Usporedba različitih metodologija proračuna prometnih parametara raskrižja u razini

Gaši, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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:119:765700

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Dominik Gaši

USPOREDBA RAZLIČITIH METODOLOGIJA PRORAČUNA PROMETNIH PARAMETARA RASKRIŽJA U RAZINI

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, 2016.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

USPOREDBA RAZLIČITIH METODOLOGIJA PRORAČUNA PROMETNIH PARAMETARA RASKRIŽJA U RAZINI

THE COMPARISON OF DIFFERENT METHODOLOGIES FOR ANALYSIS OF TRAFFIC PARAMETERS OF THE AT GRADE INTERSECTIONS

Mentor: dr. sc. Luka Novačko

Student: Dominik Gaši
JMBAG: 0135203527

Zagreb, rujan 2016.

USPOREDBA RAZLIČITIH METODOLOGIJA PRORAČUNA PROMETNIH PARAMETARA RASKRIŽJA U RAZINI

SAŽETAK

U prometnoj praksi korištene su različite metodologije za proračun prometnih parametara raskrižja u razini. Svaka od tih metodologija karakteristična je za određeno analizirano područje ovisno o prometnim uvjetima. Tako je primjerice SAD razvio vlastitu metodologiju u HCM – u koja se primjenjuje za američke uvjete ili Njemačka koja je razvila vlastitu metodologiju u HBS – u. U Republici Hrvatskoj još nije razvijena metodologija proračuna prometnih parametara raskrižja u razini koja bi u potpunosti odgovarala prometnim uvjetima na ovom području pa se iz tog razloga koristi već postojeća HCM metodologija. Budući da je HCM metodologija karakteristična za američko područje u ovom radu će se u obzir uzeti i druge postojeće metodologije kao što su HBS, New South Wales i New Zealand te će se njihovom usporedbom doći do zaključka koja je od navedenih metodologija optimalna za primjenu u Republici Hrvatskoj.

KLJUČNE RIJEČI: metodologija; prometni parametar; raskrižje u razini; HCM; HBS; New South Wales; New Zealand.

THE COMPARISON OF DIFFERENT METHODOLOGIES FOR ANALYSIS OF TRAFFIC PARAMETERS OF THE AT GRADE INTERSECTIONS

SUMMARY

Different methodologies for calculating traffic parameters of the At-Grade Intersections are being used in the transport practice. Each of these methodologies is characteristic for specific analyzed area depending on the traffic conditions. For example, the USA has developed its own methodology using HCM, which applies to American conditions, and Germany has developed its methodology using HBS. The Republic of Croatia still has not developed its own methodology for calculating traffic parameters of the At-Grade Intersections that would fully match the traffic conditions in this area; therefore the already existing HCM methodology is in use. Since the HCM methodology is characteristic for the American area, this paper is going to take into consideration some other existing methodologies like HBS, New South Wales and New Zealand. The comparison of the abovementioned methodologies will show which one of them is the best to use in the Republic of Croatia.

KEY WORDS: methodology; traffic parameter; At-Grade Intersections; HCM; HBS; New South Wales; New Zealand.

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. PREGLED PROMETNIH PARAMETARA ZA ANALIZU RASKRIŽJA 3
2.1. Prometni tok 3
2.1.1. Podjela prometnog toka 3
2.1.2. Osnovni parametri koji određuju prekinuti prometni tok 4
2.1.2.1. Protok 4
2.1.2.2. Faktor vršnog sata 5
2.1.2.3. Brzina prometnog toka 5
2.1.2.4. Gustoća prometnog toka 7
2.1.2.5. Interval slijeđenja i kritična vremenska praznina između vozila 7
2.1.2.6. Prometna svjetla 8
2.1.2.7. Rep čekanja i vrijeme kašnjenja na raskrižju 10
2.2. Propusna moć raskrižja 10
2.2.1. Vozni uvjeti 11
2.2.2. Prometni uvjeti 11
2.2.2.1. Upravljanje prometnim tokovima na raskrižju 11
2.2.2.2. Tip vozila 12
2.2.2.3. Pješački tokovi 12
2.3. Razina usluge raskrižja 12
3. PREGLED METODOLOGIJE HCM – a 14
3.1. Metodologija proračuna prometnih parametara semaforiziranih raskrižja primjenom HCM – a 14
3.1.1. Definiranje grupa trakova, kretanja i prilagođavanje prometnog opterećenja 14
3.1.2. Proračun zasićenog toka 15
3.1.3. Izračun propusne moći za svaku grupu trakova i stupnja zasićenja x 16
3.1.4. Izračun vremena kašnjenja za svaku grupu trakova 16
3.1.5. Određivanje razine usluge semaforiziranog raskrižja 18
3.2. Metodologija proračuna prometnih parametara nesemaforiziranih raskrižja primjenom HCM – a 18
3.2.1. Određivanje konfliktnih prometnih tokova, vremenskih praznina i vremena slijeđenja 19
3.2.3. Proračun duljine repa čekanja 25
3.2.4. Proračun prosječnog vremena kašnjenja 25

3.2.5. Određivanje razine usluge nesemaforiziranog raskrižja 26
3.3. Metodologija proračuna prometnih parametara kružnih raskrižja primjenom HCM – a 2010. 27
3.3.1. Izračun stope prijevozne potražnje i proračunavanje prometnog opterećenja u PAJ jedinicama 27
3.3.2. Određivanje konfliktnih tokova 28
3.3.3. Izračun propusne moći ulaznog dijela raskrižja 29
3.3.4. Određivanje faktora utjecaja pješaka 29
3.3.5. Intenzitet ulaza u voz/h 30
3.3.6. Stvarna (realna) propusna moć ulaza 30
3.3.7. Izračun duljine repa čekanja na privozu 30
3.3.8. Izračun prosječnog vremena kašnjanja raskrižja i razine usluge 31
4. PREGLED METODOLOGIJE HBS – a 32
4.1. Metodologija proračuna prometnih parametara semaforiziranih raskrižja primjenom HBS – a 32
4.1.1. Izračun efektivnog zelenog svjetla 32
4.1.2. Izračun zasićenog toka za svaku grupu trakova 33
4.1.3. Izračunavanje propusne moći za svaku grupu trakova 34
4.1.4. Izračun prosječnog vremena kašnjenja i određivanje razine usluge semaforiziranog raskrižja 36
4.1.5. Određivanje duljine repa čekanja 37
4.2. Metodologija proračuna prometnih parametara nesemaforiziranih raskrižja primjenom HBS – a 38
4.2.1. Prilagođavanje prometnog opterećenja 38
4.2.2. Određivanje prioritetnih i konfliktnih tokova 39
4.2.2. Proračun idealne propusne moći svakog pojedinog traka raskrižja 40
4.2.3. Proračun stvarne (realne) propusne moći 42
4.2.4. Izračun prosječnog vremena kašnjenja 45
4.2.5. Određivanje repa čekanja 47
4.3. Metodologija proračuna prometnih parametara kružnih raskrižja prema HBS - u 47
4.3.1. Određivanje konfliktnih tokova 47
4.3.2. Proračun idealne propusne moći ulaznog dijela raskrižja 49
4.3.3. Izračun stvarne (realne) propusne moći ulaznog dijela raskrižja 50
4.3.4. Određivanje prosječnog vremena kašnjenja, duljine repa čekanja i razine usluge kružnog raskrižja. 52
5. PREGLED OSTALIH METODA KOJE SE KORISTE ZA ANALIZU RASKRIŽJA 53

5.1. Općenito o SIDRA INTERSECTION programskom paketu 53

5.2. Pregled različitih modela za proračun prometnih parametara raskrižja u razini implementiranih u programskom paketu SIDRA INTERSECTION. 54

5.3. Australski i novozelandski SIDRA INTERSECTION model za analizu semaforiziranih raskrižja ... 55

5.4. Australski i novozelandski SIDRA INTERSECTION model za analizu nesemaforiziranih raskrižja 57

5.5. Australski i novozelandski SIDRA INTERSECTION model za analizu kružnih raskrižja 59

5.6. Kriterij za određivanje razine usluge raskrižja u razini prema australskom i novozelandskom SIDRA INTERSECTION modelu 62

6. USPOREDBA ANALIZIRANIH METODA NA PRIMJERU RASKRIŽJA (SEMAFORIZIRANO, NESEMAFORIZIRANO, KRUŽNO RASKRIŽJE) 63

6.1. Usporedba analiziranih metoda na primjeru semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska) 63

6.1.1. Prikupljanje ulaznih podataka semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska) 63

6.1.2. Izlazni podatci dobiveni korištenjem različitih metodologija za proračun prometnih parametara semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska) 67

6.2. Usporedba analiziranih metoda na primjeru nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec) 70

6.2.1. Prikupljanje ulaznih podataka nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec) 70

6.2.2. Izlazni podatci dobiveni korištenjem različitih metodologija za proračun prometnih parametara nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec) 72

6.3. Usporedba analiziranih metoda na primjeru kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica) 74

6.3.1. Prikupljanje ulaznih podataka kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica) 75

6.3.2. Izlazni podatci dobiveni korištenjem različitih metodologija za proračun prometnih parametara kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica) 77

7. ZAKLJUČAK 80

Literatura 82

Popis kratica 84

Popis slika 85

Popis tablica 86

1. UVOD

Raskrižja upravljana prometnim svjetlima (semaforizirana), raskrižja upravljana prometnim znakovima (nesemaforizirana) i raskrižja s kružnim tokom prometa (kružna) zajedničkim imenom se nazivaju raskrižja u razini i predstavljaju točke na prometnoj mreži u kojima se povezuju dvije ili više cesta, a prometni tokovi se spajaju, razdvajaju, križaju ili prepliću. Svako od navedenih raskrižja definirano je određenim prometnim parametrima koji su bitni za analizu novih ili već postojećih raskrižja. U Republici Hrvatskoj uobičajena metoda analize prometnih parametara raskrižja je HCM (eng. Highway Capacity Manual) metoda, dok druge metode uglavnom nisu analizirane. Budući da je HCM metoda razvijena za američke uvjete postavlja se pitanje koliko je ona zapravo prihvatljiva za primjenu u Hrvatskoj. S tim u vezi potrebno je analizirati i druge metode kao što su njemačka HBS (ger. Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen) metoda i metode korištene u Australiji i Novom Zelandu kako bi se utvrdila metoda koja je najprihvatljivija za primjenu u Hrvatskoj.
Osnovni cilj koji se želi postići pisanjem ovog rada je dati pregled i kritički osvrt na postojeće metode analize prometnih parametara raskrižja. Međusobnom usporedbom rezultata različitih metodologija doći će se do konačnog rješenja odnosno odabira najprihvatljivije metode. Tematika ovog diplomskog rada podjeljena je u sedam osnovnih poglavlja:

1. Uvod
2. Pregled prometnih parametara za analizu raskrižja
3. Pregled metodologije HCM – a
4. Pregled metodologije HBS – a
5. Pregled ostalih metoda koje se koriste za analizu raskrižja
6. Usporedba analiziranih metoda na primjeru raskrižja (semaforizirano, nesemaforizirano, kružno raskrižje)
7. Zaključak

U drugom poglavlju dat će se pregled svih prometnih parametara kojima se analiziraju raskrižja u razini.
Treće poglavlje prikazuje metodologiju proračuna prometnih parametara raskrižja u razini prema HCM – u. U ovom poglavlju prikazat će se svi matematički izrazi i formule kojima se proračunavaju prometni parametri raskrižja prema američkim standardima.

Korištenjem smjernica iz priručnika HBS u četvrtom poglavlju opisat će se metodologija proračuna prometnih parametara raskrižja prema njemačkim standardima.

U petom poglavlju opisat će se neke druge metode koje se koriste za analizu raskrižja. Prikazat će se metodologije korištene u Australiji i Novom Zelandu koje su implementirane unutar programskog paketa SIDRA INTERSECTION.

U šestom poglavlju na primjeru tri raskrižja (semaforizirano, nesemaforizirano i kružno raskrižje) prikazat će se proračun prometnih parametara raskrižja prema svim navedenim metodologijama. Dobijeni rezultati međusobno će se uspoređivati te će se na osnovu toga odabrati najpovoljnija metodologija.

Na samom kraju ovog diplomskog rada iznijet će se zaključna razmatranja, te prijedlozi drugih mogućnosti ili rješenja prilikom proračuna prometnih parametara raskrižja u razini.

2. PREGLED PROMETNIH PARAMETARA ZA ANALIZU RASKRIŽJA

Prometni parametri kao što su prometni tok, propusna moć i razina usluge osnova su za analiziranje semaforiziranih, nesemaforaziranih i kružnih raskrižja. Iz tog razloga prije upotrebe bilo koje metodologije za analizu raskrižja u razini potrebno je detaljno se upoznati s ovim parametrima i njihovim svojstvima kako bi se na kraju analize dobili što točniji rezultati.

2.1. Prometni tok

Prometni tok može se definirati kao istodobno kretanje više prometnih entiteta (cestovnih vozila, vlakova, pješaka) na prometnoj infrastrukturi (cesti, željezničkoj pruzi, pješačkom stazama) prema određenim zakonitostima koje su propisane od strane teorije prometnog toka [1].

2.1.1. Podjela prometnog toka

Prometni tok može se podijeliti prema kontinuitetu, sastavu i prema stanju toka tijekom vremena [1].

U svrhu analize različitih elemenata prometne infrastrukture prema različitim priručnicima u obzir se najčešće uzima njegov kontinuitet. Prema kontinuitetu prometni tok može se podijeliti na prekinuti i neprekinuti.

Neprekinuti prometni tok karakterističan je po tome što nema statičnih elemenata kao što su prometni znakovi ili prometna svjetla izvan prometnog toka koji mogu prouzročiti njegov prekid. Autoceste i njihove komponente najjednostavniji su oblik neperekinutog prometnog toka. Ne samo da nema prekida toka već je pristup kontroliran i ograničen na ulazima. Višetračne i dvotračne ceste primjeri su neprekinutog prometnog toka u dugim segmentima između točaka prekida (semaforizirana, nesemaforizirana i kružna raskrižja). Kod višetračnih i dvotračnih cesta često je potrebno analizirati točke prekida (raskrižja) jednako kao i segmente neprekinutog prometnog toka [2].

Objekti prekinutog prometnog toka imaju kontrolirane i nekontrolirane pristupne točke koje mogu prekinuti prometni tok. Te pristupne točke podrazumjevaju prometne znakove, prometna svjetla ili ostale tipove znakova koji zaustavljaju promet periodično (ili usporavaju)

bez obzira na količinu prometa. Primjeri prekinutog prometnog toka uglavnom su glavne i sporedne gradske ceste gdje je kretanje ograničeno raskrižjima upravljanim prometnim svjetlima i pješačkim prijelazima. Tranzitni, pješački i biciklistički promet također se smatraju prekinutim, a neprekinuti tok moguće je ostvariti samo u zonama s dugim pješačkim otocima i hodnicima [2].

Kada se govori o razlikama između prekinutog i neprekinutog prometnog toka važno je spomenuti kako oni opisuju tip prometnog objekta, a ne kvalitetu prometnog toka u bilo kojem trenutku. Npr. autocesta koja je suočena s ekstremnim zagušenjima još uvijek je objekt neprekinutog prometnog toka jer su uzroci zagušenja unutarnji, a ne vanjski [2].

2.1.2. Osnovni parametri koji određuju prekinuti prometni tok

Protok, brzina, gustoća i faktor vršnog sata prometni su parametri koji određuju ponašanje prometnog toka na raskrižjima. Ovi parametri zajednički su kod prekinutog i neprekinutog prometnog toka. Osim navedenog prilikom analiziranja prometnog toka na raskrižju potrebno je u obzir uzeti i signalni plan semaforiziranih raskrižja, praznine, rep čekanja i prosječno vrijeme kašnjenja.

2.1.2.1. Protok

Protok je količina (broj) prometnih entiteta (vozila, pješaka) koji prođu kroz raskrižje u jedinici vremena. U obzir se uzimaju vozila koja prođu kroz raskrižje sa svih privoza promatranog raskrižja.

$$q = \frac{N}{t} \tag{2.1.}$$

ili

$$q = D \cdot S \tag{2.2.}$$

gdje je:

q - protok (voz/h)

N - broj vozila

t - vrijeme (s)
D – gustoća (voz/km)
S - brzina (km/h)

Prometno opterećenje je ukupan broj vozila koja prođu kroz odabrani presjek ceste unutar vremenskog intervala. Najčešće se koriste godišnji, dnevni ili satni vremenski intervali [3].

2.1.2.2. Faktor vršnog sata

Faktor vršnog sata predstavlja prometno opterećenje najopterećenijeg sata u danu (vršni sat) podjeljeno s najvećim 15 – minutnim prometnim opterećenjem unutar tog istog sata. Predstavlja mjeru nestabilnosti prometne potražnje unutar vršnog sata u danu [4].

$$PHF = \frac{q}{4 \cdot q_{15}} \tag{2.3.}$$

gdje je:
PHF - faktor vršnog sata
q - satno prometno opterećenje (voz/h)
q_{15} - prometno opterećenje vršnih 15 minuta analiziranog sata (voz/15 min)

Faktor vršnog sata najčešće se procjenjuje pa se iz njega i prometnog opterećenja određuje q_{15} prometno opterećenje vršnog 15 – minutnog perioda. U nedostatku mjerenja, PHF se može aproksimirati. Prema HCM – u u uvjetima prometnog zagušenja u gradskim područjima uzima se vrijednost 0.92, a u uvjetima ravnomjernog toka, ali uz poznavanje kratkih zagušenja uzima se 0.88 [5].

2.1.2.3. Brzina prometnog toka

Brzina je također bitan parametar za određivanje kvalitete prometne usluge. Kod proračuna se najčešće koristi prosječna brzina putovanja, jer se jednostavno računa analizom kretanja vozila u prometnom toku i najviše je statistički relevantna u odnosu na druge varijable. Prosječna brzina putovanja određuje se dijeljenjem promatrane duljine dionice ceste s

prosječnim vremenom putovanja vozila u prometnom toku. Vrijeme putovanja uključuje i vrijeme stajanja uzrokovanih zastojima u prometnom toku [5].

$$S = \frac{nL}{\sum_{i=1}^{n} t_i} \tag{2.4.}$$

gdje je:

S - prosječna brzina putovanja (km/h)

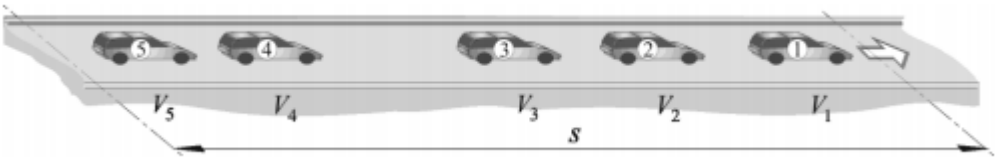
L - duljina promatrane dionice ceste (km)

t_i - vrijeme putovanja i – tog vozila u prometnom toku (s)

n - ukupan broj promatranih vremena putovanja

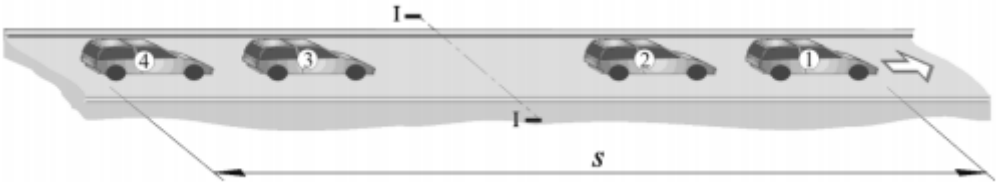
Osim prosječne brzine putovanja mogu se koristiti i ostale brzine:

a) Prosječna prometna brzina koja za razliku od brzine putovanja uzima u obzir samo vrijeme koje su vozila provela u pokretu.
b) Srednja prostorna brzina (slika 1) predstavlja prosječnu brzinu kojom vozila prolaze definiranu dionicu ceste.



