 4,227 \cdot CS - 4,524 \cdot R_V - 0,044 \cdot D \quad (26)$$

gdje je:

- VP (s) – vrijeme putovanja vozila na dionici od 300 m od kružnog do semaforiziranog raskrižja
- VPO (voz/sat) – vršno prometno opterećenje, u rasponu od 1000 – 2000 voz/h
- GS (/) – udio vozila na glavnom smjeru izražen kao decimalni broj, u rasponu 0,5-0,7
- CS (s) – trajanje crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju, u rasponu 17–27 s
- R_V (m) – vanjski polumjer kružnog raskrižja, u rasponu 12 – 22 m
- D (m) – udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja, 40-60 m s inkrementom od 10 m

Analiza modela je pokazala da model ima visoku prediktivnu sposobnost ($R^2 = 0,763$), stabilnost procjene te umjerenu prosječnu apsolutnu pogrešku predikcije (21,05 %).

Validacija razvijenog regresijskog modela provedena je temeljem eksperimentalnih mjerenja na šest koridora na cestovnoj mreži u Gradovima Osijek i Poreč. Rezultati statističke analize pokazali su visoku pouzdanost modela: na četiri analizirane rute srednja apsolutna pogreška (MAPE) iznosila je ispod 10 %, što ukazuje na visoku preciznost, dok je na jednoj ruti ostvarena prihvatljiva pogreška od 16 %, bez statistički značajnog odstupanja ($p > 0,05$). Statistički značajno odstupanje zabilježeno je samo na jednoj od analiziranih ruta (MAPE=25 %) što se može objasniti time da je model primijenjen izvan raspona ulaznih parametara. Model je razvijen za najveći polumjer kružnog raskrižja od 22 m, a u ovom je slučaju polumjer 24 m.

Provedena validacija u stvarnim uvjetima potvrdila je visoku razinu pouzdanosti predloženoga regresijskog modela u predviđanju vremena putovanja kroz kružna raskrižja unutar semaforiziranih cestovnih koridora, za ispitani raspon prometnih i projektnih parametara. Premda je regresijski model razvijen temeljem rezultata prometnih mikrosimulacija na segmentu cestovne mreže koji sadrži jedno kružno i jedno semaforizirano raskrižje, validacija je ukazala na njegovu primjenjivost u realnim

uvjetima na prometnim koridorima s više raskrižja. Ovim se potvrđuje da razvijeni regresijski model ima potencijal šire primjene izvan uvjeta korištenih za njegovo formiranje – za kružna raskrižja smještena između 2 semaforizirana raskrižja te za kružna raskrižja u mreži kružnih i semaforiziranih raskrižja.

Zaključno, provedeno istraživanje potvrdilo je glavnu hipotezu H1, kojom je utvrđeno da je primjenom razvijenog regresijskog modela za predikciju vremena putovanja moguće objektivno vrednovati opravdanost implementacije kružnog raskrižja unutar postojećeg koridora semaforiziranih raskrižja. Model omogućava procjenu vremena putovanja na segmentu cestovne mreže koja sadrži kružno raskrižje te jedno ili više semaforiziranih raskrižja kao i raskrižja u mreži, unutar postavljenih granica za koja je razvijen.

Rezultati istraživanja jasno pokazuju da je razvijeni model visoke prediktivne pouzdanosti, primjenjiv u stvarnim prometnim uvjetima te može poslužiti kao praktičan alat u preliminarnoj fazi projektiranja kružnih raskrižja na semaforiziranom koridoru.

Model za predikciju ukupnog broja konflikata

Za potrebe ovoga dijela istraživanja definirana je jedna glavna hipoteza te dvije podhipoteze kojima se detaljnije ispituju ključni elementi istraživačkog problema.

Podhipoteza H2.1: Promjene u projektnim elementima mogu doprinijeti smanjenju rizika od prometnih nesreća kroz smanjenje broja i vrsta konflikata na kružnom raskrižju.

Na temelju terenskih mjerenja na devet srednje velikih urbanih kružnih raskrižja u Gradu Rijeci izrađeni su prometni mikrosimulacijski modeli korištenjem programskog alata VISSIM. Pri izradi modela uzeti su u obzir projektni i prometni parametri dobiveni terenskim istraživanjem, uključujući dnevno prometno opterećenje, strukturu prometnog toka, ulazne i izlazne brzine vozila te brzine na prilaznim i odlaznim prometnim trakama. Iz modela prometnih mikrosimulacija su generirane trajektorije vozila kroz kružna raskrižja, koje su zatim korištene za procjenu broja potencijalnih konflikata pomoću programa SSAM.

Analiza korelacija pokazala je da pojedini projektni elementi kružnih raskrižja imaju statistički značajnu povezanost s brojem potencijalnih konflikata koji predstavljaju indikator prometnih nesreća. Višestrukom linearnom regresijom utvrđena je kvantitativna povezanost projektnih elemenata i prometnog opterećenja s brojem potencijalnih konflikata:

Ukupni broj konflikata na kružnim raskrižjima značajno se povećava s povećanjem dnevnog prometnog opterećenja i većim vanjskim polumjerom raskrižja, dok povećanje širine izlaza dovodi do značajnog smanjenja konflikata. Ovaj regresijski model ostvario je visoku prediktivnu sposobnost ($R^2 = 0,78$).

U slučaju konflikata koji mogu dovesti do sudara straga, kao statistički značajni projektni elementi pokazali su se ulazni polumjer, širina izlaza, polumjer središnjeg otoka i uzdužni nagib privoza. Rezultati sugeriraju da se povećanjem ulaznog polumjera, širine izlaza i uzdužnog nagiba privoza značajno smanjuje broj ovih konflikata, dok povećanje polumjera središnjeg otoka povećava njihov broj ($R^2 = 0,853$).

Kod konflikata uslijed prestrojavanja, povećanje širine ulaza i polumjera središnjeg otoka statistički značajno povećava broj konflikata. Premda ovaj model ima slabiju prediktivnu moć ($R^2 = 0,368$), jasno ukazuje na važnost pravilnog dimenzioniranja ulaza i središnjeg otoka u svrhu smanjenja ovih konflikata.

Kombinirajući navedene rezultate, potvrđeno je da je promjenom projektnih elemenata, kao što su vanjski polumjer raskrižja i širina izlazne prometne trake te pravilnim dimenzioniranjem ulaznih i izlaznih elemenata, moguće značajno utjecati na smanjenje rizika od prometnih nesreća kroz smanjenje ukupnog broja i određenih vrsta potencijalnih konflikata.

Pod-hipoteza H2.2: *Ukupan broj konflikata na izoliranom kružnom raskrižju manji je u odnosu na kružno raskrižje smješteno u blizini semaforiziranog raskrižja.*

U okviru izrade modela za predikciju vremena putovanja korišteni su prometni mikrosimulacijski modeli koji su istodobno omogućili prikupljanje podataka o broju potencijalnih konflikata u različitim scenarijima. Učinkovitost kružnih raskrižja često se procjenjuje temeljem uvjeta prometa tijekom vršnih sati, no preliminarni rezultati ovog istraživanja ukazuju da takav pristup ne generira dovoljan broj konflikata za provođenje pouzdane statističke analize sigurnosti. Iz tog razloga provedene su dodatne prometne mikrosimulacije u trajanju od 24 sata, čime je ostvaren reprezentativan uzorak prometnih konflikata.

Analiza je provedena za dnevno prometno opterećenje od 20 000 vozila, što je u skladu s preporučenim kapacitetom za srednje velika urbana kružna raskrižja prema Hrvatskim smjernicama (Hrvatske ceste, 2014). Ispitani su scenariji definirani sljedećim ulaznim parametrima:

- Raspodjela prometa između glavnog i sporednog smjera: omjeri 80:20, 70:30, 60:40 i 50:50
- Udaljenost između kružnog i semaforiziranog raskrižja: 40-160 m s inkrementom od 10 m
- Vanjski polumjer kružnog raskrižja: 12 m, 17 m i 22 m
- Trajanje crvenog signala na semaforiziranom raskrižju: 17 s, 22 s i 27 s

Rezultati istraživanja ističu značajan utjecaj udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja na učestalost prometnih konflikata, što je posebno izraženo kod raskrižja manjih dimenzija. Izolirana kružna raskrižja pokazala su sustavno manji broj konflikata u odnosu na one scenarije u kojima se raskrižja nalaze u neposrednoj blizini

semaforiziranih raskrižja. Pri najmanjoj analiziranoj udaljenosti od 40 m zabilježen je porast ukupnog broja konflikata u rasponu od 40 % do 60 %, pri čemu je najveći utjecaj opažen kod raskrižja s najmanjim analiziranim polumjerom od 12 m.

Kod većih kružnih raskrižja (vanjski polumjer 17 m i 22 m) također je potvrđen negativan utjecaj male međusobne udaljenosti raskrižja, ali u manjoj mjeri. U tim slučajevima povećanje broja konflikata uglavnom iznosi između 20 % i 40 % u odnosu na izolirane scenarije.

Na temelju baze podataka provedenih prometnih mikrosimulacija razvijen je višestruki regresijski model za predikciju ukupnog broja konflikata:

$$Konflikti = 5020,476 - 0,942 \cdot D - 14,259 \cdot CS - 190,123 \cdot R_v \quad (27)$$

gdje su:

- *Konflikti* – ukupan broj konflikata na prometnom koridoru uključujući kružno i semaforizirano raskrižje (razvijen za dnevno prometno opterećenje od 20 000 voz/dan)
- *D* (m) – udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja, u rasponu 40 do 160 m
- *CS* (s) – trajanje crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju, u rasponu 17–27 s
- *R_v* (m) – vanjski polumjer kružnog raskrižja, u rasponu 12 – 22 m

Model je pokazao visoku točnost predikcije ($R^2=0,801$), stabilnost rezultata te umjerenu apsolutnu pogrešku (34,538 %).

Valjanost modela provjerena je usporedbom s rezultatima SSAM analize na kalibriranim mikrosimulacijskim modelima šest prometnih segmenata u gradovima Osijek i Poreč.

Rezultati statističke analize pokazali su visoku pouzdanost modela: na četiri analizirana segmenta nije zabilježena statistički značajna razlika između broja konflikata predviđenih regresijskim modelom i onih dobivenih prometnom mikrosimulacijom. Statistički značajno odstupanje zabilježeno je na dva segmenta koja su odstupala od raspona ulaznih parametara. Budući da je vanjski polumjer kružnog raskrižja ranije identificiran kao najutjecajniji parametar regresijskog modela ($r = -0,87$), odstupanje vanjskog polumjer kružnog raskrižja od okvira modela, na ovim segmentima rezultiralo je povećanom pogreškom u procjeni broja konflikata. Provedena usporedba pokazuje vrlo dobru usklađenost regresijskog modela za predikciju broja konflikata s rezultatima kalibriranih mikrosimulacijskih modela, uz prihvatljivu razinu odstupanja.

Sve navedeno potvrđuje glavnu hipotezu H2 da je razvijenim regresijskim modelom moguće pouzdano procijeniti razinu prometne sigurnosti na segmentu cestovne mreže koji se sastoji od jednog kružnog i jednog semaforiziranog raskrižja, uzimajući u obzir prevladavajuće građevinske i prometne uvjete prometne mreže.

Integracijom razvijenih modela za predikciju vremena putovanja i broja konflikata, doktorski rad nudi kvantitativnu podlogu za određivanje optimalne udaljenosti

između kružnog i susjednog semaforiziranog raskrižja pri zadanim prometnim uvjetima, kako bi se postigla ravnoteža između protočnosti i prometne sigurnosti, temeljenih na analizi vremena putovanja i prometnih konflikata. Sve glavne istraživačke hipoteze i podhipoteze ovim su istraživanjem potvrđene, čime je ispunjena znanstvena svrha rada.

Znanstveni doprinos ogleda se u novim saznanjima o međudjelovanju kružnih i semaforiziranih raskrižja – identificirani su i modelirani ključni parametri koji simultano utječu na prometnu učinkovitost i prometnu sigurnost takvih integriranih prometnih sustava.

Dodatni metodološki iskorak predstavlja integracija prometne mikrosimulacije (VISSIM), modela za procjenu sigurnosti zasnovanog na surogatnim sigurnosnim pokazateljima (SSAM) te naprednog statističkog modeliranja. Takva kombinacija alata potvrđuje važnost interdisciplinarnog pristupa u analizi i rješavanju kompleksnih problema prometnog toka i sigurnosti prometa.

Primjenjivost istraživanja

Stručni doprinos provedenog istraživanja ogleda se u rezultatima i preporukama primjenjivim u inženjerskoj praksi. Integracijom razvijenih modela, disertacija nudi kvantitativnu podlogu za ocjenu opravdanosti uvođenja kružnog raskrižja u postojeći semaforizirani koridor s ciljem postizanja ravnoteže između protočnosti i prometne sigurnosti na kružnom raskrižju. Na temelju ovog istraživanja moguće je formulirati preporuke za optimalno pozicioniranje kružnih raskrižja unutar semaforiziranih urbanih koridora radi istovremenog poboljšanja operativnih pokazatelja (poput vremena putovanja i kašnjenja) i razine prometne sigurnosti.

Ovaj rad na taj način daje dopunu postojećim normativnim smjernicama koje su samo općenito sugerirale izbjegavanje postavljanja kružnih raskrižja preblizu semaforiziranima, ali nisu nudile konkretne i mjerljive kriterije minimalnih udaljenosti niti integrirale sigurnosne aspekte. Predložene preporuke temelje se na objektivnim pokazateljima i rezultatima simulacija te predstavljaju jasne upute prostornim planerima i tehničkim regulativnim tijelima za izradu ili doradu standarda u planiranju mreže gradskih raskrižja.

Praktična vrijednost istraživanja dodatno se ogleda u razvijenim prediktivnim modelima i trodimenzionalnim dijagramima, koji mogu poslužiti kao alat za brzu evaluaciju različitih varijanti planiranja prometne mreže. Primjerice, primjena razvijenog modela za predikciju vremena putovanja omogućuje brzu procjenu opravdanost implementacije kružnog raskrižja u postojeći semaforizirani koridor – model će odmah pokazati kakav se učinak na ukupno vrijeme putovanja može očekivati pri zadanom prometnom opterećenju i geometrijskim karakteristikama. Slično tome, model za predviđanje broja konflikata omogućuje procjenu sigurnosnih implikacija takve intervencije prije same

izgradnje ili rekonstrukcije raskrižja. Time su pruženi konkretni alati i kvantitativni kriteriji koji olakšavaju donošenje odluka u procesu planiranja cestovne mreže. Rezultati istraživanja mogu se integrirati u postupke prostornog planiranja i tehničke regulative kako bi se osigurala usklađenost planerskih odluka s ciljevima prometne efikasnosti i sigurnosti.

Ograničenja istraživanja

Ograničenja provedenog istraživanja obuhvaćaju nekoliko aspekata koja treba uzeti u obzir pri interpretaciji dobivenih rezultata, njihovoj generalizaciji i primjeni razvijenih regresijskih modela u inženjerskoj praksi.

Regresijski modeli razvijeni su na temelju mikrosimulacijskih i eksperimentalnih podataka prikupljenih unutar jasno definiranih granica ulaznih prometnih i projektnih parametara. Stoga primjena razvijenih modela izvan ovih granica može dovesti do smanjene pouzdanosti rezultata te potencijalno značajnijih odstupanja u predikciji vremena putovanja i broja prometnih konflikata.

Drugo ograničenje je činjenica da u okviru istraživanja nije analiziran utjecaj pješaka i biciklista. Pješaci i biciklisti mogu značajno utjecati na funkcionalnost i sigurnost raskrižja, posebice u urbanim sredinama, a njihova interakcija s motornim vozilima na kružnim i semaforiziranim raskrižjima često rezultira specifičnim vrstama konflikata koje nisu obuhvaćene ovim istraživanjem.

Treće ograničenje proizlazi iz činjenice da u istraživanju nije bilo moguće razviti model temeljen na stvarnom broju prometnih nesreća zbog nedostatka pouzdane baze podataka o prometnim nesrećama. Stoga je prometna sigurnost u istraživanju ocijenjena isključivo korištenjem surogatnih sigurnosnih pokazatelja, odnosno prometnih konflikata.

Preporuke za daljnja istraživanja

Preporuke za daljnja istraživanja, proizašle iz rezultata ovoga doktorskog rada, usmjerene su prema uklanjanju identificiranih ograničenja čime se proširuje metodološki okvir, s ciljem sveobuhvatnijeg sagledavanja problematike interakcije kružnih i semaforiziranih raskrižja u urbanim cestovnim mrežama.

Na osnovu analize rezultata preporučuje se dodatno proširenje baze ulaznih parametara obuhvaćenih istraživanjem. To podrazumijeva uključivanje većih dimenzija vanjskog polumjera kružnih raskrižja te povećanje maksimalne istraživane udaljenosti između kružnog i semaforiziranog raskrižja. Proširenjem raspona ulaznih parametara povećala bi se primjenjivost, generalizacija i pouzdanost regresijskih modela.

U budućim istraživanjima potrebno je obuhvatiti analizu utjecaja nemotoriziranih sudionika - pješaka i biciklista. Uključivanjem ovih skupina sudionika omogućila bi se

detaljnija i preciznija procjena interakcija koje se odvijaju na raskrižjima te bi se dobila potpunija slika prometne funkcionalnosti i sigurnosti raskrižja u uvjetima heterogenog prometnog toka kakvi se u urbanim sredinama očekuju.

Preporučuje se provođenje istraživanja usmjerenih na analizu prometnog funkcioniranja koridora koji se sastoji od kombinacije dvaju uzastopnih kružnih raskrižja, osobito u uvjetima većih prometnih opterećenja. Navedena istraživanja omogućila bi primjenu modela u uvjetima u kojima se razmatraju različite alternative unutar koridora sa više raskrižja.

POPIS LITERATURE

- Abed, H. M. i Ewadh, H. A. (2021). Coupling Visual Simulation Model (VISSIM) with Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) to evaluate safety at signalized intersections. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973(1), <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012234>
- Abu-Eisheh, S., Ghanim, M. S. i Dodeen, A. (2024). Trip generation model for a developing city in an emerging country. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 24, 101048. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101048>
- Ahac, S., Džambas, T. i Dragčević, V. (2016). Review of fastest path procedures for single-lane roundabouts. *Road and Rail Infrastructure IV*; Lakušić, S., Ed.; The University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering: Zagreb, Croatia, 885-891. (Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/303667379_Review_of_fastest_path_procedures_for_single-lane_roundabouts)
- Ahmad, A. i Rastogi, R. (2016). Regression model for entry capacity of a roundabout under mixed traffic condition – An Indian case study. *Transportation Letters*, 9(5), 243–257. <https://doi.org/10.1080/19427867.2016.1203603>
- Akçelik, R. (1980). *Time-dependent expressions for delay, stop rate and queue length at traffic signals*. Internal Report AIR 367-1. Australian Road Research Board, Vermont South, Australia.
- Akçelik, R. (2014). Modelling queue spillback and nearby signal effects in a roundabout corridor. *Proceedings of the TRB 4th International Roundabout Conference*, Seattle, WA, SAD.
- Al-Masaeid, H. R. (1999). Capacity and performance of roundabouts. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 26(5), 597–605. <https://doi.org/10.1139/l99-025>
- Al-Omari, B., Al-Masaeid, H. i Al-Shawabkha, Y. (2004). Development of a delay model for roundabouts in Jordan. *Journal of Transportation Engineering*, 130(1), 76–80. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:1\(76\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:1(76))
- Ali, H. K. M. i Majid, H. M. (2023). Comparative evaluation of roundabout capacities methods for single-lane and multi-lane roundabout. *Journal of Engineering*, 29(3), 76–97. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2023.03.06>
- Ambros, J., Novák, J., Borsos, A., Hóz, E., Kieć, M., Machciník, Š. i Ondrejka, R. (2016). Central European comparative study of traffic safety on roundabouts. *Transportation Research Procedia*, 14, 4200-4208. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.391>
- Amundsen, F.H., Hydén, C. (1977). *Proceedings: First workshop on traffic conflicts*. TØI.

