Primjena simulacijskih alata u analizi i odabiru optimalnog rješenja vođenja prometnih tokova u raskrižjima

Babojelić, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:561786

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Karlo Babojelić

PRIMJENA SIMULACIJSKIH ALATA U ANALIZI I ODABIRU OPTIMALNOG RJEŠENJA VOĐENJA PROMETNIH TOKOVA U RASKRIŽJIMA

Diplomski rad

Zagreb, 2017.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

PRIMJENA SIMULACIJSKIH ALATA U ANALIZI I ODABIRU OPTIMALNOG RJEŠENJA VOĐENJA PROMETNIH TOKOVA U RASKRIŽJIMA

IMPLEMENTATION OF SIMULATION TOOLS FOR ANALYSIS AND OPTIMAL CHOICE OF INTERSECTION CONTROL TYPE

Mentor: dr. sc. Luka Novačko

Student: Karlo Babojelić
JMBAG: 0135230187

Zagreb, srpanj 2017.

SAŽETAK

Simulacijski alati postali su neizostavna pomoć pri evaluaciji i odabiru optimalnog rješenja različitih prometnih situacija. Intervencija na realnom sustavu zahtjeva značajna financijska sredstva. Simulacijom se eksperimentira sa stvarnim modelom realnog sustava na računalu. S dobrom simulacijom može se postići vrlo velika točnost opisivanja promatranog procesa. U današnje vrijeme, postoji čitav niz simulacijski alata koji su dostupni prometnim stručnjacima, a koji im pomažu za analizu pojedinih prometnih situacija i problema. Jedan od najraširenijih mikroskopskih alata je i PTV VISSIM. Ovaj simulacijski alat ima mogućnost modeliranja ponašanja svakog pojedinačnog vozača, a kvaliteta izrađene simulacije ovisi upravo o tome. AIMSUN simulacijski alat ima mogućnost modeliranja mikroskopskih modela, mezoskopskih i makroskopskih modela. U sklopu ovog diplomskog rada napravljena je simulacija na odabranom primjeru pomoću simulacijskog alata PTV VISSIM te primjerima varijantnih rješenja rekonstrukcije.

KLJUČNE RIJEČI: simulacijski alati, evaluacija, model, PTV VISSIM, AIMSUN, primjer

SUMMARY

Simulation tools have become necessary in evaluating and choosing the optimal solution for different traffic situations. Intervention on the real system requires significant financial resources. Simulation is experimenting with the real model of the real system on the computer. With good simulation, a very high accuracy of describing the observed process can be achieved. Nowadays, there is a whole range of simulation tools available to traffic experts to help them analyze some traffic situations and problems. One of the most widely used microscopic tools is PTV VISSIM. This simulation tool has the ability to model the behaviors of each individual driver, and the quality of the simulation created depends precisely on it. The AIMSUN simulation tool has the ability to model microscopic models, mesoscopic and macroscopic models. As part of this graduate thesis, a simulation was performed on the selected example using the PTV VISSIM simulation tool and examples of variant reconstruction solutions.

KEY WORDS: simulation tools, evaluation, model, PTV VISSIM, AIMSUN, example

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. ANALIZA PROJEKTNO – OBLIKOVNIH ELEMENATA RAZLIČITIH TIPOVA RASKRIŽJA 2
   2.1. Analiza projektno – oblikovnih elemenata raskrižja u razini 5
   2.2. Analiza projektno – oblikovnih elemenata raskrižja s kružnim tokom prometa 11
   2.3. Analiza projektno – oblikovnih elemenata raskrižja izvan razine 14
3. PREGLED SIMULACIJSKIH ALATA ZA MODELIRANJE VOĐENJA PROMETNIH TOKOVA U RASKRIŽJIMA 18
4. ANALIZA PROMETNIH PARAMETARA ZA EVALUACIJU RAZLIČITIH OBLIKA RASKRIŽJA 27
5. RAZVOJ SIMULACIJSKOG MODELA ZA PRIMJENU RAZLIČITIH NAČINA UPRAVLJANJA PROMETNIM TOKOVIMA NA ODABRANOM PRIMJERU 35
   5.1. Analiza postojećeg stanja 35
   5.2. Varijanta 1 – raskrižje s kružnim tokom prometa 47
   5.3. Varijanta 2 – kružno raskrižje sa spiralnim tokom 51
6. EVALUACIJA I IZBOR OPTIMALNOG VARIJANTNOG RJEŠENJA ODABRANOG RASKRIŽJA 57
7. ZAKLJUČAK 63

LITERATURA 64
POPIS SLIKA 65
POPIS TABLICA 66
POPIS GRAFIKONA 66
POPIS PRILOGA 67

1. UVOD

Raskrižja predstavljaju točke u cestovnoj mreži gdje dolazi do spajanja dviju ili više prometnica, tokovi se prepliću, križaju, spajaju ili razdvajaju te dolazi do naglašenih promjena smjerova kretanja vozila što uzrokuje probleme s propusnošću i sigurnosti odvijanja prometa. Loše koncipirana rješenja raskrižja dovode do smanjenja sigurnosti, povećanog vremena putovanja, povećanih repova čekanja i značajnih eksternih učinaka, a rješavanje takvih problema zahtjeva značajna financijska sredstva. Razvitkom simulacijskih alata, značajno se pojednostavila mogućnost analize i optimalnog odabira vođenja prometnih tokova u raskrižjima. Prometnim stručnjacima je, u današnje vrijeme, dostupna široka paleta različitih simulacijskih alata i često je potrebno koristiti dva ili više simulacijska alata za odgovarajuću analizu promatranih raskrižja.

Raskrižje Ulice Dr. Franje Tuđmana i spoja na čvor Sveta Nedjelja autoceste A3 Bregana – Zagreb – Lipovac nalazi se izvan naseljenog mjesta Grada Svete Nedelje u zapadnom dijelu Zagrebačke županije, nekoliko kilometara istočno od Grada Samobora i 15 km zapadno od Grada Zagreba. U neposrednoj blizini nalazi se logistički park i stambene zone što ovo raskrižje čini značajnim produktorom i atraktorom putovanja za spomenuto područje. U izradi rada korišteni su podaci o prometu prikupljeni na spomenutom raskrižju tijekom mjeseca ožujka 2017. godine. Svrha ovog rada je ukazivanje na neodrživo stanje u prometu koje se događa u vršnim prometnim opterećenjima te prijedlog varijantnih rješenja s ciljem poboljšanja protočnosti i sigurnosti prometa na tom raskrižju. Rad je podijeljen u sedam cjelina:

1. Uvod
2. Analiza projektno – oblikovnih elemenata različitih tipova raskrižja
3. Pregled simulacijskih alata za modeliranje vođenja prometnih tokova u raskrižjima
4. Analiza prometnih parametara za evaluaciju različitih oblika raskrižja
5. Razvoj simulacijskog modela za primjenu različitih načina upravljanja prometnim tokovima na odabranom primjeru
6. Evaluacija i izbor optimalnog varijantnog rješenja odabranog raskrižja
7. Zaključak

U drugom poglavlju definiran je pojam raskrižja te su analizirani projektno – oblikovni elementi raskrižja u razini, raskrižja s kružnim tokom prometa i raskrižja izvan razine. Treće poglavlje obuhvaća pregled simulacijskih alata za modeliranje tokova u raskrižjima. Alati se razlikuju po svojim sposobnostima za modeliranje različitih tipova raskrižja. Često je potrebno koristiti dva ili više alata kako bi ispravno i točno analizirali svaku prometnu situaciju. U četvrtom poglavlju prikazani su svi prometnih parametri kojima se analizira prometni tok. Također, prikazani su parametri za analizu prometnog toka simulacijskog alata PTV VISSIM. Analiza postojećeg stanja te analiza varijantnih rješenja promatranog raskrižja prikazana je u petom poglavlju. Na temelju podataka o brojanju prometa izrađeni su modeli postojećeg stanja, kao i modeli varijantnih rješenja. Završni dio rada donosi evaluaciju navedenih rješenja i odabir optimalnog rješenja za problematično raskrižje.

2. ANALIZA PROJEKTNO – OBLIKOVNIH ELEMENATA RAZLIČITIH TIPOVA RASKRIŽJA

Raskrižja su točke u cestovnoj mreži u kojima se povezuju dvije ili više prometnica, a prometni tokovi se spajaju, razdvajaju, križaju i prepliću. Zbog prometnih radnji i mogućih konflikata, koji se ne pojavljuju na otvorenim potezima ceste, na raskrižju su naglašeni problemi propusne moći i sigurnosti prometa.

Raskrižja se u cestovnoj mreži pojavljuju u više oblikovnih modaliteta, a općenito se mogu razvrstati na raskrižja u jednoj ili više razina, raskrižja s kružnim tokom prometa i kombinirana raskrižja [1].

Pri izboru mjesta i načina rješavanja raskrižja neophodno je detaljno proučiti svaki slučaj, jer loše koncipirano i oblikovano raskrižje predstavlja opasnost za sigurnost prometa. Visoki zahtjevi u pogledu projektiranja i uporabe raskrižja trebaju se provjeriti uz pomoć osnovnih mjerila od kojih su najvažniji:

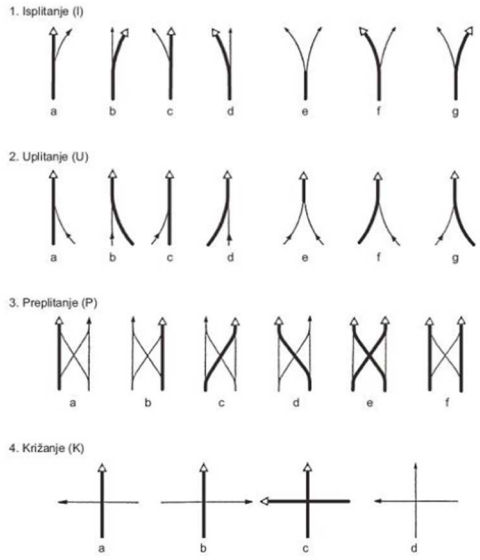
1. sigurnost prometa,
2. kvaliteta odvijanja prometa,
3. utjecaj raskrižja na okoliš,
4. ekonomičnost rješenja.

U području cestovnih raskrižja znatno su složeniji prometni postupci i događanja od sličnih na otvorenim dijelovima trase. Zbog izrazite promjene smjera kretanja vozila opada sigurnost prometa i propusna moć raskrižja. Načini kretanja u području raskrižja određeni su prometno – oblikovnim parametrima: vrsta ili tip raskrižja; način upravljanja prometom; oblik trasiranja i presjek prometnica; smjer i jačina prometnih tokova; brzina vozila u raskrižju; veličina preglednosti itd. [1].

Osnovne prometne radnje (koje uzrokuju konfliktne situacije različitih stupnjeva) nastaju zbog promjene smjera, ali i brzine jednog ili više vozila nastaju. U području raskrižja izvode se sljedeće radnje:

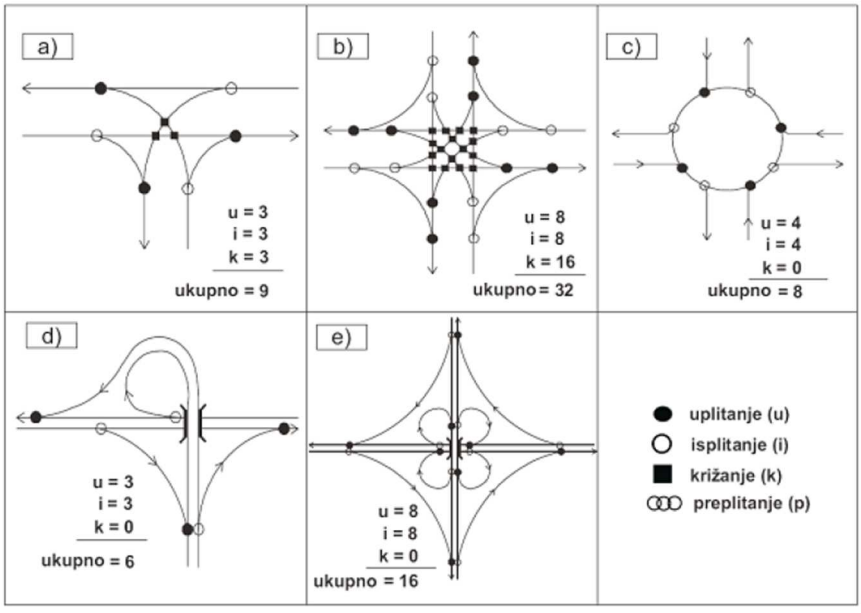
- isplitanje - dijeljenje prometnih tokova,
- uplitanje - sjedinjavanje prometnih tokova,
- preplitanje - međusobna izmjena prometnih trakova ili tokova,
- križanje - međusobno križanje/presijecanje prometnih tokova [1].

Iz priložene slike, zahtjevnost određenog manevra odvija se prema gradaciji, od najlakšeg do najzahtjevnijeg.



Slika 1. Prometne radnje u raskrižju, [1]

Konfliktne situacije se mogu definirati kao zbroj svih konfliktnih točaka koje nastaju uslijed odvijanja prometnog toka, a uzrokovane su isplitanjem, preplitanjem, uplitanjem i križanjem tokova u raskrižju. Broj konfliktnih točaka ovisi o vrsti/tipu raskrižja, a stvaran broj je ovisan o geometrijskom oblikovanju, o slobodnoj vidljivost i prometnom opterećenju. Najveći broj konfliktnih točaka sadrže raskrižja u razini, a manje ih je u raskrižjima izvan razine te u raskrižjima s kružnim tokom prometa. Iz slike 2. vidljivo je da najmanji broj konfliktnih točaka ima raskrižje s kružnim tokom prometa, kada govorimo o raskrižjima u razini, odnosno raskrižje izvan razine oblika trube [1]. Konfliktne točke semaforiziranog raskrižja određuju se za sve prometne tokove koji nisu kompatibilni, odnosno koji se ne kreću u istoj fazi zelenog svjetla.



Slika 2. Konfliktne točke u pojedinim raskrižjima, [1]

Nakon definiranja osnovnih prometnih radnji u raskrižju i konfliktnih točaka, slijedi podjela raskrižja, koja se mogu razvrstati ili tipizirati prema više osnova ili mjerila, a podjele se mogu gledati kroz nekoliko mjerila: prometno – planerska, prometno – tehnička, prometno – građevinska, a svi podrazumijevaju analizu svojstva prometnog toka.

Uobičajena podjela raskrižja je na raskrižja u razini (RUR), raskrižja izvan razine (RIR) i kombinirana i posebna raskrižja. Za napomenuti je da u raskrižja u razini pripadaju klasična površinska raskrižja te površinska raskrižja s kružnim tokom prometa (RKT) [1].

Raskrižja u razini (RUR) su najbrojnije zastupljena u cestovnoj mreži, čine ih klasična rješenja priključaka ("T" - raskrižje) i križanja u užem smislu, te raskrižja s kružnim tokom prometa u jednoj razini. U pogledu propusne moći ova raskrižja zadovoljavaju opterećenja cesta s privozima do $Q_{mjer} \leq 800$ [voz/h] po smjeru, odnosno do $t_{vp} \geq 6$ s. Mjerodavno satno opterećenje (Q_{mjer}) predstavlja trideseto do šezdeseto po veličini satno opterećenje, dok t_{vp} predstavlja srednju vremensku prazninu prometnog toka. Krivulja satnog protoka dobije se kumulativni svrstavanjem satnih protoka po veličini.

Raskrižja izvan razine omogućuju povezivanje konfliktnih prometnih tokova uz najviši stupanj sigurnosti i maksimalan protok vozila. Potreba za ovakvim raskrižjima visokog učinka dolazi do izričaja kada je ukupno prometno opterećenje glavnog i sporednog privoza veće od Q = 12 000 [voz/dan] [1].

Kombinirana i posebna raskrižja nastaju kao prijelazne tvorbe između raskrižja unutar i izvan razine, ali i u kombinaciji raskrižja s kružnim tokom prometa.

U posebna raskrižja mogu se ubrojiti oblici s izostavljenim (nepotpuna raskrižja) i s dodatnim privozima, odnosno privozi sa zemljišta i priključci s gospodarskih puteva [1].

Prema Pravilniku o uvjetima za projektiranje i izgradnju priključaka i prilaza na javnu cestu (NN 95/2014) u posebna raskrižja se mogu ubrojiti:

- prilaz,
- poprečni priključak,
- uzdužni priključak.

Stručno - detaljistički dio izbora oblika raskrižja oslanja se na određena načela ili mjerila od kojih se ističu:

- funkcijski,
- prometno – sigurnosni,
- projektno – oblikovni,
- estetski.

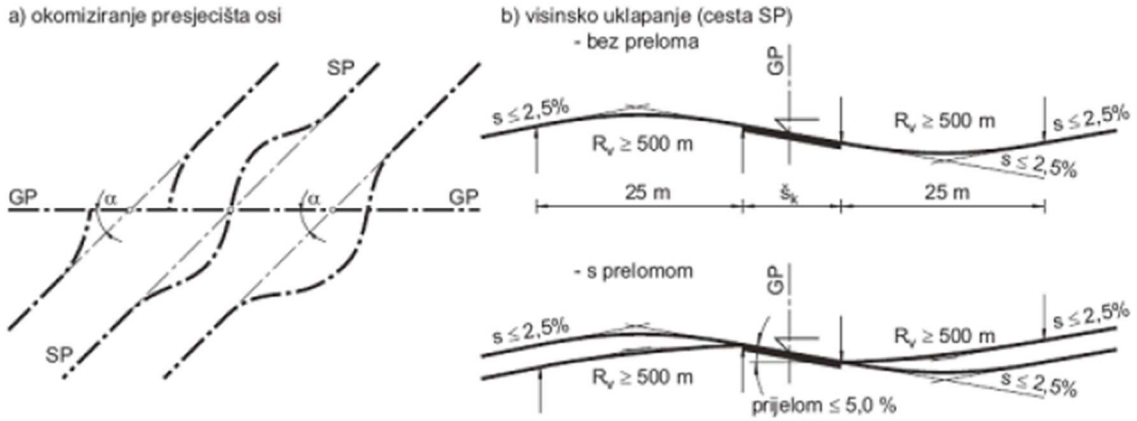
2.1. Analiza projektno – oblikovnih elemenata raskrižja u razini

U mreži javnih cesta, s većim brzinama vozila, prisutna je voznodinamička kategorija događaja. U naseljima s kontroliranim brzinama vozila manje je istaknuto voznodinamičko, a više voznogeometrijsko mjerilo za određivanje projektnih elemenata.

Vođenje linije veoma je važna komponenta prilikom projektiranja raskrižja. Prilikom tlocrtnog polaganja linije treba težiti okomitijem odnosu zbog bolje preglednosti i povećanja sigurnosti. Vrijednosti iznose α= 80 - 120 gona, što bi odgovaralo 72º - 108º.

Dobra preglednost i jasnoća rješenja postiže se primjenom odgovarajućih visinskih elemenata u kombinaciji s tlocrtnim elementima. Prednost će biti zadovoljena pri manjim konkavnim zaobljenjima u odnosu na konveksna koja rezultiraju nepreglednim i nesigurnim raskrižjima.

Poprečni (q), uzdužni (s) i ukupni nagib (d) te svi detalji prijelomnih ploha u području raskrižja trebaju biti tako oblikovani da se omogući učinkovita i brza odvodnja [1].



Slika 3. Tlocrtni i visinski elementi pri vođenju linije, [1]

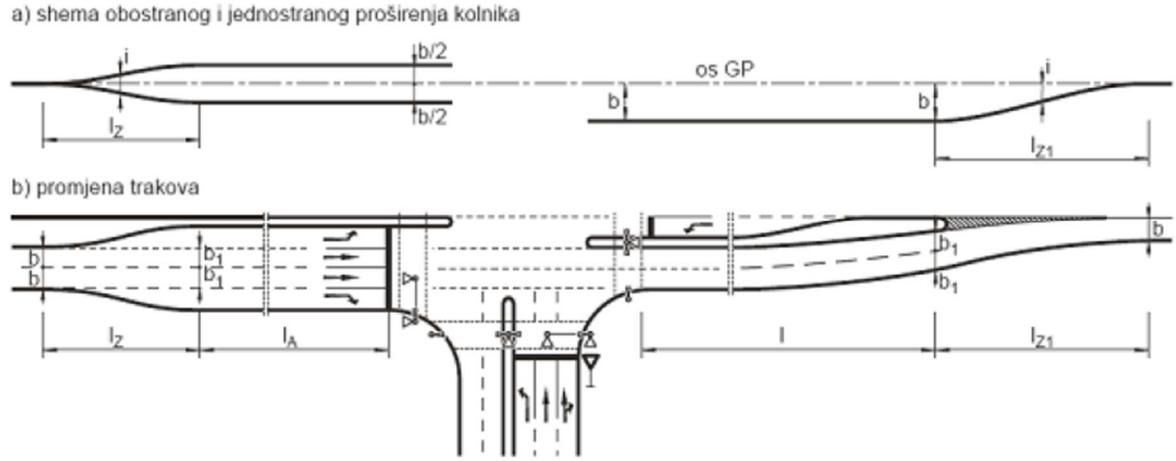
Plohe kolnika u području raskrižja čine:

- prolazni trakovi
- dodatni prometni trakovi (u pojedinim slučajevima)/ trakovi za lijeva i desna skretanja, trakovi za javni promet i za ostale namjene.

Širina jednotračnog kolnika između rubnjaka ovisna je o brzini V_k i o najširem ili mjerodavnom vozilu koje vozi njime:

- za V_k= 90 km/h potrebna je širina od 5,50 m,
- za V_k= 70 km/h potrebna je širina od 4,50 m,
- za V_k= 50 km/h zadovoljava nepromijenjena širina od 3,75 m prometnog traka ukoliko je utjecaj posebnog prometa zanemarivo malen [1].

Broj prolaznih trakova u području raskrižja (osobito u raskrižjima bez svjetlosne signalizacije) u pravilu treba ostati isti kao na otvorenoj trasi. Prolazni trak pri ulazu u raskrižje ne prelazi direktno u trak za skretanje, budući da se može očekivati neočekivana promjena putanje [1]. Na slici 4 vidljiva je promjena broja trakova na prilazu i izlazu s raskrižja.



Slika 4. Promjena broja trakova na prilazu i izlazu s raskrižja, [1]

Nepromijenjen broj prolaznih trakova treba osigurati na duljini l [m] izvan uže zone raskrižja. Ova duljina ovisi o prometnom rasterećenju u raskrižju i o konfiguraciji trase te o trajanju zelene faze (t_{zel}) u slučaju svjetlosne signalizacije [1].

Proračun i oblikovanje proširenja operativnih površina uz prolazni kolnik provode se u ovisnosti o prometnim, voznodinamičkim i lokalnim prilikama, a duljina razvlačenja lz[m] s postupnim proširivanjem kolnika može se dobiti iz izraza:

$$lz\ [m] = Vk * \sqrt{\frac{i}{3}}$$

gdje je:

lz – duljina razvlačenja

V_k – brzina vožnje na glavnom smjeru

i – mjera proširenja.

U raskrižju su mogući trakovi za skretanje ulijevo s kolnika glavne ceste (GP) i trakovi za skretanje ulijevo s kolnika sporedne ceste na glavni prometni pravac.

Širina trakova za skretanje ulijevo može biti 0,25 m manja od prolaznih trakova, ali ne ispod 3,0 m. U iznimnim slučajevima, u raskrižjima s neznatnim učešćem teretnog i autobusnog prometa, ovi trakovi mogu biti 2,75 m [1].

Duljina traka za skretanje ulijevo uključuje:

- duljinu razvlačenja l_z[m],
- duljinu za svrstavanje/smještanje odnosno usporavanje l_v[m],
- potez za postavljanje (retencija) l_a[m].