Slika 1. Srednja prostorna brzina, [6]

c) Srednja vremenska brzina (slika 2) predstavlja aritmetičku sredinu brzina vozila koja prolaze određeni presjek ceste [6].



Slika 2. Srednja vremenska brzina, [6]

2.1.2.4. Gustoća prometnog toka

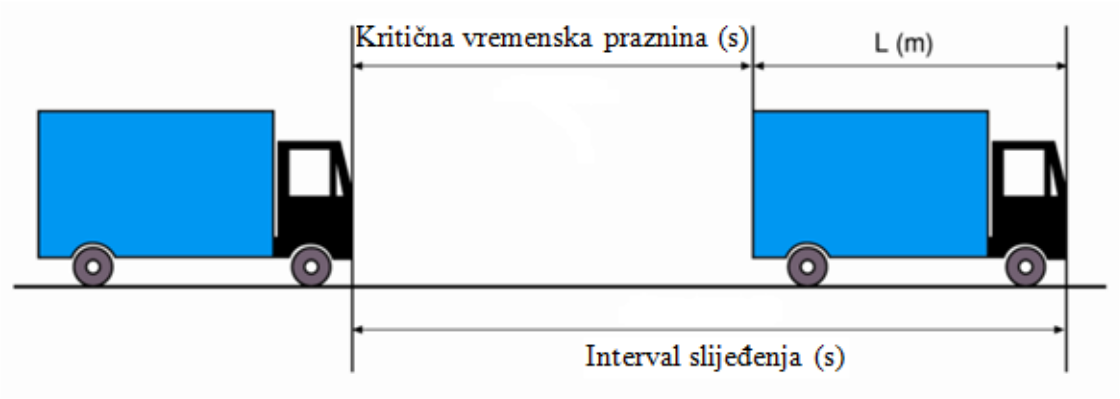
Gustoća prometa predstavlja broj vozila ili pješaka koji zauzimaju promatranu duljinu traka ili ceste u određenom trenutku. Izražava se u vozilima po kilometru (voz/km). S obzirom na komplicirano izračunavanje gustoće direktnim mjerenjem, proračunava se pomoću prosječne brzine putovanja i prometnog opterećenja [5].

$$D = \frac{q}{S} \tag{2.5.}$$

gdje je:
q = prometno opterećenje (km/h)
S = srednja brzina putovanja (km/h)
D = gustoća (voz/km)

2.1.2.5. Interval slijeđenja i kritična vremenska praznina između vozila

Interval slijeđenja između vozila može se podijeliti na vremenski interval slijeđenja vozila i prostorni interval slijeđenja vozila.
Vremenski interval slijeđenja vozila je vremenski razmak u sekundama između istih točaka dva uzastopna vozila (najistaknutija točka dva uzastopna vozila – npr. prednji branik), a prostorni interval slijeđenja između vozila je prostorni razmak u metrima između dva uzastopna vozila ili pješaka.
Prilikom analize prometnog toka na raskrižju bitno je poznavati razliku između intervala slijeđenja i kritične vremenske praznine između vozila. Kritična vremenska praznina vrlo je bitan element za analizu raskrižja a može se definirati kao minimalan vremenski razmak između dva uzastopna vozila koja prolaze kroz jednu točku mjereno od zadnje najisturenije točke prednjeg vozila i prednje najisturenije točke uzastopnog vozila. Ovaj razmak odnosno praznina bitna je kako bi se na glavnoj cesti omogućio ulazak vozila sa sporednog privoza. Bitno je napomenuti kako će vozač odbaciti svaku prazninu manju od kritične kako bi ušao u raskrižje i time izbjeći konflikt sa vozilom na glavnoj cesti [1].



Slika 3. Interval slijeđenja i kritična vremenska praznina između vozila, [1]

2.1.2.6. Prometna svjetla

Najbolji primjer fiksnih prekida u prekinutom prometnom toku su prometna svjetla. Osnovna funkcija prometnih svjetala je unutar zadanog vremenskog perioda dozvoliti ili prekinuti kretanje prometnog toka glavnog ili sporednog smjera pojedinog raskrižja. Način na koji je taj vremenski period raspoređen bitno utječe na operacije, propusnu moć i razinu usluge raskrižja. Kako bi se za promatrano raskrižje izradio što bolji i kvalitetniji signalni plan potrebno se upoznati s osnovnim parametrima za njegov izračun koji su dani u tablici 1.

Tablica 1. Osnovni pojmovi i parametri za izračun signalnog plana raskrižja

Oznaka	**Parametar**	**Objašnjenje parametra**
C	Ciklus	Trajanje jednostrukog isteka svih signalnih pojmova
	Faza	Dio ciklusa u kojem pojedini prometni tokovi imaju istovremeno slobodan prolaz
g_e	Efektivno zeleno vrijeme	Vrijeme u fazi tijekom kojeg sudionici u prometu imaju slobodan prolaz
min g	Minimalno efektivno zeleno vrijeme	Mora omogućiti siguran prolazak svih sudionika u jednoj fazi
$t_ž$	Žuto vrijeme	Promjena sa zelenog na crveno svijetlo zbog voznodinamičkih razloga
$t_{cž}$	Crveno i žuto vrijeme	Prijelazni signal ispred zelenog signalnog pojma koji služi kao priprema za predstojeći signal propuštanja
t_z	Zaštitno međuvrijeme	Vrijeme između dvije uzastopne konfliktne signalne grupe.
t_k	Provozno vrijeme	Vrijeme od trenutka kraja zelenog svijetla do početka vremena pražnjenja
t_p	Vrijeme pražnjenja	Vrijeme potrebno da vozilo prođe točku konflikta brzinom pražnjenja
t_n	Vrijeme naleta	Vrijeme potrebno da sudionik kojem se upali zeleno svijetlo prođe put naleta brzinom naleta
l	Izgubljeno vrijeme	Razlika prometnog procesa pri stvarnim u odnosu na idealne uvjete
s	Zasićeni tok	Predstavlja propusnu moć prometnog traka kada bi na lanterni bilo konstantno upaljeno zeleno svjetlo

Izvor: [7]

2.1.2.7. Rep čekanja i vrijeme kašnjenja na raskrižju

Kada prometna potražnja prelazi propusnu moć privoza raskrižja na njemu se formira rep čekanja. Uzrok tome je velika količina vozila koja dolaze na raskrižje za vrijeme trajanja crvene faze i ne stignu napustiti raskrižje za vrijeme trajanja zelene faze. Kod nesemaforiziranih i kružnih raskrižja rep čekanja na ulazu u raskrižje nastaje zbog toga što vozači ne uspjevaju pronaći prihvatljivu prazninu za uključenje u promet. Karakteristike repa čekanja na pojedinom raskrižju mogu se predviđati matematički za što je potrebno odrediti karakteristike tog sustava i parametre:

- karakteristike uzorka dolazaka, uključujući prosječnu stopu dolazaka i statističku distribuciju vremena između dolazaka
- karakteristike uslužnog objekta (raskrižja) uključujući prosječnu stopu čekanja na usluživanje, te broj korisnika koji mogu biti usluženi istovremeno i koliki je broj slobodnih kanala
- ponašanje repa čekanja (npr. koji je korisnik sljedeći na redu)

Posljedica formiranja repa čekanja na privozu je vrijeme kašnjenja koje je osnovni parametar za određivanje razine usluge raskrižja. Vrijeme kašnjenja nastaje u trenutku kada vozilo koje se približava raskrižju smanjuje svoju brzinu zbog prisustva repa čekanja. Jednostavnije vrijeme kašnjenja može se definirati kao vrijeme proteklo od kada se vozilo priključilo repu čekanja do njegovog prelaska preko zaustavne linije. Vrijeme kašnjenja također uključuje vrijeme smanjenja brzine do zaustavljanja i vrijeme potrebno za ubrzanje do brzine slobodnog toka [2].

2.2. Propusna moć raskrižja

Propusna moć raskrižja je maksimalan broj vozila koji može proći kroz to raskrižje u promatranom vremenskom intervalu u prevladavajućim voznim, kontrolnim i prometnim uvjetima [2].

2.2.1. Vozni uvjeti

Vozni uvjeti uključuju osnovnu geometriju raskrižja, broj i širinu prometnih trakova, poprečni i uzdužni nagib, ostale prometne trake i slično. Budući da promet na raskrižju varira tokom vremena na propusnu moć može se utjecati isključivo geometrijskim poboljšanjima što ukazuje na važnost voznih uvjeta raskrižja [2].

2.2.2. Prometni uvjeti

Prometni uvjeti uključuju prometno opterećenje na svakom privozu, upravljanje prometnim tokovima, tipove vozila koja prolaze raskrižjem, pješačke tokove i drugo.

2.2.2.1. Upravljanje prometnim tokovima na raskrižju

Kod objekata prekinutog prometnog toka, upravljanje prometnim tokovima ima bitnu ulogu za određivanje propusne moći.

Na signaliziranim raskrižjima upravljanje prometnim tokovima vrši se uz pomoć prometnih svjetala (semafora). Za svako semaforizirano raskrižje potrebno je definirati duljinu trajanja ciklusa, signalne faze i procjenu paljenja signala za svaku signalnu grupu.

Kretanje vozila na nesemaforiziranim raskrižjima ograničeno je kontrolom prometa na sporednim privozima uz pomoć prometnih znakova. Vozači na sporednim privozima moraju tražiti praznine na glavnoj cesti kroz koje se mogu uključiti u promet. U prisustvu repa čekanja na sporednom privozu svaki vozač mora provesti određeno vrijeme kako bi došao na čelo kolone i procjeniti praznine na glavnoj cesti. Prema tome propusna moć sporedne ceste bazirana je na tri faktora: distribucija praznina na glavnoj cesti, procjena vozača u traženju praznina kako bi ostvario manevar i prisustvo repa čekanja na sporednom privozu.

Slična situacija javlja se i kod kružnih raskrižja gdje glavni utjecaj na propusnu moć ima promet koji cirkulira kružnim trakom raskrižja. Na svakom od privoza raskrižja stvara se rep čekanja dok se na kružnom traku ne pojavi praznina kroz koju se vozač može uključiti u promet [3].

2.2.2.2. Tip vozila

Prisutnost teških vozila (nisu uključeni mali kamioni i kombiji) u prometnom toku utječe na broj vozila koja mogu biti uslužena. Teška vozila podrazumjevaju sva vozila koja s više od četiri gume dodiruju asfaltnu površinu, a tu spadaju kamioni, autobusi i rekreacijska vozila.
Osim što zauzimaju veće površine od osobnih automobila teška vozila imaju siromašnije operativne sposobnosti posebno s naglaskom na ubrzanje, usporenje i sposobnost održavanja brzine na usponima i padovima. Što se autobusnog prometa tiče, njihov najveći utjecaj na propusnu moć raskrižja je taj što moraju prihvaćati i odvoziti putnike na stajalištima [2].

2.2.2.3. Pješački tokovi .

Pješački tokovi, odnosno pješaci koji prelaze cestu na raskrižju ometaju vozila i samim time umanjuju propusnu moć raskrižja. Ovo se događa iz razloga što vozila sa sporedne ceste prolaze raskrižjem istovremeno kada i pješaci.
Brojanje pješaka nešto je drugačije nego brojanje vozila. Ako se osnovni uzorak za pješake promatra individualno, tada će se svaki pješak brojati posebno, a ako se pješaci kreću u skupinama onda se broje skupine. U oba slučaja bitno je odrediti broj smetnji tako da se najčešće broje pojedinačni pješaci i skupine [2].

2.3. Razina usluge raskrižja

Razina usluge može se definirati kao kvalitativna veličina koja opisuje uvjete unutar prometnog toka, obično u pogledu veličina kao što su brzina i vrijeme putovanja, sloboda manevriranja prometna zagušenja, pogodnost i udobnost.
Za svaki prometni objekt jedna ili više mjera učinka služe kao primarna odredba razine usluge. Mjera učinka za određivanje razine usluge na raskrižjima je prosječno vrijeme kašnjenja.
Prema različitim priručnicima definira se šest razina usluge od A do F za svaku mjeru učinka, ili kao rezultat matematičkog modela baziranog na više mjera učinka. Razina usluge A predstavlja najpovoljnije uvjete sa stajališta korisnika, a F najnepovoljnije uvjete. Zbog visoke cijene, utjecaja na okoliš i ostalih uvjeta prilično je teško ostvariti razinu usluge A uslijed

vršnih prometnih opterećenja dok je u vrijeme malih prometnih opterećenja njeno postizanje sasvim moguće [2].

Razina usluge A – uvjeti uslijed kojih se većina vozila ne zaustavlja na raskrižju ili je relativno kratko vrijeme kašnjenja . Kod semaforiziranih raskrižja većina vozila stiže uslijed zelenog svjetla.
Razina usluge B – uvijeti uslijed kojih dolazi do kraćih zaustavljanja u odnosu na razinu usluge A što uzrokuje mala kašnjenja
Razina usluge C – uvjeti u kojima se stvaraju kraći repovi čekanja uzrokovani većom progresijom prometa i većom duljinom ciklusa
Razina usluge D – uvjeti u kojima se znatnije primjećuje prometno zagušenje. Dulja vremena kašnjenja javljaju se kao rezultat dugog trajanja ciklusa i lošeg omjera prometnog opterećenja i propusne moći. Mnoga vozila se zaustavljaju, a broj vozila koja prolaze kroz raskrižje opada.
Razina usluge E – kao i kod razine usluge D javljaju se prilično duga vremena kašnjenja zbog dugog trajanja ciklusa i lošeg omjera prometnog opterećenja i propusne moći
Razina usluge F – uvjeti u kojima se javljaju ekstremene duljine vremena kašnjenja. Ova razina usluge neprihvatljiva je za većinu vozača, a često dolazi do prezasićenja kada prometno opterećenje prekorači propusnu moć [2].

Osim vremena kašnjenja velik utjecaj na određivanje razine usluge ima i odnos prometnog opterećenja i propusne moći odnosno stupanj zasićenja. Kada je stupanj zasićenja veći od 1 to znači da prometno opterećenje prelazi kapacitet i samim time za promatrani objekt određuje se razina usluge F. Stupanj zasićenja može se izračunati iz izraza [3]:

$$x = \frac{q}{c} \tag{2.6.}$$

gdje je:
x – stupanj zasićenja
q – prometno opterećenje (voz/h)
c – propusna moć (voz/h)

3. PREGLED METODOLOGIJE HCM – a

Primarna funkcija HCM - a je pomoć pri proračunavanju propusne moći i razine usluge raskrižja, dionica cesta, javnog gradskog prijevoza, te pješačkog i biciklističkog prometa. Ovaj priručnik temelji se na prometnim standardima u SAD – u, ali zbog dobro razvijene metodologije i jednostavnosti korištenja sve više se koristi u Europi pa tako i u Republici Hrvatskoj [5].

3.1. Metodologija proračuna prometnih parametara semaforiziranih raskrižja primjenom HCM – a

Današnji model (HCM 2010) je iznimno kompleksan s nekoliko iterativnih elemenata, te gotovo da nije moguć njegov manualan izračun već zahtijeva upotrebu različitih programskih alata. Metodologija proračuna prometnih parametara potrebnih za određivanje razine usluge semaforiziranog raskrižja provodi se kako slijedi u nastavku [8].

3.1.1. Definiranje grupa trakova, kretanja i prilagođavanje prometnog opterećenja

Na samom početku analiziranja semaforiziranih raskrižja potrebno je definirati određene grupe trakova i kretanja čije su kombinacije dane u tablici 2.

Tablica 2. Kombinacije grupa trakova i grupa kretanja

Broj trakova	Smjerovi po traku	Grupa kretanja (GK)	Grupa trakova (GT)
1	Lijevo, ravno, desno	GK 1:	GT 1:
2	Lijevo Ravno i desno	GK 1: GK 2:	GT 1: GT 2:
2	Lijevo i ravno Ravno i desno	GK 1:	GT 1: GT 2:
3	Lijevo Lijevo Ravno Ravno Ravno i desno	GK 1: GK 2:	GT 1: GT 2: GT 3:

Izvor: [3]

Za svaku grupu trakova na anliziranom raskrižju određenu prema tablici 2 potrebno je prilagoditi pripadajuće prometno opterećenje, odnosno prometnu potražnju. U slučaju kada je moguće terensko prikupljanje podataka (brojanje prometa) prometno opterećenje i faktor vršnog sata predstavljaju ulazne podatke te se na temelju njih može odrediti stopa prijevozne potražnje.

$$q_0 = \frac{q}{PHF} \tag{3.1.}$$

gdje je:

q_0 - stopa prijevozne potražnje

3.1.2. Proračun zasićenog toka

Bazna vrijednost zasićenog toka kod semaforiziranih raskrižja prema HCM – u izosi 1750 voz/h dok za velike gradove (više od 250 000 stanovnika) ta vrijednost iznosi 1900 vozila po satu. Osim bazne vrijednosti zasićenog toka u obzir se mora uzeti i broj trakova u grupi trakova i multiplikativni faktor prilagodbe, te se na osnovu njih može odrediti zasićeni tok za svaku grupu trakova [8].

$$s = s_0 \cdot N \cdot \prod_i f_i \tag{3.2.}$$

gdje je:

s_0 – bazna vrijednost zasićenog toka (voz/h)

f_i - multiplikativni faktor prilagodbe

N - broj trakova u grupi trakova

Multiplikativni faktor prilagodbe podrazumjeva različite faktore prilagodbe kao što su faktor prilagodbe za širinu traka, faktor prilagodbe za teška vozila, faktor prilagodbe za uzdužni nagib i slično. Tako se primjerice faktor prilagodbe za teška vozila može izračunati iz izraza:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_{HV} \cdot (E_T - 1)} \tag{3.3.}$$

gdje je:

P_{HV} – postotak teških vozila pripadajuće grupe trakova (%)

E_T – ekvivalentna jedinica za teška vozila ($E_T = 2$)

3.1.3. Izračun propusne moći za svaku grupu trakova i stupnja zasićenja x

Uvrštavanjem u formulu izračunatog zasićenog toka i poznatih vrijednosti o trajanju efektivnog zelenog svijetla i ciklusa na analiziranom raskrižju moguće je odrediti propusnu moć za svaku grupu trakova na raskrižju:

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g_e}{C} \tag{3.4.}$$

gdje je:

g_e – efektivno trajanje zelenog svjetla za grupu trakova (s)

C – trajanje ciklusa (s)

Stupanj zasićenja za svaku grupu trakova računa se pomoću formule (2.6.) dok se kritični stupanj zasićenja cijelog raskrižja može izračunati iz izraza:

$$x_c = \frac{\sum_i \left(\frac{q_0}{s}\right)_{ci}}{\sum_i \frac{g_{ci}}{C}} \tag{3.5.}$$

gdje je:

q_0/S - omjer protoka vozila i zasićenog toka svake grupe trakova

3.1.4. Izračun vremena kašnjenja za svaku grupu trakova

Kašnjenje koje se računa u ovom koraku predstavlja prosječno vrijeme kašnjenja svih vozila koja su prošla raskrižjem unutar analiziranog perioda. To uključuje i svako kašnjenje vozila koja se nalaze u repu čekanja i nakon analiziranog perioda. Prosječno vrijeme kašnjenja sastoji se od zbroja prosječnog uniformnog kašnjenja, prosječnog povećanog kašnjenja i dodatnog kašnjenja zbog stvaranja repa čekanja prije početka analize [3].