- Arafat, M. Y., Abdel-Aty, M., Lee, J. i Park, J. (2021). Safety evaluation of intersection designs using simulated conflicts. *Journal of Transportation Safety & Security*, 13(4), 414–432. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/584/1/012018>
- Ariniello, A. J. (2005). Are roundabouts good for business?. *National Roundabout Conference: 2005 Proceedings – Transportation Research Circular* (Issue E C083). Transportation Research Board. (Preuzeto s: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/circulars/ec083/39_Ariniellopaper.pdf)
- Arlot, S. i Celisse, A. (2010). A survey of cross-validation procedures for model selection. *Statistics Surveys*, 4, 40–79. <https://doi.org/10.1214/09-ss054>
- Arroju, R., Gaddam, H. K., Vanumu, L. D., Ramachandra Rao, K. (2015). Comparative evaluation of roundabout capacities under heterogeneous traffic conditions. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 35(6), 310–324. <https://doi.org/10.1007/S40534-015-0089-8>
- Astarita, V., Guido, G., Vitale, A. i Gallelli, V. (2014). Analysis of non-conventional roundabouts performances through microscopic traffic simulation. *Applied Mechanics and Materials*, 505–506, 481–488. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.505-506.481>
- Austroroads. (2023). Guide to Road Design Part 4B - Roundabouts. Sydney, Australija. (Preuzeto s: https://austroroads.gov.au/__data/assets/pdf_file/0036/797931/AGRD04B-23_Guide_to_Road_Design_Part_4B_Roundabouts_Ed3.2.pdf)
- Avşar, Y. Ö., Yıldırım, Z. B., Politi, R. R. i Tanyel, S. (2024). Investigation of the effect of geometric irregularities on capacity of traffic circles by using partial least squares regression method. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 51(12), 1388–1408. <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0483>
- Bared, J. i Edara, P. (2005). Simulated capacity of roundabouts and impact of a roundabout within a progressed signalized road. *Transportation Research Circular E-C083: 3rd International Symposium on Highway Geometric Design*, 59–68. (Preuzeto s: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/circulars/ec083/59_Baredpaper.pdf)
- Bargogol, I., Najafi Moghaddam Gilani, V. N., Ghasedi, M. i Ghorbanzadeh, M. (2016). Delay modeling of un-signalized roundabouts using neural network and regression. *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering*, 2(1), 28–34. (Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/320456810_Delay_Modelling_of_Un-signalized_Roundabouts_Using_Neural_Network_and_Regression)
- Benigar, M. (2008). Mreža kružnih raskrižja u urbanom prostoru – temeljni principi definiranja. *Zbornik 9. slovenskog kongresa o cestama i prometu* (147–157). Portorož, Slovenia.

- Bezembinder, E. M., Wismans, L. J. J. i van Berkum, E. C. (2018). Network effects of local intersection design strategies. *Proceedings of the 7th Transport Research Arena* (TRA 2018), Beč, Austrija. (Preuzeto s: https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/141832704/TRA2018_11179_Bezembinder.pdf).
- Brilon, W. (2005). Roundabouts: A state of the art in Germany. *National Roundabout Conference*, Vail, Colorado (Vol. 16). (Preuzeto s: <https://www.researchgate.net/publication/237635143>)
- Brilon, W., i Wu, N. (2008). Capacity at unsignalized intersections derived by conflict technique. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2071(1), 82–90. <https://doi.org/10.3141/2071-10>
- Broccchini, L., Pratelli, A., Josselin, D. i Losa, M. (2025). A microsimulation-based methodology for evaluating efficiency and safety in roundabout corridors: Case studies of Pisa (Italy) and Avignon (France). *Infrastructures*, 10(7), 186. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10070186>
- Bulla-Cruz, L. A., Laureshyn, A. i Lyons, L. (2020). Event-based road safety assessment: A novel approach towards risk microsimulation in roundabouts. *Measurement*, 165, 108192. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108192>
- Burdett, B., Alsghan, I., Chiu, L.-H., Bill, A. R. i Noyce, D. A. (2021). Analysis of rear-end collisions at roundabout approaches. *Transportation Research Record*, (2585), 30–38. <https://doi.org/10.3141/2585-0>
- Burnham, K. P. i Anderson, D. R. (2002). *Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach* (2. izdanje). Springer.
- Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité & l'aménagement (Cerema). (2010). *Guide des carrefours urbains* [Priručnik za urbana raskrižja]. Lyon, Francuska. (Preuzeto s: <https://www.mayotte-bum.fr/app/uploads/2023/06/Guide-des-carrefours-urbains.pdf>)
- Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Wegenbouw en de Verkeerstechniek (CROW). (2015). *Richtlijn rotondes* (Publicatie 257) [Smjernice za kružna raskrižja]. Ede, Nizozemska. (Preuzeto s: https://www.fietsberaad.nl/CROWFietsberaad/media/Kennis/Bestanden/Aanpassing_turborotondes.pdf)
- Chen, T., Tang, L., Zhao, Z., Yang, H., Guo, X. i Shi, H. (2025). Exploring the effect of new urban expressway on travel time. *Journal of Transport Geography*, 123, 104128. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2025.104128>
- Chen, X. i Lee, M. S. (2016). A case study on multi-lane roundabouts under congestion: Comparing software capacity and delay estimates with field data. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3(2), 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.03.005>

- Chevuri, P. K. (2018). *Trucks at roundabouts: A synthesis study*. *Journal of Transportation Technologies*, 8(1), 65–74. <https://doi.org/10.4236/jtts.2018.81004>
- Chiappone, S., Giuffrè, O., Granà, A., Mauro, R. i Sferlazza, A. (2016). Traffic simulation models calibration using speed–density relationship: An automated procedure based on genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 44, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.09.024>
- Choi, J., Kim, S., Lee, S., Kim, Y., Park, J. i Hwang, K. (2011). Safety analysis of roundabout designs based on geometric and speed characteristics. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 8, 354–354. <https://doi.org/10.11175/EASTPRO.2011.0.354.0>
- Ciuffo, B. F., Punzo, V. i Torrieri, V. (2008). Comparison of Simulation Based and Model Based Calibrations of Traffic Flow Microsimulation Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2088), 36–44. <https://doi.org/10.3141/2088.05>
- Codjoe, J. A., Thapa, R., Ayernor, S. M. A. i Loker, M. (2021). *Determining Louisiana's roundabout capacity*. Baton Rouge, LA: Louisiana Transportation Research Center (Report No. 640). (Preuzeto s: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/58439>)
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. izdanje). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Cunto, F. i Saccomanno, F. F. (2008). Calibration and validation of simulated vehicle safety performance at signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 40, 1171–1179. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.01.003>
- Cvitanić, D., Breški, D. i Lovrić, I. (2012). Possibility of microsimulation models calibration – case study in the city of Split. *Promet – Traffic & Transportation*, 24(3), 231–241. <https://doi.org/10.7307/ptt.v24i3.316>
- Dahl, J., i Lee, C. (2012). Empirical estimation of capacity for roundabouts using adjusted gap-acceptance parameters for trucks. *Transportation Research Record*, 2312, 34–45. <https://doi.org/10.3141/2312-04>
- Damaskou, E. i Kehagia, F. (2017). Quality of Service (QOS) of urban roundabouts: A literature review. *International Journal of Transportation Systems*, 2(1), 37–45. (Preuzeto s: <https://www.iasas.org/home/caijts/quality-of-service-qos-of-urban-roundabouts-a-literature-review>)
- Daniels, S., Brijs, T., Nuyts, E. i Wets, G. (2011). Extended prediction models for crashes at roundabouts. *Safety science*, 49(2), 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.07.016>
- Deluka-Tibljaš, A., Giuffrè, T., Surdonja, S. i Trubia, S. (2018). Introduction of autonomous vehicles: Roundabouts design and safety performance evaluation. *Sustainability*, 10(4), 1060. <https://doi.org/10.3390/su10041060>

- Demir, H. G. i Demir, Y. K. (2020). A comparison of traffic flow performance of roundabouts and signalized intersections: A case study in Niğde. *The Open Transportation Journal*, 14(1), 120–132.
<https://doi.org/10.2174/1874447802014010120>
- Duan, Y., Lin, Z., Wang, Y. i Bai, Q. (2025). Analysis of traffic conflicts at roundabout entrances and exits – A machine learning approach for enhanced safety. *Promet – Traffic & Transportation*, 37(4), 947–962. <https://doi.org/10.7307/ptt.v37i4.769>.
- D’Agostino, R. B. i Stephens, M. A. (1986). *Goodness-of-Fit Techniques*. New York: Marcel Dekker.
- Elefteriadou, L. (2014). An introduction to traffic flow theory. New York, NY: Springer. (Preuzeto s: https://www.victorknoop.eu/research/book/Knoop_Intro_traffic_flow_theory_edit ion1.pdf).
- Elhassy, Z., Abou-Senna, H., Shaaban, K. i Radwan, E. (2020). The implications of converting a high-volume multilane roundabout into a turbo roundabout. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, Article 5472806.
<https://doi.org/10.1155/2020/5472806>
- Elvik, R. (2017). Road safety effects of roundabouts: A meta analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 99, 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.12.018>
- Espejel García, D., Saniger Alba, J. A., Wenglas Lara, G., Espejel García, V. V. i Villalobos Aragón, A. (2017). A Comparison among Manual and Automatic Calibration Methods in VISSIM in an Expressway (Chihuahua, Mexico). *Open Journal of Civil Engineering*, 7(4), 539–552. <https://doi.org/10.4236/ojce.2017.74036>
- Essa, M. i Sayed, T. (2015). Transferability of calibrated microsimulation model parameters for safety assessment using simulated conflicts. *Accident Analysis & Prevention*, 84, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.08.005>
- Evans, J. D. (1996). *Straightforward statistics for the behavioral sciences*. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole. <https://doi.org/10.1111/j.0011-7315.2004.00025.x>
- Fang, X., Li, H., Tettamanti, T., Eichberger, A. i Fellendorf, M. (2022). Effects of automated vehicle models at the mixed traffic situation on a motorway scenario. *Energies*, 15(6), 2008. <https://doi.org/10.3390/en15062008>
- Federal Highway Administration. (2000). Roundabouts: An Informational Guide. FHWA, U.S. Dept. of Transportation, Washington, DC. (Preuzeto s: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/00067/00067.pdf>)
- Federal Highway Administration. (2008). *Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report* (FHWA-HRT-08-051). FHWA, U.S. Dept. of Transportation, McLean, VA. (Preuzeto s: <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/3551>)

- Federal Highway Administration. (2010). Roundabouts: An Informational Guide (2nd ed., Report FHWA-HRT-10-007). FHWA, U.S. Dept. of Transportation, Washington, DC. (Preuzeto s: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/22914>)
- Fellendorf, M. i Vortisch, P. (2011). Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. U J. Barceló (Ur.), *Fundamentals of Traffic Simulation* (63–93). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6_2
- Fernandes, P., Coelho, M. C. i Roupail, N. M. (2017). Assessing the impact of closely-spaced intersections on traffic operations and pollutant emissions on a corridor level. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 304–320. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.05.016>.
- Fernandes, P., Fontes, T., Neves, M., Pereira, S. R., Bandeira, J. M., Roupail, N. M. i Coelho, M. C. (2015a). Assessment of Corridors with Different Types of Intersections. *Transportation Research Record*, 2503, 39–50. <https://doi.org/10.3141/2503-05>
- Fernandes, P., Salamati, K., Roupail, N. M. i Coelho, M. C. (2015b). Identification of emission hotspots in roundabouts corridors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 37, 48–64. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.026>
- Fernandes, P., Salamati, K., Roupail, N. M. i Coelho, M. C. (2017). The effect of a roundabout corridor's design on selecting the optimal crosswalk location: a multi-objective impact analysis. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(3), 206–220. <https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1220839>
- Field, A. (2017). *Discovering statistics using IBM SPSS Statistics* (5. izdanje). SAGE Publications. (Preuzeto s: <http://repo.darmajaya.ac.id/5678/1/Discovering%20Statistics%20Using%20IBM%20SPSS%20Statistics%20%28%20PDFDrive%20%29.pdf>)
- Flannery, A. (2001). Geometric design and safety aspects of roundabouts. *Transportation Research Record*, 1751(1), 76–81. <https://doi.org/10.3141/1751-09>
- Flannery, A., Elefteriadou, L., Koza, P. i McFadden, J. (1998). Safety, delay, and capacity of single-lane roundabouts in the United States. *Transportation Research Record*, 1646(1), 63–70. <https://doi.org/10.3141/1646-08>
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). (2006). *Richtlinien für die Anlage von Kreisverkehren* [Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja]. Köln, Njemačka. (Preuzeto s: <https://www.fgsv-verlag.de/anlage-von-kreisverkehren>)
- Fortuijn, L. G. H. (2009). Turbo roundabout: Estimation of capacity. *Transportation Research Record*, 2130, 83–92. <https://doi.org/10.3141/2130-11>
- Gallelli, V., Luele, T. i Vaiana, R. (2016). Conversion of a semi-two lanes roundabout into a turbo-roundabout: A performance comparison. *Procedia Computer Science*, 83, 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.201>

- Gallelli, V., Perri, G. i Vaiana, R. (2021). Operational and Safety Management at Intersections: Can the Turbo Roundabout Be an Effective Alternative to Conventional Solutions?. *Sustainability*, 13(9), 5103. <https://doi.org/10.3390/su13095103>
- Gandhi, S. G., Al-Haddad, A. H. i Al-Haydari, I. S. (2012). Development of delay models for roundabouts. *Journal of Engineering and Development*, 16(1), 1–15. (Preuzeto S: https://www.researchgate.net/publication/333162904_Development_of_Delay_Models_for_Roundabouts)
- Gazzarri, A., Martello, M. T., Pratelli, A., & Souleyrette, R. R. (2012). Estimation of gap acceptance parameters for HCM 2010 roundabout capacity model applications. *WIT Transactions on the Built Environment*, 1, 309–320. <https://doi.org/10.2495/ut120271>
- Gettman, D. i Head, L. (2003). Surrogate safety measures from traffic simulation models. *Transportation research record*, 1840(1), 104-115. <https://doi.org/10.3141/1840-12>
- Ghasemi, A. i Zahediasl, S. (2012). Normality tests for statistical analysis: A guide for non-statisticians. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 10(2), 486–489. <https://doi.org/10.5812/ijem.3505>
- Giuffrè, O., Granà, A. i Tumminello, M. L. (2016). Gap-acceptance parameters for roundabouts: A systematic review. *European Transport Research Review*, 8, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0190-4>
- Giuffrè, O., Granà, A., Tumminello, M. L., Giuffrè, T., Trubia, S., Sferlazza, A. i Rencelj, M. (2018). Evaluation of Roundabout Safety Performance through Surrogate Safety Measures from Microsimulation. *Journal of Advanced Transportation*, 2018(1), 4915970. <https://doi.org/10.1155/2018/4915970>
- Giuffrè, O., Trubia, S., Canale, A. i Persaud, B. (2017). Comparative safety assessment of turbo, flower and target roundabouts. *Transportation Research Procedia*, 25, 2162–2176. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.415>
- Giuffrè, T., Guerrieri, M. i Granà, A. (2020). Evaluating roundabout geometric design consistency based on operating speed profiles and driver behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2674(8), 1–12. <https://doi.org/10.1177/0361198120930847>
- Giuffrè, T., Trubia, S., Canale, A. i Persaud, B. (2017). Using Microsimulation to Evaluate Safety and Operational Implications of Newer Roundabout Layouts for European Road Networks. *Sustainability*, 9(11), 2084. <https://doi.org/10.3390/su9112084>
- Gross, F., Lyon, C., Persaud, B. i Srinivasan, R. (2013). Safety effectiveness of converting signalized intersections to roundabouts. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.04.012>

- Guerrieri, M., Mauro, R., & Tollazzi, T. (2019). *Turbo-roundabout: Case study of driver behaviour and kinematic parameters of light and heavy vehicles*. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 145(6), 05019002. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000241>
- Gunaratne, D., Amarasingha, N., Kulathunga, A. i Wickramasinghe, V. (2023). Optimization of VISSIM driver behavior parameter values using genetic algorithm. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 51(2), 117–125. <https://doi.org/10.3311/PPtr.20106>
- Hainen, A., Rivera-Hernandez, E., Day, C., McBride, M., Grimmer, G., Loehr, A. i Bullock, D. (2013). Roundabout Critical Headway Measurement Based on High-Resolution Event-Based Data from Wireless Magnetometers. *Transportation Research Record*, 2389, 51–64. <https://doi.org/10.3141/2389-06>
- Hallmark, S., Fitzsimmons, E. J., Isebrands, H. N. i Giese, K. (2010). Roundabouts in Signalized Corridors: Evaluation of Traffic Flow Impacts. *Transportation Research Record*, 2182(1), 139–147. <https://doi.org/10.3141/2182-18>
- Hallmark, S. L., Wang, B., Mudgal, A. i Isebrands, H. N. (2011). On Road Evaluation of Emission Impacts of Roundabouts. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2265(1), 226–233. <https://doi.org/10.3141/226525>
- Hastie, T., Tibshirani, R. i Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (2. izdanje). Springer.
- Hayward, J. C. (1972). Near-miss determination through use of a scale of danger. *Highway Research Record*, 384, 24–34. (*Preuzeto s: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1972/384/384-004.pdf*)
- Hellinga, B. i Sindi, A. (2012). Analytical method for estimating delays to vehicles traversing single-lane roundabouts as a function of vehicle and pedestrian volumes. *Transportation Research Record*, 2312, 56–66. <https://doi.org/10.3141/2312-06>
- Hoque, I., Naz, A. i Khan, M. R. (2025). Machine learning approach in calibrating VISSIM microsimulation model for mixed traffic conditions. *Journal of Engineering Science*, 16(1), 21–30. <https://doi.org/10.3329/jes.v16i1.82663>
- Hourdakis, J., Michalopoulos, P. G. i Kottommannil, J. (2003). Practical procedure for calibrating microscopic traffic simulation models. *Transportation Research Record*, 1852, 130–139. <https://doi.org/10.3141/1852-17>
- Howlader, M. M., Mannering, F. i Haque, M. M. (2024). Estimating crash risk and injury severity considering multiple traffic conflict and crash types: A bivariate extreme value approach. *Analytic Methods in Accident Research*, 42, 100331. <https://doi.org/10.1016/j.amar.2024.100331>

- Hrvatske ceste. (2001). Smjernice za prometnu svjetlosnu signalizaciju na cestama. Narodne novine 61/2001, Zagreb, Hrvatska. (Preuzeto s: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2001_07_61_996.html)
- Hrvatske ceste. (2014). Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja na državnim cestama. Hrvatske ceste, Zagreb, Hrvatska. (Preuzeto s: https://hrvatske-cestes.hr/uploads/documents/SMJERNICE_KRUZNA_RASKRIZJA-HRVATSKE_CESTE.pdf)
- Hydén, C. (1987). The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish traffic conflicts technique. Lund University, Department of Traffic Planning and Engineering. (Preuzeto s: https://www.ictct.net/wp-content/uploads/SMoS_Library/LIB_Hyden_1987.pdf)
- Isebrands, H., Hallmark, S., Fitzsimmons, E. i Stroda, J. (2008). Toolbox to evaluate the system impacts of roundabouts on a corridor or roadway network. Ames, IA: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University. (Preuzeto s: <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/38133>)
- Isler, C. A., Huang, Y. i de Melo, L. E. A. (2024). Developing accident frequency prediction models for urban roads: A case study in São Paulo, Brazil. *IATSS Research*, 48(3), 378–392. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2024.07.002>
- Ismail, K., Sayed, T. i Saunier, N. (2013). Automated analysis of pedestrian–vehicle conflicts using video data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2393(1), 44–54. <https://doi.org/10.3141/2393-05>
- Ištoka Otković, I. (2011). *Using neural networks in the process of calibrating the microsimulation models in the analysis and design of roundabouts in urban areas*. Doktorska disertacija, Sveučilište u Mariboru, Slovenija. (Preuzeto s: <https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=18811>)
- Ištoka Otković, I. i Dadić, I. (2009). Comparison of delays at signal-controlled intersection and roundabout. *Promet – Traffic & Transportation*, 21(3), 157–165. (Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/258286487_Comparison_of_Delays_at_Signal-Controlled_Intersection_and_Roundabout)
- Ištoka Otković, I., Deluka-Tibljáš, A. i Šurdonja, S. (2020). Validation of the calibration methodology of a micro-simulation traffic model. *Transportation Research Procedia*, 45, 684–691. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.110>
- Ištoka Otković, I., Tollazzi, T. i Šraml, M. (2013). Calibration of microsimulation traffic model using neural network approach. *Expert Systems with Applications*, 40(15), 5965–5974. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.05.003>
- Ištoka Otković, I., Tollazzi, T., Šraml, M. i Varevac, D. (2023). Calibration of the microsimulation traffic model using different neural network applications. *Future Transportation*, 3(1), 150–168. <https://doi.org/10.3390/futuretransp3010010>