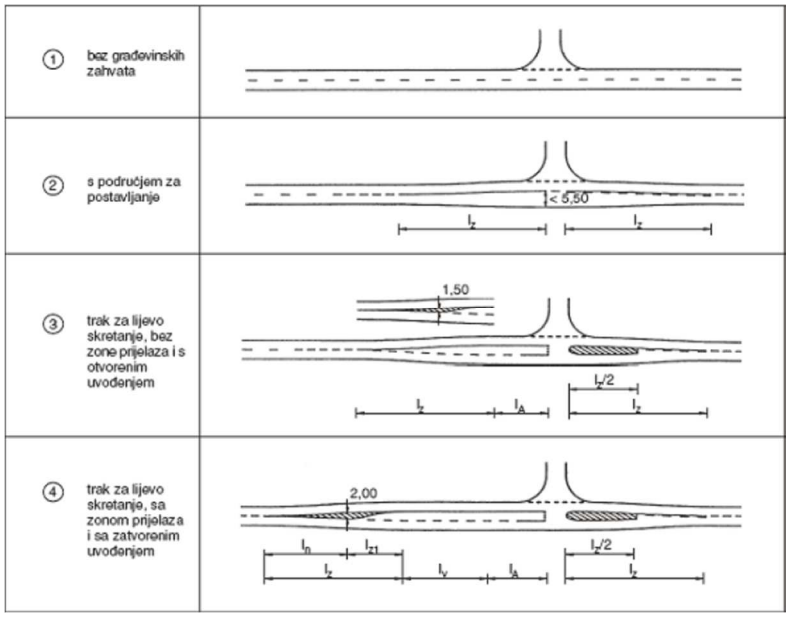
Četiri su oblika vođenja skretača ulijevo (slika 5):

1. bez građevinskih zahvata, kada skretači ulijevo za slučaj potrebe moraju čekati na prolaznom traku;

2. s područjem za postavljanje, sastavljenim od poteza razvlačenja duljine l_z[m] i jednostrane širine b [m] u iznosu 4,75 m (4,00) $\leq$b$\leq$5,50 m;

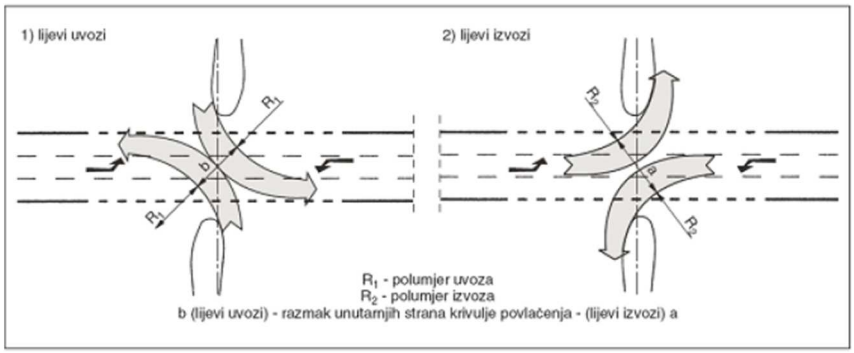
3. trak za skretanje ulijevo, sa zonom za razvlačenje l_z[m] i za postavljanje l_A[m] te u pravilu s otvorenim uvođenjem;

4. trak za lijevo skretanje, sa zonama l_z[m] i l_A[m] te sa zonom svrstavanja l_v[m] i sa zatvorenim uvođenjem pomoću zaporne površine.



Slika 5. Osnovni oblici vođenja lijevih skretača, [1]

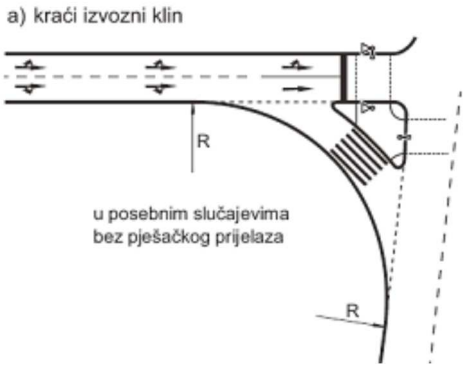
Ako prometno rješenje osigurava istovremena lijeva skretanja u raskrižju, trajektorije mjerodavnih vozila ne smiju se presijecati. Odmjeravanje unutar zone kretanja mjerodavnih vozila u pravilu će se provesti uz pomoć krivulje povlačenja koja je prikazana na slici 6.



Slika 6. Trajektorije vozila pri istovremenom prolaženju ulijevo, [1]

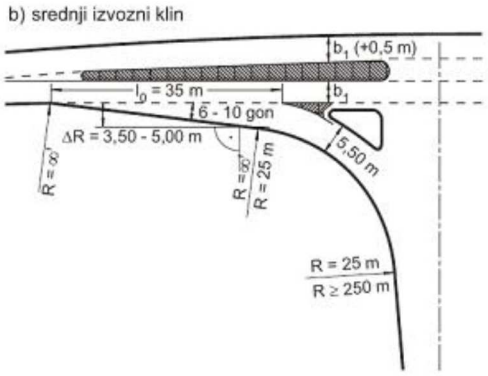
Oblikovanje prometnih površina za odvajanje s glavnog kolnika udesno ponajviše ovisi o broju i strukturi skretača, tipu raskrižja i konfiguraciji te o mjesnim prilikama. Tri su osnovna oblika vođenja prometa u desnom odvajanju s osnovnim značajkama:

1. zaobljenje ugla s jednostavnim kružnim lukom ili sa složenim lukom (R1-R2-R3) te s ili bez razdjelnika kolnika (kaplje), (slika 7),



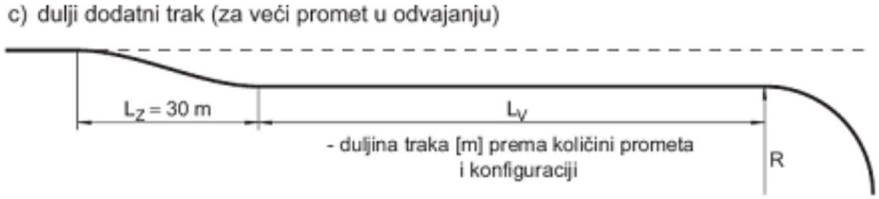
Slika 7. Kraći izvozni klin, [1]

2. izvozni klin s priključnim zaobljenjem te s razdjelnikom kolnika (kaplje) i s trokutastim otokom, (slika 8),



Slika 8. Srednji izvozni klin, [1]

3. trak za desno odvajanje s priključnim zaobljenjem te s razdjelnikom kolnika i s trokutastim otokom, (slika 9),

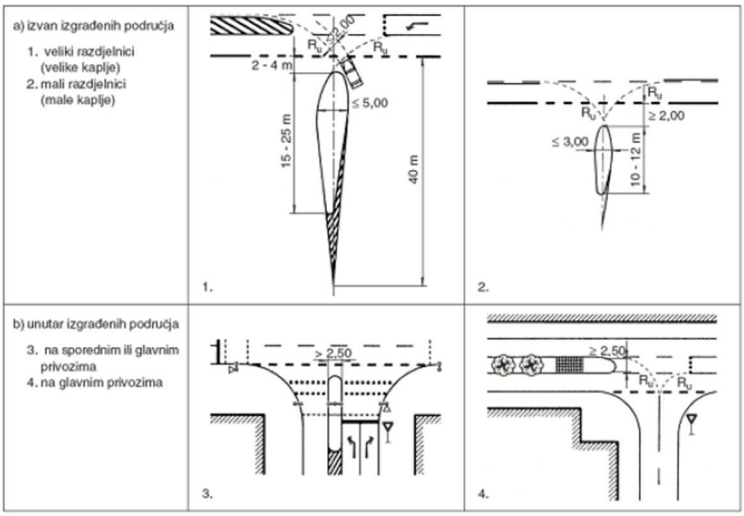


Slika 9. Dulji dodatni trak, [1]

Izdignuti ili iscrtani otoci (polja za usmjeravanje prometa) u raskrižju služe kanaliziranju i vođenju prometnih tokova, odnosno smanjenju konfliktnih površina. Uz vođenje prometnih tokova, otoci se predviđaju kao podloge za prometne uređaje (prometni znakovi, nosači svjetlosnih signala, putokazi) i odgovarajuće ozelenjivanje [1].

Pored toga otoci služe:

- unutar izgrađenih područja za zaštitu pješaka i biciklista te olakšavanju pri prelasku kolnika;
- izvan izgrađenih područja u razjašnjenju i potvrdi za čekanje na sporednim privozima prema raskrižju



Slika 10. Oblici razdjelnih otoka, [1]

Izvan izgrađenih područja bi razdjelnici kolnika na privozima trebali načelno sadržavati elemente koji bi upućivali vozače na obavezu čekanja prije faze križanja. Razdjelnici trebaju za vozače biti optička zapreka. Zbog toga treba vrh otoka tako odmaknuti od smjera prometnog traka da nastane ljevkasto suženje kolnika [1].

Unutar izgrađenih područja razdjelnici su uvijek potrebni u raskrižju, ako pješački prijelaz (zebra) vodi preko tri ili više prometnih trakova. Na raskrižjima sa svjetlosnom signalizacijom i pješačkim prijelazom dobije se potrebitost razdjelnika iz prometne analize i proračuna semaforskih faza [1].

2.2. Analiza projektno – oblikovnih elemenata raskrižja s kružnim tokom prometa

Najvažniji čimbenici za okvirni izgled kružnog raskrižja su prometno opterećenje, struktura prognoznog toka, položaj u cestovnoj mreži, dopuštena brzina prometnih tokova. Postupak projektiranja provodi se na određenim redoslijedom u kojima se odabiru bitni elementi raskrižja:

- Vanjski promjer (D_v), odnosno polumjer (R_v),
- Unutarnji promjer (D_u), odnosno polumjer (R_u),
- Širina kružnog kolnika (B).

Vanjski polumjer/promjer (Dv,Rv) i širina kružnog kolnika (B) u međusobnoj su vezi što se vidi iz priložene tablice 1.

Tablica 1. Okvirni oblikovni elementi kružnih raskrižja

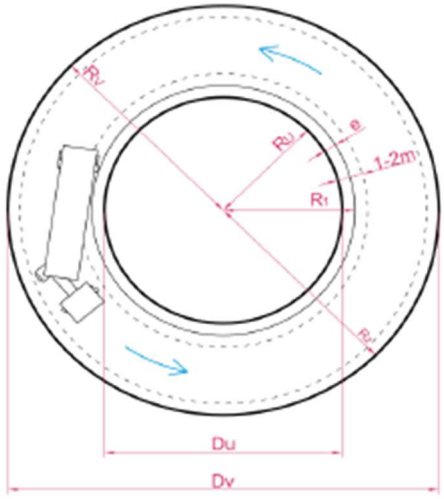
Veličina/tip raskrižja	Alokacija	Vanjski promjer Dv, (m)	Širina kolnika B (m)	Propusna moć, okvirno (voz/dan)	Oblikovanje i dimenzioniranje
Mini RKT/ jednotračno	u naselju	13,5 – 25	4,5 – 5	≤ 15 000	poseban postupak
Malo RKT/ jednotračno	u naselju	22 -35	9,0 – 6,5	15 000	Vk = 30 km/h
Srednje veliko RKT/ jednotračno	u naselju	30 – 40	7,0 – 5,5	20 000	Vk = 35 km/h
Srednje veliko RKT/ jednotračno	izvan naselja	35 – 45	6,0 – 5,5	22 000	Vk = 40 km/h
Srednje veliko RKT/ dvotračno	izvan naselja	(45) 50 – 90	7,5 – 7,0	25 000	Vk ≤ 40 km/h
Veliko RKT / dvotračno	izvan naselja	≥ 90	≤ 7,0	≥ 25 000	poseban postupak

Izvor: [1]

Poprečni nagib kružnog kolnika izvodi se prema vanjskoj strani u iznosi od q_{min}= od -2,5% (2%) prema vanjskoj strani zbog učinkovitije i tehnički prihvatljivije odvodnje, pogodnijeg prelaska iz privoza u kružni tok te prisiljavanja na smanjenje brzine u kružnom toku.

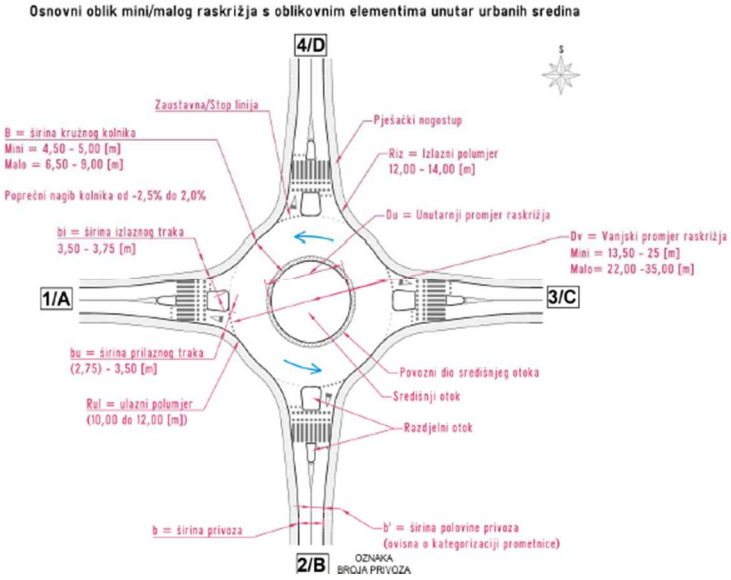
Središnji otok može biti provozni, djelomično provozni ili neprovozni dio obrubljen kružnim kolnikom ili prijelaznim prstenom. Zbog preglednosti nebi trebao biti viši od 1,0 (1,2) m. U mini i malim kružnim raskrižjima, radi manjeg trošenja pneumatika preporučljiva je izvedba zaobljenja prijelaza između unutarnjeg kružnog traka i povoznog dijela otoka.

Prijelazni prsten širine od 1,5 m do 2,0 m između kolnika i središnjeg otoka omogućuje lakši provoz duljih vozila te je u poprečnom nagibu od -4,0 %.



Slika 11. Elementi za provjeru trajektorija mjerodavnog vozila, [1]

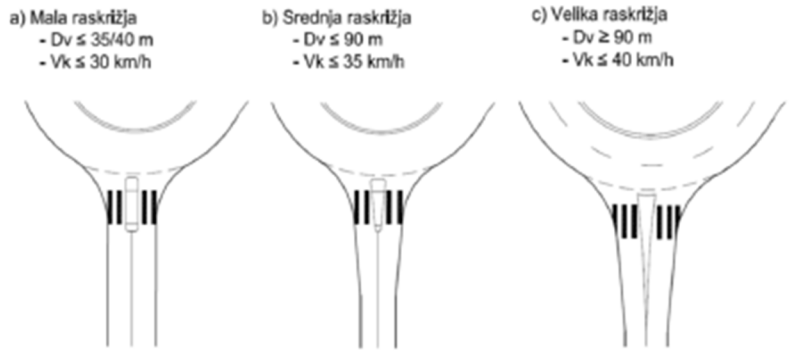
Izbor projektnih elemenata i detalja oblikovanja privoza prema kružnom raskrižju jedan je od ključnih stvari kojima se utječe na sigurnost i propusnu moć. Optimalan kut između privoza je 90º. Na slici 12. je prikazan osnovni oblik mini/malog raskrižja s oblikovnim elementima.



Slika 12. Oblikovni elementi urbanog mini/malog RKT, [2]

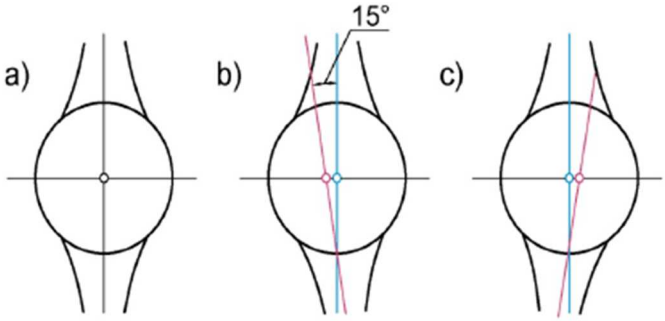
Razdjelni otoci privoza služe za razdjeljivanje i vođenje tokova, sprečavanje opasnih skraćivanja putanja vozila, najavu obveznog usporavanja, pripomoć u poprečnom prijelazu pješaka i biciklista, te osiguravanje prostora za vertikalnu signalizaciju.

Trebaju biti prilagođeni veličini kružnog raskrižja, a u slučajevima gdje su prisutni biciklisti i pješaci potrebno je predvidjeti odmak od 4,5 – 10 m, odnosno duljinu jednog ili dva vozila koja čekaju za uključivanje u privoz [2].



Slika 13. Oblici razdjelnih otoka u ovisnosti o veličini (D_v) i brzini (V_k), [2]

Tlocrtno i visinsko vođenje podrazumijeva oblikovanje privoza u širem i užem smislu. Pod širim oblikovanje misli se na elemente horizontalnog toka prije i poslije kružnog raskrižja, a uži smisao predstavljaju zadnji elementi horizontalnog toka cesta pred kružnim raskrižjem i prvi elementi horizontalnog toka ceste poslije raskrižja. Poželjno je da se produžeci linija privoza sijeku samo u jednoj točki kako je prikazano na slici 14.

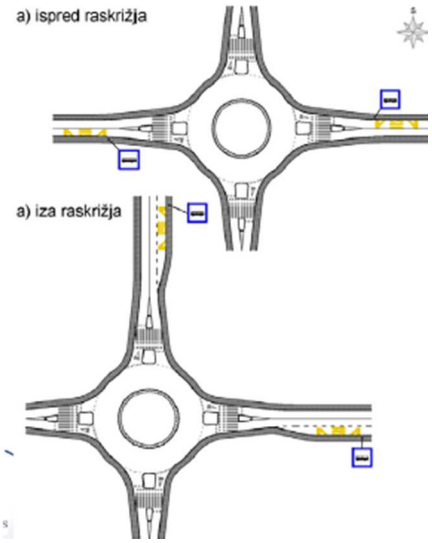


Slika 14. Položaj sjecišta linija privoza s obzirom na središte kružnog raskrižja, [2]

Pješački i biciklistički promet potrebno je voditi izvan ili odmaknuto od kružnog raskrižja za 1,5 m odgovarajućim hortikulturnim uređenjem, širina pješačkog nogostupa ne smije biti manja od 0,9 m, odnosno 1,5 m što omogućuje prolazak dviju osoba. Postoje dva načina vođenja:

1. zajedničko – za promet manjeg intenziteta i brzine vožnje u kružnom raskrižju do $V_k \leq 30$ km/h
2. odvojeno ili samostalno vođenje – znatno poboljšava propusnu moć i sigurnost prometa, biciklistička staza oblikovana je na udaljenosti 5,0 m oko kružnog kolnika, i širine 1,0 m za jednosmjerni promet [2].

Kružna raskrižja vrlo često služe kao završne postaje ili okretišta vozilima javnog gradskog prijevoza (JGP). Dvije su osnovne mogućnosti odabira stajališta, ispred kružnog raskrižja za slučaj da je raskrižje i okretište tramvaja i iza kružnog raskrižja za tranzitne linije što predstavlja povoljnije rješenje.



Slika 15. Smještanje autobusnih stajališta uz kružno raskrižje, [2]

2.3. Analiza projektno – oblikovnih elemenata raskrižja izvan razine

Povezivanje prometnih tokova raskrižja izvan razine obavlja se pomoću spojnih cesta, odnosno rampi. Prema funkcionalnoj klasifikaciji razlikuju se dvije vrste rampi: priključne i vezne. U pogledu propusne moći raskrižja izvan razine, mjerodavna je propusnost rampi. Za sve spojne rampe mjerodavna je projektna brzina V_p (km/h). U tablici 2 vidljive su granične vrijednosti projektnih elemenata rampi [1].

Tablica 2. Granične vrijednosti projektnih elemenata u spoju rampi

Projektni element		**Oznaka**	**Granične vrijednosti projektnog elementa za Vp [km/h]**					
			30	40	50	60	70	80
Najmanji polumjer zavoja		Rmin [m]	25	45	75	120	175	250
Najveći uzdužni nagib	uspon	+ s [%]	6,0					
	pad	- s [%]	7,0					
Najmanji konveksni polumjer		Rmin [m]	500	1000	1500	2000	2800	4000
Najmanji konkavni polumjer		Rmin [m]	250	500	750	1000	1400	2000
Najmanji poprečni nagib		qp [%]	2,5					
Najveći poprečni nagib		qR [%]	7,0					
Najmanji nagib vitoperenja		Δsmin [%]	0,1*a (a= odmak ruba od osi vitoperenja [m])					
Najmanja duljina zaustavljanja		Lz [m]	25	30	40	60	85	115

Izvor:[1]

Odnosi projektnih elemenata i brzina dešavaju za veličine V_p=40-80 [km/h], bilo da se radi o grupi rampi 1 (s vođenjem iz RIR u RIR) ili o grupi rampi 2 (iz RIR u RUR). Izbor i kombinacije bitnih elemenata moraju biti usklađeni na razini propusne moći i sigurnosti prometa (režim V_{pje} ključan). U pogledu visinskog vođenja rampi, ističe se razlikovnost uzdužnih nagiba rampi, ovisno o potezima s usponom ($s_r \leq 6\%$) i u padu ($s_r \leq 7\%$) [1].

Za oblikovanje rampi u tlocrtu koriste se pravac, kružni luk i klotoida kao tri osnova geometrijska elementa. Projektna brzina kao polazište za projektne elemente te zavisnost od tipa rampi i funkcionalne razine raskrižja određuje se prema tablici 3.

Projektni elementi rampi u tlocrtnoj funkciji moraju provjeravati sa stajališta sigurnosti prometa i propusne moći.

Tablica 3. Odnosi tipa, funkcionalne razine te brzine na rampi

Rampe\ Vp [km/h] i funkc. razine	**Projektna brzina Vp**			
	A	B	C	D
Direktne/izravne	80	70	60	50
Poludirektne	70	60	50	-
Indirektne/neizravne	50	40	30	30

Izvor: [1]

Najmanji elementi horizontalnih krivina postižu se iz izraza za polumjer R i prijelaznicu A:

$$R_{min}=\frac{Vp^2}{127(qmax+frmax)}$$

gdje je:

vp – brzina vožnje
qmax – nagib poprečnog nagiba
frmax – koeficijent prianjanja

Vertikalna projekcija spojnih rampi u pravilu se oblikuje uz primjenu graničnih elemenata kako bi se smanjila duljina rampi i opseg prostora. Na odabir visinskih elemenata utječu:

- najmanja visinska razlika dviju razina u raskrižju određena je visinom slobodnog profila (h_s=4,50 m) te konstruktivnom visinom nadvožnjaka
- najveći dopušteni nagib nivelete ne bi trebali prelaziti u usponu s_{max}= +5,0(6,0) % odnosno u padu s_{max}=-6,0 (7,0) %
- granični polumjeri zaobljenja vertikalnih zaobljenja proističu iz mjerila preglednosti, prema tablici 4.

Tablica 4. Ovisnost ključnih elemenata o projektnoj brzini Vp

Rmin [m] \ Vp [km\h]	(30)	40	50	60	70	80
Rmin konveksno [m]	500	500	1000	1500	2500	4000
Rmin konkavno [m]	500	500	1000	1500	2000	3000

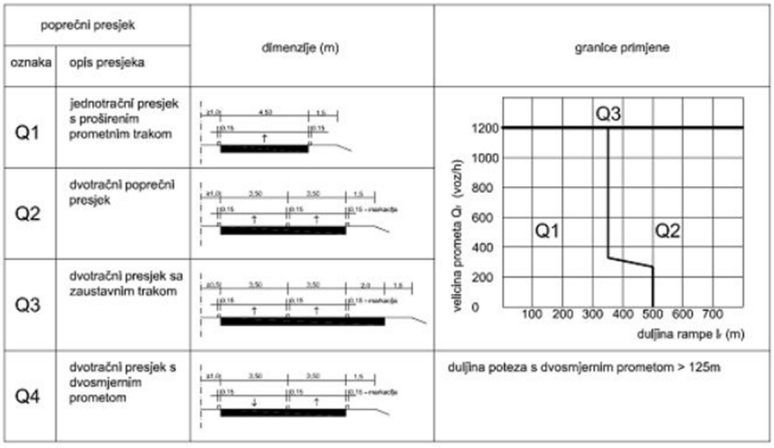
Izvor [1]

Poprečni presjek rampe određuje se prema prometnom opterećenju i duljini vožnje. Karakteristični su tipovi presjeka jednosmjernih rampi (Q_1-Q_3) i dvosmjerne rampe (Q_4).

Presjek Q_1 sadrži jedan prometni trak koji omogućuje vožnju u koloni, uz dostatne uvjete za obilaženje zaustavljenog vozila. Primjenjuje se za relativno kratke rampe s prometnim opterećenjem $Q_r \leq 800$ voz/h odnosno za manja prometna opterećenja i nešto dulje rampe. Presjek Q_2 se primjenjuje na rampama srednje do veće duljine i za opterećenje $Q_r \leq$ 1000 voz/h.

Primjenjuje se i za tzv. vezne rampe (koje povezuju značajnije prometnice), a može se primijeniti na dionicama dvosmjernih rampi (na raskrižjima tipa truba i poludjeteline.)

