

Analiza isprekidanih prometnih tokova primjenom metodologije Highway Capacity Manuala

Kalem, Mario

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:119:913247>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Mario Kalem

ANALIZA ISPREKIDANIH PROMETNIH TOKOVA
PRIMJENOM METODOLOGIJE HIGHWAY
CAPACITY MANUALA

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.

Zagreb, 20. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za cestovni promet**
Predmet: **Cestovne prometnice II**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 7086

Pristupnik: **Mario Kalem (0135211557)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Cestovni promet**

Zadatak: **Analiza isprekidanih prometnih tokova primjenom metodologije Highway Capacity Manuala**

Opis zadatka:

Highway Capacity Manual predstavlja bazu za analizu različitih cestovnih entiteta. U ovom diplomskom radu cilj je analizirati isprekidane prometne tokove kao što su semaforizirana i nesemaforizirana raskrižja te raskrižja s kružnim tokom prometa. Metodologija HCMA će se i testirati na odabranim specifičnim raskrižjima.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

izv. prof. dr. sc. Luka Novačko

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

**ANALIZA ISPREKIDANIH PROMETNIH TOKOVA
PRIMJENOM METODOLOGIJE HIGHWAY
CAPACITY MANUALA**

**ANALYSIS OF INTERRUPTED TRAFFIC FLOWS
USING HCM METHODOLOGY**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Luka Novačko

Student: Mario Kalem

JMBAG: 0135211557

Zagreb, travanj 2024.

SAŽETAK

Priručnik za projektiranje kapaciteta prometnica (engl. Highway Capacity Manual - HCM) osnova je za planiranje, dizajn i upravljanje prometnim sustavima, nudeći metodologije za analizu različitih prometnih objekata poput autocesta, urbanih ulica, raskrižja, biciklističkih i pješačkih staza. Ovaj priručnik, iako izvorno razvijen na osnovu prometnih uvjeta u Sjedinjenim Američkim Državama, usvojen je kao standard u praksi projektiranja i upravljanja prometnim sustavima unutar Europe i Hrvatske. U radu su opisani potrebni ulazni podaci, potencijalni izvori i predložene zadane vrijednosti podataka koji se primjenjuju u proračunskim koracima za analizu semaforiziranih, nesemaforiziranih i raskrižja s kružnim tokom prometa. Na osnovu provedenog brojanja prometa na semaforiziranom raskrižju Maksimirska cesta - Ulica Ravnice, nesemaforiziranom raskrižju Ulica Ravnice XI - Ravnice V i kružnom raskrižju Ulice Ravnice I - Aleja Antuna Augustinčića - Ulica Jurja Dalmatinca - Ravnice izračunani su stupanj zasićenja, prosječno vrijeme čekanja, duljina repa čekanja i razina usluge primjenom metodologije HCM-a. U programskom sustavu AutoCAD izrađen je tlocrtni prikaz predmetnih raskrižja.

KLJUČNE RIJEČI: priručnik za projektiranje kapaciteta prometnica; semaforizirano raskrižje; nesemaforizirano raskrižje; raskrižje s kružnim tokom prometa; analiza raskrižja.

SUMMARY

The Highway Capacity Manual serves as the foundation for planning, designing, and managing traffic systems, offering methodologies for the analysis of various traffic facilities such as highways, urban streets, intersections, bicycles, and pedestrian paths. Although originally developed based on traffic conditions in the United States, it has been adopted as a standard in the practice of designing and managing traffic systems in Europe and Croatia. This paper describes the necessary input data, potential sources, and suggested default data values applied in the calculation steps for analyzing signalized, unsignalized intersections, and roundabouts. Based on the traffic count conducted at the signalized intersection of Maksimirska Street - Ravnice Street, the unsignalized intersection of Ravnice XI - Ravnice Street, and the roundabout at Ravnice I Street - Aleja Antuna Augustinčića - Jurja Dalmatinca Street - Ravnice Street the degree of saturation, average delay time, queue length, and level of service were calculated using the HCM methodology. Plan views of these intersections were created within the AutoCAD software system.

KEYWORDS: Highway Capacity Manual; signalized intersections; unsignalized intersections; roundabouts; intersection analysis.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Općenito o Highway Capacity Manual metodologiji	3
3. Analiza semaforiziranih raskrižja prema metodologiji HCM-a.....	5
3.1. Ulazni podatci za analizu semaforiziranih raskrižja.....	5
3.2. Proračunski koraci za semaforizirana raskrižja.....	9
4. Analiza nesemaforiziranih raskrižja primjenom metodologije HCM-a.....	29
4.1. Ulazni podatci za analizu nesemaforiziranih raskrižja.....	29
4.2. Proračunski koraci za nesemaforizirana raskrižja	30
5. Analiza raskrižja s kružnim tokom prometa primjenom metodologije HCM-a	53
5.1. Ulazni podatci za analizu raskrižja s kružnim tokom prometa	53
5.2. Proračunski koraci za raskrižja s kružnim tokom prometa	54
6. Primjena metodologije HCM-a na konkretnim primjerima raskrižja	65
6.1. Semaforizirano raskrižje Maksimirska cesta - Ulica Ravnice	65
6.2. Nesemaforizirano raskrižje Ravnice XI - Ravnice V	74
6.3. Raskrižje s kružnim tokom prometa Ulice Ravnice, Ulice Jurja Dalmatinca, Ulice Ravnice I i Aleje Antuna Augustinčića	82
7. Zaključak.....	88
Literatura	90
Popis slika	91
Popis tablica	93

1. Uvod

Highway Capacity Manual je u svom prvom izdanju 1950. godine nastao uslijed velike ekspanzije američkog cestovnog sustava nakon Drugog svjetskog rata. Predstavlja prvi dokument koji je kvantificirao koncept kapaciteta za transportne objekte, a namijenjen je inženjerima kao praktičan vodič pri dizajniranju novih ili preuređenja postojećih prometnica s ciljem osiguranja predviđenog kapaciteta. U svom drugom izdanju 1965. godine fokus je ostao na dizajnu, uz uvođenje koncepta razine usluge (engl. Level of Service - LoS) i dodavanja poglavlja o autobusnom prijevozu. Treće izdanje HCM-a iz 1985. godine donijelo je unaprjeđenje koncepta razine usluge i integraciju rezultata značajnih istraživanja, uz proširenje ciljne publike dodavanjem sadržaja o pješacima, biciklima i javnom prijevozu. Četvrto izdanje iz 2000. godine donijelo je značajno proširenje materijala s ciljem uspostavljanja sustavnog okvira za procjenu kapaciteta i razine usluge u sustavu površinskog prijevoza, obuhvaćajući pojedinačne objekte i njihove kombinacije. U petom izdanju iz 2010. godine implementirano je mnoštvo novih materijala nastalih iz istraživačkih projekata nakon objavljivanja HCM-a 2000. godine. Napravljena je reorganizacija za bolju pristupačnost i razumljivost sadržaja, promičući razmatranje svih korisnika cesta i korištenje šireg spektra pristupa.

Šesto izdanje iz 2016. godine proširuje svoj sadržaj s novim istraživanjima o pouzdanosti vremena putovanja, trakama za vozila s visokim stupnjem popunjenosti, radnim zonama i alternativnim raskrižjima. Razvoj HCM-a prati promjene u potrebama i pristupima planiranja i upravljanja prometom u SAD-u, s naglaskom na multimodalni pristup i efikasno korištenje ograničenih resursa. Šesto izdanje uvodi podnaslov "Vodič za analizu multimodalne mobilnosti", ističući njegovu usmjerenost na alate za mjerenje performansi različitih načina putovanja.

Iako je razvijen i izvorno namijenjen za američki cestovni sustav, zbog svog sustavnog pristupa i kontinuiranog unaprjeđivanja prateći razvoj prometnih sustava, primjenjuje se širom svijeta, pa tako i u Hrvatskoj. Pravilnikom o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa propisano je kako se proračun propusne moći ceste vrši prema HCM-u, a uporabu drugih metoda treba posebno obrazložiti.

Ovaj rad podijeljen je u tri dijela. Prvi dio rada posvećen je općem pregledu HCM-a, gdje je prikazan njegov razvoj kroz povijest i nadopunjavanje novim spoznajama putem novih izdanja, uključujući i podjelu na sveske. Također, izložene su svrha i ciljevi priručnika, kao i njegova primjena. Osim toga, definirani su ciljni korisnici priručnika.

U drugom dijelu rada, koji se bavi isprekidanim prometnim tokovima, detaljno se kroz poglavlja 3, 4 i 5 razrađuju potrebni ulazni podatci, potencijalni izvori tih podataka i predložene zadane vrijednosti koje su neophodne za analizu semaforiziranih i nesemaforiziranih raskrižja, te raskrižja s kružnim tokom prometa. Također, definirani su proračunski koraci za generiranje izlaznih podataka koji uključuju prosječno vrijeme kašnjenja, duljinu reda čekanja, stupanj zasićenosti te konačno, razinu usluge.

U trećem dijelu rada, koristeći podatke dobivene brojanjem prometa na semaforiziranom raskrižju Maksimirska cesta - Ulica Ravnice, nesemaforiziranom raskrižju Ravnice XI – Ulica Ravnice, i kružnom raskrižju Ulica Ravnice - Aleja Antuna Augustinčića - Ulica Jurja Dalmatinca - Ulica Ravnice, provedena je primjena proračunskih koraka i metodologije HCM-a. Na temelju toga određeni su izlazni podatci koji služe kao osnova za daljnju evaluaciju navedenih raskrižja.

Način vođenja prometnih tokova u području raskrižja najbitniji je čimbenik koji određuje različitost u prometnim radnjama. Prometni tokovi se razlikuju po svojoj prirodi odvijanja i u zoni raskrižja se dijele na neprekinute i prekinute prometne tokove. Neprekinuti prometni tok predstavlja uvjete vožnje pod kojima se vozilo u prijelazu dionice ceste ili prometnog traka mora zaustaviti samo zbog čimbenika unutar prometnog toka, a prekinuti prometni tok predstavlja uvjete vožnje pod kojima vozilo na dionici ceste, odnosno prometnog traka, mora obavezno zaustaviti ispred raskrižja zbog prometnih znakova ili signala [7].

2. Općenito o Highway Capacity Manual metodologiji

Priručnik za projektiranje kapaciteta prometnica (engl. Highway Capacity Manual - HCM) objavio je u SAD-u Zavod za istraživanje prometa (engl. Transportation Research Board - TRB) u suradnji s Nacionalnim istraživačkim vijećem (engl. National Research Center - NRC) te ima ključnu ulogu u optimizaciji prometnih sustava i planiranju prometnih mreža.

HCM se sastoji od četiri sveska, od kojih su prva tri dostupna u tiskanom izdanju, a četvrti je dostupan samo na mrežnim stranicama.

Prvi svezak HCM-a naslova „Koncepti“ (engl. Concepts) pruža temeljne informacije potrebne analitičarima prije početka analiza kapaciteta ili kvalitete usluge. Uključuje vodič za korisnike s opisom svrhe, opsega i strukture HCM-a, te istraživačku osnovu. Obuhvaća primjene HCM-a, definiranje elemenata sustava cesta, načina putovanja i operativnih uvjeta. Raspravlja o karakteristikama različitih načina putovanja, uključujući varijacije potražnje i faktore koji utječu na iskustvo putnika. Također, opisuje osnovne odnose operacija prometa i kako se primjenjuju na načine putovanja, koncepte kvalitete usluge i razine usluge, te mjere usluge za opis doživljenih kvaliteta usluge. Svezak pruža pregled alata za analizu koje koristi HCM te smjernice za tumačenje rezultata i usporedbu s alternativnim alatima. Uključuje i uvodni sažetak za donositelje odluka te rječnik i simbole za tehničke termine i varijable korištene u metodama HCM-a.

Drugi svezak HCM-a naslova „Neisprekidani tokovi“ (engl. Uninterrupted Flow) detaljno se bavi elementima sustava neisprekidanog toka, uključujući autoceste, dvotračne i višetračne prometnice. Ovi elementi odlikuju se odsutnošću fiksni uzroka kašnjenja ili prekida izvan prometnog toka. Poglavlja ovog sveska pružaju metodologiju dovoljno detaljnu da analitičari mogu razumjeti korake analize, uključujući opseg i ograničenja metodologije, preporučene vrijednosti, pragove razine usluge i smjernice za korištenje alternativnih alata. Poglavlja 10 do 15 obuhvaćaju osnovne koncepte i metodologije za evaluaciju rada autocesta, uključujući analizu pouzdanosti, operacije segmenata bez utjecaja spajanja i razdvajanja, te analizu dvotračnih cesta, s fokusom na različite operativne scenarije i strategije upravljanja.

Treći svezak HCM-a naslova „Isprekidani tokovi“ (engl. Interrupted Flow) fokusira se na elemente sustava s isprekidanim tokom, uključujući gradske ulice, raskrižja, te pješačke i biciklističke staze izvan prometnica. Obuhvaća uređaje za kontrolu prometa koji periodički prekidaju tok prometa, kao što su semafori i znakovi STOP. Metodologija pruža detaljan opis koraka analize, opseg i ograničenja, preporučene vrijednosti, pragove razine usluge, smjernice za posebne slučajeve i korištenje alternativnih alata. Uključuje i metode analize za pješake i bicikliste te materijal specifičan za javni prijevoz u multimodalnim analizama. Poglavlja 16 do 24 detaljno opisuju metode evaluacije rada motoriziranih vozila, biciklista, pješaka, vozila javnog prijevoza, te operacija na semaforiziranim raskrižjima, nesemaforiziranim raskrižjima, kružnim tokovima, terminalima rampi, alternativnim raskrižjima, te stazama za pješake i bicikliste izvan prometnica.

Četvrti svezak HCM-a naslova „Vodič za primjenu“ (engl. Applications Guide) je online resurs dostupan na mrežnog stranici www.hcm.trb.org, koji služi kao podrška pružanjem dopunskih poglavlja s primjerima problema, tumačenjima HCM metoda, popisom ispravaka ili propusta pronađenih nakon objavljivanja, tzv. errata, tehničkom referentnom knjižnicom, vodičima za primjenu HCM metoda na različite operacije i projekte te forumom za raspravu. U budućnosti se mogu dodati poglavlja o novonastalim temama kako bi se smanjilo vrijeme između istraživanja i usvajanja njegovih rezultata. Pristup Svesku 4 zahtijeva besplatnu registraciju, s mogućnošću obavijesti e-poštom o dodavanju novog materijala.

Svrha HCM-a jest osiguravanje metodologija i odgovarajućih procedura za analizu multimodalne učinkovitosti autocesta i gradskih prometnica, temeljene na operativnim mjerama i pokazateljima kvalitete usluge. Ciljevi HCM-a uključuju definiranje mjera učinkovitosti, opisivanje metoda istraživanja ključnih prometnih karakteristika, razvoj metodologija za procjenu i predviđanje mjera učinkovitosti te detaljno objašnjenje metodologija za bolje razumijevanje čimbenika koji utječu na multimodalni promet. HCM nudi najnovije tehnike za određivanje kapaciteta i razine usluge (LOS) dostupne u vrijeme objavljivanja, ne postavljajući pritom pravne standarde za dizajn ili izgradnju autocesta.

HCM je prvenstveno namijenjen analizi operacija, dizajna, preliminarnog inženjeringa i planiranja za različite načine putovanja, uključujući motorizirana vozila, pješake, bicikliste i javni prijevoz kao dio gradske ulične infrastrukture. Pokriva analizu točaka, segmenata i objekata, obuhvaćajući stanja s nedovoljnim i prekomjernim zasićenjem prometa.

Namijenjen je inženjerima u području prometnih tokova i geometrijskog dizajna autocesta te planerima prometa u upravljanju transportnim sustavima. Efikasna upotreba i primjena metodologija HCM-a pretpostavljaju tehničko predznanje, idealno stečeno kroz sveučilišno obrazovanje ili rad u javnim agencijama ili konzultantskim tvrtkama. Osim toga, HCM je koristan alat za menadžersko osoblje, edukatore, stručnjake za kvalitetu zraka i buku, izabrane dužnosnike, regionalne planere korištenja zemljišta i razne interesne skupine.

3. Analiza semaforiziranih raskrižja prema metodologiji HCM-a

U suvremenom urbanom planiranju i upravljanju prometom, ključnu ulogu u osiguravanju sigurnosti i efikasnosti prometnih tokova imaju semaforizirana raskrižja. Njihova precizna analiza i optimizacija mogu značajno doprinijeti smanjenju prometnih zagušenja, povećanju sigurnosti sudionika u prometu i poboljšanju kvalitete općeg prometnog okruženja.

Ovo poglavlje bavi se detaljnom analizom semaforiziranih raskrižja koristeći metodologiju definiranu u HCM-u, s ciljem procjene njihove učinkovitosti i identifikacije potencijalnih poboljšanja. Metodologija HCM-a pruža okvir za kvantitativno vrednovanje performansi raskrižja, fokusirajući se pritom na kapacitet, razinu usluge i vremena kašnjenja.

3.1. Ulazni podatci za analizu semaforiziranih raskrižja

Potrebni ulazni podatci, njihovi izvori i predložene zadane vrijednosti za analizu semaforiziranih raskrižja razvrstani su prema prometnim, geometrijskim karakteristikama, upravljanjem signalizacijom ili drugim dodatnim podacima. Dodatno su raščlanjeni prema razini na kojoj ih je potrebno primjenjivati, tako da se za podatke u tablici 1 primjenjuje jedna vrijednost za svaki manevar lijevo, ravno i desno.

Tablica 1. Potrebni ulazni podatci, izvori i predložene vrijednosti na razini manevra [1]

Potrebni podatci i jedinice	Potencijalni izvori podataka	Predložena zadana vrijednost
Prometne karakteristike		
Očekivana prometna potražnja [voz/h]	Terenski podatci, prethodna brojanja prometa	Potrebno osigurati
Kašnjenje nesemaforiziranog kretanja [s]	Terenski podatci	Pojašnjeno u radu
Geometrijske karakteristike		
Broj prometnih traka [trak]	Terenski podatci, snimke iz zraka	Potrebno osigurati

U tablici 2 prikazani su podatci potrebni na razini privoza, tako da jedna vrijednost ili uvjet vrijedi za cijeli privoz semaforiziranog raskrižja.

Tablica 2. Potrebni ulazni podatci, izvori i predložene vrijednosti na razini privoza [1]

Potrebni podatci i jedinice	Potencijalni izvori podataka	Predložena zadana vrijednost
Prometne karakteristike		
Desna skretanja za vrijeme crvenog svjetla [voz/h]	Terenski podatci, prethodna brojanja prometa	0,0 [voz/h]
Protok pješaka [pješaka/h]	Terenski podatci, prethodna brojanja prometa	Potrebno osigurati
Protok biciklista [biciklista/h]	Terenski podatci, prethodna brojanja prometa	Potrebno osigurati
Stopa zaustavljanja autobusa [bus/h]	Terenski podatci, procjena analitičara	Stajalište busa centralne poslovne četvrti: 12 [bus/h] Stajalište busa izvan centralne poslovne četvrti: 2 [bus/h]

Geometrijske karakteristike		
Broj trakova za uplitanje prometa [trak]	Terenski podatci, snimke iz zraka	Potrebno osigurati
Nagib privoza [%]	Terenski podatci	Vodoravan privoz: 0 [%] Umjereni nagib privoza: 3 [%] Strmi nagib privoza: 6 [%]
Upravljanje signalizacijom		
Signalni plan	Terenski podatci	Potrebno osigurati
Način rada lijevog skretanja	Terenski podatci	Potrebno osigurati
Prekidanje faze ako nema prisutnosti (ako je prometno ovisno)	Terenski podatci	Omogućeno
Drugi podatci		
Ograničenje brzine [km/h]	Terenski podatci, dokumentacija cesta	Potrebno osigurati

Podatci u tablici 3 primjenjuju se na razini svake grupe kretanja, tako da se dodjeljuje jedna vrijednost za svaki manevar s ekskluzivnim trakama za skretanje i jedna vrijednost za provoz ravno (uključujući manevarske pokrete u zajedničkom traku). Grupe kretanja predstavljaju skupine prometnih traka na raskrižju koje su određene na temelju smjera i tipa kretanja koje omogućuju, a pomažu u analizi i organizaciji prometa na raskrižju jer omogućuju odvajanje različitih vrsta kretanja.

Tablica 3. Potrebni ulazni podatci, izvori i predložene vrijednosti na razini grupe kretanja [1]

Potrebni podatci i jedinice	Potencijalni izvori podataka	Predložena zadana vrijednost
Prometne karakteristike		
Udio teških vozila [%]	Terenski podatci, prethodna brojanja prometa	3%
Omjer plotuna vozila [decimalno]	Terenski podatci, procjena analitičara	Pojašnjeno u HCM-u [4]
Čimbenik utjecaja susjednih raskrižja [decimalno]	Terenski podatci, procjena analitičara	1,0
Početni rep čekanja [voz]	Terenski podatci, procjena analitičara	Potrebno osigurati
Osnovno zasićenje toka	Terenski podatci, procjena analitičara	Populacija metropole ≥ 250.000 : 1900 [voz/h/trak] u suprotnom: 1.750 [voz/h/trak]
Čimbenik prilagodbe iskorištenja traka [decimalno]	Terenski podatci, procjena analitičara	Pojašnjeno u radu
Broj manevara parkiranja uz cestu [voz/h]	Terenski podatci, procjena analitičara	Pojašnjeno u radu
Geometrijske karakteristike		
Prosječna širina traka [m]	Terenski podatci, snimke iz zraka	3,6576 [m]
Duljina traka za skretanje [m]	Terenski podatci, snimke iz zraka	Potrebno osigurati
Prisutnost parkiranja uz cestu	Terenski podatci, snimke iz zraka	Potrebno osigurati
Drugi podatci		
Duljina detektora na zaustavnoj liniji [m] i način detekcije (ako je prometno ovisno)	Terenski podatci	12,192 [m] (način detekcija prisutnosti)

U tablici 4 prikazani su podatci i uvjeti koji se jednoliko primjenjuju na razini cijelog raskrižja.

Tablica 4. Potrebni ulazni podatci, izvori i predložene vrijednosti na razini cijelog raskrižja [1]

Potrebni podatci i jedinice	Potencijalni izvori podataka	Predložena zadana vrijednost
Prometne karakteristike		
Faktor vršnog sata [decimalno]	Terenski podatci, procjena analitičara	Satni podatci o prometu i 15-minutni period analize: Ukupni ulazni intenzitet ≥ 1.000 voz/h: 0,92 Ukupni ulazni intenzitet < 1.000 voz/h: 0,90 u suprotnom: 1,0
Upravljanje signalizacijom		
Vrsta upravljanja signalizacijom	Terenski podatci	Potrebno osigurati
Trajanje ciklusa (ako je prometno ovisno)	Terenski podatci	Pojašnjeno u radu
Drugi podatci		
Period analize [h]	Zadano od analitičara	0,25 [h]
Vrsta područja (centralna poslovna četvrt ili ne)	Procjena analitičara	Potrebno osigurati

U tablici 5 prikazani su podatci i uvjeti koji se primjenjuju na svaku pojedinačnu signalnu fazu.

Tablica 5. Potrebni ulazni podatci, izvori i predložene vrijednosti na razini pojedine faze [1]

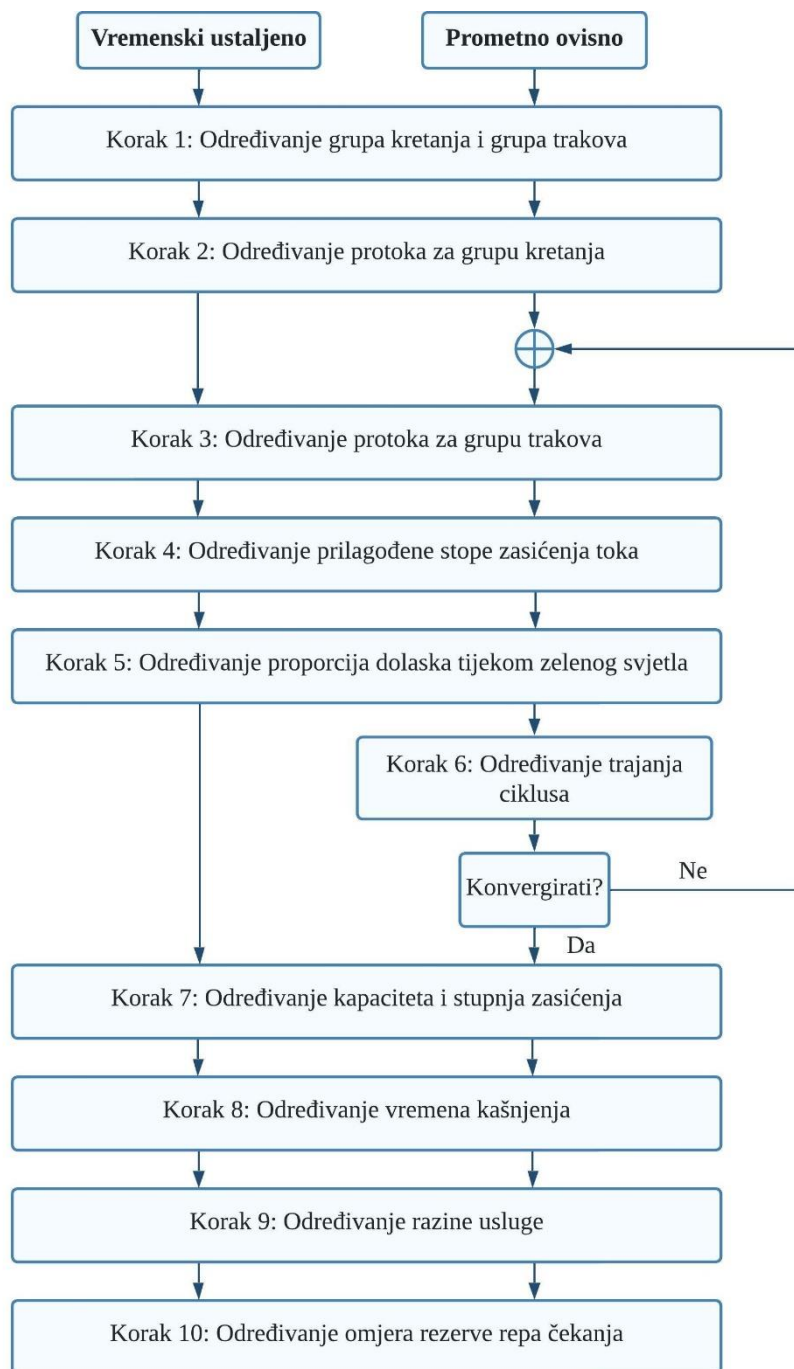
Potrebni podatci i jedinice	Potencijalni izvori podataka	Predložena zadana vrijednost
Upravljanje signalizacijom		
Vrijeme prolaza (ako je prometno ovisno)	Terenski podatci	2,0 [s] (detekcija prisutnosti)
Maksimalno trajanje zelenog svjetlosnog pojma [s] (ako je prometno ovisno)	Terenski podatci	Ravno na glavnom privozu: 50 [s] Ravno na sporednom privozu: 30 [s] Lijevo skretanje: 20 [s]
Trajanje zelenog svjetlosnog pojma [s] (ako je prometno ovisno)	Terenski podatci	Ravno na glavnom privozu: 50 [s] Ravno na sporednom privozu: 30 [s] Lijevo skretanje: 20 [s]
Minimalno zeleno [s]	Terenski podatci	Ravno na glavnom privozu: 10 [s] Ravno na sporednom privozu: 8 [s] Lijevo skretanje: 6 [s]
Zaštitno vrijeme crveno - žuto [s]	Terenski podatci	4,0 [s]
Pješačka faza [s]	Terenski podatci	Aktivirano: 7 [s] Ustaljeno: trajanje zelenog intervala umanjeno za napuštajuće vrijeme
Vrijeme napuštanja [s]	Terenski podatci	Temeljeno na brzini napuštanja

		1,0668 [m/s]
Ponovno pozivanje faze (ako je prometno ovisno)	Terenski podatci	Onemogućeno
Dvostruki unos detektora (ako je prometno ovisno)	Terenski podatci	Nije omogućeno (koristiti samo unos podataka jednog detektora)

Ako se radi o semaforiziranom raskrižju s koordiniranim upravljanjem signalima potrebni su dodatni podatci, duljine ciklusa, podjela faza, pomak, referentne točke pomaka i o aktiviranju prisilnog načina rada [1].

3.2. Proračunski koraci za semaforizirana raskrižja

Proračunski koraci za analizu semaforiziranih raskrižja prema metodologiji HCM-a prikazani su na slici 1, a načini primjene pojedinog koraka prikazat će se u nastavku rada.






















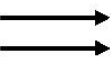

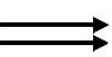


Slika 1. Proračunski koraci za analizu semaforiziranih raskrižja [1]

Primjena navedenih proračunskih koraka rezultirat će izlaznim podacima o prosječnom vremenu kašnjenja za grupe trakova, privoze i raskrižje za koje se određuje razina usluge.

a) Određivanje grupa kretanja i grupa trakova

Tijekom ovog koraka uspostavljaju se grupe kretanja (engl. Movement Groups - MG) i grupe trakova (engl. Lane Groups - LG), i to zasebno za svaki privoz raskrižju. Uobičajeno označavanje ovih grupa prikazano je tablici 6.

Tablica 6. Uobičajeno označavanje grupa kretanja i grupa trakova [1]

Broj trakova	Manevri po traku	Grupa kretanja (MG)	Grupa trakova (LG)
1	Lijevo, ravno i desno: 	MG 1: 	LG 1: 
2	Ekskluzivno lijevo: 	MG 1: 	LG 1: 
	Ravno i desno: 	MG 2: 	LG 2: 
2	Lijevo i ravno: 	MG 1: 	LG 1: 
	Ravno i desno: 	MG 2: 	LG 2: 
3	Ekskluzivno lijevo: 	MG 1: 	LG 1: 
	Ekskluzivno lijevo: 		
	Ravno: 	MG 2: 	LG 2: 
	Ravno: 		
	Ravno i desno: 		

Određivanje grupa kretanja zahtjeva primjenu sljedećih pravila:

- manevar skretanja koji koristi jednu ili više ekskluzivnih traka i nema zajedničkih dijeljenih traka treba biti označen kao grupa kretanja;
- trakovi koji nisu dodijeljeni nijednoj grupi prethodnim pravilom trebaju biti kombinirani u jednu grupu kretanja [1].

Ova pravila rezultiraju označavanjem jedne do tri grupe kretanja za svaki privoz, pri čemu grupa kretanja može obuhvaćati jednu ili više traka [1].

Grupa trakova može sadržavati jednu ili više traka. Određivanje grupa trakova privoza raskrižju zahtjeva primjenu sljedećih pravila:

- ekskluzivna traka ili trake za skretanje ulijevo trebaju biti označene kao zasebna grupa traka, a isto vrijedi i za ekskluzivnu traku za skretanje udesno;
- svaka zajednička traka treba biti označena kao zasebna grupa traka;

- sve trake koje nisu ekskluzivne za skretanje ili zajedničke trake trebaju biti kombinirane u jednu grupu traka [1].

Ova pravila rezultiraju označavanjem jedne ili više mogućih skupina traka za privoz raskrižju, a to su:

- ekskluzivna traka za skretanje lijevo (ili trake);
- ekskluzivna traka za kretanje ravno (ili trake);
- ekskluzivna traka za skretanje desno (ili trake);
- zajednička traka za skretanje lijevo i kretanje ravno;
- zajednička traka za skretanje ulijevo i skretanje desno;
- zajednička traka za skretanje udesno i nastavak vožnje ravno;
- zajednička traka za skretanje ulijevo, nastavak vožnje ravno i skretanje udesno [1].

b) Određivanje protoka za grupu kretanja

U ovom koraku određuje se protok za svaku grupu kretanja. Ako skretanje koristi jednu ili više ekskluzivnih traka bez zajedničkih traka, protok tog skretanja dodjeljuje se grupi kretanja za ekskluzivne trake. Svi protoci privoza koji nisu dodijeljeni nekoj grupi kretanja dodjeljuju se jednoj grupi kretanja [1].

Protok desnog skretanja na crveno (engl. Right-turn-on-red - RTOR) oduzima se od ukupnog protoka skretanja desno, neovisno o tome dolazi li iz zajedničke ili ekskluzivne trake. Ovaj smanjeni volumen skretanja udesno koristi se za daljnje izračune kapaciteta i razine usluge [1].

c) Određivanje protoka za grupu trakova

Protok grupe traka određuje se u ovom koraku. Ako privoz raskrižju nema zajedničkih traka ili privoz ima samo jednu traku, postoji izravan odnos između grupa traka i grupa kretanja, gdje je protok grupe traka jednak protoku grupe kretanja [1].