- Jayasooriya, N. i Bandara, S. (2018). Calibrating and validating VISSIM microscopic simulation software for the context of Sri Lanka. *Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, 494–499. <https://doi.org/10.1109/MERCon.2018.8421918>
- Johnson, M. T. (2023). Effects of phi and view angle geometric principles on safety of multi-lane roundabouts. *Transportation Research Record*, 2677(9), 362-371. <https://doi.org/10.1177/03611981231159123>
- JP Putevi Srbije. (2012). Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji. Beograd, Srbija. (Preuzeto s: <https://www.putevi-srbije.rs/index.php/sr/srdm-priru%C4%8Dnik-za-projektovanje-puteva>)
- Kennedy, J. (2007). *International comparison of roundabout design guidelines*. TRL. (Preuzeto s: https://www.trl.co.uk/uploads/trl/documents/PPR206_secure.PDF)
- Khademi, S., Williams, J. i Paschai, B. (2021). VISSIM calibration and validation: Case study of freeway weaving segment. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 10(7), 362–379. <https://doi.org/10.17577/IJERTV10IS070164>
- Kim, K. M., Saito, M., Schultz, G. G. i Eggett, D. L. (2018). Evaluating safety impacts of access management alternatives with the surrogate safety assessment model. *Transportation Research Record*, 2672(17), 120-128. <https://doi.org/10.1177/0361198118773505>
- Kim, S. i Choi, J. (2013). Safety analysis of roundabout designs based on geometric and speed characteristics. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17, 1446-1454. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-0177-4>
- Kim, S. J. (2006). *Simultaneous calibration of a microscopic traffic simulation model and OD matrix*, doktorska disertacija, Texas A&M University. (Preuzeto s: <https://oaktrust.library.tamu.edu/server/api/core/bitstreams/0e51a969-ab4d-456c-88e0-2f838507d8fb/content>)
- Kimber, R. M. (1980). *The traffic capacity of roundabouts* (LR 942). Transport and Road Research Laboratory.
- Klobučar, M. i Deluka-Tibljaš, A. (2022). Preliminary analyses of the optimal distance between a roundabout and signalized intersection. *Book of Abstracts: MFC 2022*, 22. rujna 2022., Rijeka.
- Klobučar, M., Deluka-Tibljaš, A. i Šurdonja, S. (2024). Optimising signalised intersection-roundabout distance: Insights from microsimulation analysis. *Road and Rail Infrastructure VIII*, 1241–1244. <https://doi.org/10.5592/CO/CETRA.2024.1735>
- Klobučar, M., Deluka-Tibljaš, A., Šurdonja, S. i Ištoka Otković, I. (2025a). A theoretical model for optimizing signalized intersection and roundabout distance using microsimulations. *Future Transportation*, 5(1), 28. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010028>

- Klobučar, M., Šurdonja, S. i Deluka-Tibljaš, A. (2025b). Impact of geometric parameters and operational speed on traffic safety at roundabouts: A conflict analysis using microsimulation models. *Journal of Road Safety*, 36(3), 36–49. <https://doi.org/10.33492/jrs-d-25-3-2681114>
- Klobučar, M., Šurdonja, S. i Deluka-Tibljaš A. (2025c). Microsimulation-Based Surrogate Safety Analysis of Single-Lane Urban Roundabouts, *Book of Abstracts: MFC 2025*, 22. rujna 2025., Rijeka.
- Klos, M. J. i Sobota, A. (2019). Performance evaluation of roundabouts using a microscopic simulation model. *Scientific Journal of Silesian University of Technology – Series Transport*, 104, 57–67. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2019.104.6>
- Krehbiel, T. C. (2004). Correlation coefficient rule of thumb. *Decision Sciences Journal of Innovative Education*, 2(1), 97–100. <https://doi.org/10.1111/j.0011-7315.2004.00025.x>
- Kyte, M., Tian, Z., Mir, Z., Hameedmansoor, Z., Kittelson, W., Vandehey, M., Robinson, B., Brilon, W., Bondzio, L., Wu, N. i Troutbeck, R. J. (1996). *Capacity and Level of Service at Unsignalized Intersections: Final Report, Volume 1 – Two-Way Stop-Controlled Intersections (Report No. FHWA-RD-96-132)*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- LeBas, M. A. (2015). *A Comparative Analysis of Roundabouts and Traffic Signals through a Corridor* (diplomski rad). Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College. https://doi.org/10.31390/gradschool_theses.3753
- Leonardi, S. i Distefano, N. (2023). Turbo-roundabouts as an instrument for improving the efficiency and safety in urban area: An Italian case study. *Sustainability*, 15(4), 3223. <https://doi.org/10.3390/su15043223>
- Lewis, C. D. (1982). *Industrial and Business Forecasting Methods*. London: Butterworths.
- Li, D., Fu, C., Sayed, T. i Wang, W. (2023). An integrated approach of machine learning and Bayesian spatial Poisson model for large-scale real-time traffic conflict prediction. *Accident Analysis & Prevention*, 192, 107286. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107286>
- Li, H., Li, J., Yang, Z., Wu, J. i Chen, X. (2011). Micro-simulation study on capacity of roundabout. *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 852-857). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2011.6082918>
- Li, J. i Wang, X. (2017). Safety analysis of urban arterials at the meso level. *Accident Analysis & Prevention*, 108, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.08.023>
- Li, L., Zhang, Z., Xu, Z.-G., Yang, W.-C. i Lu, Q. C. (2024). The role of traffic conflicts in roundabout safety evaluation: A review. *Accident Analysis & Prevention*, 196, 107430. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107430>

- Li, S., Xiang, Q., Ma, Y., Gu, X. i Li, H. (2016). Crash risk prediction modeling based on the traffic conflict technique and a microscopic simulation for freeway interchange merging areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(11), 1157. <https://doi.org/10.3390/ijerph13111157>
- Li, X., Khattak, A. J. i Kohls, A. G. (2016). Signal phase timing impact on traffic delay and queue length—An intersection case study. *Winter Simulation Conference 2016* (3722–3733). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC.2016.7822418>
- Llorca, C., Moreno, A. T., Lenorzer, A. J., Casas, J. i García, A. (2015). Development of a new microscopic passing manoeuvre model for two-lane rural roads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 52, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.11.007>
- Lorion, A. C. i Persaud, B. (2015). Investigation of surrogate measures for safety assessment of urban two-way stop-controlled intersections. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(12), 987–992. <https://doi.org/10.1139/cjce-2014-0303>
- Lu, X. i Wang, Y. (2015). VISSIM Calibration for Urban Freeways: Final Report. Institute for Transportation, Iowa State University. (*Preuzeto s:* https://www.intrans.iastate.edu/wp-content/uploads/2018/03/VISSIM_calibration_for_urban_freeways_w_cvr.pdf)
- Lumley, T., Diehr, P., Emerson, S. i Chen, L. (2002). The importance of the normality assumption in large public health data sets. *Annual Review of Public Health*, 23, 151–169. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.23.100901.140546>.
- Luo, H., Deng, M. i Chen, J. (2023). Queue length estimation based on probe vehicle data at signalized intersections. *Journal of Advanced Transportation*, 2023(1), 3241207. <https://doi.org/10.1155/2023/3241207>
- Ma, T. i Abdulhai, B. (2002). Genetic algorithm based optimization approach and generic tool for calibrating traffic microscopic simulation parameters. *Transportation Research Record*, 1800, 6–15. https://doi.org/10.3141/1800_02
- Macioszek, E. (2014). Relationship between vehicle stream in the circular roadway of a one-lane roundabout and traffic volume on the roundabout at peak hour. *Telematics - Support for Transport (Proceedings of TST 2014)* (, Vol. 471, pp. 110–119). Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-45317-9_12
- Mahdalova, I., Krivda, V. i Skvain, V. (2013). Influence of Roundabout Inscribed Circle Diameter to the Traffic Safety. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 409-410, 1122–1125. Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.409-410.1122>.
- Maheshwary, P., Bhattacharyya, K., Maitra, B. i Boltze, M. (2020). A methodology for calibration of traffic micro simulator for urban heterogeneous traffic operations.

- Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(4), 507–519.
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.06.007>
- Maji, A. i Ghosh, I. (2025). Advanced traffic conflict analysis for safety evaluation at roundabouts under mixed traffic using extreme value theory. *Accident Analysis & Prevention*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2025.108108>
- Mauro, R. i Branco, F. (2010). Comparative analysis of compact multilane roundabouts and turbo-roundabouts. *Journal of Transportation Engineering*, 136(4), 316–322.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000106](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000106)
- McClenaghan, E. (2024). *The Wilcoxon signed-rank test*. *Technology Networks*.
 (Preuzeto s: <https://www.technologynetworks.com/informatics/articles/the-wilcoxon-signed-rank-test-370384>)
- Ministerstvo dopravy ČR. (2017). *Projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích* [Projektiranje kružnih raskrižja na cestama i lokalnim prometnicama]. Prag, Češka Republika. (Preuzeto s: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_135_2017.pdf)
- Ministrstvo za infrastrukturo. (2023). *Tehnička specifikacija TSG-211-008:2023 – Krožna križišča*. Ljubljana, Slovenija. (Preuzeto s: <https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/DRSI/Dokumenti-DRSI/Tehnicne-specifikacije/TSPI-PCPV-PGV.03.244-Krozna-krizisca.pdf>)
- Mitrović Simić, J., Bogdanović, V., Basarić, V. i Saulić, N. (2016). Motorist yield rate model at unsignalized crossings. *Tehnički vjesnik*, 23(4), 1185–1192.
<https://doi.org/10.17559/TV-20150507102757>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A. i Vining, G. G. (2015). *Introduction to linear regression analysis*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Moore, D. S., McCabe, G. P. i Craig, B. A. (2017). *Introduction to the practice of statistics* (9. izdanje). New York: W. H. Freeman.
- Muhan, N., Qin, Y., Zhang, Q., Yang, Y. i Zhang, Z. (2013). Parameter Calibration of VISSIM Simulation Model Based on Genetic Algorithm. *Proc. of 2013 Int. Conf. on Advanced Computer Science and Electronics Information* (pp. 591–596).
<https://doi.org/10.2991/icacsei.2013.142>
- National Cooperative Highway Research Program (2022). *Highway Capacity Manual: A Guide for Multimodal Mobility Analysis* (7. izdanje). Washington, DC: Transportation Research Board. (Preuzeto s: <https://nap.nationalacademies.org/download/24798>)
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2023). *Guide for roundabouts*. (NCHRP Research Report 1043). Washington, DC: Transportation Research Board.

- National Highways. (2023). *Geometric design of roundabouts*, Ujedinjeno Kraljevstvo. (Preuzeto s: <https://www.standardsforhighways.co.uk/search/7b5ea157-9b3e-4774-9781-7d1656e83338>)
- Nazaryan, N. i Fang, C. (2022). Vehicle dynamics with additional entry lane of a roundabout. *Journal of Transportation Technologies*, 12(3), 498–532. <https://doi.org/10.4236/jtts.2022.123030>
- Nazaryan, N. i Fang, F. C. (2020). Quantify the relationship between roundabout geometry and delay. *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 9(1), 25–36. <https://doi.org/10.5923/j.ijtte.20200902.01>
- Neuman, W. L. (2014). *Social research methods: Qualitative and quantitative approaches* (7. izdanje). Harlow, UK: Pearson Education Limited.
- Novák, J., Ambros, J. i Frič, J. (2018). How roundabout entry design parameters influence safety. *Transportation Research Record*, 2672(34), 73–84. <https://doi.org/10.1177/0361198118776159>
- Osei, K. K., Adams, C. A., Ackaah, W. i Oliver-Commey, Y. (2019). Signalization options to improve capacity and delay at roundabouts through microsimulation: A case study on arterial roadways in Ghana. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 6(5), 505–516. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.06.003>
- Papageorgiou, S. N. (2022). On correlation coefficients and their interpretation. *Journal of Orthodontics*, 49(3), 359–361. <https://doi.org/10.1177/14653125221076142>
- Papić, M. (2021). *Primijenjena statistika u MS Excelu za ekonomiste, znanstvenike i neznalice*. Zbornik Veleučilišta u Rijeci, 9(1), 59–78.
- Park, B. i Qi, H. (2005). Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1934, 208–217. <https://doi.org/10.3141/1934-22>
- Park, B. i Schneeberger, J. D. (2003). Microscopic simulation model calibration and validation: Case study of VISSIM simulation model for a coordinated actuated signal system. *Transportation Research Record*, 1856, 185–192. <https://doi.org/10.3141/1856-20>
- Park, B. i Qi, H. (2006). Microscopic simulation model calibration and validation for freeway work zone network – a case study of VISSIM. Proceedings of the 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (pp. 1471–1476). IEEE. (Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/224650912_Microscopic_simulation_model_calibration_and_validation_for_freeway_work_zone_network_-_a_case_study_of_VISSIM)
- Park, B., Qi, H. i Owen, K. (2010). Calibration of microsimulation models using travel time as a performance measure. *89th Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, DC.

- Park, B., Won, J. i Yun, I. (2006). Application of microscopic simulation model calibration and validation procedure: A case study of coordinated actuated signal system. *Transportation Research Record*, 1978, 113–122. <https://doi.org/10.3141/1978-16>
- Paul, G., Raju, N., Arkatkar, S. S. i Easa, S. M. (2021). Can segregating small vehicles in mixed-traffic stream improve safety and throughput? Implications using simulation. *Transportmetrica A: Transport Science*, 17(5), 615–639. <https://doi.org/10.1080/23249935.2020.1826595>
- Pilko, H., Šarić, Š. (2018). Vehicle Speed Impact on the Design of Efficient Urban Single-Lane Roundabouts. In: Macioszek, E., Sierpiński, G. *Recent Advances in Traffic Engineering for Transport Networks and Systems. TSTP 2017. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 21. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64084-6_1
- Polders, E., Daniels, S., Casters, W. i Brijs, T. (2014). Identifying Crash Patterns on Roundabouts. *Traffic Injury Prevention*, 16(2), 202–207. <https://doi.org/10.1080/15389588.2014.927576>
- Pranckutė, R. (2021). Web of Science (WoS) and Scopus: The Titans of Bibliographic Information in Today's Academic World. *Publications*, 9(1), 12. <https://doi.org/10.3390/publications9010012>
- PTV VISSIM (2022). *PTV VISSIM Multimodal Traffic Simulation Software*. (Preuzeto sa: <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim>)
- Rajasakran, R. A. (2008). A Practical Application: Micro Simulation of the N1 Freeway. *Proceedings of the 27th Southern African Transport Conference (SATC)*, 7–11 July 2008, Pretoria, South Africa. (Preuzeto s: <https://repository.up.ac.za/server/api/core/bitstreams/9db667d6-bd6a-452a-85e3-d8076dd351f1/content>)
- Rajput, A. A., Luo, Z., Gao, Q. i Khan, M. I. (2023). Analyzing network disruptions and their impact on travel times in urban areas. *Sustainable Cities and Society*, 96, Article 104808. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104808>
- Raju, N. i Farah, H. (2021). Evolution of Traffic Microsimulation and Its Use for Modeling Connected and Automated Vehicles. *Journal of Advanced Transportation Citation*, 2021, 1–29. <https://doi.org/10.1155/2021/2444363>
- Ranpura, P., Gujar, R. i Singh, S. (2025). Development of Mixed Traffic Microsimulation Model Calibration for Signalized Intersections. *Transportation Research Procedia*, 82, 2898–2910. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.12.226>
- Razali, N. M. i Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro–Wilk, Kolmogorov–Smirnov, Lilliefors, and Anderson–Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21–33. (Preuzeto s: <https://www.nrc.gov/docs/ml1714/ml17143a100.pdf>)

- Retting, R. A., Persaud, B., Garder, P. E. i Lord, D. (2001). Crash and injury reduction following installation of roundabouts in the United States. *American Journal of Public Health*, 91(4), 628–631. <https://doi.org/10.2105/AJPH.91.4.628>
- Riccardi, M. R.; Augeri, M. G.; Galante, F.; Mauriello, F.; Nicolosi, V.; Montella, A. (2022). Safety Index for evaluation of urban roundabouts. *Accident Analysis & Prevention*, 178, 106858. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106858>
- Rodegerdts, L., Bansen, J., Tiesler, C., Knudsen, J., Myers, E., Johnson, M., Moule, M., Persaud, B., Lyon, C., Hallmark, S., Isebrands, H., Crown, R. B., Guichet, B. i O'Brien, A. (2007). *Roundabouts in the United States (NCHRP Report 573)*. Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C.
- Rodgers, M. O., Gbologah, F., & Wei, A. (2021). *Evaluation of Factors Influencing Roundabout Performance* (Report No. FHWA-GA-21-1825). Georgia Tech Research Corporation, Federal Highway Administration. (*Preuzeto s: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/57330>*)
- Roy Hubara, N. i Sturm, A. (2020). Design methods for the new database era: A systematic literature review. *Software and Systems Modeling*, 19(2), 297–312. <https://doi.org/10.1007/s10270-019-00739-8>
- Rrecaj, A. A. i Bombol, K. M. (2015). Calibration and validation of the VISSIM parameters – state of the art. *TEM Journal*, 4(3), 255–269. (*Preuzeto s: https://www.temjournal.com/content/43/05/TemJournalAugust2015_255_269.pdf*)
- Saccomanno, F. F., Cunto, F. J. C., Guido, G. P. i Vitale, A. (2008). Comparing safety at signalized intersections and roundabouts using simulated rear end conflicts. *Transportation Research Record*, 2078(1), 90–95. <https://doi.org/10.3141/2078.12>
- Saidallah, M., El Fergougui, A. i Elalaoui, A. E. (2016). A comparative study of urban road traffic simulators. *MATEC Web of Conferences*, 81, 05002. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20168105002>
- Samaranayake, S., Chand, S., Sinha, A. i Dixit, V. (2024). Impact of connected and automated vehicles on the travel time reliability of an urban network. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 13(10), 171–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2023.11.008>
- Sang, H., Kim, J., Yu, J. i Lee, S. (2014). Development of a two-step neural network-based model to predict construction cost contingency. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(5), 679–688. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.802739>
- Sayed, T., Brown, G. i Navin, F. (1994). Simulation of traffic conflicts at unsignalized intersections with TSC-Sim. *Accident Analysis & Prevention*, 26(5), 593–607. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(94\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0001-4575(94)90021-3)