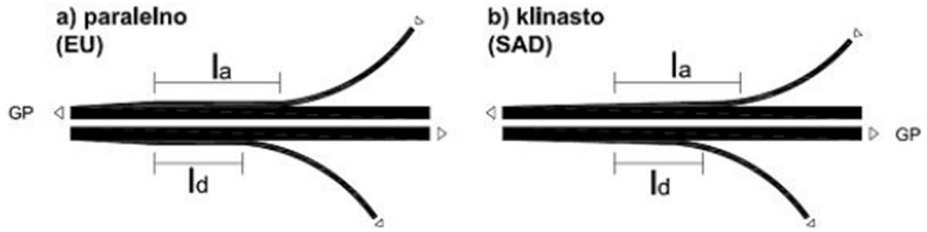
Presjek Q_3 se primjenjuje u iznimnim slučajevima kod raskrižja izvan razine najviše razine (tip 1)-primjena kod direktnih i poludirektnih rampi [1].



Slika 16. Dimenzije i granično područje primjene spojnih rampi, [1]

Prometna operacija izljevanja i uljevanja podrazumijeva promjenu prometnog traka uz prilagođavanje brzine vožnje. Kod izljevanja je prisutno izdvajanje iz osnovnog prometnog pravca (GP) s usporavanjem vožnje. Kod uljevanja se radi o ubrzavanju s uplitanjem u osnovni prometni tok.

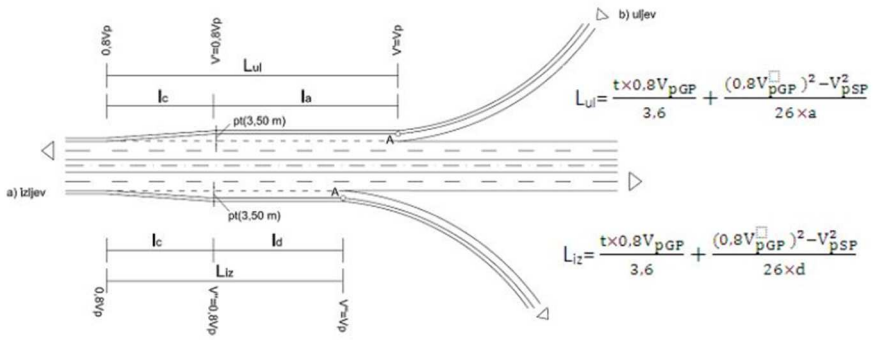
Pri obje operacije ne smije se remetiti ustaljeni prometni režim, pa je neophodno izljevno – uljevna mjesta građevinski prikladno urediti te opremiti odgovarajućom signalizacijom. U europskoj praksi se izvodi paralelnim, a u anglo – američkoj s klinastim trakovima [1].



Slika 17. Osnovni oblici izljevno - uljevnih trakova, [1]

U području izljeva ili uljeva izvode se proširenja za dodatni prometni trak (pt_d ili pt_a) koji je duž puta usporavanja (l_d) odnosno ubrzavanja (l_a)-duljina dodatnog traka iznosi: $L_{iz}/ulj=l_c+l_{d/a}$ - l_c put koji vozilo prijeđe za t=3 s (duljina proširenja/razmicanja).

- vrijednosti usporenja d=1,2-1,5 m/s^2
- vrijednosti ubrzanja a=0,8-1,0 m/s^2



Slika 18. Osnovni elementi za dimenzioniranje izljeva i uljeva, [1]

Postoje i modaliteti raznih tipova izljeva. Širine prometnih trakova kod oblikovanja izljeva na osnovnom kolniku i u odvojku ovisne su o prometnom režimu i voznodinamičkim zahtjevima

- osnovni kolnik; širine su jednake onima na slobodnoj trasi (uobičajeno: p_t=3,75 m)
- trak u odvajanju je ponekad nepromijenjen ili je u funkciji s posebnim uvjetima (širine 3,75 m za pravolinijske te širine 3,50 m za spojne rampe) [1].

Potezi za preplitanje trebaju se predvidjeti za slučajeve kad nedostaje minimalni razmak između vrhova otoka susjednog uljeva i izljeva. Mogu se razlučiti trakovi za preplitanje na prolaznim kolnicima i unutar spojnih rampi. Preplitanje na prolaznom kolniku u slučaju manjih prometnih tokova, odnosno iz razloga racionalnosti izvedbe neophodna je provjera sigurnosne komponente rješenja između vrhova otoka kraćem od 500 metara treba smanjiti brzine na 80 do 100 km/h preporučuje se barem 300 metara dugački kolnik za preplitanje [1].

3. PREGLED SIMULACIJSKIH ALATA ZA MODELIRANJE VOĐENJA PROMETNIH TOKOVA U RASKRIŽJIMA

Postoji čitav niz simulacijskih alata za modeliranje prometnih tokova koji su dostupni prometnim stručnjacima. Alati se razlikuju po nizu sposobnosti za modeliranje različitih prometnih situacija i ponašanja sudionika u prometu. Često je potrebno koristiti dva ili više različita alata kako bi u potpunosti izradili model. Uobičajeni simulacijski alati za dizajniranje i optimiziranje raskrižja upravljanih svjetlosnom signalizacijom su Synchro Studio, PTV VISSIM, LinSig, OSCADY PRO i TRANSYT.

Mikrosimulacijski alati imaju najveću mogućnost za otkrivanje kompleksnih i zagušenih prometnih scenarija. Stohastički mikrosimulacijski alati imaju mogućnost modeliranja ponašanja vozila u cestovnoj mreži te mogu pružiti detaljan prikaz složenih prostornih odnosa koji utječu na ponašanje vozača.

Deterministički alati koriste empirijske algoritme za izračun optimalnih postavki na temelju fiksnih ulaznih podataka. Ulazni podaci se razlikuju ovisno o kojem se simulacijskom alatu radi, a služe za prikaz prometne mreže i njezinih temeljnih uvjeta, primjerice definiranje geometrije prometnica i prometnog toka.

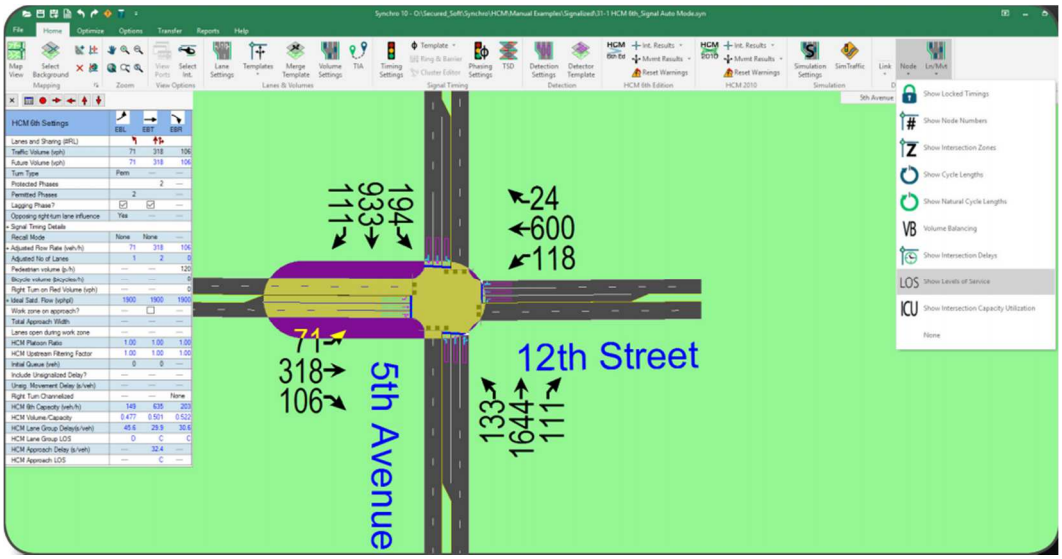
Empirijski modeli mogu predvidjeti potencijalan nastanak neodrživog stanja u prometu na mreži te se mogu testirati razne strategije signalnih planova. Egzaktni numerički podaci dobiveni izradom modela mogu dati općenite naznake hoće li uvedeni prijedlozi raditi usklađeno u cestovnoj mreži [3].

Modeliranje se primjenjuje kod prostornih razmjera određenih predloženim planom. Izbor odgovarajućeg determinističkog modela određeno je potrebom modeliranja izoliranog raskrižja ili nekoliko povezanih raskrižja u mreži te da li će raskrižja biti upravljana svjetlosnom signalizacijom ili nesemaforizirana raskrižja.

Izolirana raskrižja upravljana svjetlosnom signalizacijom

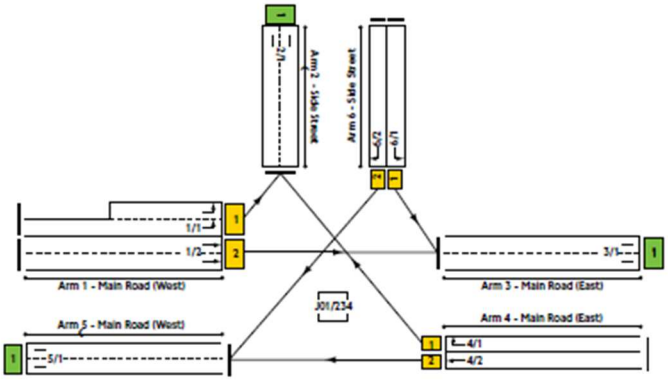
Najčešće korišteni simulacijski alati za modeliranje izoliranih raskrižja upravljanih svjetlosnom signalizacijom su LinSig, Synchro Studio i OSCADY PRO. Navedeni alati koriste se za brzu procjenu kako i na koji način se upravlja prometom na raskrižju. Pomoću ovih alata i s vrlo malo ulaznih podataka mogu se izraditi osnovni modeli što ove alate čini pogodnim za izradu pripremnih studija raskrižja.

Synchro Studio mikrosimulacijski alat, razvijen od tvrtke Trafficware sa sjedištem u Sjedinjenim Američkim Državama. Synchro se koristi za modeliranje svih vrsta raskrižja, nesemaforiziranih raskrižja, raskrižja upravljanih svjetlosnom signalizacijom i raskrižja sa kružnim tokom prometa. Ovaj alat koristi metodologiju HCM 2010 (Highway Capacity Manual) za proračune propusne moći raskrižja. Jednostavno grafičko sučelje omogućuje analiziranje podataka u kratkom roku. Evaluacija podataka vrši se pomoću smjernica i priručnika Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD).



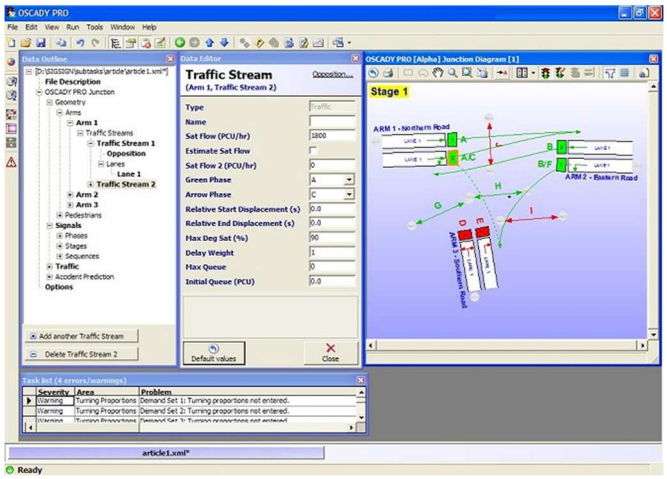
Slika 19. Grafičko sučelje Synchro Studio simulacijskog alata, [18]

LinSig, alat koji je razvio Brian Simmomite, u Ujedinjenom Kraljevstvu 1980. godine. Kasnije je osnovao JCT Consultancy, tvrtku koja se bavi prometnim djelatnostima kao što su razvitak simulacijskih prometnih softvera, prometnim modeliranjem i sl. LinSig se koristi za detaljno dizajniranje raskrižja, procjenu predloženih varijanata i stvaranje okvirnih modela. Kombinacijom prometa i kontrolnog modeliranja replicira se mikroprocesorska tehnologija korištena za upravljanje prometnim svjetlima, također omogućuje prometnom stručnjaku da maksimizira učinkovitost raskrižja. LinSig može optimizirati signalni plan te je pomoću tog alata moguća i evaluacija. Osmišljen je za detaljno modeliranje malih grupa raskrižja umjesto složenih mreža više raskrižja. Mreža se sastoji od niza geometrijskih traka, umjesto apstraktnih veza kao što je slučaj sa TRANSYT – om. LinSig se koristi za modeliranje manjih urbanih raskrižja koji dijele isti semaforski uređaj [3].



Slika 20. Grafičko sučelje LinSig simulacijskog alata, [3]

OSCADY PRO, (engl. Optimised Signal Capacity and Delay, Phase-based Rapid Optimisation of traffic signals), je simulacijski alat, razvijen od strane TRL Software (Transport Research Laboratory) u Ujedinjenom Kraljevstvu, pomoću kojeg se procjenjuju rezultati različitih varijanata raskrižja. Posjeduje mogućnost optimizacije alternativnih signalnih sekvenci na raskrižju tako što, onome tko modelira, predstavlja različite potencijalne konfiguracije koje se mogu implementirati na raskrižju. OSCADY PRO zahtijeva sve ulazne podatke o raskrižju što produljuje vrijeme potrebno za izradu i evaluaciju modela [3]. Na slici 20 prikazano je grafičko sučelje OSCADY PRO simulacijskog alata.

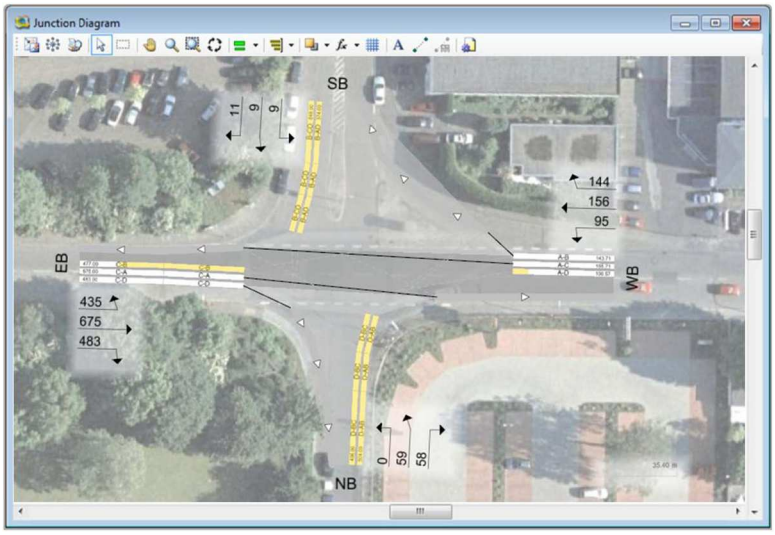


Slika 21. Grafičko sučelje OSCADY PRO simulacijskog alata, [16]

Izolirana nesemaforizirana raskrižja

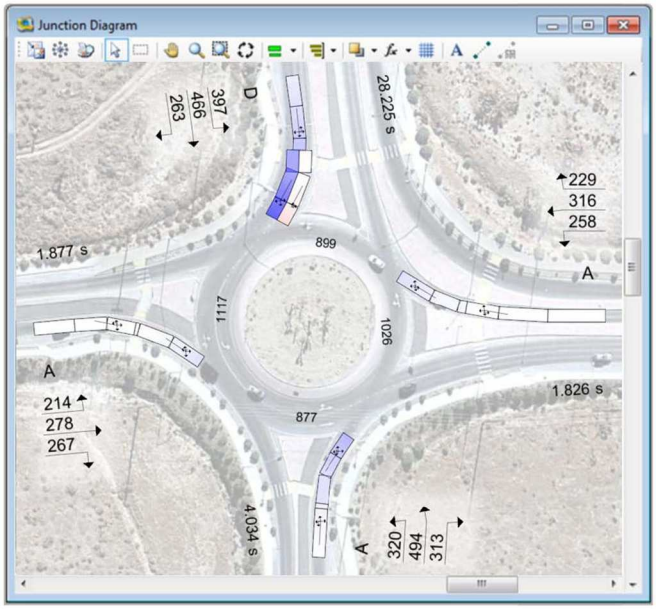
Nesemaforizirana raskrižja su najčešće zastupljen oblik upravljanja prometom u kojima se spajaju tokovi sporednih privoza s tokom glavnog privoza. Glavni prometni tok ima pravo prednosti u odnosu na tok sa sporednog privoza. Obzirom na regulaciju prometa i prometnu signalizaciju, vozila se na sporednom privozu imaju obvezu zaustaviti. Preglednost i geometrija raskrižja uvelike utječu na promet sporednih privoza. Nesemaforizirana raskrižja se modeliraju pomoću simulacijskih alata kao što su PICADY i ARCADY [3].

PICADY (engl. Priority Intersection Capacity and Delay) simulacijski alat, razvijen od strane TRL Software (Transport Research Laboratory) u Ujedinjenom Kraljevstvu koristi se za predviđanje parametara nesemaforiziranog raskrižja u pogledu potencijalnog repa čekanja i prosječnog vremena čekanja. PICADY uključuje razna istraživanja kako bi obuhvatio utjecaj projektno – oblikovnih elemenata raskrižja na ponašanje vozača te preglednost na glavnim privozima sa specifičnim geometrijskim karakteristikama. U mogućnosti je i modeliranje pješačkih prijelaza na privozima raskrižja.



Slika 22. Grafičko sučelje PICADY simulacijskog alata, [17]

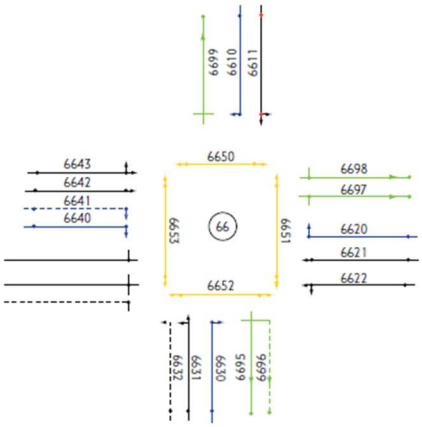
ARCADY (engl. Assessment of Roundabout Capacity and Delay) je simulacijski alat koji služi za modeliranje raskrižja s kružnim tokom prometa. Najčešće se koristi za predviđanje vjerojatnosti nastanka prometnih nesreća, prometnih zagušenja te za evaluaciju rješenja.



Slika 23. Grafičko sučelje ARCADY simulacijskog alata, [12]

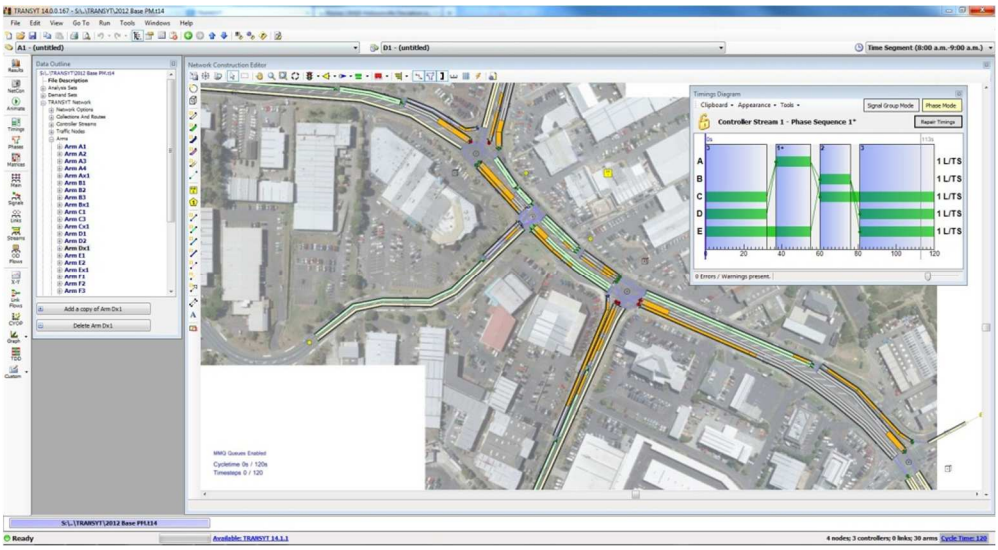
Općenito gledajući, u zagušenim urbanim područjima potrebno je koordinirati prometne tokove kako bi postigli pouzdane i zadovoljavajuće rezultate za sve sudionike u prometu. Učinkovita kontrola vozila u mreži postiže se upotrebom povezanih postavki koje su prisutne na raskrižjima. Optimalna podešavanja postavki za koordiniranu kontrolu prometa na raskrižjima razlikuju se ovisno o dobu dana i ovisno o danu u tjednu te su zbog tih razloga obično izvedeni iz deterministčkih mrežnih modela. Ovaj empirijski pristup daje približne prometne parametre mreže na temelju fiksnih ulaznih podataka i time omogućuje kontrolu prometnih zagušenja minimizirajući vrijeme čekanja vozila [3].

TRANSYT se koristi za modeliranje i optimizaciju različitih tipova raskrižja, od nesemaforiziranih raskrižja do raskrižja s kružnim tokom prometa koji su upravljani svjetlosnom signalizacijom. Postoji mogućnost razvitka optimalnog fiksnog signalnog plana za različite prometne uvjete u cestovnoj mreži. Razvoj tih postavki zahtijeva prikupljanje i analizu prosječnih podataka o prometu za svako modelirano razdoblje te postavljanje u zamišljenu mrežu linkova (veza) i nodova (čvorova).



Slika 24. Označavanje linkova u TRANSYT simulacijskom alatu, [3]

Optimizacija pomoću TRANSYT alata provodi se pomoću iterativnog algoritma „hill climb“. „Hill climb“ je iterativni algoritam koji počinje rješavati problem tako da postavi proizvoljno rješenje problema, a onda pokušava pronaći bolje rješenje tako da postupno mijenja pojedini element rješenja. TRANSYT je prikladan za modeliranje raskrižja koji imaju jednaku duljinu ciklusa [3].



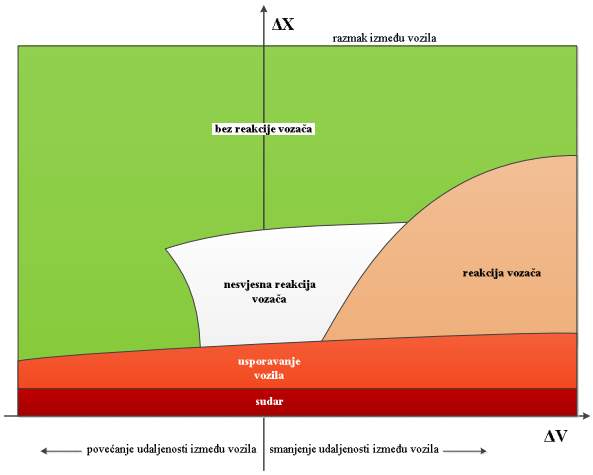
Slika 25. Grafičko sučelje TRANSYT simulacijskog alata, [13]

Mikrosimulacijski alati

Mikrosimulacijski alati imaju mogućnost modeliranja kretanja pojedinačnog vozila u cestovnoj mreži. Omogućuju realne prikaze ponašanja vozača kao što su promjena prometne trake i pretjecanje vozila. U tom pogledu razlikuju se od gore navedenih simulacijskih alata koji koriste skupni prikaz prometnih tokova u kojima sva vozila imaju ujednačeno ponašanje. U usporedbi s deterministčkim modelima, bolji prikaz i stohastički pristup mikro – simulacijskih alata omogućuje realniji prikaz ponašanja vozača, a tako i cijele prometne mreže. Mikro – simulacijski alati mogu prikazivati složene probleme u tkz. izvanmrežnom okruženju, kao što incidenti na prometnoj mreži ili parkiranje, a većina mikro – simulacijskih alata posjeduje grafiku koja prikazuje pojedinačna vozila u mreži te takvo modeliranje može pružiti izvrsnu vizualnu pomoć prilikom predstavljanja složenih problema inženjerima različitih struka [3].

PTV VISSIM (njem. Planung Transport Verkehr Verkehr In Städten – SIMulationsmodell) je mikroskopski simulacijski alat za modeliranje gradske prometne mreže i operacija javnoga gradskoga prijevoza te tokova pješaka. Točnost i vjerodostojnost simulacijskog modela najviše ovisi o kvaliteti modeliranja ponašanja vozila u simuliranoj prometnoj mreži. Za razliku od ostalih simulacijskih alata koji koriste konstantne brzine vozila i deterministčku logiku slijeđenja, PTV VISSIM koristi psihofizički model ponašanja vozača kojeg je razvio Rainer Wiedemann 1974. godine na Sveučilištu u Karlsruheu u Njemačkoj.