Međutim, ako prilaz ima jednu ili više zajedničkih traka i više od jedne trake, protok grupe traka izračunava se prema metodi opisanoj u HCM poglavlju 31, odjeljak 2., pododjeljak "Protok grupe traka na privozima s više traka". Ova metoda pretpostavlja da vozači biraju traku koja minimizira njihovo vrijeme čekanja na raskrižju, koristeći omjer volumena trake i protoka zasićenja za procjenu vremenskih razlika između traka. Ova pretpostavka možda neće uvijek biti točna ako vozači biraju traku radi pozicioniranja za skretanje na sljedećem raskrižju ili ako je prisutna pomoćna traka za kretanje ravno. U tim slučajevima, analitičar treba odrediti protok za svaku traku zasebno, a zatim kombinirati te protoke za jasno definiranje protoka za svaku grupu traka [1].

d) Određivanje prilagođene stope zasićenja toka

U ovom koraku izračunava se prilagođena stopa zasićenja za svaku traku unutar svake grupe traka, koristeći baznu stopu zasićenja kao unaprijed određenu varijablu. Izraz "prilagođena stopa zasićenja" koristi se jer se proračun odnosi na primjenu različitih

čimbenika koji prilagođavaju temeljnu stopu zasićenja specifičnim uvjetima prisutnim na prilazu istraživanog raskrižja [1].

Postupak opisan u ovom koraku primjenjuje se na grupe traka koje se sastoje od ekskluzivne trake (ili trakova) koje rade u predefiniranom zaštićenom načinu rada i bez interakcije s pješacima ili biciklistima. Ako ovi uvjeti nisu ispunjeni, dodatni postupci opisani u [4], odjeljcima 2 i 3 trebaju se kombinirati s postupcima u ovom koraku kako bi se izračunala prilagođena stopa zasićenja toka [1].

Za određivanje prilagođene stope zasićenja toka primjenjuje se (1).

$$s = s_o \cdot f_w \cdot f_{HVg} \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} \cdot f_{LT} \cdot f_{RT} \cdot f_{Lpb} \cdot f_{Rpb} \cdot f_{wz} \cdot f_{ms} \cdot f_{sp} \quad (1)$$

gdje je:

- s – prilagođena stopa zasićenja toka [voz/h/trak];
- s_o – osnovno zasićenje toka [voz/h/trak];
- f_w – čimbenik prilagodbe za širinu traka;
- f_{HVg} – čimbenik prilagodbe za teška vozila i nagib;
- f_p – čimbenik prilagodbe utjecaja parkiranja;
- f_{bb} – čimbenik prilagodbe za utjecaj javnog prometa;
- f_a – čimbenik prilagodbe za vrstu područja;
- f_{LU} – čimbenik prilagodbe za iskorištenje traka;
- f_{LT} – čimbenik prilagodbe za utjecaj lijevih skretanja;
- f_{RT} – čimbenik prilagodbe za desna skretanja;
- f_{Lpb} – čimbenik prilagodbe za pješake za lijeva skretanja;
- f_{Rpb} – čimbenik prilagodbe za pješake i bicikliste za desna skretanja;
- f_{wz} – čimbenik prilagodbe za prisutnost radne zone na raskrižju;
- f_{ms} – čimbenik prilagodbe za blokadu trake niz prometnicu;
- f_{sp} – čimbenik prilagodbe za utjecaj šok-vala.

Osnovna stopa zasićenja toka predstavlja očekivanu prosječnu stopu toka za prolaznu traku s geometrijskim i prometnim uvjetima koji odgovaraju vrijednosti 1,0 za sve čimbenike prilagodbe. Obično se odabire jedna osnovna stopa koja predstavlja sva signalizirana raskrižja unutar nadležnosti ili područja gdje se nalazi istraživano raskrižje, a zadane vrijednosti za ovu stopu prikazane su u tablici 3 [1].

Čimbenik prilagodbe za širinu trake f_w uzima u obzir negativan utjecaj uskih traka na stopu zasićenja i omogućuje povećanje stope toka na širokim trakama. Vrijednosti ovog čimbenika prikazane su u tablici 7 [1].

Tablica 7. Čimbenici prilagodbe za širinu traka [1]

Prosječna širina traka [stopa]	Prosječna širina traka [m]	Čimbenik prilagodbe f_w
<10,0	<3,048	0,96
≥10,0 – 12,9	≥3,048 – 3,932	1,00
>12,9	>3,932	1,04

Standardne trake su široke 3,6576 metara (12 stopa). Čimbenik širine traka treba koristiti s oprezom za trake šire od 4,8768 metara (16 stopa) ili se može razmotriti analiza s dvije uske trake. Dvije uske trake rezultiraju većom stopom zasićenja toka od jedne široke

trake, ali analiza u oba slučaja treba odražavati stvarnu ili očekivanu upotrebu širine trake. Čimbenik se ne bi trebao koristiti za procjenu stope toka zasićenja za grupe traka s prosječnom širinom manjom od 2,4384 metra (8 stopa) [1].

Čimbenik prilagodbe za teška vozila i nagib f_{HVg} uzima u obzir kombinirani učinak teških vozila i nagiba privoza na stopu toka zasićenja. Teška vozila se uzimaju u obzir zbog dodatnog prostora koji zauzimaju i razlike u operativnim sposobnostima u odnosu na putnička vozila. Nagib privoza se uzima u obzir zbog njegovog utjecaja na performanse vozila, gdje uzbrdice imaju pozitivnu, a nizbrdice negativnu vrijednost [1]. Za negativne nagibe (nizbrdice) čimbenik se izračunava prema (2).

$$f_{HVg} = \frac{100 - 0,79 \cdot P_{HV} - 2,07 \cdot P_g}{100} \quad (2)$$

Za vodoravne nagibe ili uzbrdice primjenjuje se (3).

$$f_{HVg} = \frac{100 - 0,78 \cdot P_{HV} - 0,31 \cdot P_g^2}{100} \quad (3)$$

gdje je:

- f_{HVg} – čimbenik prilagodbe za teška vozila i nagib;
- P_{HV} – udio teških vozila u prometnom toku [%];
- P_g – nagib privoza za grupu kretanja [%].

Ovaj čimbenik primjenjuje se na postotke teških vozila do 50 % i nagibe u rasponu od -4,0 % do +10,0 % i ne uzima u obzir lokalne autobuse koji se zaustavljaju na području raskrižja [1].

Čimbenik prilagodbe za parkiranje f_p uzima u obzir utjecaj parkirne trake na tok u susjednoj grupi traka, uključujući i povremeno blokiranje susjedne trake vozilima koja ulaze i izlaze iz parkirnih mjesta. Ako nema parkiranja, ovaj čimbenik je 1,00. U slučaju prisutnosti parkiranja, čimbenik se izračunava prema (4).

$$f_p = \frac{N - 0,1 - \frac{18 \cdot N_m}{3.600}}{N} \geq 0,050 \quad (4)$$

gdje je:

- f_p – čimbenik prilagodbe za parkiranje;
- N_m – stopa manevriranja prilikom parkiranja uz grupu traka [manevra/sat];
- N – broj trakova u grupi traka.

Stopa manevriranja odnosi se na područja parkiranja uz grupu traka i unutar 76,2 m (250 stopa) uzvodno od linije za zaustavljanje. Pretpostavlja se da svaki manevar (ulazak ili izlazak) blokira promet u traci pored manevra parkiranja u prosjeku 18 sekundi. Praktično gornje ograničenje od 180 manevara na sat trebalo bi se odražavati jednadžbom (4). Čimbenik se primjenjuje samo na grupu traka uz parkiranje. Na jednosmjernoj cesti s dvije ili više grupa traka, čimbenik se računa zasebno za svaku grupu traka i temelji se na broju manevara uz

grupu. Uvjeti parkiranja s nula manevra imaju drugačiji utjecaj u odnosu na situaciju bez parkiranja [1].

Čimbenik prilagodbe za utjecaj javnog prometa f_{bb} uzima u obzir utjecaj lokalnih autobusa javnog prijevoza koji se zaustavljaju na autobusnim stanicama unutar 76,2 metara (250 stopa) od linije za zaustavljanje (bilo uzvodno ili nizvodno) kako bi iskrcali ili ukrcali putnike. Vrijednost ovog čimbenika izračunava se prema (5) [1].

$$f_{bb} = \frac{N - \frac{14,4 \cdot N_b}{3.600}}{N} \geq 0,050 \quad (5)$$

gdje je:

- f_{bb} – čimbenik prilagodbe za utjecaj javnog prometa;
- N_b – stopa zaustavljanja autobusa na promatranom privozu [manevara/sat];
- N – broj trakova u grupi traka.

Ovaj čimbenik se koristi samo ako autobusi koji se zaustavljaju blokiraju promet u promatranj grupi traka. Praktično gornje ograničenje od 250 autobusa na sat trebalo bi se odražavati jednadžbom (5). Minimalna vrijednost f_{bb} iz ove jednadžbe je 0,050. Čimbenik pretpostavlja prosječno vrijeme blokade od 14,4 sekunde tijekom trajanja zelenog svjetla [1].

Čimbenik prilagodbe za tip područja f_a uzima u obzir manju efikasnost raskrižja u centralnim poslovnim četvrtima (engl. Central Business District - CBD) u odnosu na raskrižja na drugim lokacijama. Ovaj čimbenik, kada se primjenjuje, ima vrijednost od 0,90. Upotreba ovog čimbenika trebala bi se razmatrati od slučaja do slučaja. Nije ograničen samo na formalno označena područja centralnih poslovnih četvrti niti bi se trebao primjenjivati na sva takva područja. Umjesto toga, trebao bi se koristiti u područjima gdje geometrijski dizajn te prometni i pješачki tokovi značajno povećavaju vremenske razmake između vozila [1].

Čimbenik prilagodbe za korištenje trake f_{LU} primjenjuje se u procjeni stope zasićenja za grupe traka koje imaju više od jedne ekskluzivne trake. U slučajevima kada grupa traka sadrži samo jednu zajedničku traku ili jednu ekskluzivnu traku, ovaj čimbenik iznosi 1,0 [1].

Čimbenik prilagodbe za desna skretanja f_{RT} odražava utjecaj geometrije putanje desnog skretanja na stopu zasićenja [1]. Vrijednost ovog čimbenika izračunava se prema (6).

$$f_{RT} = \frac{1}{E_R} \quad (6)$$

gdje je:

- f_{RT} – čimbenik prilagodbe za desna skretanja;
- E_R – ekvivalentan broj prolaznih vozila za vozilo koje skreće desno zaštićeno (=1,18).

Ako manevar skretanja udesno dijeli traku s drugim manevrom ili ima dozvoljenu operaciju, treba se koristiti postupak iz [4], odjeljka 3, za izračun prilagođene stope zasićenja za grupu traka sa zajedničkom trakom [1].

Čimbenik prilagodbe za lijeva skretanja f_{LT} namijenjen je odražavanju utjecaja geometrije putanje lijevog skretanja na stopu zasićenja [1]. Vrijednost ovog čimbenika izračunava se prema (7).

$$f_{LT} = \frac{1}{E_L} \quad (7)$$

gdje je:

- f_{LT} – čimbenik prilagodbe za lijeva skretanja;
- E_L – ekvivalentan broj prolaznih vozila za vozilo koje zaštićeno skreće ulijevo (=1,05).

Ako manevar skretanja lijevo dijeli traku s drugim manevrom ili ima dozvoljenu operaciju, treba se koristiti postupak iz [4], odjeljka 3, za izračun prilagođene stope zasićenja za grupu traka sa zajedničkom trakom [1].

Čimbenik prilagodbe za prisutnost radne zone f_{wz} koristi se za procjenu utjecaja prisutnosti radne zone na stopu zasićenja. Radna zona se smatra prisutnom na privozu ako se nalazi između linije za zaustavljanje i točke 76,2 metra (250 stopa) uzvodno od linije zaustavljanja. Postupak za izračun ovog čimbenika nalazi se u [4], odjeljak 2, "Signalizirana raskrižja: Dopuna". Ako radna zona nije prisutna, čimbenik ima vrijednost 1,0 [1].

Čimbenik prilagodbe za utjecaj zatvaranja traka f_{ms} koristi se za procjenu utjecaja zatvaranja trake nizvodno od raskrižja na stopu zasićenja. Ovo zatvaranje, koje može biti povezano s radnom zonom ili posebnim događajem, smješteno je nizvodno od istraživanog raskrižja. Čimbenik se primjenjuje samo na one grupe traka koje ulaze u dionicu ceste gdje je prisutno zatvaranje. Postupak za izračun ovog čimbenika nalazi se u HCM poglavlju 30, odjeljak 3, "Urbani ulični segmenti: Dopuna". Vrijednost čimbenika iznosi 1,0 ako nema prisutne blokade traka nizvodno [1].

Čimbenik prilagodbe za utjecaj šok-vala f_{sp} koristi se za procjenu utjecaja povratnog širenja gužve s raskrižja niz prometnicu. U slučaju šok-vala, njegov utjecaj se kvantificira kao smanjenje stope zasićenja za grupe traka nizvodno koje ulaze u segment. Postupak za procjenu utjecaja šok-vala na urbane ulične segmente opisan je u HCM poglavlju 29, odjeljak 3, "Urbani ulični segmenti: Dopuna". Ovaj čimbenik prilagodbe je dio većeg postupka procjene. Čimbenik ima vrijednost 1,0 ako ne dolazi do šok-vala [1].

Čimbenik prilagodbe za pješake i bicikle pri lijevom skretanju f_{Lpb} i čimbenik prilagodbe za pješake i bicikliste pri desnom skretanju f_{Rpb} temelji se na konceptu zauzeća konfliktne zone. Ovaj koncept razmatra konflikte između vozila koja skreću, pješaka i bicikala, te uključuje i potencijalni konflikt sa suprotnim tokom vozila kod manevra lijevog skretanja. Udio vremena zelenog signalnog pojma tijekom kojeg je konfliktna zona zauzeta određuje se na temelju relevantnog zauzeća i broja prihvatnih traka za vozila koja skreću. Ako nema prisutnih pješaka ili bicikala, ovi čimbenici imaju vrijednost 1,0 [1].

Smjernice za određivanje čimbenika prilagodbe za pješake i bicikliste za grupe traka koje služe manevrima skretanja lijevo [4]:

- ako nema konfliktnih pješaka, čimbenik f_{Lpb} iznosi 1,0;
- ako se grupa traka nalazi na dvosmjernoj ulici i koristi se zaštićeni način rada ili podijeljene faze, čimbenik f_{Lpb} iznosi 1,0;
- ako se grupa traka nalazi jednosmjernoj ulici, tada se postupak 1 opisan u nastavku primjenjuje za izračun f_{Lpb} ;
- ako se grupa traka nalazi na dvosmjernoj ulici i koristi se dozvoljeni način rada ili kombinirani dozvoljeni i zaštićeni način rada, tada se koristi postupak 2 za izračunavanje f_{Lpb} .

Smjernice za određivanje čimbenika prilagodbe za pješake i bicikliste za grupe traka koje služe manevrima desnog skretanja [4]:

- ako nema konfliktnih pješaka ili biciklista, čimbenik f_{Rpb} iznosi 1,0;
- ako se koristi zaštićeni način rada, čimbenik f_{Rpb} iznosi 1,0;
- ako se koristi dozvoljeni način rada ili kombinirani dozvoljeni i zaštićeni način rada, tada se primjenjuje postupak 1 za izračunavanje f_{Rpb} .

Postupak 1: Desna i lijeva skretanja s jednosmjerne prometnice

Korak A: Određivanje stope protoka pješaka tijekom vremena usluge

Postupak zahtijeva poznavanje trajanja faze i duljine ciklusa, a ako ove varijable nisu poznate i raskrižje je unaprijed programirano, tada se može koristiti postupak opisan u [4], naslova „Trajanje unaprijed programirane faze“. Ako je raskrižje aktivirano, tada se prosječno trajanje faze i duljina ciklusa mogu izračunati koristeći postupak opisan u [4], naslova „Trajanje aktivirane faze“. Stopa protoka pješaka tijekom vremena usluge pješaka izračunava se prema (8) [4].

$$v_{pedg} = v_{ped} \cdot \frac{C}{g_{ped}} \leq 5.000 \quad (8)$$

gdje je:

- v_{pedg} – stopa protoka pješaka tijekom vremena usluge pješaka [pj/h];
- v_{ped} – stopa protoka pješaka na predmetnom privozu (hodanje u oba smjera) [pj/h];
- C – trajanje ciklusa [s];
- g_{ped} – vrijeme usluge pješaka [s].

Ako je faza koja pruža uslugu pješacima aktivirana, ima semafor za pješake i nije omogućen odmor tijekom hodanja, tada je vrijeme usluge pješaka jednako ili manje od (a) efektivno zeleno vrijeme za fazu ili (b) zbroj postavki za hodanje i čišćenje pješaka [tj. $g_{ped} = \min(g, Walk + PC)$]. Vrijeme usluge pješaka može se pretpostaviti jednako efektivnom zelenom vremenu za fazu (tj. $g_{ped} = g$) [4].

Korak B: Određivanje prosječne zauzetosti pješaka

Ako je stopa protoka pješaka tijekom vremena usluge za pješake 1.000 [pj/h] ili manje, primjenjuje se (9) za izračun zauzetosti pješaka [4].

$$OCC_{pedg} = \frac{v_{pedg}}{2.000} \quad (9)$$

gdje je:

OCC_{pedg} – zauzetost pješaka;

v_{pedg} – stopa protoka pješaka tijekom vremena usluge pješaka [pj/h].

Ako stopa protoka pješaka tijekom vremena usluge premašuje 1.000 [pj/h] primjenjuje se (10) za izračun zauzetosti pješaka, a praktično gornje ograničenje iznosi 5.000 [pj/h] [4].

$$OCC_{pedg} = 0,4 + \frac{v_{pedg}}{10.000} \leq 0,90 \quad (10)$$

Korak C: Određivanje stope protoka biciklista tijekom zelenog svjetla, prema (11) [4].

$$v_{bicg} = v_{bic} \cdot \frac{C}{g} \leq 1.900 \quad (11)$$

gdje je:

v_{bicg} – stopa protoka biciklista tijekom zelene faze [bicikli/h];

v_{bic} – stopa protoka biciklista [bicikli/h];

C – trajanje ciklusa [s];

g – efektivno zeleno vrijeme [s].

Korak D: Određivanje prosječne zauzetosti biciklista, primjenom (12), praktično gornje ograničenje iznosi 1.900 [bicikla/h] [4].

$$OCC_{bicg} = 0,02 + \frac{v_{bicg}}{2.700} \quad (12)$$

gdje je:

OCC_{bicg} – zauzetost biciklista;

v_{bicg} – stopa protoka biciklista tijekom zelene faze [bicikli/h].

Korak E: Određivanje zauzetosti relevantne zone konflikta

Za manevre skretanja desno bez ometanja biciklista ili manevre skretanja lijevo s jednosmjerne prometnice primjenjuje se (13), a temelji se na pretpostavkama da (a) aktivnost prelaska pješaka odvija se tijekom razdoblja povezanog s g_{ped} i (b) prelazak se ne odvija tijekom zelenog razdoblja $g - g_{ped}$, kada to razdoblje postoji. Za manevre skretanja desno s ometanjem pješaka i biciklista primjenjuje se (14) [4].

$$OCC_r = \frac{g_{ped}}{g} \cdot OCC_{pedg} \quad (13)$$

$$OCC_r = \left(\frac{g_{ped}}{g} \cdot OCC_{pedg} \right) + OCC_{bicg} - \left(\frac{g_{ped}}{g} \cdot OCC_{pedg} \cdot OCC_{bicg} \right) \quad (14)$$

gdje je:

OCC_r – zauzetost relevantne zone konflikta;

- g_{ped} – vrijeme usluge pješaka [s];
- g – efektivno trajanje zelenog svjetlosnog pojma [s];
- OCC_{pedg} – zauzetost pješaka;
- OCC_{bicg} – zauzetost biciklista.

Korak F: Određivanje vremena nezauzetosti relevantne zone konflikta

Ako je broj traka za uplitanje na poprečnoj cesti jednak broju traka za skretanje, tada vozila koja skreću neće moći manevrirati oko pješaka ili biciklista, a vrijeme dok je zona slobodna izračunava se primjenom (15). Ako broj uplitajućih traka premašuje broj trakova za skretanje, vozila koja skreću će vjerojatnije manevrirati oko pješaka ili biciklista pa je njihov utjecaj na zasićenje prometa niži, a vrijeme dok zona konflikta nije zauzeta izračunava se prema (16) [4].

$$A_{pbT} = 1 - OCC_r \quad (15)$$

$$A_{pbT} = 1 - 0,6 \cdot OCC_r \quad (16)$$

gdje je:

- A_{pbT} – nezauzetost relevantne zone konflikta;
- OCC_r – zauzetost relevantne zone konflikta.

Korak G: Određivanje čimbenika prilagodbe za pješake i bicikliste.

Za manevar desnog skretanja u ekskluzivnoj traci primjenjuje se (17) za izračun čimbenika prilagodbe za pješake i bicikliste. Za zaštićeni i dozvoljeni manevar u ekskluzivnoj traci čimbenik iz (17) primjenjuje se za izračun prilagođene stope zasićenja za zaštićeno razdoblje. Za manevre lijevih skretanja s jednosmjernih prometnica primjenjuje se (18) za izračun čimbenika prilagodbe za pješake [4].

$$f_{Rpb} = A_{pbT} \quad (17)$$

$$f_{Lpb} = A_{pbT} \quad (18)$$

gdje je:

- f_{Rpb} – čimbenik prilagodbe za pješake i bicikliste pri desnom skretanju;
- f_{Lpb} – čimbenik prilagodbe za pješake i bicikliste pri lijevom skretanju;
- A_{pbT} – nezauzetost relevantne zone.

Postupak 2: Dozvoljeni i zaštićeno-dozvoljeni manevri skretanja lijevo na dvosmjernoj prometnici.

Za primjenu postupka 2 potrebno je izračunati korake A i B iz postupka 1 (u koraku A zamijeniti efektivno zeleno vrijeme g_{ped} za g). Postupak ne uzima u obzir konflikt vozila i biciklista tijekom manevra lijevog skretanja.

Korak A: Izračun zauzetosti pješaka nakon čišćenja suprotstavljene kolone vozila.

Zauzetost pješaka nakon čišćenja suprotstavljene kolone vozila izračunava se primjenom (19). Vrijeme usluge suprotstavljene kolone g_q izračunava se kao efektivno

dozvoljeno zeleno vrijeme g_p umanjeno za trajanje dozvoljenog vremena za skretanje lijevo koje nije blokirano suprotnom kolonom g_u (tj. $g_q = g_p - g_u$). Ako je $g_q < g_{ped}$, primjenjuje se (19), a u suprotnom zauzetost pješaka nakon čišćenja suprotstavljene kolone vozila iznosi 0 [4].

$$OCC_{pedu} = OCC_{pedg} \left(1 - \frac{0,5 \cdot g_q}{g_{ped}} \right) \quad (19)$$

gdje je:

- OCC_{pedu} – zauzetost pješaka nakon čišćenja suprotstavljene kolone;
- OCC_{pedg} – zauzetost pješaka;
- g_q – vrijeme usluge suprotstavljene kolone [s];
- g_{ped} – vrijeme usluge pješaka [s];

Ako se vrijeme usluživanja suprotstavljene kolone vozila g_q izjednači ili premaši vrijeme usluživanja pješaka g_{ped} , tada suprotstavljena kolona vozila konzumira cijelo vrijeme usluživanja pješaka [4].

Korak B: Određivanje zauzetosti relevantne zone konflikta

Nakon raščišćavanja suprotstavljenog repa čekanja, vozila koja skreću lijevo završavaju svoj manevar na temelju prihvaćanja vremenskih praznina u suprotnom prometnom toku. Zauzetost relevantne zone konflikta funkcija je vjerojatnosti prihvaćanja vremenskih praznina i zauzetosti pješaka, a izračunava se prema (20).

$$OCC_r = \frac{g_{ped} - g_q}{g_p - g_q} \cdot (OCC_{pedu}) \cdot e^{-5,00 \cdot v_o / 3.600} \quad (20)$$

gdje je:

- OCC_r – zauzetost relevantne zone konflikta;
- OCC_{pedu} – zauzetost pješaka nakon čišćenja suprotstavljene kolone;
- v_o – protok vozila suprotstavljenih manevru [voz/h];
- g_{ped} – vrijeme usluge pješaka [s];
- g_p – efektivno trajanje zelenog svjetla za dopušteno skretanje lijevo [s].

Protok vozila suprotstavljenih manevru v_o određuje se kao jedan od dva slučaja. U prvom slučaju v_o je zbroj volumena suprotstavljenih protoka ravno i desno. U drugom slučaju v_o je volumen suprotstavljenog protoka ravno. Drugi slučaj primjenjuje se kada na suprotnom privozu postoji manevar ravno i kada se primjenjuje jedan od sljedećih uvjeta: (a) postoji ekskluzivna traka za skretanje desno na suprotnom privozu i analitičar po izboru navodi da ta traka ne utječe na prihvaćanje vremenskih praznina od strane vozača koji skreću lijevo, ili (b) na suprotnom privozu nema manevra skretanja desno. Prvi slučaj primjenjuje se kada ne vrijedi drugi slučaj. Kada na suprotnom privozu postoji ekskluzivni trak za skretanje desno, zadani je uvjet pretpostaviti da navedena traka utječe na prihvaćanje vremenskih praznina od strane vozača koji skreću lijevo. Odluka da ekskluzivna traka za desno skretanje ne utječe na prihvaćanje praznina trebala bi se temeljiti na poznavanju lokalnog ponašanja vozača, prometnih uvjeta i geometrije raskrižja [4].

Korak C: Određivanje vremena nezauzetosti relevantne zone konflikta

Za određivanje nezauzetosti relevantne zone primjenjuju se (15) i (16). Ako je broj traka za uplitanje jednak broju traka za skretanje primjenjuje se (15), ako broj traka za uplitanje premašuje broj traka za skretanje primjenjuje se (16).

Korak D: Određivanje čimbenika prilagodbe za pješake i bicikliste. Za određivanje se primjenjuje (18).

e) Određivanje omjera dolazaka tijekom zelenog signalnog pojma

Prosječno vrijeme kašnjenja i duljina repa čekanja na signaliziranom raskrižju uveliko ovise o omjeru vozila koja pristižu tijekom zelenih i crvenih signalnih pojmova. Prosječno vrijeme kašnjenja i duljina repa čekanja manji su kada veći postotak vozila dolazi tijekom zelenog signalnog pojma. Kašnjenje i rep čekanja manji su kada veći postotak vozila dolazi tijekom zelenih signalnih pojmova. Za izračunavanje omjera dolazaka vozila tijekom zelenog signalnog pojma za svaku grupu trakova primjenjuje se (21) [1].

$$P = R_p \cdot \frac{g}{C} \quad (21)$$

gdje je:

- P – postotak vozila koja dolaze tijekom zelenog signalnog pojma [decimalno];
- R_p – čimbenik prilagodbe progresije;
- g – efektivno zeleno vrijeme [s];
- C – trajanje ciklusa [s].

Jednadžba (21) zahtijeva poznavanje efektivnog vremena zelenog svjetla i duljine trajanja ciklusa, a što je poznato za vremenski ustaljeno upravljanje prometom. Za raskrižja bez unaprijed određenog trajanja ciklusa, postupak se računa prema koracima iz HCM-a, Poglavlje 30, odjeljak 3. Ovaj postupak se koristi za procjenu profila dolaznog toka na privozu raskrižju, posebno kada se taj prilaz evaluira kao dio urbano-uličnog segmenta. Postupak uključuje korištenje profila prometa za izračun omjera dolazaka vozila tijekom zelenih svjetlosnih signala pojmova [1].

f) Određivanje trajanja ciklusa

Trajanje ciklusa varira ovisno o vrsti kontrole prometa na odabranom raskrižju. Za raskrižja s vremenski ustaljenom kontrolom, trajanje faze je unaprijed poznato, te se nastavlja s korakom određivanja kapaciteta i stupnja zasićenja. U slučajevima kada trajanje ciklusa nije poznato, može se koristiti postupak procjene trajanja ciklusa za vremenski ustaljenu kontrolu opisanu u [4], odjeljku 2 [1].

Za raskrižja s upravljanim kontrolom, koristi se postupak za određivanje trajanja ciklusa opisan u [4], odjeljku 2, koji procjenjuje prosječno trajanje ciklusa. Ovaj postupak razlikuje različite vrste upravljane kontrole, uključujući nekoordiniranu i koordiniranu kontrolu [1].

g) Određivanje kapaciteta i stupnja zasićenja

Kapacitet grupe traka namijenjene jednom smjeru prometa bez dopuštenih lijevih skretanja izračunava se primjenom (22) [1].

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} \quad (22)$$

gdje je:

- c – kapacitet vozila [voz/h];
- N – broj trakova u grupi traka;
- s – prilagođena stopa zasićenja protoka [voz/h/trak];
- g – efektivno zeleno vrijeme [s];
- C – trajanje ciklusa [s].

Jednadžba (22) nije primjenjiva za izračunavanje kapaciteta grupa traka koje dijele traku ili grupu traka s dopuštenim kretanjem, jer na njihov kapacitet utječu drugi čimbenici. Za procjenu kapaciteta takvih grupa traka, odgovarajući postupak je naveden u [4].

Stupanj zasićenja za grupu traka definira se kao omjer volumena grupe traka i njenog kapaciteta, i izračunava se prema (23) [1].

$$X = \frac{v}{c} \quad (23)$$

gdje je:

- X – stupanj zasićenja;
- v – volumen prometa [voz/h];
- c – kapacitet vozila [voz/h].

Tijekom ovog koraka računa se i kritični stupanj zasićenja na raskrižju. Smjernice za izračun ovog parametra dostupne su u [1], odjeljku 4.

h) Određivanje vremena kašnjenja

Kašnjenje izračunano u ovom koraku odnosi se na prosječno vrijeme kašnjenja koje doživljavaju sva vozila koja pristignu tijekom analiziranog razdoblja. Ovo uključuje kašnjenja koja vozila doživljavaju ako se još uvijek nalaze u repu čekanja na kraju analiziranog razdoblja. Prosječno vrijeme kašnjenja za određenu grupu traka izračunava se prema (24) [1].

$$d = d_1 + d_2 + d_3 \quad (24)$$

gdje je:

- d – prosječno vrijeme kašnjenja [s/voz];
- d_1 – uniformno kašnjenje [s/voz];
- d_2 – inkrementalno kašnjenje [s/voz];
- d_3 – inicijalno kašnjenje repa čekanja [s/voz].

U [4] opisana je metoda za mjerenje vremena kašnjenja na području istraživanja [1].

Uniformno vrijeme kašnjenja za grupu traka koja služi jednom smjeru prometa bez dopuštenih kretanja izračunava se prema (25) uz primjenu (26) i (27) za izračun čimbenika prilagodbe progresije i omjera protoka [1].

$$d_1 = PF \cdot \frac{0,5 \cdot C(1 - g/C)^2}{1 - [\min(1, X) \cdot g / C]} \quad (25)$$

$$PF = \frac{1 - P}{1 - g/C} \cdot \frac{1 - y}{1 - \min(1, X) \cdot P} \cdot \left[1 + y \cdot \frac{1 - P \cdot g/C}{1 - g/C} \right] \quad (26)$$

$$y = \min(1, X) \cdot g/C \quad (27)$$

gdje je:

- d_1 – uniformno vrijeme kašnjenja [s/voz];
- PF – čimbenik prilagodbe progresije;
- y – omjer protoka;
- X – stupanj zasićenja;
- P – udio vozila koja dolaze tijekom zelenog signalnog pojma [decimalno];
- g – efektivno zeleno vrijeme [s];
- C – trajanje ciklusa [s].

Jednadžba (25) ne omogućuje točnu procjenu uniformnog kašnjenja za grupe traka koje dijele traku ili imaju dopuštena kretanja, jer na kašnjenje utječu dodatni čimbenici. Također, nije točna za procjenu uniformnog kašnjenja kada na raskrižju postoji početni rep čekanja za jedan ili više smjerova na raskrižju. Za precizno procjenjivanje uniformnog kašnjenja u ovakvim uvjetima potrebno je koristiti postupak opisan u [1], odjeljku 4.

Inicijalno kašnjenje je dodatno kašnjenje uzrokovano početnim repom čekanja, nastalim zbog nezadovoljene potražnje iz prethodnog perioda. Ovo kašnjenje ne obuhvaća vozila koja se nađu u repu čekanja zbog nasumičnih fluktuacija u potražnji koja povremeno premašuju kapacitet. Ako na početku analiziranog razdoblja nema početnog repa čekanja za bilo koju grupu traka na raskrižju, inicijalno kašnjenje iznosi 0,0 sekundi po vozilu. Metodologija za procjenu kašnjenja za grupe traka s prisutnim početnim repom čekanja opisana je u [1], odjeljku 4 [1].

Inkrementalno vrijeme kašnjenja uključuje varijablu k (čimbenik inkrementalnog kašnjenja) koji se izračunava prema (28), a koji odražava utjecaj vrste kontrolera semafora na vrijeme kašnjenja. Vrijednost ovog čimbenika varira od 0,04 do 0,50, s preporukom korištenja čimbenika 0,50 za faze s vremenski ustaljenom kontrolom, usklađenim fazama i fazama postavljenim na engl. recall-to-maximum [1].