- Schoon, C. i van Minnen, J. (1994). The safety of roundabouts in the Netherlands. *Traffic Engineering & Control*, 35(3), 142–148
- Shaaban, K., & Hamad, H. (2020). Critical gap comparison between one-, two-, and three-lane roundabouts in Qatar. *Sustainability*, 12(10), 4232. <https://doi.org/10.3390/su12104232>
- Shawky, M., Alsobky, A., Al-Sobky, A. i Hassan, A. (2023). Traffic safety assessment for roundabout intersections using drone photography and conflict technique. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(6), 102115. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102115>
- Shin, S., Son, D. i Lee, S. (2024). Evaluation of a Cooperative Eco-Driving Strategy Based on VISSIM-MATLAB Integration. *Applied Sciences*, 14(13), Article 5453. <https://doi.org/10.3390/app14135453>
- SIDRA Solutions (2024). (Preuzeto sa: <https://www.sidrasolutions.com/software/sidra-intersection>)
- Sohouenou, P. Y., Neves, L. A., Christodoulou, A., Christidis, P. i Lo Presti, D. (2021). Using a hazard-independent approach to understand road-network robustness to multiple disruption scenarios. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 93, 102672. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102672>
- St-Aubin, P., Saunier, N. i Miranda-Moreno, L. (2015). Large-scale automated proactive road safety analysis using video data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 363–379. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.04.007>
- Statens vegvesen. (2023). Håndbok V121: Geometrisk utforming av veg- og gatekryss [Geometrijsko oblikovanje cestovnih raskrižja]. Oslo, Norveška. (Preuzeto s: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-v121.pdf>)
- Susilawati, M. A. P., Taylor, M. A. P. i Somenahalli, S. S. (2013). Modelling urban travel time variability with the Burr XII regression technique. Australasian Transport Research Forum 2011 Proceedings. (Preuzeto s: https://australasiantransportresearchforum.org.au/wp-content/uploads/2022/03/2011_Susilawati_Taylor_Somenahalli.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- Šenk, P. i Ambros, J. (2011). Estimation of accident frequency at newly-built roundabouts in the Czech Republic. *Transactions on Transport Sciences*, 4(4), 199–206. <https://doi.org/10.2478/V10158-011-0018-4>
- Šurdonja, S., Nežić, D. i Deluka-Tibljaš, A. (2015). Mikrosimulacijski model proračuna kapaciteta kružnog raskrižja. *Pomorski zbornik*, 49–50(1), 143–165. (Preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/138199>)
- Tarko, A. P. (2021). A unifying view on traffic conflicts and their connection with crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 158, 106187. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106187>

- Tian, Z., Troutbeck, R. J., Kyte, M., Brilon, W., Kittelson, W. i Vandehey, M. (2000). A Further Investigation on Critical Gap and Follow-Up Time. *Transportation Research Circular E-C018: Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity*, Transportation Research Board, Maui, Hawaii, 397–408. (Preuzeto s: https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec018/34_45.pdf).
- Tkalac Verčić, A., Sinčić Ćorić, D. i Pološki Vokić, N. (2010). *Priručnik za metodologiju istraživačkog rada: kako osmisliti, provesti i opisati znanstveno i stručno istraživanje*. Zagreb: M.E.P. d.o.o.
- Toledo, T., Ben-Akiva, M. E., Darda, D., Jha, M. N. i Koutsopoulos, H. N. (2004). Calibration of microscopic traffic simulation models with aggregate data. *Transportation Research Record*, 1876, 10–19. <https://doi.org/10.3141/1876-02>
- Toledo, T., Koutsopoulos, H. N. i Ben-Akiva, M. (2004). Off-line calibration of microscopic traffic simulation models with aggregate data. *Transportation Research Record*, 1876, 108–116. <https://doi.org/10.3141/1876-14>
- Tollazzi, T. (2015). *Alternative Types of Roundabouts: An Informational Guide*. Springer, Cham, Švicarska. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09084-9>
- Tollazzi, T., Zgrablić, T., Bergoč, J. i Renčelj, M. (2020). Comparative Analysis of "Turbo", "Reduced-Turbo", "Flower" and "Semi-Turbo" Roundabout. *Tehnički vjesnik*, 27 (5), 1410–1417. <https://doi.org/10.17559/TV-20190131115411>
- Toppen, A., Wunderlich, K. (2003). *Travel time data collection for measurement of advanced traveler information systems—Los Angeles case study*. Federal Highway Administration. (Preuzeto s: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/4221>)
- Transportation Research Board (TRB). (2010). *Highway Capacity Manual* (5. izdanje). National Research Council, Washington, D.C.
- Transportation Research Board. (2016). *Highway Capacity Manual* (6. izdanje). National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Washington, D.C.
- Trinh, L. T., Sano, K., Hatoyama, K., & De Silva, C. K. (2020). *Analysis of motorcycle microscopic characteristics at roundabouts under mixed traffic conditions: A case study of Vietnam*. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* (English Edition), 8(4), 520–532. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.04.005>
- Turner, S. M., Eisele, W. L., Benz, R. J. i Holdener, D. J. (1998). *Travel time data collection handbook (Report No. FHWA-PL-98-035)*. Washington, DC: Federal Highway Administration. (Preuzeto s: <https://www.fhwa.dot.gov/ohim/tvtw/natmec/00020.pdf>)
- Vaiana, R., Gallelli, V. i luele, T. (2013). Sensitivity analysis in traffic microscopic simulation model for roundabouts. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 8(3), 174–183. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2013.22>

- Vasconcelos, L., Neto, L., Seco, Á. M. i Silva, A. B. (2014). Validation of the surrogate safety assessment model for assessment of intersection safety. *Transportation Research Record*, 2432(1), 1-9. <https://doi.org/10.3141/2432-01>
- Vasconcelos, L., Silva, A. B., Seco, Á. M. i Santos, S. (2014). Application of microsimulation and surrogate safety assessment for evaluating roundabout safety. *Accident Analysis & Prevention*, 62, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.09.016>
- VOSviewer - Visualizing scientific landscapes. (Preuzeto s: <https://www.vosviewer.com/>).
- Wang, X., Dai, Z., Hsu, Y. T. i Zheng, S. (2024). Meso safety analysis of major arterials: The impact of intersection spacing and network connection compatibility. *Transportation Research Record*, 2678(5), 331–345. <https://doi.org/10.1177/03611981231189496>
- Washington State Department of Transportation. (2014). *Protocol for VISSIM simulation (Technical report)*. Olympia, WA; Washington State Department of Transportation. (Preuzeto s: <https://wsdot.wa.gov/sites/default/files/2021-03/TrafficOps-VISSIM-Protocol.pdf>)
- Webster, F. V. (1958). *Traffic signal settings [Road Research Technical Paper No. 39]*. London: Road Research Laboratory.
- Wu, Y., Abdel-Aty, M., Lee, J. i Huang, H. (2018). Risk-field assessment for safety evaluation of signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 113, 236–247. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.02.026>
- Xu, F. i Tian, Z. Z. (2008). Driver Behavior and Gap-Acceptance Characteristics at Roundabouts in California. *Transportation Research Record*, 2071, 117–124. <https://doi.org/10.3141/2071-14>
- Yang, F., Yin, Y., Cheng, L. i Zhu, L. (2017). Urban travel time reliability at different traffic conditions. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 23(1), 20–32. <https://doi.org/10.1080/15472450.2017.1408866>
- Yang, J. (2007). Application of the Kalman filter to the arterial travel time prediction: A special event case study. *Control and Intelligent Systems*, 35(1). <https://doi.org/10.2316/journal.201.2007.1.201-1670>
- Yap, Y. H., Gibson, H. M. i Waterson, B. J. (2013). An international review of roundabout capacity modelling. *Transport Reviews*, 33(5), 593–616. <https://doi.org/10.1080/01441647.2013.830160>
- Yaron, O. i Liu, R. (2008). Calibration of microscopic traffic simulation models: Methods and application. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2088(1), 36–46. <https://doi.org/10.3141/2088-05>

- Yoshioka, K., Hnakamura, H., Shimokawa, S. i Morita, H. (2017). An analysis on impact of roundabout geometric elements on driving behavior. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 12, 1783-1796.
<https://doi.org/10.11175/easts.12.1783>
- Yu, M. i Fan, W. D. (2017). Calibration of microscopic traffic simulation models using metaheuristic algorithms. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(1), 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.05.001>
- Zang, X., Zhao, X. i Tang, B. (2023). Hierarchical molecular graph self-supervised learning for property prediction. *Communications Chemistry*, 6(1), 34.
<https://doi.org/10.1038/s42004-023-00825-5>
- Zang, Z., Zhang, X., Song, T., Li, J., Nie, B., Mei, S. i Lu, J. (2023). Association between gene expression and functional–metabolic architecture in Parkinson’s disease. *Human Brain Mapping*, 44(14), 5387–5401. <https://doi.org/10.1002/hbm.26443>
- Zhang, H., Gao, Z., Zhao, X. i Liu, Y. (2015). Simulation-based analysis of roundabout capacity under heterogeneous traffic conditions. *Transportation Letters*, 7(2), 61–76. <https://doi.org/10.1179/1942787514Y.0000000043>
- Zhou, B., Li, Z. i Zhang, S. (2018). Comparison of factors affecting crash severities in hit and run and non hit and run crashes. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, Article 8537131. <https://doi.org/10.1155/2018/8537131>
- Zhou, L., Zhang, L. i Liu, C. S. (2022). Comparing roundabouts and signalized intersections through multiple model simulation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 7931–7940.
<https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3074787>

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Struktura doktorskog rada	6
Slika 2.1. Projektni elementi jednotračnog kružnog raskrižja	11
Slika 3.1. Vennov dijagram za definiranje upita	26
Slika 3.2. Trend objavljivanja radova po godini	28
Slika 3.3. Mrežna vizualizacija ključnih riječi – klasteri (VOSviewer)	29
Slika 3.4. Vizualizacija ključnih riječi – razvoj kroz godine (VOSviewer).....	30
Slika 3.5. Utjecaj prometnog opterećenja i kapaciteta na prosječno vrijeme kašnjenja vozila	40
Slika 4.1. Vizualizacija ključnih riječi od 2015. do 2025. godine (VOSviewer).....	55
Slika 4.2. Vrsta sudara prema kutu između smjera kretanja vozila	59
Slika 5.1. Metodologija istraživanja	67
Slika 5.2. (a) Vrsta konflikata; (b) Ozbiljnost konflikata.....	73
Slika 6.1. Brojač prometa (lijevo); Pozicija brojača prometa (desno)	86
Slika 6.2. Dnevni promet u odnosu na preporučeni maksimalni kapacitet kružnog raskrižja.....	89
Slika 6.3. Udio prometa na glavnom smjeru	90
Slika 6.4. Usporedba udjela vozila koja prekoračuju dozvoljenu brzinu - analizirano po raskrižjima.....	93
Slika 6.5. Projektni elementi jednotračnog kružnog raskrižja	94
Slika 6.6. (a) Projektni elementi mikrosimulacijskog modela; (b) VISSIM model.....	99
Slika 6.7. Ulazni parametri preliminarnog modela	100
Slika 6.8. (a) Prometna mreža modela; (b) VISSIM model kružnog i semaforiziranog raskrižja.....	101
Slika 6.9. Kapacitet izoliranog kružnog raskrižja u različitim scenarijima	102
Slika 6.10. Usporedba prometnih pokazatelja kod različitih scenarija izoliranog kružnog raskrižja.....	103
Slika 6.11. Utjecaj postotka dnevnog prometnog opterećenja u vršnom satu i udaljenosti između raskrižja na vrijeme putovanja za udio prometa na glavnom smjeru 60 %	105
Slika 6.12. Utjecaj udjela prometa na glavnom smjeru (GS) i udaljenosti između raskrižja na vrijeme putovanja (za udio od 7% PGDP-a u vršnom satu).....	106
Slika 6.13. Usporedba rezultata mikrosimulacija, neuronskih mreža i regresijskog modela	113

Slika 6.14. Utjecaj odabranih prediktora na vrijeme putovanja- usporedba neuronskih mreža i regresijskog modela.....	116
Slika 6.15. Broj potencijalnih konflikata po scenarijima.....	120
Slika 6.16. Usporedba ukupnog broja konflikata – SSAM i regresijski model	123
Slika 6.17. Broj potencijalnih konflikata po privozima	128
Slika 6.18. (a) Vrsta konflikta; (b) Ozbiljnost konflikta – SSAM model kružnog raskrižja 5	129
Slika 7.1. Ulazni parametri modela.....	137
Slika 7.2. VISSIM modeli raskrižja: (a) $R_v = 12$ m; (b) $R_v = 17$ m; (c) $R_v = 22$ m.....	138
Slika 7.3. Projektni elementi modela prometnih mikrosimulacija	138
Slika 7.4. Definirana ruta za prikupljanje podataka o vremenu putovanja vozila.....	140
Slika 7.5. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja ($R_v=12$ m, $GS=60\%$, $cs=17s$)	143
Slika 7.6. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja ($R_v=17$ m, $GS=60\%$, $cs=17s$)	143
Slika 7.7. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja ($R_v=22$ m, $GS=60\%$, $cs=17s$)	144
Slika 7.8. (a) Zastoj prometnog toka u scenarijima s vanjskim polumjerom 12 m ; (b) Prosječan postotak vozila koja su prošla kroz prometnu mrežu.....	145
Slika 7.9. Utjecaj vanjskog polumjera (R_v) i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja ($VPO=1400$ voz/h, $GS=60\%$, $cs=17s$)	146
Slika 7.10. Utjecaj udjela prometa na glavnom smjeru (GS) i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja ($VPO=1400$ voz/h, $R_v=17$ m, $cs=17s$)	147
Slika 7.11. Utjecaj duljine crvenog vremena (cs) i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja ($VPO=1400$ voz/h, $GS=60\%$, $R_v=17m$)	148
Slika 7.12. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja (VPO) i udaljenosti kružnog i semaforiziranog raskrižja na postotak vozila koja nisu uspjela proći kroz prometnu mrežu unutar vršnog sata.....	150
Slika 7.13. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja i udaljenosti raskrižja na vrijeme putovanja ($R_v=12$ m, $GS=60\%$, $cs=17s$)	152
Slika 7.14. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja i udaljenosti raskrižja na vrijeme putovanja ($R_v=17$ m, $GS=60\%$, $cs=17s$)	152
Slika 7.15. Utjecaj vršnog prometnog opterećenja i udaljenosti raskrižja na vrijeme putovanja ($R_v=22$ m, $GS=60\%$, $cs=17s$)	153
Slika 7.16. Utjecaj vanjskog polumjera (R_v) i udaljenosti raskrižja na prosječno vrijeme kašnjenja ($VPO=1400$ voz/h, $GS=60\%$, $cs=17s$)	154

Slika 7.17. Utjecaj udjela prometa na glavnom smjeru (GS) i udaljenosti raskrižja na vrijeme putovanja (VPO=1400 voz/h, cs=17s, Rv=17m)	156
Slika 7.18. Utjecaj duljine crvenog vremena (cs) i udaljenosti raskrižja na vrijeme putovanja (VPO=1400 voz/h, GS=60%, Rv=17m)	158
Slika 8.1. Prometni koridor u Gradu Osijeku s označenim privozima i pozicijom brojača prometa	169
Slika 8.2. Projektni elementi – situacija (Grad Osijek).....	170
Slika 8.3. Rute za terensko mjerenje vremena putovanja.....	172
Slika 8.4. Analizirani dio prometne mreže u gradu Poreču	175
Slika 8.5. Projektni elementi – Kružno raskrižje 3 (Grad Poreč).....	176
Slika 8.6. Projektni elementi: (a) Kružno raskrižje KR1; (b) Kružno raskrižje KR2 (Grad Poreč).....	176
Slika 8.7. Rute na kojima je mjereno vrijeme putovanja.....	178
Slika 8.8. Usporedba izmjerenog i modelom predviđenog vremena putovanja.....	182
Slika 9.1. Utjecaj vanjskog polumjera i udaljenosti između raskrižja na ukupan broj konflikata (GS=70%, cs=22s).....	190
Slika 9.2. Utjecaj duljine crvenog vremena i udaljenosti između raskrižja na ukupan broj konflikata (GS=70%, Rv=12m)	191
Slika 9.3. Utjecaj udjela prometa na glavnom smjeru (GS) i udaljenosti između raskrižja na ukupan broj konflikata (cs=17, Rv=17m).....	192
Slika 9.4. Mikrosimulacijski model prometnog koridora u Gradu Osijeku	199
Slika 9.5. Mikrosimulacijski model prometne mreže u Gradu Poreču	200
Slika 9.6. Analizirani segmenti prometnog koridora u Gradu Osijeku	203
Slika 9.7. Analizirani segmenti prometne mreže u Gradu Poreču.....	203
Slika 9.8. Usporedba broja prometnih konflikata predviđenih modelom s brojem konflikata utvrđenih softverskim alatom SSAM.....	204

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Podjela kružnih raskrižja (Hrvatske ceste, 2014)	10
Tablica 2.2. Popis analiziranih smjernica i pravilnika za projektiranje kružnih raskrižja	10
Tablica 2.3. Preporuke za projektiranje srednje velikih urbanih kružnih raskrižja	12
Tablica 2.4. Usporedba međunarodnih smjernica za projektiranje kružnih raskrižja....	16
Tablica 2.5. Usporedba međunarodnih smjernica za urbana i izvanurbana kružna raskrižja.....	18
Tablica 2.6. Kružna raskrižja na koridoru – usporedna analiza međunarodne tehničke regulative	22
Tablica 3.1. Statistika časopisa	28
Tablica 3.2. Popis ključnih riječi s najvećom "težinom"	29
Tablica 3.3. Kritični i međuslijedni razmak za jednostručna kružna raskrižja	39
Tablica 6.1. Količina prometa, struktura i dnevna raspodjela prometnog opterećenja	88
Tablica 6.2. Prikaz dnevnih brzina na analiziranim raskrižjima	91
Tablica 6.3. Deskriptivna statistika – dnevne brzine	92
Tablica 6.4. Projektni elementi analiziranih kružnih raskrižja	95
Tablica 6.5. Projektni i prometni parametri mikrosimulacijskog modela	99
Tablica 6.6. Korelacijska matrica prometnih pokazatelja	104
Tablica 6.7. Deskriptivna statistika prometnih pokazatelja	108
Tablica 6.8. Korelacijska matrica modela	108
Tablica 6.9. Odabir varijabli modela	109
Tablica 6.10. Statistika prilagodbe regresijskog modela	110
Tablica 6.11. Procijenjeni parametri višestruke linearne regresije za vrijeme putovanja	110
Tablica 6.12. Deskriptivna statistika predviđenog vremena putovanja na izdvojenom skupu	111
Tablica 6.13. Deskriptivna statistika	114
Tablica 6.14. Usporedba statistika prilagodbe regresijskog model i neuronske mreže	115
Tablica 6.15. Broj potencijalnih konflikata prema tipu	118
Tablica 6.16. Deskriptivna statistika konflikata unutar 24-satnog perioda.....	120
Tablica 6.17. Korelacijska matrica modela	121
Tablica 6.18. Odabir varijabli modela	121
Tablica 6.19. Statistika prilagodbe regresijskog modela	122
Tablica 6.20. Parametri modela.....	122

Tablica 6.21. Korelacijska matrica – dnevno prometno opterećenje, brzine, broj konflikata	126
Tablica 6.22. Korelacijska matrica – dnevno prometno opterećenje, projektni elementi i broj konflikata.....	127
Tablica 6.23. Rezultati višestruke linearne regresije za predviđanje ukupnog broja konflikata	129
Tablica 6.24. Rezultati višestruke linearne regresije za predviđanje sudara straga	130
Tablica 6.25. Rezultati višestruke linearne regresije za predviđanje sudara uslijed prestrojavanja.....	131
Tablica 7.1. Količina prometa, struktura prometa i projektni elementi modela prometnih mikrosimulacija.....	139
Tablica 7.2. Korelacijska matrica prometnih pokazatelja.....	141
Tablica 7.3. Korelacijska matrica modela	160
Tablica 7.4. Odabir varijabli modela	161
Tablica 7.5. Statistika prilagodbe regresijskog modela	162
Tablica 7.6. Analiza varijance.....	163
Tablica 7.7. Rezultati višestruke linearne regresije za predviđanje vremena putovanja	164
Tablica 8.1. Projektni elementi kružnog raskrižja u Osijeku.....	170
Tablica 8.2. Količina prometa, struktura i dnevna raspodjela prometnog opterećenja	171
Tablica 8.3. Duljine svjetlosnih vremena i opis ruta	173
Tablica 8.4. Vrijeme putovanja prema terenskim mjerenjima.....	173
Tablica 8.5. Deskriptivna statistika: vremena putovanja – mjerenja u Osijeku	174
Tablica 8.6. Projektni elementi kružnih raskrižja u Gradu Poreču	176
Tablica 8.7. Količina prometa, struktura i dnevna raspodjela prometnog opterećenja – mjerenja u Gradu Poreču	177
Tablica 8.8. Duljine svjetlosnih vremena i opis ruta	179
Tablica 8.9. Vrijeme putovanja prema terenskim mjerenjima.....	179
Tablica 8.10. Deskriptivna statistika vremena putovanja	180
Tablica 8.11. Predviđeno vrijeme putovanja regresijskim modelom i pripadni ulazni parametri modela.....	181
Tablica 8.12. Rezultati Shapiro-Wilkovog testa normalnosti	182
Tablica 8.13. Rezultati provedenih statističkih testova za usporedbu modelom predviđenih i stvarnih vremena putovanja.	184