$$d = d_1 + d_2 + d_3 \tag{3.6.}$$

gdje je:

d - prosječno vrijeme kašnjenja (s/vozilo)

d_1 - prosječno uniformno kašnjenje (s/vozilo)

d_2 - prosječno povećano kašnjenje (s/vozilo)

d_3 - dodatno kašnjenje zbog postojanja repa čekanja prije analize (s/vozilo)

Uniformnim vremenom kašnjenja se pretpostavlja slučajan dolazak vozila na raskrižje tijekom ciklusa. Izraz za izračun uniformnog vremena baziran je na prvoj formuli za proračun vremena kašnjenja, a iskazuje se Websterovom formulom [3]:

$$d_1 = \frac{0.5C\left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \left[\min(1,x) \cdot \frac{g}{C}\right]} \tag{3.7.}$$

Prosječno povećano vrijeme kašnjenja pretpostavlja varijacije u broju dolazaka vozila na raskrižje iz ciklusa u ciklus. Također predstavlja kašnjenje uslijed kojeg je prijevozna potražnja veća od propusne moći u analiziranom periodu. Izraz za povećano vrijeme kašnjenja pretpostavlja da na raskrižju nema repa čekanja uzrokovanog nezadovoljenom prometnom potražnjom, a iskazuje se Akcelikovom formulom (3.8.) [3]:

$$d_2 = 900T \cdot \left[\left(x - 1\right) + \sqrt{\left(x - 1\right)^2 + \left(\frac{8kIx}{cT}\right)}\right] \tag{3.8.}$$

gdje je:

k - faktor prilagodbe za način upravljanja raskrižjem (za fiksno 0.50)

I - faktor prilagodbe za utjecaj susjednih raskrižja (izolirana raskrižja I = 1)

Ako niti jedna grupa trakova nema rep čekanja, tada je inicijalno vrijeme kašnjenja jednako 0. Ako je rep čekanja prisutan u bilo kojoj grupi trakova analiziranog raskrižja sljedeći izraz koristi se za izračun inicijalnog vremena kašnjenja [3]:

$$d_3 = \frac{3600}{q_0 T} \cdot \left(t \cdot \frac{Q_b + Q_e - Q_{eo}}{2} + \frac{Q_e^2 - Q_{eo}^2}{2c} - \frac{Q_b^2}{2c} \right) \quad (3.9.)$$

Gdje je:

t – prilagođeno trajanje nezadovoljene prometne potražnje u analiziranom periodu (s)

Q_e – rep čekanja na kraju analiziranog perioda (vozila)

Q_{eo} – rep čekanja na kraju analiziranog perioda kada je $q \geq c$ ili kada je $Q_b = 0$

3.1.5. Određivanje razine usluge semaforiziranog raskrižja

Na osnovu svih prethodno izračunatih parametara, odnosno izračunatog prosječnog vremena kašnjenja može se odrediti razina usluge. Razina usluge svake grupe trakova i svakog privoza semaforiziranog raskrižja može se odrediti prema tablici:

Tablica 3. Kriterij za određivanje razine usluge prema HCM - u

Prosječno vrijeme kašnjenja (s/vozilo)	Razina usluge na temelju odnosa q/c	
	$q/c \leq 1$	$q/c > 1$
0 - 10	A	F
> 10 - 20	B	F
> 20 - 35	C	F
> 35 - 55	D	F
> 55 - 80	E	F
> 80	F	F

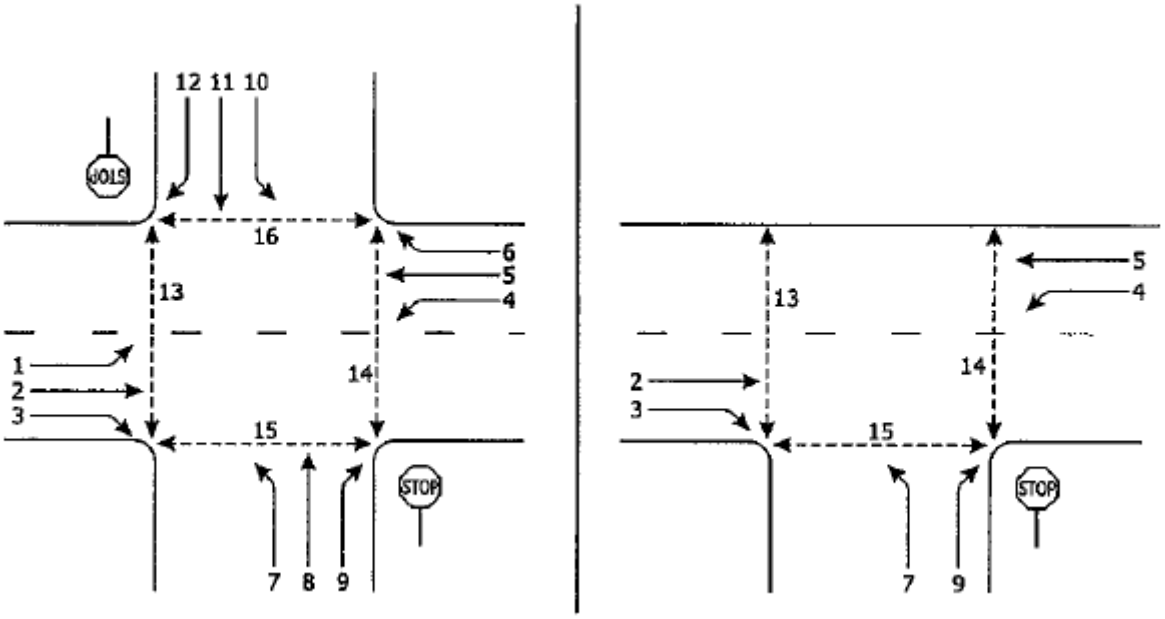
Izvor: [3]

3.2. Metodologija proračuna prometnih parametara nesemaforiziranih raskrižja primjenom HCM – a

Metodologija proračuna prometnih parametara nesemaforiziranih raskrižja prema HCM - u temelji se na izračunu vremenskih praznina i vremena slijeđenja na glavnoj cesti. Ova metodologija bazira se na nacionalnim istraživanjima prometa (National Cooperative Highway Research Program Project 3 – 46) [3].

3.2.1. Određivanje konfliktnih prometnih tokova, vremenskih praznina i vremena slijeđenja

Budući da je kod nesemaforiziranih raskrižja ulazak vozila sa sporedne ceste na glavnu cestu kontroliran znakom za obavezno zaustavljanje (STOP) prilikom analize potrebno je odrediti koji prometni tokovi imaju prednost pri prolasku kroz raskrižje.



Slika 4. Prikaz tokova po privozima na četverokrakom i T – raskrižju, [3]

Slika 4 prikazuje prometne tokove po privozima na četverokrakom i T – raskrižju koji se mogu kategorizirati na sljedeći način:

Prioritet broj jedan - uključuje smjer za ravno na glavnoj cesti (tokovi 2 i 5), desna skretanja na glavnoj cesti (tokovi 3 i 6) i pješačke tokove preko sporedne ceste (tokovi 15 i 16).

Prioritet broj dva - uključuje lijeva skretanja na glavnoj cesti (tokovi 1 i 4), desna skretanja na sporednoj cesti (tokovi 9 i 12) i pješački tokovi preko glavne ceste (tokovi 13 i 14).

Prioritet broj tri - uključuje smjer za ravno na sporednoj cesti (tokovi 8 i 11) i lijevo skretanje na sporednoj cesti u slučaju T - raskrižja (tok 7).

Prioritet broj četiri - uključuje lijeva skretanja na sporednoj cesti (tokovi 7 i 10) i ne određuje se kod T – raskrižja [3].

Parametar qc,i predstavlja konfliktni prometni tok za manevar i. On je u biti zbroj prometnih opterećenja tokova koji su u konfliktu s manevrom i.

Desni skretači sa sporednog privoza su samo u konfliktu s provoznim trakovima u glavnom privozu (ako su dva traka za ravno, onda utječu samo na desni trak u koji se ulijevaju desni skretači). Desni skretači s glavnog privoza ipak indirektno utječu na odluku vozača da izvede manevar desnog skretanja iz sporednog u glavni privoz pa se uzima u proračun polovica prometnog opterećenja desnih skretača s glavnog privoza.

Lijevi skretači s glavnog privoza su u konfliktu s provoznim prometom i desnim skretačima glavnog privoza suprotnog smjera.

Tokovi za ravno na sporednim privozima su u konfliktu sa svim tokovima glavnih privoza, osim s desnim skretačima na glavnom privozu. No zbog indirektnog utjecaja na odluku vozača ipak se uzima u proračun polovina prometnog toka desnih skretača na glavnom privozu. Prema istraživanjima pokazalo se da je utjecaj lijevih skretača na glavnom privozu izrazit pa se u proračunima udvostručuje protok lijevih skretača.

Lijevo skretanje sa sporednog privoza je najkompliciraniji manevar na četverokrakom raskrižju. On mora propustiti sve tokove glavnog privoza te tokove za ravno i desno na sporednom privozu suprotnog smjera. U proračun se uzima samo polovina protoka za ravno i desnih skretača suprotnog sporednog privoza, jer su ti protoci regulirani prometnim znakom (STOP ili raskrižje s cestom s prednošću prolaska) i imaju umanjen utjecaj na lijevog skretača. Prema istraživanjima pokazalo se da je utjecaj lijevih skretača na glavnom privozu izrazit pa se u proračunima udvostručuje protok tih lijevih skretača.

Ako je tok za desno skretanje na glavnom privozu odvojen trokutastim otokom ti tokovi se zanemaruju u proračunu.

Ako postoji poseban trak za desno skretanje na glavnom privozu tokovi desnih skretača na glavnom privozu se zanemaruju.

Ako je skretanje udesno sa sporednog privoza odvojeno trokutastim otokom ti tokovi se zanemaruju u proračunu.

Ako postoji više trakova za prolaz ravno na glavnom privozu, ukupan protok za ravno se dijeli s brojem trakova ili se specificira drugačija distribucija po trakovima prema podacima s terena [5].

Nakon određivanja konfliktnih prometnih tokova na analiziranom raskrižju potrebno je odrediti kritične vremenske praznine i vremena slijeđenja. Ovi parametri određuju se za lijeva skretanja na glavnoj cesti, desna skretanja na sporednoj cesti, smjer za ravno na sporednoj cesti i lijeva skretanja na sporednoj cesti [3].

Kritična vremenska praznina izračunat će se iz izraza:

$$t_{c,i} = t_{c,base} + t_{c,HV} + P_{HV} + t_{c,G}G - t_{3,LT} \quad (3.10.)$$

gdje je:

$t_{c,i}$ – kritična vremenska praznina za manevar i (s)

$t_{c,base}$ – bazna kritična vremenska praznina (s)

$t_{c,HV}$ – korekcijski faktor za teška vozila (1 za glavnu cestu sa jednim prometnim trakom za svaki smjer, 2 za glavnu cestu sa dva ili tri prometna traka za svaki smjer)

P_{HV} – postotak teških vozila u prometnom toku (%)

$t_{c,G}$ – korekcijski faktor utjecaja uzdužnog nagiba za svaki privoz (0.1 za manevre 9 i 12, 0.2 za manevre 7,8,10,11) (s)

G – postotak uzdužnog nagiba (%)

$t_{3,LT}$ – korekcijski faktor geometrije raskrižja (0.7 za lijevo skretanje sa sporednog privoza kod T – raskrižja, 0 za ostale slučajeve)

Izraz za izračunavanje vremena slijeđenja prema HCM 2010 metodologiji glasi:

$$t_{f,i} = t_{f,base} + t_{f,HV}P_{HV} \quad (3.11.)$$

gdje je:

$t_{f,i}$ – vrijeme slijeđenja za manevar i (s)

$t_{f,base}$ – bazno vrijeme slijeđenja (s)

$t_{f,HV}$ – korekcijski faktor za teška vozila (0.9 za glavnu cestu sa jednim prometnim trakom za svaki smjer, 1 za glavnu cestu sa dva ili tri prometna traka za svaki smjer)

Bazne vrijednosti kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja navedene su u tablici 4.

Tablica 4. Bazne vrijednosti kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja u ovisnosti o manevru u raskrižju

Manevar	Bazni $t_{c,\ base}$		Bazni $t_{f,\ base}$
	2 – tračni glavni smjer	4 – tračni glavni smjer	
Lijevo skretanje s glavnog privoza	4.1	4.1	2.2
Desno skretanje sa sporednog privoza	6.2	6.9	3.3
Ravno sa sporednog privoza	6.5	6.5	4.0
Lijevo skretanje sa sporednog privoza	7.1	7.5	3.5

Izvor: [5]

3.2.2. Proračun propusne moći nesemaforiziranog raskrižja

Prilikom izračuna propusne moći nesemaforiziranog raskrižja najprije je potrebno odrediti idealnu propusnu moć svakog prometnog traka raskrižja na svakom privozu. Idealna propusna moć predstavlja propusnu moć za specifični manevar u sljedećim uvjetima:

- promet iz susjednih raskrižja ne utječe na promatrano raskrižje
- postoji posebna traka za svaki manevar iz sporednog privoza [5]

Idealna propusna moć izračunat će se iz izraza:

$$c_{p,\ i} = qci \cdot \frac{e^{-\ q_{ci}\ \cdot\ t_{ci}/3600}}{1\ -\ e^{-\ q_{ci}\ \cdot\ t_{fi}/3600}} \qquad (3.12.)$$

Nakon izračuna idealne propusne moći potrebno je izračunati i realnu propusnu moć svakog prometnog traka na raskrižju. Ovaj parametar ovisi prvenstveno o stupnju zasićenja prometnog toka i rangu prometnog toka.

Za glavne prometne tokove ranga 1 pretpostavlja se da nisu ometani od prometnih tokova sa sporednih privoza. Ovaj rang također podrazumjeva da se glavni tok ne usporava i ne kasni prilikom prolaska kroz raskrižje.

Rang 2 nema dodatnih ometanja od strane tokova sa sporednih privoza pa je realni kapacitet ranga 2 jednak idealnom.

Rang 3 mora propustiti rang 1, te lijeve skretače s glavnog pravca ranga 2. . Iz toga proizlazi da rang 3 neće moći iskoristiti sve vremenske praznine kako bi se uključio u glavni tok, jer će neke od tih praznina iskoristiti vozači koji s glavnoga toka skreću lijevo. Veličina ove impedancije (ometanja) ovisi o vjerojatnosti da će vozila koja skreću lijevo s glavnog privoza čekati istovremeno odgovarajuću vremensku prazninu kao i vozila ranga 3 [5].

Prilikom izračuna realne propusne moći za rang 3 iz sljedećeg izraza potrebno je izračunati vjerojatnost da neće biti repa čekanja:

$$p_{o,j} = 1 - \frac{q_j}{c_{m,j}} \tag{3.13.}$$

gdje je:

$p_{o,j}$ = vjerojatnost da nema repa čekanja

j – lijevi skretači s glavnog privoza

c_m – realna propusna moć lijevih skretača (rang2)

Množenjem svih vjerojatnosti da nema repa čekanja dobit će se korekcijski koeficijent:

$$f_k = \prod_j p_{o,j} \tag{3.14.}$$

Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti idealne propusne moći i korekcijskog koeficijenta u sljedeći izraz može se izračunati realna propusna moć ranga 3:

$$c_{m,k} = (c_{p,k}) \cdot f_k \tag{3.15.}$$

Prometni tokovi ranga 4 zadnji prolaze kroz raskrižje što znači da moraju propustiti sva vozila ranga 1, 2 i 3 i prvenstveno ovise o repu čekanja lijevih skretača glavnog privoza, smjera za

ravno sporednog privoza i desnih skretača sporednog privoza. Kod ovog ranga bitno je uočiti da vjerojatnosti viših rangova nisu neovisne jedna o drugoj. Posebno vjerojatnost da nema repa čekanja u traku za lijevo skretanje s glavnog privoza utječe na vjerojatnost da nema repa čekanja u traku za ravno sa sporednog privoza. Iz tog razloga potrebno je odrediti faktor statističke zavisnosti vjerojatnosti za tokove ranga 2 i 3 prema izrazu [5]:

$$p' = 0.65 \cdot p'' - \frac{p''}{p''+3} + 0.6\sqrt{p''} \tag{3.16.}$$

gdje je:

p' – faktor statističke zavisnosti vjerojatnosti za struje 2. i 3. ranga

p'' – $(f_k)(p_{o,k})$

$p_{o,k}$ – vjerojatnost da prometni tok ranga 3 nema repa čekanja

Korekcijski koeficijent potreban za daljnji proračun za rang 4 odredit će se iz izraza:

$$f_l = p' \cdot p_{o,j} \tag{3.17.}$$

gdje je:

l – lijevi skretači sa sporednog privoza

j – desni skretači sa sporednog privoza

U konačnici realni kapacitet ranga 4 izračunat će se iz izraza:

$$c_{m,l} = (c_{p,l}) \cdot f_l \tag{3.18.}$$

Propusna moć zajedničkog prometnog traka izračunat će se iz izraza:

$$c_{SH} = \frac{\sum_Y q_y}{\sum_y \left(\frac{q_y}{c_{m,y}}\right)} \tag{3.19.}$$

gdje je:

c_{SH} – propusna moć zajedničkog traka (voz/h)

q_y – protok vozila za pojedini manevar u zajedničkom traku (voz/h)

3.2.3. Proračun duljine repa čekanja

Duljina repa čekanja je bitan parametar za analizu nesemaforiziranih raskrižja. Prema HCM – u 2010. Duljina repa čekanja računa se za lijevo skretanje s glavnog privoza i trakove sporednog privoza, a može se izračunati iz izraza [3]:

$$Q_{95} \approx 900T \cdot \left[\frac{q_i}{c_{m,i}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{q_i}{c_{m,i}} - 1 \right)^2 + \frac{\frac{3600}{c_{m,i}} \cdot \frac{q_i}{c_{m,i}}}{150T}} \right] \cdot \frac{c_{m,i}}{3600} \tag{3.20.}$$

gdje je:

Q_{95} – 95 – i percentil repa čekanja (vozila)

q_i – protok za manevar i (voz/h)

$c_{m,i}$ – realna propusna moć manevra i (voz/h)

T – analizirani period (0.25 za 15 minutni period)

3.2.4. Proračun prosječnog vremena kašnjenja

Prosječno vrijeme kašnjenja za svaki zasebni prometni trak je funkcija realne propusne moći i stupnja zasićenja. Analitički model za određivanje prosječnog vremena kašnjenja pretpostavlja da je prijevozna potražnja veća od propusne moći za analizirani period od 15 minuta. Ako je stupanj zasićenja veći od 0.9, tada je prosječno vrijeme kašnjenja značajno pogođeno trajanjem analiziranog perioda. Ako prijevozna potražnja prelazi propusnu moć unutar 15 minutnog perioda proračun prema navedenoj formuli možda neće biti ispravan. U ovom slučaju period analize treba produljiti uključujući razdoblje prezasićenja. Prema HCM 2010. Prosječno vrijeme kašnjenja svakog prometnog traka na raskrižju računa se iz izraza (3.21.) [3]:

$$d = \frac{3600}{c_{m,i}} + 900T \cdot \left[\frac{q_i}{c_{m,i}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{q_i}{c_{m,i}} - 1 \right)^2 + \frac{\frac{3600}{c_{m,i}} \cdot \frac{q_i}{c_{m,i}}}{450T}} \right] + 5 \tag{3.21.}$$

gdje je:
d = prosječno vrijeme kašnjenja (s/vozilo)

Konstanta od 5 (s/vozilo) dodaje se formuli zbog usporenja vozila iz brzine slobodnog toka do brzine vozila u repu čekanja i zbog ubrzanja nakon prolaska zaustavne linije do postizanja brzine slobodnog toka.
Prosječno vrijeme kašnjenja računa se samo za lijeva skretanja s glavnog privoza i trakove sporednog privoza.