Prometno ovisno upravljanje omogućava prilagodbu trajanja zelene faze od ciklusa do ciklusa radi zadovoljavanja prometne potražnje, čime se smanjuje učestalost neuspjeha ciklusa. Ova sposobnost je ograničena samo kada je zelena faza produžena do svog maksimalnog limita. Utjecaj prometno ovisnog upravljanja na kašnjenje uzima se u obzir u (28), uz primjenu (29) do (31) [1].

$$k = (1 - 2k_{min})(v/c_a - 0,5) + k_{min} \leq 0,50 \quad (28)$$

$$k_{min} = -0,375 + 0,354 \cdot PT - 0,0910 \cdot PT^2 + 0,00889 \cdot PT^3 \geq 0,04 \quad (29)$$

$$c_a = \frac{g_a \cdot s \cdot N}{C} \quad (30)$$

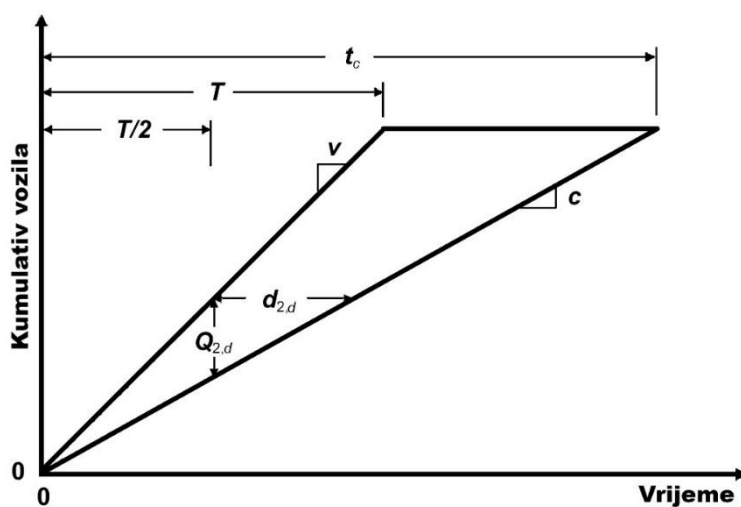
$$g_a = G_{max} + Y + R_C - l_1 - l_2 \quad (31)$$

gdje je:

- k – čimbenik inkrementalnog kašnjenja;
- c_a – dostupni kapacitet za grupu traka usluženu fazom prometno ovisnog upravljanja [voz/h];
- k_{min} – minimalni čimbenik inkrementalnog kašnjenja;
- PT – postavka vremena prolaza [s];
- G_{max} – postavka maksimalnog trajanja zelene faze[s];
- g_a – dostupno efektivno zeleno vrijeme [s];
- N – broj trakova u grupi traka;
- s – prilagođena stopa zasićenja toka [voz/h/trak];
- C – trajanje ciklusa [s].

Vrijednost čimbenika inkrementalnog kašnjenja ovisi o maksimalnom trajanju zelene faze i postavci vremena prolaza koje kontrolira određenu grupu traka. Istraživanja su pokazala da kraća vremena prolaza dovode do niže vrijednosti čimbenika i manjeg kašnjenja, pod uvjetom da vrijeme prolaza nije prekratko te ne dovodi do završetka faze prije nego što se obradi cijeli rep čekanja [1].

Inkrementalno vrijeme kašnjenja uključuje dvije komponente kašnjenja. Prva je povezana s kašnjenjem uslijed nasumičnih fluktuacija potražnje iz ciklusa u ciklus, koje povremeno premašuju kapacitet, što rezultira povremenim preljevom repa čekanja na kraju zelene faze (tj. neuspješni ciklus). Druga komponenta kašnjenja povezana je s trajnim prekapacitiranjem tijekom analiziranog razdoblja, što se događa kada ukupna potražnja tijekom analiziranog razdoblja premašuje ukupni kapacitet. Ova komponenta se ponekad naziva determinističkom komponentom kašnjenja i označena je kao varijabla $d_{2,d}$ na slici 2 [1].



Slika 2. Kumulativ dolazaka i odlazaka tijekom prezasićenog perioda analize [1]

Slika 2 ilustrira rast repa čekanja koji nastaje dok vozila pristižu brzinom protoka v tijekom analiziranog razdoblja T s kapacitetom c . Deterministička komponenta kašnjenja, prikazana trokutastim područjem omeđenim debelom linijom, povezana je s prosječnim kašnjenjem po vozilu, označenim kao $d_{2,d}$. Posljednje vozilo koje stigne tijekom analiziranog razdoblja prikazano je kako čisti rep čekanja t_c satima nakon početka razdoblja. Prosječna veličina repa čekanja povezana s ovim kašnjenjem prikazana je kao $Q_{2,d}$. Rep čekanja na kraju analiziranog razdoblja, označen kao $[= T(v - c)]$, naziva se rezidualni rep čekanja [1].

Inkrementalno vrijeme kašnjenja uključuje kašnjenje uzrokovano nasumičnom varijacijom broja dolazaka iz ciklusa u ciklus, kao i kašnjenje zbog potražnje koja premašuje kapacitet tijekom analiziranog razdoblja, poznato kao nepokrivena potražnja. Jednadžba (32) za izračun inkrementalnog kašnjenja izvedena je pod pretpostavkom da nema početnog repa čekanja zbog nepokrivene potražnje [1].

$$d_2 = 900 \cdot T \left[(X_A - 1) + \sqrt{(X_A - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X_A}{c_A \cdot T}} \right] \quad (32)$$

$$X_A = v/c_A \quad (33)$$

gdje je:

- d_2 – inkrementalno vrijeme kašnjenja [s/voz];
- k – čimbenik inkrementalnog kašnjenja;
- I – čimbenik prilagodbe filtracije uzvodno;
- c_A – prosječni kapacitet grupe traka [voz/h];
- X_A – prosječni omjer volumen-kapacitet;
- T – period analize [h] (za cijeli sat $T=1$, za 15 min $T=0,25$).

Varijabla c_A nije ista kao varijabla c koja je izračunana u (22), osim u slučaju kada niti jedna grupa traka na raskrižju nema početni rep čekanja. U tom slučaju, prosječni kapacitet grupe traka c_A jednak je kapacitetu c . Izraz za inkrementalno kašnjenje primjenjiv je na sve vrijednosti X_A , uključujući i situacije s visokim stupnjem prezasićenja grupa traka [1].

U prvom koraku izračuna inicijalnog vremena kašnjenja, inicijalni rep čekanja svake grupe kretanja pretvara se u inicijalni rep čekanja svake grupe traka. Kad postoji izravna korelacija između grupe kretanja i grupe traka, inicijalni rep čekanja grupe traka jednak je inicijalnom repu čekanja grupe kretanja. Kada postoji zajednička traka na privozu s više traka, tada se uneseni inicijalni rep čekanja treba distribuirati među grupama traka koje služe kretanjima koja dijele traku. Inicijalni rep čekanja svake grupe traka procjenjuje se kao jednak unesenom inicijalnom repu čekanja pomnoženom s brojem traka u grupi traka i podijeljenom s ukupnim brojem zajedničkih i prolaznih traka. U ovom koraku potrebno je za svaku grupu traka ponovno izračunati zasićeni protok, trajanje faze, kapacitet i uniformno kašnjenje. Kada se ove varijable izračunavaju za grupu traka s inicijalnim repom čekanja, stopa dolaznog toka za grupu traka se uvećava tako da odgovara kapacitetu grupe traka. Preostale grupe traka će imati postavljenu stopu dolaznog toka jednakoj manjoj vrijednosti između ulazne stope toka potražnje ili kapaciteta [1].

Potreba za ponovnim izračunavanjem varijabli proizlazi iz utjecaja koji jedna grupa traka ima na rad ostalih grupa traka, a izrazito je negativan kada jedna ili više grupa traka radi u zasićenom stanju tijekom dijela analiziranog razdoblja. Ako zasićena grupa traka predstavlja konfliktno kretanje grupi traka koja uključuje dozvoljeno lijevo skretanje, tada će rad grupe traka za lijevo skretanje također biti negativno pogođene. Ako je faza koja služi grupi traka prometno ovisna, tada će njen kapacitet tijekom zasićenog stanja biti drugačiji od onog tijekom naknadnog nezasićenog stanja. Uniformno kašnjenje izračunano tijekom ovog koraka naziva se zasićeno uniformno kašnjenje, a izračunava se za svaku grupu traka koristeći stopu dolaznog toka, kapacitet i trajanje faze određeno prema prethodno navedenim uputama. Trajanje nezadovoljene potražnje izračunava se za svaku grupu traka koristeći (34) ili (35) [1].

ako je $v \geq c_A$ vrijedi:

$$t = T \quad (34)$$

ako je $v < c_A$ vrijedi:

$$t = Q_b / (c_s - v) \leq T \quad (35)$$

gdje je:

- t – trajanje nezadovoljene potražnje tijekom perioda analize [h];
- T – period analize [h];
- Q_b – inicijalni rep čekanja na početku perioda analize [voz];
- v – volumen prometa [voz/h];
- c_s – zasićeni kapacitet prometa [voz/h].

Za ovaj izračun, zasićeni kapacitet c_s jednak je onome koji se dobiva iz poligona akumulacije repa čekanja konstruiranog u ovom koraku i odražava trajanje faze povezane sa zasićenim radom (zbog početnog reda) [1].

Prosječno vrijeme nezadovoljene potražnje izračunava se koristeći (36) [1].

$$t_a = \frac{1}{N_g} \sum_{i \in N_g} t_i \quad (36)$$

gdje je:

- t_a – prosječno trajanje nezadovoljene potražnje tijekom perioda analize [h];
- t_i – trajanje nezadovoljene potražnje za grupu traka i tijekom perioda analize [h];
- N_g – broj grupa traka za koje t iznosi više od 0,0 h.

U drugom koraku prethodno izračunano uniformno kašnjenje d_1 prilagođava se tako da uniformno kašnjenje oslikava prisutnost početnog repa čekanja pri čemu se preimenuje u osnovno uniformno kašnjenje d_{1b} ($d_{1b} = d_1$). Za izračun uniformnog kašnjenja za grupe traka primjenjuju se (37) ako grupa traka i ima inicijalni rep čekanja i (38) ako grupa traka i nema inicijalni repa čekanja [1].

$$d_{1,i} = d_{s,i} \cdot \frac{t_i}{T} + d_{1b,i} \cdot \frac{(T - t_i)}{T} \quad (37)$$

$$d_{1,i} = d_{s,i} \cdot \frac{t_a}{T} + d_{1b,i} \cdot \frac{(T - t_a)}{T} \quad (38)$$

U trećem koraku prosječni kapacitet vozila za svaku grupu traka izračunava se koristeći (39) ako grupa traka i ima inicijalni rep čekanja i (40) ako grupa traka i nema inicijalnog repa čekanja [1].

$$c_{A,i} = c_{s,i} \cdot \frac{t_i}{T} + c_i \cdot \frac{(T - t_i)}{T} \quad (39)$$

$$c_{A,i} = c_{s,i} \cdot \frac{t_a}{T} + c_i \cdot \frac{(T - t_a)}{T} \quad (40)$$

U četvrtom koraku izračunava se za svaku grupu traka inicijalni rep čekanja primjenom (41) i (42) [1].

$$d_3 = \frac{3.600}{v \cdot t} \cdot \left(t_A \cdot \frac{Q_b + Q_e - Q_{eo}}{2} + \frac{Q_e^2 - Q_{eo}^2}{2 \cdot c_A} - \frac{Q_b^2}{2 \cdot c_A} \right) \quad (41)$$

$$Q_e = Q_b + t_A \cdot (v - c_A) \quad (42)$$

ako je $v \geq c_A$ vrijedi:

$$Q_e = T \cdot (v - c_A) \quad (43)$$

$$t_A = T \quad (44)$$

ako je $v < c_A$ vrijedi:

$$Q_{eo} = 0,0 \text{ [voz]} \quad (45)$$

$$t_A = Q_b / (c_A - v) \leq T \quad (46)$$

gdje je:

- d_3 – inicijalno kašnjenje repa čekanja [s/voz];
- v – volumen prometa [voz/h];
- t – trajanje nezadovoljene potražnje tijekom perioda analize [h];
- t_A – prilagođeno trajanje nezadovoljene potražnje tijekom perioda analize [h];
- Q_b – inicijalni rep čekanja na početku perioda analize [voz];
- Q_e – rep čekanja na kraju perioda analize (rezidualni rep čekanja) [voz];
- Q_{eo} – rep čekanja na kraju perioda analize kada je $v \geq c_A$ i $Q_b = 0,0$ [voz];
- c_A – prosječni kapacitet prometa [voz/h].

Posljednje vozilo koje stigne u pretrpani rep čekanja tijekom analiziranog perioda napustit će raskrižje u vremenu dobivenom koristeći (47) [1].

$$t_c = t_A + Q_e / c_A \quad (47)$$

gdje je:

- t_c – vrijeme čišćenja repa čekanja [h];
- t_A – prilagođeno trajanje nezadovoljene potražnje tijekom perioda analize [h];
- Q_e – rep čekanja na kraju perioda analize (rezidualni rep čekanja) [voz];
- c_A – prosječni kapacitet prometa [voz/h].

Vrijednosti uniformnog kašnjenja, inkrementalnog kašnjenja i inicijalnog kašnjenja, koje su izračunane u prethodnim koracima, zbrajaju se prema (24) radi procjene prosječnog vremena kašnjenja za određenu grupu traka [1].

Prosječno vrijeme kašnjenja privoza raskrižju često je važno izračunati. Agregirano kašnjenje se računa kao ponderirani prosjek, gdje se kašnjenje svake grupe traka množi s protokom te grupe traka [1]. Prosječno vrijeme kašnjenja privoza raskrižja izračunava se prema (48).

$$d_{A,j} = \frac{\sum_{i=1}^{m_j} d_i \cdot v_i}{\sum_{i=1}^{m_j} v_i} \quad (48)$$

gdje je:

- $d_{A,j}$ – prosječno vrijeme kašnjenja privoza j [s/voz];
- d_i – prosječno vrijeme kašnjenja za grupu traka i [s/voz];
- m_j – broj grupa trakova na privozu j ;
- v_i – volumen prometa na privozu i [voz/h].

Prosječno vrijeme kašnjenja raskrižja izračunava se prema (49).

$$d_I = \frac{\sum d_i \cdot v_i}{\sum v_i} \quad (49)$$

gdje je:

- d_I – prosječno vrijeme kašnjenja raskrižja [s/voz];
- d_i – prosječno vrijeme kašnjenja za grupu traka i [s/voz];
- v_i – volumen prometa na privozu i [voz/h].

Pri izračunavanju agregiranog kašnjenja, nesignalizirani manevri na signaliziranom raskrižju trebaju biti uzeti u obzir. Postupak uključivanja nesignaliziranih pokreta u agregirano kašnjenje privoza i raskrižja slijedi ove smjernice:

- kašnjenje nesignaliziranih kretanja treba biti uključeno u izračune agregiranog kašnjenja pristupa i raskrižja prema (48) i (49), osim u posebno označenim slučajevima;
- ako se kašnjenje nesignaliziranih kretanja uključi u prosječna kašnjenja privoza i raskrižja, bilo da je nula ili različita od nule, rezultirajuće agregirano kašnjenje treba biti označeno fusnotom koja ukazuje na to uključivanje;
- ako kašnjenje nesignaliziranih kretanja nije uključeno u agregirane sume, tj. nije uključeno ni u brojnik niti u nazivnik jednadžbi (48) ili (49), isključivanje treba jasno označiti fusnotom [1].

i) Određivanje razine usluge

Za određivanje razine usluge za svaku grupu traka, svaki privoz i raskrižje u cjelini koristi se tablica 8. Razina usluge služi kao pokazatelj prihvatljivosti razine kašnjenja za vozače na raskrižju i može također ukazivati na neprihvatljive prezasićene operacije za pojedine grupe traka [1].

Tablica 8. Razina usluge semaforiziranih raskrižja [1]

Prosječno vrijeme kašnjenja [s/voz]	Razina usluge prema stupnju zasićenja	
	$X \leq 1,0$	$X > 1,0$
≤ 10	A	F
$> 10-20$	B	F
$> 20-35$	C	F
$> 35-55$	D	F
$> 55-80$	E	F
> 80	F	F

j) Određivanje omjera rezerve repa čekanja

Postupak za procjenu veličine kraja repa čekanja i omjera rezerve repa čekanja detaljno je opisan u [4], odjeljak 4. Položaj kraja repa čekanja određuje se kao položaj vozila koje se zaustavilo najdalje od crte zaustavljanja tijekom ciklusa zbog crvenog svjetlosnog pojma. Veličina repa čekanja ovisi o uzorku dolazaka vozila i broju vozila koja nisu prošla raskrižje tijekom prethodnog ciklusa [1].

Omjer rezerve repa čekanja odražava koliki dio dostupnog prostora za pohranu repa čekanja je zauzet u trenutku ciklusa kada se dostigne kraj repa. Ako omjer premaši 1,0, prostor za pohranu će se preliti, što može dovesti do toga da vozila u repu blokiraju druga vozila, sprječavajući njihovo kretanje [1].

4. Analiza nesemaforiziranih raskrižja primjenom metodologije HCM-a

U ovom poglavlju obrađeni su potrebni ulazni podaci i koraci proračuna za analizu nesemaforiziranih raskrižja u razini, gdje je prometnim znakom obaveznog zaustavljanja određen glavni i sporedni tok prometa.

4.1. Ulazni podaci za analizu nesemaforiziranih raskrižja

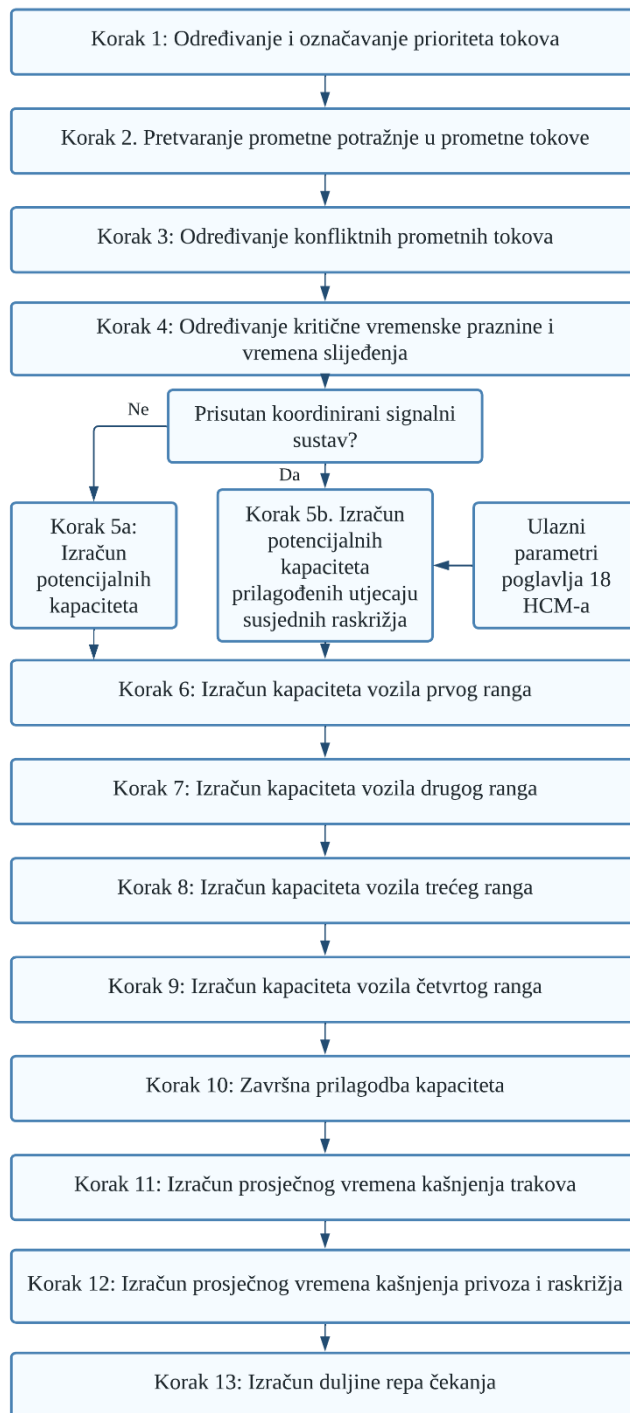
Potrebni ulazni podaci, potencijalni izvori i predložene vrijednosti za analizu nesemaforiziranih raskrižja primjenom metodologije HCM-a prikazani su u tablici 9.

Tablica 9. Potrebni ulazni podaci, potencijalni izvori i predložene zadane vrijednosti za analizu nesemaforiziranih raskrižja [2]

Potrebni podaci i jedinice	Potencijalni izvori podataka	Predložena zadana vrijednost
Geometrijski podaci		
Broj i konfiguracija prometnih traka za svaki privoz	Projektni planovi, dokumentacija cesta	Potrebno osigurati
Nagibi privoza	Projektni planovi, dokumentacija cesta	0%
Specijalni geometrijski čimbenici kao što su: <ul style="list-style-type: none"> • posebnosti kanalizacije prometa; • postojanje dvosmjernih traka za skretanje lijevo ili uzdignutih ili označenih središnjih pohrana (ili oboje); • postojanje proširenja privoza na sporednoj cesti; • postojanje uzvodnih semafora 	Projektni planovi, dokumentacija cesta	Potrebno osigurati
Podatci o potražnji		
Očekivanja prometna potražnja [voz/h] i faktor vršnog sata ili satni protok vozila [voz/h]	Terenski podaci, modeliranje	Potrebno osigurati
Period analize	Zadano od analitičara	15 min [0,25 sati]
Faktor vršnog sata [decimalno]	Terenski podaci	0,92
Udio teških teretnih vozila [%]	Terenski podaci	3%
Stopa zasićenja za provoz na glavnom privozu (za analizu zajedničkih ili kratkih trakova za lijevo skretanje na glavnom privozu)	Terenski podaci	1800 [voz/h]
Stopa zasićenja za desno skretanje na glavnom privozu (za analizu zajedničkih ili kratkih trakova za lijevo skretanje na glavnom privozu)	Terenski podaci	1500 [voz/h]

4.2. Proračunski koraci za nesemaforizirana raskrižja

Proračunski koraci za analizu nesemaforiziranih raskrižja prema metodologiji HCM-a prikazani su na slici 3, a načini primjene pojedinog koraka prikazat će se u nastavku rada.



Slika 3. Proračunski koraci za analizu nesemaforiziranih raskrižja [2]

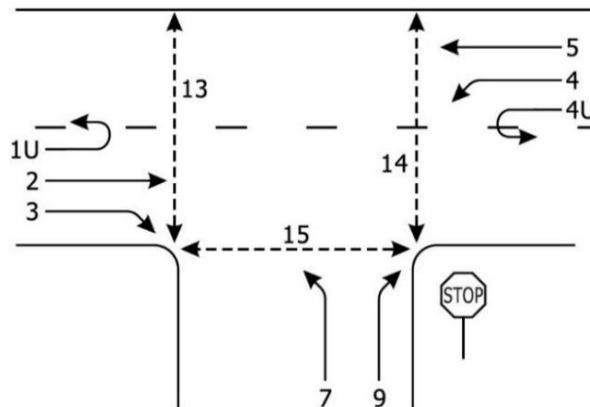
Primjena navedenih proračunskih koraka rezultirat će izlaznim podacima o prosječnom vremenu kašnjenja za trakove, privoze i raskrižje za koje se određuje razina usluge, te duljini repa čekanja za trakove.

a) Određivanje i označavanje prioriteta prometnih tokova

Za analizu prometnih tokova na nesemaforiziranom raskrižju, prvo je potrebno identificirati i rangirati maneuvre prometnih tokova. Ova analiza se temelji na korištenju vremenskih praznina od strane vozila. Proračuni se moraju obavljati prema redosljedu koji odražava prioritete u korištenju vremenskih praznina:

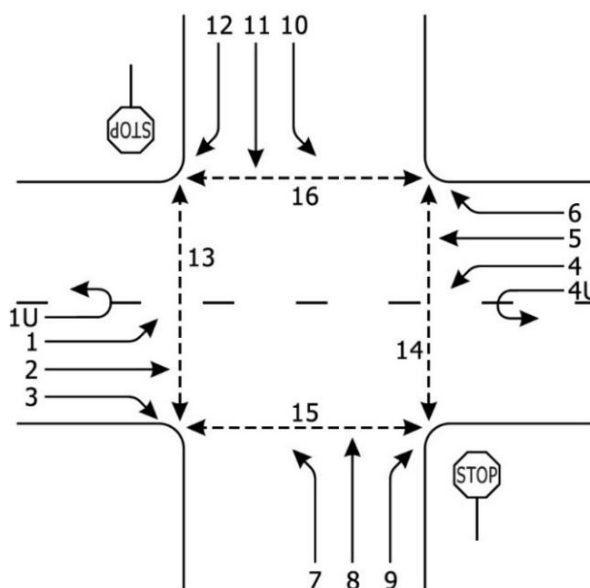
1. lijevo skretanje s glavnog privoza;
2. desno skretanje sa sporednog privoza;
3. polukružno okretanje na glavnom privozu;
4. ravno kretanje na sporednom privozu;
5. lijevo skretanje na sporednom privozu [2].

Na slici 4 prikazano je označavanje prometnih tokova na trokrakom nesemaforiziranom raskrižju.



Slika 4. Prometni tokovi na trokrakom nesemaforiziranom raskrižju [2]

Na slici 5 prikazano je označavanje prometnih tokova na četverokrakom nesemaforiziranom raskrižju.



Slika 5. Prometni tokovi na četverokrakom nesemaforiziranom raskrižju [2]

b) Pretvaranje prometne potražnje u prometne tokove

Za analizu postojećih prometnih uvjeta kada se vršno 15-minutno prometno opterećenje može izmjeriti u stvarnim uvjetima, kapacitet prometnice za vršno 15-minutno razdoblje pretvara se u vršni 15-minutni protok množenjem s 4 [2].

U slučaju analize projiciranih uvjeta ili kada 15-minutni prometni podatci nisu dostupni, satni kapacitet prometnice za određeni manevar pretvara se u vršni 15-minutni protok koristeći faktor vršnog sata prema (50) [2].

$$v_i = \frac{V_i}{PHF} \quad (50)$$

gdje je:

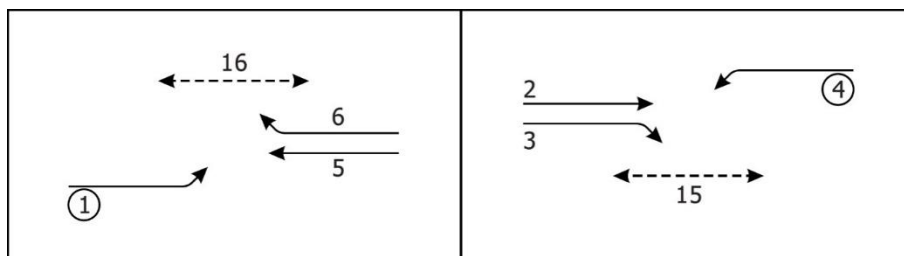
- v_i – protok za manevar i [voz/h];
- V_i – kapacitet za manevar i [voz/h];
- PHF – faktor vršnog sata za raskrižje.

c) Određivanje konfliktnih prometnih tokova

Svaki manevar na nesemaforiziranom raskrižju ima svoje specifične konflikte, ovisno o vrsti manevara. Detaljno su opisane skupine konflikata za svaki manevar na takvom raskrižju. U nastavku su prikazane jednadžbe i ilustracije za izračunavanje parametra $v_{c,x}$, koji predstavlja protok u konfliktu s određenim manevarom x , odnosno ukupni protok koji je u konfliktu s tim manevarom [2].

Pješački promet stvara konflikte s vozilima na raskrižju. Protoci pješaka, označeni kao v_x , gdje x predstavlja privoz raskrižja koji pješaci prelaze, trebaju se smatrati dijelom konfliktnih tokova. Uključivanje pješačkih tokova je važno jer oni utječu na početak ili završetak vremenskih praznina koje su dostupne za manevre s manjim intenzitetom prometa. Ovaj pristup tretira pješake i vozila jednako, prepoznajući specifičnosti pješačkog prometa [2].

Lijeva skretanja s glavnog privoza na nesemaforiziranim raskrižjima prioritizirana su kao manevri drugoga ranga, a to uključuje manevar 1 i 4.



Slika 6. Prikaz konfliktnih tokova za lijeva skretanja na glavnom privoza [2]

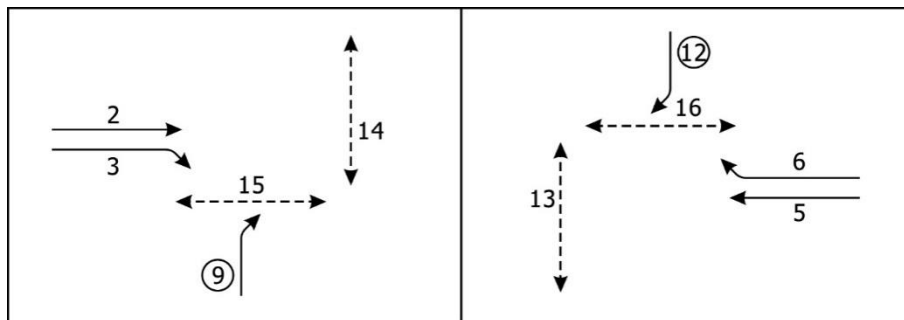
Konflikti u ovim manevrima prikazani su na slici 6, a konfliktni prometni tok se računa primjenom (51) i (52). Ovi konflikti nastaju jer vozila koja skreću ulijevo s glavnog privoza moraju propustiti provozni promet i desna skretanja iz suprotnog glavnog privoza [2].

$$v_{c,1} = v_5 + v_6 + v_{16} \quad (51)$$

$$v_{c,4} = v_2 + v_3 + v_{15} \quad (52)$$

Metoda ne radi razliku između konflikata koji nastaju zbog križanja i uplitanja tokova. Vozila koja skreću lijevo s glavnog privoza i ona koja skreću desno iz suprotnog glavnog privoza sa suprotne strane tretiraju se kao uplitanja, neovisno o broju traka na izlaznom privozu. Ako je desno skretanje na glavnom privozu fizički odvojeno s trokutastim otokom i označeno prometnim znakovima trokuta „Raskrižje s prednošću prolaska“ ili osmerokuta STOP „Obavezno zaustavljanje“, pretpostavlja se da su v_6 i v_3 u (51) i (52) jednaki nuli [2].

Desna skretanja sa sporednog privoza na nesemaforiziranim raskrižjima prioritizirana su kao manevri drugoga ranga, a to uključuje manevar 9 i 12.



Slika 7. Prikaz konfliktnih tokova za desno skretanje na sporednom privozu [2]

Slika 7 prikazuje konflikte s kojima se suočavaju vozači koji skreću desno sa sporednog privoza ceste. Manevri se sukobljavaju samo s dijelom provoznog prometa s glavnog privoza ako postoji više od jedne trake na glavnom privozu. Također, polovica manevara skretanja desno s glavnog privoza je u konfliktu s pokretom skretanja desno sa sporednog privoza jer ih neki od tih manevara mogu ometati. Vozila koja skreću desno sa sporednog privoza obično koriste praznine u desnom prometnom traku toka u koji skreću, stoga im obično nije potrebna praznina preko svih traka konfliktnog toka (ovo možda ne vrijedi za neka veća teretna vozila i kombije). Vremenska praznina u prometu glavnog privoza može biti istovremeno korištena i od drugih vozila, kao što su ona koja skreću lijevo s glavnog privoza. Vozila koja vrše polukružna okretanja (U-pokreti) na glavnom privozu nisu uključena kao konflikti na slici 7 u ovoj metodologiji, iako se sukobi s njima mogu primijetiti u praksi [2].

Za izračunavanje konfliktnih prometnih tokova kod manevara desnog skretanja sa sporednog privoza na dvotračnu glavnu prometnicu, primjenjuju se (53) i (54) [2].

$$v_{c,9} = v_2 + 0,5 \cdot v_3 + v_{14} + v_{15} \quad (53)$$

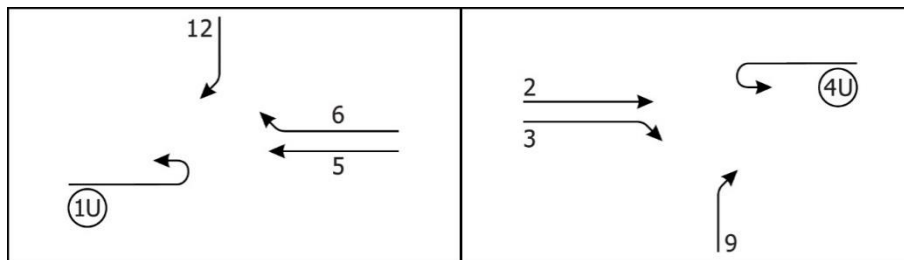
$$v_{c,12} = v_5 + 0,5 \cdot v_6 + v_{13} + v_{16} \quad (54)$$

Kod skretanja sa sporednog privoza na četverotračnu ili šesterotračnu prometnicu, koriste se (55) i (56) [2].

$$v_{c,9} = 0,5 \cdot v_2 + 0,5 \cdot v_3 + v_{14} + v_{15} \quad (55)$$

$$v_{c,12} = 0,5 \cdot v_5 + 0,5 \cdot v_6 + v_{13} + v_{16} \quad (56)$$

Polukružna okretanja na glavnom privozu nesemaforiziranog raskrižja prioritizirana su kao manevri drugog ranga, a to uključuje manevar 1U i 4U.