Tablica 9.1. Deskriptivna statistika konflikata unutar 24-satnog perioda.....	193
Tablica 9.2. Korelacijska matrica	193
Tablica 9.3. Rezultati višestruke linearne regresije za predviđanje broja konflikata ...	194
Tablica 9.4. Odabir broja parametara regresijskog modela	195
Tablica 9.5. Statistika prilagodbe regresijskog modela	195
Tablica 9.6. Vanjski polumjer, količina prometa, prometna raspodjela, struktura prometa i operativna brzina analiziranih raskrižja	200
Tablica 9.7. Usporedba rezultata vremena putovanja mikrosimulacijskih modela i terenskih mjerenja.....	201
Tablica 9.8. Ulazni parametri ponašanja vozača - VISSIM.....	201
Tablica 9.9. Ulazni parametri za usporedbu regresijskog modela i rezultata mikrosimulacija.....	204
Tablica 9.10. Rezultati Shapiro-Wilkovog testa normalnosti	205
Tablica 9.11. Rezultati Wilcoxonovog neparametarskog testa za jedan uzorak.....	205

PRILOZI

PRILOG A: Preliminarna istraživanja - Rezultati prometnih mikrosimulacija

PRILOG B: Preliminarna istraživanja – neovisna validacija, ulazni podaci i rezultati mikrosimulacija izdvojenog skupa

PRILOG C: Preliminarna istraživanja – Usporedba rezultata vremena putovanja temeljem prometnih mikrosimulacija (VISSIM), regresijskog modela i neuronskih mreža

PRILOG D: Sažeti prikaz rezultata modela prometnih mikrosimulacija za razvoj modela predikcije vremena putovanja

PRILOG E: Prikaz broja konflikata u 24-satnom razdoblju

PRILOG A: Preliminarna istraživanja - Rezultati prometnih mikrosimulacija

- VPO : vršno prometno opterećenje (voz/h)
- GS : udio prometa na glavnom smjeru (/)
- D : udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja (m)
- QLen, QLenMax: prosječna i maksimalna duljinu reda čekanja (m)
- Veh: broj vozila koja su prošla kroz kružno raskrižje (voz)
- LOS: razina uslužnosti (/)
- VehDelay: prosječno vrijeme kašnjenja po vozilu (s/voz)
- StopDelay: kašnjenje pri zaustavljanju (s/voz)
- Stops: broj zaustavljanja po vozilu (/),
- EmissCO: emisija ugljikova monoksida (g),
- Fuel: potrošnja goriva (gal)
- Vrijeme put. : vrijeme putovanja od kružnog do semaforiziranog raskrižja [s].
- IKR : izolirano kružno raskrižje (D = 1000 m)

VPO	GS	D	QLen	QLen Max	Veh	LOS	VehDelay	StopDelay	Stops	EmissCO	Fuel	Vrijeme put.
voz/h	/	m	m	m	voz	/	s/voz	s/voz	/	g	gal	s
1000	0,7	IKR	2,82	89,44	1015	1	9,20	2,44	0,52	709,55	10,15	38,83
1000	0,7	40	3,75	89,24	1022	2	16,23	7,30	0,90	997,55	14,27	48,29
1000	0,7	50	2,55	86,99	1022	2	12,65	4,72	0,71	854,82	12,23	47,82
1000	0,7	60	2,26	81,53	1022	2	11,42	4,08	0,62	791,60	11,32	47,67
1000	0,7	70	2,22	85,58	1021	2	10,94	3,69	0,60	773,73	11,07	48,73
1000	0,7	80	2,36	85,61	1021	2	10,93	3,61	0,59	769,01	11,00	49,13
1000	0,7	90	2,52	94,67	1021	2	10,98	3,61	0,59	772,12	11,05	50,05
1000	0,7	100	2,64	93,02	1021	2	11,07	3,68	0,60	779,92	11,16	50,48
1000	0,7	110	2,62	86,62	1021	2	10,77	3,53	0,60	771,65	11,04	50,09
1000	0,7	120	2,68	90,04	1022	2	10,64	3,48	0,58	760,30	10,88	50,15
1000	0,6	IKR	2,20	66,62	1010	1	7,92	2,07	0,46	646,68	9,25	37,09
1000	0,6	40	1,92	74,21	1015	2	10,16	3,49	0,55	728,71	10,42	47,00
1000	0,6	50	2,29	72,06	1014	2	11,82	4,40	0,68	813,81	11,64	46,33
1000	0,6	60	1,94	67,84	1014	2	10,67	3,76	0,61	760,07	10,87	46,39
1000	0,6	70	1,92	74,21	1015	2	10,16	3,49	0,55	728,71	10,42	47,00
1000	0,6	80	2,12	69,02	1014	2	10,38	3,61	0,57	742,06	10,62	47,32
1000	0,6	90	2,07	68,88	1014	2	10,10	3,46	0,56	731,12	10,46	47,73
1000	0,6	100	2,08	65,04	1014	2	9,95	3,42	0,55	723,61	10,35	47,59
1000	0,6	110	2,24	62,90	1014	2	10,02	3,41	0,57	734,39	10,51	47,62
1000	0,6	120	2,33	63,27	1013	2	9,86	3,31	0,55	723,71	10,35	47,39
1000	0,5	IKR	2,14	64,26	1005	1	7,71	2,06	0,46	634,43	9,08	35,23
1000	0,5	40	3,07	78,96	1012	2	14,29	6,11	0,85	916,86	13,12	44,50
1000	0,5	50	2,18	67,89	1013	2	11,62	4,34	0,67	794,18	11,36	44,89

VPO	GS	D	QLen	QLen Max	Veh	LOS	VehDel ay	StopDe lay	Stops	EmissiCO	Fuel	Vrijem eput.
voz/ h	/	m	m	m	voz	/	s/voz	s/voz	/	g	gal	s
1000	0,5	60	1,94	66,16	1013	2	10,55	3,77	0,60	747,79	10,70	45,04
1000	0,5	70	1,91	55,20	1013	2	10,25	3,64	0,57	729,34	10,43	45,58
1000	0,5	80	1,87	55,65	1013	2	9,95	3,48	0,56	719,39	10,29	46,41
1000	0,5	90	1,92	52,10	1013	1	9,89	3,46	0,55	714,49	10,22	46,84
1000	0,5	100	1,95	51,16	1013	1	9,77	3,39	0,54	709,54	10,15	46,02
1000	0,5	110	2,11	52,48	1013	1	9,85	3,43	0,57	720,84	10,31	46,47
1000	0,5	120	2,21	57,17	1012	1	9,61	3,28	0,56	712,15	10,19	46,38
1200	0,7	IKR	8,46	124,73	1204	3	17,38	6,01	1,04	1277,48	18,28	47,79
1200	0,7	40	12,87	126,72	1214	3	30,16	15,31	1,67	1863,14	26,65	60,08
1200	0,7	50	8,37	129,70	1213	3	22,12	9,82	1,25	1482,76	21,21	57,19
1200	0,7	60	7,01	128,27	1212	3	19,43	8,16	1,10	1354,76	19,38	56,44
1200	0,7	70	6,49	123,84	1211	3	17,85	6,93	1,02	1279,45	18,30	57,06
1200	0,7	80	7,22	132,81	1212	3	18,41	6,69	1,09	1327,73	18,99	60,30
1200	0,7	90	7,52	135,85	1212	3	18,50	6,54	1,12	1346,89	19,27	61,99
1200	0,7	100	7,20	131,95	1212	3	17,67	6,21	1,07	1303,35	18,65	60,61
1200	0,7	110	7,80	130,36	1210	3	18,22	6,63	1,10	1327,91	19,00	61,28
1200	0,7	120	8,29	136,00	1211	3	18,57	6,78	1,12	1346,26	19,26	61,41
1200	0,6	IKR	6,01	95,91	1209	2	13,69	4,68	0,84	1090,37	15,60	43,61
1200	0,6	40	11,34	109,50	1211	3	27,22	13,58	1,57	1739,35	24,88	57,55
1200	0,6	50	7,74	110,63	1210	3	20,81	9,20	1,22	1429,12	20,45	56,46
1200	0,6	60	5,99	111,89	1212	3	17,51	7,20	1,03	1269,54	18,16	55,68
1200	0,6	70	5,34	111,04	1214	3	15,66	6,10	0,92	1176,34	16,83	55,42
1200	0,6	80	5,96	103,00	1213	3	15,50	5,78	0,95	1188,19	17,00	57,86
1200	0,6	90	5,63	102,44	1214	3	15,62	5,72	0,94	1189,00	17,01	58,51
1200	0,6	100	5,62	104,16	1214	3	15,36	5,71	0,92	1170,89	16,75	57,49
1200	0,6	110	5,96	103,00	1213	3	15,50	5,78	0,95	1188,19	17,00	57,86
1200	0,6	120	6,01	103,52	1214	3	15,20	5,66	0,93	1171,88	16,77	56,85
1200	0,5	IKR	5,77	88,53	1208	2	13,16	4,53	0,83	1065,80	15,25	39,52
1200	0,5	40	9,03	101,47	1209	3	23,50	11,33	1,38	1554,22	22,23	51,62
1200	0,5	50	6,89	94,47	1212	3	19,21	8,35	1,15	1356,21	19,40	51,77
1200	0,5	60	5,49	93,87	1214	3	16,67	6,84	0,99	1225,26	17,53	51,04
1200	0,5	70	5,06	92,22	1213	3	15,35	6,09	0,90	1150,11	16,45	52,17
1200	0,5	80	4,83	85,72	1214	2	14,81	5,62	0,90	1139,58	16,30	52,43
1200	0,5	90	4,80	86,96	1213	2	14,46	5,49	0,86	1109,29	15,87	52,71
1200	0,5	100	5,16	88,87	1213	2	14,73	5,57	0,89	1131,97	16,19	52,09
1200	0,5	110	5,66	82,27	1213	3	15,13	5,79	0,92	1158,59	16,57	53,22
1200	0,5	120	6,23	84,51	1212	2	15,51	5,98	0,95	1175,54	16,82	52,09
1400	0,7	IKR	28,94	143,97	1383	5	40,10	15,67	2,61	2923,06	41,82	74,72
1400	0,7	40	44,39	141,01	1345	5	70,39	38,85	3,79	4157,02	59,47	97,45
1400	0,7	50	36,74	141,12	1374	6	57,70	29,81	3,26	3661,39	52,38	91,87
1400	0,7	60	29,03	141,92	1392	5	46,73	22,41	2,72	3148,50	45,04	86,25

VPO	GS	D	QLen	QLen Max	Veh	LOS	VehDel ay	StopDe lay	Stops	EmissiCO	Fuel	Vrijem eput.
voz/ h	/	m	m	m	voz	/	s/voz	s/voz	/	g	gal	s
1400	0,7	70	26,04	141,43	1399	5	41,64	18,40	2,55	2952,09	42,23	86,07
1400	0,7	80	27,42	141,68	1391	5	41,90	16,90	2,74	3064,28	43,84	93,50
1400	0,7	90	26,68	144,49	1392	5	40,16	15,41	2,70	3006,19	43,01	96,62
1400	0,7	100	26,10	141,96	1394	5	39,19	14,69	2,67	2965,92	42,43	96,23
1400	0,7	110	26,88	142,28	1392	5	39,69	15,11	2,68	2982,62	42,67	96,25
1400	0,7	120	30,12	143,74	1390	5	43,20	17,15	2,87	3170,27	45,35	97,43
1400	0,6	IKR	21,50	137,45	1400	4	31,99	13,27	2,07	2436,40	34,86	61,72
1400	0,6	40	33,73	138,36	1357	5	56,93	32,35	3,03	3438,03	49,18	80,80
1400	0,6	50	27,26	135,51	1392	5	46,09	24,10	2,60	3039,61	43,49	75,15
1400	0,6	60	22,32	135,49	1400	5	38,71	18,75	2,28	2707,71	38,74	73,55
1400	0,6	70	20,56	131,83	1403	4	35,71	16,65	2,15	2565,94	36,71	76,28
1400	0,6	80	21,90	137,39	1406	5	36,48	16,28	2,27	2672,00	38,23	81,27
1400	0,6	90	19,42	139,10	1412	4	32,39	13,43	2,09	2475,42	35,41	82,41
1400	0,6	100	18,36	137,42	1411	4	30,54	12,36	2,00	2381,80	34,07	82,76
1400	0,6	110	21,45	135,47	1408	4	34,05	14,36	2,22	2593,00	37,10	81,65
1400	0,6	120	22,34	136,17	1409	4	34,65	14,92	2,23	2609,03	37,33	82,42
1400	0,5	IKR	15,93	104,59	1395	4	25,62	10,54	1,64	2005,99	28,70	48,03
1400	0,5	40	28,44	127,60	1360	4	49,18	26,68	2,77	3122,95	44,68	69,65
1400	0,5	50	21,93	115,05	1388	5	39,31	19,83	2,33	2709,76	38,77	67,75
1400	0,5	60	16,95	115,87	1402	4	31,55	14,77	1,92	2316,71	33,14	64,73
1400	0,5	70	15,20	119,68	1404	4	28,70	12,89	1,76	2162,76	30,94	64,50
1400	0,5	80	14,68	115,00	1405	4	27,86	12,11	1,75	2135,39	30,55	67,75
1400	0,5	90	13,56	120,68	1403	4	25,88	10,97	1,64	2025,29	28,97	68,67
1400	0,5	100	14,09	119,26	1403	4	25,99	10,82	1,68	2050,22	29,33	68,10
1400	0,5	110	16,31	119,92	1403	4	28,15	11,93	1,82	2187,85	31,30	68,63
1400	0,5	120	17,05	110,92	1401	4	28,64	12,32	1,85	2210,35	31,62	66,75
1600	0,7	IKR	44,30	143,66	1456	6	55,77	22,51	3,85	4231,74	60,54	97,59
1600	0,7	40	53,74	143,83	1382	6	80,76	43,75	4,54	4952,19	70,85	117,27
1600	0,7	50	51,41	145,27	1415	6	75,19	39,13	4,36	4840,89	69,25	115,22
1600	0,7	60	50,00	144,32	1441	6	71,26	35,60	4,23	4762,62	68,13	115,56
1600	0,7	70	48,38	144,51	1467	6	67,45	31,80	4,22	4757,27	68,06	117,44
1600	0,7	80	44,96	147,38	1464	6	61,55	26,59	4,12	4562,37	65,27	119,09
1600	0,7	90	41,32	146,21	1461	6	56,35	22,79	3,93	4311,75	61,68	122,54
1600	0,7	100	41,86	146,24	1464	6	56,53	23,29	3,90	4308,82	61,64	122,13
1600	0,7	110	43,88	143,64	1468	6	57,81	24,19	3,95	4374,35	62,58	121,30
1600	0,7	120	45,06	146,44	1467	6	58,66	24,47	4,00	4429,02	63,36	120,73
1600	0,6	IKR	50,50	144,23	1492	6	62,64	27,07	4,27	4762,86	68,14	104,80
1600	0,6	40	53,79	143,39	1395	6	79,49	42,80	4,58	4992,80	71,43	126,76
1600	0,6	50	51,57	144,76	1429	6	75,04	38,78	4,45	4936,20	70,62	124,76
1600	0,6	60	49,64	143,97	1459	6	70,41	35,11	4,23	4799,48	68,66	117,58
1600	0,6	70	49,28	144,62	1473	6	68,28	32,44	4,30	4850,34	69,39	121,99

VPO	GS	D	QLen	QLen Max	Veh	LOS	VehDel ay	StopDe lay	Stops	EmissiCO	Fuel	Vrijem eput.
voz/ h	/	m	m	m	voz	/	s/voz	s/voz	/	g	gal	s
1600	0,6	80	51,66	145,81	1486	6	69,66	31,56	4,62	5136,94	73,49	134,91
1600	0,6	90	50,91	146,04	1500	6	67,20	29,65	4,56	5089,13	72,81	135,22
1600	0,6	100	46,24	145,53	1481	6	61,46	26,25	4,21	4674,01	66,87	127,60
1600	0,6	110	47,34	144,09	1481	6	61,92	26,57	4,24	4702,66	67,28	125,60
1600	0,6	120	51,87	145,45	1488	6	66,47	29,14	4,54	5020,93	71,83	130,84
1600	0,5	IKR	35,11	135,15	1516	5	45,94	20,64	3,01	3577,69	51,18	70,15
1600	0,5	40	44,58	140,60	1405	5	68,86	38,53	3,85	4328,53	61,92	113,12
1600	0,5	50	39,95	138,80	1439	6	61,77	33,13	3,56	4092,22	58,54	104,40
1600	0,5	60	38,33	139,13	1476	6	57,95	29,92	3,46	4050,55	57,95	100,02
1600	0,5	70	38,76	138,36	1498	6	56,54	28,34	3,43	4059,08	58,07	100,05
1600	0,5	80	41,19	145,03	1517	6	58,46	27,76	3,78	4392,95	62,85	114,85
1600	0,5	90	41,56	149,32	1525	6	57,57	26,86	3,73	4365,95	62,46	114,80
1600	0,5	100	37,78	138,31	1524	6	52,35	24,13	3,42	4030,90	57,67	104,69
1600	0,5	110	37,42	137,97	1515	6	51,49	23,45	3,43	3992,15	57,11	100,88
1600	0,5	120	39,70	138,81	1509	6	53,52	24,40	3,57	4121,32	58,96	105,88
1800	0,7	IKR	50,60	143,94	1511	6	61,11	25,49	4,24	4778,26	68,36	105,04
1800	0,7	40	57,74	142,61	1394	6	85,71	47,80	4,75	5224,48	74,74	132,22
1800	0,7	50	54,63	143,71	1435	6	80,46	42,90	4,63	5198,02	74,36	130,74
1800	0,7	60	53,73	150,82	1476	6	75,77	38,47	4,60	5224,68	74,75	128,92
1800	0,7	70	53,78	147,46	1487	6	73,77	36,07	4,59	5215,26	74,61	131,50
1800	0,7	80	50,53	148,24	1492	6	69,56	32,21	4,56	5115,19	73,18	139,62
1800	0,7	90	47,38	152,51	1504	6	64,44	28,46	4,32	4882,14	69,84	140,49
1800	0,7	100	49,46	157,51	1508	6	65,45	28,88	4,45	5010,68	71,68	140,58
1800	0,7	110	48,79	149,15	1516	6	63,73	27,65	4,39	4950,85	70,83	139,48
1800	0,7	120	50,38	158,84	1514	6	63,42	27,01	4,42	4962,01	70,99	134,47
1800	0,6	IKR	55,87	144,49	1538	6	66,98	28,78	4,68	5302,28	75,86	122,82
1800	0,6	40	59,55	144,83	1424	6	86,48	47,77	4,93	5462,40	78,15	146,03
1800	0,6	50	56,74	143,80	1456	6	81,99	43,80	4,79	5400,59	77,26	147,07
1800	0,6	60	55,93	144,37	1494	6	78,13	39,32	4,85	5508,12	78,80	144,76
1800	0,6	70	56,00	144,92	1506	6	77,67	38,47	4,85	5539,10	79,24	149,15
1800	0,6	80	56,37	149,71	1516	6	76,03	35,81	5,03	5665,85	81,06	156,44
1800	0,6	90	55,97	148,00	1531	6	74,41	34,41	5,00	5660,21	80,98	158,39
1800	0,6	100	55,68	153,20	1530	6	72,90	33,30	4,93	5577,16	79,79	158,91
1800	0,6	110	55,58	154,23	1538	6	71,15	31,89	4,86	5520,22	78,97	154,53
1800	0,6	120	56,98	154,61	1534	6	71,71	31,83	4,94	5575,04	79,76	151,03
1800	0,5	IKR	58,87	143,66	1582	6	69,30	30,78	4,76	5555,93	79,48	131,43
1800	0,5	40	62,09	143,65	1439	6	91,41	51,73	5,11	5735,44	82,05	177,03
1800	0,5	50	60,55	142,78	1466	6	87,41	47,80	5,02	5700,95	81,56	172,56
1800	0,5	60	60,33	144,06	1502	6	84,50	44,36	5,10	5836,85	83,50	170,26
1800	0,5	70	61,85	145,32	1528	6	83,66	42,08	5,21	5993,49	85,74	171,75
1800	0,5	80	60,92	148,62	1531	6	81,87	40,08	5,30	6025,84	86,21	180,14