3.2.5. Određivanje razine usluge nesemaforiziranog raskrižja

Nakon određivanja prosječnog vremena kašnjenja trakova za lijevo skretanje na glavnom privozu i trakova sporednog privoza može se izračunati i prosječno vrijeme kašnjenja po privozima na temelju kojih će se odrediti razina usluge raskrižja.

Prosječno vrijeme kašnjenja po privozima može se izračunati iz izraza:

$$d_A = \frac{d_r \cdot q_r + d_t \cdot q_t + d_l \cdot q_l}{q_r + q_t + q_l} \tag{3.22}$$

gdje je:
d_A – vrijeme kašnjenja po privozu (s/vozilo)
d_r, d_t, d_l – prosječno vrijeme kašnjenja za lijevo, ravno i desno skretanje promatranog privoza (s/vozilo)
q_r, q_t, q_l – protok vozila na prometnom traku za lijevo, ravno i desno promatranog privoza (voz/h)

Dobiveni rezultati prosječnog vremena kašnjenja po privozima nalazit će se unutar određenih intervala. Svaki od tih intervala prema HCM 2010 metodologiji ima pripadajuću razinu usluge kako je prikazano u tablici 5.

Tablica 5. Kriterij za određivanje razine usluge nesemaforiziranog raskrižja po metodologiji HCM 2010.

Prosječno vrijeme kašnjenja (s/vozilo)	Razina usluge na temelju odnosa q/c	
	q/c ≤ 1	q/c > 1
0 - 10	A	F
> 10 - 15	B	F
> 15 - 25	C	F
> 25 - 35	D	F
> 35 - 50	E	F
> 50	F	F

Izvor: [3]

3.3. Metodologija proračuna prometnih parametara kružnih raskrižja primjenom HCM – a 2010.

Metodologija proračuna prometnih parametara kružnih raskrižja prema HCM – u ne koristi se za proračune utjecaja usporedne kontrole prometa kao što su signalizirani pješački prijelazi. Ova metodologija primjenjuje se isključivo na kružnim raskrižjima koja imaju jedan prometni trak za ulaz i jedan prometni trak za izlaz iz raskrižja, budući da ostali tipovi raskrižja s kružnim tokom prometa imaju geometrijske i prometne elemente koji zahtjevaju drugačiju analizu.

3.3.1. Izračun stope prijevozne potražnje i proračunavanje prometnog opterećenja u PAJ jedinicama

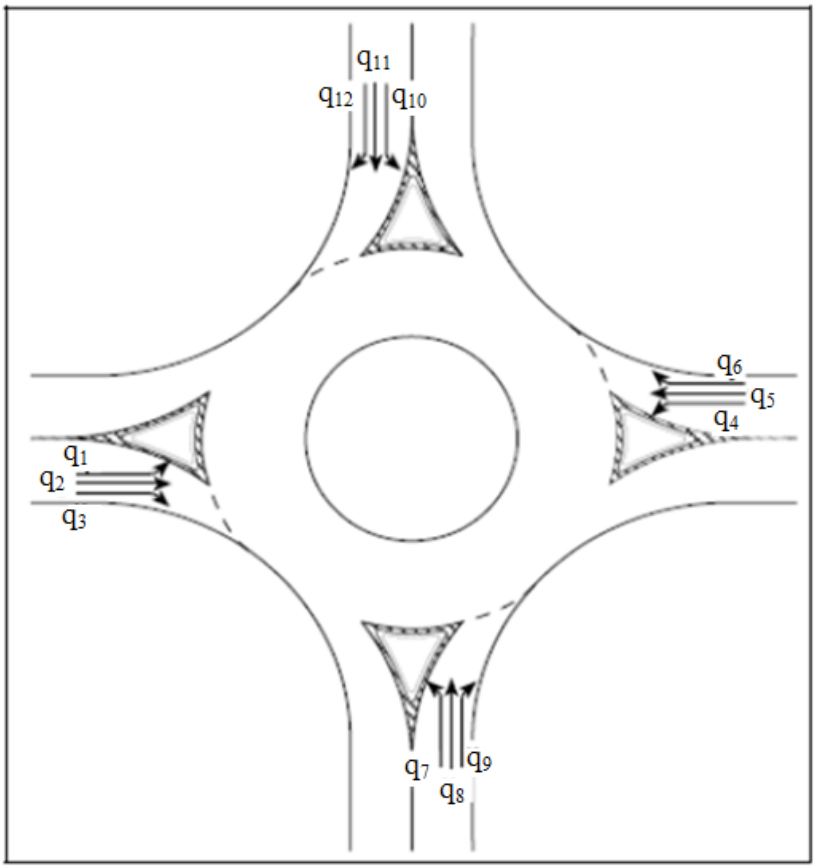
Iz poznatih podataka o prometnom opterećenju i faktoru vršnog sata za svaki prometni tok na raskrižju može se izračunati stopa prijevozne potražnje prema formuli (3.1.)

U prometnom toku kružnog raskrižja, osim osobnih automobila kreće se i određeni postotak teških vozila. Ta teška vozila imaju određen utjecaj na proračun ostalih prometnih parametara kružnih raskrižja i iz tog razloga ih je potrebno uzeti u obzir. Radi jednostavnosti proračuna prometno opterećenje potrebno je pretvoriti u PAJ (putnička automobilska jedinica) jedinice stavljanjem u omjer prethodno izračunate prometne potražnje i faktora prilagodbe za teška vozila:

$$q_{i,\,PAJ} = \frac{q_{i,0}}{f_{i,\,HV}} \tag{3.23.}$$

3.3.2. Određivanje konfliktnih tokova

Prilikom ulaska vozila u raskrižje sa određenog privoza javljaju se njemu konfliktni tokovi. Taj konfliktni tok je zapravo tok kružnog traka koji nastaje iz pojedinih privoza raskrižja [9].



Slika 5. Kružno raskrižje s njemu pripadajućim prometnim tokovima, [9]

Slika 5 prikazuje pripadajuće prometne tokove svakog privoza, te se na osnovu prikazanog za svaki privoz mogu odrediti konfliktni tokovi:

$q_{C7,\,8,\,9} = q_1 + q_2 + q_{10}$

$q_{C4,\,5,\,6} = q_1 + q_7 + q_8$

$q_{C10,\,11,\,12} = q_4 + q_5 + q_7$

$q_{C1,\,2,\,3} = q_4 + q_{10} + q_{11}$

3.3.3. Izračun propusne moći ulaznog dijela raskrižja

Izračunom prethodnih parametara uz pomoć sljedećeg izraza moguće je izračunati propusnu moć ulaznog dijela svakog privoza:

$$c_u = 1130 \cdot e^{\left(-1 \cdot 10^{-3}\right) q_{c,\,i}} \tag{3.24.}$$

3.3.4. Određivanje faktora utjecaja pješaka

Pješački promet bitno utječe na propusnu moć ulaznog dijela raskrižja. Uslijed velikog utjecaja konfliktnih tokova, pješaci često prolaze kroz praznine između vozila što tada ima neznatan utjecaj na propusnu moć ulaznog dijela raskrižja. Uslijed manjeg utjecaja konfliktnih tokova pješaci se promatraju kao dodatni konfliktni tok s vozilima koja ulaze u raskrižje [3]. Faktor utjecaja pješaka može se izračunati kako je prikazano u tablici:

Tablica 6. Izrazi za izračun faktora utjecaja pješaka na ulaznom dijelu kružnog raskrižja

Slučaj	Faktor utjecaja pješaka na propusnu moć ulaznog dijela raskrižja
$q_{c,i} > 881$	$f_{pj} = 1$
$n_{pj} \leq 101$	$f_{pj} = 1 - 0.000137 n_{pj}$ ili $f_{pj} = \frac{1119.5 - 0.715 q_{c,i} - 0.644 n_{pj} + 0.00073 q_{c,\,i} n_{pj}}{1068.6 - 0.654 q_{c,\,i}}$

Izvor: [3]

gdje je:

f_{pj} = faktor utjecaja pješaka na propusnu moć ulaznog dijela raskrižja

n_{pj} = broj pješaka u konfliktu sa vozilima po satu (p/h)

$q_{c,i}$ = konfliktni tok (voz/h)

3.3.5. Intenzitet ulaza u voz/h

Množenjem prometnog opterećenja u PAJ jedinicama sa faktorom prilagodbe za teška vozila ulaza dobije se intenzitet ulaza u vozilima po satu, a može ga se izračinati iz formule:

$$q_i = q_{i,\,PAJ} \cdot f_{HV,\,e} \tag{3.25.}$$

Gdje je:

$f_{HV,\,e}$ – faktor prilagodbe za teška vozila ulaza

Faktor prilagodbe za teška vozila ulaza može se izračunati iz formule:

$$f_{HV},\, e = \frac{\sum\left(f_{i,\,HV} \cdot q_{i,\,PAJ}\right)}{\sum q_{i,\,PAJ}} \tag{3.26.}$$

3.3.6. Stvarna (realna) propusna moć ulaza

Kada su poznate vrijednosti propusne moći privoza i utjecajnih faktora pješaka i teških vozila na pojedinom ulazu u raskrižje iz sljedećeg izraza moguće je odrediti stvarnu propusnu moć ulaza:

$$c_i = c_{u,PAJ} \cdot f_{HV,e} \cdot f_{pj} \tag{3.27.}$$

3.3.7. Izračun duljine repa čekanja na privozu

Uslijed zadržavanja vozila na ulasku u raskrižje zbog nedostatka vremenskih praznina na kružnom dijelu raskrižja na privozu će se stvoriti rep čekanja. Taj rep čekanja može se izračunati iz izraza (3.28.):

$$Q_{95} \approx 900T \cdot \left[x - 1 + \sqrt{(1 - x)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c}\right) \cdot x}{150T}} \right] \cdot \left(\frac{c}{3600}\right) \tag{3.28.}$$

3.3.8. Izračun prosječnog vremena kašnjanja raskrižja i razine usluge

Izraz za izračun vremena kašnjenja svakog ulaza na kružnom raskrižju jednak je onome za nesemaforizirana raskrižja uz izmjenu kod konstante od 5 (s/vozilo). Ova promjena je neophodna kod ulaza u raskrižje, koji ne zahtjevaju od vozača da se zaustavljaju kada nema konfliktnog toka.

Temeljem dobijenih vrijednosti može se odrediti prosječno vrijeme kašnjenja cijelog raskrižja kao i razina usluge. Ovi parametri određuju se na jednak način kao kod nesemaforiziranih raskrižja.

4. PREGLED METODOLOGIJE HBS – a

Njemačka je uključena u prometna istraživanja već veći broj desetljeća, a računske procedure koje su se koristile u početku uglavnom se temelje na determinističkim razmatranjima. Nova era u prometnim istraživanjima počinje kada je Ministarstvo prometa Njemačke predstavilo prototip German Highway Capacity Manual (HBS) 1989 po uzoru na američki HCM. Prva verzija ovog priručnika tiskana je 2001. godine, a predstavlja standard za izračunavanje propusne moći i razine usluge prometnih objekata u Njemačkoj [10].

4.1. Metodologija proračuna prometnih parametara semaforiziranih raskrižja primjenom HBS – a

U HBS – u 2015 metodologija proračuna prometnih parametara semaforiziranih raskrižja u potpunosti je izmjenjena u skladu s otkrićima u posljednjih deset godina. Zbog zastarjelosti osnovnih parametara i procedura koje više nisu u upotrebi, uvedene su nove procedure koje se zasnivaju na analizi propusne moći i prosječnog vremena kašnjenja [10].

4.1.1. Izračun efektivnog zelenog svjetla

Osnovni koncept HBS – a fokusiran je samo na izračun odvijanja prometa na raskrižju što znači da se smjernice za izračun signalnog plana raskrižja nalaze u RiLSA (ger. Richtlinien für Lichtsignalanlagen) priručniku. Prema tome zeleno svjetlo i trajanje ciklusa određeni su kao ulazni parametri koji se prethodno računaju preko RiLSA priručnika. Umjesto zelenog svjetla za daljnji proračun u novoj verziji priručnika koristi se efektivno zeleno svjetlo koje je definirano kao zeleno svjetlo plus jedna sekunda [10].

$$g_e = g + 1 \tag{4.1.}$$

gdje je:

g_e – efektivno zeleno vrijeme (s)

g – zeleno vrijeme (s)

4.1.2. Izračun zasićenog toka za svaku grupu trakova

Bazna vrijednost zasićenog toka prema HBS – u je 2000 voz/h, što odgovara intervalu slijeđenja zasićenog toka od 1.8 sekundi. Ove vrijednosti uzimaju se u slučajevima kada je riječ o čistom automobilskom prometu i standardnim prometnim uvjetima. U suprotnom slučaju prilikom izračuna vremenske praznine zasićenog toka u obzir je potrebno uzeti vanjske utjecaje kao što su postotak teških vozila, širina prometnog traka i slično [11].

$$t_H = t_{H,0} \cdot \prod_i f_i \qquad (4.2.)$$

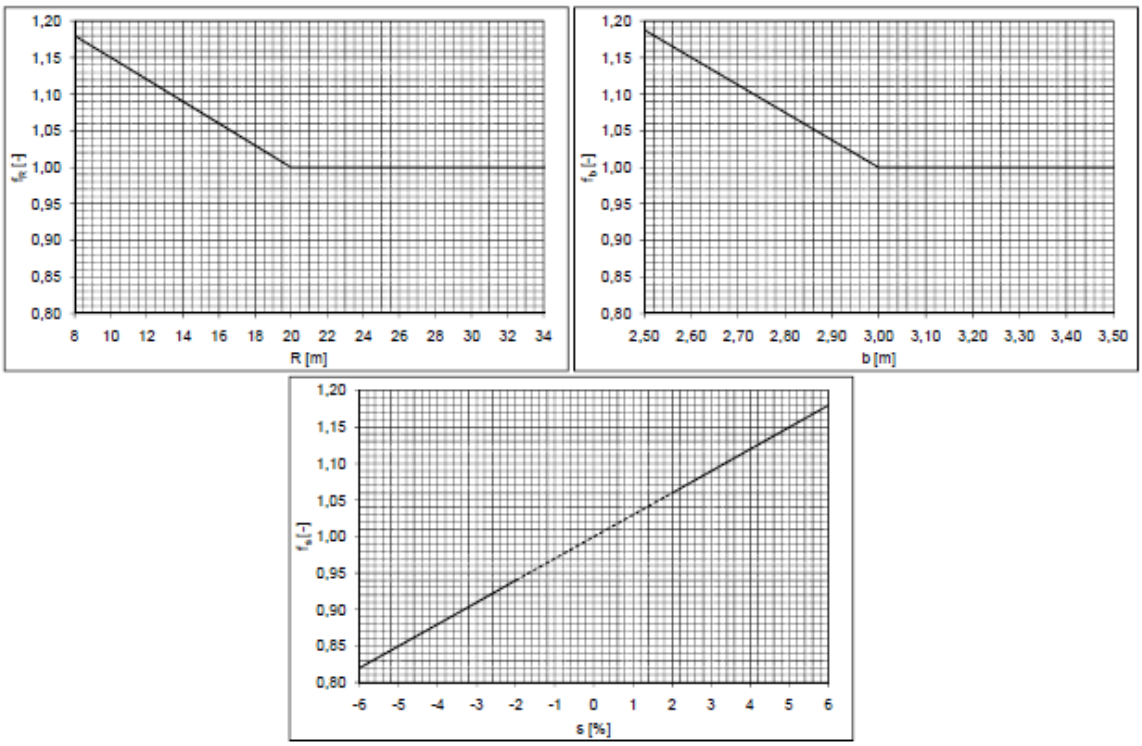
gdje je:

t_H – interval slijeđenja zasićenog toka (s)

$t_{H,0}$ – bazna vrijednost vremenske praznine zasićenog toka (s)

f_i – multiplikativni faktor prilagodbe

Faktori prilagodbe polumjera skteranja (f_R), širine prometnog traka (f_b) i nagiba privoza (f_s) mogu se odrediti iz grafikona na slici 6:



Slika 6. Grafikoni multiplikativnih faktora prilagodbe, [12]

Faktor prilagodbe za teška vozila svake grupe trakova može se izračunati iz izraza:

$$f_{HV} = \frac{q_L + 1.75 \cdot q_{autobus+kamion} + 2.5 \cdot q_{kamion\ s\ poluprikolicom}}{q} \tag{4.3.}$$

gdje je:

q_L – prometno opterećenje lakih vozila (voz/h)

q – ukupno prometno opterećenje (voz/h)

Na osnovu svega izračunatog prema sljedećem izrazu može se odrediti zasićeni tok za svaku grupu trakova analiziranog raskrižja:

$$s = \frac{3600}{t_H} \tag{4.4.}$$

4.1.3. Izračunavanje propusne moći za svaku grupu trakova

Prema HBS – u propusna moć računa se za različite smjerove kretanja i različitu konfiguraciju trakova. Tako postoje modeli za izračun propusne moći zaštićenih signalnih grupa, propusne moći dozvoljenog lijevog skretanja, propusne moći dozvoljenog desnog skretanja i propusne moći zajedničkih trakova [10]. Propusna moć zaštićenih signalnih grupa računa se jednakao kao i u HCM – u prema izrazu (3.4.) dok se propusna moć za ostale smjerove i konfiguracije prometnih trakova može izračunati kako slijedi:

Propusna moć dozvoljenog lijevog skretanja može se izračunati iz izraza:

$$c_L = c_{pm} + c_{pc} + c_{pt} \tag{4.5.}$$

gdje je:

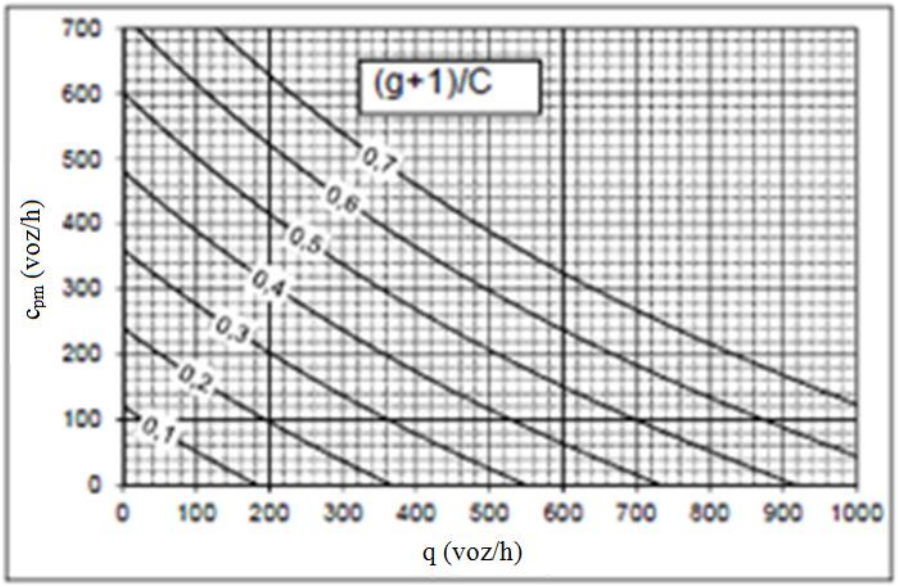
c_L – ukupna propusna moć dozvoljenog lijevog skretanja (voz/h)

c_{pm} – propusna moć uslijed dozvoljenog perioda (voz/h)

c_{pc} – propusna moć koja uključuje vozila koja su prešla zaustavnu liniju ali se zadržavaju u raskrižju uslijed promjene faza (voz/h)

c_{pt} – propusna moć uslijed zaštićenog perioda (voz/h)

Propusna moć uslijed dozvoljenog perioda ovisi o prometnom opterećenju prometnog toka suprotnog smjera u odnosu na promatranog lijevog skretača, a može se odrediti iz grafikona na slici 7:



Slika 7. Grafikon za određivanje propusne moći uslijed dozvoljenog perioda za lijeva skretanja, [10]

Kod izračuna propusne moći dozvoljenih desnih skretanja u obzir je potrebno uzeti pješake i bicikliste koji su u konfliktu s vozilima za vrijeme trajanja zelenog svjetla. Prema tome propusna moć dozvoljenih desnih skretanja može se izračunati iz izraza:

$$c_D = \frac{t_{0,\,pj}}{C} \cdot s + n_R \cdot n_c \tag{4.6.}$$

gdje je:

c_D – ukupna propusna moć dozvoljenog desnog skretanja (voz/h)

$t_{0,\,pj}$ – vrijeme trajanja zelenog svijetla bez konflikta sa pješacima i biciklistima (računa se iz izraza $g - t_{occ} + t_{adv} - n_R \cdot t_H$)

t_{occ} – vrijeme trajanja paralelnog zelenog svjetla u kojem postoji utjecaj pješaka (s)

C – ciklus (s)

n_R – broj mogućih mjesta za čekanje na prolazak između zaustavne linije i pješačkog prijelaza ($n_R = 1$)
n_C – broj ciklusa unutar jednog sata

U slučaju zajedničkog prometnog traka za više smjerova propusna moć može se odrediti iz izraza (3.19.)