Slika 8. Prikaz konfliktnih tokova za polukružna okretanja na glavnom privozu [2]

Na slici 8. prikazani su prometni tokovi koji su u konfliktu s vozilima koja izvode polukružna okretanja na glavnom privozu. Konflikt pri polukružnom okretanju na glavnom privozu sličan je onome kod lijevog skretanja, uključujući protok vozila iz suprotnog smjera koja idu ravno i vozila koja skreću desno sa sporednog privoza. Istraživanja su pokazala da prisutnost vozila koja skreću desno sa sporednog privoza značajno utječu na kapacitet polukružnih okretanja na glavnom privozu. U metodologiji se ovaj utjecaj uzima u obzir prilikom izračuna ometanja, a ne pri izračunu konfliktnih tokova. U slučaju da se želi primijeniti drugačiji redoslijed prioriteta (npr. vozila koja skreću desno sa sporednih privoza daju prednost vozilima koja izvode polukružno okretanje na glavnom privozu), analitičar treba prilagoditi postupak izračuna prema specifičnim uvjetima promatranog raskrižja [2].

Za izračun konfliktnih tokova pri polukružnom okretanju na glavnom privozu kada prometnica ima četiri prometna traka koriste se (57) i (58) [2].

$$v_{c,1U} = v_5 + v_6 \quad (57)$$

$$v_{c,4U} = v_2 + v_3 \quad (58)$$

Za prometnice sa šest prometnih traka, primjenjuju se (59) i (60) [2].

$$v_{c,1U} = 0,73 \cdot v_5 + 0,73 \cdot v_6 \quad (59)$$

$$v_{c,4U} = 0,73 \cdot v_2 + 0,73 \cdot v_3 \quad (60)$$

Nema terenskih podataka o polukružnim okretanjima na prometnicama s manje od četiri prometna traka. Ako desno skretanje na glavnom privozu ima prometni trak, odgovarajući izraz v_3 ili v_6 u tim jednadžbama treba pretpostaviti kao nula [2].

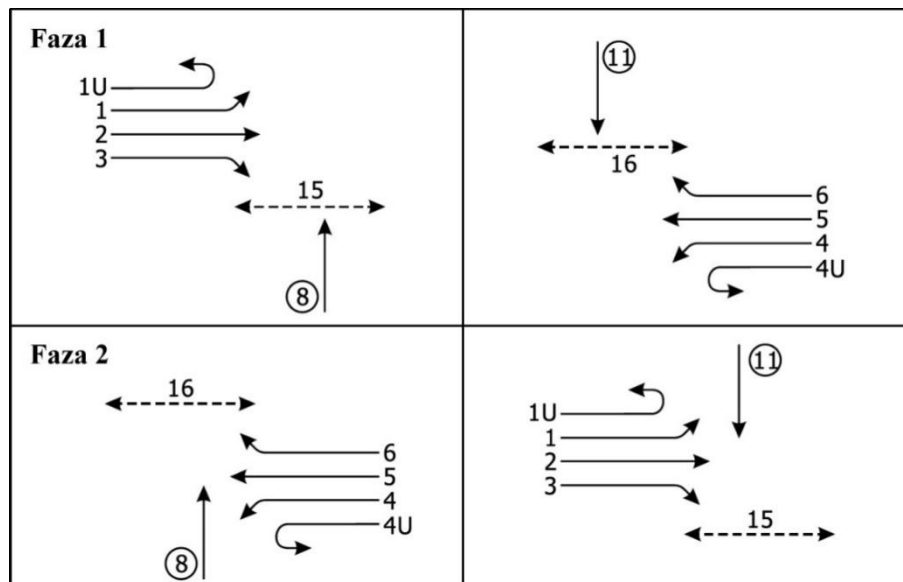
Pješачki tokovi na sporednom privozu nesemaforiziranog raskrižja prioritizirana su kao manevri drugog ranga, obuhvaćajući manevre 13 i 14. Pješачki tokovi na sporednom privozu koji prelaze glavni privoz izravno su u konfliktu sa svim prometnim tokovima na

glavnom privozu, izuzev s tokovima vozila koja skreću desno ili lijevo s udaljenije suprotne strane raskrižja. Volumen pješaka na sporednom privozu predstavlja ulazni parametar pri izračunu konfliktnih tokova vozila trećeg i četvrtog ranga [2].

Kretanja ravno na sporednom privozu nesemaforiziranog raskrižja prioritizirana su kao manevri trećeg ranga, a to uključuje manevre 8 i 11. Manevar ravno na sporednom privozu nesemaforiziranog raskrižja u izravnom je konfliktu sa svim tokovima na glavnoj cesti, osim s desnim skretanjima prema predmetnom sporednom privozu. Smatra se da je polovica svakog skretanja desno s glavnog privoza u konfliktu s manevrom kretanja ravno na sporednom privozu. Terenska istraživanja pokazuju da je utjecaj vozila koja skreću lijevo na glavnom privozu dvostruko veći od njihova stvarnog broja. Vozači koji izvode manevar kretanja ravno na sporednom privozu nesemaforiziranog raskrižja mogu završiti svoj manevar u jednom stupnju ili u dvije faze [2].

Jednostupanjsko prihvaćanje vremenskih praznina pretpostavlja da nema srednjeg sigurnosnog područja dostupnog za pohranu vozila za vozače sa sporednog privoza i da će vozači na sporednom privozu ocjenjivati vremenske praznine u oba smjera istodobno. Nasuprot tome, dvofazni scenarij prihvaćanja vremenskih praznina pretpostavlja postojanje srednjeg sigurnosnog područja za pohranu vozila za vozače sa sporednog privoza [2].

U prvoj fazi, vozači na sporednom privozu procjenjuju vremenske praznine u glavnom toku s lijeve strane. U drugoj fazi, isti ti vozači procjenjuju vremenske praznine u glavnom toku s desne strane, što je prikazano na slici 9. Za jednostupanjska prijelazna mjesta, konfliktni tokovi za prvu i drugu fazu se kombiniraju. Za dvofazna prijelazna mjesta, konfliktni tokovi se razmatraju odvojeno za svaku fazu [2].



Slika 9. Prikaz konfliktnih tokova za ravno na sporednom privozu [2]

Za izračunavanje konfliktnih tokova prometa za vozila koja nastavljaju vožnju ravno na sporednom privozu tijekom prve faze, koriste se (61) i (62). U slučaju postojanja

prometnog traka za desno skretanje na glavnom privozu, pretpostavlja se da su vrijednosti v_3 i v_6 jednake nuli [2].

$$v_{c,I,8} = 2(v_1 + v_{1U}) + v_2 + 0,5v_3 + v_{15} \quad (61)$$

$$v_{c,I,11} = 2(v_4 + v_{4U}) + v_5 + 0,5v_6 + v_{16} \quad (62)$$

Tijekom druge faze, za izračun konfliktnih tokova koriste se (63) i (64). Ako je desno skretanje na glavnom privozu fizički odvojeno trokutastim otkom i označeno prometnim znakovima "Raskrižje s prednošću prolaska" ili "Obavezno zaustavljanje", tada se pretpostavlja da su vrijednosti v_3 i v_6 u tim jednadžbama jednake nuli [2].

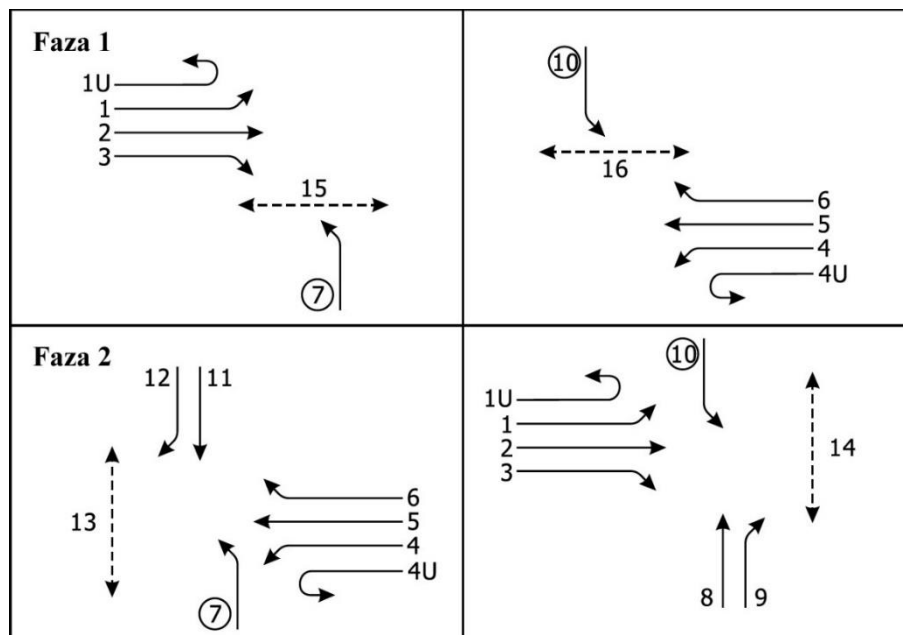
$$v_{c,II,8} = 2(v_4 + v_{4U}) + v_5 + v_6 + v_{16} \quad (63)$$

$$v_{c,II,11} = 2(v_1 + v_{1U}) + v_2 + v_3 + v_{15} \quad (64)$$

Lijeva skretanja na sporednom privozu nesemaforiziranog raskrižja prioritizirana su kao manevri četvrtog ranga, a to uključuje manevre 7 i 10.

Lijevo skretanje na sporednom privozu najteži je manevar na nesemaforiziranom raskrižju jer su u konfliktu s vozilima na glavnom toku te s vozilima na sporednom privozu koja skreću desno ili nastavljaju vožnju ravno. Polovica protoka vozila koja skreću desno ili nastavljaju ravno suprotnog sporednog privoza smatra se u konfliktnom toku s lijevim skretanjima sa sporednog privoza, zbog prisutnosti znakova obaveznog zaustavljanja. Dodatni utjecaji na kapacitet suprotnih manevara skretanja desno i ravno uzeti su u obzir na drugim dijelovima postupka [2].

Lijevo skretanje na sporednom privozu, slično kao i ravno na sporednom privozu, može se izvesti u jednom stupnju ili dvije faze, a konfliktni tokovi za lijevo skretanje na sporednom privozu prikazani su na slici 10 [2].



Slika 10. Prikaz konfliktnih tokova za lijeva skretanja na sporednom privozu [2]

Za izračunavanje konfliktnih tokova prometa koje susreću vozila koja skreću lijevo na sporednom privozu tijekom prve faze na dvotračnoj prometnici, koriste se (65) i (66). Ako na glavnom privozu postoji prometni trak za desno skretanje, pretpostavlja se da su vrijednosti v_3 i v_6 jednake nuli [2].

$$v_{c,I,7} = 2v_1 + v_2 + 0,5v_3 + v_{15} \quad (65)$$

$$v_{c,I,10} = 2v_4 + v_5 + 0,5v_6 + v_{16} \quad (66)$$

Za prometnice s četiri ili šest prometnih trakova, koriste se (67) i (68) [2].

$$v_{c,I,7} = 2(v_1 + v_{1U}) + v_2 + 0,5v_3 + v_{15} \quad (67)$$

$$v_{c,I,10} = 2(v_4 + v_{4U}) + v_5 + 0,5v_6 + v_{16} \quad (68)$$

Za izračun konfliktnih tokova za lijeva skretanja u drugoj fazi, na dvotračnoj prometnici koriste se (69) i (70). Ako je desno skretanje na sporednom privozu fizički odvojeno trokutastim otokom i označeno prometnim znakovima "Raskrižje s prednošću prolaska" ili "Obavezno zaustavljanje", tada se pretpostavlja da su vrijednosti v_9 i v_{12} u tim jednadžbama jednake nuli [2].

$$v_{c,II,7} = 2v_4 + v_5 + 0,5v_6 + 0,5v_{12} + 0,5v_{11} + v_{13} \quad (69)$$

$$v_{c,II,10} = 2v_1 + v_2 + 0,5v_3 + 0,5v_9 + 0,5v_8 + v_{14} \quad (70)$$

Za prometnice s četiri prometna traka, koriste se (71) i (72) [2].

$$v_{c,II,7} = 2(v_4 + v_{4U}) + 0,5v_5 + 0,5v_{11} + v_{13} \quad (71)$$

$$v_{c,II,10} = 2(v_1 + v_{1U}) + 0,5v_2 + 0,5v_8 + v_{14} \quad (72)$$

Za prometnice sa šest prometnih trakova, koriste se (73) i (74) [2].

$$v_{c,II,7} = 2(v_4 + v_{4U}) + 0,4v_5 + 0,5v_{11} + v_{13} \quad (73)$$

$$v_{c,II,10} = 2(v_1 + v_{1U}) + 0,4v_2 + 0,5v_8 + v_{14} \quad (74)$$

d) Određivanje kritične vremenske praznine i vremena slijeđenja

Kritična vremenska praznina $t_{c,x}$ i vrijeme slijeđenja $t_{f,x}$ određuje se za lijevo skretanje s glavnog privoza ($v_{c,1}$ i $v_{c,4}$), desno skretanje sa sporednog privoza ($v_{c,9}$ i $v_{c,12}$), polukružno okretanje na glavnom privozu ($v_{c,1U}$ i $v_{c,4U}$), ravno kretanje na sporednom privozu ($v_{c,8}$ i $v_{c,11}$), i lijevo skretanje na sporednom privozu ($v_{c,7}$ i $v_{c,10}$), u ovisnosti kako se pojavljuju na nesemaforiziranom raskrižju. Kritična vremenska praznina za svaki manevar izračunava se prema (75), uzimajući u obzir baznu kritičnu vremensku prazninu prema tablici 10 [2].

$$t_{c,x} = t_{c,base} + t_{c,HV} \cdot P_{HV} + t_{c,G} \cdot G - t_{3,LT} \quad (75)$$

gdje je:

- $t_{c,x}$ – kritična vremenska praznina za manevar x [s];
- $t_{c,base}$ – bazna kritična vremenska praznina prema tablici 10 [s];

- $t_{c,HV}$ – korekcijski čimbenik za teška vozila (1,0 za glavnu cestu s jednim trakom za svaki smjer vožnje, a 2,0 za glavnu cestu s 2 i 3 traka za smjer vožnje);
 P_{HV} – postotak teških vozila u toku ($P_{HV}=0,02$ za 2 % teških vozila u toku);
 $t_{c,G}$ – korekcijski čimbenik stupnja nagiba (0,1 za manevre 9,12, 0,2 za manevre 7,8,10,11);
 G – postotak uzdužnog nagiba ceste ($G=-2$ za nagib nizbrdice od 2%);
 $t_{3,LT}$ – korekcijski čimbenik geometrije raskrižja za manevre 7, 8, 10 i 11 (0,7 za skretanje lijevo sa sporednog privoza kod trokrakih raskrižja, a 0,0 za ostalo) [s].

Tablica 10. Bazne kritične vremenske praznine za nesemaforizirana raskrižja [2]

Manevar vozila	Bazna kritična vremenska praznina, $t_{c,base}$ [s]		
	dva prometna traka	četiri prometna traka	šest prometnih trakova
lijevo skretanje s glavnog privoza	4,1	4,1	5,3
polukružno okretanje na glavnom privožu	nije primjenjivo	6,4 (široko) 6,9 (usko)	5,6
desno skretanje sa sporednog privoza	6,2	6,9	7,1
ravno sa sporednog privoza	1-stupanjski: 6,5 2.faze, I faza: 5,5 2.faze, II faza: 5,5	1-stupanjski: 6,5 2.faze, I faza: 5,5 2.faze, II faza: 5,5	1-stupanjski: 6,5 2.faze, I faza: 5,5 2.faze, II faza: 5,5
lijevo skretanje sa sporednog privoza	1-stupanjski: 7,1 2.faze, I faza: 6,1 2.faze, II faza: 6,1	1-stupanjski: 7,1 2.faze, I faza: 6,5 2.faze, II faza: 6,5	1-stupanjski: 6,4 2.faze, I faza: 7,3 2.faze, II faza: 6,7

Podaci o kritičnoj vremenskoj praznini za četverotračne i šesterotračne prometnice uzimaju u obzir stvarnu distribuciju prometnih tokova izmjerenu na konkretnoj lokaciji. Na mjestima sa šest trakova, primijećeno je da vozila koja skreću lijevo sa sporednog privoza započinju svoj manevar dok druga vozila, naizgled konfliktna vozila, prolaze na suprotnoj strani glavnog toka [2].

Vrijeme slijeđenja za pojedini manevar izračunava se koristeći (76) na temelju baznog vremena slijeđenja za manevar vozila iz tablice 11.

$$t_{f,x} = t_{f,base} + t_{f,HV} \cdot P_{HV} \quad (76)$$

gdje je:

- $t_{f,x}$ – vrijeme slijeđenja za manevar x [s];
 $t_{f,base}$ – bazno vrijeme slijeđenja prema tablici 11 [s];
 $t_{f,HV}$ – korekcijski čimbenik za teška vozila (0,9 za glavnu cestu s jednim trakom za svaki smjer vožnje, a 2,0 za glavnu cestu s 2 i 3 traka za smjer vožnje);
 P_{HV} – postotak teških vozila u toku ($P_{HV}=0,02$ za 2 % teških vozila u toku).

Tablica 11. Bazna vremena slijeđenja za nesemaforizirana raskrižja [2]

Manevar vozila	Bazno vrijeme slijeđenja, $t_{f,base}$ [s]		
	dva prometna traka	četiri prometna traka	šest prometnih trakova
lijevo skretanje s glavnog privoza	2,2	2,2	5,3
polukružno okretanje na glavnom privozu	nije primjenjivo	2,5 (široko) 3,1 (usko)	2,3
desno skretanje sa sporednog privoza	3,3	3,3	3,9
ravno sa sporednog privoza	4,0	4,0	4,0
lijevo skretanje sa sporednog privoza	3,5	3,5	3,8

Vrijednosti navedene u tablicama 10 i 11 temelje se na istraživanjima provedenim u Sjedinjenim Američkim Državama i obuhvaćaju širok spektar uvjeta. Manje vrijednosti bazne kritične vremenske praznine i baznog vremena slijeđenja, zapažene tijekom promatranja, dovode do povećanja kapaciteta, dok veće vrijednosti rezultiraju smanjenjem kapaciteta [2].

e) Izračun potencijalnih kapaciteta

Pri izračunu potencijalnog kapaciteta nesemaforiziranog raskrižja važno je uzeti u obzir utjecaj susjednih semaforiziranih raskrižja, prema tome razlikujemo sljedeće izračun potencijalnog kapaciteta bez utjecaja susjednih semaforiziranih raskrižja i s utjecajem susjednih semaforiziranih raskrižja.

Potencijalni kapacitet bez utjecaja susjednih semaforiziranih raskrižja svakog pojedinog manevra izračunava se koristeći model prihvaćanja vremenskih praznina od strane vozača, prema (77) [2].

$$C_{p,x} = v_{c,x} \cdot \frac{e^{-v_{c,x} \cdot t_{c,x}/3.600}}{1 - e^{-v_{c,x} \cdot t_{f,x}/3.600}} \quad (77)$$

gdje je:

- $C_{p,x}$ – potencijalni kapacitet manevra x [voz/h];
- $v_{c,x}$ – konfliktni prometni tok za manevar x [voz/h];
- $t_{c,x}$ – kritična vremenska praznina za manevar x [s];
- $t_{f,x}$ – vrijeme slijeđenja za manevar x [s].

Za manevre u dvije faze, trećeg i četvrtog ranga, potencijalni kapacitet izračunava za tri slučaja: $C_{p,x}$ za jednostupanjski manevar, $C_{p,I,x}$ za prvu fazu manevra i $C_{p,II,x}$ za drugu fazu manevra [2].

Potencijalni kapacitet s utjecajem susjednih semaforiziranih raskrižja. pretpostavlja prisutnost koordiniranih signala na susjednim raskrižjima, a za procjenu utjecaja koristi se metodologija uličnih segmenata iz HCM-a, Poglavlja 17, naziva „Pouzdanost urbanih ulica i aktivno upravljanje prijevozom i potražnjom“. Ova metodologija služi za procjenu udjela vremena tijekom kojeg će manevri drugoga ranga ili nižega biti efektivno blokirani zbog kolone vozila. Udio blokiranog vremena označava se kao $p_{b,x}$, gdje x predstavlja specifičan

manevar naveden u tablici 12. Korištenjem ovih vrijednosti moguće je izračunati udio analitičkog razdoblja tijekom kojeg je svaki manevar blokiran [2].

Tablica 12. Udio analitičkog vremena blokade pojedinih manevara [2]

Manevar x	Udio blokiranih manevara		
	Jednostupanjski manevar	Manevar u dvije faze	
		Faza 1	Faza 2
1, 1U	$p_{b,1}$	nije primjenjivo	nije primjenjivo
4, 4U	$p_{b,4}$	nije primjenjivo	nije primjenjivo
7	$p_{b,7}$	$p_{b,4}$	$p_{b,1}$
8	$p_{b,8}$	$p_{b,4}$	$p_{b,1}$
9	$p_{b,9}$	nije primjenjivo	nije primjenjivo
10	$p_{b,10}$	$p_{b,1}$	$p_{b,4}$
11	$p_{b,11}$	$p_{b,1}$	$p_{b,4}$
12	$p_{b,12}$	nije primjenjivo	nije primjenjivo

Protok tijekom neblokiranog razdoblja, odnosno kada nema kolone vozila, određuje se i postaje konfliktni tok za određeni manevar. Konfliktni tok se zatim koristi za izračunavanje kapaciteta tog manevara koristeći (78) [2].

$$v_{c,u,x} = \begin{cases} \frac{v_{c,x} - 1,5v_{c,min} \cdot p_{b,x}}{1 - p_{b,x}} & \text{ako je } v_{c,x} > 1,5v_{c,min} \cdot p_{b,x} \\ 0 & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (78)$$

gdje je:

- $v_{c,u,x}$ – konfliktni tok za manevar x tijekom neblokiranog perioda [voz/h];
- $v_{c,x}$ – ukupni konfliktni tok za manevar x ;
- $v_{c,min}$ – minimalni protok vozila u koloni [voz/h] (iznosi približno $1000N$, gdje je N broj trakova za ravno po smjeru na glavnoj cesti);
- $p_{b,x}$ – udio analitičkog vremena tijekom kojeg je manevar x blokiran od strane kolone vozila glavne ceste, određen prema tablici 12.

Potencijalni kapacitet za manevar x , uzimajući u obzir utjecaj kolone vozila, izračunava se prema (79) uz primjenu (80) [2].

$$C_{p,x} = (1 - p_{b,x})c_{r,x} \quad (79)$$

$$c_{r,x} = v_{c,u,x} \frac{e^{-v_{c,u,x} \cdot t_{c,x}/3600}}{1 - e^{-v_{c,u,x} \cdot t_{f,x}/3600}} \quad (80)$$

gdje je:

- $C_{p,x}$ – potencijalni kapacitet manevara x [voz/h];
- $p_{b,x}$ – udio vremena tijekom kojeg je manevar x blokiran od strane kolone vozila;
- $c_{r,x}$ – kapacitet manevara x pretpostavljajući nasumični protok tijekom neblokiranog razdoblja [voz/h];
- $v_{c,u,x}$ – konfliktni tok za manevar x tijekom neblokiranog perioda [voz/h];
- $t_{c,x}$ – kritična vremenska praznina za manevar x [s];
- $t_{f,x}$ – udio analitičkog vremena tijekom kojeg je manevar x blokiran od strane kolone vozila glavne ceste, određen prema tablici 12.

f) Izračun realnih kapaciteta vozila prvog ranga

Za glavne prometne tokove prvoga ranga pretpostavlja se da nisu ometani prometnim tokovima sa sporednih privoza. Ovaj rang implicira da se ne očekuju zastoji ili usporavanja glavnog toka prometa dok prolazi kroz nesemaforizirano raskrižje. Međutim, empirijska promatranja pokazuju da zastoji ponekad ipak nastaju, što je uzeto u obzir uz određene prilagodbe opisane u nastavku rada [2].

g) Izračun realnih kapaciteta vozila drugog ranga

Prometni tokovi drugog ranga, koji uključuju lijeva skretanja, polukružna okretanja na glavnom prometnom toku i desna skretanja sa sporednog toka, moraju dati prednost prolaza vozilima prvoga ranga. Također se pretpostavlja da će desno skretanje sa sporednog toka ustupiti prednost vozilima koja izvedu polukružno okretanje na glavnom toku, iako se ponekad može dogoditi i suprotno [2].

Realni kapaciteti manevara lijevog skretanja s glavnog na sporedni privoz (manevri 1 i 4) i desnih skretanja sa sporednog na glavni privoz jednaki su njegovom potencijalnom kapacitetu $c_{p,j}$ kako je prikazano u (81) [2].

$$c_{m,j} = c_{p,j} \quad (81)$$

Realni kapacitet manevara polukružnih okretanja $c_{m,j}$ na glavnom privozu (manevri 1U i 4U) utvrđuje se na osnovu čimbenika prilagodbe kapaciteta, koji uzima u obzir ometanje od vozila višeg ranga. Terenska opažanja pokazuju da polukružna okretanja na glavnom privozu često ustupaju prednost desnim skretanjima sa sporednog privoza i obrnuto. Prisutnost vozila koja skreću desno sa sporednog privoza može ometati vozila koja se polukružno okreću na glavnom privozu. Kapacitet polukružnih okretanja s glavnog privoza stoga ovisi o vjerojatnosti da će desna skretanja biti izvedena bez repa čekanja. Čimbenici prilagodbe kapaciteta izračunavaju se prema (82) i (83) [2].

$$f_{1U} = p_{0,12} = 1 - \frac{v_{12}}{c_{m,12}} \quad (82)$$

$$f_{4U} = p_{0,9} = 1 - \frac{v_9}{c_{m,9}} \quad (83)$$

gdje je:

- f_{1U}, f_{4U} – čimbenici prilagodbe kapaciteta za vozila drugog ranga koja se polukružno okreću na glavnom privozu (manevri 1U i 4U);
- $p_{0,j}$ – vjerojatnost da konflikti prometni tok drugog ranga nema repa čekanja;
- v_j – protok vozila za manevar j [voz/h];
- $c_{m,j}$ – kapacitet vozila za manevar j [voz/h];
- j – 9 i 12 (manevri drugog ranga, desna skretanja sa sporednog privoza).

Nakon utvrđivanja čimbenika prilagodbe kapaciteta, realni kapacitet manevara polukružnog okretanja na glavnom privozu izračunava se prema (84) [2].

$$c_{m,jU} = C_{p,jU} \cdot f_{jU} \quad (84)$$

gdje je:

- $c_{m,jU}$ – realni kapaciteti manevara 1U i 4U [voz/h];
- $C_{p,jU}$ – potencijalni kapaciteti manevara 1U i 4U [voz/h];
- f_{jU} – čimbenici prilagodbe kapaciteta za manevre 1U i 4U.

Budući da se manevri lijevog skretanja i polukružnog okretanja na glavnom toku obično izvode iz iste prometne trake, potrebno je izračunati njihov zajednički kapacitet traka koristeći (85) [2].

$$C_{SH} = \frac{\sum_y v_y}{\sum_y \frac{v_y}{c_{m,y}}} \quad (85)$$

gdje je:

- C_{SH} – realni kapacitet zajedničkog traka [voz/h];
- v_y – protok manevra y prometnim trakom [voz/h];
- $c_{m,y}$ – kapacitet manevra y zajedničkim prometnim trakom [voz/h].

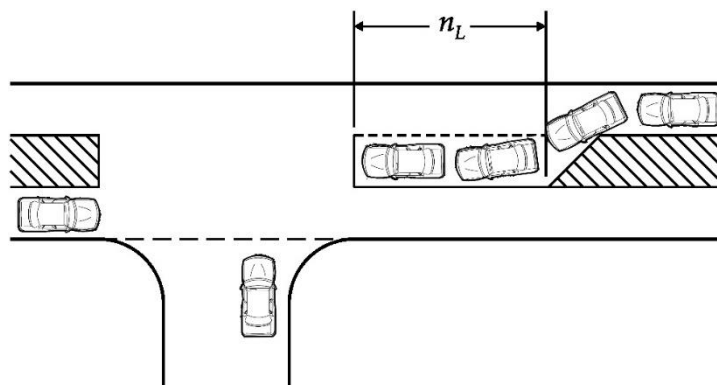
Utjecaj zajedničkog traka za lijevo skretanje i provoz na glavnom privozu temelji se na vjerojatnosti da će prometni tokovi lijevog skretanja na glavnom toku funkcionirati bez stvaranja repa čekanja, a izračunava se prema (86) [2].

$$p_{0,j} = 1 - \frac{v_j}{c_{m,j}} \quad (86)$$

gdje je:

- $p_{0,j}$ – vjerojatnost da će lijeva skretanja na glavnom privozu raditi bez repa čekanja;
- v_j – protok vozila za manevar j [voz/h];
- $c_{m,j}$ – kapacitet vozila za manevar j [voz/h];
- j – manevri 1 i 4 (manevri drugog ranga, lijevo skretanje i polukružno okretanje na glavnom privozu, koristeći zajednički kapacitet prema potrebi).

Ako na glavnom privozu postoji zajednički trak za lijevo skretanje ili kratki prometni trak za lijevo skretanje, kako je prikazano na slici 11, analitičar mora uzeti u obzir vjerojatnost da u tom traku neće biti repa čekanja, označenu kao $p_{0,j}^*$ prema (87). Ova vjerojatnost se zatim koristi umjesto $p_{0,j}$ iz (86) [2].



Slika 11. Kratak prometni trak za lijevo skretanje na glavnom toku [2]

Metodologija podrazumijeva da postoji ekskluzivni prometni trak dostupan za sva vozila koja skreću lijevo s glavnog privoza. Međutim, ako takav trak za lijevo skretanje nije dostupan ili je njegova duljina nedovoljna da primi sva vozila koja čekaju na lijevo skretanje i polukružno okretanje, tada vozila koja skreću ulijevo mogu uzrokovati kašnjenja u glavnim tokovima prometa, uključujući i one koji skreću desno, dok čekaju prihvatljivu vremensku prazninu u suprotnom glavnom toku. Vjerojatnost da neće biti repa čekanja u zajedničkom ili kratkom prometnom traku za lijevo skretanje može se izračunati koristeći (87) i (88) [2].

$$p_{0,j}^* = 1 - (1 - p_{0,j}) \left[\frac{(n_L+1) \sqrt{1 + \frac{x_{i,1+2}^{(n_L+1)}}{1 - x_{i,1+2}}}}{1 + \frac{x_{i,1+2}^{(n_L+1)}}{1 - x_{i,1+2}}} \right] \quad (87)$$

$$x_{i,1+2} = \frac{v_{i1}}{s_{i1}} + \frac{v_{i2}}{s_{i2}} \quad (88)$$

gdje je:

- $p_{0,j}$ – vjerojatnost da nema repa čekanja za manevar j uz pretpostavku ekskluzivnog lijevog traka na glavnom privožu;
- $p_{0,j}^*$ – vjerojatnost da nema repa čekanja za manevar j uz pretpostavku zajedničkog traka na glavnom privožu;
- v_j – protok vozila za manevar j [voz/h];
- $c_{m,j}$ – kapacitet vozila za manevar j [voz/h];
- j – manevri lijevo na glavnom privožu (1 i 4);
- $i1$ – manevri ravno na glavnom privožu (2 i 5);
- $i2$ – manevri desno na glavnom privožu (3 i 6);
- $x_{i,1+2}$ – kombinirani stupanj zasićenja za ravno i desno skretanje na glavnom privožu;
- s_{i1} – stupanj zasićenja za ravno na glavnom privožu (pretpostavljeno 1800 [voz/h], može se prilagoditi prema terenskim istraživanjima);
- s_{i2} – stupanj zasićenja za desno skretanje na glavnom privožu (pretpostavljeno 1500 [voz/h], može se prilagoditi prema terenskim istraživanjima);
- v_{i1} – protok vozila za ravno na glavnom privožu [voz/h];
- v_{i2} – protok vozila za desno skretanje na glavnom privožu [voz/h], iznosi 0 ako desno skretanje ima ekskluzivan prometni trak za desno skretanje;
- n_L – broj vozila koji se može zaustaviti u prometnom traku za lijevo.