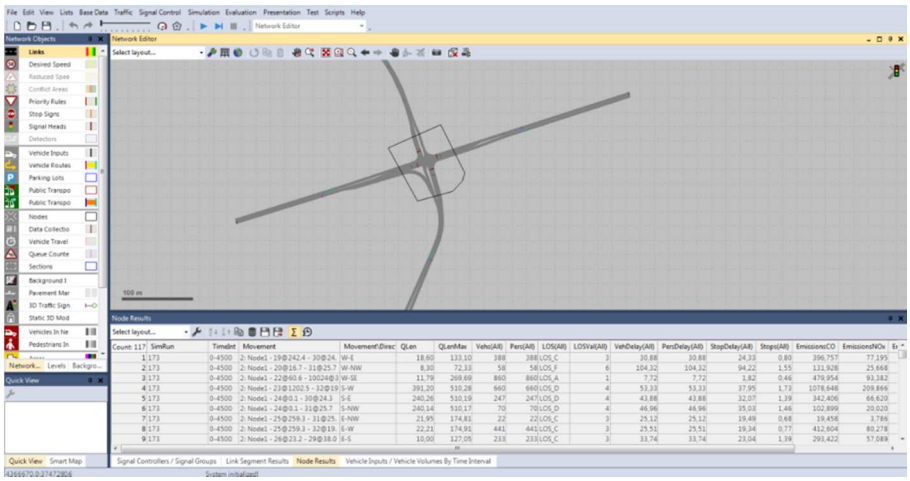
Osnovni koncept Wiedemannovog modela je taj da vozač bržeg vozila (u jednom prometnom traku, bez mogućnosti izlaska iz mreže), počinje usporavati kada percipira sporije vozilo u istom prometnom traku (slika 26). Budući da vozač u bržem vozilu ne može točno utvrditi brzinu sporijeg vozila, on usporava ispod brzine sporijeg vozila, te postepeno počinje ubrzavati do brzine sporijeg vozila [4].



Slika 26. Wiedemann - ov psihofizički model ponašanja vozača, [4]

PTV VISSIM vrši simulaciju prometnog toka pomicanjem jedinica "čovjek-vozilo" (engl. driver-vehicle-units) kroz definiranu prometnu mrežu. Svaki vozač u mreži sa svojim specifičnim karakteristikama ponašanja dodijeljen je određenom vozilu, te se poštuju i prethodno definirane tehničke mogućnosti određenog vozila (npr. maksimalna brzina vozila, maksimalno ubrzanje i usporenje, itd.). Atributi koji opisuju svaku jedinicu "čovjek-vozilo" mogu se kategorizirati u tri osnovne skupine:

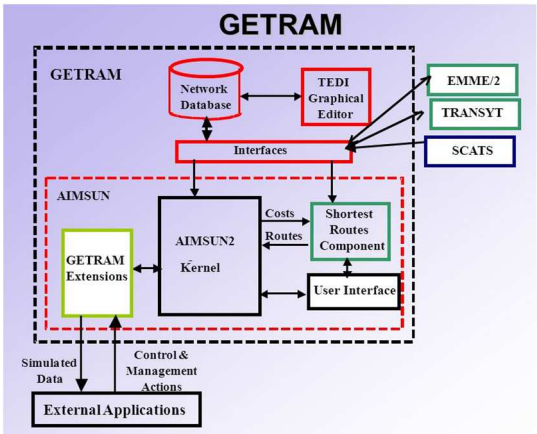
1. tehničke specifikacije vozila – duljina samog vozila, maksimalna brzina, potencijalno ubrzanje i usporenje, trenutna pozicija vozila u prometnoj mreži, trenutna brzina i ubrzanje vozila, itd.;
2. ponašanje jedinice "čovjek-vozilo" – psihofizički pragovi osjetljivosti vozača (mogućnost procjene specifične prometne situacije, agresivnost vozača, itd.);
3. međusobna zavisnost jedinica "čovjek-vozilo" – odnos između vozila u koloni u istom i susjednim prometnim trakovima, odnos između trenutne prometnice vozila i sljedećeg raskrižja, odnos prema narednom semaforiziranom raskrižju (signalnoj logici raskrižja), itd. [4]. Neki atributi koje je potrebno unijeti u VISSIM su geometrija prometnica, broj traka, prometna opterećenja, kategorije itd.



Slika 27. Grafičko sučelje PTV VISSIM simulacijskog alata

AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks) je mikroskopski simulacijski alat koji ima mogućnost prikazivanja stvarnih prometnih podataka na različitim prometnim mrežama. Ovaj simulacijski alat ima mogućnost modeliranja mikroskopskih modela, mezoskopskih i makroskopskih modela. U modelu, ponašanje svakog pojedinačnog vozila se modelira tijekom cijelog razdoblja simulacije obzirom na nekoliko atributa ponašanja sudionika u prometu kao što su promjena traka i prihvaćanje vremenskih praznina.

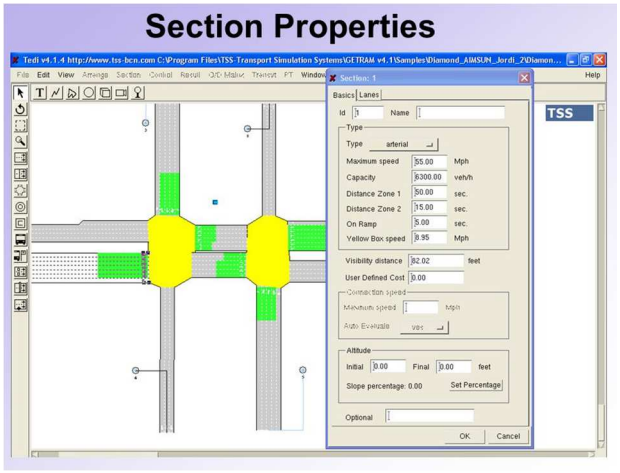
AIMSUN je ugrađen u GETRAM (eng. Generic Environment for Traffic Analysis and Modelling), simulacijsko okruženje sastavljeno od izbornika za uređivanje prometne mreže (TEDI), mrežne baze podataka te aplikacijskog programskog sučelja (API) koje ima za cilj povezivanje s drugim modelima simulacije.



Slika 28. Hijerarhijski prikaz simulacijskog okruženja GETRAM, [8]

Model pruža vrlo detaljne mogućnosti prometne mreže kao što su klasifikacija vozila, modeliranje prometne potražnje temeljene na prometnim tokovima ili na temelju izvorišno – odredišne matrice (OD matrice), modeliranje različitih načina kontrole prometa semaforiziranog raskrižja, od fiksno upravljanog do adaptivnog upravljanja, modeliranje incidenata na mreži te upotreba promjenjivih znakova (VMS).

AIMSUN može replicirati razne vrste detektora prometa kao što su detektori koji broje promet, zauzeće, prisutnost, brzinu vozila i gustoću prometnog toka [5].



Slika 29. Grafičko sučelje (TEDI) AIMSUN simulacijskog alatA, [8]

4. ANALIZA PROMETNIH PARAMETARA ZA EVALUACIJU RAZLIČITIH OBLIKA RASKRIŽJA

Prometni tok je istovremeno kretanje više vozila na putu u određenom poretku. Za opisivanje prometnih tokova na cestovnim prometnicama potrebno je definirati osnovne pokazatelje. Osnovna razlika u uvjetima kretanja vozila u prometnim tokovima u odnosu na uvjete kretanja pojedinačnog vozila je što u prometnom toku na kretanje vozila djeluje i međusobna interakcija vozila [6].

Osnovni parametri prometnog toka su:

- protok vozila,
- gustoća prometnog toka,
- brzina prometnog toka,
- vrijeme putovanja vozila,
- jedinično vrijeme putovanja,
- vremenski interval slijeđenja vozila,
- razmak slijeđenja vozila [6].

Protok vozila podrazumijeva broj vozila koja prođu kroz promatrani presjekprometnice u jedinici vremena u jednom smjeru za jednosmjerne prometnice ili u oba smjera za dvosmjerne prometnice. Osnovna jedinica za iskazivanje protoka vozila je broj vozila u jednom satu (voz/h) [6].

$$q\ \left[\frac{voz}{h}\right] = g\ \left[\frac{voz}{km}\right] * V\ [\frac{km}{h}]$$

gdje je:

q - protok

g - gustoća

V - brzina

Pod pojmom gustoća prometnog toka podrazumijeva se broj vozila na jedinicu duljine prometnice, po prometnoj traci, po smjerovima za jednosmjerne prometnice, odnosno u oba smjera za dvosmjerne prometnice. Broj vozila po jedinici dužine promatranog odsjeka (dionice) u trenutku promatranja g (voz/km) [6].

$$g = \frac{N}{s}\ [\frac{voz}{km}]$$

gdje je:

N - broj vozila u prometnom toku na promatranom dijelu puta u određenom trenutku

s - duljina dijela u kilometrima.

Ovisno o načinu promatranja protoka u odnosu na prostor i vrijeme, a obzirom i na značenja pojmova protoka vozila i gustoće toka, u teoriji prometnog toka su uspostavljena dva pojma za definiranje brzine prometnog toka kao odgovarajuće srednje vrijednosti brzina svih vozila koja čine promatrani prometni tok [6].

Ti pojmovi su:

- *Srednja prostorna brzina* prometnog toka predstavlja aritmetičku sredinu trenutnih brzina svih vozila u prometnom toku na promatranom odsjeku puta. Ova brzina se naziva i srednja trenutna brzina.

$$v_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} vi}{n}$$

gdje je:

v_s – srednja prostorna brzina

v_i – suma trenutnih brzina svih vozila

n – broj vozila

- *Srednja vremenska brzina* prometnog toka predstavlja aritmetičku sredinu brzina svih vozila u prometnom toku koja prolaze kroz promatrani presjek puta, u određenom periodu vremena.

$$v_t = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} vi$$

gdje je:

v_t – srednja vremenska brzina

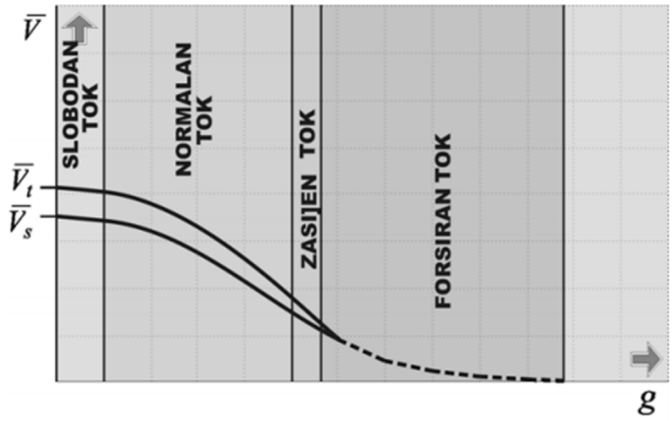
v_i – suma brzina svih vozila

N – broj vozila

U ovisnosti o uvjetima kretanja vozila u prometnom toku obzirom na stupanj interakcijskog utjecaja pri približno idealnim prometnim i putnim uvjetima srednja prostorna i srednja vremenska brzina prometnog toka dobivaju slijedeće specifične nazive [6]:

- brzina slobodnog toka; vezana je za slobodan tok i podrazumijeva da se sva vozila u prometnom toku na promatranom odsjeku kreću u identičnim ili bliskim uvjetima kretanja koja odgovaraju kretanju pojedinačnih vozila na dotičnom odsjeku v_s i v_t.
- brzina normalnog toka (stabilan, polustabilan i nestabilan); pojam brzine normalnog toka vezan je za stabilan, polustabilan i nestabilan prometni tok u kome na uvjete kretanja vozila djeluje i interakcija između vozila u toku v_s i v_t .
- brzina zasićenog toka, tzv. brzina pri kapacitetu; vezana je uz zasićen prometni tok u kome se sva vozila kreću uz potpuno ili približno potpuno djelovanje interakcije između vozila u toku. U uvjetima zasićenog toka sva vozila se kreću približno istom brzinom (v_{ZT}), što znači da ne postoji gotovo nikakva kvantitativna razlika između srednje prostorne i srednje vremenske brzine prometnog toka. Znači, pri zasićenom toku vrijedi uvjet da je: $v_{ZT} \cong vs \cong vt$.
- brzina forsiranog (prisilnog) toka, pojam brzine forsiranog toka vezan je za forsiran prisilni prometni tok. U uvjetima forsiranog (prisilnog) toka vozila se kreću približno istom brzinom koja, promatrana u prostoru i vremenu, oscilira između vrijednosti v_{ZT} i 0. Znači, pri zasićenom toku važi uvjet da je $v_f < v_{ZT}$.

Na slici 30 grafički je prikazano odnos srednje prostorne i srednje vremenske brzine u različitim uvjetima odvijanja prometnih tokova.



Slika 30. Prikaz brzina u različitim uvjetima odvijanja toka, [6]

Interval slijeđenja vozila u prometnom toku predstavlja vrijeme između prolaska dva uzastopna vozila kroz zamišljeni presjek promatranog odsjeka puta. Promatra se prednji dio vozila (čeoni prolaz). Interval praćenja vozila na presjeku puta predstavlja vrijeme prolaska prednjeg kraja uzastopnih vozila preko promatranog presjeka puta. Osnovna jedinica za iskazivanje intervala praćenja vozila je sekunda [6].

$$\bar{t} = \frac{3600}{\bar{q}} \left[\frac{s}{voz}\right]$$

Izračunom prosječnog vremena slijeđenja moguće je odrediti prosječnu veličinu prometnog toka, odnosno protok.

$$\bar{q} = \frac{3600}{\bar{t}} \left[\frac{voz}{s}\right]$$

gdje je:
$\bar{t}$ – interval slijeđenja vozila
$\bar{q}$ – protok vozila

Razmak slijeđenja vozila predstavlja prostorni razmak između dva uzastopna vozila u prometnom toku i najčešće se označava sa S_h, a izražava u metrima. Sa stajališta realnih prometnih tokova na odsjeku puta razmak u praćenju predstavlja srednju vrijednost svih razmaka praćenja između uzastopnih vozila u određenom toku na promatranom odsjeku ili dionici puta. Promatra se razmak između stražnjeg kraja prvog vozila i prednjeg kraja stražnjeg vozila [6].

$$\overline{Sh} = \frac{1000}{\bar{g}} \left[\frac{m}{voz}\right]$$

gdje je:
$\overline{Sh}$ - razmak slijeđenja vozila
$\bar{g}$ – gustoća prometnog toka

Za proračun propusne moći raskrižja u razini mjerodavna su razrješenja kolizijskih točaka pri operacijama križanja i lijevih skretanja, za raskrižja s kružnim tokom mjerodavna je propusna moć privoza, a za raskrižja izvan razine mjerodavna je propusnost spojnih cesta (rampi) [1].

Za nesemaforizirana raskrižja procjenjuje se kapacitet sporednih privoza, odnosno da li vozila sa sporednog privoza mogu ući ili proći raskrižjem u prihvatljivom vremenskom intervalu. Procjenjuje se ili se mjeri i rep čekanja na sporednim privozima. Na semaforiziranim raskrižjima procjenjuje se propusna moć u smislu prihvatljive duljine trajanja ciklusa i „zelenih" vremena za pojedine grupe trakova [1].

Suvremeni simulacijski alati, kao na primjer PTV VISSIM – u, za modeliranje vođenja tokova u raskrižjima imaju mogućnost odabira velikog broja podataka za evaluaciju raskrižja. Ovisno o objektima koji se koriste, tijekom simulacije nastaju podaci i informacije o vozilima u mreži, linkovima (prometnicama), područjima obuhvata, „nodovima", prometnim zagušenjima, raspodjeli zelenih vremena, informacijama o javnom prijevozu itd.

Evaluacija izlaznih podataka najčešće se vrši pomoću slijedećih elemenata:

- vrijeme putovanja,
- rep čekanja,
- vrijeme čekanja (kašnjenja),
- razina usluge (LoS),
- informacije o svakom pojedinačnom vozilu,
- evaluacija linkova,
- evaluacija nodova,
- vrijeme čekanja JGP,
- emisije štetnih plinova,
- signalnih uređajimag [14].

Najčešće korišten alat za evaluaciju i prikupljanje izlaznih podataka raskrižja u simulacijskom programu PTV VISSIM je „node evaluation". Node predstavlja definirano područje koje se nalazi oko promatranog raskrižja. „Node evaluation" se posebno koristi za prikupljanje specifičnih izlaznih podataka raskrižja bez prethodno „ručnog" definiranja elemenata za prikupljanje podataka. Prema zadanim postavkama, podaci za sve vrste vozila su zajedno prikazani, ali se mogu prikazati i podaci za svaku vrstu vozila posebno [7].

Prilikom rada motora s unutarnjim izgaranjem nastaju plinovi koji su štetni za okoliš i za čovjeka. Neki od tih plinova su ugljikov monoksid (CO), ugljikovodici (CH), dušikovi oksidi (NOx), sumporov dioksid (SO_2) i krute čestice (PM). U novijim verzijama PTV VISSIM ima mogućnost određivanja i mjerenja navedenih štetnih plinova kako bi se moglo utvrditi u kojoj mjeri promet utječe na okoliš i na cjelokupno promatrano područje.

Baza za to određivanje definirana je prema formulama za potrošnju goriva vozila iz simulacijskog alata TRANSYT 7-F. Evaluacija node – a koristi se za usporedbu emisija štetnih plinova više varijanata raskrižja te se odabire najpovoljnije. Emisije štetnih plinova u izravnoj su vezi sa potrošnjom goriva, što je veća potrošnja goriva to će i emisije štetnih plinova biti veće [7]. Na slici 31. prikazani su izlazni podaci emisija nekoliko štetnih plinova i potrošnje goriva u PTV Vissimu.

EmissionsCO	EmissionsNOx	EmissionsVOC	FuelConsumption
0,000	0,000	0,000	0,000
1356,986	264,020	314,495	19,413
636,365	123,813	147,484	9,104
198,806	38,680	46,075	2,844
1472,566	286,508	341,281	21,067
0,000	0,000	0,000	0,000
736,822	143,359	170,766	10,541
80,616	15,685	18,684	1,153
756,375	147,163	175,297	10,821
1354,329	263,503	313,879	19,375
0,000	0,000	0,000	0,000
36,047	7,013	8,354	0,516
214,185	41,673	49,639	3,064
0,785	0,153	0,182	0,011

Slika 31. Izlazni podaci o emisijama štetnih plinova u alatu PTV Vissim

Široka paleta elemenata za evaluaciju raskrižja čini Vissim jednim od vodećih simulacijskih alata u Europi, ali i šire. Izbornik za mjerenje kašnjenja vozila (eng. delay measurements) prikuplja podatke o broju vozila, prosječnom kašnjenju te broju zaustavljanja vozila. Mjerenje kašnjenja vozila sastoji se od jednog ili više mjerenja vremena putovanja. Za svako mjerenje vremena putovanja vrijedi:

- mjerenje vremena putovanja počinje prije ulaska vozila u „node“,
- mjerenje vremena putovanja počinje neposredno nakon ulaska u „node“ ukoliko između dva „node – a“ nema više od četiri čvorišta,
- mjerenje vremena putovanja završava odmah nakon izlaska vozila iz „node – a“ [7].

Vrijeme trajanja pružanja usluga (npr. kupovina karte) putnicima u vozilima javnog gradskog prijevoza (JGP) i čekanje vozila JGP na raskrižjima gdje je postavljen „STOP“ znak nije uračunato u ukupno vrijeme kašnjenja, no kašnjenje uzrokovano kočenjem prije stanice JGP i ubrzanjem prilikom uključivanja u glavni tok jest.

Duljine repa čekanja mjerene su pomoću brojača koji su smješteni u signalnoj lanterni ako se promatra semaforizirano raskrižje ili na prvoj konfliktnoj točki (eng. conflict marker) na linku između tokova ako se promatra nesemaforizirano raskrižje. Ako nema signalne lanterne na raskrižju, niti ne postoje konfliktne točke, Vissim će sam dodati brojače repa čekanja na ulasku u „node“, no Vissim ne mjeri rep čekanja ako je status između dva toka pasivan ili ako je neodređen (eng. undetermined).

Za svaki „node“, tablično će se prikazati rezultati:

- ukupan zbroj svih vozila, pješaka, emisija štetnih plinova i potrošnje goriva,
- prosječne vrijednosti kašnjenja vozila, kašnjenja pješaka, repa čekanja i broja zaustavljanja vozila,
- zbroj maksimalnog repa čekanja,
- razina usluge za svako skretanje (LoS).

Ono što je vrlo bitno kod evaluacije podataka je i mogućnost pregleda podataka po svakom skretanju posebno što je vidljivo iz slike 32 gdje je posebno označen stupac „movement“. Iz navedene slike prikazani su osnovni izlazni rezultati evaluacije „node – a“.

Node Results

Select layout...

Count: 17	SimRun	TimeInt	Movement\D	QLen	QLenMax	Vehs(All)	Pers(All)	LOS(All)	LOSVal(A	VehDelay(All)	PersDelay(A	StopDelay(All)	Stops(All)	EmissionsCO	EmissionsNOx	EmissionsVOC	FuelConsumpt
1	19	0-4500	S-S	163,14	223,31	0	0	LOS_A						0,000	0,000	0,000	0,000
2	19	0-4500	S-W	163,14	223,31	597	597	LOS_E	5	48,92	48,92	7,86	3,61	1339,328	260,585	310,402	19,161
3	19	0-4500	S-E	163,14	223,31	288	288	LOS_E	5	49,38	49,38	8,22	3,65	622,077	121,034	144,172	8,900
4	19	0-4500	S-N	163,14	223,31	86	86	LOS_E	5	48,97	48,97	8,37	3,38	180,206	35,062	41,765	2,578
5	19	0-4500	W-S	224,59	260,92	497	497	LOS_F	6	75,97	75,97	13,27	6,22	1647,132	320,472	381,739	23,564
6	19	0-4500	W-W	224,59	260,92	0	0	LOS_A						0,000	0,000	0,000	0,000
7	19	0-4500	W-E	224,59	260,92	240	240	LOS_F	6	77,41	77,41	14,00	6,56	828,331	161,163	191,974	11,850
8	19	0-4500	W-N	224,59	260,92	26	26	LOS_F	6	75,49	75,49	15,29	6,27	87,790	17,081	20,346	1,256
9	19	0-4500	E-S	203,21	259,81	199	199	LOS_F	6	99,21	99,21	32,66	7,80	835,289	162,517	193,586	11,950
10	19	0-4500	E-W	203,21	259,81	383	383	LOS_F	6	99,54	99,54	34,35	7,33	1534,267	298,513	355,581	21,949
11	19	0-4500	E-E	203,21	259,81	0	0	LOS_A						0,000	0,000	0,000	0,000
12	19	0-4500	E-N	203,21	259,81	11	11	LOS_F	6	97,73	97,73	29,95	8,45	46,976	9,140	10,887	0,672
13	19	0-4500	N-S	3,80	59,74	174	174	LOS_B	2	14,42	14,42	6,96	0,99	156,690	30,486	36,314	2,242
14	19	0-4500	N-W	3,80	59,74	1	1	LOS_D	4	25,41	25,41	15,14	1,00	1,034	0,201	0,240	0,015
15	19	0-4500	N-E	3,80	59,74	17	17	LOS_C	3	18,53	18,53	10,00	1,06	17,128	3,333	3,970	0,245
16	19	0-4500	N-N	3,80	59,74	0	0	LOS_A						0,000	0,000	0,000	0,000
17	19	0-4500	Total	148,68	260,92	2519	2519	LOS_F	6	66,59	66,59	15,69	5,15	7299,352	1420,189	1691,695	104,426

Slika 32. Prikaz izlaznih rezultata evaluacije

Redom su prikazani:

- *SimRun (Simulation run)*; broj pokrenutih simulacija,
- *Movement*; skretanje,
- *QLen (queue length)*; srednja vrijednost svih prosječnih veličina repova čekanja,
- *QLenMax (queue length maximum);* maksimalan rep čekanja,
- *Veh (All) (vehicle);* ukupan broj vozila,
- *Pers(All) (persons):* ukupan broj osoba koji se nalaze u vozilima,
- *LOS (All) (Level of Service);* razina usluge za svako skretanje (s), mogućnost usporedbe sa HCM 2010 prikazana je u tablici 5.