4.1.4. Izračun prosječnog vremena kašnjenja i određivanje razine usluge semaforiziranog raskrižja

Prosječno vrijeme kašnjenja semaforiziranih raskrižja prema HBS – u definira se kao zbroj uniformnog vremena kašnjenja i dodatnog vremena kašnjenja koje se javlja kao posljedica postojanja repa čekanja na promatranom prometnom traku [12].

$$d = d_1 + d_3 \tag{4.7.}$$

gdje je:
d_1 – uniformno vrijeme kašnjenja (s/voz)
d_3 – dodatno vrijeme kašnjenja (s/voz)

Uniformno vrijeme kašnjenja može se izračunati iz izraza (3.7.) jednako kao i u HCM metodologiji, dok se dodatno vrijeme kašnjenja računa prema izrazu:

$$d_3 = \frac{Q_{GE} \cdot 3600}{c} \tag{4.8.}$$

gdje je:
Q_{GE} – duljina repa čekanja (vozila)
c – propusna moć prometnog traka (voz/h)

Na osnovu dobivenih vrijednosti prosječnog vremena kašnjenja prema tablici 7 se može odrediti razina usluge analiziranog raskrižja.

Tablica 7. Kriterij za određivanje razine usluge semaforiziranih raskrižja prema HBS – u

Prosječno vrijeme kašnjenja (s/vozilo)	Razina usluge na temelju odnosa q/c	
	$q/c \leq 1$	$q/c > 1$
0 - 20	A	F
> 20 - 35	B	F
> 35 - 50	C	F
> 50 - 70	D	F
> 70	E	F
-	F	F

Izvor: [12]

4.1.5. Određivanje duljine repa čekanja

Duljina repa čekanja ima veliku važnost u određivanju razine usluge semaforiziranih raskrižja prema HBS – u jer poznavanje ovog parametra uvjetuje proračun vremena kašnjenja raskrižja.

$$Q_{GE} \approx \frac{0.58 \cdot T \cdot c}{4} \cdot \left[\left(f_{in} \cdot x - 1\right) + \sqrt{\left(f_{in} \cdot x - 1\right)^2 + \frac{4 \cdot f_{in} \cdot x}{0.58 \cdot T \cdot c}} \right] \tag{4.9.}$$

gdje je:

f_{in} – faktor nestacionarnosti

Kao što se vidi iz izraza (4.9.) za proračun repa čekanja on uzima u obzir nestacionarnost prometa unutar vršnog sata koristeći faktor nestacionarnosti koji se može izračunati iz izraza:

$$f_{in} = 1 + \frac{\left(\frac{4 \cdot q_{15}}{q} - 1\right)}{1.5} \tag{4.10.}$$

gdje je:

q_{15} – vršno 15 – minutno prometno opterećenje (voz/h)

4.2. Metodologija proračuna prometnih parametara nesemaforiziranih raskrižja primjenom HBS – a

Kao što je slučaj kod većine metodologija za proračun prometnih parametara raskrižja HBS metodologija temelji se na procjeni kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja. Ova metodologija primjenjuje se na već postojeća ili planirana nesemaforizirana T – raskrižja i klasična četverokraka raskrižja u Njemačkoj [12].

4.2.1. Prilagođavanje prometnog opterećenja

Osnovni ulazni podatak potreban kako bi se ova metodologija mogla primjeniti je prometno opterećenje. Osim automobila raskrižjima prolaze i teška vozila koja imaju drugačije vozne značajke od automobila. Iz tog razloga prometno opterećenje voz/h potrebno je prilagoditi na način da ga se pretvori u prometno opterećenje u PAJ jedinicama koje će se koristiti u daljnjem proračunu[12].

$$q_{PAJ} = f_{HV} \cdot q \tag{4.11.}$$

gdje je:

q_{PAJ} – prometno opterećenje u PAJ jedinicama (PAJ/h)

f_{HV} – faktor prilagodbe za teška vozila (voz/h)

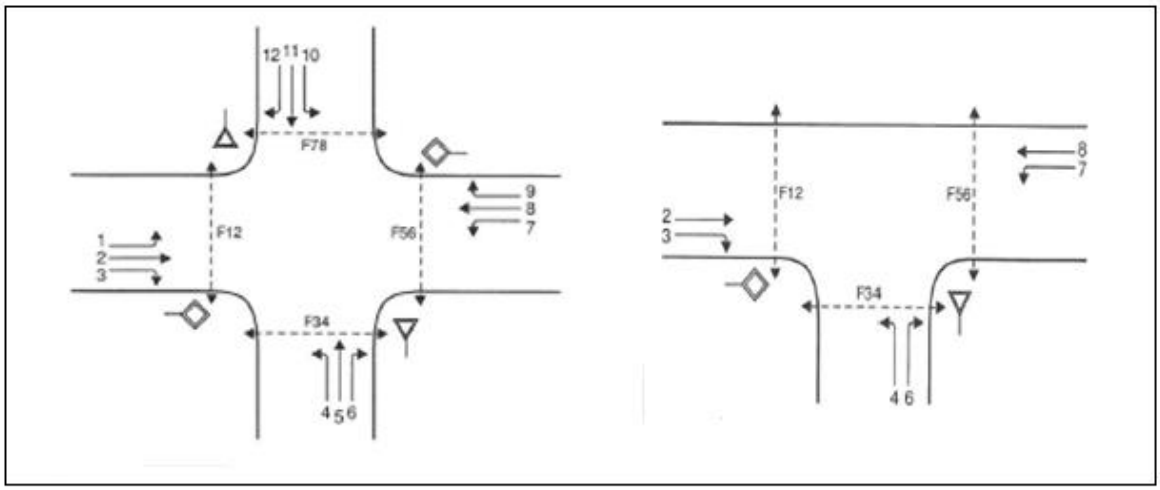
q – prometno opterećenje (voz/h)

Faktor prilagodbe za teška vozila pomoću kojeg se prilagođava prometno opterećenje može se odrediti iz izraza:

$$f_{HV} = \frac{q_L + 1.5 \cdot q_{autobus+kamion} + 2.0 \cdot q_{kamion\ s\ poluprikolicom}}{q} \tag{4.12.}$$

4.2.2. Određivanje prioritetnih i konfliktnih tokova

Prilikom određivanja prioritetnih i konfliktnih tokova HBS u svojoj metodologiji koristi standarde pravilnika o regulaciji prometa StVO (ger. Straßenverkehrsordnung).



Slika 8. Prikaz kretanja prometnih tokova na raskrižju prema StVO standardima, [12]

Prema slici 8 vozila sa glavne ceste imaju prednost prolaska kroz raskrižje u odnosu na vozila sa sporedne ceste. S tim u vezi navedene prometne tokove može se svrstati u rangove za što se koristi sličan postupak kao kod američke HCM metodologije:

Prioritet broj jedan – podrazumjeva vozila koja idu ravno na glavnoj cesti (tokovi 2 i 8) i pješačke tokove preko sporednih privoza (tokovi F34 i F78)

Prioritet broj dva – podrazumjeva sva vozila koja skreću desno na raskrižju (tokovi 3, 6, 9 i 12) i pješačke tokove preko glavnih privoza (tokovi F12 i F56)

Prioritet broj tri – podrazumjeva vozila koja skreću lijevo sa glavne ceste (tokovi 1 i 7)

Prioritet broj četiri – podrazumjeva vozila koja idu ravno na sporednoj cesti (tokovi 5 i 11)

Prioritet broj pet – podrazumjeva vozila koja skreću lijevo sa sporedne ceste (tokovi 4 i 10)

Nakon određivanja prioriteta prolaska kroz raskrižje na jednostavan način mogu se odrediti konfliktni tokovi na raskrižju koji će se koristiti u daljnjem proračunu. Način izračuna konfliktnih tokova za četverokrako raskrižje nalazi se u tablici 8, a isti postupak primjenjuje se i kod T – raskrižja uz dodatno prilagođavanje tablice. Bitno je napomenuti kako prilikom određivanja konfliktnih tokova nesemaforiziranih raskrižja prema HBS – u nije potrebno koristiti prilagođeno prometno opterećenje u PAJ jedinicama već izmjereno prometno opterećenje u voz/h [12].

Tablica 8. Izračun konfliktnih tokova četverokrakog nesemaforiziranog raskrižja

Manevar	Rb.	Prometni tokovi u konfliktu sa tokom q_c (voz/h)
Lijevi sa glavne ceste	1	$q_8 + q_9$
	7	$q_2 + q_3$
Desni sa sporedne ceste	6	$q_2 + 0.5q_3 + q_{10}$
	12	$q_8 + 0.5q_9 + q_4$
Ravno na sporednoj cesti	5	$q_2 + 0.5q_3 + q_8 + q_9 + q_1 + q_7$
	11	$q_8 + 0.5q_9 + q_2 + q_3 + q_1 + q_7$
Lijevi na sporednoj cesti	4	$q_2 + 0.5q_3 + q_8 + 0.5q_9 + q_1 + q_7 + q_{12} + q_{11}$
	10	$q_8 + 0.5q_9 + q_2 + 0.5q_3 + q_1 + q_7 + q_6 + q_5$

Izvor: [12]

4.2.2. Proračun idealne propusne moći svakog pojedinog traka raskrižja

Kako bi se mogla izračunati propusna moć svakog pojedinog prometnog traka na nesemaforiziranom raskrižju najprije je potrebno izračunati njihovu propusnu moć u idealnim uvjetima. Idealna propusna moć svakog prometnog traka raskrižja može se izračunati iz izraza:

$$c_{pPAJ,\,i} = \frac{3600}{t_f} \cdot e^{-\frac{q_c}{3600} \cdot \left(t_c - \frac{t_f}{2}\right)} \tag{4.13.}$$

gdje je:

$c_{pPAJ,\,i}$ – idealna propusna moć prometnog traka i (PAJ/h)

q_c – konfliktni tok (voz/h)

t_c – kritična vremenska praznina (s)

t_f – vrijeme slijeđenja (s)

U slučaju kada desni skretači s glavne ceste (tokovi 3 i 9) nisu odvojeni trokutastim otokom njihova idealna propusna moć iznosi 1600 PAJ/h, u suprotnom ona se računa iz izraza (4.13.) [12].

Vrijednosti kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja za raskrižja s obaveznim zaustavljanjem na sporednoj cesti (StVO 205) i raskrižja s prednošću prolaska glavne ceste (StVO 206) potrebnih za izračun idealne propusne moći dane su u tablici:

Tablica 9. Vrijednosti kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja

Manevar	Rb.	Kritična vremenska praznina t_c	Vrijeme slijeđenja t_f	
			StVO 205	StVO 206
Lijevo s glavne ceste	1 7	5.5	2.8	
Desno sa sporedne ceste	6 12	5.9	3.0	3.9
Ravno na sporednoj cesti	5 11	6.7	3.3	3.8
Lijevo sa sporedne ceste	4 10	6.5	3.2	3.8
Ravno i lijevo sa sporedne kada je jednosmjeran promet na glavnoj cesti	4 5 11 10	5.6	3.2	3.8

Izvor: [12]

4.2.3. Proračun stvarne (realne) propusne moći

Izračunata idealna propusna moć u nastavku će se koristiti za izračun realne (stvarne) propusne moći pod realnim (stvarnim) uvjetima na raskrižju. Lijevi skretači glavne ceste (tokovi 1 i 7) i svi desni skretači raskrižja (tokovi 3, 6, 9, 12) prilikom izvođenja manevra moraju propustiti pješake ukoliko desni skretači nisu odvojeni trokutastim otokom [12]. Realna (stvarna) propusna moć za sve desne skretače na raskrižju jednaka je idealnoj propusnoj moći dok se za lijeve skretače glavnog privoza računa iz formule.

$$c_{mPAJ,i} = f_{pj,\,EK,\,j} \cdot c_{pPAJ,\,i} \qquad (4.14.)$$

gdje je:

$c_{mPAJ,\,i}$ – realna propusna moć analiziranog toka i (PAJ/h)

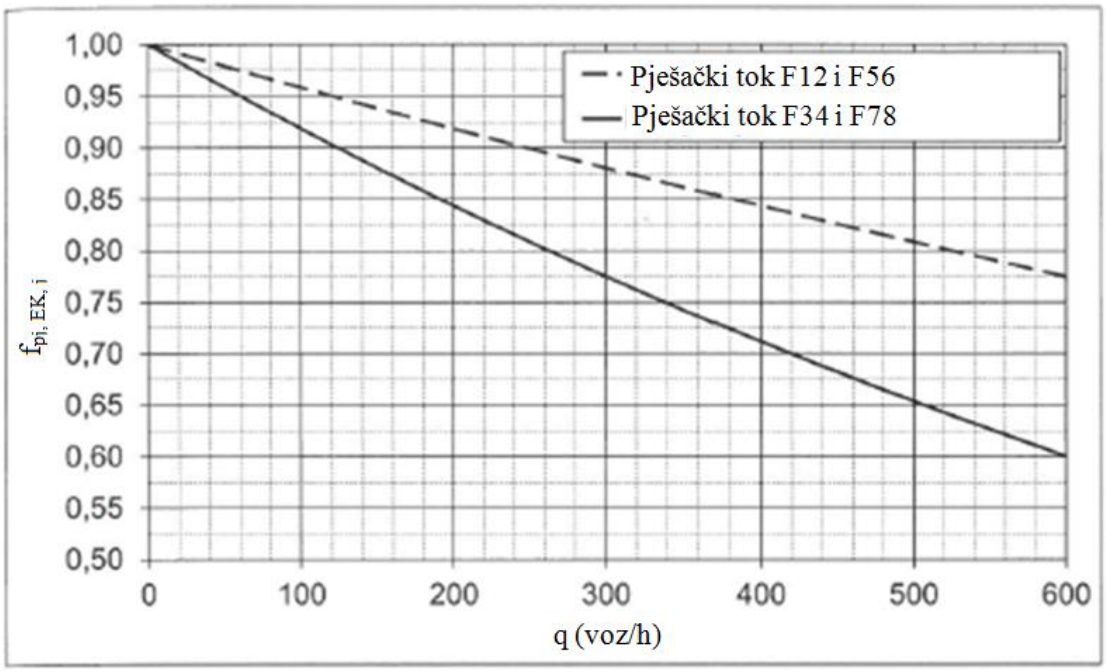
$f_{pj,\,EK,\,j}$ – faktor utjecaja pješaka

(za i = 1, 9; j = F78)

(za i = 3, 7; j = F34)

(za i =6; j = F56)

(za i = 12; j = F12)



Slika 9. Grafikon faktora utjecaja pješačkog prometa, [12]

Vozila koja idu ravno sa sporedne ceste (tokovi 5 i 11) mogu proći kroz raskrižje samo u slučaju ako na lijevim skretačima glavne ceste (tokovi 1 i 7) nema repova čekanja [12]. Ova vjerojatnost može se izračunati iz jednadžbe:

$$p_{0,\,i} = 1 - x_{i+j+k} \tag{4.15.}$$

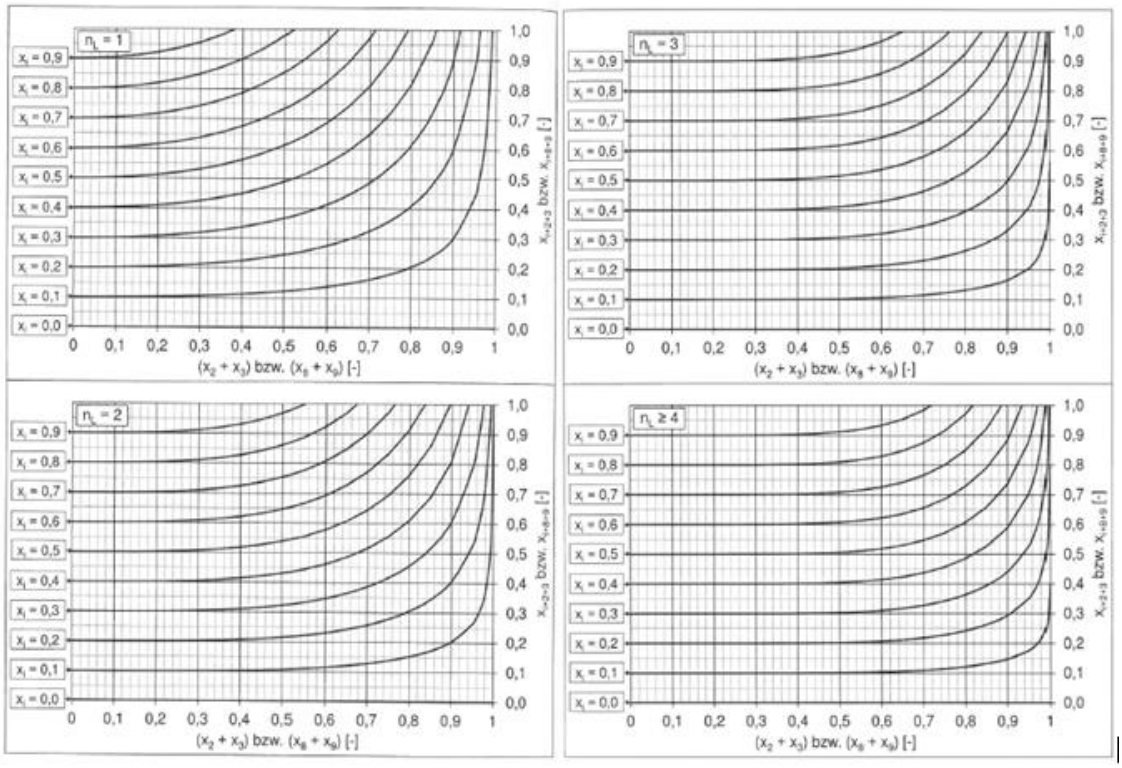
gdje je:

$p_{0,\,i}$ - vjerojatnost da nema repa čekanja na lijevim skretačima glavne ceste

x_{i+j+k} – zajednički stupanj zasićenja promatranog privoza

Zajednički stupanj zasićenja promatranog privoza u zavisnosti je od broja mjesta za vozila koja se pripremaju na skretanje n_L [12]. U slučaju kada je broj tih mjesta $n_L > 0$ vrijednost x_{i+j+k} može se iščitati iz grafikona na slici 10, a kada je $n_L = 0$ za izračun x_{i+j+k} koristi se izraz:

$$x_{i+j+k} = \frac{x_i}{1-x_j-x_k} \tag{4.16.}$$



Slika 10. Grafikoni za određivanje broja mjesta na kojima se vozila pripremaju na skretanje, [12]

Na osnovu svega navedenog realna (stvarna) propusna moć vozila koja idu ravno sa sporedne ceste može se izračunati iz izraza:

$$c_{mPAJ,\,i} = p_{x,\,i} \cdot c_{pPAJ,\,i} \tag{4.17.}$$

gdje je:

$p_{x,\,i}$ – zajednička vjerojatnost da nema repa čekanja na lijevim skretačima glavne ceste (dobije se množenjem vjerojatnisti oba lijeva skretača sa glavne ceste)

Budući da su lijevi skretači sa sporedne ceste (tokovi 4 i 10) najzahtjevniji manevar na nesemaforiziranom raskrižju izračun njihove propusne moći ovisi o vjerojatnosti da nema repa čekanja na ostalim manevrima sporedne ceste (tokovi 5, 6, 11 i 12) i da nema repa čekanja na lijevim skretačima glavne ceste (tokovi 1 i 7) [12]. Vjerojatnosti da neće biti repa čekanja na ostalim manevrima sporedne ceste može se izračunati iz izraza:

$$p_{0,\,i} = 1 - \frac{q_{PAJ,\,i}}{c_{mPAJ,\,i}} \tag{4.18.}$$

Vjerojatnost istovremenog nepostojanja repa čekanja na trakovima za ravno sporedne ceste (tokovi 5 i 11) može se izračunati iz izraza:

$$p_{z,\,i} = \frac{1}{\frac{1}{p_x} + \frac{1}{p_{0,i}} - 1} \tag{4.19.}$$

Temeljem svega navedenog dobit će se izraz za izračun propusne moći lijevih skretača sporedne ceste:

$$c_{mPAJ,\,i} = f_{pj,\,EK,\,j} \cdot p_{z,\,i} \cdot p_{0,i} \cdot c_{pPAJ,\,i} \tag{4.20.}$$

Propusna moć zajedničkih trakova nesemaforiziranih raskrižja prema HBS – u može se izračunati iz izraza (4.21.):

$$c_{mPAJ,\,i+j} = \frac{q_{PAJ,\,i} + q_{PAJ,\,j}}{x_{i+j}} \tag{4.21.}$$

4.2.4. Izračun prosječnog vremena kašnjenja

Kako bi uopće bilo moguće izračunati prosječno vrijeme kašnjenja nesemaforiziranog raskrižja potrebno je izračunate propusne moći u PAJ jedinicama pretvoriti u propusne moći u voz/h.

$$c_{m,\,i} = \frac{c_{mPAJ,\,i}}{f_{HV,\,i}} \tag{4.22.}$$

gdje je:

$c_{m,\,i}$ – stvarna propusna moć jednog prometnog traka (voz/h)

$c_{mPAJ,\,i}$ – stvarna propusna moć jednog prometnog traka (PAJ/h)

Rezervna propusna moć predstavlja razliku između stvarne propusne moći jednog prometnog traka i njegovog prometnog opterećenja te se pomoću nje može vrlo jednostavno opisati situacija na analiziranom raskrižju.

$$R = c_{m,\,i} - q_i \tag{4.23.}$$

Gdje je:

R – rezervna propusna moć (voz/h)

Temeljem svih prethodno izračunatih vrijednosti iz sljedećeg izraza može se odrediti prosječno vrijeme kašnjenja na analiziranom nesemaforiziranom raskrižju [12]. Ovaj parametar kao i u većini metodologija biti će osnova za određivanje razine usluge.

$$d = \frac{3600}{c_{m,i}} + 900 \cdot \left[\frac{q_i}{c_{m,i}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{q_i}{c_{m,i}} - 1 \right)^2 + \frac{8 \cdot q_i}{\left(c_{m,i}\right)^2}} \right] \tag{4.24.}$$

gdje je:

d – prosječno vrijeme kašnjenja na nesemaforiziranom raskrižju (s/vozilo)

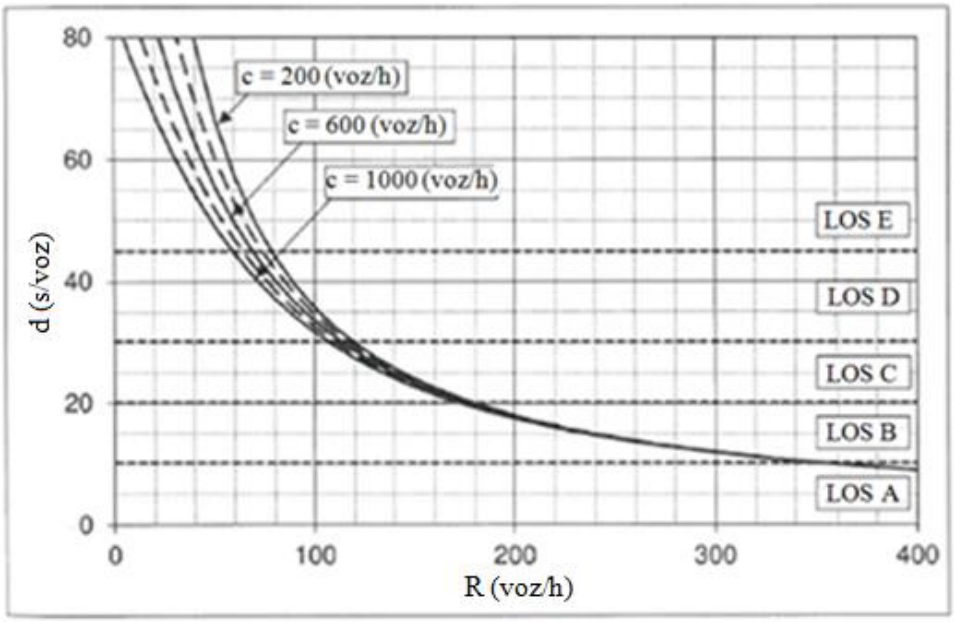
Na osnovu izračunatog prosječnog vremena kašnjenja iz tablice se može očitati razina usluge za svaki pojedini prometni trak i svaki privoz raskrižja [12].

Tablica 10. Kriterij za određivanje razine usluge nesemaforiziranih raskrižja prema HBS – u

Prosječno vrijeme kašnjenja (s/vozilo)	Razina usluge na temelju odnosa q/c	
	q/c ≤ 1	q/c > 1
0 - 10	A	F
> 10 - 20	B	F
> 20 - 30	C	F
> 30 - 45	D	F
> 45	E	F
-	F	F

Izvor: [12]

U slučaju nedostatka podataka za proračun potrebnih prometnih parametara i kada je x ≤ 0.85 razina usluge nesemaforiziranih raskrižja može se odrediti i temeljem grafikona 5 [12].



Slika 11. Grafikon vremena kašnjenja u ovisnosti o parametrima R i c, [12]

4.2.5. Određivanje repa čekanja

Uz prosječno vrijeme kašnjenja koje je najbitniji element za određivanje razine usluge raskrižja duljina repa čekanja je također vrlo bitan pokazatelj trenutnog stanja anliziranog raskrižja. Kod nesemaforiziranih raskrižja rep čekanja određuje se na temelju Q_{95} [12].

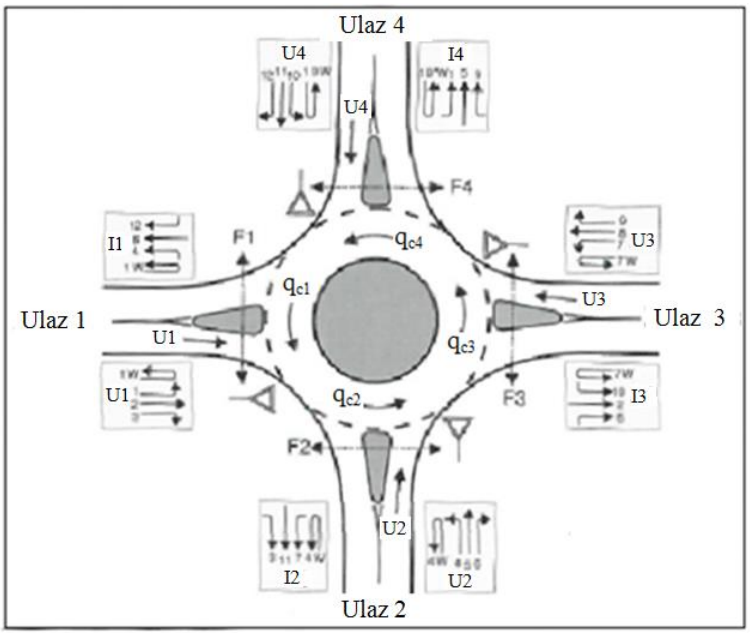
$$Q_{95} \approx \frac{c_{m,\,i}}{4} \cdot \left[\frac{q_i}{c_{m,i}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{q_i}{c_{m,i}} - 1 \right)^2 + \frac{24 \cdot q_i}{\left(c_{m,i}\right)^2}} \right] \tag{4.25.}$$

4.3. Metodologija proračuna prometnih parametara kružnih raskrižja prema HBS - u

Metodologija proračuna prometnih parametara kružnih raskrižja prema HBS –u temelji se na procjeni kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja. Ova metodologija primjenjuje se na različitim oblicima kružnih raskrižja u Njemačkoj [12].

4.3.1. Određivanje konfliktnih tokova

Kod kružnih raskrižja vozila koja se nalaze na ulazu u raskrižje moraju propustiti vozila koja se nalaze u kružnom traku raskrižja.



Slika 12. Pravilo odvijanja prometa unutar kružnog raskrižja u Njemačkoj, [12]

Kao što se vidi iz slike 12 svako kružno raskrižje sastoji se od kružnog traka, jednog ulaza i jednog izlaza. Kretanje prometnih tokova kroz kružno raskrižje može se prikazati OD matricom, koju je moguće prilagoditi ovisno o geometriji raskrižja [12].

od \ do	Izlaz 1	Izlaz 2	Izlaz 3	Izlaz 4
Ulaz 1	Tok 1W	Tok 3	Tok 2	Tok 1
Ulaz 2	Tok 4	Tok 4W	Tok 6	Tok 5
Ulaz 3	Tok 8	Tok 7	Tok 7W	Tok 9
Ulaz 4	Tok 12	Tok 11	Tok 10	Tok 10W

Slika 13. OD matrica kružnog raskrižja, [12]

Prilikom ulaska u raskrižje vozila su u konfliktu s vozilima koja se nalaze u kružnom traku raskrižja. Ti konfliktni tokovi izračunavaju se prema tablici. Prije samog izračuna konfliktnih tokova kružnih raskrižja potrebno je napomenuti kako su vrijednosti korištene u proračunu u PAJ jedinicama pa je stoga potrebno prilagoditi prometno opterećenje prema izrazu (4.11).

Tablica 11. Izrazi za određivanje konfliktnih tokova kružnog raskrižja

Privoz	Konfliktni tok	Prometni tokovi u konfliktu s tokom q_c (PAJ/h)
P1	$q_{cPAJ,\,1}$	$q_{PAJ,\,7} + q_{PAJ,\,10} + q_{PAJ,\,11} + q_{PAJ,\,4W} + q_{PAJ,\,7W} + q_{PAJ,\,10W} + 0.15 \cdot (q_{PAJ,\,4} + q_{PAJ,\,8} + q_{PAJ,\,12} + q_{PAJ,\,1W})$
P2	$q_{cPAJ,\,2}$	$q_{PAJ,\,1} + q_{PAJ,\,2} + q_{PAJ,\,10} + q_{PAJ,\,1W} + q_{PAJ,\,7W} + q_{PAJ,\,10W} + 0.15 \cdot (q_{PAJ,\,3} + q_{PAJ,\,7} + q_{PAJ,\,11} + q_{PAJ,\,4W})$
P3	$q_{cPAJ,\,3}$	$q_{PAJ,\,1} + q_{PAJ,\,4} + q_{PAJ,\,5} + q_{PAJ,\,1W} + q_{PAJ,\,4W} + q_{PAJ,\,10W} + 0.15 \cdot (q_{PAJ,\,2} + q_{PAJ,\,6} + q_{PAJ,\,10} + q_{PAJ,\,7W})$
P4	$q_{cPAJ,\,4}$	$q_{PAJ,\,4} + q_{PAJ,\,7} + q_{PAJ,\,8} + q_{PAJ,\,1W} + q_{PAJ,\,4W} + q_{PAJ,\,7W} + 0.15 \cdot (q_{PAJ,\,1} + q_{PAJ,\,5} + q_{PAJ,\,9} + q_{PAJ,\,10W})$

Izvor: [12]

Kod mini kružnih raskrižja uzima se 15 % od odlaznog prometa dok kod raskrižja kojima je vanjski promjer D > 26 m, taj dio formule se može zanemariti [12].

4.3.2. Proračun idealne propusne moći ulaznog dijela raskrižja

Kao što je slučaj kod nesemaforiziranih raskrižja prilikom izračuna propusne moći kružnih raskrižja potrebno je najprije odrediti idealnu propusnu moć. Kao ulazna vrijednost za izračun idealne propusne moći prema HBS – u koriste se prethodno izračunati konfliktni tokovi [12]. Budući da je propusna moć ulaza kružnih raskrižja određena parametrima kao što su broj prometnih trakova na kružnom dijelu raskrižja, broj prometnih trakova na ulaznom dijelu raskrižja i vanjskim promjerom tada će se idealna propusna moć moći izračunati iz izraza (4.26.) i (4.27.).

Idealna propuna moć ulaznog dijela mini kružnih raskrižja kojima vanjski promjer iznosi 13 m ≤ D ≤ 22 m i kružnih raskrižja s jednotračnim kružnim dijelom kojima vanjski promjer iznosi D ≤ 40 m ≥ D može se izračunati iz izraza:

$$c_{pPAJ,\,i} = \left(1 - \frac{t_{min} \cdot q_{c,\ PAJ}}{3600}\right) \cdot \frac{3600}{t_f} \cdot e^{-\frac{q_{c,\,PAJ}}{3600} \cdot \left(t_c - \frac{t_f}{2} - t_{min}\right)} \tag{4.26.}$$

gdje je:

$c_{pPAJ,\,i}$ – idealna propusna moć ulaznog dijela raskrižja (PAJ/h)

$q_{c,\,PAJ}$ – konfliktni tok ulaznog dijela raskrižja (PAJ/h)

t_c – kritična vremenska praznina (t_c = 4.7 s za mini kružna raskrižja ili t_c = 3.86 + 8.27/D za kružna raskrižja s jednotračnim kružnim dijelom)

t_f – vrijeme slijeđenja (t_f = 3.1 s za mini kružna raskrižja ili t_f = 2.84 + 2.07/D za kružna raskrižja s jednotračnim kružnim dijelom)

t_{min} – minimalno vrijeme između vozila u kružnom dijelu raskrižja (t_{min} = 2.5 s za mini kružna raskrižja ili t_{min} = 1.57 + 18.61/D za kružna raskrižja s jednotračnim kružnim dijelom)

Za kružna raskrižja s dvotračnim kružnim dijelom kojima vanjski promjer iznosi 40 m ≤ D ≤ 60 m idealna propusna moć može se izračunati iz izraza:

$$c_{pPAJ,\,i} = A \cdot e^{-\frac{q_{cPAJ}}{B}} \qquad (4.27.)$$

gdje je:

A, B – parametri ovisnosti broja prometnih trakova na privozu i kružnom dijelu raskrižja

Tablica 12. Bazne vrijednosti faktora A i B u ovisnosti o broju trakova privoza/kružnog dijela raskrižja:

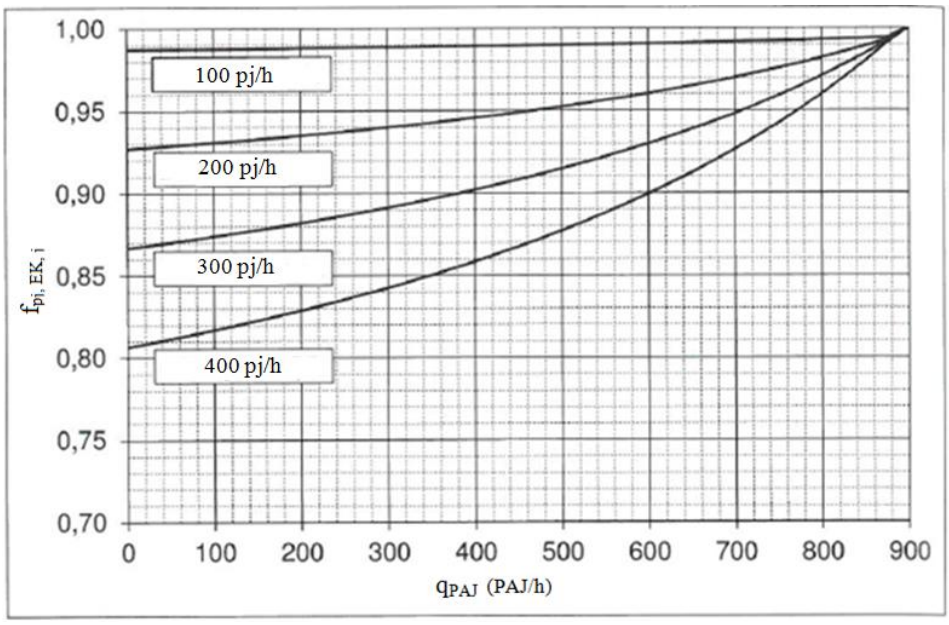
Broj trakova na privozu/kružnom dijelu	**A**	**B**
1/2	1440	1180
2/2	1642	1180

Izvor: [12]

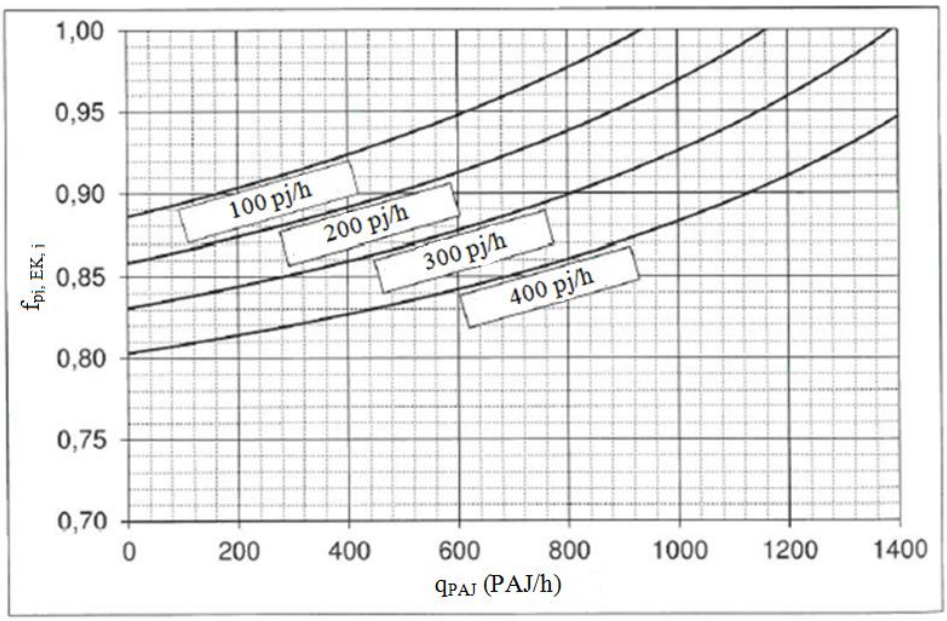
4.3.3. Izračun stvarne (realne) propusne moći ulaznog dijela raskrižja

Nakon izračuna idealne propusne moći potrebno je izračunati i stvarnu (realnu) propusnu moć ulaznog dijela raskrižja. Pješaci koji prelaze cestu na mjestu ulaska ili izlaska iz raskrižja bitno utječu na stvarnu propusnu moć. U slučajevima kada nije označen pješački prijelaz na određenom privozu raskrižja vozači nisu dužni propustiti pješake ali se ne isključuje mogućnost da će to učiniti. Iz tog razloga prilikom izračuna stvarne (realne) propusne moći prema izrazu (4.14.) faktor utjecaja pješaka potrebno je svaki put uzeti u obzir [12].