U posebnim situacijama gdje broj vozila koji se može zaustaviti u traku za lijevo skretanje n_L iznosi 0, primjenjuje se (89) [2].

$$p_{0,j}^* = 1 - \frac{1 - p_{0,j}}{1 - x_{i,1+2}} \quad (89)$$

Korištenjem $p_{0,1}^*$ i $p_{0,4}^*$ umjesto $p_{0,1}$ i $p_{0,4}$, izračunatih prema (86) moguće je uzeti u obzir potencijal za stvaranje repova čekanja na glavnom privozu sa zajedničkim trakom ili kratkim trakom za lijevo skretanje [2].

h) Izračun realnih kapaciteta vozila trećeg ranga

Prometni tokovi trećeg ranga, koji uključuju ravno kretanje na sporednom privozu četverokrakog raskrižja i lijevo skretanje na trokrakom raskrižju, moraju dati prednost vozilima prvoga i drugoga ranga. To znači da vozila trećeg ranga neće moći iskoristiti sve dostupne vremenske praznine u prometnom toku, jer će neke od tih praznina koristiti vozila drugog ranga. U slučajevima kada je manevar vozila trećeg ranga dvofazni, kapacitet za jednostupanjski manevar se izračunava i koristi kao ulazni parametar za dvofazni proračun kapaciteta [2].

Realni kapacitet manevara $C_{m,k}$ za sve tokove trećeg ranga određuje se računanjem čimbenika prilagodbe kapaciteta koji uzima u obzir konfliktni utjecaj vozila višeg ranga. Čimbenik prilagodbe kapaciteta, označen kao f_k za svaki manevar k i sve tokove trećeg ranga, određuje se prema (90), gdje simbol \prod označava umnožak niza članova [2].

$$f_k = \prod_j p_{0,j} \quad (90)$$

gdje je:

- f_k – čimbenik prilagodbe kapaciteta za konfliktni utjecaj vozila višeg ranga;
- $p_{0,j}$ – vjerojatnost da će konfliktni prometni tok drugog ranga manevara j raditi bez repa čekanja;
- k – manevri trećeg ranga.

Realni kapacitet manevara $C_{m,k}$ za tokove trećeg ranga izračunava se prema (91) [2].

$$C_{m,k} = c_{p,k} \cdot f_k \quad (91)$$

gdje je:

- $C_{m,k}$ – realni kapacitet vozila trećeg ranga [voz/h];
- $c_{p,k}$ – potencijalni kapacitet vozila trećeg ranga sporednih privoza;
- f_k – čimbenik prilagodbe ometajućeg utjecaja vozila višeg ranga, izračunan prema (90).

Za dvofazni manevar vozila trećeg ranga, izračun ukupnog kapaciteta uključuje određivanje čimbenika prilagodbe a prema (92) i međuvarijable y prema (93) [2].

$$a = 1 - 0,32e^{-1,3\sqrt{n_m}} \text{ za } n_m > 0 \quad (92)$$

$$y = \frac{c_I - C_{m,x}}{c_{II} - v_L - C_{m,x}} \quad (93)$$

gdje je:

- a – čimbenik prilagodbe;
- n_m – broj vozila koja se mogu smjestiti u međuprostor [voz];
- y – međuvarijabla;
- c_I – realni kapacitet faze I [voz/h];
- c_{II} – realni kapacitet faze II [voz/h];
- v_L – protok vozila lijevih skretanja i polukružnog okretanja na glavnom privozu, neovisno radi li se o $v_1 + v_{1U}$ ili $v_4 + v_{4U}$ [voz/h];
- $c_{m,x}$ – kapacitet predmetnog manevra, uzimajući u obzir ukupni konfliktni tok za obje faze prihvatanja vremenskih praznina.

Ukupni realni kapacitet za dvofazni manevar C_T izračunava se prema (94) i (95), u ovisnosti o međuvarijabli y [2].

za $y \neq 1$:

$$c_T = \frac{a}{y^{n_m+1} - 1} [y(y^{n_m} - 1)(c_{II} - v_L) + (y - 1)c_{m,x}] \quad (94)$$

za $y = 1$:

$$c_T = \frac{a}{n_m + 1} [n_m(c_{II} - v_L) + c_{m,x}] \quad (95)$$

i) Izračun realnih kapaciteta vozila četvrtog ranga

Vozila četvrtog ranga pojavljuju se samo na četverokrakim raskrižjima, a odnose se na lijeva skretanja vozila sa sporednog privoza koja moraju propustiti sva vozila viših rangova. Za određivanje realnog kapaciteta vozila četvrtog ranga u jednostupanjskom manevaru, ključno je odrediti vjerojatnosti da u tokovima višeg ranga nema repova čekanja. Međutim, vjerojatnosti nisu uvijek neovisne, primjerice, čekanje za lijevo skretanje na glavnom privozu utječe na vjerojatnost repa čekanja na sporednom privozu. Direktno množenje ovih vjerojatnosti može dovesti do precjenjivanja ometajućeg učinka. Da bi se prilagodilo ovom precjenjivanju uzrokovanim statističkom ovisnošću između tokova drugog i trećeg ranga, koristi se (96), koja matematički reprezentira ovu prilagodbu [2].

$$p' = 0,65p'' - \frac{p''}{p'' + 3} + 0,6\sqrt{p''} \quad (96)$$

$$p'' = (p_{0,j})(p_{0,k}) \quad (97)$$

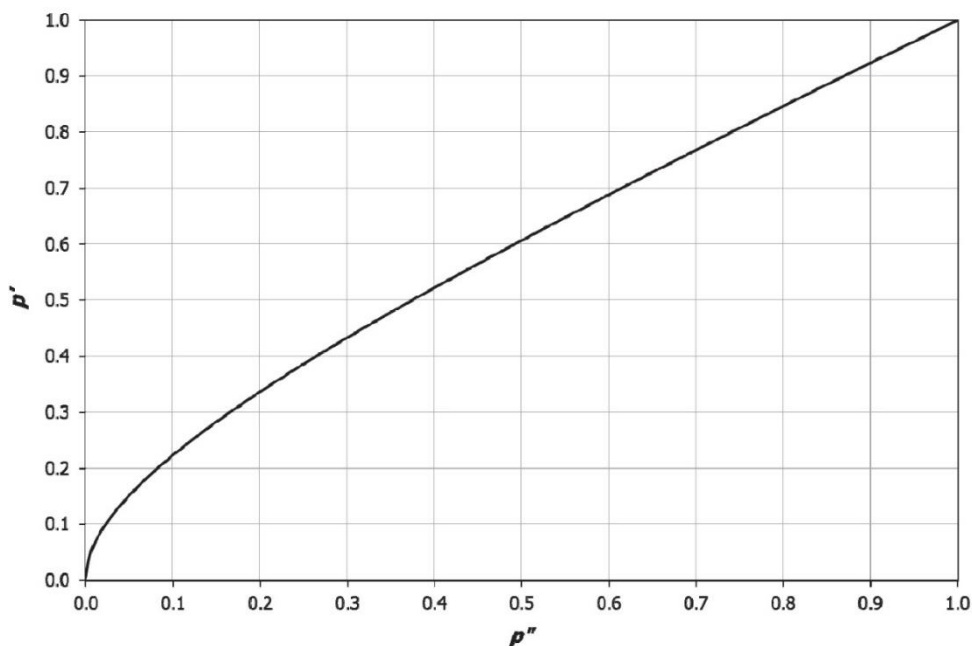
gdje je:

- p' – čimbenik statističke zavisnosti vjerojatnosti tokova drugog i trećeg ranga;
- $p_{0,j}$ – vjerojatnost da nema repa čekanja vozila drugog ranga (lijevo skretanje na glavnom privozu);
- $p_{0,k}$ – vjerojatnost da nema repa čekanja vozila trećeg ranga (ravno na suprotnom sporednom privozu).

Pri određivanju čimbenika statističke zavisnosti p' za četvrti rang, manevar 7 koristi se (98), a za manevar 10 koristi se (99) [2].

$$p'' = (p_{0,1})(p_{0,4})(p_{0,11}) \quad (98)$$

$$p'' = (p_{0,1})(p_{0,4})(p_{0,8}) \quad (99)$$



Slika 12. Prilagodba čimbenika impedancije za lijevo skretanje i vožnju ravno sa suprotnog sporednog privoza [2]

Realni kapacitet za vozila četvrtog ranga određuje se izračunavanjem čimbenika prilagodbe kapaciteta koji uzima u obzir ometajuće učinke vozila višeg ranga. Čimbenik prilagodbe kapaciteta izračunava se koristeći (100) [2].

$$f_{p,l} = p' \cdot p_{0,j} \quad (100)$$

gdje je:

- $f_{p,l}$ – čimbenik prilagodbe kapaciteta vozilima četvrtog ranga;
- l – tokovi lijevih skretanja sa sporednog privoza četvrtog ranga;
- j – konfliktni tokovi desnog skretanja sa sporednog privoza drugoga ranga.

Realni kapacitet za lijeva skretanja na sporednom privozu četvrtog ranga zatim se izračunava koristeći (101) [2].

$$c_{m,l} = c_{p,l} \cdot f_{p,l} \quad (101)$$

gdje je:

- $c_{m,l}$ – realni kapacitet vozila četvrtog ranga [voz/h];
- $c_{p,l}$ – potencijalni kapacitet vozila četvrtog ranga [voz/h];
- $f_{p,l}$ – čimbenik prilagodbe kapaciteta vozilima četvrtog ranga.

Postupak izračuna ukupnog realnog kapaciteta, s obzirom na dvofazni postupak prihvatanja vremenskih praznina temelji se na izračunu čimbenika prilagodbe a prema (102) i međuvarijable y prema (103) [2].

$$a = 1 - 0,32e^{-1,3\sqrt{n_m}} \text{ za } n_m > 0 \quad (102)$$

$$y = \frac{c_I - c_{m,x}}{c_2 - v_L - c_{m,x}} \quad (103)$$

gdje je:

- a – čimbenik prilagodbe;
- n_m – broj vozila koja se mogu smjestiti u međuprostor [voz];
- y – međuvarijabla;
- c_I – realni kapacitet faze I [voz/h];
- c_{II} – realni kapacitet faze II [voz/h];
- v_L – protok vozila za lijeva skretanja i polukružna okretanja na glavnom privozu (neovisno radi li se o $v_1 + v_{1U}$ ili $v_4 + v_{4U}$) [voz/h];
- $c_{m,x}$ – realni kapacitet manevra, uzimajući u obzir ukupni konfliktni protok za obje faze prihvatanja vremenskih praznina.

Ukupni realni kapacitet uzimajući u obzir dvofazni postupak prihvatanja vremenskih praznina izračunava se koristeći (104) i (105), u ovisnosti o vrijednosti međuvarijable y [2].

za $y \neq 1$:

$$c_T = \frac{a}{y^{n_m+1} - 1} [y(y^{n_m} - 1)(c_{II} - v_L) + (y - 1)c_{m,x}] \quad (104)$$

za $y = 1$:

$$c_T = \frac{a}{n_m + 1} [n_m(c_{II} - v_L) + c_{m,x}] \quad (105)$$

j) Završne prilagodbe realnih kapaciteta

U završnoj prilagodbi realnih kapaciteta, uzima se u obzir prilagodba zajedničkih trakova na sporednom privozu te prilagodba kapaciteta prometnih traka s izdvojenim desnim skretanjem.

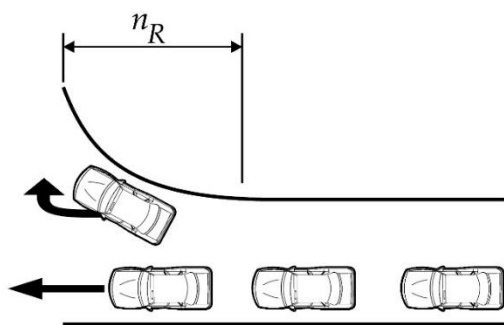
Kada dva ili više manevara dijele isti prometni trak i ne mogu stati jedan pored drugog na zaustavnoj liniji, kapacitet zajedničkog traka se izračunava primjenom (106) [2].

$$C_{SH} = \frac{\sum_y v_y}{\sum_y \frac{v_y}{c_{m,y}}} \quad (106)$$

gdje je:

- C_{SH} – realni kapacitet zajedničkog traka [voz/h];
- v_y – protok manevra y u zajedničkom traku [voz/h];
- $c_{m,y}$ – realni kapacitet manevra y u zajedničkom traku [voz/h].

Za procjenu kapaciteta prometnog traka koji ima izdvojeno skretanje desno, kako je prikazano na slici 13, potrebno je izračunati prosječnu duljinu repa čekanja za svaki manevar koji koristi zajednički trak na sporednom privozu [2].



Slika 13. Prometni trak s izdvojenim desnim skretanjem [2]

Proračun prosječne duljine repa čekanja pretpostavlja da se manevar desnog skretanja odvija u jednom traku, dok se ostali promet odvija u desnom traku. Za izračun se koristi (107) [2].

$$Q_{sep} = \frac{d_{sep} \cdot v_{sep}}{3.600} \quad (107)$$

gdje je:

- Q_{sep} – prosječna duljina repa čekanja, razmatrana kao odvojeni trak [voz];
- d_{sep} – prosječno vrijeme kašnjenja za manevar, razmatrano kao odvojeni trak [voz/h];
- v_{sep} – protok za manevar [voz/h].

Za učinkovito funkcioniranje traka kao odvojenih prometnih trakova, potrebno je izračunati potrebnu duljinu prostora za pohranu vozila koristeći (108) [2].

$$n_{max} = \max_i [\text{round}(Q_{sep,i} + 1)] \quad (108)$$

gdje je:

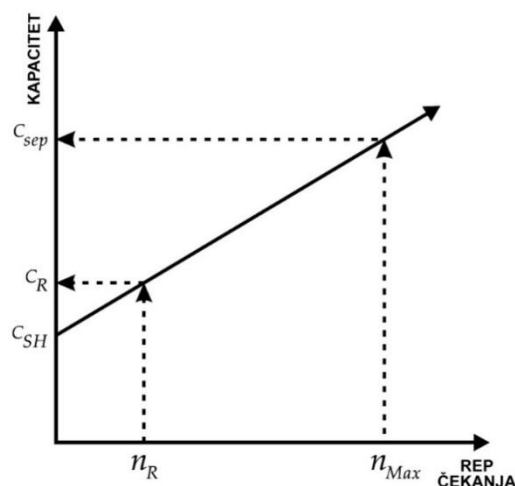
- n_{max} – duljina prostora za pohranu vozila potrebna za funkcioniranje traka kao odvojenih;
- $Q_{sep,i}$ – prosječna duljina repa čekanja za manevar i , razmatrana kao odvojeni trak [voz];
- round – operator zaokruživanja na najbliži cijeli broj.

Realni kapacitet odvojenih trakova izračunava prema (109) uz pretpostavku da kapacitet desnih skretanja funkcionira kao odvojeni trak, a kapacitet ostalog prometa u desnom traku kao drugi odvojeni trak [2].

$$c_{sep} = \min \left[c_R \left(1 + \frac{v_{L+TH}}{v_R} \right), c_{L+TH} \left(1 + \frac{v_R}{v_{L+TH}} \right) \right] \quad (109)$$

gdje je:

- c_{sep} – zbroj realnih kapaciteta prometa koji skreću desno (kao odvojeni trak) i kapaciteta ostalog prometa u desnom traku (kao odvojeni trak) [voz/h];
- c_R – realni kapacitet manevara desnog skretanja [voz/h];
- c_{L+TH} – realni kapacitet manevara ravno i lijevo u zajedničkom traku [voz/h];
- v_R – protok vozila desnih skretanja [voz/h];
- v_{L+TH} – kombinirani protok manevara ravno i lijevo [voz/h].



Slika 14. Kapacitet traka s izdvojenim desnim skretanjem [2]

Realni kapacitet traka s izdvojenim desnim skretanjem interpolira se korištenjem dvije točke (c_{sep}, n_{max}) i $(c_{SH}, 0)$ kako je prikazano na slici 14. Interpolirana vrijednost realnog kapaciteta izračunava se primjenom (110) [2].

$$c_R = \begin{cases} (c_{sep} - c_{SH}) \frac{n_R}{n_{max}} + c_{SH}, & \text{ako je } n_R \leq n_{max} \\ c_{sep} & , \text{ ako je } n_R > n_{max} \end{cases} \quad (110)$$

gdje je:

- c_R – realni kapacitet traka s izdvojenim desnim skretanjem [voz/h];
- c_{sep} – kapacitet prometnog traka ako su oba prostora pohrane vozila neograničeno dugačka, prema (99) [voz/h];
- c_{SH} – realni kapacitet traka kada sav promet dijeli jedan prometni trak [voz/h];
- n_R – stvarni prostor za pohranu vozila koja skreću desno (prema slici 13).

Realni kapacitet traka s izdvojenim desnim skretanjem c_R treba biti veći od kapaciteta koji bi se postigao kada bi sav promet koristio zajednički trak c_{SH} , ali manji ili jednak kapacitetu c_{sep} koji bi se ostvario ako su prostori za pohranu vozila neograničeno dugački [2].

k) Izračun prosječnog vremena kašnjenja

Kašnjenje koje doživljava vozač nastaje zbog različitih čimbenika, uključujući vrstu upravljanja prometom, geometriju ceste, prometne uvjete i moguće incidente. Metodologija nesemaforiziranog raskrižja fokusira se na kvantificiranje dijela kašnjenja koje je uzrokovano nailaskom na cestu s prvenstvom prolaska, reguliranu znakom obaveznog zaustavljanja STOP, što se naziva prosječnim vremenom kašnjenja [2].

Prosječno vrijeme kašnjenja obuhvaća kašnjenje usporavanja i zaustavljanja na kraju repa čekanja, vrijeme provedeno u repu, zaustavljeno kašnjenje na njegovom početku te kašnjenje prilikom ubrzanja do brzine slobodnog toka. Definira se kao ukupno vrijeme od dolaska vozila na kraj repa čekanja do trenutka kada napušta zaustavnu liniju raskrižja [2].

Prosječno vrijeme kašnjenja za bilo koji manevar ovisi o kapacitetu privoza i stupnju zasićenja. Analitički model za procjenu prosječnog vremena kašnjenja pretpostavlja da je potražnja manja od kapaciteta tijekom analiziranog razdoblja. Ako je stupanj zasićenja veći od 0,9, prosječno vrijeme kašnjenja znatno ovisi o trajanju analize, koje je obično 15 minuta. U slučajevima kada potražnja premašuje kapacitet tijekom 15-minutnog razdoblja, rezultati za prosječno vrijeme kašnjenja mogu biti netočni, pa se preporučuje produljiti razdoblje analize kako bi se obuhvatio period prekomjernog zasićenja. Za izračun prosječnog vremena kašnjenja koristi se (111) [2].

$$d = \frac{3600}{c_{m,x}} + 900T \left[\frac{v_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_x}{c_{m,x}} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}}\right)\left(\frac{v_x}{c_{m,x}}\right)}{450T}} \right] + 5 \quad (111)$$

gdje je:

- d – prosječno vrijeme kašnjenja [s/voz];
- v_x – protok vozila za manevar x [voz/h];
- $c_{m,x}$ – realni kapacitet manevra x [voz/h];
- T – razdoblje analize (0,25 h za 15-minutni interval) [h].

Konstantna vrijednost od 5 sekundi po vozilu u (111) koristi se za uzimanje u obzir vremena potrebnog vozilima za usporavanje od brzine slobodnog toka do brzine u repu čekanja, te za ubrzanje od zaustavne linije raskrižja do brzine slobodnog toka [2].

Učinak zajedničkog prometnog traka na glavnom privozu, u kojem vozila koja skreću lijevo mogu blokirati vozila prvog ranga koja idu ravno ili skreću desno, može biti značajan. Ako na glavnom toku nema posebnog traka za lijevo skretanje, vozila koja kasne s lijevom skretanjem mogu blokirati vozila prvog ranga iza sebe, uzrokujući kašnjenja ne samo za vozila prvog ranga, već i za vozila nižih rangova. Osim toga, dok vozila prvog ranga izlaze iz repa čekanja vozila koja skreću lijevo, oni također ometaju niže rangirana konfliktna vozila [2].

Terenska promatranja pokazala su da je učinak blokade vozila koja skreću lijevo na glavnom privozu obično vrlo nizak, jer glavni privoz često pruža dovoljno prostora da se blokirano vozilo zaobiđe s desne strane. Za uključivanje ovog učinka u analizu potrebno je procijeniti udio vozila prvog ranga koja se blokiraju i izračunati prosječno vrijeme kašnjenja za vozila koja skreću lijevo na glavnom privozu, a koja blokiraju vozila koja nastavljaju vožnju ravno [2].

U najjednostavnijem postupku, proporcija vozila prvog ranga na glavnom privozu koja nisu blokirana (bez repa čekanja) prikazana je s $p_{0,j}^*$ u (87). Pri izračunu kapaciteta nižeg ranga u konfliktu, $p_{0,j}^*$ treba zamijeniti s čimbenikom za lijevo skretanje $p_{0,j}$. Prema tome, proporcija vozila prvog ranga koja se blokiraju iznosi $1 - p_{0,j}^*$. Za izračunavanje prosječnog vremena kašnjenja vozila prvog ranga koristi se (112) [2].

$$d_{Rank1} = \begin{cases} \frac{((1 - p_{0,j}^*)d_{M,LT} \left(\frac{v_{i,1}}{N}\right))}{v_{i,1} + v_{i,2}}, & N > 0 \\ (1 - p_{0,j}^*)d_{M,LT}, & N = 0 \end{cases} \quad (112)$$

gdje je:

- d_{Rank1} – prosječno vrijeme kašnjenja vozila prvog ranga [s/voz];
- N – broj trakova za ravno po smjeru na glavnom privozu;
- $p_{0,j}^*$ – proporcija vozila prvog ranga koja nisu blokirana;
- $d_{M,LT}$ – vrijeme kašnjenja vozila koja skreću lijevu na glavnom privozu [s/voz];
- $v_{i,1}$ – broj vozila glavnog privoza koja nastavljaju vožnju ravno u zajedničkom traku [voz/h];
- $v_{i,2}$ – broj vozila glavnog privoza koja skreću lijevo u zajedničkom traku [voz/h].

Na cestama s više prometnih traka, u izračunima treba koristiti samo volumen prometa na glavnom toku u traci koja se može blokirati, što se označava kao $v_{i,1}$ i $v_{i,2}$. Ako se na prometnicama s više traka pretpostavlja da blokirana vozila prvog ranga neće zaobilaziti blokadu prelaskom u druge trake (što je razumna pretpostavka pri visokim prometnim tokovima na glavnom toku), tada vrijedi $v_{i,1} = v_{i,2}/N$. S obzirom na jedinstvene karakteristike svakog raskrižja, odluka o uključivanju ovog efekta u analizu prepuštena je analitičaru [2].

1) Izračun prosječnog vremena kašnjenja privoza i raskrižja

Prosječno vrijeme kašnjenja za sva vozila na određenom privozu izračunava se prema (113) kao ponderirani prosjek procijenjenih prosječnih vremena kašnjenja za svaki manevar [2].

$$d_A = \frac{d_r \cdot v_r + d_t \cdot v_t + d_l \cdot v_l}{v_r + v_t + v_l} \quad (113)$$

gdje je:

- d_A – prosječno vrijeme kašnjenja privoza [s/voz];
- d_r, d_t, d_l – prosječno vrijeme kašnjenja za manevre desno, ravno i lijevo [s/voz];
- v_r, v_t, v_l – volumen ili protok za manevre desno, ravno i lijevo [voz/h].

Prosječno vrijeme kašnjenja za raskrižje d_I izračunava se prema (114) [2].

$$d_I = \frac{d_{A,1} \cdot v_{A,1} + d_{A,2} \cdot v_{A,2} + d_{A,3} \cdot v_{A,3} + d_{A,4} \cdot v_{A,4}}{v_{A,1} + v_{A,2} + v_{A,3} + v_{A,4}} \quad (114)$$

gdje je:

- d_I – prosječno vrijeme kašnjenja raskrižja [s/voz];
- $d_{A,x}$ – prosječno vrijeme kašnjenja privoza [s/voz];
- $v_{A,x}$ – volumen ili protok privoza [voz/h].

Prilikom primjene (113) i (114) pretpostavlja se da je kašnjenje za sva vozila prvog ranga jednako 0 sekundi po vozilu. Razina usluge (LOS) za cijelo raskrižje nije određena

zbog niskog ponderiranog prosječnog vremena kašnjenja vozila na glavnom privozu. Proračun prosječnog vremena kašnjenja za raskrižje koristi se uglavnom za usporedbu različitih vrsta upravljanja raskrižjem. Razina usluge privoza i raskrižja u cjelini određuje se prema tablici 13, u ovisnosti o stupnju zasićenja raskrižja i prosječnom vremenu kašnjenja [2].

Tablica 13. Razina usluge nesemaforiziranih raskrižja [2]

Prosječno vrijeme kašnjenja [s/voz]	Razina usluge prema stupnju zasićenja	
	$X \leq 1,0$	$X > 1,0$
≤ 10	A	F
$> 10-15$	B	F
$> 15-25$	C	F
$> 25-35$	D	F
$> 35-50$	E	F
> 50	F	F

m) Izračun duljine repa čekanja

Proračun 95. percentila duljine repa čekanja je bitan za analizu nesemaforiziranih raskrižja. Teorijske studije i empirijska opažanja ukazuju da je distribucija vjerojatnosti duljina repova čekanja za svaki manevar na raskrižju funkcija kapaciteta i volumena prometa tijekom analiziranog razdoblja. Za procjenu 95. percentila duljine repa čekanja za lijevo skretanje s glavnog privoza i za sve trakove sa sporednog privoza koristi se (115).

$$Q_{95} \approx 900T \left[\frac{v_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_x}{c_{m,x}} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}}\right)\left(\frac{v_x}{c_{m,x}}\right)}{150T}} \right] \left(\frac{c_{m,x}}{3600}\right) \quad (115)$$

gdje je:

- Q_{95} – duljina repa čekanja za 95. percentil vozila [voz];
- v_x – protok za manevar x [voz/h];
- $c_{m,x}$ – realni kapacitet za manevar x [voz/h];
- T – razdoblje analize (0,25 h za 15-minutni interval) [h].

Prosječna duljina repa čekanja izračunava se kao produkt prosječnog kašnjenja po vozilu i protoka prometa za odabrani manevar [2].

5. Analiza raskrižja s kružnim tokom prometa primjenom metodologije HCM-a

Raskrižje s kružnim tokom prometa je kanalizirano raskrižje s neprovoznim ili djelomično provoznim središnjim otokom i kružnim prometnim kolnikom, na koji su povezana tri ili više privoza, a promet se odvija u suprotnom od kazaljke na satu [5].

U ovom poglavlju prikazat će se potrebni ulazni prometni podatci, navesti potencijalni izvori za njihovo dobivanje, prezentirati predložene zadane vrijednosti temeljene na geografskoj regiji, populaciji i vremenu dana ako nisu obuhvaćeni terenskim istraživanjem. U svrhu analize raskrižja s kružnim tokom prometa, objasniti će se proračunski koraci analize temeljeni na metodologiji HCM-a.

5.1. Ulazni podatci za analizu raskrižja s kružnim tokom prometa

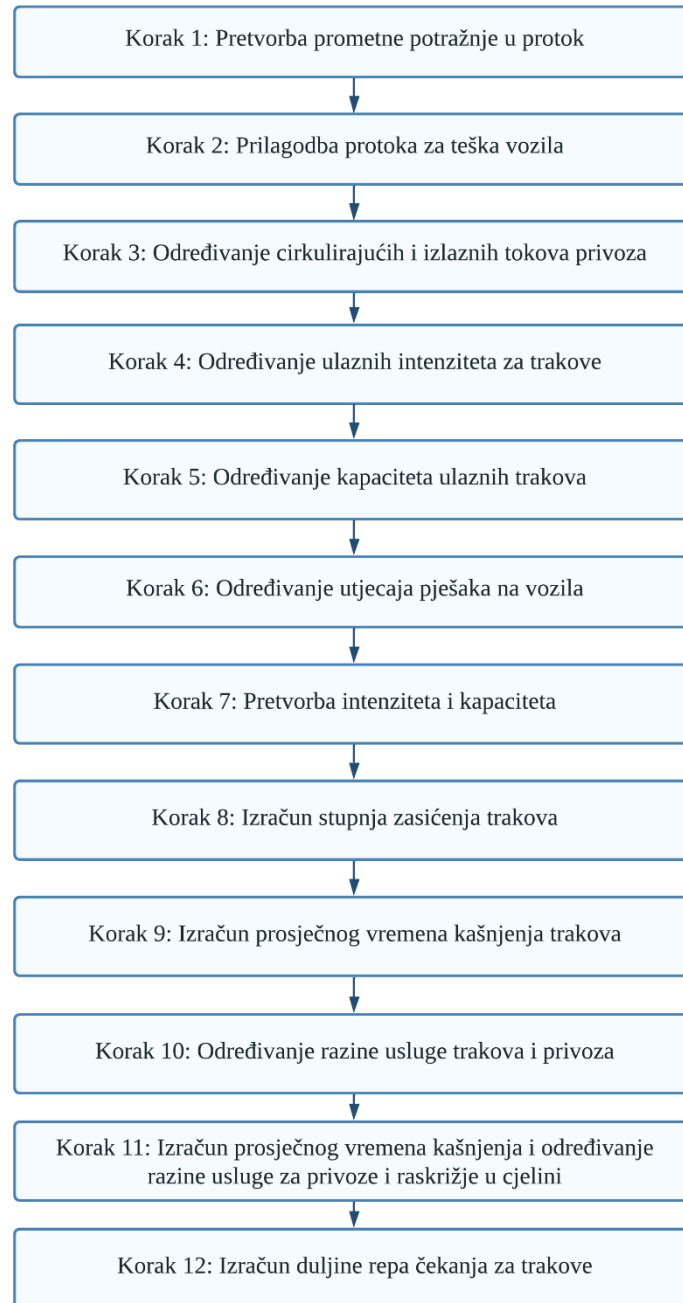
Potrebni ulazni podatci, njihovi potencijalni izvori i predložene zadane vrijednosti prikazane su u tablici 14.

Tablica 14. Potrebni ulazni podatci, potencijalni izvori i predložene vrijednosti za analizu raskrižja s kružnim tokom prometa [3]

Potrebni podatci i jedinice	Potencijalni izvori podataka	Predložena zadana vrijednost
Geometrijski podatci		
Broj i konfiguracija prometnih traka za svaki privoz	Projektni planovi, dokumentacija cesta	Potrebno osigurati
Podatci o potražnji		
Očekivanja prometna potražnja [voz/h] i faktor vršnog sata ili satni protok vozila [voz/h]	Terenski podatci, modeliranje	Potrebno osigurati
Period analize	Zadano od analitičara	15 min [0,25 sati]
Faktor vršnog sata [decimalno]	Terenski podatci	0,92
Udio teških teretnih vozila [%]	Terenski podatci	3%
Korištenje trakova	Terenski podatci	Lijevo-ravno + ravno-desno: % prometa u lijevom traku: 0,47 % prometa u desnom traku: 0,53 Lijevo-ravno-desno + desno: % prometa u lijevom traku: 0,47 % prometa u desnom traku: 0,53 Lijevo + lijevo-ravno-desno: % prometa u lijevom traku: 0,53 % prometa u desnom traku: 0,47

5.2. Proračunski koraci za raskrižja s kružnim tokom prometa

Proračunski koraci za analizu raskrižja s kružnim tokom prometa prema metodologiji HCM-a prikazani su na slici 15, a načini primjene pojedinog koraka prikazat će se u nastavku rada.



Slika 15. Proračunski koraci za analizu raskrižja s kružnim tokom prometa [3]

Primjena navedenih proračunskih koraka rezultirat će izlaznim podacima o prosječnom vremenu kašnjenja za trakove, privoze i raskrižje za koje se određuje razina usluge, te duljini repa čekanja za trakove.

a) Pretvorba prometne potražnje u protok

Prvi korak analize predstavlja izračun intenziteta pojedinih manevara na temelju podataka o brojanju prometa dobivenih istraživanjem terenskim istraživanjem ili u svrhu modeliranja.

Za analizu postojećih uvjeta gdje se vršnih 15 minuta može mjeriti na terenu, potražnja za vršnih 15 minuta se pretvaraju u prometnu potražnju za vršnih 15 minuta tako da se vršnih 15 minuta pomnoži s četiri. Za analizu projekcije uvjeta ili kad nisu dostupni podatci za tih 15 minuta, intenzitet prometa za manevar se pretvara u prometnu potražnju za manevar u vršnih 15 minuta koristeći (116) s pomoću faktora vršnog sata za raskrižje [3].

$$v_i = \frac{V_i}{PHF} \quad (116)$$

gdje je:

- v_i – intenzitet prometa za manevar i [voz/h];
- V_i – prometna potražnja za manevar i [voz/h];
- PHF – faktor vršnog sata.