Tablica 5. Vrijednosti za određivanje razine usluge na semaforiziranim i nesemaforiziranim raskrižjima

Za semaforizirana raskrižja [s]:		Za nesemaforizirana raskrižja [s]:	
A	≤ 10	**A**	≤ 10
B	> 10 to 20	**B**	> 10 to 15
C	> 20 to 35	**C**	> 15 to 25
D	> 35 to 55	**D**	> 25 to 35
E	> 55 to 80	**E**	> 35 to 50
F	> 80	**F**	> 50

Izvor: [7]

- *LOSVal (All) (Level of Service value;* razina usluge prikazana brojevima od 1 – 6. 1 pripada vrijednosti A, a 6 vrijednosti F.
- *VehDelay (All);* prosječno vrijeme kašnjenja svih vozila. Rezultat je oduzimanja teoretskog (idealnog) vremena putovanja od stvarnog vremena putovanja. Teoretsko vrijeme putovanja je ono koje bi se ostvarilo ukoliko na mreži ne bi bilo vozila ili semafora, odnosno bilo kojeg drugog razloga zbog kojeg bi se vozila morala zaustaviti. Stvarno vrijeme putovanja ne uključuje vrijeme provedeno pružanjem usluga u JGP.
- *PersDelay(All);* prosječno kašnjenje svih putnika u vozilima,
- *StopDelay (All);* prosječna vrijednost kašnjenja prilikom zaustavljanja vozila.
- *Stops (All);* prosječan broj zaustavljanja svakog vozila,
- *EmissionsCO;* količina emisija ugljikovog monoksida [gram],
- *EmissionsNO_x;* količina emisija dušičnih oksida [gram],
- *EmissionsVOC*; količina emisija hlapivih organskih spojeva [gram],
- *FuelConsumpt (Fuel consumption);* potrošnja goriva [gallon]

Jedan od načina evaluacije rezultata je i prikazivanje rezultata mreže vozila i pješaka (network performance results (vehicles)), gdje se prikazuju određeni atributi vozila cijele mreže. U mikroskopskim simulacijskim alatima, rezultati mreže su ažurirani svakim vremenskim korakom (eng.: „time step“), no u mezoskopskim simulacijskim alatima ažuriraju se na kraju svakog intervala evaluacije.

Atributi uzimaju u obzir vozila koja su već napustila mrežu, vozila koja su stigla do svog odredišta (npr. parkiralište) te vozila koja se nalaze u mreži na kraju intervala evaluacije. Ukupna potražnja ulaznih tokova i izvorišno – odredišnih matrica tijekom simulacije zbroj je slijedećih izlaznih rezultata:

Ukupno = vozila koje se nalaze u mreži + vozila koja su napustila mrežu + vozila koja se trenutno ne mogu koristiti.

Pri završetku simulacije prikazuju se slijedeći rezultati:

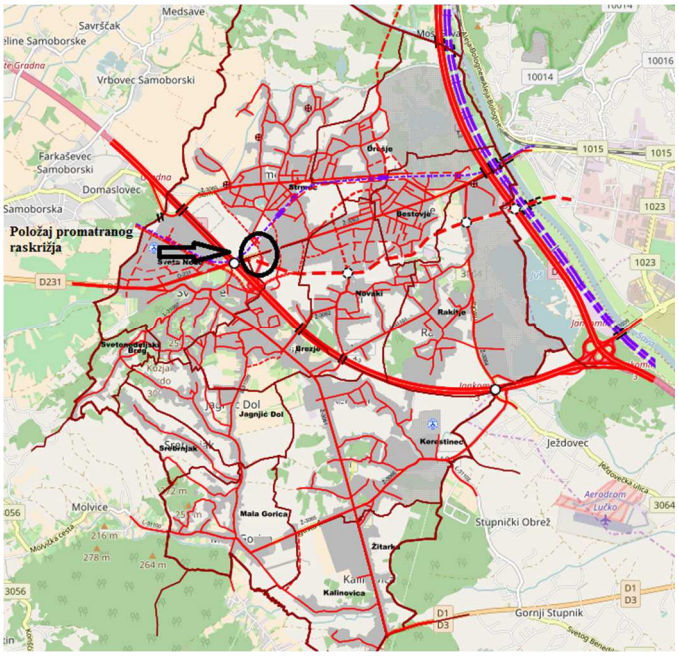
- emisije štetnih plinova,
- ukupan broj vozila na kraju simulacije,
- ukupan broj vozila koja su stigla na svoje odredište i uklonjena su iz mreže,
- prosječna brzina vozila,
- prosječan broj zaustavljanja vozila,
- potrošnja goriva,
- ukupno vrijeme putovanja,
- ukupno vrijeme kašnjenja,
- prosječno vrijeme kašnjenja vozila,
- ukupan prijeđeni put vozila.

5. RAZVOJ SIMULACIJSKOG MODELA ZA PRIMJENU RAZLIČITIH NAČINA UPRAVLJANJA PROMETNIM TOKOVIMA NA ODABRANOM PRIMJERU

5.1. Analiza postojećeg stanja

Sveta Nedelja je grad smješten uz autocestu A3 Bregana – Zagreb – Lipovac, 6 km istočno od Samobora i 15 km zapadno od Zagreba te je jedan od satelitskih gradova Grada Zagreba. Grad se sastoji od 14 naselja, a prema popisu stanovništva 2011. godine u gradu živi 18.059 stanovnika.

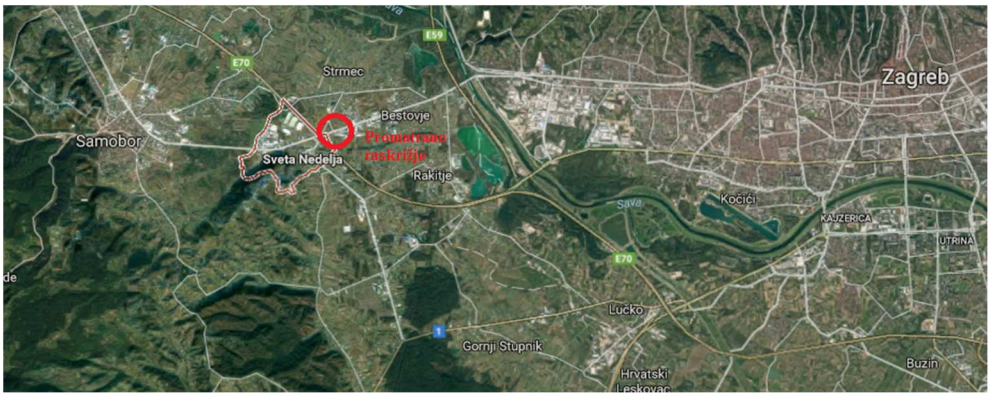
Područjem Grada prolazi jedna od najznačajnijih prometnica, autocesta A3 Bregana – Zagreb – Lipovac, što omogućuje odličnu prometnu povezanost sa Zagrebom na istoku, ali i s Europom na zapadu pošto se granični prijelaz sa Republikom Slovenijom nalazi svega 7,0 km od čvora Sveta Nedelja. Autocesta A3 dijeli grad i gradska naselja na dva dijela, sjeverni i južni dio te ista predstavlja, uz državnu cestu D231, glavnu prometnicu kojom je Sveta Nedelja povezana sa Samoborom i Zagrebom. Sjeverni dio čine naselja Orešje, Strmec, Bestovje, Novaki i Rakitje, a južni dio Brezje, grad Sveta Nedjelja, Svetonedeljski Breg, Jagnjić Dol, Srebrnjak, Mala Gorica, Kerestinec, Žitarka i Kalinovica, što je vidljivo iz slike 33.



Slika 33. Prikaz prometnica Grada Svete Nedelje, [15]

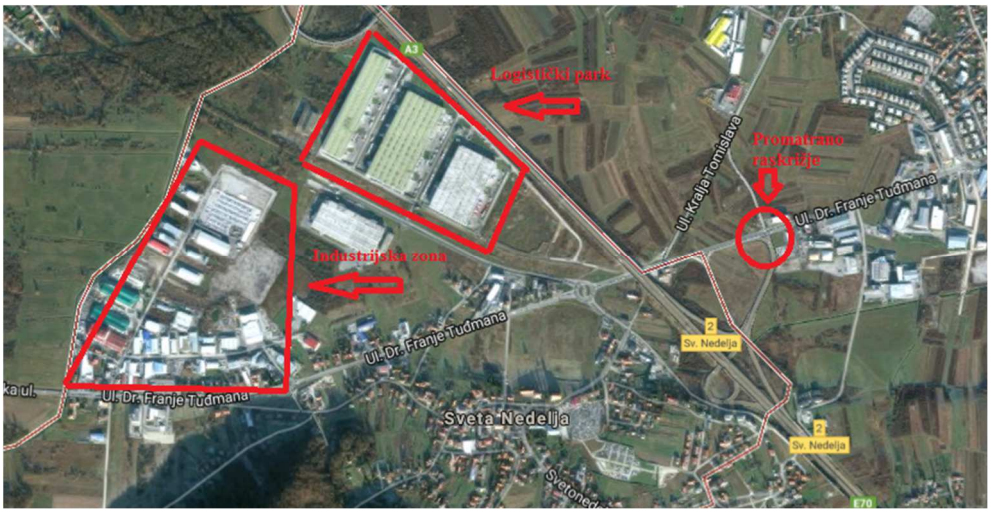
Raskrižje, Ulice Dr. Franje Tuđmana (D231) i spoja na autocestu A3 Bregana – Zagreb – Lipovac nalazi se izvan naseljenog mjesta grada Svete Nedelje te služi za bolje povezivanje područja u i oko grada Samobora putem Svetonedeljske ulice, Ul. Dr. Franje Tuđmana te zapadnog ulaza/izlaza iz Grada Zagreba.

Na slici 34. prikazana je makrolokacija raskrižja.



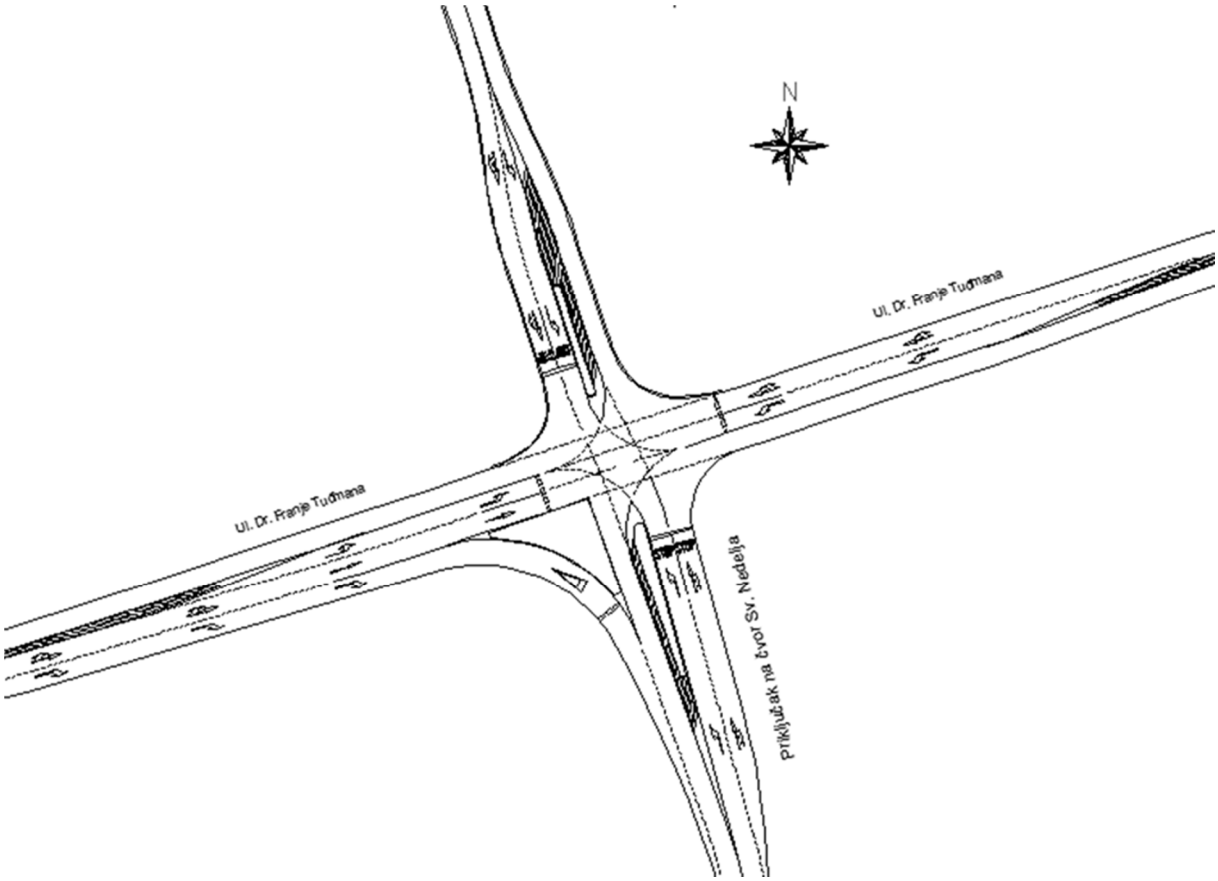
Slika 34. Makrolokacija promatranog raskrižja

U blizini navedenog raskrižja nalaze se brojne industrijske zone, stambene zone te novoizgrađeni logistički park, koje predstavljaju značajni atraktor putovanja ovom području. Mikorolokacija je prikazana slikom 35.



Slika 35. Mikrolokacija promatranog raskrižja

Raskrižje u razini, sastoji se od četiri privoza, od kojih se glavni smjer kretanja vozila proteže od zapada prema jugu i obrnuto. Sporedni privozi nalaze se pod kutevima od 88º i 90º. Raskrižje se ne nalazi u centralnom dijelu Grada pa je koncentracija nemotoriziranog prometa zanemariva. Tlocrt raskrižja prikazan je slikom 32. Iz tlocrta su jasno vidljivi osnovni elementi raskrižja, oblik raskrižja, broj privoza, raspodjela traka, namjena traka i broj traka. Kao što je već navedeno, glavni smjer kretanja vozila je smjer zapad – jug, odnosno jug zapad. I slike 36. vidljivo je da se radi o intenzivnom desnom, odnosno u drugom slučaju o lijevom skretanju.



Slika 36. Tlocrt analiziranog raskrižja

Zapadni privoz (privoz 1) sastoji se od 3 prometne trake, od kojih je svaka za svoj smjer kretanja, (lijevo, ravno, desno) te je traka za desno skretanje odvojena prometnim otokom te njezin tok nije reguliran svjetlosnom prometnom signalizacijom.



Slika 37. Zapadni privoz raskrižja (privoz 1)

Južni privoz (privoz 2), odnosno priključak na autocestu A3, sastoji se od 2 prometne trake od kojih je jedna za lijevo skretanje, a druga za ravno i desno.



Slika 38. Južni privoz raskrižja, priključak na autocestu A3 (privoz 2)

Istočni privoz (privoz 3) sastoji se od 2 prometne trake, posebne trake za lijevo skretanje te zajednička traka za ravno i desno.



Slika 39. Istočni privoz raskrižja (privoz 3)

Sjeverni privoz (privoz 4) se, kao i privoz 3, sastoji od zasebne trake za lijevo skretanje te zajedničke trake za ravno i desno skretanje.



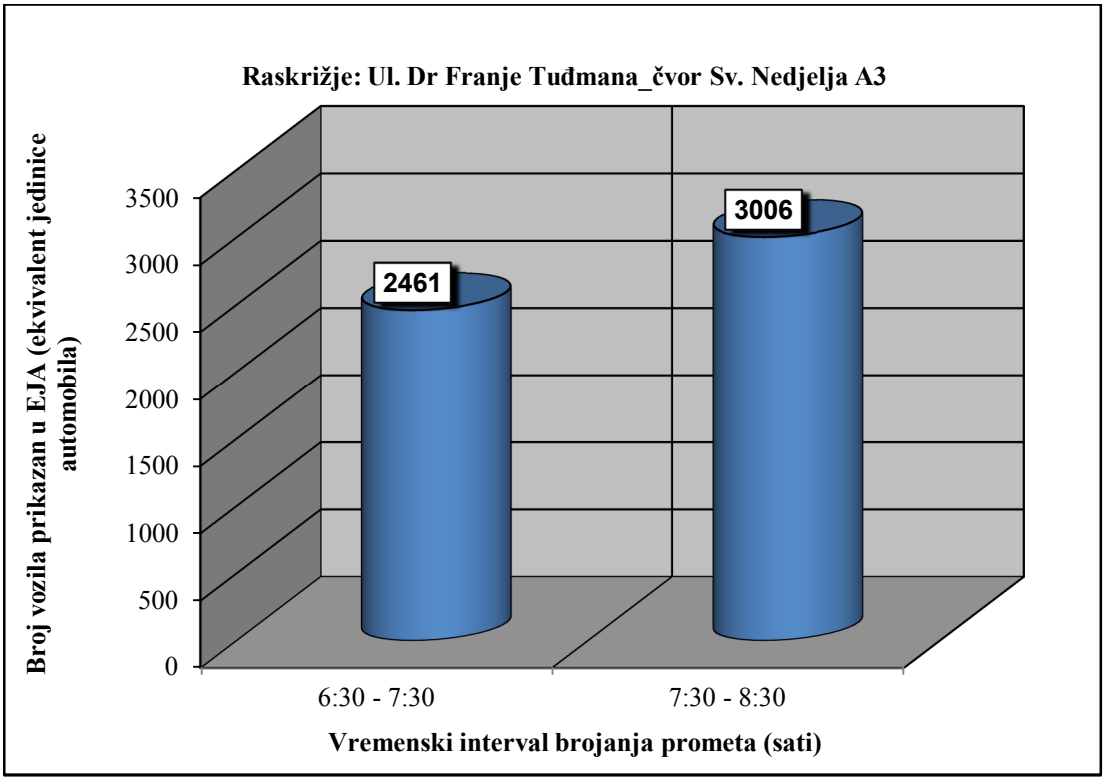
Slika 40. Sjeverni privoz raskrižja (privoz 4)

Za dublju analizu raskrižja potrebno je obaviti terensko snimanje prometa i prikupiti podatke o prometnim tokovima. Brojanje prometa predstavlja jedan od glavnih ulaznih podataka pri prometnom planiranju i projektiranju. Podaci predstavljaju stvarnu sliku dinamike prometnih tokova. Podaci se sastoje od informacija kao što su: prometna opterećenja, struktura toka, brzina kretanja vozila u toku, razmak između vozila, smjerovi kretanja te vršna opterećenja u određenim vremenskim intervalima. Iz takvih podataka dobiva se slika o prometnim zahtjevima, te se na temelju toga mogu odrediti budući prometni pravci, rekonstrukcija prometnice ili napraviti reorganizaciju prometnih tokova [9]. Terensko snimanje prometa izvršeno je u srijedu 8.3.2017. godine u jutarnjem vršnom opterećenju od 6.30 do 8.30 sati.

Podjela i oznake privoza su:

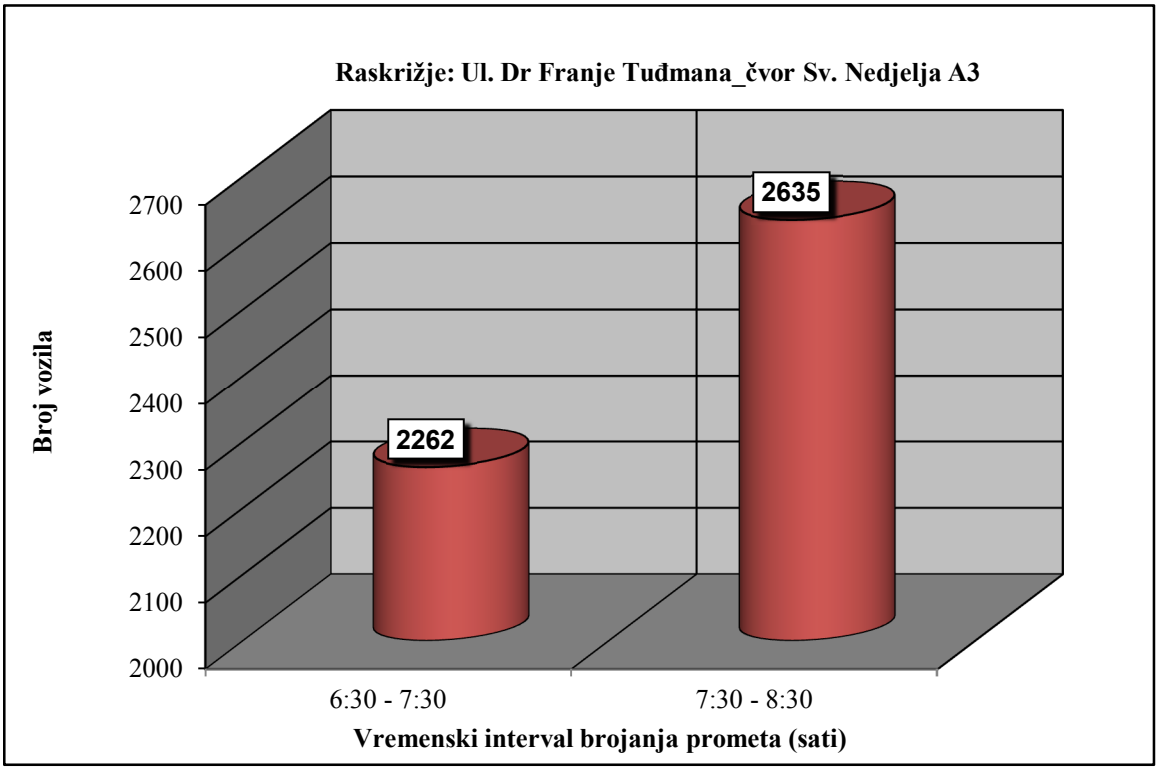
- zapad – privoz 1,
- jug – privoz 2,
- istok – privoz 3,
- sjeverni – privoz 4.

Na grafikonu 1 prikazan je broj vozila u EJA (ekvivalent jedinice automobila) po satima. Vidljivo je da je u vremenskom periodu od 7.30 do 8.30 sati (3006 EJA) zabilježen za 18, 13 % veći promet nego u vremenskom periodu od 6.30 do 7.30 (2461 EJA).



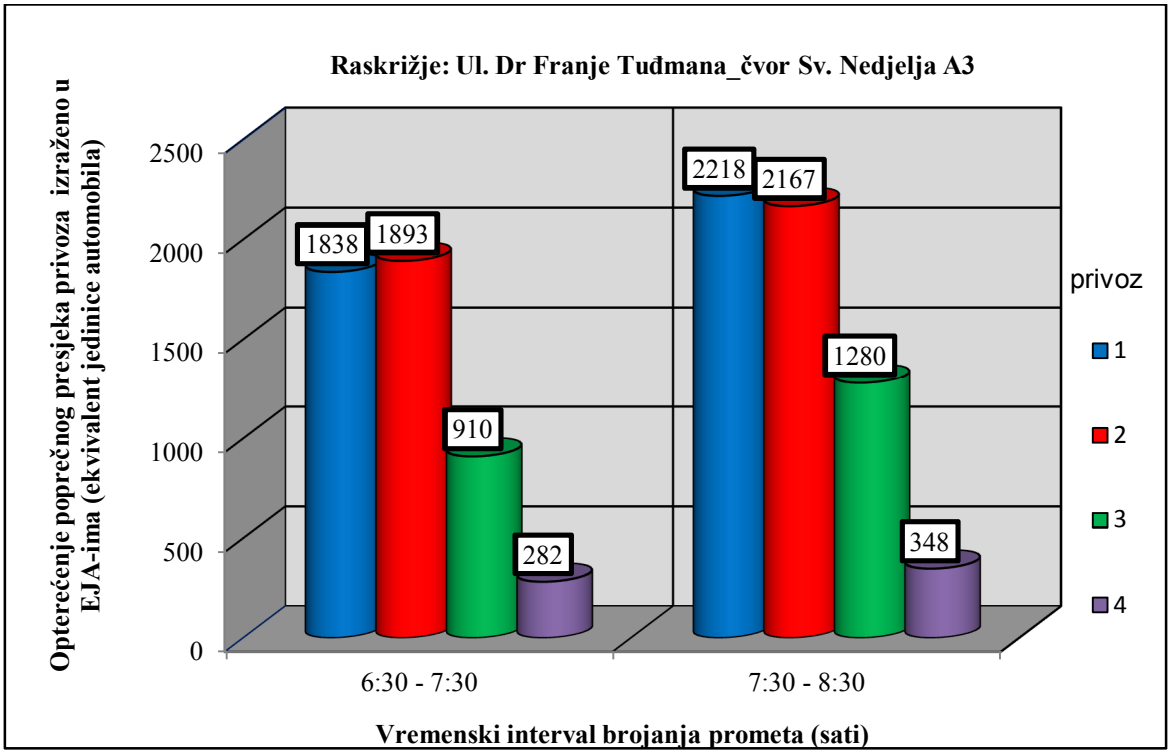
Grafikon 1. Prikaz ukupnog broja vozila u EJA u satu

Na grafikonu 2 prikazan je ukupan broj vozila za oba perioda snimanja prometa. Vidljivo je da je u periodu od 7.30 do 8.30 sati zabilježen za 16.48% (2635 voz/h) veći promet u odnos na raniji period 6.30 do 7.30 gdje je zabilježeno 2262 voz/h. Iz grafikona je vidljivo da je vršni period onaj od 7.30 do 8.30 sati. Prema ovom brojanju može se pretpostaviti prosječni godišnji dnevni promet (PGDP) te iznosi 26.350 voz/dan.