Vrijednost faktora utjecaja pješaka za raskrižja koja imaju jedan prometni trak na privozu mogu se uzeti iz grafikona na slici 14, s dva prometna traka na privozu iz grafikona na slici 15, a u slučajevima kada nema obilježenog pješačkog prijelaza uzima se vrijednost 1 [12].



Slika 14. Grafikon faktora utjecaja pješaka kada privoz raskrižja ima jedan prometni trak, [12]



Slika 15. Grafikon faktora utjecaja pješaka u slučaju kada privoz raskrižja ima dva prometna traka, [12]

4.3.4. Određivanje prosječnog vremena kašnjenja, duljine repa čekanja i razine usluge kružnog raskrižja.

Prema HBS metodologiji glavni kriterij za određivanje razine usluge kod kružnih raskrižja je vrijeme kašnjenja. Prosječno vrijeme kašnjenja kružnih raskrižja izračunava se iz izraza (4.24.), te koriste jednake vrijednosti kriterija za određivanje razine usluge raskrižja iz tablice 10. kao kod nesemaforiziranih raskrižja [12].

Duljina repa čekanja na kružnim raskrižjima određuje se prema izrazima (4.25.) i (4.28.) ovisno o prometnim uvjetima.

$$Q_{99} \approx \frac{c_{m,\,i}}{4} \cdot \left[\frac{q_i}{c_{m,i}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{q_i}{c_{m,i}} - 1 \right)^2 + \frac{36.8 \cdot q_i}{\left(c_{m,i}\right)^2}} \right] \tag{4.28.}$$

gdje je:

Q_{99} – 99 – ti percentil repa čekanja na kružnom raskrižju (vozila)

5. PREGLED OSTALIH METODA KOJE SE KORISTE ZA ANALIZU RASKRIŽJA

Osim navedenih metoda (HCM i HBS) diljem svijeta koriste se i mnoge druge metode za analizu raskrižja u razini. Ručni izračun kod većine tih metoda prilično je kompleksan pa su s tim u vezi u prometnoj praksi osmišljeni različiti mikrosimulacijski i mikroanalitički programski paketi kako bi se taj postupak pojednostavio i učinio preciznijim. Jedan takav programski paket je i SIDRA INTERSECTION koji osim HCM modela sadrži i mnoge druge modele za analizu raskrižja primjenjive u različitim dijelovima svijeta.

5.1. Općenito o SIDRA INTERSECTION programskom paketu

Originalna verzija SIDRA INTERSECTION alata nastala je u periodu između 1975. – 1979. godine od strane australskog prometnog stručnjaka dr. Rahmi Akçelika. Danas se ovaj programski paket izdaje od strane Akçelik & Associates Pty. Ltd. te predstavlja jedan od najmoćnijih alata za analizu različitih tipova raskrižja.

SIDRA INTERSECTION je napredni mikroanalitički računalni alat namjenjen za analizu alternativnih oblika raskrižja u pogledu propusne moći, razine usluge i ostalih prometnih parametara kao što su vrijeme kašnjenja, duljina repa čekanja, kretanje i zaustavljanje vozila i pješaka na raskrižju i slično. Osim navedenog ovaj alat ima mogućnosti analize raskrižja u pogledu potrošnje goriva, zagađenja okoliša ili troškova putovanja. Ovaj program razvio se kao odgovor na sva istraživanja prometnih stručnjaka Australije i SAD – a kao i cijeloga svijeta. Koristi se u projektiranju novih ali i postojećih semaforiziranih raskrižja, signaliziranih pješačkih prijelaza, kružnih raskrižja, signaliziranih kružnih raskrižja, nesemaforiziranih raskrižja svih tipova kontrole prometa i slično.

Razvojem prometnih sustava upotreba ovog alata ubrzano raste. Korištenje ovog programskog paketa koristi ukupno 1350 organizacija koje posjeduju više od 8500 licenci u 69 zemalja kao što su Australija, SAD, Južna Afrika, Kanada, Novi Zeland, Malezija, Singapur, Arapski poluotok i Europa [13].

5.2. Pregled različitih modela za proračun prometnih parametara raskrižja u razini implementiranih u programskom paketu SIDRA INTERSECTION.

Programski paket SIDRA INTERSECTION za analizu prometnih parametara raskrižja kao što su propusna moć, razina usluge, vrijeme čekanja, duljina repa čekanja i slično koristi različite modele nastale prema istraživanjima prometne struke primjenjivim u svim djelovima svijeta. Tako primjerice HCM model koristi metodologiju Highway Capacity Manuala primjenjivu za prometne uvjete koji vrijede u SAD – u, dok se australski i novozelandski model zasnivaju na metodologiji Austroads priručnika. Bitno je napomenuti kako je prilikom korištenja ovog alata svaki model moguće prilagoditi lokalnim uvjetima [13].

SIDRA INTERSECTION programski paket sadrži sljedeće modele za analizu raskrižja:
Standard left model - koristi standardna pravila (left hand) za vožnju u uvjetima kada se pločnik nalazi sa lijeve strane od oka vozača u smjeru kretanja vozila. Ovaj model karakterističan je za Australiju i za zemlje gdje vrijede ista pravila vožnje.
Standard right model – koristi standardna pravila (right hand) za vožnju u uvjetima kada se pločnik nalazi sa desne strane od oka vozača u smjeru kretanja vozila. Ovaj model karakterističan je za Europu (osim Velike Britanije) i većinu zemalja svijeta
New Zealand model – koristi pravila vožnje karakteristična za Novi Zeland. Ne razlikuje se previše od „standard left“ modela osim u korištenju metodologije za izračun parametara troškova i brzine putovanja.
New South Wales model – koristi pravila vožnje jednaka kao i u ostalim djelovima Australije. Jedina razlika sa „standard left“ modelom je u kriteriju za određivanje razine usluge raskrižja.
US HCM (metrički) i US HCM (američki sustav jedinica) – koriste jednaku metodologiju ali se razlikuju u sustavu jedinica koji koriste [13].

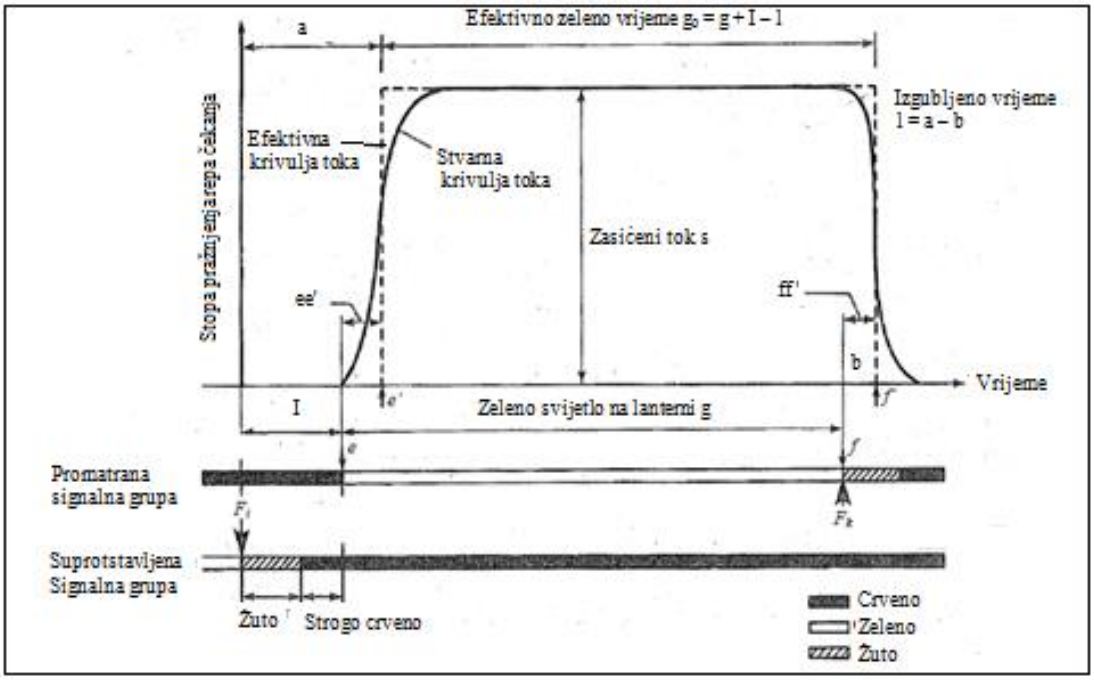
Metodologija koju koriste NSW i New Zealand modeli temelji se na smjernicama Austroads priručnika kao i drugih lokalnih dokumenata izdanih od strane Association of Australian State, Territory of Federal Road and Transport Australies [13].

5.3. Australski i novozelandski SIDRA INTERSECTION model za analizu semaforiziranih raskrižja

Signalni plan bazni je mehanizam kontrole prema kojem je određena efikasnost i sigurnost semaforiziranih raskrižja. Australski i novozelandski SIDRA INTERSECTION model za određivanje signalnog plana koristi model koji se temelji na Akçelikovom istraživanju iz 1981. godine (Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis)

Postojeća metoda uvodi nekoliko promjena u odnosu na tradicionalne tehnike, a osnovna promjena je iz fazno povezane metode u smjerno povezanu metodu. Važan aspekt ove izmjene je korištenje u proračunu smjernog izgubljenog vremena umjesto faznog izgubljenog vremena do definicije izgubljenog vremena u raskrižju kao suma kritičnih smjernih izgubljenih vremena umjesto sume kritičnih faznih izgubljenih vremena.

Na slici 16 prikazan je tradicionalni model koji predstavlja međuovisnost glavnih karaktersitika kretanja kao što su zasićeni tok, efektivno zeleno vrijeme i izgubljeno vrijeme u odnosu odgovarajućeg signalnog plana koji je unaprijed dogovoren. Ovaj model pretpostavlja da kada se signal pretvori u zeleno prometni tok iza zaustavne linije naglo prelazi u zasićeni tok sve dok se ne rasčisti rep čekanja ili dok se signalni pojam na semaforu ne promjeni u crveno. U ovom slučaju zasićeni tok pretstavlja maksimalnu stopu vozila koja napuštaju raskrižje u trenutku kada postoji rep čekanja [14].



Slika 16. Tradicionalni Akçelikov model za određivanje signalnog plana raskrižja, [15]

Kao što je naznačeno isprekidanom linijom, tradicionalni model zamjenjuje stvarna krivulja napuštanja raskrižja u obliku pravokutnika jednake površine, gdje visina pravokutnika predstavlja zasićeni tok, a njegova širina predstavlja efektivno zeleno vrijeme.
Vrijeme između početka trajanja prikazanog zelenog svjetla i početka trajanja efektivnog zelenog svjetla (ee') smatra se izgubljenim vremenom na početku paljenja zelenog svjetla. Slično tome vrijeme između završetka prikazanog zelenog svjetla i efektivnog zelenog svjetla (ff ') smatra se dodatnim vremenom kada vozila još mogu proći raskrižjem [14]. Prema tome efektivno zeleno vrijeme može se izračunati iz izraza:

$$g_e = g + ff' - ee' \tag{5.1.}$$

gdje je:
ff ' – razlika između završetka zelenog svjetla i završetka efektivnog zelenog svjetla (s)
ee' – razlika između početka zelenog svjetla i početka efektivnog zelenog svjetla (s)

Početak i kraj efektivnog zelenog svjetla za određeni smjer kretanja najbolje se može prikazati vremenom izmjena faza. Prema tome početno vrijeme pražnjenja repa čekanja definirano je kao suma međuvremena između zelenog svjetla i izgubljenog vremena na početku paljenja zelenog svijetla, a završno vrijeme pražnjenja repa čekanja definirano jednako kao razlika između završetka zelenog svjetla i završetka efektivnog zelenog svjetla [14]. Prema tome smjerno izgubljeno vrijeme može se izračunati iz izraza:

$$l = a - b \tag{5.2.}$$

gdje je:
a – početno vrijeme pražnjenja repa čekanja (a = I + ee') (s)
b – završno vrijeme pražnjenja repa čekanja (b = ff ') (s)
I – međuvrijeme između zelenog svjetla (s)

Izračun propusne moći i ostalih prometnih parametara semaforiziranih raskrižja u programskom paketu SIDRA INTERSECTION temelji se na već postojećim smjernicama HCM – a i Austroads priručnika. Izraz za izračun propusne moći (3.4.) prvenstveno ovisi o vrijednosti zasićenog toka, trajanju efektivnog zelenog svjetla i trajanju ciklusa određene grupe trakova. Svaka od ovih vrijednosti ovisi o nizu drugih parametara i geometrijskih karakteristika raskrižja koje direktno utječu na izračun kapaciteta. Prema tome SIDRA INTERSECTION programski paket sadrži bazne vrijednosti zasićenog toka (1950 voz/h), faktora vršnog sata (0.95) i ostalih bitnih parametara za izračun propusne moći primjenom New South Wales i New Zealand modela.

5.4. Australski i novozelandski SIDRA INTERSECTION model za analizu nesemaforiziranih raskrižja

Metodologija proračuna prometnih parametara prema australskom i novozelandskom modelu implementiranom u SIDRA INTERSECTION programskom paketu temelji se na smjernicama i izrazima HCM – a i Austroads priručnika.

Kod nesemaforiziranih raskrižja u Australiji i Novom Zelandu pravila vožnje temelje se na „standard left“ modelu. Budući da je kretanje vozila prema ovom modelu obrnuto od kretanja vozila u europskim uvjetima to će dovesti do određenih razlika u određivanju prioritetnih prometnih tokova u raskrižju, a samim time i razlika u daljnjem proračunu. Primjerice za „standard right“ model koji se koristi u Europi lijeva skretanja predstavljaju najzahtjevniji manevar u raskrižju i zbog toga imaju niži prioritet prolaska dok u „standard left“ modelu tu ulogu preuzimaju desna skretanja [16].

Za nesemaforizirana raskrižja važno je napomenuti i to da je prilikom korištenja novozelandskog modela u SIDRA INTERSECTION programskom paketu moguće uključiti ili isključiti novozelandsko pravilo (eng. New Zealand rule). Prema ovom pravilu vozila koja skreću lijevo daju prednost vozilima koja skreću desno. Ovo pravilo na Novom Zelandu prestalo je važiti 2012. godine te se promet na nesemaforiziranim raskrižjima odvija prema pravilima „standard left“ modela [13].

Osnova za izračunavanje propusne moći nesemaforiziranih raskrižja prema New South Wales metodologiji i novozelandskoj metodologiji kao i u većini metodologija su kritična vremenska praznina i vrijeme slijeđenja [17].

Nova metoda za izračun ovih parametara implementirana u SIDRA INTERSECTION programskom paketu definira kritičnu vremensku prazninu i vrijeme slijeđenja kao funciju geometrije raskrižja, njegove kontrole i uvjeta prometnog toka [18]. Izračun ovih parametara zasniva se na metodologiji HCM – a dok se njihove bazne vrijednosti razlikuju ovisno o korištenom modelu kako je prikazano u tablici 13.

Tablica 13. Bazne vrijednosti kritične vremenske praznine i vremena slijeđenja SIDRA STANDARD modela i HCM modela za dvotračnu glavnu cestu

Manevar	SIDRA STANDARD		HCM	
	$t_{c,\ base}$	$t_{f,\ base}$	$t_{c,\ base}$	$t_{f,\ base}$
Lijevo skretanje sa sporedne ceste	4.5	2.5	6.2	3.3
Ravno na sporednoj cesti	5.0	3.0	6.5	4.0
Desno skretanje sa sporedne ceste	5.5	3.5	7.1	3.5
Desno skretanje sa glavne ceste	4.0	2.0	4.1	2.2

Izvor: [17]

SIDRA STANDARD model odnosi se na uvjete Australije i Novog Zelanda dok se HCM model odnosi na uvjete u SAD – u. Bazne vrijednosti kritičnih vremenskih praznina za ova dva modela unutar SIDRA INTERSECTION programskog paketa za slučaj kada se na glavnoj cesti nalazi četiri prometna traka prikazane su u tablici 14.

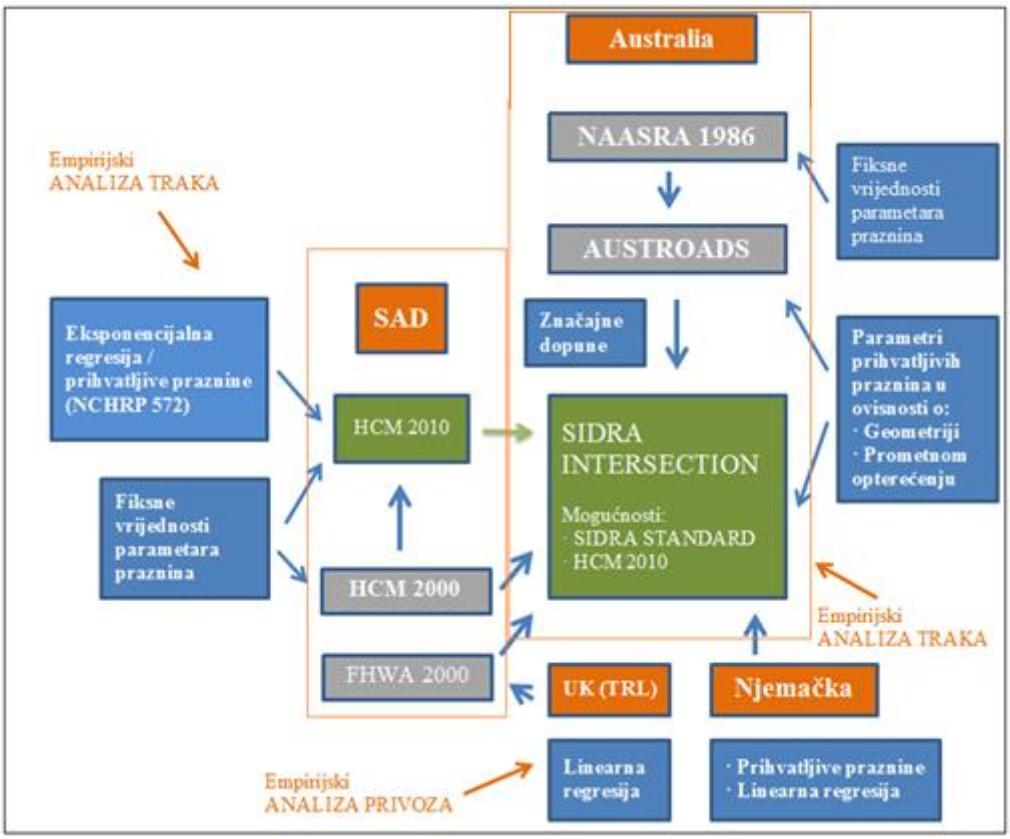
Tablica 14. Bazne vrijednosti kritične vremenske praznine i vremena slijeđenja SIDRA STANDARD modela i HCM modela za četverotračnu glavnu cestu

Manevar	SIDRA STANDARD		HCM	
	$t_{c,\ base}$	$t_{f,\ base}$	$t_{c,\ base}$	$t_{f,\ base}$
Lijevo skretanje sa sporedne ceste	5.0	3.0	7.5	3.5
Ravno na sporednoj cesti	6.5	3.5	6.5	4.0
Desno skretanje sa sporedne ceste	7.0	4.0	6.9	3.3
Desno skretanje sa glavne ceste	4.5	2.5	4.1	2.2

Izvor: [17]

5.5. Australski i novozelandski SIDRA INTERSECTION model za analizu kružnih raskrižja

U Australiji i Novom Zelandu kružna raskrižja zastupljenija su nego u ostalim dijelovima svijeta, a izračun njihove propusne moći i ostalih prometnih parametara temelji se na izračunu kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja [16].