Ako su dostupni stvarni podatci o prometnoj potražnji za 15 minutne intervale, onda se preporučuje njihovo korištenje umjesto korištenja faktora vršnog sata. Kada se koristi faktor vršnog sata, potrebno je takav faktor koristiti za cijelo raskrižje kako bi se spriječilo stvaranje scenarija potražnje sa suprotstavljenih potražnji koje nisu proporcionalne stvarnoj potražnji u analiziranom intervalu 15 minuta. Primjena faktora vršnog sata za pojedinačni privoz ili manevar, vjerojatno će stvoriti prometnu potražnju za period od 15 minuta u suprotnosti s potražnjom za drugi period od 15 minuta, ali u stvarnosti se ove potražnje ne događaju u isto vrijeme. U slučaju da pojedinačni pristupi ili manevri imaju znatno drugačija vršna obilježja za periode od 15 minuta u satu, serija analiza takvih perioda s vršnim podacima trebala bi se uzeti u obzir umjesto jedne analize koja koristi faktor vršnog sata za raskrižje [3].

b) Prilagodba protoka za teška vozila

Protok vozila za svaki manevar može se prilagoditi karakteristikama vozila u prometnom toku, primjenom koeficijenta ekvivalentnih jedinica automobila (E_T), E_T iz tablice 15, podataka o strukturi prometnog toka dobivenih prilikom brojanja prometa i prema (103) i (104) [3].

Tablica 15. Koeficijent ekvivalentnih jedinica automobila [3]

Vrsta vozila	Ekvivalent jedinice automobila, E_T
Osobni automobil	1,0
Teško vozilo	2,0

Na temelju podataka o strukturi prometnog toka, potrebno je za svaki manevar utvrditi udio teških vozila i na temelju tablice 15 i (117) izračunati čimbenik prilagodbe za teška vozila [3].

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1)} \quad (117)$$

$$v_{i,pce} = \frac{v_i}{f_{HV}} \quad (118)$$

gdje je:

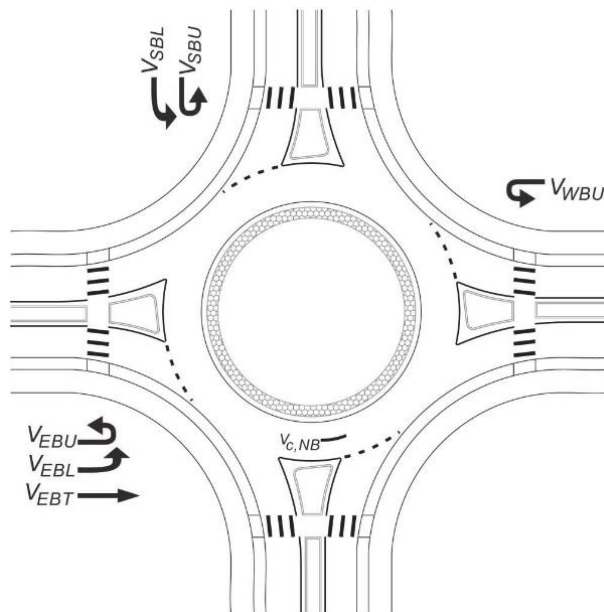
- f_{HV} – čimbenik prilagodbe za teška vozila;
- P_T – postotak teških vozila [%];
- E_T – ekvivalent jedinice automobila;
- $v_{i,pce}$ – intenzitet prometa za manevar i [PAJ/h];
- v_i – intenzitet prometa za manevar i [voz/h].

S pomoću čimbenika prilagodbe za teška vozila iz (117), izračunati prilagođeni intenzitet prometa prema (118) [3].

c) Određivanje cirkulirajućih i izlaznih tokova

Metodologija prikazana u nastavku primjenjuje se za izračunavanje cirkulirajućih i izlaznih tokova za svaki krak kružnog toka. Neovisno što je prikazan četverokraki kružni tok, metodologija se može primijeniti na kružne tokove s bilo kojim brojem krakova [3].

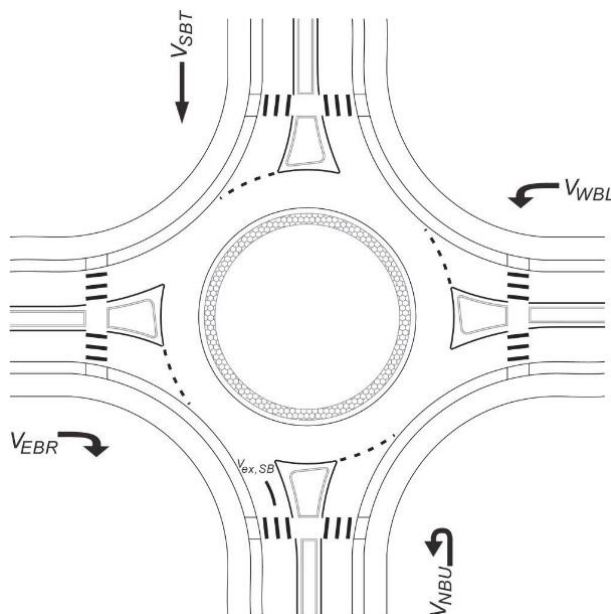
Cirkulirajući tok prometa definiran je kao protok suprotstavljen ulaznom toku vozila, odnosno protok koji prolazi ispred razdjelnog otoka predmetnog ulaznog toka. Na slici 16 prikazani su cirkulirajući tokovi za sjeverni privoz, a postupak izračuna cirkulirajućih tokova za sjeverni privoz prikazan je u (119) [3].



Slika 16. Izračun cirkulirajućeg intenziteta prometa za sjeverni privoz [3]

$$v_{c,NB,pce} = v_{WBU,pce} + v_{SBL,pce} + v_{SBU,pce} + v_{EBT,pce} + v_{EBL,pce} + v_{EBU,pce} \quad (119)$$

Izlazni intenzitet prometa za određeni privoz koristi se za izračunavanje suprotstavljenog toka za izdvojeni trak za desno skretanje. Postupak izračuna izlaznog toka južnog privoza prikazan je na slici 17 i u (120) [3].



Slika 17. Izračun izlaznog intenziteta prometa za južni privoz [3]

$$v_{ex,SB,pce} = v_{NBU,pce} + v_{WBL,pce} + v_{SBT,pce} + v_{EBR,pce} + v_{EBR,pce,bypass} \quad (120)$$

U slučaju da postoji poseban trak za desno skretanje kod ulaska u tok, promet koji skreće desno kroz taj trak se ne računa u izlazni tok [3].

d) Određivanje ulaznih intenziteta traka

Za jednostrane ulazne tokove, ulazni intenzitet prometa izračunava se zbrajanjem intenziteta svih manevara koji koriste taj ulaz. Kod višetračnih ulaza ili ulaza s rampama, postoji procedura u nastavku koristi se za dodjeljivanje prometnih tokova pojedinim trakama:

- ako je dostupan desni klinasti izvoz ili prometni trak, tok desnih skretanja izuzima se iz proračuna ulaznih tokova;
- ako je dostupan samo jedan prometni trak za predmetni manevar, tok za taj manevar se pripisuje samo tom prometnom traku;
- preostali tokovi smatraju se rasprostranjenima po svim prometnim trakovima te su podložni ograničenjima nametnutim bilo kojim određenim ili de facto dodijeljenim prometnim trakama i bilo kojim uočenim ili procijenjenim neravnotežama u korištenju traka [3].

Ova procedura omogućuje analizu pet općenitih višetračnih primjera. Kada manevar koristi više od jednog traka, prvo se određuje pretpostavljena konfiguracija traka, koja može varirati od standardnog korištenja trake na temelju analize specifičnih uzoraka skretanja.

Pretpostavljeno korištenje prometnih trakova prikazano je u narednoj tablici 16. Za raskrižja s različitim brojem prilaza, analitičari bi trebali koristiti razumnu procjenu pri dodjeljivanju intenziteta prometa svakom prometnom traku [3].

Tablica 16. Pretpostavljeno korištenje prometnih trakova [3]

Dodijeljeno korištenje traka	Pretpostavljeno korištenje traka
lijevo-ravno, desno-ravno	ako je $v_U + v_L > v_T + v_{R,e}$: L,TR (zapravo lijevi trak) ako je $v_R > v_U + v_L + v_T$: LT,R (zapravo desni trak) u suprotnom LT, TR
lijevo, lijevo-ravno-desno	ako je $v_T + v_{R,e} > v_U + v_L$: L,TR (zapravo ravno-desno trak) u suprotnom L; LTR
lijevo-ravno-desno, desno	ako je $v_U + v_L + v_T > v_{R,e}$: LT,R (zapravo lijevo-ravno trak) u suprotnom LTR, R
Napomena: $v_U, v_L, v_T, v_{R,e}$ su intenziteti toka za polukružno okretanje, lijevo-ravno, ravno, desno bez izvoznog klina za određeni ulaz. L - lijevo, LT- lijevo-ravno, TR - ravno-desno, R - desno	

Na temelju pretpostavljenog korištenja traka za ulazak te gore opisanog efekta korištenja trake, intenzitet toka može se pripisati svakom traku korištenjem jednadžbi navedenih u sljedećoj tablici 17 [3].

Tablica 17. Dodjeljivanje intenziteta prometa za dvotračne ulazne tokove [3]

Slučaj	Pretpostavljeno korištenje traka	Lijevi trak	Desni trak
1	lijevo, ravno-desno	$v_U + v_L$	$v_T + v_{R,e}$
2	lijevo-ravno, desno	$v_U + v_L + v_T$	$v_{R,e}$
3	lijevo-ravno, ravno-desno	$(\%LL)v_e$	$(\%RL)v_e$
4	lijevo, lijevo-ravno-desno	$(\%LL)v_e$	$(\%RL)v_e$
5	lijevo-ravno-desno, desno	$(\%LL)v_e$	$(\%RL)v_e$
Napomena: $v_U, v_L, v_T, v_{R,e}$ su intenziteti toka za polukružno okretanje, lijevo-ravno, ravno, desno bez izvoznog klina za određeni ulaz. L - lijevo, LT- lijevo-ravno, TR - ravno-desno, R - desno. $\%RL$ - postotak vozila koji koristi desni ulazni trak, $\%LL$ - postotak vozila koji koristi lijevi ulazni trak. $\%RL + \%LL = 1$.			

Kapacitet svakog ulaznog traka i traka za desno skretanje izvedenog kao klinasti izvoz iz kružnog raskrižja izračunava se koristeći jednadžbe kapaciteta prikazane u nastavku. Kapacitet za jedan ulazni trak koji je u konfliktu s jednim cirkulirajućim tokom izračunava prema (121).

$$c_{e,pce} = 1.380e^{(-1,02*10^{-3})v_{c,pce}} \quad (121)$$

Kapacitet za dvotračne ulazne trakove koji su u konfliktu s jednim cirkulirajućim tokom izračunava se za svaki pojedinačni trak prema (122).

$$c_{e,pce} = 1.420e^{(-0,91*10^{-3})v_{c,pce}} \quad (122)$$

Kapacitet za jedan ulazni trak koji je u konfliktu s dva cirkulirajuća toka izračunava se prema (123).

$$c_{e,pce} = 1.420e^{(-0,85 \cdot 10^{-3})v_{c,pce}} \quad (123)$$

Kapacitet za dvotračne ulazne trakove koji su u konfliktu s dva cirkulirajuća toka izračunava se posebno za desni i posebno za lijevi ulazni trak prema (124) i (125).

$$c_{e,R,pce} = 1.420e^{(-0,85 \cdot 10^{-3})v_{c,pce}} \quad (124)$$

$$c_{e,L,pce} = 1.350e^{(-0,92 \cdot 10^{-3})v_{c,pce}} \quad (125)$$

Kapacitet za desno skretanje izvedeno izvoznim klinom koji je u konfliktu s jednim izlaznim trakom raskrižja izračunava se prema (126).

$$c_{bypass,pce} = 1.380e^{(-1,02 \cdot 10^{-3})v_{ex,pce}} \quad (126)$$

Kapacitet za desno skretanje izvedeno izvoznim klinom koji je u konfliktu s dva izlazna traka raskrižja izračunava se prema (127).

$$c_{bypass,pce} = 1.420e^{(-0,85 \cdot 10^{-3})v_{ex,pce}} \quad (127)$$

e) Određivanje utjecaja pješaka na vozila

Prisutnost pješaka može smanjiti kapacitet vozila na ulazu u kružni tok, posebice ako ih je mnogo i ako koriste svoje pravo prvenstva. Kod visoko konfliktnih tokova vozila, pješaci obično prelaze između vozila u redu na ulazu, pa je njihov utjecaj na kapacitet ulaska vozila zanemariv. Kod nisko konfliktnih tokova vozila, pješaci mogu djelovati kao dodatna konfliktna vozila, smanjujući time kapacitet ulaza vozila. Utjecaj pješaka postaje izraženiji s porastom njihovog broja [3].

Model određivanja utjecaja pješaka temelji se na apsolutnom prioritetu pješaka pri prelasku ulaznog traka, a jednadžbe za izračun čimbenika prilagodbe za jedan ulazni trak ovise o konfliktom broju vozila, konfliktom broju pješaka i prikazane su na slici 18.

Ako je broj konfliktnih cirkulirajućih tokova $v_{c,pce} > 881$ čimbenik prilagodbe iznosi $f_{ped} = 1$, ako je broj konfliktnih pješaka po satu $n_{ped} \leq 101$ čimbenik prilagodbe izračunava se prema (128).

$$f_{ped} = 1 - 0,000137 \cdot n_{ped} \quad (128)$$

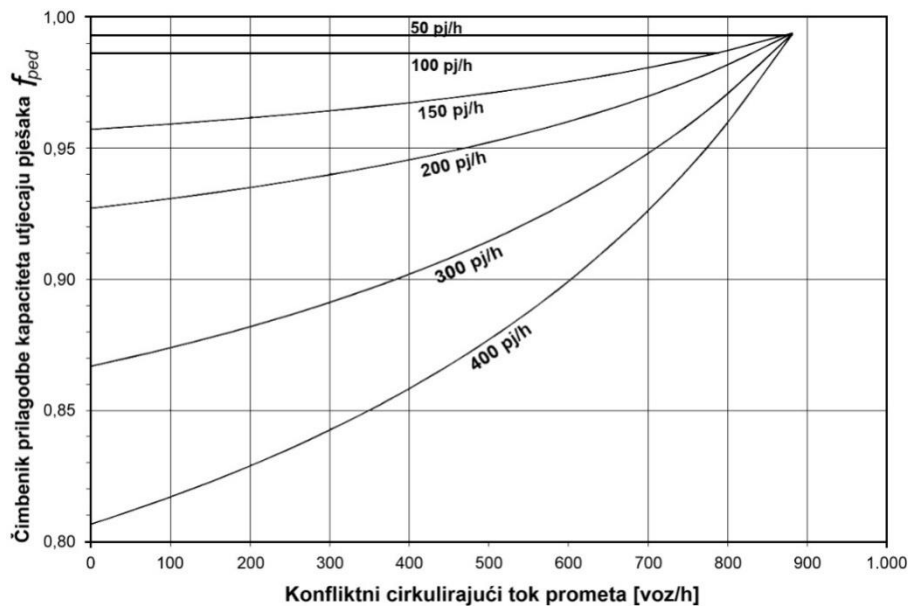
U suprotnom, primjenjuje se (129).

$$f_{ped} = \frac{1.119,5 - 0,715 \cdot v_{c,pce} - 0,644 \cdot n_{ped} + 0,00073 \cdot v_{c,pce} \cdot n_{ped}}{1.068,6 - 0,654 \cdot v_{c,pce}} \quad (129)$$

gdje je:

- f_{ped} – čimbenik prilagodbe kapaciteta utjecaju pješaka;
- n_{ped} – broj konfliktnih pješaka u satu [pj/h];

$v_{c,pce}$ – konfliktni cirkulirajući prometni tok [voz/h].



Slika 18. Čimbenik prilagodbe kapaciteta utjecaju pješaka za jednostrani ulaz [3]

Za izračun čimbenika prilagodbe utjecaju pješaka za dvotračni ulaz primjenjuju se (130) i (131) koje su kao i prethodnom slučaju prikazane na slici 19 i pretpostavljaju da pješaci imaju apsolutni prioritet [3].

Ako je broj konfliktnih pješaka u satu $n_{ped} < 100$ primjenjuje se (130),

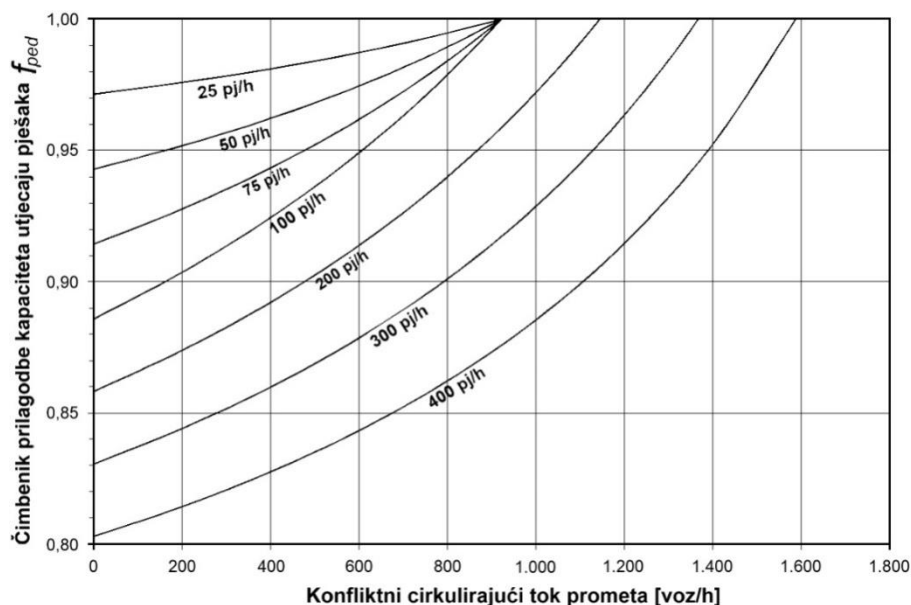
$$f_{ped} = \min \left[1 - \frac{n_{ped}}{100} \left(1 - \frac{1.260,6 - 0,329 \cdot v_{c,pce} - 0,381 \cdot 100}{1,380 - 0,5 \cdot v_{c,pce}} \right), 1 \right] \quad (130)$$

u suprotnom primjenjuje se (131).

$$f_{ped} = \min \left[\frac{1.260,6 - 0,329 \cdot v_{c,pce} - 0,381 \cdot n_{ped}}{1,380 - 0,5 \cdot v_{c,pce}}, 1 \right] \quad (131)$$

gdje je:

- f_{ped} – čimbenik prilagodbe kapaciteta utjecaju pješaka;
- n_{ped} – broj konfliktnih pješaka u satu [p/h];
- $v_{c,pce}$ – konfliktni cirkulirajući prometni tok [voz/h].



Slika 19. Čimbenik prilagodbe kapaciteta utjecaju pješaka za dvotračni ulaz [3]

f) Pretvorba intenziteta prometa i kapaciteta traka u vozila na sat

Intenzitet prometa određenog prometnog traku pretvara se natrag u vozila po satu tako što se intenzitet prometa tog traka izračunan u ekvivalentima putničkih vozila u prethodnom koraku pomnoži s čimbenikom za teška vozila tog traka, kako je prikazano u (132) [3].

$$v_i = v_{i,PCE} \cdot f_{HV,e} \quad (132)$$

gdje je:

- v_i – intenzitet prometa za manevar i [voz/h];
- $v_{i,PCE}$ – intenzitet prometa za manevar i [PAJ/h];
- $f_{HV,e}$ – čimbenik prilagodbe teškim vozilima za trak.

Slično tome, kapacitet za određeni prometni trak pretvara se natrag u vozila po satu, prema (133) [3].

$$c_i = c_{i,PCE} \cdot f_{HV,e} \cdot f_{ped} \quad (133)$$

gdje je:

- c_i – kapacitet prometnog traka i [voz/h];
- $c_{i,PCE}$ – kapacitet prometnog traka i [PAJ/h];
- $f_{HV,e}$ – čimbenik prilagodbe teškim vozilima za trak;
- f_{ped} – čimbenik prilagodbe utjecaju pješaka.

Čimbenik prilagodbe teškim vozilima za svaki ulazni trak može se približno izračunati uzimajući u obzir ponderiranu prosječnu vrijednost čimbenika prilagodbe za teška vozila za svaki manevar koji ulazi u kružni tok (isključujući izdvojenu traku za skretanje, ako postoji). Ova vrijednost se ponderira prema intenzitetu prometa, kao što je prikazano u (134) [3].

$$f_{HV,e} = \frac{f_{HV,U} \cdot v_{U,PCE} + f_{HV,L} \cdot v_{L,PCE} + f_{HV,T} \cdot v_{T,PCE} + f_{HV,R,e} \cdot v_{R,e,PCE}}{v_{U,PCE} + v_{L,PCE} + v_{T,PCE} + v_{R,e,PCE}} \quad (134)$$

gdje je:

- $f_{HV,e}$ – čimbenik prilagodbe za teška vozila za ulazni trak;
- $f_{HV,i}$ – čimbenik prilagodbe za teška vozila za manevar i ;
- $v_{i,PCE}$ – intenzitet prometa za manevar i [PAJ/h].

Ako su poznate specifične dodjele traka za korištenje od strane teških vozila, moguće je zasebno izračunati čimbenik prilagodbe teškim vozilima za svaki trak [3].

g) Izračun stupnja zasićenja traka

Stupanj zasićenja omjer je intenziteta prometa i kapaciteta prometa, a izračunava se prema (135) [3].

$$x_i = \frac{v_i}{c_i} \quad (135)$$

gdje je:

- x_i – stupanj zasićenja prometnog traka i ;
- v_i – očekivana prometna potražnja traka i (stvarni intenzitet prometnog traka) [voz/h];
- c_i – kapacitet prometnog traka i [voz/h].

h) Izračun prosječnog vremena kašnjenja traka

Prema podacima o vremenima kašnjenja prikupljenima za kružne tokove u SAD-u utvrđeno je da se prosječna vremena kašnjenja mogu predvidjeti metodom sličnom onoj koja se koristi za nesemaforizirana raskrižja. Model za procjenu prosječnog kašnjenja po traku na privozu kružnom raskrižju prikazan je u (136) [3].

$$d = \frac{3600}{c} + 900 \cdot T \left[x - 1 + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c}\right) \cdot x}{450 \cdot T}} \right] + 5 \cdot \min[x, 1] \quad (136)$$

gdje je:

- d – prosječno vrijeme kašnjenja traka [s/voz];
- x – stupanj zasićenja traka;
- c – kapacitet traka [voz/h];
- T – period analize [h] (za cijeli sat $T=1$, za 15 min $T=0,25$).

i) Određivanje razine usluge traka, privoza i raskrižja

Kriteriji za procjenu razine usluge raskrižja s kružnim tokom prometa za privoz ili raskrižje u cjelini su vrijeme kašnjenja i omjer prometnog opterećenja i kapaciteta prometnog traka, odnosno stupanj zasićenja [3]. U tablici 18 prikazane su razine usluga koje se dodjeljuju prema stupnju zasićenosti i prosječnom vremenu kašnjenja.

Tablica 18. Razine usluge raskrižja s kružnim tokom prometa [3]

Prosječno vrijeme kašnjenja [s/voz]	Razina usluge prema stupnju zasićenja	
	$X \leq 1,0$	$X > 1,0$
0-10	A	F
>10-15	B	F
>15-25	C	F
>25-35	D	F
>35-50	E	F
>50	F	F

j) Izračun prosječnog vremena kašnjenja privoza i raskrižja u cjelini

Prosječno vrijeme kašnjenja za privoz izračunava se kao ponderirani prosjek vremena kašnjenja za svaki trak na privozu, ponderirano prema intenzitetu prometa u svakom traku prema (137), a u izračun treba uključiti i intenzitet prometa u izdvojenom traku za desno skretanje [3].

$$d_{approach} = \frac{d_{LL} \cdot v_{LL} + d_{RL} \cdot v_{RL} + d_{bypass} \cdot v_{bypass}}{v_{LL} + v_{RL} + v_{bypass}} \quad (137)$$

gdje je:

- $d_{approach}$ – prosječno vrijeme kašnjenja privoza [s/voz];
- d – prosječno vrijeme kašnjenja traka [s/voz];
- v – intenzitet prometa u traku [voz/h].

Prosječno vrijeme kašnjenja za cijelo raskrižje izračunava se pomoću ponderiranog prosječnog vremena kašnjenja svakog privoza, ponderirane intenzitetom prometa na svakom privozu, primjenom (138) [3].

$$d_{intersection} = \frac{\sum d_i \cdot v_i}{\sum v_i} \quad (138)$$

gdje je:

- $d_{intersection}$ – prosječno vrijeme kašnjenja raskrižja u cjelini [s/voz];
- d_i – prosječno vrijeme kašnjenja privoza i [s/voz];
- v_i – intenzitet prometa privoza i [voz/h].

Razina usluge privoza i raskrižja u cjelini određuje se prema tablici 18, u ovisnosti o stupnju zasićenja i prosječnom vremenu kašnjenja [3].

k) Izračun duljine repa čekanja traka

Duljina repa čekanja, odnosno 95. percentil duljine repa čekanja za pojedini trak na privozu izračunava se prema (139) [3].

$$Q_{95} = 900 \cdot T \left[x - 1 + \sqrt{(1 - x)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c}\right) \cdot x}{150T}} \right] \left(\frac{c}{3600}\right) \quad (139)$$

gdje je:

- Q_{95} – duljina repa čekanja traka [voz];
- x – stupanj zasićenja traka;
- c – kapacitet traka [voz/h];
- T – period analize [h] (za cijeli sat $T=1$, za 15 min $T=0,25$).

Izračunanu duljinu repa čekanja za svaku traku treba usporediti s dostupnim prostorom. Repovi čekanja mogu međusobno utjecati na sljedeće načine:

- ako repovi čekanja u susjednim trakovima premašuju kapacitet, rep čekanja u određenom traku može se povećati zbog dodatnog formiranja repa iz susjednog traka;
- ako rep čekanja u jednom traku premašuje kapacitet za susjedne trakove, susjedni trak može biti ispražnjen zbog repa čekanja u tom traku [3].

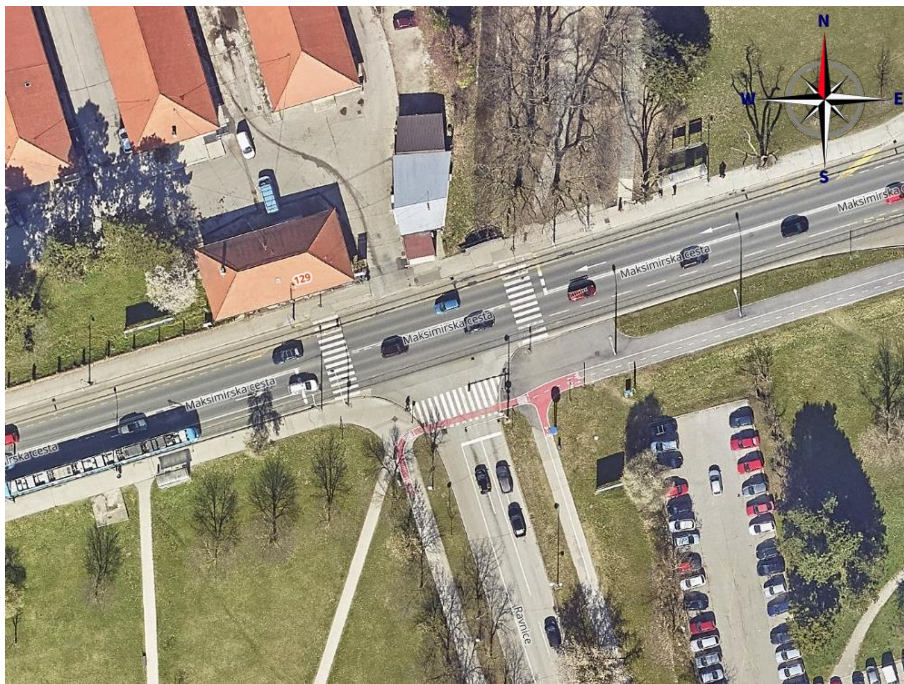
U slučaju ovih uvjeta, može se provesti analiza osjetljivosti kroz variranje zahtjeva u svakom traku. Analitičari također mogu koristiti alternativne alate osjetljive na učinke po traku [3].

6. Primjena metodologije HCM-a na konkretnim primjerima raskrižja

U ovom poglavlju prikazana je primjena metodologije HCM-a na tri primjera raskrižja u Gradu Zagrebu. Za semaforizirano raskrižje odabrano je raskrižje Maksimirske ceste i Ulice Ravnice, za nesemaforizirano raskrižje Ulice Ravnice XI i Ulice Ravnice V, a za kružno raskrižje Ulice Ravnice, Aleje Antuna Augustinčića i Ulice Jurja Dalmatinca. Navedena raskrižja odabrana su iz zato što se nalaze u neposrednoj blizini jedna drugome, kružno raskrižje nalazi se na približno 300 metara od južnog privoza semaforiziranog raskrižja, a nesemaforizirano raskrižje nalazi se na približno 350 metara od istočnog privoza kružnog raskrižja.

6.1. Semaforizirano raskrižje Maksimirska cesta - Ulica Ravnice

Semaforizirano raskrižje Maksimirske ceste i Ulice Ravnice prikazano je na slici 20. Ima tri privoza koja su u nastavku označena prema položaju u odnosu na strane svijeta. Maksimirska cesta koja prolazi raskrižjem u smjeru istok - zapad predstavlja granicu između gradskih četvrti Maksimir i Peščenica. Istočni dio ceste povezan je s gradskom četvrti Dubrava. Raskrižje je prometno iznimno važno, posebno za uslugu javnog gradskog prijevoza, jer kroz njega prolazi jedina tramvajska pruga koja povezuje centar grada s istočnim dijelom. Također je značajno za pristup uslugama bolničkih centara, a mnogi građani svakodnevno koriste ovo raskrižje kako bi stigli do svojih odredišta. Analizom prometne povezanosti Grada Zagreba utvrđeno je da ono čini jednu od tri ključne prometnice koja povezuje centar grada s njegovim istočnim dijelom, uz Ulicu Kneza Branimira i Slavonsku aveniju.



Slika 20. Satelitski snimak semaforiziranog raskrižja Maksimirska cesta - Ulica Ravnice [8]

Zapadni privoz raskrižja koji je prikazan na slici 21 ima dva prometna traka - trak za ravno i trak za ravno i desno koji dijeli namjenu s javnim gradskim prijevozom. Na privozu se nalazi stajalište tramvaja i semaforizirani pješački prijelaz s pješačkom najavnom tipkom.



Slika 21. Zapadni privoz semaforiziranom raskrižju Maksimirska cesta - Ulica Ravnice

Istočni privoz raskrižju prikazan na slici 22 ima dvije prometne trake - ekskluzivni trak za vožnju ravno na raskrižju i desni trak namijenjen isključivo za vozila javnog gradskog prijevoza. Ispred istočnog privoza nalazi se tramvajsko stajalište i semaforizirani pješački prijelaz s pješačkom najavnom tipkom.



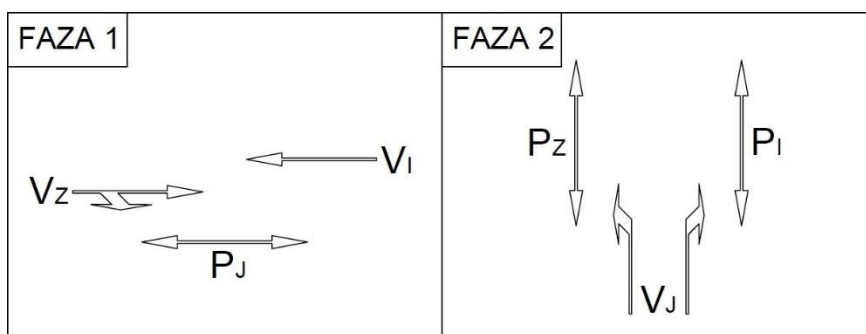
Slika 22. Istočni privoz semaforiziranom raskrižju Maksimirska cesta - Ulica Ravnice

Na južnom privozu prikazanom na slici 23 nalaze se dva prometna traka - jedan ekskluzivan trak za skretanje lijevo i jedan ekskluzivan trak za skretanje desno, koji su opremljeni video-detekcijskim sensorima i tehnologijom optičkog prepoznavanja objekata za detekciju kretanja motornog prometa. Za kretanje pješačkih i biciklističkih tokova na privozu se nalazi semaforizirani pješački prijelaz s biciklističkom trakom s ustaljenim trajanjem faze.