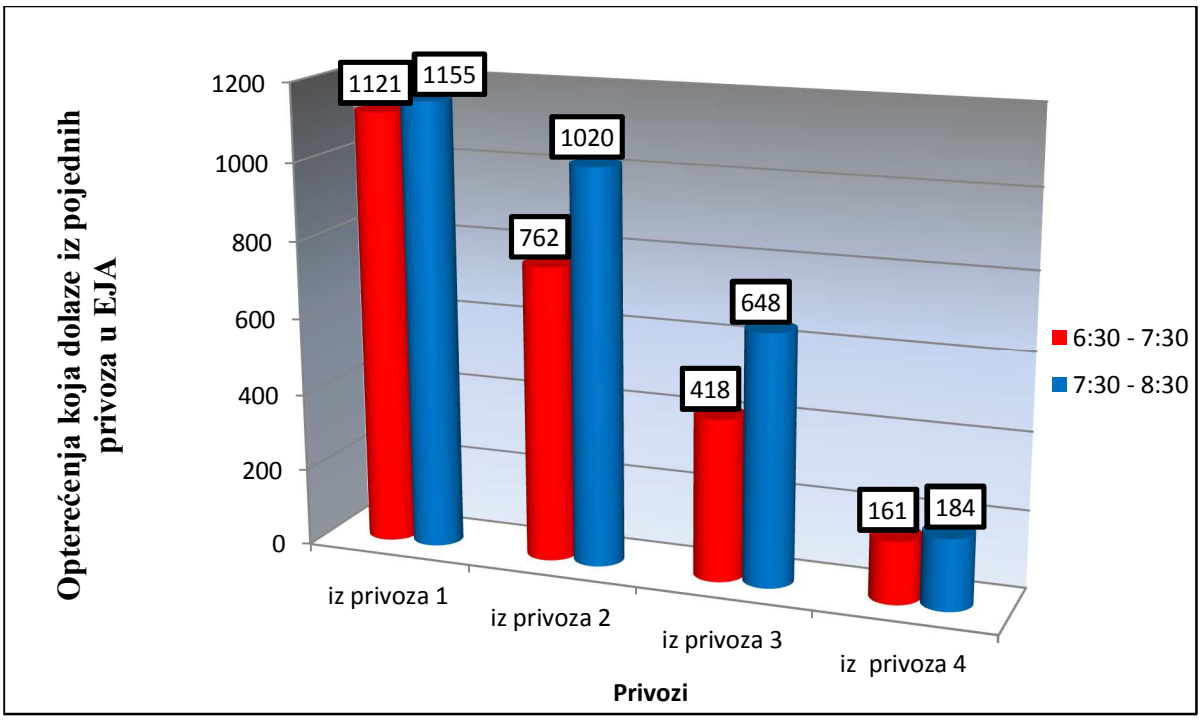
Grafikon 2. Prikaz ukupnog broja vozila po satu

Ukupno opterećenje svakog privoza u EJA po satima prikazano je na grafikonu 3. Zaključivo je da su privozi 1 i 2 najopterećeniji privozi za oba sata brojanja prometa. Vidljivo je da su vrijednosti približno jednake; 1838 EJA/h i 1893 EJA/h za vremenski period od 6.30-7.30 sati, te 2218 EJA/h i 2167 EJA/h za vremenski period od 7.30-8.30 sati.



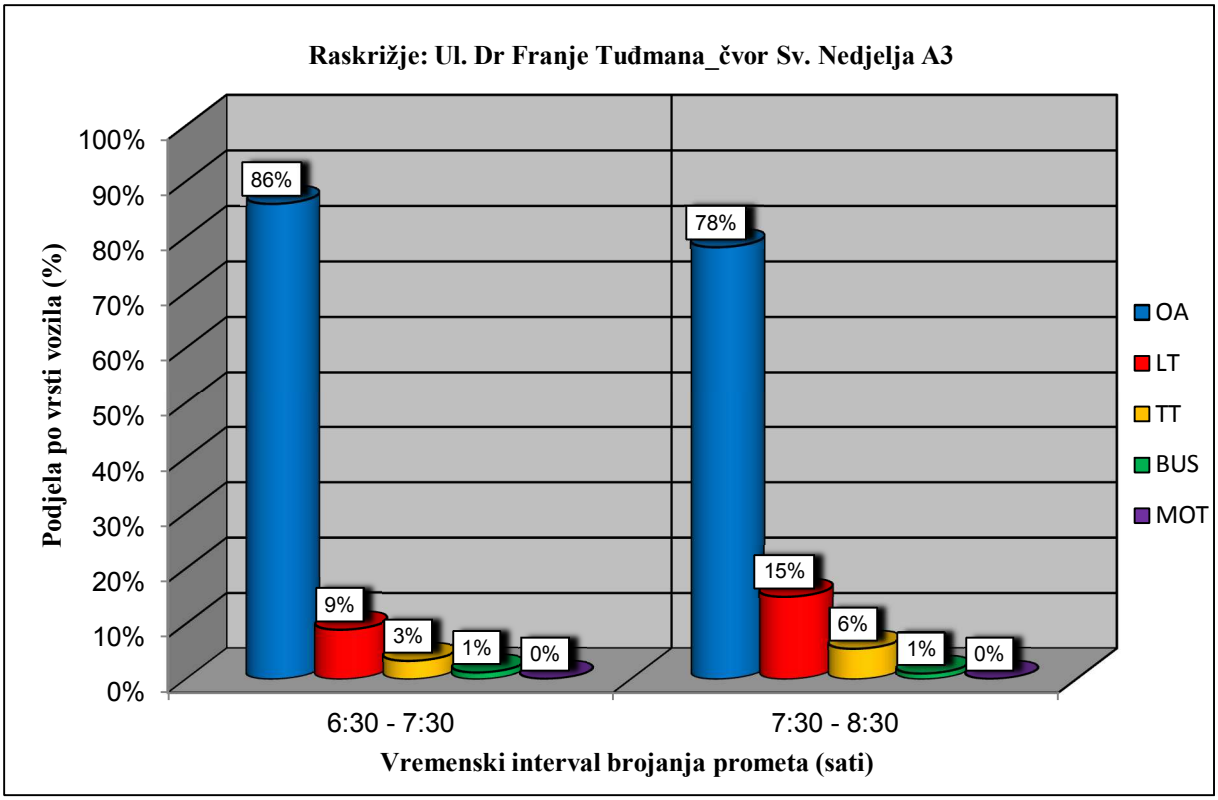
Grafikon 3. Prikaz ukupnog opterećenja svakog privoza

Na grafikonu 4 prikazana su opterećenja koja dolaze iz pojedinih privoza u EJA za oba promatrana perioda. Vidljivo je da je privoz 1 približno jednako opterećen u oba vremenska perioda snimanja prometa sa 1121 EJA od 6.30 do 7.30 sati te 1155 EJA od 7.30 do 8.30 sati. Privoz 2 je za 25,29 % opterećeniji u vremenskom periodu od 7.30 – 8.30 sati, a privoz 3 čak 35,49 % u istom vremenskom periodu promatranja.



Grafikon 4. Opterećenja u EJA za pojedine privoze

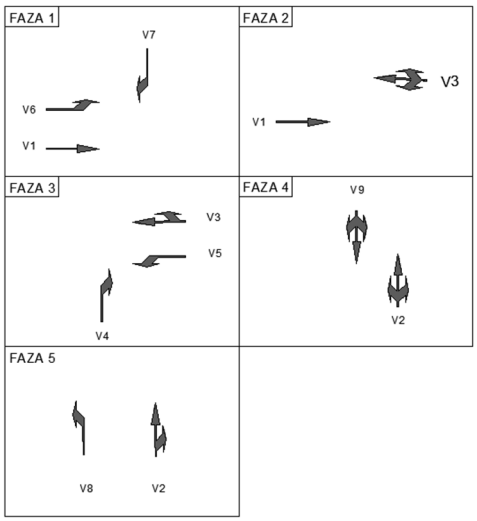
Na grafikonu 5 prikazana je podjela po vrsti vozila za vremenske periode. Iz grafikona se vidi da dominiraju osobna vozila u oba vremenska perioda i to 86 % od 6.30 do 7.30 sati i 78 % u vremenskom intervalu od 7.30 do 8.30 sati. Značajan udio čine i laka teretna vozila kojih u prvom promatranom periodu ima 9 %, a u drugom čak 15 %, slijede teška teretna vozila od 3 %, odnosno 6 %, autobusi od 1 % u oba promatrana perioda. Na raskrižju nisu prisutne pješačke i biciklističke staze stoga je istih zabilježeno tek nekoliko. Vidljivo je da je u vremenskom periodu od 7.30 do 8.30 zabilježen značajan pad osobnih vozila od 8 %, a istovremeno značajan porast lakih teretnih vozila u iznosu od 6 % i teških teretnih vozila u iznosu od 3 %.



Grafikon 5. Podjela prometa po vrsti vozila

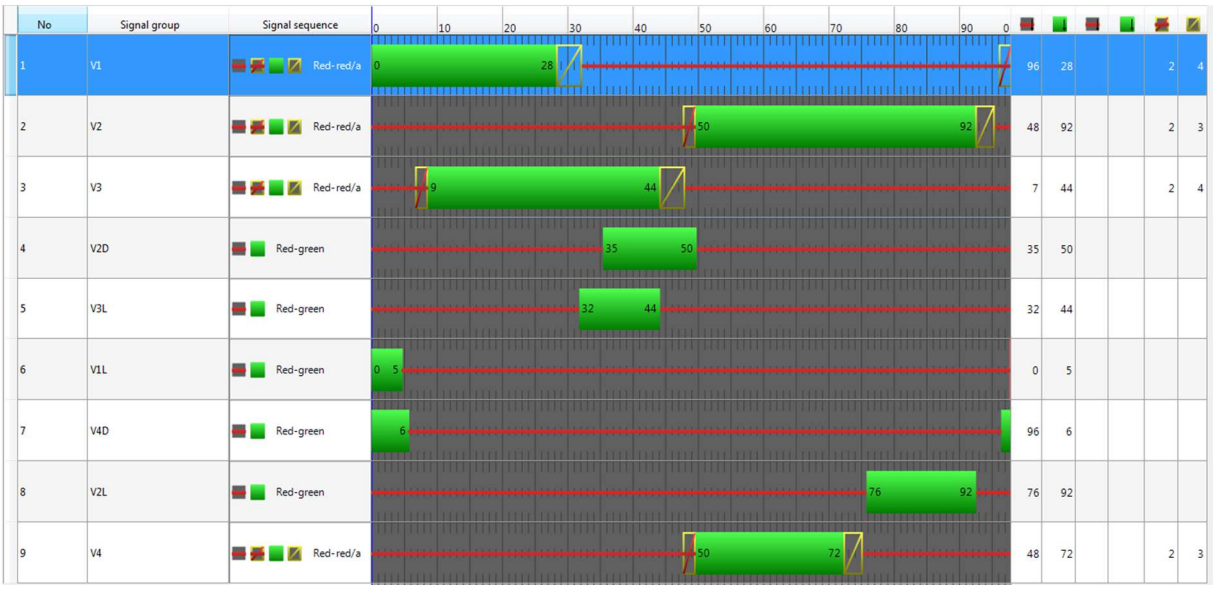
Svakim radnim danom u vremenu od 7.40 do 8:10 ujutro te 15.30 do 16:15 sati policijski službenici putem statičke stanice upravljaju semaforskim uređajem pri čemu su dati prioriteti privozima 1, posebno lijeva skretanja iz privoza 2 i 3. Do 7.29 nema zagušenja prometa na privozima, a nakon tog vremena zabilježeno je značajno povećanje intenziteta prometa na privozima 1, 2, 3, a manje na privozu 4. Značajan rep čekanja stvara se posebno na privozu 2 te duljina iznosi od 200 m do 600 m. U tim trenucima vozila se nalaze na zaustavnom traku autoceste A3 te takva situacija predstavlja značajnu prijetnju sigurnosti prometa.

Promatrano raskrižje upravljano je svjetlosnom prometnom signalizacijom, potpuno ovisno o prometu. Sva kretanja na raskrižju su detektirana, a sve signalne grupe imaju određena minimalna i maksimalna trajanja zelenih vremena. Promet se odvija u pet faza,a trajanje ciklusa iznosi 98 s. Na slici 41 prikazana je raspodjela faza, a na slici 38 postojeći signalni plan.



Slika 41. Raspored signalnih grupa

Iz signalnog plana vidljiva su trajanja zelenih vremena za pojedinu signalnu grupu. U prvoj fazi trajanje zelenog svjetla za signalnu grupu V1 iznosi 9 s, za signalnu grupu V6 5s, a za signalnu grupu V7 6 s. Signalna grupa se nastavlja i u drugoj fazi te maksimalno trajanje zelenog svjetla za tu signalnu grupu iznosi 28 s. U drugoj fazi slobodno kretanje ima i signalna grupa V3. U trećoj fazi se nastavlja slobodno kretanje signalne grupe V3, no slobodan smjer, zbog dopunske strelice, imaju i signalna grupa V5 i V4 u iznosu od 12 s, odnosno 15 s. U četvrtoj fazi slobodno kretanje imaju signalne grupe V2 i V9 u trajanju od maksimalno 22 s. U petoj fazi se nastavlja kretanje signalne grupe V2 te se pali dopunska strelica signalnoj grupi V8 u trajanju od 16s.

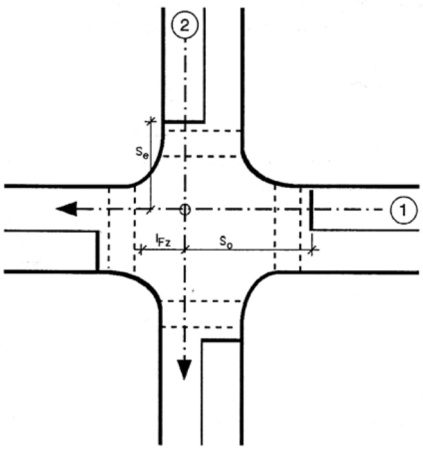


Slika 42. Postojeći signalni plan

Zaštitno međuvrijeme je vremensko razdoblje između završetka propuštanja jednog prometnog toka i početka vremena propuštanja drugog prometnog toka, odnosno to je vrijeme između kraja zelenog svjetla jedne signalne grupe i početka zelenog svjetla druge signalne grupe koja je u koliziji s prethodnom. Ono omogućuje sigurno napuštanje raskrižja vozila koje je ušlo u raskrižje na kraju zelenog vremena u odnosu na vozilo koje će dobiti dozvolu za prolaz [10]. Ova vrijednost predstavlja krucijalnu sigurnosnu komponentu.

Minimalno potrebno međuvrijeme t_z određuje se iz vremena prolaza t_u, vremena napuštanja t_r i vremena ulaza t_e:

$$t_z = t_u + t_r - t_e$$



Slika 43. Primjer za slučaj konflikta, [10]

Mjerodavna međuvremena za određene signalne grupe ujedinjuju se u matricu međuvremena. Za utvrđivanje međuvremena najprije treba odrediti puteve napuštanja i puteve prilaza. Kao referentne linije za utvrđivanje dužine u pravilu se koriste središnje linije voznih ili pješačkih traka uključenih prometnih tokova [10]. Analogno ovime rečeno u tablici je prikazane konačne vrijednosti zaštitnih međuvremena za promatrano raskrižje Ul. Dr. Franje Tuđmana i čvor autoceste A3 Bregana – Zagreb – Lipovac.

Tablica 6. Matrica zaštitnih međuvremena

		NALET								
PRAŽNJENJE		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
	V1		7		7	4			7	7
	V2	6		6		6	6			
	V3		6				4	6	6	6
	V4	3								
	V5	4	6						6	6
	V6		6	4					6	6
	V7			3					3	
	V8	6		6		6	6	4		4
	V9	6		6		6	6		4	

Za tokove vozila promjena sa zelenog na crveno svjetlo zbog voznodinamičkih razloga prikazuje se prijelaznim signalom žuto. Prijelazno vrijeme žuto $t_ž$ određuje se prema dopuštenoj maksimalnoj brzini na prilaznom putu te iz toga slijedi:

$t_ž$ = 3 s pri V = 50 km/h,
$t_ž$ = 4 s pri V = 60 km/h,
$t_ž$ = 5 s pri V = 70 km/h,
$t_ž$ = ** s pri V = > 70 km/h (ovisno o vremenu zaustavljanja pri V_{doz} kod forsiranog kočenja) [10].

Na pojedinačnim prilazima raskrižjima vremena žutoga mogu biti različitog trajanja. Duljina trajanja crveno+žutog svjetla je $t_{cž}$ = 2 s.

5.2. Varijanta 1 – raskrižje s kružnim tokom prometa

Varijanta 1 predlaže izgradnju raskrižja s kružnim tokom prometa. Raskrižje je definirano s četiri privoza, jednim ulaznim i jednim izlaznim trakom, nalazi se izvan naselja, a prema veličini je srednje veliko sa vanjskim promjerom od 54 m. Okvirna propusna moć ovakvog raskrižja je 25.000 voz/dan. Raskrižje je koncipirano s posebno odvojenom desnom trakom na privozu 1 kako vozila ne bi nepotrebno ulazila u raskrižje s kružnim tokom prometa.

Vanjski radijus R_v određen je i iznosi 25m, a ulazni polumjer iznosi 30 m. Mjerodavno vozilo je kamion s prikolicom, a za to vozilo minimalni ulazni polumjer iznosi 20 m. Prema tablici 7 određen je polumjer R_2 u ovisnosti o broju ulaznih i izlaznih trakova, ulaznog i izlaznog radijusa te isti iznosi R_2 = 21,09 m.

Tablica 7. Određivanje polumjera R2 u ovisnosti o R3, R5 i Rv

Broj ulaznih i izlaznih trakova i polumjer R_v		**Polumjer ulaznog radijusa R_3 i izlaznog radijusa R_5**							
1	**2**	**13**	**17**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**
13	**17**	10,05	9,97	9,92	9,82	9,75	9,71	9,68	9,66
15,5	**19,5**	12,50	12,43	12,39	12,30	12,24	12,20	12,17	12,15
16	**20**	12,50	12,43	12,39	12,30	12,24	12,20	12,17	12,15
20	**24**	16,43	16,38	16,35	16,27	16,22	16,19	16,16	16,15
21	**25**	17,41	17,37	17,34	17,27	17,22	17,22	17,16	17,14
24	**27,5**	20,38	20,34	20,11	20,09	20,07	20,06	20,06	20,05
25	**29**	21,37	21,33	21,11	21,09	21,07	21,06	21,06	21,05
30	**34**	26,32	26,29	26,10	26,08	26,07	26,06	26,05	26,05
40	**44**	36,25	36,24	36,08	36,07	36,06	36,05	36,05	36,04
50	**54**	46,21	46,20	46,07	46,06	46,05	46,05	46,04	46,04

Izvor: [10]

Prometni otoci pravokutnog su oblika u svrhu okomizacije privoza, razdvajanja prometnih tokova, smještaj prometnih znakova i smirivanje prometa. Širine su 2,0 m, a duljine 15,0 m. Da bi odredili polumjer ulaznog radijusa R_4 središnjeg otoka, mora se odrediti širina ulaznog traka koja se dobiva iz tablice 5. Oduzimanjem širine ulaznog traka od radijusa R_3 dobije se polumjer ulaznog radijusa.

$R_4 = R_3 – B_u$ [m].

B_u - širina ulaznog privoza [m]

Tablica 8. Određivanje širine ulaznog privoza Bu u ovisnosti o R3

R_3 (m)	Širina ulaznog traka (m)	
	Kamion/Bus	Kamion s prikolicom
13	5,7	Širina ulaznog traka preširoka, potrebna dva traka
15,5	5,3	
17	5,1	
20	4,8	
30	4,4	5,4
40	4,3	4,8
50	4,3	4,5
60	4,3	4,4

Izvor: [10]

Prema tablici 8 određena je širina ulaznog traka i iznosi 5,4 m. Prema formuli polumjer ulaznog radijusa iznosi:

$$R_4 = R_3 - B_u$$
$$R_4 = 30\ m - 5.4\ m = 24,6\ m.$$

Izlazni polumjer R_5 ne smije biti manji od niti jednog ulaznog radijusa R_3, a treba biti jednak ili veći stoga vrijedi da je $R_5 = R_3 = 30m$.

Polumjer R_6 određuje se prema formuli:

$$R_6 = R_5 - B_i\ [m].$$

B_i - širina izlaznog privoza [m]

Širina izlaznog privoza B_i određuje se u ovisnosti o radijusu R_5 što je vidljivo iz tablice 9. Za mjerodavno vozilo, kamion s prikolicom, odabrana je širina izlaznog traka od 5,7 m. Ako se sve vrijednosti uvrste u formulu, dobije se:

$$R_6 = R_5 - B_i$$
$$R_6 = 30\ m - 5,7\ m$$
$$R_6 = 24,3\ m$$

Tablica 9. Određivanje širine izlaznog privoza Bi u ovisnosti o R5

R_5 (m)	Vozilo/širina izlaznog privoza B_i [m]	
	Kamion/bus	Kamion s prikolicom
13,0	5,7	7,9
15,5	5,3	7,4
17,0	5,2	7,1
20,0	4,9	6,7
30,0	4,5	5,7
40,0	4,3	5,2
50,0	4,3	4,8
60,0	4,3	4,7

Izvor: [10]

Nakon što se ucrtaju svi privozi i korigiraju sve radijuse, slijedi ucrtavanje središnjeg kružnog otoka, polumjer središnjeg otoka određuje se prema formuli:

$$R_7 = R_v - B_k$$

B_k - širina kružnog kolnika [m]
R_v - novi vanjski polumjer [m]

Novi vanjski promjer iznosi 27,0 m te je za mjerodavno vozilo prema tablici 10 određena širina kružnog kolnika od 6,6 m stoga je prema ranije definiranoj formuli određen polumjer središnjeg otoka od:

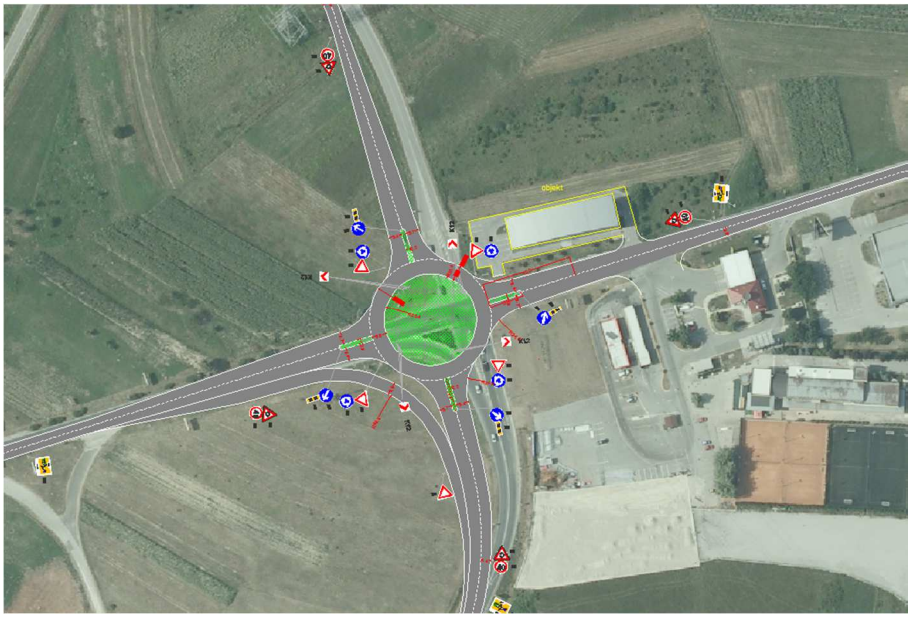
$R_7 = R_v - B_k$
$R_7 = 27,0 - 6,6$
$R_7 = 20,4$ m.