VPO	GS	D	QLen	QLen Max	Veh	LOS	VehDel ay	StopDe lay	Stops	EmissiCO	Fuel	Vrijem eput.
voz/ h	/	m	m	m	voz	/	s/voz	s/voz	/	g	gal	s
1800	0,5	90	61,56	150,85	1536	6	81,79	39,74	5,37	6098,63	87,25	185,57
1800	0,5	100	59,61	155,53	1539	6	78,10	36,91	5,22	5920,80	84,70	182,40
1800	0,5	110	59,36	145,42	1547	6	75,56	34,98	5,12	5825,61	83,34	174,19
1800	0,5	120	60,78	144,53	1548	6	75,96	35,25	5,16	5866,44	83,93	175,23
2000	0,7	<i>IKR</i>	54,67	144,81	1560	6	64,10	26,31	4,60	5261,06	75,27	116,42
2000	0,7	40	62,91	147,22	1424	6	91,27	51,68	5,05	5652,75	80,87	148,31
2000	0,7	50	59,30	143,75	1451	6	87,06	47,36	5,01	5639,78	80,68	150,20
2000	0,7	60	57,05	147,64	1494	6	81,51	42,58	4,85	5583,71	79,88	147,80
2000	0,7	70	57,53	150,86	1511	6	79,75	40,19	4,92	5659,75	80,97	149,75
2000	0,7	80	55,98	150,32	1518	6	77,29	37,28	4,99	5675,12	81,19	156,12
2000	0,7	90	53,25	158,29	1531	6	71,56	33,00	4,79	5458,03	78,08	160,18
2000	0,7	100	54,99	161,34	1531	6	72,77	33,36	4,95	5596,87	80,07	161,41
2000	0,7	110	55,47	158,73	1550	6	70,60	31,58	4,87	5560,21	79,55	154,84
2000	0,7	120	56,04	168,05	1553	6	69,02	29,92	4,81	5493,01	78,58	151,85
2000	0,6	<i>IKR</i>	60,78	147,59	1590	6	70,50	30,63	4,98	5778,95	82,67	135,55
2000	0,6	40	65,19	145,38	1449	6	94,28	53,63	5,24	5933,07	84,88	170,41
2000	0,6	50	62,38	144,44	1469	6	90,76	49,17	5,33	6002,29	85,87	175,00
2000	0,6	60	61,82	151,85	1512	6	86,64	45,74	5,19	5991,93	85,72	169,48
2000	0,6	70	62,54	148,01	1527	6	85,88	43,82	5,32	6123,26	87,60	171,66
2000	0,6	80	61,67	152,21	1549	6	82,30	39,74	5,39	6184,09	88,47	176,65
2000	0,6	90	62,21	158,29	1556	6	82,26	39,76	5,38	6204,31	88,76	183,91
2000	0,6	100	61,45	159,44	1560	6	79,78	37,25	5,39	6171,19	88,29	178,67
2000	0,6	110	61,33	156,47	1557	6	78,21	36,50	5,29	6048,11	86,53	178,00
2000	0,6	120	63,22	160,33	1575	6	77,60	35,66	5,29	6106,96	87,37	174,24
2000	0,5	<i>IKR</i>	69,02	145,05	1622	6	78,58	35,13	5,44	6426,57	91,94	148,21
2000	0,5	40	73,02	143,66	1474	6	101,32	57,92	5,64	6447,24	92,24	203,93
2000	0,5	50	69,67	145,19	1502	6	98,15	54,35	5,67	6526,83	93,37	203,86
2000	0,5	60	69,71	146,96	1499	6	95,19	50,87	5,71	6480,02	92,70	192,10
2000	0,5	70	69,08	145,79	1539	6	93,18	48,10	5,74	6629,49	94,84	196,70
2000	0,5	80	68,58	151,08	1550	6	91,43	45,87	5,85	6707,81	95,96	206,93
2000	0,5	90	68,25	153,50	1562	6	89,87	44,62	5,81	6703,21	95,90	207,41
2000	0,5	100	68,13	160,31	1566	6	87,74	42,52	5,82	6673,57	95,47	203,84
2000	0,5	110	67,82	160,63	1572	6	85,02	40,36	5,73	6573,89	94,05	200,44
2000	0,5	120	68,82	163,00	1576	6	84,70	39,73	5,72	6581,26	94,15	194,86

PRILOG B: Preliminarna istraživanja – neovisna validacija, ulazni podaci i rezultati mikrosimulacija izdvojenog skupa

Br.	Vršno prometno opterećenje (voz/h)	Udio prometa na glavnom smjeru (/)	Razmak raskrižja (m)	Vrijeme putovanja - VISSIM (s)	Vrijeme putovanja - regresija (s)
1	1380	0,55	40	66,34	91,49
2	1500	0,64	40	110,31	105,25
3	1730	0,60	40	128,59	137,78
4	1050	0,60	50	46,64	44,78
5	1220	0,52	50	52,29	70,28
6	1410	0,58	50	78,95	94,46
7	1940	0,70	60	140,91	163,00
8	1390	0,65	60	71,44	89,44
9	1220	0,70	70	58,80	64,55
10	1040	0,62	70	46,96	42,32
11	1350	0,55	70	66,38	86,62
12	1590	0,58	70	111,37	118,49
13	1780	0,60	70	134,74	143,82
14	1970	0,50	80	175,22	172,37
15	1050	0,65	80	49,71	42,55
16	1760	0,52	80	149,06	143,15
17	1720	0,60	80	137,27	135,38
18	1550	0,65	90	125,59	110,49
19	1810	0,52	90	158,71	149,71
20	1220	0,66	100	59,67	64,93
21	1750	0,69	100	135,22	136,34
22	1900	0,52	100	162,84	161,73
23	1060	0,65	100	51,31	43,40
24	1780	0,61	110	139,75	142,49
25	1030	0,67	110	49,19	38,47
26	1020	0,53	110	47,47	41,16
27	1100	0,70	120	51,46	46,89
28	1350	0,55	120	70,28	85,33
29	1590	0,50	120	102,76	119,51
30	1820	0,58	120	159,29	148,56

PRILOG C: Preliminarna istraživanja – Usporedba rezultata vremena putovanja temeljem prometnih mikrosimulacija (VISSIM), regresijskog modela i neuronskih mreža

Vršno prometno opterećenje (voz/h)	Udio prometa na glavnom smjeru (/)	Udaljenost raskrižja (m)	VISSIM	Regresijski model	Neuronska mreža
1000	0,7	izolirano KR	38,83	9,9751	31,39345
1000	0,7	40	48,29	34,9351	48,8277
1000	0,7	50	47,82	34,6751	48,10521
1000	0,7	60	47,67	34,4151	47,38982
1000	0,7	70	48,73	34,1551	46,68166
1000	0,7	80	49,13	33,8951	45,98088
1000	0,7	90	50,05	33,6351	45,28764
1000	0,7	100	50,48	33,3751	44,60207
1000	0,7	110	50,09	33,1151	43,92431
1000	0,7	120	50,15	32,8551	43,25452
1000	0,6	izolirano KR	37,09	12,8728	33,53653
1000	0,6	40	47	37,8328	46,28963
1000	0,6	50	46,33	37,5728	46,06659
1000	0,6	60	46,39	37,3128	45,84031
1000	0,6	70	47	37,0528	45,61096
1000	0,6	80	47,32	36,7928	45,3787
1000	0,6	90	47,73	36,5328	45,1437
1000	0,6	100	47,59	36,2728	44,90612
1000	0,6	110	47,62	36,0128	44,66613
1000	0,6	120	47,39	35,7528	44,4239
1000	0,5	izolirano KR	35,23	15,7705	20,35558
1000	0,5	40	44,5	40,7305	31,56281
1000	0,5	50	44,89	40,4705	31,85682
1000	0,5	60	45,04	40,2105	32,13742
1000	0,5	70	45,58	39,9505	32,40476
1000	0,5	80	46,41	39,6905	32,65898
1000	0,5	90	46,84	39,4305	32,90023
1000	0,5	100	46,02	39,1705	33,12864
1000	0,5	110	46,47	38,9105	33,34438
1000	0,5	120	46,38	38,6505	33,54758
1200	0,7	izolirano KR	47,79	37,1751	53,68835
1200	0,7	40	60,08	62,1351	70,2155
1200	0,7	50	57,19	61,8751	69,66386
1200	0,7	60	56,44	61,6151	69,1155
1200	0,7	70	57,06	61,3551	68,57056

Vršno prometno opterećenje (voz/h)	Udio prometa na glavnom smjeru (/)	Udaljenost raskrižja (m)	VISSIM	Regresijski model	Neuronska mreža
1200	0,7	80	60,3	61,0951	68,02919
1200	0,7	90	61,99	60,8351	67,49156
1200	0,7	100	60,61	60,5751	66,95782
1200	0,7	110	61,28	60,3151	66,42814
1200	0,7	120	61,41	60,0551	65,90266
1200	0,6	izolirano KR	43,61	40,0728	49,99597
1200	0,6	40	57,55	65,0328	67,34289
1200	0,6	50	56,46	64,7728	67,27122
1200	0,6	60	55,68	64,5128	67,1921
1200	0,6	70	55,42	64,2528	67,10569
1200	0,6	80	57,86	63,9928	67,01215
1200	0,6	90	58,51	63,7328	66,91164
1200	0,6	100	57,49	63,4728	66,80434
1200	0,6	110	57,86	63,2128	66,69038
1200	0,6	120	56,85	62,9528	66,56996
1200	0,5	izolirano KR	39,52	42,9705	35,83115
1200	0,5	40	51,62	67,9305	53,41638
1200	0,5	50	51,77	67,6705	53,82154
1200	0,5	60	51,04	67,4105	54,20995
1200	0,5	70	52,17	67,1505	54,58175
1200	0,5	80	52,43	66,8905	54,93707
1200	0,5	90	52,71	66,6305	55,27603
1200	0,5	100	52,09	66,3705	55,59877
1200	0,5	110	53,22	66,1105	55,90541
1200	0,5	120	52,09	65,8505	56,19609
1400	0,7	izolirano KR	74,72	64,3751	73,20429
1400	0,7	40	97,45	89,3351	90,8076
1400	0,7	50	91,87	89,0751	90,42569
1400	0,7	60	86,25	88,8151	90,04295
1400	0,7	70	86,07	88,5551	89,65952
1400	0,7	80	93,5	88,2951	89,27558
1400	0,7	90	96,62	88,0351	88,8913
1400	0,7	100	96,23	87,7751	88,50682
1400	0,7	110	96,25	87,5151	88,12232
1400	0,7	120	97,43	87,2551	87,73797
1400	0,6	izolirano KR	61,72	67,2728	68,71866
1400	0,6	40	80,8	92,2328	90,39791
1400	0,6	50	75,15	91,9728	90,48042
1400	0,6	60	73,55	91,7128	90,55142
1400	0,6	70	76,28	91,4528	90,61107
1400	0,6	80	81,27	91,1928	90,65952

Vršno prometno opterećenje (voz/h)	Udio prometa na glavnom smjeru (/)	Udaljenost raskrižja (m)	VISSIM	Regresijski model	Neuronska mreža
1400	0,6	90	82,41	90,9328	90,69694
1400	0,6	100	82,76	90,6728	90,72347
1400	0,6	110	81,65	90,4128	90,73927
1400	0,6	120	82,42	90,1528	90,74451
1400	0,5	1000	48,03	70,1705	56,17073
1400	0,5	40	69,65	95,1305	80,19016
1400	0,5	50	67,75	94,8705	80,68616
1400	0,5	60	64,73	94,6105	81,16263
1400	0,5	70	64,5	94,3505	81,61966
1400	0,5	80	67,75	94,0905	82,05737
1400	0,5	90	68,67	93,8305	82,47586
1400	0,5	100	68,1	93,5705	82,87526
1400	0,5	110	68,63	93,3105	83,25567
1400	0,5	120	66,75	93,0505	83,61721
1600	0,7	izolirano KR	97,59	91,5751	92,01838
1600	0,7	40	117,27	116,5351	111,6673
1600	0,7	50	115,22	116,2751	111,4583
1600	0,7	60	115,56	116,0151	111,2443
1600	0,7	70	117,44	115,7551	111,0254
1600	0,7	80	119,09	115,4951	110,8017
1600	0,7	90	122,54	115,2351	110,5735
1600	0,7	100	122,13	114,9751	110,3408
1600	0,7	110	121,3	114,7151	110,1039
1600	0,7	120	120,73	114,4551	109,863
1600	0,6	izolirano KR	104,8	94,4728	90,53459
1600	0,6	40	126,76	119,4328	116,0009
1600	0,6	50	124,76	119,1728	116,2354
1600	0,6	60	117,58	118,9128	116,4546
1600	0,6	70	121,99	118,6528	116,6587
1600	0,6	80	134,91	118,3928	116,8479
1600	0,6	90	135,22	118,1328	117,0223
1600	0,6	100	127,6	117,8728	117,182
1600	0,6	110	125,6	117,6128	117,3273
1600	0,6	120	130,84	117,3528	117,4581
1600	0,5	izolirano KR	70,15	97,3705	82,09734
1600	0,5	40	113,12	122,3305	113,1428
1600	0,5	50	104,4	122,0705	113,6988
1600	0,5	60	100,02	121,8105	114,233
1600	0,5	70	100,05	121,5505	114,7456
1600	0,5	80	114,85	121,2905	115,2367
1600	0,5	90	114,8	121,0305	115,7062

Vršno prometno opterećenje (voz/h)	Udio prometa na glavnom smjeru (/)	Udaljenost raskrižja (m)	VISSIM	Regresijski model	Neuronska mreža
1600	0,5	100	104,69	120,7705	116,1544
1600	0,5	110	100,88	120,5105	116,5814
1600	0,5	120	105,88	120,2505	116,9871
1800	0,7	izolirano KR	105,04	118,7751	111,6883
1800	0,7	40	132,22	143,7351	133,5375
1800	0,7	50	130,74	143,4751	133,506
1800	0,7	60	128,92	143,2151	133,4651
1800	0,7	70	131,5	142,9551	133,4152
1800	0,7	80	139,62	142,6951	133,3563
1800	0,7	90	140,49	142,4351	133,2886
1800	0,7	100	140,58	142,1751	133,2123
1800	0,7	110	139,48	141,9151	133,1275
1800	0,7	120	134,47	141,6551	133,0345
1800	0,6	izolirano KR	122,82	121,6728	116,0368
1800	0,6	40	146,03	146,6328	144,8077
1800	0,6	50	147,07	146,3728	145,1838
1800	0,6	60	144,76	146,1128	145,5414
1800	0,6	70	149,15	145,8528	145,8806
1800	0,6	80	156,44	145,5928	146,2016
1800	0,6	90	158,39	145,3328	146,5045
1800	0,6	100	158,91	145,0728	146,7895
1800	0,6	110	154,53	144,8128	147,0565
1800	0,6	120	151,03	144,5528	147,3058
1800	0,5	izolirano KR	131,43	124,5705	114,5015
1800	0,5	40	177,03	149,5305	153,8773
1800	0,5	50	172,56	149,2705	154,4518
1800	0,5	60	170,26	149,0105	155,0029
1800	0,5	70	171,75	148,7505	155,5308
1800	0,5	80	180,14	148,4905	156,0356
1800	0,5	90	185,57	148,2305	156,5172
1800	0,5	100	182,4	147,9705	156,9759
1800	0,5	110	174,19	147,7105	157,4116
1800	0,5	120	175,23	147,4505	157,8244
2000	0,7	izolirano KR	116,42	145,9751	133,3147
2000	0,7	40	148,31	170,9351	156,9895
2000	0,7	50	150,2	170,6751	157,1372
2000	0,7	60	147,8	170,4151	157,2718
2000	0,7	70	149,75	170,1551	157,3932
2000	0,7	80	156,12	169,8951	157,5016
2000	0,7	90	160,18	169,6351	157,5973
2000	0,7	100	161,41	169,3751	157,6803

Vršno prometno opterećenje (voz/h)	Udio prometa na glavnom smjeru (/)	Udaljenost raskrižja (m)	VISSIM	Regresijski model	Neuronska mreža
2000	0,7	110	154,84	169,1151	157,7508
2000	0,7	120	151,85	168,8551	157,809
2000	0,6	izolirano KR	135,55	148,8728	145,7428
2000	0,6	40	170,41	173,8328	177,7199
2000	0,6	50	175	173,5728	178,217
2000	0,6	60	169,48	173,3128	178,693
2000	0,6	70	171,66	173,0528	179,1478
2000	0,6	80	176,65	172,7928	179,5817
2000	0,6	90	183,91	172,5328	179,9948
2000	0,6	100	178,67	172,2728	180,387
2000	0,6	110	178	172,0128	180,7587
2000	0,6	120	174,24	171,7528	181,1097
2000	0,5	izolirano KR	148,21	151,7705	154,5387
2000	0,5	40	203,93	176,7305	204,3379
2000	0,5	50	203,86	176,4705	204,8796
2000	0,5	60	192,1	176,2105	205,3971
2000	0,5	70	196,7	175,9505	205,8905
2000	0,5	80	206,93	175,6905	206,3597
2000	0,5	90	207,41	175,4305	206,8048
2000	0,5	100	203,84	175,1705	207,2259
2000	0,5	110	200,44	174,9105	207,623
2000	0,5	120	194,86	174,6505	207,9962

Napomena: U scenarijima izoliranog kružnog raskrižja, kao udaljenost je između kružnog i semaforiziranog raskrižja usvojena je odaljenost od 1000 m.

PRILOG D: Sažeti prikaz rezultata modela prometnih mikrosimulacija za razvoj modela predikcije vremena putovanja

U tablici su prikazani rezultati za scenarije s vanjskim polumjerom kružnog raskrižja 17 m, duljinom crvenog vremena 22 s i udjelom vozila na glavnom smjeru od 60 %.

Cjelovita baza podataka (2880 scenarija) dostupna je u digitalnom repozitoriju Sveučilišta u Rijeci.

U scenarijima izoliranog kružnog raskrižja, kao udaljenost je između kružnog i semaforiziranog raskrižja usvojena je udaljenost od 1000 m.