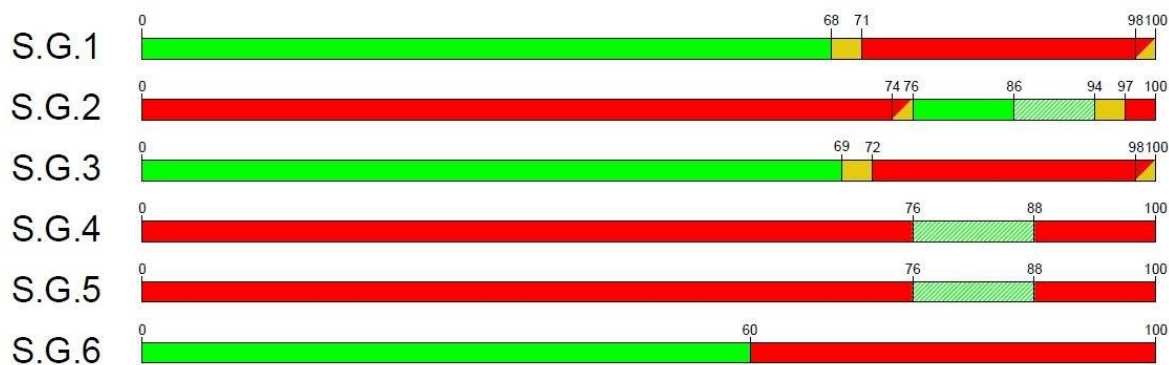
Slika 23. Južni privoz semaforiziranom raskrižju Maksimirska cesta - Ulica Ravnice

Analizom raskrižja utvrđeno je da trajanje ciklusa iznosi 100 sekundi, a ciklus se odvija u dvije faze prikazane na slici 24. U prvoj fazi propuštaju se vozila na zapadnom i istočnom privozu s pješacima preko južnog privoza, a u drugoj se fazi propuštaju vozila s južnog privoza te pješaci preko zapadnog i istočnog privoza.



Slika 24. Pregled faza semaforiziranog raskrižja Maksimirska cesta - Ulica Ravnice

U nastavku, na slici 25 prikazan je signalni plan raskrižja s trajanjem od 100 sekundi na kojem su prikazana zelena vremena za pojedine signalne grupe.



Slika 25. Signalni plan raskrižja Maksimirska cesta - Ulica Ravnice

U prvoj fazi prethodno prikazanog signalnog plana, koji se sastoji od šest signalnih grupa, zajedno se izvode signalna grupa 1, signalna grupa 3 i signalna grupa 6.

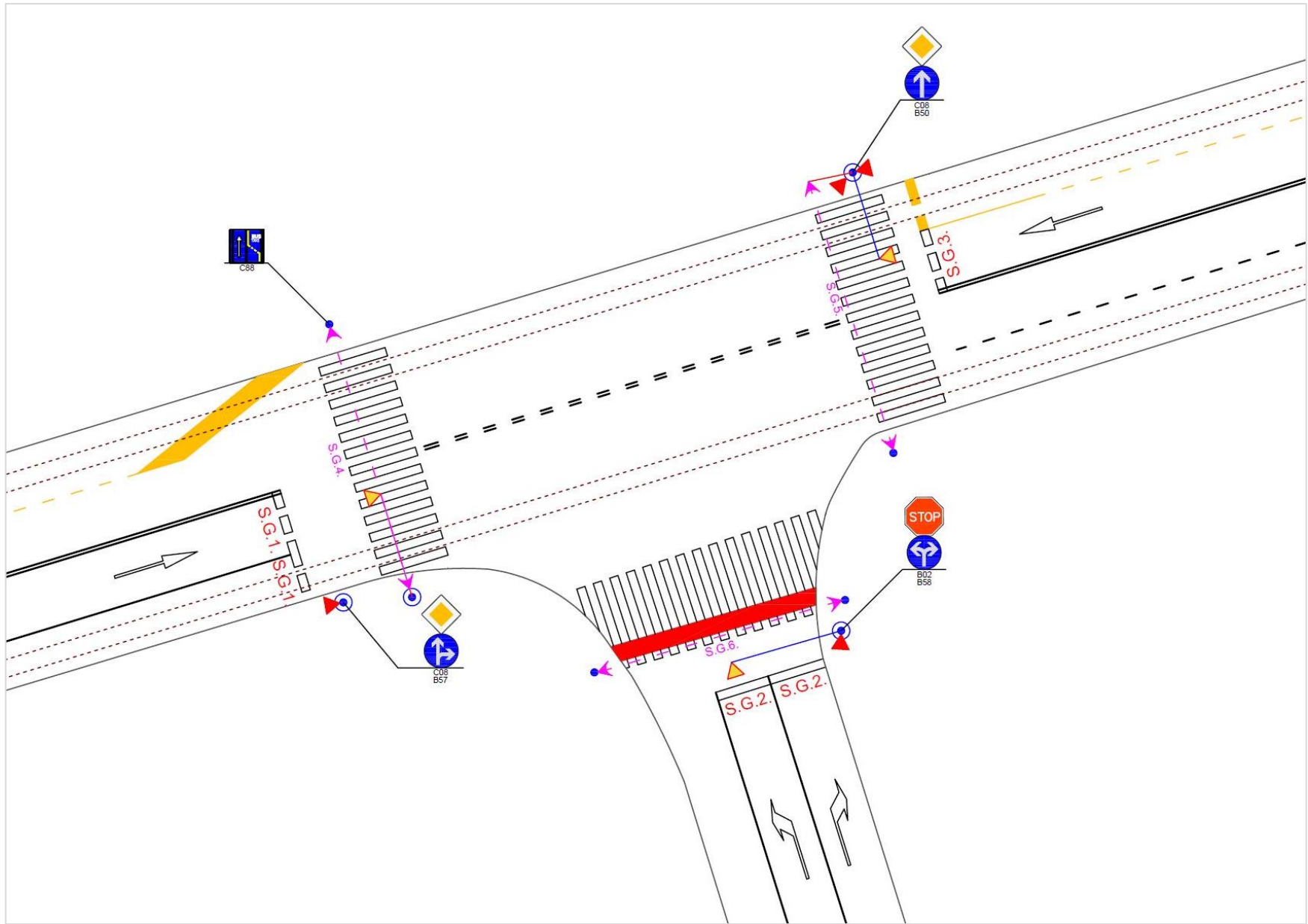
Za signalnu grupu 1, vozila zapadnog privoza ravno i ravno-desno, trajanje zelenog svjetlosnog pojma iznosi 68 sekundi, prijelazni žuti signalni pojam traje 3 sekunde zbog ograničenja brzine 50 (km/h) u naselju, crveni signalni pojam traje 27 sekundi, a potom se pali prijelazni signalni pojam crveno + žuto koji traje 2 sekunde. Za signalnu grupu 3, vozila istočnog privoza za ravno, trajanje zelenog svjetlosnog pojma iznosi 69 sekundi, prijelazni žuti signalni pojam traje 3 sekunde, crveni signalni pojam 26 sekundi, a potom se pali prijelazni pojam crveno + žuto u trajanju 2 sekunde. Uz navedene, još se u prvoj fazi izvodi signalna grupa 6 za pješake i bicikliste na južnom privozu kojima trajanje zelenog svjetlosnog pojma iznosi 60 sekundi.

U drugoj fazi signalnog plana izvodi se signalna grupa 2 (lijevo i desno na južnom privozu), signalna grupa 4 (pješaci na zapadnom privozu) i signalna grupa 5 (pješaci na istočnom privozu).

Za signalnu grupu 2, vozila južnog privoza za lijevo i desno, trajanje zelenog svjetlosnog pojma iznosi od 10 do 18 sekundi zato što je privoz opremljen video-detekcijskim senzorima koji bilježe prisutnost vozila. Ako na isteku 10 sekundi zelenog svjetlosnog pojma ima zabilježenih vozila u području detekcije, trajanje zelenog svjetla za vozila južnog privoza produljuje se za 8 sekundi. Prijelazno žuto traje 3 sekunde, prijelazno crveno + žuto traje 2 sekunde, a trajanje crvenog svjetlosnog pojma ovisi o prisutnosti vozila i iznosi 77 ili 85 sekundi.

Za signalne grupe 4 i 5, pješake na zapadnom i pješake na istočnom privozu, trajanje zelenog svjetlosnog pojma iznosi 12 sekundi ako je putem pješačke najavne tipke predan zahtjev za zeleno svjetlo. Unutar ciklusa za sve štićene signalne grupe između prijelaza faza osigurana je 1 sekunda sve crveno.

U programskom sustavu AutoCAD primjenom uputa navedenih u [6] i [7] izrađen je tlocrtni prikaz semaforiziranog raskrižja Maksimirska cesta - Ulica Ravnice koji je prikazan na slici 26.



Slika 26. Tlocrtni prikaz semaforiziranog raskrižja Maksimirska cesta - Ulica Ravnice

Primjena proračunskih koraka semaforiziranog raskrižja

Raskrižje ima pet prometnih trakova, na zapadnom privozu ekskluzivni trak za ravno i zajednički trak za ravno i desno, na istočnom privozu ekskluzivni trak za ravno te na južnom privozu ekskluzivni trak za lijevo i ekskluzivni trak za desno skretanje. Međutim, trak na zapadnom privozu za ravno i desno nije označen prometnim znakom ravno i desno, dijeli prometni trak s tramvajskim prometom i ne koristi se kao trak za ravno, tako da će se u radu razmatrati kao ekskluzivni trak za desno. Primjenom pravila za određivanje grupa kretanja svaki ekskluzivni trak označava se kao grupa kretanja, što rezultira formiranjem pet grupa kretanja za ekskluzivne trakove tj. pet grupa traka.

Nakon određivanja grupe traka, terenskim je istraživanjem i brojanjem prometa utvrđen protok za pojedinu grupu traka kako prikazano u tablici 19.

Tablica 19. Prometno opterećenje grupa trakova semaforiziranog raskrižja Maksimirska cesta - Ravnice

Privoz	Manevar	v_i	V_i
Zapad	ravno	743	808
	desno	65	71
	pješaci	56	61
Istok	ravno	1413	1536
	pješaci	100	109
Jug	lijevo	51	55
	desno	86	93
	pješaci	60	65
	biciklisti	48	52

Za svaku grupu traka određena je prilagođena stopa zasićenja prema čimbenicima opisanim u poglavlju 3.2. U tablici 20. prikazani su primijenjeni čimbenici prilagodbe za izračun prilagođene stope zasićenja za svaku grupu traka.

Tablica 20. Prikaz primijenjenih čimbenika prilagodbe za izračun prilagođene stope zasićenja grupe traka

Grupa trakova	Zapad		Istok	Jug	
	ravno	desno	ravno	lijevo	desno
s_0 – osnovno zasićenje toka [voz/h/trak]	1.900	1.900	1.900	1.900	1.900
f_{HVg} – prilagodba za teška vozila i nagib	0,9763	0,9763	0,9763	0,9763	0,9763
f_{bb} – prilagodba za utjecaj javnog prometa	1,00	0,888	1,00	1,00	1,00
f_{Lpb} – prilagodba za pješake i bicikliste pri lijevom skretanju	1,00	1,00	1,00	0,746	1,00
f_{Rpb} – prilagodba za pješake i bicikliste za desna skretanja	1,00	0,8966	1,00	1,00	0,546
s – prilagođena stopa zasićenja toka [voz/h/trak]	1.855	1.477	1.855	1.384	1.013

Iz tablice 20 može se zaključiti kako su primijenjeni čimbenici prilagodbe najviše djelovali na grupu traka južnog privoza što nije neobično s obzirom na kratko trajanje faze od 12-18 [s] i prisutnost najopterećenijeg pješačkog prijelaza raskrižja. Slična situacija prisutna je i u grupi traka lijevo, južnog privoza. Na grupu traka desno na zapadnom privozu djeluje

utjecaj javnog prometa i pješački i biciklistički tokovi na južnom privozu, čiji utjecaj nije prevelik jer se izvode u istoj fazi koja za pješake i bicikliste traje 60 [s].

Čimbenik prilagodbe za teška vozila i nagib za sve grupe traka izračunava se primjenom jednadžbe (3) za vodoravne nagibe ili uzbrdice. Predložena zadana vrijednost udjela teških vozila iz tablice 3 iznosi 3 % što odgovara promatranim uvjetima. Istočni i zapadni privoz imaju vodoravan nagib privoza 0 %, dok se južni privoz nalazi na zanemarivo blagom uzbrdici ispod 1 %. Čimbenik prilagodbe za teška vozila i nagib iznosi 0,9763 i jednak je za sve grupe traka na svim privozima raskrižju.

Čimbenik prilagodbe za utjecaj javnog prometa uzima u obzir utjecaj lokalnih autobusa javnog prijevoza koji se zaustavljaju na stanicama unutar 76,2 [m] od linije zaustavljanja (uzvodno ili nizvodno) kako bi iskricali ili ukrcali putnike. Na raskrižju nema autobusnih stajališta koji bi se mogli uzeti u obzir. Na udaljenosti od 90 [m] od zaustavne linije zapadnog privoza raskrižja dolazi do isplitanja jednog prometnog traka u dva prometna traka, u prometni trak za ravno i prometni trak za ravno i desno skretanje na raskrižju. Prije navedenog isplitanja, desni trak je namijenjen isključivo za kretanje vozila javnog prijevoza. Tako tramvajski promet i desno skretanje na zapadnom privozu dijele prometni trak, a stajalište tramvaja „Ravnice“ udaljeno je 15 [m] od zaustavne linije. Kada tramvaj izmjeni putnike na stajalištu, prolazi raskrižjem ili se pomiče do zaustavne linije raskrižja u ovisnosti o signalnim pojmovima tramvajskog prometa. Pozicioniranje tramvaja koji ima duljinu 32,054 [m] kada je u pitanju dvozglojni niskopodni tramvaj TMK 2200 [10], na zaustavnoj liniji onemogućuje desna skretanja na raskrižju, što znatno utječe na tu grupu traka te čimbenik iznosi 0,888.

Analizom voznog reda Zagrebačkog električnog tramvaja objavljenog na njihovim mrežnim stranicama [11] utvrđeno je kako raskrižjem u oba smjera prometuju četiri tramvajске linije, linija 4 „Savski most - Dubec“, linija 11 „Črnomerec - Dubec“, linija 12 „Ljubljanića - Dubrava“ i linija 7 „Arena Zagreb - Dubrava“. U vršnom satu od 8 do 9 sati na tramvajskom stajalištu zapadnog privoza zaustavi se 28 tramvaja, dok se na tramvajskom stajalištu istočnog privoza zaustavi 30 tramvaja. Tramvaj i autobus imaju približno jednako trajanje zaustavljanja pri ukrcaju i iskrcaju putnika - od oko 20 [s] po manevru, tako da su se tramvajска zaustavljanja na zapadnom privozu promatrala pri izračunu kao ekvivalentna autobusima.

Čimbenik prilagodbe za pješake i bicikliste pri lijevom skretanju za sve grupe trakova na zapadnom, istočnom i grupi traka za desno južnog privoza iznosi 1,0. Na južnom privozu grupa traka za lijevo izračunava se prema prethodno prikazanom postupku koristeći jednadžbe (8), (9), (13), (15) i (18) . Spomenuti čimbenik prilagodbe iznosi 0,746.

Čimbenik prilagodbe za pješake i bicikliste pri desnom skretanju iznosi 1,0 za sve grupe trakova istočnog privoza, grupu trakova ravno na zapadnom privozu i grupu trakova za lijevo na južnom privozu. Za grupe trakova desno na zapadnom privozu izračunava se čimbenik prilagodbe za pješake i bicikliste pri desnom skretanju koristeći jednadžbe (8), (9), (11), (12), (14), (15) i (17), dok se za grupu trakova desno na južnom privozu izračunava čimbenik prilagodbe za pješake pri desnom skretanju koristeći jednadžbe (8), (9), (13), (15) i

(17). Spomenuti čimbenici prema ranije prikazanim izračunima iznose 0,8966 za zapadni i 0,546 za južni privoz.

Ostali čimbenici ne utječu na zasićenost prometnog toka iz sljedećih razloga:

- čimbenik prilagodbe za širinu traka za sve grupe trakova iznosi 1,0 jer je prosječna širina traka na svim privozima prema tablici 7 unutar dimenzija od 3,048 do 3,932 [m];
- čimbenik prilagodbe za parkiranje za sve grupe trakova iznosi 1,0 jer nije prisutno parkiranje u grupi trakova, niti u susjednim grupama trakova i nema povremenog blokiranja susjedne trake vozilima koja ulaze i izlaze iz parkirnih mjesta na svim privozima raskrižja;
- čimbenik prilagodbe za tip područja za sve grupe trakova raskrižja iznosi 1,0 jer se raskrižje ne nalazi u području koje ima karakteristike centralnih poslovnih četvrti i geometrijski dizajn, a prometni i pješački tokovi ne dovode do značajnih povećanja vremenskih razmaka između vozila;
- čimbenik prilagodbe za tip područja za sve grupe trakova raskrižja iznosi 1,0 jer se raskrižje ne nalazi u području koje ima karakteristike centralnih poslovnih četvrti i geometrijski dizajn, prometni i pješački tokovi ne dovode do značajnih povećanja vremenskih razmaka između vozila;
- čimbenik prilagodbe za korištenje traka za sve grupe trakova iznosi 1,0 jer sve grupe trakova sadrže samo jednu ekskluzivnu traku;
- čimbenik prilagodbe za desna skretanja iznosi 1,0 za sve grupe trakova raskrižja jer geometrija putanje desnih skretanja ne utječe na smanjenje stope zasićenja;
- čimbenik prilagodbe za lijeva skretanja iznosi 1,0 za sve grupe trakova jer se na istočnom i zapadnom privozu nalaze samo grupe trakova za ravno i desno, a na južnom privozu grupe trakova za lijevo i desno;
- čimbenik prilagodbe za prisutnost radne zone iznosi 1,0 za sve grupe trakova raskrižja jer se unutar 76,2 [m] od zaustavnih linija privoza ne nalazi radna zona koja bi utjecala na stopu zasićenja;
- čimbenik prilagodbe za utjecaj zatvaranja traka iznosi 1,0 za sve grupe trakova raskrižja jer nema prisutnih blokada trakova nizvodno raskrižja;
- čimbenik prilagodbe za utjecaj šok-vala iznosi 1,0 za sve grupe trakova raskrižja jer ne dolazi smanjenja stope zasićenja za grupe traka nizvodno koje ulaze u segment.

Nakon određivanja zasićenosti prometnog toka određen je omjer dolazaka tijekom zelenog signalnog pojma, uz primjenu čimbenika prilagodbe progresije koji za dobru progresiju, kada većina vozila dolazi tijekom zelenog intervala, iznosi 0,7 zbog čega se primjenjuje na grupe trakova zapadnog i istočnog privoza, a kada je to nasumično i nekoordinirano sa susjednim raskrižjima iznosi 1,0, te se isti primjenjuje na grupe trakova južnog privoza.

Kako je trajanje ciklusa unaprijed poznato nakon određivanja omjera dolaska izračunat je kapacitet grupe trakova i njihovo zasićenje kako je prikazano u tablici 21.

Tablica 21. Prikaz kapaciteta i zasićenja za pojedine grupe traka na analiziranom semaforiziranom raskrižju

Privoz	Grupa traka	Kapacitet [voz/h]	Zasićenje grupe
Zapad	zapad ravno	1.280	0,63
	zapad desno	1.019	0,07
Istok	istok	1.299	1,18
Jug	jug lijevo	263	0,21
	jug desno	192	0,48

Kako bi se mogla odrediti razina usluge izračunano je prosječno vrijeme kašnjenja za grupe traka, privoze i raskrižje u cjelini. Vrijeme kašnjenja sastoji se od uniformnog, inkrementalnog i inicijalnog vremena kašnjenja, a kako je ranije prikazano u (24). Prikaz izračunanih vremena kašnjenja za svaki od privoza dat je u tablici 22.

Tablica 22. Prikaz uniformnog, inkrementalnog i inicijalnog vremena kašnjenja za pojedine grupe traka na analiziranom semaforiziranom raskrižju

Privoz	Grupa traka	Uniformno kašnjenje [s/voz]	Inkrementalno kašnjenje [s/voz]	Inicijalno kašnjenje [s/voz]
Zapad	zapad ravno	5,95	2,36	0,0
	zapad desno	3,53	0,13	0,0
Istok	istok	10,50	24,97	0,0
Jug	jug lijevo	34,17	1,81	0,0
	jug desno	36,10	8,35	0,0

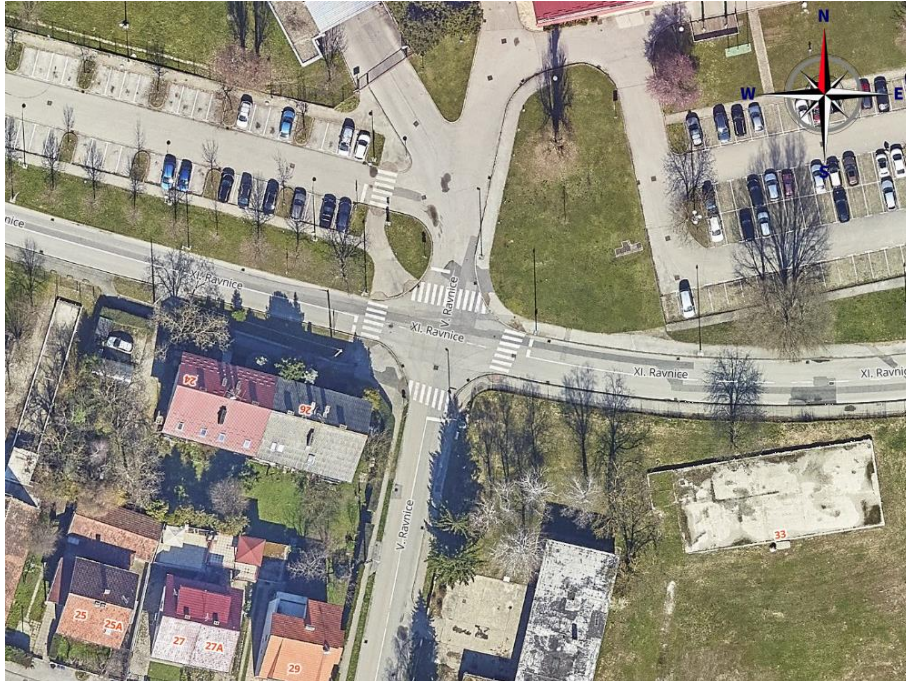
Iz rezultata prikazanih u tablici 22 i jednadžbe (48) dobiva se prosječno vrijeme kašnjenja po privozima te ono iznosi 7,93 [s] za zapadni privoz, 35,47 [s] za istočni privoz te 41,30 [s] za južni privoz. Prosječno vrijeme kašnjenja za cijelo raskrižje iznosi 26,36 [s]. Za grupe traka, privoze i raskrižje u cjelini dodjeljuje se odgovarajuća razina usluge prema tablici 8, a dodijeljene razine usluge prikazane su u tablici 23.

Tablica 23. Razine usluge grupe traka, privoza i raskrižja u cjelini semaforiziranog raskrižja

Raskrižje	C	Privoz	Razina usluge	Grupa traka	Razina usluge	
		Zapad	A	A	zapad desno	A
					zapad ravno	A
		Istok	F		istok	F
		Jug	D		jug lijevo	D
jug desno	D					

6.2. Ne semaforizirano raskrižje Ravnice XI - Ravnice V

Za analizu nesemaforiziranog raskrižja odabrano je četverokrako raskrižje ulica Ravnice XI i Ravnice V prikazano na slici 27. Ovo raskrižje predstavlja jedan od alternativnih pravaca u slučaju prometnog zagušenja na prethodno analiziranom semaforiziranom raskrižju.



Slika 27. Satelitski snimak nesemaforiziranog raskrižja Ravnice XI - Ravnice V [8]

Nalazi se u gradskoj četvrti Peščenica, a sjeverno od raskrižja nalazi se tvornica Kraš koja sjeverni privoz koristi kao pristupnu cestu postrojenju. Uz tvornicu se na sjevernom privozu nalazi i sportsko rekreacijski centar s nekoliko poslovnih subjekata i parkirališna mjesta. Istočni privoz raskrižja povezan je na ulicu Dragutina Mandla koja u smjeru sjever - jug povezuje Maksimirsku cestu i Ulicu kneza Branimira, a u blizini se nalaze trgovački centar i spremište tramvaja poduzeća Zagrebački električni tramvaj. Južni privoz raskrižja povezan je na Ulicu kneza Branimira, gdje se uz prometnicu nalaze poslovni prostori i obiteljski stambeni objekti. Zapadni privoz raskrižja nesemaforiziranog raskrižja povezan je s istočnim privozom kružnog raskrižja Ulice Ravnice, Aleje Antuna Augustinčića i Ulice Jurja Dalmatinca, a uz prometnicu nalaze se stambeni objekti. Raskrižje ima po jedan prometni trak za svaki smjer kretanja, glavni tok prometa odvija se u smjeru istok - zapad, a sporedni tokovi su sjeverni i južni, obilježeni znakom obaveznog zaustavljanja STOP. Svaki privoz ima obilježeni pješački prijelaz što je prikazano na slikama u nastavku.

Na slikama 28 i 29 prikazani su privozi glavnog prometnog toka nesemaforiziranom raskrižju. Na njima se nalaze obilježeni pješački prijelazi, a desno skretanje sa zapadnog privoza na sporedni ograničeno je prometnim znakom „Zabrana prometa za vozila čija ukupna masa prelazi 5 tona“.



Slika 28. Zapadni privoz nesemaforiziranog raskrižja Ravnice XI - Ravnice V

Na slici 28 prikazan je zapadni privoz, a na slici 29 istočni privoz raskrižju. Ograničenje brzine iznosi 40 (km/h), a vožnja ravno s istočnog privoza ograničena je prometnim znakom „Zabrana prometa za vozila čija ukupna masa prelazi 5 tona“, ali je zbog okolnog drveća teško uočljiv. Provedenim brojanjem prometa i analizom podataka utvrđeno je da 75 % ukupnog broja vozila na raskrižju u jutarnjem vršnom satu dolazi s istočnog privoza i nastavlja vožnju ravno na zapadni privoz.



Slika 29. Istočni privoz nesemaforiziranog raskrižja Ravnice XI - Ravnice V

Na slici 30 prikazan je južni privoz raskrižju, obilježen je prometnim znakom obavezno zaustavljanje i znakom da se u neposrednoj blizini nalazi pješački prijelaz.



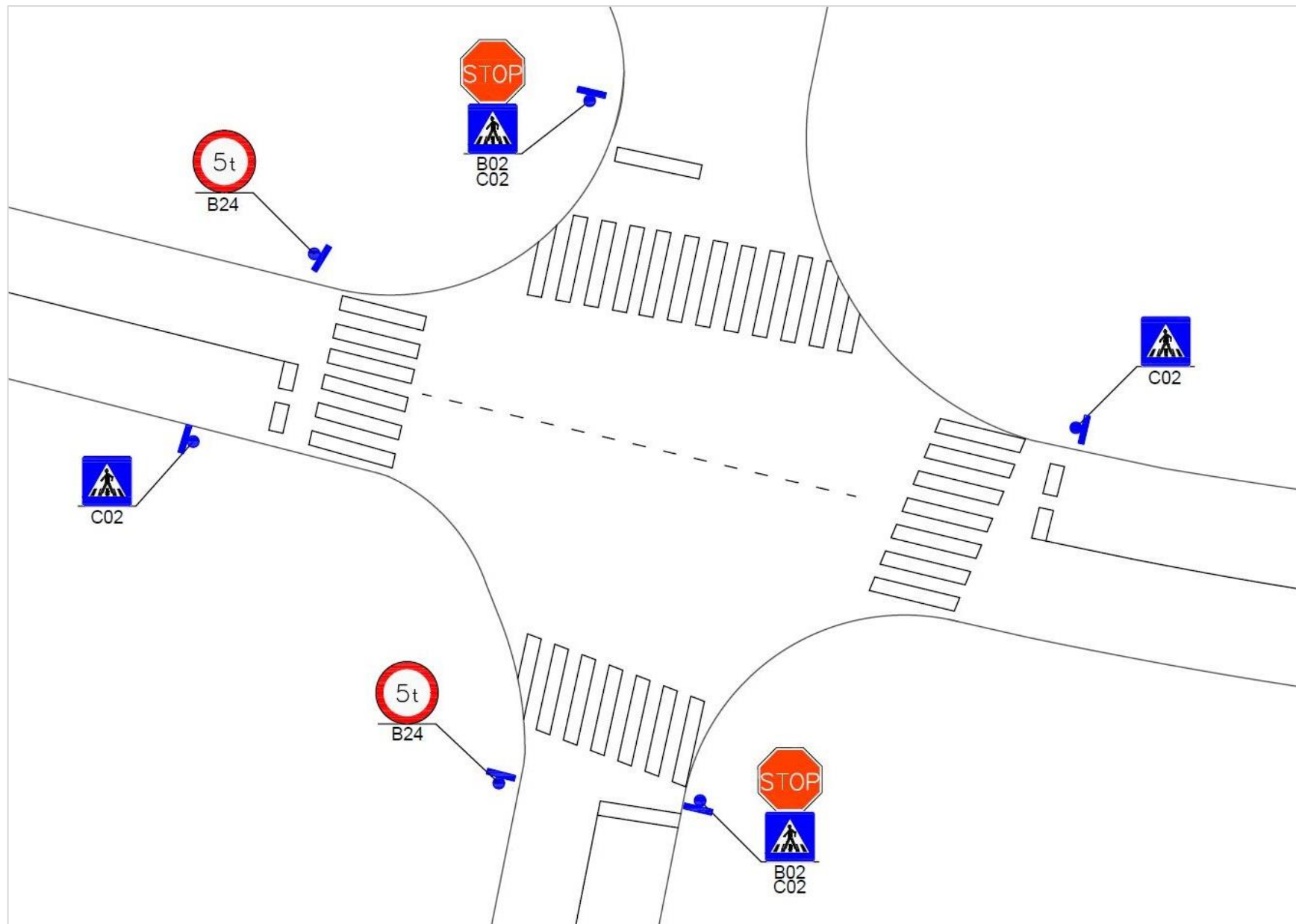
Slika 30. Južni privoz nesemaforiziranog raskrižja Ravnice XI - Ravnice V

Na slici 31 prikazan je sjeverni privoz nesemaforiziranom raskrižju, koji je obilježen kao i južni, prometnim znakovima obaveznog zaustavljanja i pješačkog prijelaza.



Slika 31. Sjeverni privoz nesemaforiziranog raskrižja Ravnice XI - Ravnice V

U programskom sustavu AutoCAD primjenom uputa navedenih u [6] i [7] izrađen je tlocrtni prikaz nesemaforiziranog raskrižja ulica Ravnice XI i Ravnice V prikazan na slici 32 s označenim svim bitnim elementima raskrižja.



Slika 32. Tlocrtni prikaz nesemaforiziranog raskrižja Ravnice XI - Ravnice V

Primjena proračunskih koraka nesemaforiziranog raskrižja

Raskrižje ima četiri privoza na kojima se nalaze obilježeni pješački prijelazi, nema izdvojenih trakova za lijevo i desno skretanje. Glavni privozi raskrižju su zapadni i istočni, a sporedni privozi su sjeverni i južni koji su označeni prometnim znakom STOP. Zapadni i južni privoz ograničeni su prometnim znakom „Zabrana prometa za vozila čija ukupna masa prelazi 5 tona“, primijenjen je homogeni prometni tok s osobnim i lakim teretnim vozilima, potvrđen brojanjem prometa. Preporučene zadane vrijednosti su udio teških vozila 3 % (za istočni i sjeverni privoz) i faktor vršnog sata za cijelo raskrižje 0,92. Brojanjem prometa na raskrižju određeno je vršnih 15 minuta (od 7:45 do 8:00 sati) u jutarnjem vršnom satu. Vrijednosti vršnih 15 minuta pomnožene su s 4 za određivanje satnog opterećenja i primjenom (50) izračunan je satni protok. Određeni i označeni prioriteti tokova, s izračunanim opterećenjem i protokom prikazani su u tablici 24.

Tablica 24. Prikaz oznaka, prioriteta, opterećenja i protoka tokova nesemaforiziranog raskrižja

Privoz	Oznaka toka	Manevar	Prioritet toka	Opterećenje V_i [voz/h]	Protok v_i [voz/h]
Zapad	1	lijevo	2	12	13
	2	ravno	1	30	33
	3	desno	1	8	9
Istok	4	lijevo	2	52	57
	5	ravno	1	500	543
	6	desno	1	8	9
Jug	7	lijevo	4	32	32
	8	ravno	3	13	13
	9	desno	2	12	12
Sjever	10	lijevo	4	4	4
	11	ravno	3	12	13
	12	desno	2	4	4

Vozila prvog ranga nemaju konfliktnih tokova. Pješački tokovi prikazani u tablici 26 korišteni su pri izračunu konfliktnih tokova za vozila drugog, trećeg i četvrtog ranga u navedenim jednadžbama. Konfliktni tokovi vozila drugog ranga izračunati su prema jednadžbama (51), (52), (53) i (54). Konfliktni tokovi vozila trećeg ranga uzimajući u obzir jednostupanjsko prihvaćanje vremenskih praznina izračunati su koristeći (61) i (63) za manevar 8 i koristeći (62) i (64) za manevar 11. Konfliktni tokovi vozila četvrtog ranga uzimajući u obzir jednostupanjsko prihvaćanje vremenskih praznina izračunani su koristeći (65) i (69) za manevar 7 i koristeći (66) i (70) za manevar 10. Kritične vremenske praznine za manevre određene su primjenom (75) i tablice 10, a vremena slijeđenja primjenom (76) i tablice 11 u ovisnosti o prometnim karakteristikama raskrižja i tokova prometa. Konfliktni tokovi, kritične vremenske praznine i vremena slijeđenja prikazane su u tablici 25.