Tablica 10. Određivanje širine kružnog kolnika Bk u ovisnosti o Rv

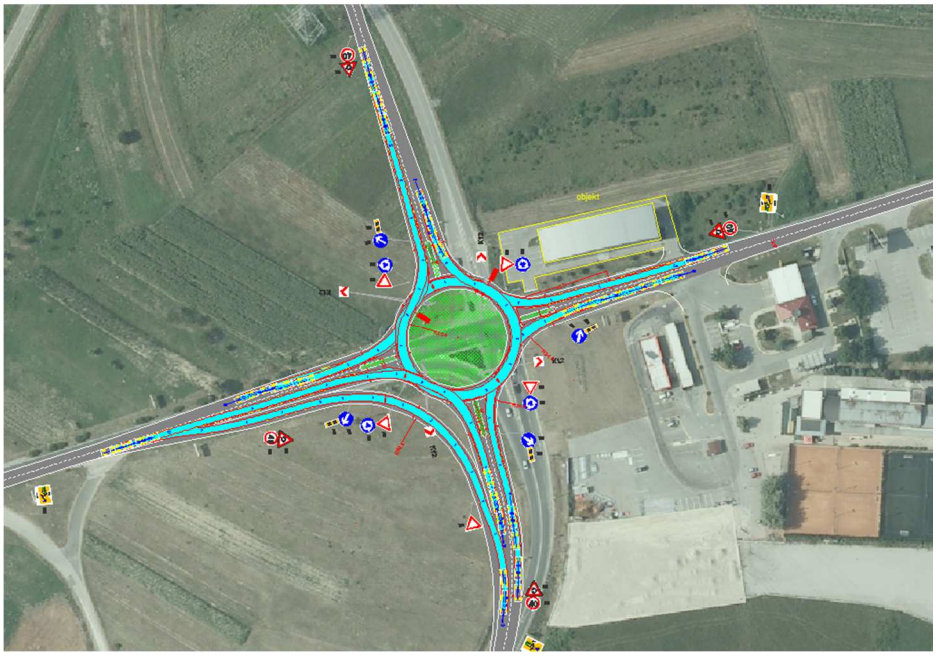
R_v (m)	Vozilo/širina kružnog kolnika B_k (m)	
	Kamion/bus	Kamion s prikolicom
13,0	6,0	9,8 – središnji otok premali za izvangradska područja
15,5	5,5	8,5
16,0	6,0	9,0
20,0	5,5	7,5
25,0	5,2	6,9
30,0	5,0	6,3
40,0	4,7	5,7
50,0	4,6	5,6

Izvor: [10]

Raskrižje s kružnim tokom prometa povoljno je i predlaže se ukoliko se uvjeti vožnje značajno mijenjaju, npr. na završecima brzih cestovnih dionica, na ulazima u urbane sredine te na izlascima s autoceste što je slučaj kod ovog raskrižja. Nedostatak ovog raskrižja s kružnim tokom prometa predstavljaju lijevi skretači iz južnog privoza zbog duljih putovanja i s otežavajućim presijecanjima i preplitanjima no u izvanvršnim opterećenjima povećalo bi sigurnost prometa i osiguralo kontinuitet odvijanja prometa. Na slici 44 prikazano je rješenje raskrižja s kružnim tokom, a na slici 45 provjera trajektorija mjerodavnog vozila.



Slika 44. Varijanta 1 - raskrižje s kružnim tokom prometa



Slika 45. Provjera provoznosti kružnog raskrižja

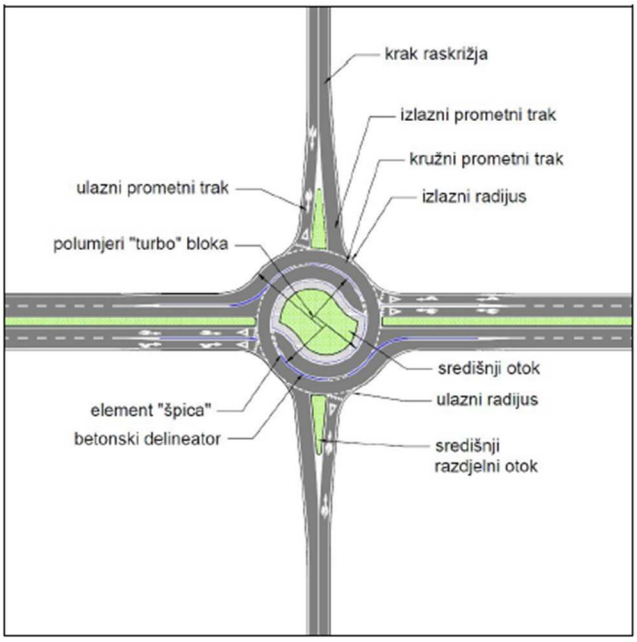
5.3. Varijanta 2 – kružno raskrižje sa spiralnim tokom

Varijanta 2 predlaže izgradnju raskrižja sa spiralnim tokom, odnosno turbo kružnog raskrižja. Turbo kružno raskrižje je kanalizirano dvotračno ili trotračno kružno raskrižje sa spiralnim tokom kružnog kolnika, na kojega se priključuju tri ili četiri priključne ceste, a vozni trakovi su međusobno odvojeni uzdignutim razdjelnim elementima (delineatorima) koji sprječavaju promjenu voznog traka (preplitanje prometnih tokova) na kružnom kolniku [11].

U turbo kružnom raskrižju su prometni tokovi u određenim smjerovima vođeni odvojeno već prije ulaza u kružno raskrižje, odvojeno su vođeni po kružnom kolniku, a isto tako i na izlazu iz turbo kružnog raskrižja. Fizička odvojenost postiže se posebnim projektno tehničkim elementima unutar turbo kružnog raskrižja (uzdignutim rubnjacima - delineatorima), kojima se sprječavaju preplitanja prometnih tokova (promjena voznog traka) unutar kružnog kolnika [11].

Osnovni elementi turbo kružnog raskrižja su:

- delineator u turbo kružnom raskrižju,
- „špica“,
- središnji otok
- središnji razdjelni otok
- razdjelni otoci na ulazu/izlazu iz turbo kružnog raskrižja
- polumjeri turbo kružnog raskrižja
- turbo blok [11]

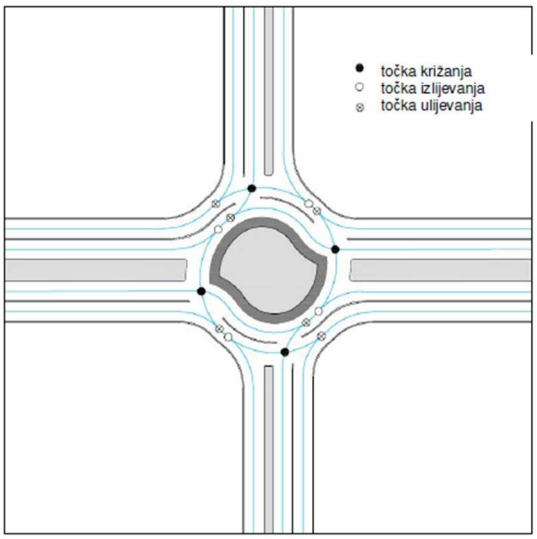


Slika 46. Oznake glavnih elemenata turbo kružnog raskrižja, [11]

Glavna prednost turbo kružnog raskrižja u usporedbi sa standardnim dvotračnim kružnim raskrižjem s dvotračnim ulazima i izlazima je:

- manji broj konfliktnih točaka križanja: što je postignuto smanjenjem broja prometnih tokova koji se križaju
- nepostojanje konfliktnih točaka preplitanja u kružnom kolniku: što je postignuto odvojenim vođenjem nekih prometnih tokova na ulazu u kružno raskrižje, unutar kružnog raskrižja i na izlazu iz kružnog raskrižja [11].

Standardno turbo kružno raskrižje ima samo 14 konfliktnih točaka: 6 ulijevanja, 4 križanja (na ulazima) i 4 izlijevanja. U turbo kružnim raskrižjima nema opasnih konfliktnih točaka križanja na izlazima i preplitanja na kružnom kolniku, stoga je ukupan broj konflikata (s obzirom na obična dvotračna kružna raskrižja) manji. To je glavni razlog za to da su turbo kružna raskrižja prometno sigurnija od običnih dvotračnih kružnih raskrižja [11].



Slika 47. Konfliktne točke u turbo kružnom raskrižju s dvotračnim ulazima, [11]

Turbo kružna raskrižja su prihvatljiva rješenja na lokacijama izvan naselja i u prijelaznim područjima na kojima nema ili se očekuje samo manji broj nemotoriziranih sudionika u prometu [11].

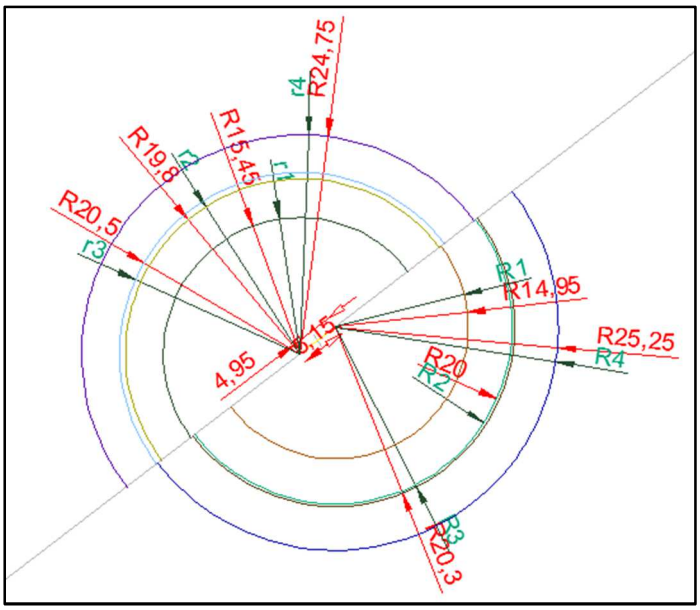
Turbo kružno raskrižje ima više polumjera koji formiraju „turbo blok“. To je blok ili skup svih potrebnih polumjera koje je potrebno na određeni način zarotirati i na taj način definirati trajektorije kretanja ili vozne linije. U tablici 11 prikazani su elementi turbo kružnog raskrižja ovisno o njegovoj veličini. Za potrebe izrade ovog varijantnog rješenja odabrano je srednje veliko turbo kružno raskrižje prikazano (istaknuto) u tablici.

Tablica 11. Dimenzije turbo kružnog raskrižja ovisno o njegovoj veličini

ELEMENTI TURBO KRUŽNOG RASKRIŽJA				
Element	Mini	Standardno	**Srednje veliko**	Veliko
R1	10,45	12,00	**14,95**	19,95 (21,70)
R2	15,85	17,15	**20,00**	24,9 (27,10)
R3	16,15	17,45	**20,30**	25,20 (27,40)
R4	21,20	22,45	**25,25**	29,95 (32,80)
r1	10,95	12,50	**15,45**	20,45
r2	15,65	16,95	**19,80**	24,70
r3	16,35	17,65	**20,50**	25,40
r4	20,70	21,95	**24,75**	29,45
Bv	5,05	5,00	**4,95**	4,75 (5,40)
Bu	5,40	5,15	**5,05**	4,95 (5,40)
bv	4,35	4,30	**4,25**	4,05
bu	4,70	4,45	**4,35**	4,25
Dv	5,75	5,30	**5,15**	5,15 (5,50)
Du	5,05	5,00	**4,95**	4,75 (5,50)

Izvor: [11]

Prema dimenzijama navedenim u tablici konstruiran je „turbo blok“ koji je prikazan na sljedećoj slici.



Slika 48. Polumjeri srednje velikog turbo kružnog raskrižja

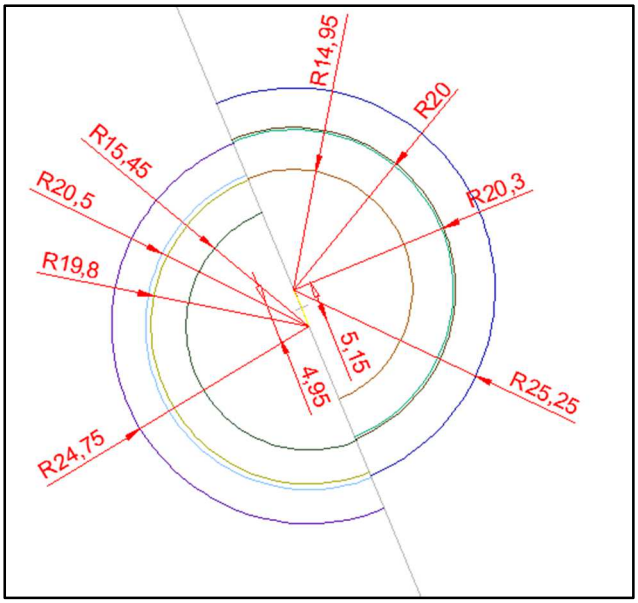
Širina asfaltne površine unutrašnjeg kružnog voznog traka je Bu = 5,05 m, a vanjskog Bv = 4,95 m. Širine između rubnih crta su bu = 4,35 m i bv = 4,25 m.

Udaljenost između vanjskih točaka translacijske osovine je Dv = 5,15 m, a između unutrašnjih točaka Du = 4,95 m [11]

Polumjeri ulaznih i izlaznih krivina odabiru se u ovisnosti o veličini turbo kružnog raskrižja, mjerodavnog vozila i željene brzine vožnje kroz turbo kružno raskrižje. Za ovo

varijantno rješenje, odabrano je srednje veliko turbo kružno raskrižje stoga polumjeri ulaznih i izlaznih krivina iznose $R_u = R_i = 20$m.

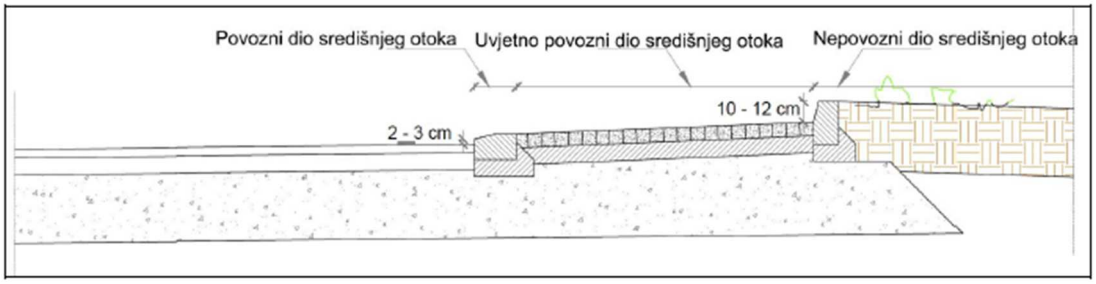
Prilikom postavljanja turbo bloka i translacijske osovine preporuča se da su osovine priključnih cesta pod pravim kutom i jednoliko raspoređene na četiri kvadranta te da se položaj translacijske osovine postavi u položaj kad kazaljke na satu pokazuju „pet do pet“ (slika 45) kod četverokrakih, odnosno „osam i deset“ kod trokrakih koljenastih turbo kružnih raskrižja [11].



Slika 49. Preporučen položaj translacijske osovine, "pet do pet"

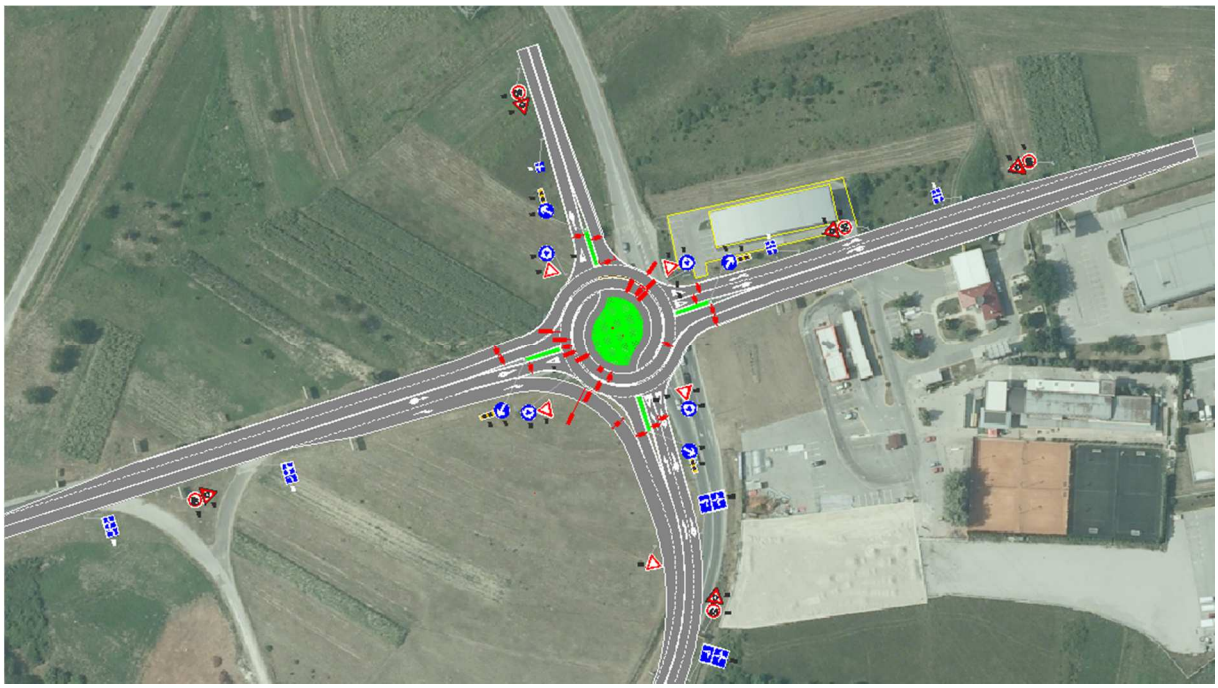
Središnji razdjelni otoci pozitivno utječu na sigurnost i protočnost raskrižja te oni imaju funkciju usmjeravanja vozila na ulazu u turbo kružno raskrižje. Odabran je središnji razdjelni otok kapljastog oblika, širine 2,0 m i dužine 15,0 m zato što nema prisutnosti nemotoriziranih sudionika u prometu [11].

Središnji otok turbo kružnog raskrižja sastavljen je od tri dijela: povoznog dijela, uvjetno povoznog dijela i nepovoznog dijela. Povozni dio središnjeg otoka predstavlja rubnjak od betonskih elemenata, koji čine prijelaz s kružnog prometnog traka na uvjetno povozan dio središnjeg otoka. Uvjetno povozni dio ima dvije uloge, za zaustavljanje vozila u nužnim slučajevima te za zaustavljanje intervencijskih vozila. Izveden je u širini 2,0 – 2,5 m i u nagibu 4 – 7 % prema vanjskom rubu turbo kružnog raskrižja [11].

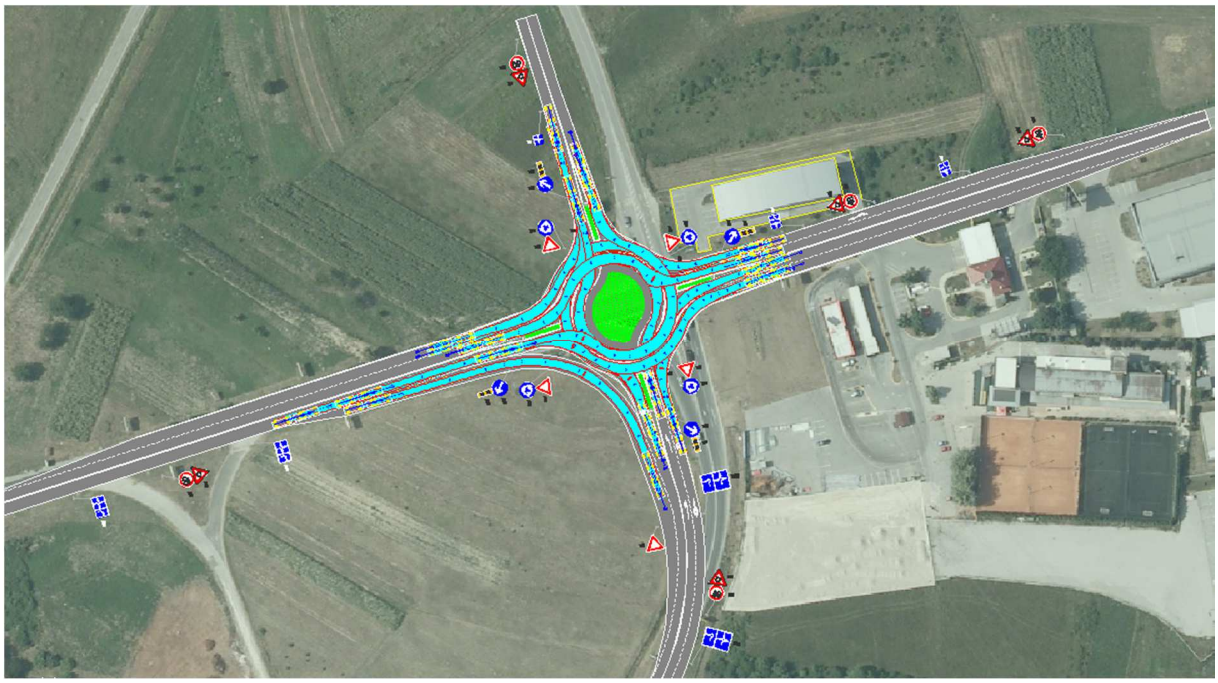


Slika 50. Dijelovi središnjeg otoka turbo kružnog raskrižja, [11]

Prema navedenim Smjernicama [11] izrađeno je varijantno rješenje turbo kružnog raskrižja prikazanog na slici 51, a na slici 52 prikazane su provoznosti mjerodavnog vozila na turbo kružnom raskrižju.



Slika 51. Varijanta 2 - turbo kružno raskrižje



Slika 52. Provjera provoznosti turbo kružnog raskrižja

6. EVALUACIJA I IZBOR OPTIMALNOG VARIJANTNOG RJEŠENJA ODABRANOG RASKRIŽJA

Za evaluaciju modela koristio se mikro – simulacijski alat PTV VISSIM 9. Razvijanjem modela dobili su se detaljni podaci o prometnom toku na spomenutim varijantnim rješenjima. Prilikom razvoja modela potrebno je definirati simulacijske parametre kako bi rezultati koji se dobiju što vjernije prikazivali stanje koje bi se postiglo na terenu. Potrebno je definirati period, odnosno trajanje simulacije. Preporučljivo je definirati duže trajanje simulacije (900 s), zbog punjenja mreže vozilima i zagrijavanje simulacije. Slijedeći bitan atribut koji je potrebno definirati je „simulation resolution“. Ovaj atribut označava koliko puta će se izračunavati pozicija vozila u jednoj simulacijskoj sekundi. Navedeni faktor značajno utječe na ponašanje vozila. Mijenjanjem ovog faktora moguće je dobiti različite izlazne rezultate simulacije. Vrijednosti se kreću od 1-20. Vrijednosti manje od 5 dovode do neopreznih manevara vozila i nekulturnog ponašanja vozača, vrijednosti između 5-10 dovode do realnije simulacije te su i izlazni podaci najbliže realnima, a vrijednosti od 10-20 dovode do „glatkih“ pokreta, a ona su pogodna za simulacije u visokoj razlučivosti. Preporučljivo je da se broj pokrenutih simulacija kreće između 5 – 20.

U tablici 12 prikazani su rezultati simulacije. Najveći prosječan rep čekanja zabilježen je na privozu 2 i iznosi 354,4 m, a najveći izmjeren na tom privozu čak 509,4 m. Na istom privozu zabilježeni su još značajni repovi čekanja od 269,1 m. Ovakvi repovi čekanja predstavljaju sigurnosni problem zbog toga što vozila koriste zaustavni trak autoceste A3 Bregana – Zagreb – Lipovac kako bi čekali na prolazak raskrižjem. Prosječno vrijeme kašnjenja na tom privozu iznosi 54,6 s, što odgovara razini usluge D. Najmanje prosječno vrijeme kašnjenja iznosi 8,0 s, a zabilježeno je na posebno odvojenoj traci za desne skretače privoza 1. Za napomenuti je da ono nije upravljano svjetlosnom signalizacijom. Najveća razina emisija štetnih plinova zabilježena je na privozu 2. Posljedica toga je značajan priljev vozila i značajan rep čekanja vozila. Na privozu 3 najveće kašnjenje vozila iznosi 33,0 s, a najmanje 26,1 s. Prosječno vrijeme kašnjenja cijelog raskrižja iznosi 33,9 s, a to odgovara razini usluge C.