VPO	GS	cs	Rv	D	Qlen	QlenMax	Veh	LOS	VehDelay	StopDelay	Stops	EmissiCO	Fuel	Vrijeme put.
voz/h	/	s	m	m	m	m	voz	/	s/voz	s/voz	/	g	gal	s
1000	0,6	22	17	40	3,81	85,74	1013	2	17,09	8,13	0,96	1017,29	14,55	49,89
1000	0,6	22	17	50	2,50	72,73	1013	2	13,32	5,39	0,77	874,19	12,51	50,23
1000	0,6	22	17	60	1,98	64,25	1013	2	11,31	4,22	0,64	784,90	11,23	49,74
1000	0,6	22	17	70	2,04	62,58	1014	2	10,72	3,84	0,59	756,19	10,82	50,47
1000	0,6	22	17	80	2,07	60,79	1014	2	10,48	3,69	0,58	747,81	10,70	51,02
1000	0,6	22	17	90	1,96	59,19	1014	2	10,10	3,52	0,55	727,70	10,41	51,01
1000	0,6	22	17	100	2,17	65,08	1015	2	10,32	3,66	0,57	739,87	10,58	51,35
1000	0,6	22	17	110	2,20	63,91	1014	2	10,16	3,59	0,57	735,85	10,53	50,77
1000	0,6	22	17	120	2,29	64,55	1014	2	9,87	3,41	0,55	722,16	10,33	50,56
1000	0,6	22	17	130	2,40	65,18	1014	1	8,49	2,30	0,50	677,62	9,69	50,64
1000	0,6	22	17	140	2,27	64,46	1014	1	8,16	2,20	0,47	659,38	9,43	49,69
1000	0,6	22	17	150	2,30	65,55	1014	1	8,18	2,20	0,48	664,57	9,51	48,78
1000	0,6	22	17	160	2,30	64,04	1014	1	8,15	2,21	0,48	664,00	9,50	47,77
1000	0,6	22	17	1000	2,20	66,62	1010	1	7,92	2,07	0,46	646,68	9,25	37,09
1200	0,6	22	17	40	17,08	129,71	1204	4	38,24	21,33	2,04	2178,14	31,16	66,60
1200	0,6	22	17	50	9,92	117,13	1209	4	25,36	12,32	1,45	1638,53	23,44	61,39
1200	0,6	22	17	60	7,62	103,17	1211	3	20,81	9,35	1,22	1433,44	20,51	59,97
1200	0,6	22	17	70	6,73	100,95	1213	3	18,73	8,03	1,09	1321,47	18,91	59,77
1200	0,6	22	17	80	5,83	102,64	1214	3	16,69	6,45	1,00	1237,32	17,70	61,90
1200	0,6	22	17	90	5,35	104,75	1213	3	15,44	5,74	0,93	1176,27	16,83	61,32
1200	0,6	22	17	100	5,65	105,01	1214	3	15,69	5,95	0,93	1184,00	16,94	61,15
1200	0,6	22	17	110	6,08	105,45	1213	3	15,80	6,02	0,96	1200,09	17,17	61,91
1200	0,6	22	17	120	6,58	110,41	1214	3	16,04	6,04	0,98	1218,12	17,43	62,46
1200	0,6	22	17	130	6,26	103,90	1214	2	14,14	4,73	0,89	1129,76	16,16	61,07
1200	0,6	22	17	140	6,21	102,81	1214	2	13,90	4,66	0,87	1119,88	16,02	59,35
1200	0,6	22	17	150	6,20	109,55	1214	2	13,91	4,78	0,87	1118,68	16,00	57,39
1200	0,6	22	17	160	6,37	105,31	1215	2	14,10	4,76	0,89	1132,84	16,21	56,72
1200	0,6	22	17	1000	6,01	95,91	1209	2	13,69	4,68	0,84	1090,37	15,60	43,61
1400	0,6	22	17	40	40,50	139,34	1304	5	69,53	40,62	3,60	3891,82	55,68	102,70

1400	0,6	22	17	50	34,05	138,82	1342	6	58,55	33,03	3,13	3496,21	50,02	92,81
1400	0,6	22	17	60	30,60	136,37	1373	6	52,25	27,92	2,92	3323,79	47,55	88,96
1400	0,6	22	17	70	27,91	137,66	1389	5	46,24	23,21	2,70	3101,87	44,38	91,47
1400	0,6	22	17	80	27,08	144,98	1390	5	44,09	20,84	2,72	3075,38	44,00	95,41
1400	0,6	22	17	90	24,68	139,65	1400	5	40,31	18,29	2,51	2889,13	41,33	95,44
1400	0,6	22	17	100	24,27	140,52	1399	5	39,04	17,48	2,48	2837,60	40,60	94,20
1400	0,6	22	17	110	22,86	137,52	1402	4	36,42	16,00	2,33	2699,02	38,61	90,31
1400	0,6	22	17	120	23,90	140,21	1400	4	37,08	16,30	2,38	2735,48	39,13	92,24
1400	0,6	22	17	130	22,94	137,42	1404	4	33,92	14,34	2,18	2555,95	36,57	88,41
1400	0,6	22	17	140	22,56	139,05	1408	4	33,26	13,70	2,18	2546,00	36,42	86,37
1400	0,6	22	17	150	22,47	137,10	1409	4	33,21	13,89	2,16	2535,89	36,28	80,96
1400	0,6	22	17	160	22,13	138,81	1406	4	32,61	13,77	2,10	2478,44	35,46	75,90
1400	0,6	22	17	1000	21,50	137,45	1400	4	31,99	13,27	2,07	2436,40	34,86	61,72
1600	0,6	22	17	40	55,23	143,99	1321	6	88,99	51,66	4,78	5023,64	71,87	149,84
1600	0,6	22	17	50	53,65	144,12	1360	6	83,56	46,21	4,67	5001,83	71,56	141,70
1600	0,6	22	17	60	52,93	144,54	1400	6	79,90	42,29	4,67	5077,19	72,64	142,05
1600	0,6	22	17	70	53,44	143,52	1419	6	78,11	39,79	4,74	5154,02	73,73	146,50
1600	0,6	22	17	80	52,87	144,38	1431	6	76,26	37,49	4,81	5209,81	74,53	152,40
1600	0,6	22	17	90	53,36	143,82	1451	6	74,51	35,22	4,86	5277,92	75,51	153,20
1600	0,6	22	17	100	52,61	144,88	1459	6	72,21	33,40	4,81	5224,24	74,74	153,29
1600	0,6	22	17	110	51,27	144,32	1464	6	69,15	31,72	4,65	5071,01	72,55	147,17
1600	0,6	22	17	120	51,84	144,51	1469	6	68,43	31,13	4,56	5010,08	71,68	147,97
1600	0,6	22	17	130	51,94	144,81	1476	6	66,34	29,40	4,51	4957,13	70,92	145,86
1600	0,6	22	17	140	50,84	144,29	1486	6	64,16	28,04	4,35	4838,22	69,22	138,20
1600	0,6	22	17	150	50,49	144,40	1498	6	62,66	26,97	4,35	4840,19	69,24	122,78
1600	0,6	22	17	160	50,06	145,50	1502	6	62,01	26,57	4,26	4775,55	68,32	111,37
1800	0,6	22	17	1000	50,50	144,23	1492	6	62,64	27,07	4,27	4762,86	68,14	104,80
1800	0,6	22	17	40	58,56	145,38	1349	6	93,14	54,66	4,94	5315,94	76,05	169,26
1800	0,6	22	17	50	57,22	144,12	1370	6	90,70	52,11	4,95	5361,23	76,70	172,64
1800	0,6	22	17	60	56,82	148,32	1412	6	85,79	46,31	5,04	5481,10	78,41	169,13
1800	0,6	22	17	70	56,65	143,70	1441	6	83,10	43,56	5,04	5533,64	79,17	169,20
1800	0,6	22	17	80	56,24	147,75	1458	6	80,53	39,72	5,17	5632,05	80,57	172,19
1800	0,6	22	17	90	56,22	145,66	1476	6	78,74	38,05	5,17	5666,15	81,06	174,57
1800	0,6	22	17	100	56,04	144,77	1474	6	77,53	37,55	5,08	5568,34	79,66	177,63
1800	0,6	22	17	110	55,65	150,40	1479	6	75,69	36,13	4,99	5491,34	78,56	176,48
1800	0,6	22	17	120	56,42	152,76	1494	6	74,23	34,58	4,97	5504,70	78,75	175,44
1800	0,6	22	17	130	57,00	148,95	1507	6	71,85	32,19	4,99	5509,79	78,82	167,85
1800	0,6	22	17	140	56,61	145,17	1514	6	70,67	31,96	4,82	5388,27	77,09	168,51
1800	0,6	22	17	150	56,34	144,84	1543	6	68,03	29,41	4,77	5402,02	77,28	146,98
1800	0,6	22	17	160	56,45	147,30	1551	6	67,38	28,72	4,76	5413,15	77,44	125,91
1800	0,6	22	17	1000	55,87	144,49	1538	6	66,98	28,78	4,68	5302,28	75,86	122,82
2000	0,6	22	17	40	65,49	144,90	1374	6	101,20	60,69	5,30	5796,29	82,92	204,36
2000	0,6	22	17	50	62,23	145,12	1395	6	98,16	57,67	5,29	5824,01	83,32	202,29
2000	0,6	22	17	60	62,68	145,49	1440	6	94,16	52,36	5,41	6002,90	85,88	194,46

2000	0,6	22	17	70	63,60	147,21	1409	6	93,54	51,30	5,44	5874,34	84,04	201,37
2000	0,6	22	17	80	62,76	152,97	1469	6	90,11	47,29	5,54	6125,36	87,63	202,32
2000	0,6	22	17	90	63,30	156,36	1482	6	90,03	46,83	5,60	6219,14	88,97	210,02
2000	0,6	22	17	100	62,72	157,34	1493	6	86,72	44,17	5,47	6109,87	87,41	209,21
2000	0,6	22	17	110	61,86	152,37	1512	6	82,94	40,70	5,41	6057,95	86,67	202,94
2000	0,6	22	17	120	62,88	164,43	1509	6	83,03	40,99	5,42	6053,01	86,60	205,19
2000	0,6	22	17	130	63,03	172,17	1541	6	78,32	36,62	5,26	5975,36	85,48	197,30
2000	0,6	22	17	140	63,49	167,10	1550	6	78,12	36,07	5,35	6066,54	86,79	196,82
2000	0,6	22	17	150	63,41	160,41	1584	6	74,93	32,96	5,24	6039,72	86,41	167,64
2000	0,6	22	17	160	62,09	144,46	1601	6	72,12	31,07	5,14	5970,02	85,41	144,89
2000	0,6	22	17	1000	60,78	147,59	1590	6	70,50	30,63	4,98	5778,95	82,67	135,55

PRILOG E: Prikaz broja konflikata u 24-satnom razdoblju

- Prometno opterećenje: 20 000 voz/h
- GS : udio prometa na glavnom smjeru (/)
- cs: duljina crvenog vremena na semaforiziranom raskrižju (s)
- Rv: vanjski polumjer kružnog raskrižja (m)
- D : udaljenost kružnog i semaforiziranog raskrižja (m)

GS (/)	cs (s)	Rv (m)	D (m)	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar uslijed prestrojavanja	Ukupni broj konflikata
0,7	0	12	1000	1267	443	233	1944
0,7	17	12	40	1738	1083	327	3148
0,7	17	12	50	1706	1059	307	3071
0,7	17	12	60	1677	1128	305	3109
0,7	17	12	70	1681	1068	297	3045
0,7	17	12	80	1682	971	298	2951
0,7	17	12	90	1660	898	296	2853
0,7	17	12	100	1660	904	288	2852
0,7	17	12	110	1658	899	289	2846
0,7	17	12	120	1640	850	306	2796
0,7	17	12	130	1646	820	304	2770
0,7	17	12	140	1630	800	303	2733
0,7	17	12	150	1629	753	317	2698
0,7	17	12	160	1627	777	316	2719
0,7	22	12	40	1295	982	285	2562
0,7	22	12	50	1294	921	249	2463
0,7	22	12	60	1270	984	248	2501
0,7	22	12	70	1211	926	243	2379
0,7	22	12	80	1195	889	243	2326
0,7	22	12	90	1235	836	236	2306
0,7	22	12	100	1245	831	232	2308
0,7	22	12	110	1335	825	248	2407
0,7	22	12	120	1260	764	238	2262
0,7	22	12	130	1268	772	239	2278
0,7	22	12	140	1244	750	241	2235
0,7	22	12	150	1439	699	267	2404
0,7	22	12	160	1400	654	235	2289
0,7	27	12	40	1352	1116	304	2771
0,7	27	12	50	1360	1029	276	2665
0,7	27	12	60	1289	998	249	2536
0,7	27	12	70	1355	950	270	2575
0,7	27	12	80	1272	923	243	2438
0,7	27	12	90	1254	836	237	2326
0,7	27	12	100	1289	841	230	2360
0,7	27	12	110	1327	827	226	2380
0,7	27	12	120	1302	784	242	2327
0,7	27	12	130	1297	803	244	2344
0,7	27	12	140	1280	737	246	2263
0,7	27	12	150	1320	670	238	2228
0,7	27	12	160	1421	660	239	2319
0,6	0	12	1000	1334	456	250	2040
0,6	17	12	40	1795	1054	358	3206
0,6	17	12	50	1781	1038	337	3155
0,6	17	12	60	1811	1040	326	3177

GS (/)	cs (s)	Rv (m)	D (m)	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar uslijed prestrojavanja	Ukupni broj konflikata
0,6	17	12	70	1789	1043	325	3157
0,6	17	12	80	1752	993	321	3066
0,6	17	12	90	1748	905	316	2968
0,6	17	12	100	1794	857	317	2968
0,6	17	12	110	1808	848	310	2966
0,6	17	12	120	1857	808	333	2998
0,6	17	12	130	1777	826	331	2933
0,6	17	12	140	1799	746	332	2876
0,6	17	12	150	1858	721	332	2911
0,6	17	12	160	727	727	326	1780
0,6	22	12	40	1384	1024	309	2717
0,6	22	12	50	1390	966	284	2640
0,6	22	12	60	1400	981	271	2651
0,6	22	12	70	1406	996	267	2669
0,6	22	12	80	1355	961	271	2587
0,6	22	12	90	1377	903	267	2546
0,6	22	12	100	1390	894	262	2545
0,6	22	12	110	1380	879	262	2521
0,6	22	12	120	1370	808	273	2451
0,6	22	12	130	1375	770	267	2412
0,6	22	12	140	1393	779	271	2443
0,6	22	12	150	1422	719	272	2413
0,6	22	12	160	1544	739	267	2550
0,6	27	12	40	1448	1094	331	2872
0,6	27	12	50	1410	987	286	2683
0,6	27	12	60	1355	956	272	2583
0,6	27	12	70	1355	950	270	2575
0,6	27	12	80	1389	890	270	2549
0,6	27	12	90	1359	904	265	2527
0,6	27	12	100	1360	866	260	2486
0,6	27	12	110	1373	839	256	2467
0,6	27	12	120	1403	829	265	2497
0,6	27	12	130	1377	754	272	2403
0,6	27	12	140	1398	774	271	2443
0,6	27	12	150	1452	715	265	2431
0,6	27	12	160	1531	684	263	2477
0,5	0	12	1000	1344	433	255	2032
0,5	17	12	40	1849	972	362	3183
0,5	17	12	50	1843	1008	340	3191
0,5	17	12	60	1843	1042	326	3210
0,5	17	12	70	1825	1030	334	3188
0,5	17	12	80	1836	954	320	3110
0,5	17	12	90	1807	867	331	3005
0,5	17	12	100	1806	829	323	2958
0,5	17	12	110	1828	805	325	2957
0,5	17	12	120	1839	794	330	2963
0,5	17	12	130	1802	772	338	2911
0,5	17	12	140	1840	744	336	2919
0,5	17	12	150	1825	677	331	2832
0,5	17	12	160	1916	683	330	2928
0,5	22	12	40	1417	896	305	2618
0,5	22	12	50	1402	862	277	2541
0,5	22	12	60	1380	903	265	2547
0,5	22	12	70	1384	924	264	2572
0,5	22	12	80	1376	893	262	2530
0,5	22	12	90	1377	834	263	2474

GS (/)	cs (s)	Rv (m)	D (m)	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar uslijed prestrojavanja	Ukupni broj konflikata
0,5	22	12	100	1397	835	268	2500
0,5	22	12	110	1368	824	262	2453
0,5	22	12	120	1369	733	276	2378
0,5	22	12	130	1360	721	267	2348
0,5	22	12	140	1404	698	275	2376
0,5	22	12	150	1438	670	263	2370
0,5	22	12	160	1478	664	266	2408
0,5	27	12	40	1452	993	336	2781
0,5	27	12	50	1452	918	301	2671
0,5	27	12	60	1433	880	271	2583
0,5	27	12	70	1432	894	270	2595
0,5	27	12	80	1390	876	269	2535
0,5	27	12	90	1364	836	271	2471
0,5	27	12	100	1399	817	271	2486
0,5	27	12	110	1427	795	268	2490
0,5	27	12	120	1367	775	268	2410
0,5	27	12	130	1344	702	269	2315
0,5	27	12	140	1354	707	267	2328
0,5	27	12	150	1395	689	272	2356
0,5	27	12	160	1483	690	270	2443
0,8	0	12	1000	1118	363	193	1674
0,8	17	12	40	1499	1114	286	2899
0,8	17	12	50	1490	1080	263	2833
0,8	17	12	60	1482	1060	263	2805
0,8	17	12	70	1461	1063	271	2794
0,8	17	12	80	1486	890	267	2643
0,8	17	12	90	1488	840	261	2589
0,8	17	12	100	1480	900	248	2627
0,8	17	12	110	1499	943	243	2685
0,8	17	12	120	1457	932	266	2655
0,8	17	12	130	1462	922	264	2648
0,8	17	12	140	1465	865	268	2598
0,8	17	12	150	1520	839	270	2628
0,8	17	12	160	1635	810	272	2717
0,8	22	12	40	1210	1038	228	2476
0,8	22	12	50	1175	930	213	2318
0,8	22	12	60	1165	911	206	2282
0,8	22	12	70	1178	872	204	2254
0,8	22	12	80	1190	830	201	2220
0,8	22	12	90	1146	777	203	2126
0,8	22	12	100	1139	788	202	2128
0,8	22	12	110	1148	781	198	2127
0,8	22	12	120	1182	763	204	2149
0,8	22	12	130	1179	743	205	2127
0,8	22	12	140	1236	616	206	2058
0,8	22	12	150	1236	616	206	2058
0,8	22	12	160	1339	661	203	2202
0,8	27	12	40	1233	1121	246	2600
0,8	27	12	50	1189	963	225	2377
0,8	27	12	60	1154	951	210	2314
0,8	27	12	70	1076	906	220	2202
0,8	27	12	80	1139	821	203	2163
0,8	27	12	90	1134	802	200	2136
0,8	27	12	100	1153	768	197	2117
0,8	27	12	110	1128	775	204	2107
0,8	27	12	120	1156	750	207	2113

GS (/)	cs (s)	Rv (m)	D (m)	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar uslijed prestrojavanja	Ukupni broj konflikata
0,8	27	12	130	1154	752	204	2110
0,8	27	12	140	1174	701	207	2082
0,8	27	12	150	1223	666	203	2091
0,8	27	12	160	1285	668	202	2155
0,7	0	17	1000	0	436	36	472
0,7	17	17	40	26	678	68	773
0,7	17	17	50	25	758	39	822
0,7	17	17	60	21	788	37	847
0,7	17	17	70	18	853	39	910
0,7	17	17	80	18	888	31	938
0,7	17	17	90	17	888	25	931
0,7	17	17	100	17	846	30	893
0,7	17	17	110	18	838	34	890
0,7	17	17	120	22	835	33	890
0,7	17	17	130	24	802	29	855
0,7	17	17	140	29	782	30	841
0,7	17	17	150	77	731	33	841
0,7	17	17	160	155	715	45	915
0,7	22	17	40	26	738	74	839
0,7	22	17	50	22	750	57	829
0,7	22	17	60	21	795	33	849
0,7	22	17	70	21	833	41	895
0,7	22	17	80	19	837	31	887
0,7	22	17	90	20	839	27	886
0,7	22	17	100	19	824	33	876
0,7	22	17	110	20	831	36	887
0,7	22	17	120	20	851	33	904
0,7	22	17	130	22	837	29	888
0,7	22	17	140	34	817	31	882
0,7	22	17	150	71	731	31	834
0,7	22	17	160	148	708	37	893
0,7	27	17	40	29	932	65	1026
0,7	27	17	50	26	910	37	973
0,7	27	17	60	23	897	24	944
0,7	27	17	70	23	912	15	951
0,7	27	17	80	21	1048	16	1086
0,7	27	17	90	21	1049	10	1080
0,7	27	17	100	20	1081	9	1111
0,7	27	17	110	24	1058	11	1093
0,7	27	17	120	21	1082	8	1111
0,7	27	17	130	23	1055	11	1088
0,7	27	17	140	27	1014	7	1048
0,7	27	17	150	66	940	12	1017
0,7	27	17	160	146	979	17	1143
0,6	0	17	1000	0	410	33	444
0,6	17	17	40	28	641	71	740
0,6	17	17	50	22	696	45	763
0,6	17	17	60	21	765	35	822
0,6	17	17	70	19	793	37	849
0,6	17	17	80	24	841	34	899
0,6	17	17	90	24	818	40	882
0,6	17	17	100	21	771	39	831
0,6	17	17	110	22	800	30	852
0,6	17	17	120	22	801	34	857
0,6	17	17	130	23	780	32	834
0,6	17	17	140	26	756	42	825