Tablica 25. Konfliktni tokovi, kritične vremenske praznine i vremena slijeđenja nesemaforiziranog raskrižja

Konfliktni tokovi, $v_{c,i}$ [voz/h]		Kritična vremenska praznina, $t_{c,i}$ [s]		Vrijeme slijeđenja $t_{f,i}$ [s]	
$v_{c,1}$	556	$t_{c,1}$	4,1	$t_{f,1}$	2,2
$v_{c,4}$	51	$t_{c,4}$	7,1	$t_{f,4}$	4,9
$v_{c,7}$	747	$t_{c,7}$	7,1	$t_{f,7}$	3,5
$v_{c,8}$	743	$t_{c,8}$	6,5	$t_{f,8}$	4,0
$v_{c,9}$	56	$t_{c,9}$	6,2	$t_{f,9}$	3,3
$v_{c,10}$	742	$t_{c,10}$	10,1	$t_{f,10}$	6,2
$v_{c,11}$	743	$t_{c,11}$	9,5	$t_{f,11}$	6,7
$v_{c,12}$	556	$t_{c,12}$	9,2	$t_{f,12}$	6,0

Utjecaj pješaka na nesemaforiziranom raskrižju kvantificira se prilikom izračuna konfliktnih tokova i izračuna potencijalnih kapaciteta manevara s pomoću čimbenika utjecaja pješaka. Čimbenik utjecaja pješaka predstavlja udio vremena u satu kada je trak na privozu raskrižja slobodan, izračunava se s pomoću čimbenika blokade pješaka koji predstavlja udio vremena kada je trak na privozu blokiran tijekom jednog sata. Za izračun čimbenika blokade pješaka korišteni su podaci o širini prometnog traka 3,2 [m] i brzini pješaka 1,0668 [m/s]. Protok pješaka, čimbenici blokade pješaka i čimbenici utjecaja pješaka prikazani su u tablici 26.

Tablica 26. Protok pješaka i određivanje utjecaja pješačkih tokova nesemaforiziranog raskrižja

Privoz	Oznaka toka	Protok pješaka [pj/h]	Čimbenik blokade pješaka		Čimbenik utjecaja pješaka	
Zapad	13	4	$f_{pb,13}$	0,0033	$p_{p,13}$	0,9967
Istok	14	8	$f_{pb,14}$	0,0075	$p_{p,14}$	0,9925
Jug	15	8	$f_{pb,15}$	0,0075	$p_{p,15}$	0,9925
Sjever	16	4	$f_{pb,16}$	0,0033	$p_{p,15}$	0,9967

Utjecaj pješaka na manevre prvog ranga je zanemariv. Manevri nižih rangova moraju propuštati vozila viših rangova i pješačke tokove privoza u konfliktu s putanjom manevra. Nužnost propuštanja pješačkih tokova i ukupni čimbenik utjecaja pješaka za manevre nižih rangova prikazan je u tablici 27.

Tablica 27. Utjecaj pješaka na manevre drugog, trećeg i četvrtog ranga na nesemaforiziranom raskrižju

Privoz	Oznaka manevra	Prioritet toka	Nužnost propuštanja pješačkih tokova	Čimbenik utjecaja pješaka	
Zapad	v_1	2	v_{16}	$p_{p,16}$	0,9967
Istok	v_4	2	v_{15}	$p_{p,15}$	0,9925
Jug	v_7	4	v_{15}, v_{13}	$(p_{p,15}) \cdot (p_{p,13})$	0,9892
	v_8	3	v_{15}, v_{16}	$(p_{p,15}) \cdot (p_{p,16})$	0,9892
	v_9	2	v_{15}, v_{14}	$(p_{p,15}) \cdot (p_{p,14})$	0,9851
Sjever	v_{10}	4	v_{16}, v_{14}	$(p_{p,16}) \cdot (p_{p,14})$	0,9892
	v_{11}	3	v_{15}, v_{16}	$(p_{p,15}) \cdot (p_{p,16})$	0,9892

	v_{12}	2	v_{16}, v_{13}	$(p_{p,16}) \cdot (p_{p,13})$	0,9933
--	----------	---	------------------	-------------------------------	--------

Potencijalni kapaciteti bez utjecaja susjednih semaforiziranih raskrižja izračunani su koristeći (77) i prethodno izračunate podatke prikazane u tablici 25. Realni kapaciteti manevara drugog ranga jednaki su potencijalnom kapacitetu umanjenom za odgovarajući čimbenik utjecaja pješaka iz tablice 27. Realni kapaciteti za manevre trećeg ranga izračunani su koristeći (91) na osnovu potencijalnog kapaciteta i čimbenika prilagodbe kapaciteta utjecaju vozila višeg ranga iz (90) koji uključuje odgovarajući čimbenik prilagodbe utjecaju pješaka iz tablice 27. Realni kapaciteti za manevre četvrtog ranga izračunani su koristeći (101) na osnovu potencijalnog kapaciteta i čimbenika prilagodbe kapaciteta vozilima četvrtog ranga iz (100) koji uključuje odgovarajući čimbenik prilagodbe utjecaju pješaka iz tablice 27. S obzirom na to da manevri na sporednim privozima dijele isti prometni trak i ne mogu stati jedan pored drugoga na zaustavnoj liniji izračunan je kapacitet zajedničkog traka koristeći (106). Rezultati spomenutih izračuna prikazani su u tablici 28.

Tablica 28. Prikaz potencijalnih i realnih kapaciteta manevara nesemaforiziranog raskrižja

Privoz	Potencijalni kapaciteti, $c_{p,x}$ [voz/h]		Realni kapaciteti $c_{m,x}$ [voz/h]		
Istok	$c_{p,1}$	1619	$c_{m,1}$	1613	
Zapad	$c_{p,4}$	682	$c_{m,4}$	677	
Jug	$c_{p,7}$	976	$c_{m,7}$	874	886
	$c_{p,8}$	884	$c_{m,8}$	795	
	$c_{p,9}$	1073	$c_{m,9}$	1057	
Sjever	$c_{p,10}$	576	$c_{m,10}$	517	500
	$c_{p,11}$	525	$c_{m,11}$	472	
	$c_{p,12}$	596	$c_{m,12}$	592	

Prosječno vrijeme kašnjenja manevara izračunano je koristeći (111), podatke o protoku manevara iz tablice 24 i podatke o realnom kapacitetu manevara iz tablice 28. Isti podatci korišteni su za procjenu duljine repa čekanja manevara prema (115). Rezultati izračuna prosječnih vremena kašnjenja i duljine repa čekanja za manevre, s razinom usluge manevara određenu prema tablici 13 prikazani su u tablici 29.

Tablica 29. Prikaz prosječnog vremena kašnjenja, razine usluge i duljine repa čekanja manevara nesemaforiziranog raskrižja

Privoz	Prosječno vrijeme kašnjenja [s/voz]		Razina usluge	Duljina repa čekanja [voz]	
Zapad	d_1	7,25	A	$Q_{95,1}$	0,02
Istok	d_4	10,80	B	$Q_{95,4}$	0,27
Jug	d_{789}	9,37	A	$Q_{95,789}$	0,23
Sjever	d_{101112}	12,52	B	$Q_{95,101112}$	0,13

Prosječno vrijeme kašnjenja privoza izračunano je koristeći (113), podatke o protoku manevara iz tablice 24 i podatke o realnom kapacitetu manevara iz tablice 28. Prosječno

vrijeme kašnjenja raskrižja u cjelini izračunano je koristeći (114), prethodno izračunano prosječno vrijeme kašnjenja privoza i sumu protoka na privozima iz tablice 24. Rezultati izračuna prikazani su u tablici 30.

Tablica 30. Prikaz prosječnog vremena kašnjenja privoza i raskrižja u cjelini nesemaforiziranog raskrižja

	Prosječno vrijeme kašnjenja [s/voz]	Razina usluge	Privoz	Prosječno vrijeme kašnjenja [s/voz]	Razina usluge
Raskrižje	1,46	A	Istok	1,71	A
			Zapad	1,01	A
			Sjever	5,29	A
			Jug	2,39	A

Na osnovu izračunanih prosječnih vremena kašnjenja privoza i raskrižja u cjelini prema tablici 13 određene su razine usluga koje su za sve privoze i raskrižje u cjelini A.



Slika 34. Sjeverni privoz raskrižja Ul. Ravnice, Ul. J. Dalmatinca, Ul. Ravnice I i Aleje A. Augustinčića

Brojanjem prometa i analizom podataka na raskrižju utvrđeno je da u jutarnjem vršnom satu 71 % ukupnog broja vozila na raskrižju dolazi s istočnog privoza, pri čemu 20 % skreće lijevo, 45 % vozila nastavlja vožnju ravno i 7 % skreće desno. Na slici 36 prikazan je istočni privoz raskrižju koji ima, kao i sjeverni, obilježeni pješački prijelaz i postavljeni prometni znak „Nailazak vozila na raskrižje s prednošću prolaska“ i dodatni znak za kružno kretanje kolnikom.



Slika 35. Istočni privoz raskrižja Ul. Ravnice, Ul. J. Dalmatinca, Ul. Ravnice I i Aleje A. Augustinčića

Na slici 37 prikazan je južni privoz raskrižju, a analizom podataka utvrđeno je da 18 % ukupnog broja vozila na raskrižju u jutarnjem vršnom satu dolazi s ovog privoza.



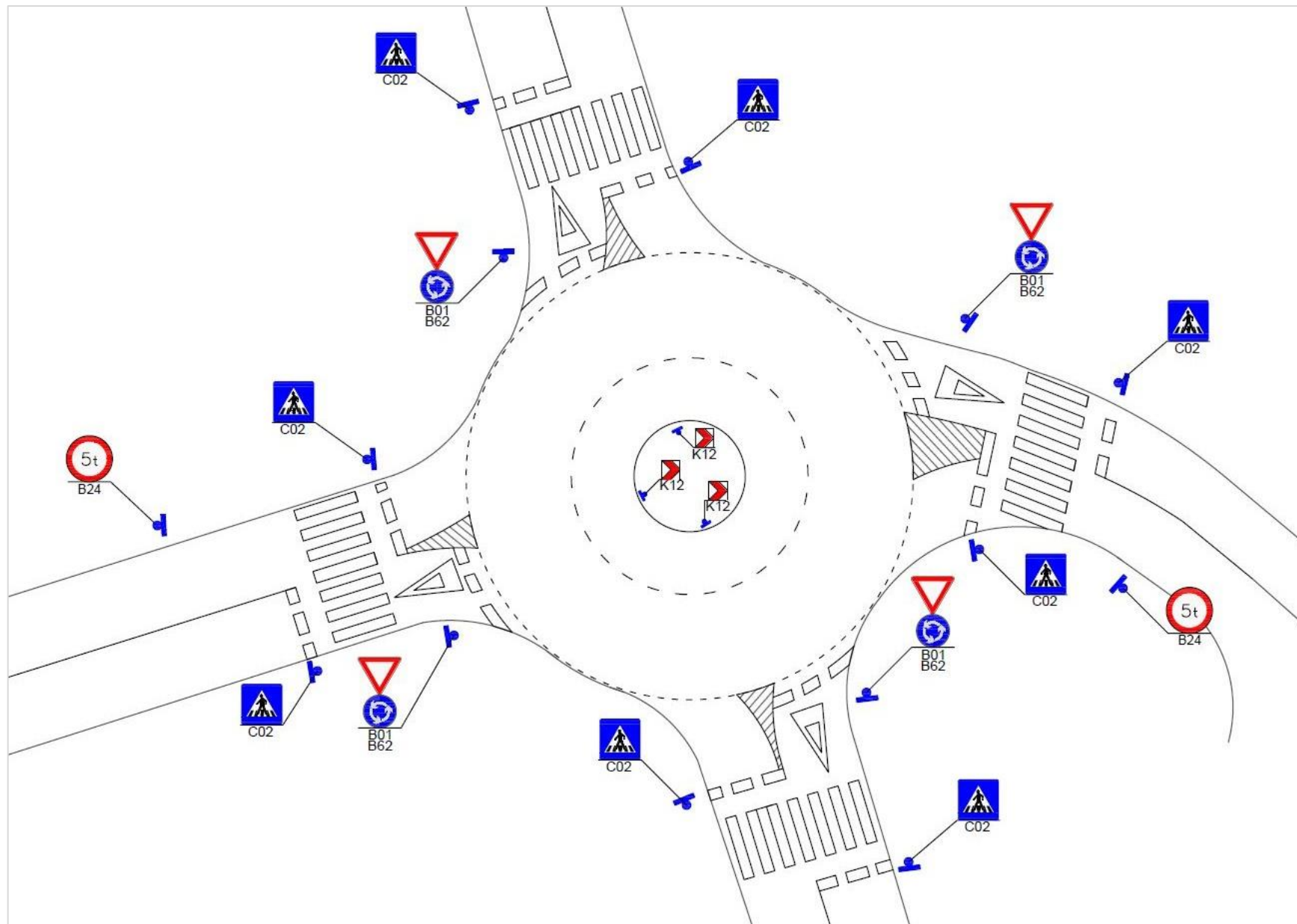
Slika 36. Južni privoz raskrižja Ul. Ravnice, Ul. J. Dalmatinca, Ul. Ravnice I i Aleje A. Augustinčića

Slika 38 prikazuje zapadni privoz raskrižju, a analizom podataka utvrđeno je da 48 % ukupnog broja vozila na raskrižju u jutarnjem vršnom satu izlazi na zapadni privoz.



Slika 37. Zapadni privoz raskrižja Ul. Ravnice, Ul. J. Dalmatinca, Ul. Ravnice I i Aleje A. Augustinčića

U programskom sustavu AutoCAD primjenom uputa navedenih u [6] i [7] izrađen je tlocrtni prikaz raskrižja s kružnim tokom prometa Ul. Ravnice, Ul. J. Dalmatinca, Ul. Ravnice I i Aleje A. Augustinčića na slici 39 s označenim svim bitnim elementima raskrižja.



Slika 38. Tlocrtni prikaz raskrižja s kružnim tokom prometa Ul. Ravnice, Ul. J. Dalmatinca, Ul. Ravnice I i Aleje A. Augustinčića

Primjena proračunskih koraka raskrižja s kružnim tokom prometa

Kružno raskrižje ima četiri privoza, jedan cirkulirajući trak, na svakom privozu po jedan ulazni trak i jedan izlazni trak, nema izdvojenog desnog skretanja. Brojanjem prometa na odabranom raskrižju određeno je vršnih 15 minuta (od 7:45 do 8:00 sati) u jutarnjem vršnom satu. Vrijednosti vršnih 15 minuta pomnožene su s 4 za dobivanje prometne potražnje prikazane u tablici 31.

Tablica 31. Prikaz prometne potražnje manevara na raskrižju s kružnim tokom prometa

Privoz	Lijevo [voz/h]	Ravno [voz/h]	Desno [voz/h]	Polukružno [voz/h]	Pješaci [pj/h]
Sjever	8	12	12	0	12
Zapad	32	20	16	0	12
Istok	168	384	56	0	4
Jug	16	124	12	0	52

Za prometnu potražnju iz tablice 31, koristeći predloženi faktor vršnog sata za cijelo raskrižje 0,92 i jednadžbu (116) određen je satni protok manevara. Za prilagođavanje satnog protoka karakteristikama prometnog toka prema (118) koristi se čimbenik prilagodbe teškim vozilima koji za predloženih 3 % udjela teških vozila iznosi 0,9709, a primijenjen je na sjeverni i južni privoz raskrižju. Zapadni i istočni privoz ograničeni su prometnim znakom „Zabrana prometa za vozila čija ukupna masa prelazi 5 tona“, primijenjen je homogeni prometni tok s osobnim i lakim teretnim vozilima, potvrđen brojanjem prometa. Prilagođeni intenziteti prometa prikazani su u tablici 32.

Tablica 32. Prikaz prilagođenih intenziteti prometa raskrižja s kružnim tokom prometa

Privoz	Lijevo [PAJ/h]	Ravno [PAJ/h]	Desno [PAJ/h]
Sjever	9	13	13
Zapad	35	22	17
Istok	183	417	61
Jug	18	139	13

Primjenom postupaka opisanih u trećem koraku analize, izračunani su cirkulirajući intenziteti prema (119) i izlazni intenziteti prema (120). U četvrtom koraku analize koristeći (121) izračunani su kapaciteti ulaznih traka. Rezultati spomenutih izračuna prikazani su u tablici 33.

Tablica 33. Prikaz cirkulirajućih i izlaznih intenziteta prometa i kapaciteta ulaznih traka raskrižja s kružnim tokom prometa

Privoz	Cirkulirajući intenzitet [PAJ/h]	Izlazni intenzitet [PAJ/h]	Kapacitet ulaznog traka [PAJ/h]
Sjever	618	235	735
Zapad	205	448	1.120
Istok	192	44	1.135

Jug	66	235	1.290
-----	----	-----	-------

Na svim privozima raskrižju nalaze se obilježeni pješački prijelazi na kojima su prisutni pješaci, a koristeći (128) određeni su čimbenici prilagodbe utjecaju pješaka koji iznose: za sjeverni i zapadni privoz 0,9984, za istočni 0,9929 i za južni privoz 0,9995.

Intenziteti prometa i kapaciteti traka pretvoreni su u vozila na sat koristeći jednadžbe (132) i (133), a primjenom (135) izračunani su stupnjevi zasićenja traka. Rezultati su prikazani u tablici 34.

Tablica 34. Prikaz intenziteta, kapaciteta i stupanja zasićenja traka raskrižja s kružnim tokom prometa

Privoz	Intenzitet prometa [voz/h]	Kapacitet traka [voz/h]	Stupanj zasićenja
Sjever	34	712	0,05
Zapad	74	1.118	0,07
Istok	661	1.134	0,58
Jug	165	1.244	0,13

Prosječno vrijeme kašnjenja traka izračunano prema (136) jednako je prosječnom vremenu kašnjenja privoza jer se na svakom privozu nalazi po jedan ulazni trak. Na osnovu prosječnog vremena kašnjenja, prema tablici 18 određena je razina usluge. Duljina repa čekanja izračunana je prema (139) i s prethodno spomenutim rezultatima prikazana u tablici 35.

Tablica 35. Prikaz prosječnog vremena kašnjenja, duljine repa čekanja i razine usluge traka raskrižja s kružnim tokom prometa

Privoz	Prosječno vrijeme kašnjenja [s/voz]	Razina usluge	Duljina repa čekanja [voz]
Sjever	5,54	A	0,15
Zapad	3,78	A	0,21
Istok	10,42	B	3,93
Jug	4,00	A	0,46

Prosječno vrijeme kašnjenja raskrižja u cjelini izračunano je prema (138) i iznosi 8,29 [s] i prema tablici 18 raskrižju je dodijeljena razina usluge A.

7. Zaključak

Raskrižja predstavljaju ključne točke unutar cestovne mreže gdje se susreću dvije ili više cesta, omogućujući prometnim tokovima da se spajaju, razdvajaju, križaju ili međusobno preplicu. Zbog navedenih prometnih radnji i konfliktnih situacija, koje se ne pojavljuju na otvorenim dijelovima ceste, problemi vezani uz propusnost i sigurnost prometa posebno su izraženi na raskrižjima. Razrješenje prometnih konflikata i optimalno uređenje prometnih tokova postiže se razdjeljivanjem prometnih tokova. Prometni tokovi mogu se razdjeljivati prostorno i vremenski, a vremensko razdjeljivanje primjenjuje se na raskrižjima koja su predmet ovoga rada.

Prvi dio rada obuhvaća kratki pregled povijesti Highway Capacity Manuala, opisuje njegove dijelove te izlaže svrhu, ciljeve, primjenu priručnika i definira ciljne korisnike.

U drugom dijelu rada detaljno se opisuju proračunski koraci za analizu isprekidanih prometnih tokova, uključujući semaforizirana, nesemaforizirana raskrižja i raskrižja s kružnim tokom prometa. Objasnjeni su potrebni ulazni podaci za analizu svakog tipa raskrižja, predložene zadane vrijednosti, kao i detaljni proračunski postupci i metode za određivanje ključnih izlaznih podataka poput prosječnog vremena kašnjenja, razine usluge i dužine repova čekanja.

U trećem dijelu rada odabrana su tri karakteristična raskrižja s isprekidanim tokovima za provedu analize metodologijom HCM-a, semaforizirano raskrižje Maksimirska cesta - Ulica Ravnice, nesemaforizirano raskrižje Ulica Ravnice XI - Ravnice V i kružno raskrižje Ulice Ravnice, Ulice Jurja Dalmatinca, Ulice Ravnice I i Aleje Antuna Augustinčića. Na odabranim raskrižjima provedena je analiza postojećeg stanja, uključujući analizu geoprometnog položaja, prometnih tokova, javnog gradskog prijevoza, postojeće prometne infrastrukture, te regulacije i organizacije prometnih tokova..

Za odabrana raskrižja, prikazane su satelitske snimke, izrađene fotografije svih privoza raskrižjima, a u programskom sustavu AutoCAD izrađeni su tlocrtni prikazi raskrižja s oznakama položaja horizontalne i vertikalne signalizacije. Za semaforizirano raskrižje izrađen je pregled faza i signalnog plana, te je objašnjen način njegova rada.

Na temelju navedene analize postojećeg stanja, za odabrana raskrižja, provedeni su proračunski koraci. Na semaforiziranom raskrižju Maksimirska cesta - Ulica Ravnice, raskrižju u cjelini određena je razina usluge C, zapadnom privozu razina usluge A, južnom privozu razina usluge D, a na osnovu stupnja zasićenja koji za istočni privoz iznosi 1,18 određena je razina usluge F. Na nesemaforiziranom raskrižju Ulica Ravnice XI - Ravnice V svim privozima i raskrižju u cjelini određena je razina usluge A. Raskrižju s kružnim tokom prometa Ulica Ravnice, Ulica Jurja Dalmatinca, Ulica Ravnice I i Aleje Antuna Augustinčića u cjelini određena je razina usluge A, istočnom privozu razina usluge B, dok sjevernom, zapadnom i južnom privozu razina usluge A.

Primjena HCM priručnika i metodologije na semaforizirana raskrižja je kompleksna zbog raspršenosti teorijskog sadržaja potrebnog za proračunske korake kroz različita

poglavlja. Za izračun specifičnih elemenata semaforiziranih raskrižja neophodno je koristiti poglavlje "Urbani ulični segmenti" iz trećeg sveska, te poglavlje "Dodatak semaforiziranim raskrižjima" iz četvrtog sveska. Nasuprot tome, primjena na nesemaforizirana raskrižja i raskrižja s kružnim tokom prometa je znatno jednostavnija, jer se teorijski sadržaj nalazi unutar osnovnih poglavlja trećeg sveska, dok je praktična primjena objašnjena u dodatnim poglavljima četvrtog sveska.

Literatura

- [1] Transportation Research Board: *Highway Capacity Manual 6th Edition*, Volume 3: Interrupted Flow, Chapter 19: *Signalized Intersections*, National Academy of Sciences, SAD, 2016.
- [2] Transportation Research Board: *Highway Capacity Manual 6th Edition*, Volume 3: Interrupted Flow, Chapter 20: *Two-way Stop-Controlled Intersections*, National Academy of Sciences, SAD, 2016.
- [3] Transportation Research Board: *Highway Capacity Manual 6th Edition*, Volume 3: Interrupted Flow, Chapter 22: *Roundabouts*, National Academy of Sciences, SAD, 2016..
- [4] Transportation Research Board: *Highway Capacity Manual 6th Edition*, Volume 4: Applications Guide, Chapter 31: *Signalized Intersections: Supplemental*, National Academy of Sciences, SAD, 2016.
- [5] Legac, I. : *Raskrižja javnih cesta / Cestovne prometnice II*, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, 2008.
- [6] Novačko, L., Pilko, H.:*Cestovne prometnice II. Upute za auditorne vježbe i seminarski rad*, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, 2017.
- [7] Kalem, M.: *Seminarski rad: Programski zadatak iz kolegija Cestovne prometnice II*, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, 2018.

Internet izvori

- [8] [URL]:<http://geoportal.dgu.hr> (pristupljeno: veljača 2024.)
- [9] [URL]:<http://zagreb.hr> (pristupljeno: veljača 2024.)
- [10] [URL]:<http://tzv-gredelj.hr> (pristupljeno: veljača 2024.)
- [11] [URL]:<http://zet.hr> (pristupljeno: veljača 2024.)

Popis slika

Slika 1. Proračunski koraci za analizu semaforiziranih raskrižja.....	9
Slika 2. Kumulativ dolazaka i odlazaka tijekom prezasićenog perioda analize.....	23
Slika 3. Proračunski koraci za analizu nesemaforiziranih raskrižja.....	30
Slika 4. Prometni tokovi na trokrakom nesemaforiziranom raskrižju	31
Slika 5. Prometni tokovi na četverokrakom nesemaforiziranom raskrižju	31
Slika 6. Prikaz konfliktnih tokova za lijeva skretanja na glavnom privozu	32
Slika 7. Prikaz konfliktnih tokova za desno skretanje na sporednom privozu.....	33
Slika 8. Prikaz konfliktnih tokova za polukružna okretanja na glavnom privozu	34
Slika 9. Prikaz konfliktnih tokova za ravno na sporednom privozu	35
Slika 10. Prikaz konfliktnih tokova za lijeva skretanja na sporednom privozu	36
Slika 11. Kratak prometni trak za lijevo skretanje na glavnom toku	43
Slika 12. Prilagodba čimbenika impedancije za lijevo skretanje i vožnju ravno sa suprotnog sporednog privoza.....	46
Slika 13. Prometni trak s izdvojenim desnim skretanjem	48
Slika 14. Kapacitet traka s izdvojenim desnim skretanjem.....	49
Slika 15. Proračunski koraci za analizu raskrižja s kružnim tokom prometa	54
Slika 16. Izračun cirkulirajućeg intenziteta prometa za sjeverni privoz	56
Slika 17. Izračun izlaznog intenziteta prometa za južni privoz.....	57
Slika 18. Čimbenik prilagodbe kapaciteta utjecaju pješaka za jednostrani ulaz.....	60
Slika 19. Čimbenik prilagodbe kapaciteta utjecaju pješaka za dvostrani ulaz.....	61
Slika 20. Satelitski snimak semaforiziranog raskrižja Maksimirska cesta - Ulica Ravnice	65
Slika 21. Zapadni privoz semaforiziranom raskrižju Maksimirska cesta - Ulica Ravnice	66
Slika 22. Istočni privoz semaforiziranom raskrižju Maksimirska cesta - Ulica Ravnice.....	66
Slika 23. Južni privoz semaforiziranom raskrižju Maksimirska cesta - Ulica Ravnice	67
Slika 24. Pregled faza semaforiziranog raskrižja Maksimirska cesta - Ulica Ravnice	67
Slika 25. Signalni plan raskrižja Maksimirska cesta - Ulica Ravnice.....	68
Slika 26. Tlocrtni prikaz semaforiziranog raskrižja Maksimirska cesta - Ulica Ravnice	69
Slika 27. Satelitski snimak nesemaforiziranog raskrižja Ravnice XI - Ravnice V	74
Slika 28. Zapadni privoz nesemaforiziranog raskrižja Ravnice XI - Ravnice V	75
Slika 29. Istočni privoz nesemaforiziranog raskrižja Ravnice XI - Ravnice V	75
Slika 30. Južni privoz nesemaforiziranog raskrižja Ravnice XI - Ravnice V	76
Slika 31. Sjeverni privoz nesemaforiziranog raskrižja Ravnice XI - Ravnice V	76
Slika 32. Tlocrtni prikaz nesemaforiziranog raskrižja Ravnice XI - Ravnice V.....	77
Slika 33. Satelitski snimak raskrižja Ul. Ravnice, Ul. J. Dalmatinca, Ul. Ravnice I i Aleje A. Augustinčića	82
Slika 34. Sjeverni privoz raskrižja Ul. Ravnice, Ul. J. Dalmatinca, Ul. Ravnice I i Aleje A. Augustinčića	83
Slika 35. Istočni privoz raskrižja Ul. Ravnice, Ul. J. Dalmatinca, Ul. Ravnice I i Aleje A. Augustinčića	83
Slika 36. Južni privoz raskrižja Ul. Ravnice, Ul. J. Dalmatinca, Ul. Ravnice I i Aleje A. Augustinčića	84

Slika 37. Zapadni privoz raskrižja Ul. Ravnice, Ul. J. Dalmatinca, Ul. Ravnice I i Aleje A. Augustinčića	84
Slika 38. Tlocrtni prikaz raskrižja s kružnim tokom prometa Ul. Ravnice, Ul. J. Dalmatinca, Ul. Ravnice I i Aleje A. Augustinčića	85

Popis tablica

Tablica 1. Potrebni ulazni podatci, izvori i predložene vrijednosti na razini manevra	5
Tablica 2. Potrebni ulazni podatci, izvori i predložene vrijednosti na razini privoza	5
Tablica 3. Potrebni ulazni podatci, izvori i predložene vrijednosti na razini grupe kretanja	6
Tablica 4. Potrebni ulazni podatci, izvori i predložene vrijednosti na razini cijelog raskrižja ..	7
Tablica 5. Potrebni ulazni podatci, izvori i predložene vrijednosti na razini pojedine faze	7
Tablica 6. Uobičajeno označavanje grupa kretanja i grupa trakova.....	10
Tablica 7. Čimbenici prilagodbe za širinu traka.....	12
Tablica 8. Razina usluge semaforiziranih raskrižja	28
Tablica 9. Potrebni ulazni podatci, potencijalni izvori i predložene zadane vrijednosti za analizu nesemaforiziranih raskrižja	29
Tablica 10. Bazne kritične vremenske praznine za nesemaforizirana raskrižja.....	38
Tablica 11. Bazna vremena slijeđenja za nesemaforizirana raskrižja	39
Tablica 12. Udio analitičkog vremena blokade pojedinih manevara	40
Tablica 13. Razina usluge nesemaforiziranih raskrižja.....	52
Tablica 14. Potrebni ulazni podatci, potencijalni izvori i predložene vrijednosti za analizu raskrižja s kružnim tokom prometa.....	53
Tablica 15. Koeficijent ekvivalentnih jedinica automobila	55
Tablica 16. Pretpostavljeno korištenje prometnih traka	58
Tablica 17. Dodjeljivanje intenziteta prometa za dvotračne ulazne tokove.....	58
Tablica 18. Razine usluge raskrižja s kružnim tokom prometa	63
Tablica 19. Prometno opterećenje grupa trakova semaforiziranog raskrižja Maksimirska cesta - Ravnice	70
Tablica 20. Prikaz primijenjenih čimbenika prilagodbe za izračun prilagođene stope zasićenja grupe traka	70
Tablica 21. Prikaz kapaciteta i zasićenja za pojedine grupe traka na analiziranom semaforiziranom raskrižju.....	73
Tablica 22. Prikaz uniformnog, inkrementalnog i inicijalnog vremena kašnjenja za pojedine grupe traka na analiziranom semaforiziranom raskrižju.....	73
Tablica 23. Razine usluge grupe traka, privoza i raskrižja u cjelini semaforiziranog raskrižja	73
Tablica 24. Prikaz oznaka, prioriteta, opterećenja i protoka tokova nesemaforiziranog raskrižja.....	78
Tablica 25. Konfliktni tokovi, kritične vremenske praznine i vremena slijeđenja nesemaforiziranog raskrižja	79
Tablica 26. Protok pješaka i određivanje utjecaja pješačkih tokova nesemaforiziranog raskrižja.....	79
Tablica 27. Utjecaj pješaka na manevre drugog, trećeg i četvrtog ranga na nesemaforiziranom raskrižju.....	79
Tablica 28. Prikaz potencijalnih i realnih kapaciteta manevara nesemaforiziranog raskrižja .	80
Tablica 29. Prikaz prosječnog vremena kašnjenja, razine usluge i duljine repa čekanja manevara nesemaforiziranog raskrižja.....	80

Tablica 30. Prikaz prosječnog vremena kašnjenja privoza i raskrižja u cjelini nesemaforiziranog raskrižja	81
Tablica 31. Prikaz prometne potražnje manevara na raskrižju s kružnim tokom prometa	86
Tablica 32. Prikaz prilagođenih intenziteti prometa raskrižja s kružnim tokom prometa	86
Tablica 33. Prikaz cirkulirajućih i izlaznih intenziteta prometa i kapaciteta ulaznih traka raskrižja s kružnim tokom prometa.....	86
Tablica 34. Prikaz intenziteta, kapaciteta i stupanja zasićenja traka raskrižja s kružnim tokom prometa	87
Tablica 35. Prikaz prosječnog vremena kašnjenja, duljine repa čekanja i razine usluge traka raskrižja sa kružnim tokom prometa.....	87

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ diplomski rad
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu diplomskog rada pod naslovom Analiza isprekidanih prometnih tokova primjenom metodologije Highway Capacity Manuala, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student:

MARIO KALEM

U Zagrebu, 15. travnja 2024. godine