Tablica 12. Prikaz rezultata simulacije postojećeg stanja

Smjer kretanja vozila		Prosječan rep čekanja [m]	Razina usluge	Prosječno vrijeme kašnjenja [s]	Prosječan broj zaustavljanja	Emisije CO (ugljikov monoksid)	Potrošnja goriva
W-E	Privoz 1 - Privoz 3	17,5	LOS_C	29,7	0,8	378,4	5,4
W-NW	Privoz 1 - Privoz 4	7,6	LOS_F	89,8	1,4	123,4	1,8
W-SE	Privoz 1 - Privoz 2	9,6	LOS_A	8,0	0,5	469,6	6,7
S-W	Privoz 2 - Privoz 1	354,4	LOS_D	54,6	1,9	1096,4	15,7
S-E	Privoz 2 - Privoz 3	269,1	LOS_D	43,5	1,5	361,0	5,2
S-NW	Privoz 2 - Privoz 4	269,1	LOS_D	46,6	1,6	121,0	1,7
E-NW	Privoz 3 - Privoz 4	19,0	LOS_C	26,3	0,8	18,7	0,3
E-W	Privoz 3 - Privoz 1	19,3	LOS_C	26,1	0,7	395,8	5,7
E-S	Privoz 3 - Privoz 2	10,5	LOS_C	33,0	1,3	305,7	4,4
N-S	Privoz 4 - Privoz 2	4,4	LOS_C	19,7	0,7	141,5	2,0
N-W	Privoz 4 - Privoz 1	4,3	LOS_B	11,3	0,6	1,8	0,0
N-E	Privoz 4 - Privoz 3	0,4	LOS_B	18,2	0,7	18,5	0,3
PROSJEK		82,1	LOS_C	33,9	1,0	286,0	4,1

Iz simulacije raskrižja, u tablici 13 prikazani su rezultati razvijenog modela varijantnog rješenja 1 – raskrižja s kružnim tokom prometa. U tablici su redom prikazani slijedeći rezultati:

- smjer kretanja vozila,
- prosječan rep čekanja,
- razina usluge,
- prosječno vrijeme kašnjenja,
- prosječan broj zaustavljanja,
- emisije ugljikovog monoksida,
- potrošnja goriva.

Iz tablice 13 je vidljivo da najveći prosječni rep čekanja iznosi 166,0 m te se on nalazi na privozu 3. Posljedica toga su brojni lijevi skretači koji ulaze u kružno raskrižje s privoza 2, a koji onemogućuju ulaz vozila sa privoza 3. Najmanji prosječni rep čekanja zabilježen je na privozu 1, posljedica toga je posebna prometna traka za desne skretače koja je odvojena te tok ne ulazi u kružno raskrižje, a iznosi 4,8 m. Iz tablice su vidljiva prosječna vremena kašnjenja, najveće prosječno vrijeme kašnjenja iznosi 267,2 s, a zabilježeno je na privozu 4. Ova vrijednost odgovara razini usluge F. Na privozu 3 prosječno kašnjenje iznosi 91,7 s (razina usluge F), na privozu 2 48,0 s (razina usluge E), a na privozu 1 18,4 s (razina usluge C). Prosječno vrijeme kašnjenja od 9,6 s zabilježeno je na posebno odvojenoj traci za desne skretače privoza 1 što odgovara razini usluge A. Iz navedenih podataka zaključivo je da je razina usluge cijelog raskrižja neodrživa za odvijanje normalnog prometnog toka te ona iznosi F. Nakon razvijanja modela i analize dobivenih rezultata može se zaključiti da raskrižje s kružnim tokom prometa, neovisno što postoji posebna traka za desne skretače, nije primjereno rješenje za postojeći problem.

Tablica 13. Prikaz rezultata simulacije raskrižja s kružnim tokom prometa

Smjer kretanja vozila		**Prosječni rep čekanja [m]**	**Razina usluge**	**Prosječno vrijeme kašnjenja [s]**	**Prosječan broj zaustavljanja**	**Emisije CO (ugljikov monoksid) [gram]**	**Potrošnja goriva [gallon]**
S-E	Privoz 2 - Privoz 3	135,4	LOS_E	47,4	4,0	443,3	6,3
S-N	Privoz 2 - Privoz 4	135,4	LOS_E	47,8	4,0	137,8	2,0
S-W	Privoz 2 - Privoz 1	135,4	LOS_E	48,0	3,9	1148,4	16,4
E-S	Privoz 3 - Privoz 2	166,0	LOS_F	90,5	7,5	705,2	10,1
E-N	Privoz 3 - Privoz 4	166,0	LOS_F	91,7	7,8	44,3	0,6
E-W	Privoz 3 - Privoz 1	166,0	LOS_F	90,3	7,5	1203,4	17,2
N-S	Privoz 4 - Privoz 2	82,6	LOS_F	244,5	9,7	836,4	12,0
N-E	Privoz 4 - Privoz 3	82,6	LOS_F	267,2	10,9	131,8	1,9
N-W	Privoz 4 - Privoz 1	82,6	LOS_F	232,1	8,9	8,5	0,1
W-S	Privoz 1 - Privoz 2	0,0	LOS_A	9,6	0,3	411,8	5,9
W-S	Privoz 1 - Privoz 2	4,8	LOS_C	18,4	1,5	54,5	0,8
W-E	Privoz 1 - Privoz 3	4,8	LOS_C	17,9	1,3	371,8	5,3
W-N	Privoz 1 - Privoz 4	4,8	LOS_C	17,9	1,2	70,5	1,0
PROSJEK		89,7	LOS_F	94,1	5,3	428,3	6,1

Kao i u prethodnim primjerima, za razvoj modela varijantnog rješenja 2 – raskrižja sa spiralnim tokom prometa, koristio se mikrosimulacijski alat PTV Vissim 9. Iz tablice 14 vidljivi su izlazni rezultati modela. U tablici su redom prikazani sljedeći rezultati:

- smjer kretanja vozila,
- prosječan rep čekanja,
- razina usluge,
- prosječno vrijeme kašnjenja,
- prosječan broj zaustavljanja,
- emisije ugljikovog monoksida,
- potrošnja goriva.

Vidljivo je da najveći prosječan rep čekanja iznosi 18,2 m te se nalazi na privozu 2. Treba napomenuti da se u ovom slučaju radi o repu čekanja na unutarnjoj kružnoj traci lijevog skretanja. Najmanji rep čekanja zabilježen je na posebno odvojenoj traci za desne skretače na privozu 1 i iznosi 4,0 m. Iz tablice su vidljiva i prosječna vremena kašnjenja, najmanje vrijeme kašnjenja iznosi 4,7 s (razina usluge A), a zabilježeno je na privozu 3. Za napomenuti je da se vozila kreću po vanjskoj traci kružnog kolnika. Pošto se vozila privoza 3 mogu kretati i po vanjskoj traci i po unutarnjoj prilikom obavljanja manevra, time utječu na prometni tok privoza 4. Na tom privozu zabilježeno je prosječno vrijeme čekanja od 95,0 s te isto predstavlja najveće kašnjenje na cijelom raskrižju. Ova vrijednost odgovara razini usluge F.

Na privozu 1 najveće kašnjenje iznosi 8,9 s (razina usluge A), a najmanje 5,9 s (razina usluge A). Zaključivo je, prema ovim vrijednostima da se prometni tok odvija bez većih smetnji. Na privozu 2 najmanje kašnjenje zabilježeno je na unutarnjoj traci kružnog kolnika za lijeve skretače i iznosi 5,3 s (razina usluge A).

Prosječni rep čekanja za cijelo raskrižje iznosi 11,8 m, a prosječno vrijeme kašnjenja iznosi 19,0. Ova vrijednost odgovara razini usluge B. Prosječan broj zaustavljanja vozila na cijelom raskrižju iznosi 1,2 puta te se iz ove vrijednosti može zaključiti da se promet na raskrižju odvija kontinuirano i bez većih i duljih čekanja, a što rezultira manjom potrošnjom goriva te manjim ispuštanjem emisija štetnih plinova, a time se pridonosi očuvanju okoliša.

Tablica 14. Prikaz rezultata simulacije raskrižja sa spiralnim tokom prometa

Smjer kretanja vozila			Prosječan rep čekanja [m]	Razina usluge	Prosječno vrijeme kašnjenja [s]	Prosječan broj zaustavljanja	Emisije CO (ugljikov monoksid)	Potrošnja goriva
W-S	unutarnja traka	Privoz 1 - Privoz 2	6,3	LOS_A	8,2	0,6	35,5	0,5
W-E	unutarnja traka	Privoz 1 - Privoz 3	6,2	LOS_A	8,2	0,5	108,9	1,6
W-N	vanjska traka	Privoz 1 - Privoz 4	6,2	LOS_A	6,9	0,4	36,7	0,5
W-E	vanjska traka	Privoz 1 - Privoz 3	6,3	LOS_A	8,9	0,6	129,0	1,8
W-SE	posebna traka	Privoz 1 - Privoz 2	4,0	LOS_A	5,9	0,4	362,1	5,2
S-E	unutarnja traka	Privoz 2 - Privoz 3	17,0	LOS_B	13,8	1,0	51,8	0,7
S-N	vanjska traka	Privoz 2 - Privoz 4	17,0	LOS_B	12,7	0,9	65,5	0,9
S-E	vanjska traka	Privoz 2 - Privoz 3	17,4	LOS_B	12,1	0,8	148,9	2,1
S-W	unutarnja traka	Privoz 2 - Privoz 1	18,2	LOS_A	5,3	0,3	204,5	2,9
S-W	vanjska traka	Privoz 2 - Privoz 1	17,0	LOS_B	13,2	1,0	319,7	4,6
E-S	vanjska traka	Privoz 3 - Privoz 2	12,8	LOS_C	16,3	1,3	238,6	3,4
E-N	vanjska traka	Privoz 3 - Privoz 4	12,3	LOS_A	5,2	0,3	7,6	0,1
E-W	unutarnja traka	Privoz 3 - Privoz 1	12,8	LOS_C	16,5	1,3	188,2	2,7
E-W	vanjska traka	Privoz 3 - Privoz 1	12,3	LOS_A	4,7	0,4	128,9	1,8
N-S	vanjska traka	Privoz 4 - Privoz 2	11,8	LOS_E	40,6	2,4	235,6	3,4
N-E	unutarnja traka	Privoz 4 - Privoz 3	11,6	LOS_D	30,8	1,7	11,9	0,2
N-E	vanjska traka	Privoz 4 - Privoz 3	11,8	LOS_E	43,7	2,7	20,8	0,3
N-W	unutarnja traka	Privoz 4 - Privoz 1	11,8	LOS_F	95,0	5,3	1,4	0,0
N-W	vanjska traka	Privoz 4 - Privoz 1	11,0	LOS_B	12,2	0,9	0,9	0,0
PROSJEK			11,8	LOS_B	19,0	1,2	120,9	1,7

Analizom postojećeg stanja i evaluacijom dobili su se podaci o prometnim tokovima, vidljivo je da je razina usluge spomenutog raskrižja C. Problemi nastaju na privozu 2 zbog povećane potražnje vozila, nastaju značajni repovi čekanja od čak 500 m. Takvo stanje predstavlja prijetnju sigurnosti prometa.

Evaluacijom varijante 1 – raskrižja s kružnim tokom prometa vidljivo je da ovakvo rješenje ne pridonosi rješavanju problema na spomenutom raskrižju.

Evaluacijom varijante 2 – raskrižje sa spiralnim tokom prometa vidljivo je da se razina usluge dovela u bolje stanje, smanjili su se značajni repovi čekanja na privozu 2, te se tako i povećala sigurnost svih sudionika u prometu.

Kao izbor optimalnog varijantnog rješenja analiziranog raskrižja odabrana je varijanta 2 – raskrižje sa spiralnim tokom prometa, odnosno turbo kružno raskrižje.

7. ZAKLJUČAK

Sveta Nedelja je grad u Zagrebačkoj županiji, nalazi se 6 km istočno od grada Samobora i 15 km zapadno od grada Zagreba. U neposrednoj blizini grada nalaze se dvije prometnice značajne za grad Samobor, grad Svetu Nedelju, ali i okolna naselja spomenutih gradova, a to su autocesta A3 Bregana – Zagreb – Lipovac i državna cesta D231 Bregana – Čvor Sveta Nedjelja. Razvojem grada Sveta Nedelja, izgradnjom industrijske zone, izgradnjom logističkog parka te izgradnjom stambene zone raskrižje Ulice Dr. Franje Tuđmana i spoja na čvor Sveta Nedelje spomenute autoceste postalo je značajan atraktor za ovo područje. Povećanje prometne potražnje na ovom raskrižju dovelo je do neodrživog stanja u prometu što za posljedicu ima značajne repove čekanja, smanjenje propusne moći, povećanje kašnjenja vozila, značajne eksterne učinke u prometu te smanjenje sigurnosti u prometu. Kašnjenja u prometu često imaju i negativne učinke na pojedince, zaposlenici kasne na posao što rezultira umorom i dekoncentracijom, a na kraju i smanjenom dobiti.

Raskrižje je upravljano svjetlosnom prometnom signalizacijom, adaptivnim načinom te se promet odvija u pet faza. Analizom brojanja prometa u vremenskom razdoblju od 6.30 do 8.30 sati, dobili su se podaci o trenutačnoj dinamici odvijanja postojećih tokova na spomenutom raskrižju. Brojanjem prometa dobili su se podaci o prometnom opterećenju pojedinih privoza, brzinama toka, klasifikaciji prometnog toka i sl. Brojanjem prometa određen je glavni tok u smjerovima zapad – jug i obrnuto. Vidljivo je da dominiraju osobna vozila i laka teretna vozila. Raskrižje se nalazi izvan naseljenog mjesta stoga je nemotoriziran promet zanemariv.

Kao varijanta 1 predložena je rekonstrukcija raskrižja u raskrižje sa kružnim tokom prometa s odvojenim desnim trakom na privozu 1. Simulacijom i evaluacijom navedenog rješenja dobili su se podaci o odvijanju tokova na takvom raskrižju te se može zaključiti da varijanta 1 ne pridonosi poboljšanju i rasterećenju prometa.

Varijanta 2 predlaže rekonstrukciju raskrižja u raskrižje sa spiralnim tokom prometa, odnosno turbo kružno raskrižje. Ovakva raskrižja relativno su nov način vođenja prometnih tokova u Hrvatskoj, dok je u Nizozemskoj tendencija da se sva dvotračna raskrižja prenamjene u turbo kružna raskrižja. Istraživanja su pokazala da turbo kružna raskrižja imaju manje konfliktnih točaka od dvotračnih kružnih raskrižja, a time su i sigurnija. Kapaciteti ovih raskrižja kreću se od 2800 voz/h do 3500 voz/h ovisno o njihovoj veličini. U zoni promatranog raskrižja nalazi se poslovni prostor te bi zbog tog objekta trebalo napraviti pomak turbo kružnog raskrižja. Zona obuhvata se ne nalazi u naseljenom mjestu pa je ovakvo rješenje prihvatljivo. Simulacijom varijante 2 dobili su se detaljni podaci o prometnim tokovima na turbo kružnom raskrižju. Izgradnjom turbo kružnog raskrižja smanjili bi se svi negativni učinci koje stvara neodrživo stanje u prometu, povećala bi se razina usluge odvijanja prometnih tokova, smanjili bi se repovi čekanja, kašnjenja vozila, a povećala bi se i sigurnost svih sudionika u prometu pošto vozači više nebi koristili zaustavnu traku čekajući za prolazak raskrižjem.

LITERATURA

[1] Legac, I.: *Raskrižja javnih cesta / Cestovne prometnice II*, Fakultet prometnih znanosti Zagreb, Zagreb 2008.

[2] Pilko, H: *Raskrižja s kružnim tokom prometa – Cestovne prometnice II, autorizirana predavanja*, Fakultet prometnih znanosti Zagreb, akademska godina 2015./2016.

[3] Transport for London, *Traffic Modelling Guidelines,*version 3*,* London, 2010.

[4] Vujić, M., Dedić, L.: *Priručnik za izradu osnovnog modela semaforiziranog raskrižja korištenjem mikrosimulacijskog alata PTV Vissim*. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.

[5] Xiao H., Ambadipudi R., Hourdakis J., Michalopoulos P.: *Methodology for selecting microscopic simulators: Comparative evaluation of AIMSUN and VISSIM*, University of Minnesota, Minneapolis, 2005.

[6] Dadić I., Kos D.: *Teorija i organizacija prometnih tokova, autorizirana skripta*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2007.

[7] PTV Vissim 9 User manual, 2016., Karlsruhe, Njemačka

[8] Prezentacija AIMSUN, URL: http://slideplayer.com/slide/10294611/, 06.2017.

[9] Brlek, P., Dadić, I., Šoštarić, M.: *Prometno tehnološko projektiranje (autorizirana predavanja, radna verzija)*, Fakultet prometnih znanosti Zagreb, Zagreb, 2011.

[10] Hozjan, D., Novačko, L.: *Cestovne prometnice II: interna skripta za izradbu seminarskog rada*, Fakultet prometnih znanosti Zagreb, Zagreb, 2009.

[11] *Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja sa spiralnim tokom kružnog kolnika na državnim cestama*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka 2014.

[12] URL: http://www.cadline.co.uk/Products/infrastructure/products/ARCADY8, 06.2017

[13] URL: http://www.flownz.com/WhatWeDo/TransportModelling/TRANSYT.aspx, 06.2017

[14] Novačko, L.: *Mikrosimulacije, Modeliranje i planiranje u cestovnom prometu, autorizirana predavanja*, Fakultet prometnih znanosti, akademska godina 2016./2017.

[15] URL: http://www.zeljko-gis.com/mapguide25/fusion/templates/mapguide/slate/index.html?ApplicationDefinition=Library://SSUG_Svn_Novo/Layouts/Fusion_SvetaNedelja.ApplicationDefinition&locale=en, 6.2017.

[16] URL: http://amrozi.staff.ugm.ac.id/mx/trl-software/oscady/, 06.2017.

[17] URL: http://www.cadline.co.uk/Products/infrastructure/products/Picady8, 06.2017.

POPIS SLIKA

Slika 1. Prometne radnje u raskrižju, [1]....3
Slika 2. Konfliktne točke u pojedinim raskrižjima, [1]....3
Slika 3. Tlocrtni i visinski elementi pri vođenju linije, [1]....5
Slika 4. Promjena broja trakova na prilazu i izlazu s raskrižja, [1]....6
Slika 5. Osnovni oblici vođenja lijevih skretača, [1]....7
Slika 6. Trajektorije vozila pri istovremenom prolaženju ulijevo, [1]....8
Slika 7. Kraći izvozni klin, [1]....8
Slika 8. Srednji izvozni klin, [1]....9
Slika 9. Dulji dodatni trak, [1]....9
Slika 10. Oblici razdjelnih otoka, [1]....10
Slika 11. Elementi za provjeru trajektorija mjerodavnog vozila, [1]....12
Slika 12. Oblikovni elementi urbanog mini/malog RKT, [2]....12
Slika 13. Oblici razdjelnih otoka u ovisnosti o veličini (D_v) i brzini (V_k), [2]....13
Slika 14. Položaj sjecišta linija privoza s obzirom na središte kružnog raskrižja, [2]....13
Slika 15. Smještanje autobusnih stajališta uz kružno raskrižje, [2]....14
Slika 16. Dimenzije i granično područje primjene spojnih rampi, [1]....16
Slika 17. Osnovni oblici izljevno - uljevnih trakova, [1]....17
Slika 18. Osnovni elementi za dimenzioniranje izljeva i uljeva, [1]....17
Slika 19. Grafičko sučelje Synchro Studio simulacijskog alata, [18]....19
Slika 20. Grafičko sučelje LinSig simulacijskog alata, [3]....19
Slika 21. Grafičko sučelje OSCADY PRO simulacijskog alata, [16]....20
Slika 22. Grafičko sučelje PICADY simulacijskog alata, [17]....21
Slika 23. Grafičko sučelje ARCADY simulacijskog alata, [12]....21
Slika 24. Označavanje linkova u TRANSYT simulacijskom alatu, [3]....22
Slika 25. Grafičko sučelje TRANSYT simulacijskog alata, [13]....23
Slika 26. Wiedemann - ov psihofizički model ponašanja vozača, [4]....24
Slika 27. Grafičko sučelje PTV VISSIM simulacijskog alata....25
Slika 28. Hijerarhijski prikaz simulacijskog okruženja GETRAM, [8]....25
Slika 29. Grafičko sučelje (TEDI) AIMSUN simulacijskog alatA, [8]....26
Slika 30. Prikaz brzina u različitim uvjetima odvijanja toka, [6]....29
Slika 31. Izlazni podaci o emisijama štetnih plinova u alatu PTV Vissim....31
Slika 32. Prikaz izlaznih rezultata evaluacije....32
Slika 33. Prikaz prometnica Grada Svete Nedelje, [15]....35
Slika 34. Makrolokacija promatranog raskrižja....36
Slika 35. Mikrolokacija promatranog raskrižja....36
Slika 36. Tlocrt analiziranog raskrižja....37
Slika 37. Zapadni privoz raskrižja (privoz 1)....37
Slika 38. Južni privoz raskrižja, priključak na autocestu A3 (privoz 2)....38
Slika 39. Istočni privoz raskrižja (privoz 3)....38
Slika 40. Sjeverni privoz raskrižja (privoz 4)....39
Slika 41. Raspored signalnih grupa....44
Slika 42. Postojeći signalni plan....45

Slika 43. Primjer za slučaj konflikta, [10] 45
Slika 44. Varijanta 1 - raskrižje s kružnim tokom prometa 50
Slika 45. Provjera provoznosti kružnog raskrižja 50
Slika 46. Oznake glavnih elemenata turbo kružnog raskrižja, [11] 51
Slika 47. Konfliktne točke u turbo kružnom raskrižju s dvotračnim ulazima, [11] 52
Slika 48. Polumjeri srednje velikog turbo kružnog raskrižja 53
Slika 49. Preporučen položaj translacijske osovine, "pet do pet" 54
Slika 50. Dijelovi središnjeg otoka turbo kružnog raskrižja, [11] 55
Slika 51. Varijanta 2 - turbo kružno raskrižje 55
Slika 52. Provjera provoznosti turbo kružnog raskrižja 56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Okvirni oblikovni elementi kružnih raskrižja 11
Tablica 2. Granične vrijednosti projektnih elemenata u spoju rampi 14
Tablica 3. Odnosi tipa, funkcionalne razine te brzine na rampi 15
Tablica 4. Ovisnost ključnih elemenata o projektnoj brzini Vp 16
Tablica 5. Vrijednosti za određivanje razine usluge na semaforiziranim i nesemaforiziranim raskrižjima 33
Tablica 6. Matrica zaštitnih međuvremena 46
Tablica 7. Određivanje polumjera R2 u ovisnosti o R3, R5 i Rv 47
Tablica 8. Određivanje širine ulaznog privoza Bu u ovisnosti o R3 48
Tablica 9. Određivanje širine izlaznog privoza Bi u ovisnosti o R5 49
Tablica 10. Određivanje širine kružnog kolnika Bk u ovisnosti o Rv 49
Tablica 11. Dimenzije turbo kružnog raskrižja ovisno o njegovoj veličini 53
Tablica 12. Prikaz rezultata simulacije postojećeg stanja 58
Tablica 13. Prikaz rezultata simulacije raskrižja s kružnim tokom prometa 59
Tablica 14. Prikaz rezultata simulacije raskrižja sa spiralnim tokom prometa 61

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. Prikaz ukupnog broja vozila u EJA u satu 40
Grafikon 2. Prikaz ukupnog broja vozila po satu 41
Grafikon 3. Prikaz ukupnog opterećenja svakog privoza 41
Grafikon 4. Opterećenja u EJA za pojedine privoze 42
Grafikon 5. Podjela prometa po vrsti vozila 43

POPIS PRILOGA

Prilog 1. Tlocrt postojećeg stanja raskrižja
Prilog 2. Varijanta 1 - raskrižje s kružnim tokom prometa
Prilog 3. Varijanta 2 - raskrižje sa spiralnim tokom prometa

Prilog 1.
(Tlocrt postojećeg stanja raskrižja)

Prilog 2.
(Varijanta 1 – raskrižje s kružnim tokom prometa)

Prilog 3.
(Varijanta 2 – raskrižje sa spiralnim tokom prometa)