GS (/)	cs (s)	Rv (m)	D (m)	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar uslijed prestrojavanja	Ukupni broj konflikata
0,6	17	17	150	78	709	43	830
0,6	17	17	160	156	683	46	885
0,6	22	17	40	26	738	74	839
0,6	22	17	50	22	750	57	829
0,6	22	17	60	21	795	33	849
0,6	22	17	70	21	833	41	895
0,6	22	17	80	19	837	31	887
0,6	22	17	90	20	839	27	886
0,6	22	17	100	19	824	33	876
0,6	22	17	110	20	831	36	887
0,6	22	17	120	20	851	33	904
0,6	22	17	130	22	837	29	888
0,6	22	17	140	34	817	31	882
0,6	22	17	150	71	731	31	834
0,6	22	17	160	148	708	37	893
0,6	27	17	40	28	751	65	844
0,6	27	17	50	19	744	38	801
0,6	27	17	60	22	746	25	793
0,6	27	17	70	20	768	42	830
0,6	27	17	80	22	774	38	835
0,6	27	17	90	21	789	36	846
0,6	27	17	100	22	808	33	863
0,6	27	17	110	21	818	42	881
0,6	27	17	120	20	817	37	874
0,6	27	17	130	20	795	34	849
0,6	27	17	140	27	769	37	833
0,6	27	17	150	74	698	37	808
0,6	27	17	160	149	699	49	897
0,5	0	17	1000	0	372	36	408
0,5	17	17	40	24	611	77	712
0,5	17	17	50	19	661	39	719
0,5	17	17	60	17	719	36	772
0,5	17	17	70	19	756	41	816
0,5	17	17	80	16	761	39	816
0,5	17	17	90	17	735	31	783
0,5	17	17	100	16	737	33	785
0,5	17	17	110	17	734	35	785
0,5	17	17	120	18	735	40	793
0,5	17	17	130	17	725	35	778
0,5	17	17	140	28	684	35	748
0,5	17	17	150	71	645	35	752
0,5	17	17	160	150	628	42	820
0,5	22	17	40	26	738	74	839
0,5	22	17	50	22	750	57	829
0,5	22	17	60	21	795	33	849
0,5	22	17	70	21	833	41	895
0,5	22	17	80	19	837	31	887
0,5	22	17	90	20	839	27	886
0,5	22	17	100	19	824	33	876
0,5	22	17	110	20	831	36	887
0,5	22	17	120	20	851	33	904
0,5	22	17	130	22	837	29	888
0,5	22	17	140	34	817	31	882
0,5	22	17	150	71	731	31	834
0,5	22	17	160	148	708	37	893
0,5	27	17	40	25	643	56	724

GS (/)	cs (s)	Rv (m)	D (m)	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar uslijed prestrojavanja	Ukupni broj konflikata
0,5	27	17	50	18	660	27	705
0,5	27	17	60	17	689	19	726
0,5	27	17	70	18	694	18	730
0,5	27	17	80	22	737	39	798
0,5	27	17	90	21	721	41	783
0,5	27	17	100	20	750	40	809
0,5	27	17	110	19	778	40	837
0,5	27	17	120	19	769	40	827
0,5	27	17	130	21	768	37	825
0,5	27	17	140	27	710	38	775
0,5	27	17	150	70	644	41	755
0,5	27	17	160	147	631	45	822
0,8	0	17	1000	0	491	21	511
0,8	17	17	40	35	702	70	807
0,8	17	17	50	19	1010	25	1054
0,8	17	17	60	20	1017	17	1054
0,8	17	17	70	20	1091	18	1129
0,8	17	17	80	21	1385	14	1419
0,8	17	17	90	23	1404	9	1436
0,8	17	17	100	22	1383	6	1411
0,8	17	17	110	21	1348	8	1377
0,8	17	17	120	23	1404	9	1436
0,8	17	17	130	23	1425	6	1454
0,8	17	17	140	33	1377	7	1417
0,8	17	17	150	75	1337	10	1423
0,8	17	17	160	164	1280	17	1461
0,8	22	17	40	26	738	74	839
0,8	22	17	50	22	750	57	829
0,8	22	17	60	21	795	33	849
0,8	22	17	70	21	833	41	895
0,8	22	17	80	19	837	31	887
0,8	22	17	90	20	839	27	886
0,8	22	17	100	19	824	33	876
0,8	22	17	110	20	831	36	887
0,8	22	17	120	20	851	33	904
0,8	22	17	130	22	837	29	888
0,8	22	17	140	34	817	31	882
0,8	22	17	150	71	731	31	834
0,8	22	17	160	148	708	37	893
0,8	27	17	40	21	768	37	825
0,8	27	17	50	27	795	45	866
0,8	27	17	60	22	802	42	866
0,8	27	17	70	22	844	41	907
0,8	27	17	80	20	870	35	924
0,8	27	17	90	18	852	38	907
0,8	27	17	100	18	849	37	904
0,8	27	17	110	16	827	30	873
0,8	27	17	120	18	851	34	903
0,8	27	17	130	18	833	33	884
0,8	27	17	140	28	818	33	879
0,8	27	17	150	65	738	37	841
0,8	27	17	160	153	747	48	948
0,7	0	22	1000	0	293	6	299
0,7	17	22	40	35	466	34	535
0,7	17	22	50	26	463	19	508
0,7	17	22	60	22	504	27	553

GS (/)	cs (s)	Rv (m)	D (m)	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar uslijed prestrojavanja	Ukupni broj konflikata
0,7	17	22	70	21	575	26	621
0,7	17	22	80	24	588	20	633
0,7	17	22	90	23	590	15	628
0,7	17	22	100	24	570	15	608
0,7	17	22	110	23	573	12	608
0,7	17	22	120	24	564	15	603
0,7	17	22	130	23	560	11	595
0,7	17	22	140	23	527	12	562
0,7	17	22	150	58	451	14	523
0,7	17	22	160	120	425	14	559
0,7	22	22	40	18	544	16	578
0,7	22	22	50	23	656	40	719
0,7	22	22	60	24	615	38	678
0,7	22	22	70	23	654	32	709
0,7	22	22	80	21	713	27	761
0,7	22	22	90	22	731	28	781
0,7	22	22	100	24	709	29	762
0,7	22	22	110	21	716	25	761
0,7	22	22	120	21	723	23	767
0,7	22	22	130	19	683	25	726
0,7	22	22	140	20	675	19	714
0,7	22	22	150	59	582	20	661
0,7	22	22	160	140	578	23	741
0,7	27	22	40	36	686	68	790
0,7	27	22	50	24	688	43	755
0,7	27	22	60	25	641	33	699
0,7	27	22	70	23	683	37	743
0,7	27	22	80	22	712	26	760
0,7	27	22	90	20	725	30	776
0,7	27	22	100	22	732	24	778
0,7	27	22	110	22	731	24	777
0,7	27	22	120	22	728	20	770
0,7	27	22	130	24	715	18	757
0,7	27	22	140	26	696	22	744
0,7	27	22	150	57	603	15	675
0,7	27	22	160	149	584	19	752
0,6	0	22	1000	0	294	5	299
0,6	17	22	40	31	462	41	533
0,6	17	22	50	22	447	27	496
0,6	17	22	60	19	498	23	540
0,6	17	22	70	19	542	21	582
0,6	17	22	80	21	568	19	608
0,6	17	22	90	18	548	16	582
0,6	17	22	100	15	527	12	554
0,6	17	22	110	15	524	14	553
0,6	17	22	120	16	547	11	574
0,6	17	22	130	15	520	12	547
0,6	17	22	140	16	512	9	537
0,6	17	22	150	51	443	8	502
0,6	17	22	160	139	410	15	564
0,6	22	22	40	35	632	63	730
0,6	22	22	50	29	638	41	708
0,6	22	22	60	21	616	38	675
0,6	22	22	70	19	639	37	695
0,6	22	22	80	21	705	30	756
0,6	22	22	90	21	706	25	752

GS (/)	cs (s)	Rv (m)	D (m)	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar uslijed prestrojavanja	Ukupni broj konflikata
0,6	22	22	100	26	701	25	751
0,6	22	22	110	25	706	24	755
0,6	22	22	120	20	713	21	755
0,6	22	22	130	23	691	17	732
0,6	22	22	140	23	674	18	715
0,6	22	22	150	59	589	16	664
0,6	22	22	160	147	575	27	749
0,6	27	22	40	32	680	62	774
0,6	27	22	50	28	639	44	711
0,6	27	22	60	23	638	44	705
0,6	27	22	70	21	639	39	699
0,6	27	22	80	20	675	26	721
0,6	27	22	90	20	692	24	736
0,6	27	22	100	21	680	22	723
0,6	27	22	110	19	696	20	735
0,6	27	22	120	23	725	18	766
0,6	27	22	130	22	685	18	726
0,6	27	22	140	22	665	18	706
0,6	27	22	150	52	598	19	668
0,6	27	22	160	141	585	22	748
0,5	0	22	1000	0	285	4	288
0,5	17	22	40	28	433	31	492
0,5	17	22	50	23	410	22	454
0,5	17	22	60	19	472	22	513
0,5	17	22	70	16	522	23	561
0,5	17	22	80	18	541	17	576
0,5	17	22	90	20	532	16	568
0,5	17	22	100	18	506	12	535
0,5	17	22	110	20	495	13	527
0,5	17	22	120	18	504	7	529
0,5	17	22	130	16	492	11	519
0,5	17	22	140	18	471	13	502
0,5	17	22	150	52	404	11	467
0,5	17	22	160	114	403	13	530
0,5	22	22	40	29	607	58	694
0,5	22	22	50	24	608	40	672
0,5	22	22	60	19	597	37	653
0,5	22	22	70	23	646	37	706
0,5	22	22	80	25	675	27	727
0,5	22	22	90	22	665	18	706
0,5	22	22	100	22	665	19	706
0,5	22	22	110	27	716	24	767
0,5	22	22	120	22	678	19	719
0,5	22	22	130	21	663	17	701
0,5	22	22	140	24	638	16	678
0,5	22	22	150	62	591	14	667
0,5	22	22	160	138	548	18	704
0,5	27	22	40	36	629	63	729
0,5	27	22	50	27	615	40	682
0,5	27	22	60	29	607	33	669
0,5	27	22	70	29	647	28	704
0,5	27	22	80	28	654	24	706
0,5	27	22	90	24	649	23	697
0,5	27	22	100	25	658	22	705
0,5	27	22	110	24	685	20	729
0,5	27	22	120	24	696	18	738

GS (/)	cs (s)	Rv (m)	D (m)	Bočni sudar	Sudar straga	Sudar uslijed prestrojavanja	Ukupni broj konflikata
0,5	27	22	130	24	684	16	724
0,5	27	22	140	24	641	22	687
0,5	27	22	150	57	575	19	651
0,5	27	22	160	145	564	19	729
0,8	0	22	1000	0	310	4	314
0,8	17	22	40	23	475	34	532
0,8	17	22	50	22	474	33	529
0,8	17	22	60	20	495	23	538
0,8	17	22	70	20	514	25	558
0,8	17	22	80	20	602	18	639
0,8	17	22	90	20	574	15	609
0,8	17	22	100	22	534	18	574
0,8	17	22	110	19	532	16	568
0,8	17	22	120	20	566	14	601
0,8	17	22	130	17	552	12	582
0,8	17	22	140	18	544	16	578
0,8	17	22	150	60	458	14	532
0,8	17	22	160	140	444	17	601
0,8	22	22	40	41	638	72	751
0,8	22	22	50	29	647	46	722
0,8	22	22	60	24	608	36	668
0,8	22	22	70	23	646	37	706
0,8	22	22	80	25	700	28	753
0,8	22	22	90	26	735	30	791
0,8	22	22	100	27	728	29	785
0,8	22	22	110	27	716	24	767
0,8	22	22	120	23	735	18	776
0,8	22	22	130	23	705	20	747
0,8	22	22	140	26	683	18	727
0,8	22	22	150	61	620	19	700
0,8	22	22	160	158	591	23	772
0,8	27	22	40	35	697	69	801
0,8	27	22	50	26	657	48	731
0,8	27	22	60	22	636	42	700
0,8	27	22	70	20	643	37	700
0,8	27	22	80	23	709	31	763
0,8	27	22	90	23	714	26	764
0,8	27	22	100	20	731	22	774
0,8	27	22	110	21	726	29	777
0,8	27	22	120	18	735	23	777
0,8	27	22	130	24	722	21	767
0,8	27	22	140	24	689	22	735
0,8	27	22	150	66	611	13	690
0,8	27	22	160	164	574	23	762

ŽIVOTOPIS AUTORA



Mirna Klobučar rođena je 30. svibnja 1991. godine u Rijeci. Srednjoškolsko obrazovanje završila je 2010. godine u matematičkoj gimnaziji Andrije Mohorovičića u Rijeci. Iste godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, gdje nakon njegovog završetka nastavlja obrazovanje na diplomskom sveučilišnom studiju, smjer Urbano inženjerstvo. Tijekom diplomskog studija stječe radno iskustvo kao projektant pripravnik u tvrtki Projekt – H d.o.o.

Diplomirala je 2016. godine obranom diplomskog rada pod naslovom „Analiza svojstava samozbijajućeg betona s dodatkom karbidnog mulja“, pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Silvije Mrakovčić.

Od 2017. do 2018. godine radi u Općini Viškovo kao viša stručna suradnica u Odsjeku za urbanizam, komunalni sustav i ekologiju, gdje u prosincu 2017. polaže Državni stručni ispit II. razine.

Od 2018. do 2020. zaposlena je u tvrtki Projekt – H d.o.o. kao projektantica, sudjelujući u projektiranju komunalne infrastrukture te vodoopskrbnih i hidrantskih mreža. Neki od značajnijih projekata na kojima je sudjelovala uključuju:

- Komunalna luka San Pelagio, Rovinj; glavni i izvedbeni građevinski projekt vodoopskrbe i odvodnje, investitor: Grad Rovinj (2018.–2019.),
- Glavni projekt vodoopskrbe i odvodnje, Riva Poreč, investitor: Grad Poreč (2018.),
- Glavni projekt hidroinstalacija – Glass system hala, Kukuljanovo (2018.),
- Glavni i izvedbeni projekt vodoopskrbe i hidrantske mreže za dogradnju i rekonstrukciju luke otvorene za javni promet županijskog značaja, Luka Punat – otok Krk (2018.),
- Interpolacija preljevnog okna (separatora) i okna mjerača protoka na postojećem dovodnom kolektoru UPOV Pazina; idejno rješenje, glavni i izvedbeni projekt (2019.).

Od rujna 2019. godine zaposlena je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, prvotno kao privremena asistentica na Katedri za hidrotehniku, a od prosinca iste godine u suradničkom zvanju asistentice na Katedri za prometnice, gdje aktivno sudjeluje u izvođenju nastave na prijediplomskim, diplomskim i stručnim studijima.

Mirna Klobučar registrirana je u Upisniku znanstvenika pod brojem 380943. Kao doktorandica i mlada istraživačica sudjelovala je na sljedećim znanstvenim projektima:

- „Prometna infrastruktura u funkciji održive mobilnosti“ (2019.–2021.), voditeljica prof. dr. sc. Aleksandra Deluka-Tibljaš,
- „Prometna infrastruktura u funkciji sigurnosti osjetljivih sudionika u prometu“ (2024.–2025.), voditeljica prof. dr. sc. Aleksandra Deluka-Tibljaš,
- „Optimizacija oblikovnih elemenata šire zone raskrižja“ (2024.–2025.), voditeljica izv. prof. dr. sc. Sanja Šurdonja.

Tijekom doktorskog studija pohađala je stručne i istraživačke radionice, a dio istraživanja provela je na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, pod mentorstvom prof. dr. sc. Irene Ištoka Otković.

Bila je uključena u rad Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci kao predstavница doktorskog studija u Uredu za podršku studentima, članica Grupe za promociju, predstavница Povjerenstva za evaluaciju projekata Studentskog zbora GRADRI te kao savjetnica u Uredu za odnose sa studentima.

Mirna Klobučar autorica je 10 znanstvenih i stručnih radova objavljenih u časopisima i konferencijskim zbornicima (preuzeto s CROSBİ profila Mirne Klobučar, 19. kolovoza 2025.):

Klobučar, Mirna; Deluka-Tibljaš, Aleksandra; Šurdonja, Sanja; Ištoka Otković, Irena (2025). A Theoretical Model for Optimizing Signalized Intersection and Roundabout Distance Using Microsimulations // *Future transportation*, 5, 1; 28, 24. doi: 10.3390/futuretransp5010028

Klobučar, Mirna; Šurdonja, Sanja; Deluka-Tibljaš, Aleksandra (2025). Impact of Geometric Parameters and Operational Speed on Traffic Safety at Roundabouts: A Conflict Analysis Using Microsimulation Models // *Journal of Road Safety*, 36, 3; 36-49. doi: 10.33492/jrs-d-25-3-2681114

Fatić, Edin; Deluka-Tibljaš, Aleksandra; Ištoka Otković, Irena; Klobučar, Mirna; Šurdonja, Sanja (2024). Optimiranje prometa u gradu Opatiji primjenom modela prometne mikrosimulacije // *Zbornik radova (Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci)*, 27, 1; 91-107. doi: 10.32762/zr.27.1.6

Šurdonja, Sanja; Deluka-Tibljaš, Aleksandra; Ištoka Otković, Irena; Klobučar, Mirna (2024). Longitudinal Research on Influence of Traffic and Urban Road Elements on Operational Speed // *Road and Rail Infrastructure VIII, Proceedings of the Conference CETRA 2024* / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, 2024. str. 223-229. doi: 10.5592/CO/CETRA.2024.1591

Klobučar, Mirna; Deluka-Tibljaš, Aleksandra; Šurdonja, Sanja (2024). Optimising Signalised Intersection-Roundabout Distance: Insights from Microsimulation Analysis // *Road and Rail Infrastructure VIII, Proceedings of the Conference CETRA 2024* / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, 2024. str. 1241-1244. doi: 10.5592/CO/CETRA.2024.1735

- Ban, Ivana; Cuculić, Marijana; Klobučar, Mirna (2024). Priručnik za laboratorijske vježbe. Rijeka, 2024. 34
- Klobučar, Mirna ; Deluka-Tibljaš, Aleksandra (2022). Preliminary analyses of the optimal distance between a roundabout and signalized intersection // Book of Abstracts: MFC 2022. Rijeka, 2022. str. 28-28
- Klobučar, Mirna ; Deluka-Tibljaš, Aleksandra ; Šurdonja, Sanja ; Campisi, Tiziana ; Maršanić , Robert (2022). Roundabout approaching speed analyses // Road and Rail Infrastructure VII. Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2022. str. 43-50. doi: 10.5592/CO/cetra.2022.1444
- Klobučar, Nives ; Stanišić Bukvić, Nina ; Labinac, Velimir ; Klobučar, Mirna (2015). Primjena norme HRN EN 12056 : 2005 – Gravitacijski odvodni sustavi u zgradama // Zbornik radova (Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci), XVIII, 105-116
- Mrakovčić, Silvija ; Klobučar, Mirna ; Krajnović, Nika (2015). Mogućnosti uporabe vapnenog mulja u proizvodnji samoslijegajućeg betona // Zbornik radova (Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci), XVIII (2015), 33-44