Slika 17. Prikaz različitih modela za izračun prometnih parametara kružnih raskrižja, [13]

Iz slike 17 može se vidjeti kako se australski i novozelandski model za analizu kružnih raskrižja implementirani u SIDRA INTERSECTION programskom paketu zasnivaju na dugogodišnjim smjernicama NAASRA (eng. National Association of Australian State Road Authorities) i Austroads priručnika. NAASRA priručnik sadrži fiksne vrijednosti parametara praznina, dok prema Austroads priručniku te vrijednosti ovise o geometriji raskrižja i prometnom opterećenju [19].

Prema australskoj i novozelandskoj metodi propusna moć raskrižja računa se za svaki prometni trak posebno. Ovom metodom pojednostavljuje se analiza i povećava točnost u

pogledu rezultata propusne moći, te omogućuje modeliranje nejednakog korištenja prometnih trakova u ulaznom i kružnom dijelu raskrižja [19].

Najbitniji geometrijski elemti na temelju kojih se određuju kritična vremenska praznina i vrijeme slijeđenja, a samim time i propusna moć raskrižja su ulazni polumjer, ulazni kut, vanjski promjer i proširenje na ulazu. Faktori utjecaja ulaznog kuta i ulaznog polumjera za svaki privoz raskrižja mogu se izračunati iz izraza 5.3. i 5.4.

$$f_r = 0.95 + \frac{1}{r_e} \tag{5.3.}$$

$$f_a = 0.94 + \frac{0.00026}{\phi_e^{1.6}} \tag{5.4.}$$

gdje je:

f_r – faktor utjecaja ulaznog polumjera

f_a – faktor utjecaja ulaznog kuta

r_e – ulazni polumjer (m)

ϕ_e – ulazni kut (˚)

SIDRA STANDARD model korišten za uvjete u Australiji i Novom Zelandu sadrži bazne vrijednosti ulaznog polumjera i ulaznog kuta koje su prikazane u tablici 15.

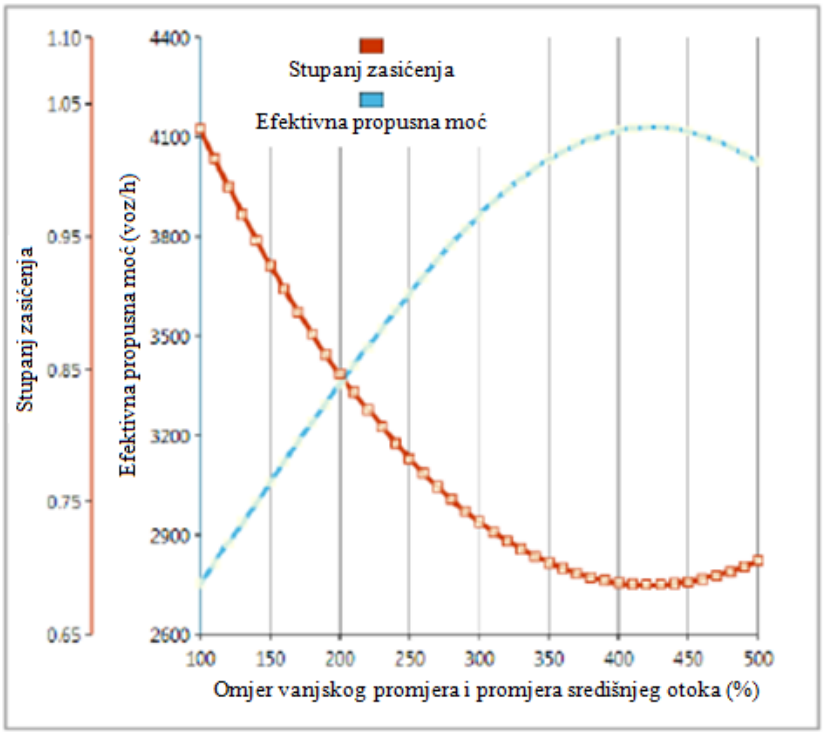
Tablica 15. Bazne vrijednosti za ulazni polumjer i ulazni kut u SIDRA STANDARD modelu

r_e (m)	ϕ_e (˚)	SIDRA STANDARD
5	70	1.35
10	60	1.18
20	45	1.05
30	35	1.00
40	30	0.98
60	15	0.93
80	5	0.91
100	0	0.90

Izvor: [19]

Veće vrijednosti ulaznog polumjera i manje vrijednosti ulaznog kuta daju manje vrijednosti kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja, a samim time i veće vrijednosti propusne moći. S druge strane manje vrijednosti ulaznog polumjera i veće vrijednosti ulaznog kuta imaju suprotan efekt [19].

Utjecaj vanjskog promjera na propusnu moć kružnog raskrižja razlikuje se kod svakog modela implementiranog u SIDRA INTERSECTION programskom paketu. U većini slučajeva modeli ukazuju na to da će se povećanjem vanjskog promjera povećati i propusna moć raskrižja. Međutim, u Australiji i Novom Zelandu gdje se zbog velikog stupnja motorizacije grade velika kružna raskrižja (maksimalna veličina vanjskog promjera 220 m) u iznimnim slučajevima može doći do suprotnog efekta [19].



Slika 18. Efektivna propusna moć raskrižja i kritični stupanj zasićenja kao funkcija vanjskog promjera izračunati pomoću SIDRA STANDARD modela, [19]

Iz slike 18 se može vidjeti kako s većim vanjskim promjerom kružnog raskrižja dolazi do povećanja efektivne propusne moći i smanjenja kritičnog stupnja zasićenja. Vidljivo je i to da tijek krivulje efektivne propusne moći postepeno pada, a tijek krivulje kritičnog stupnja zasićenja postepeno raste za slučajeve prilično velikih vanjskih promjera (u ovom primjeru 138 m) [19].

Proširenja na ulazu u raskrižje predstavljaju dodatnu širinu trake koju koriste vozila prilikom čekanja na ulazak u raskrižje. Njihova efektivnost ovisi o uvjetima prometnog toka i ne moraju nužno povećati propusnu moć ulaza u raskrižje ili smanjiti njegov stupanj zasićenja [19].

5.6. Kriterij za određivanje razine usluge raskrižja u razini prema australskom i novozelandskom SIDRA INTERSECTION modelu

Kriterij za određivanje razine usluge semaforiziranih i nesemaforiziranih raskrižja kod australskog i novozelandskog modela usvaja se iz HCM i Austroads priručnika, dok je kriterij za određivanje razine usluge kružnih raskrižja posebno određen unutar modela.

New South Wales metoda je znatno je tolerantnija u odnosu na ostale metode određivanja razine usluge raskrižja, te za sve tipove raskrižja u razini ima jednak kriterij. U tablici 16 prikazane su granične vrijednosti prosječnog vremena kašnjenja korištene u NSW i SIDRA STANDARD (Australija i Novi Zeland) metodologiji uspoređene sa graničnim vrijednostima korištenim u drugim metodologijama. [13].

Tablica 16. Kriterij za određivanje razine usluge prema SIDRA STANDARD i NSW metodologiji u usporedbi sa kriterijem za određivanje razine usluge prema HCM i HBS metodologiji

Razina usluge	NSW	HCM i SIDRA STANDARD			HBS	
		1	2	3	1	2 i 3
A	≤ 14.5	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 20	≤ 10
B	≤ 28.5	≤ 20	≤ 20	≤ 15	≤ 35	≤ 20
C	≤ 42.5	≤ 35	≤ 35	≤ 25	≤ 50	≤ 30
D	≤ 56.5	≤ 55	≤ 50	≤ 35	≤ 70	≤ 45
E	≤ 70.5	≤ 80	≤ 70	≤ 50	> 70	> 45
F	> 70.5	> 80	> 70	> 50	-	-

1 – semaforizirana raskrižja

2 – kružna raskrižja

3 – nesemaforizirana raskrižja

Izvor: [13]

6. USPOREDBA ANALIZIRANIH METODA NA PRIMJERU RASKRIŽJA (SEMAFORIZIRANO, NESEMAFORIZIRANO, KRUŽNO RASKRIŽJE)

Kako bi se moglo odrediti koja od metoda za proračun prometnih parametara raskrižja analiziranih u ovom radu je najprihvatljivija za primjenu u Republici Hrvatskoj izvršit će se međusobna usporedba njihovih rezultata. Ta usporedba izvršit će se za tri različita tipa raskrižja (semaforizirano, nesemaforizirano i kružno) u gradu Zagrebu. Proračun prometnih parametara prema HCM, New South Wales i New Zealand metodologiji izvršit će se primjenom SIDRA INTERSECTION programskog paketa dok će se proračun prema HBS metodologiji izvršiti ručno. Kao osnovni ulazni podatci prilikom korištenja navedenih metodologija koristit će se ručno prikupljeni podatci o prometnom opterećenju, signalnom planu i podatci o geometriji raskrižja.

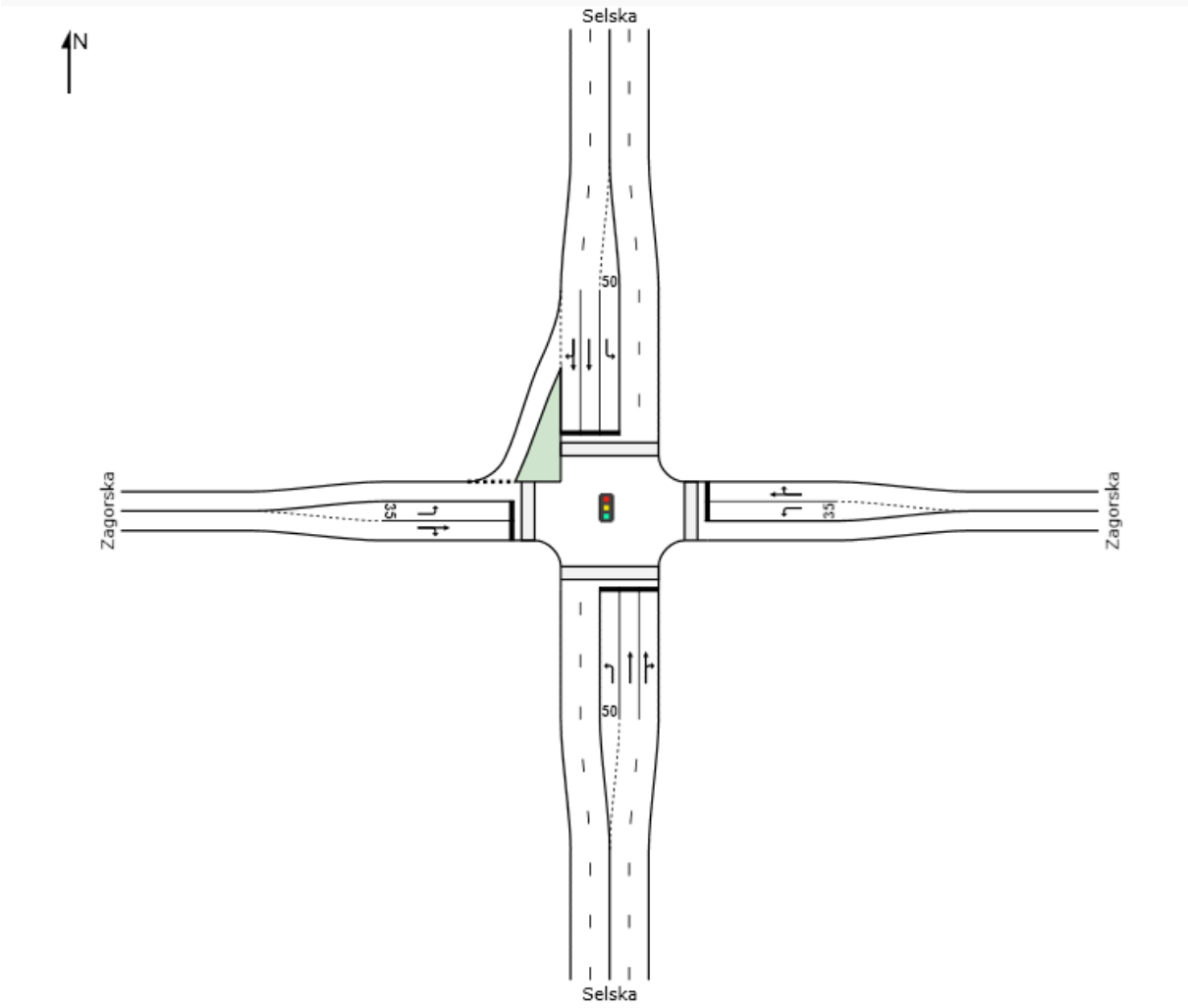
6.1. Usporedba analiziranih metoda na primjeru semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska)

Raskrižje Selska – Zagorska nalazi se na sjevernom dijelu gradske četvrti Trešnjevka – sjever. Glavna prometnica raskrižja je Selska cesta koja se proteže od raskrižja sa Savskom cestom na jugu do raskrižja s Ilicom na sjeveru. Sporedna prometnica ovog raskrižja je Zagorska ulica koja se proteže od raskrižja s Fallerovim šetalištem na zapadu do raskrižja s Magazinskom i Vodovodnom ulicom na istoku. Promet na raskrižju je reguliran prometnim svjetlima (semaforima) uz znatnija zagušenja i repove čekanja u periodu jutarnjeg i popodnevnog vršnog sata.

6.1.1. Prikupljanje ulaznih podataka semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska)

Raskrižje Selska – Zagorska klasični je tip četverokrakog semaforiziranog raskrižja. Glavni privozi raskrižja (Selska cesta) sastoje se od tri ulazna prometna traka (zajednički prometni trak za ravno i desno, prometni trak za ravno i prometni trak za lijevo) i dva izlazna prometna traka širine 3 m. Radi veće sigurnosti pješaka trak za desno skretanje sa sjevernog glavnog privoza odvojen je trokutastim otokom. Sporedni privozi raskrižja sastoje se od dva ulazna

prometna traka (zajednički prometni trak za ravno i desno i prometni trak za lijevo) i jednog izlaznog prometnog traka širine 3 m. Pješački prijelazi širine su 5 m, te su označeni na svakom privozu raskrižja i odmaknuti su 1 m od zaustavne linije.



Slika 19. Geometrijski prikaz semaforiziranog raskrižja Selska – Zagorska unutar SIDRA INTERSECTION programskog paketa.

Geometrija raskrižja prikazana na slici 19. koristi se za proračun prometnih parametara semaforiziranih raskrižja primjenom HCM modela implementiranog u SIDRA INTERSECTION programskom paketu. Prikazani geometrijski elementi koristit će se i prilikom ručnog izračuna prema HBS – metodologiji. Bitno je napomenuti kako je geometriju raskrižja moguće prilagoditi uvjetima korištenog modela kao što je slučaj kod New South Wales i novozelandske metodologije gdje se koristi „standard left“ model.

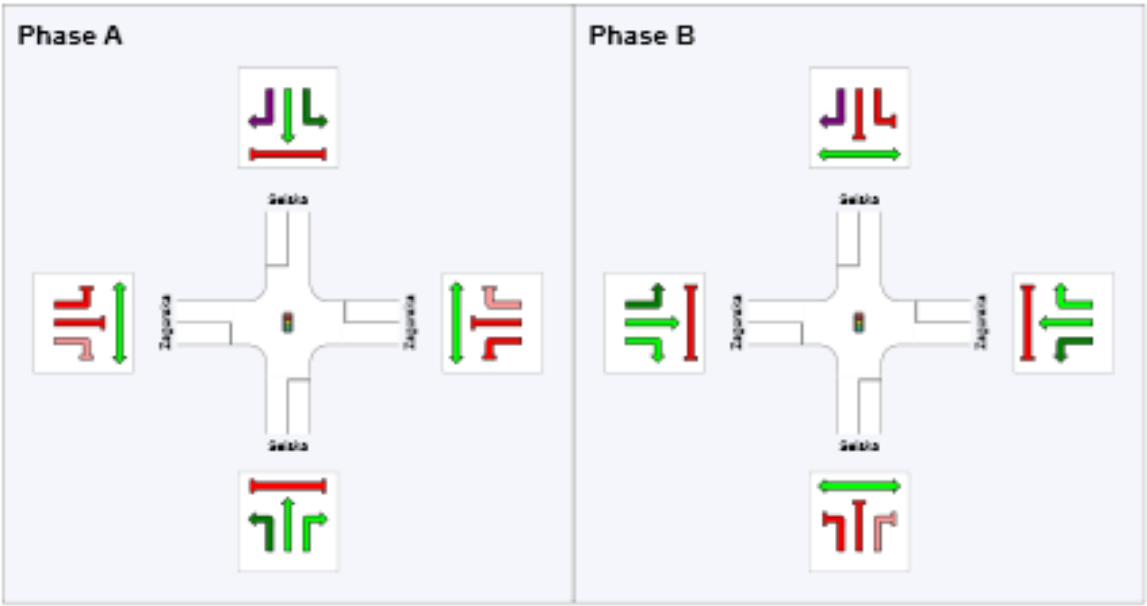
Promet vozila i pješaka na raskrižju reguliran je prometnim svjetlima (semaforima) s pripadajućim signalnim planom prikazanim u tablici 17.

Tablica 17. Signalni plan semaforiziranog raskrižja Selska – Zagorska

Faza	A	B
Vrijeme trajanja ciklusa (s)	80	
Vrijeme trajanja faze (s)	42	38
Zeleno vrijeme (s)	27	23
Žuto vrijeme (s)	3	3
Strogo crveno (all red) vrijeme*	12	12

*Strogo crveno („all red time“) koristi se kod definiranja signalnog plana prilikom korištenja SIDRA INTERSECTION programskog paketa, a podrazumjeva vrijeme kada niti jednoj fazi nije dozvoljeno kretanje (u ovom primjeru predstavlja zbroj crveno/žutog vremena u trajanju od 2 sekunde i vremena kada je za obje faze upaljeno crveno svjetlo).

Osim definiranja signalnog plana potrebno je definirati kretanja unutar svake faze kako je prikazano na slici 20:



Slika 20. Način definiranja kretanja unutar svake faze korištenjem SIDRA INTERSECTION programskog paketa

Na slici 20 vidljivo je kako će u fazi A biti dozvoljeno kretanje svih vozila na glavnoj cesti (Selska cesta) i pješaka koji prelaze cestu na sporednim privozima. U fazi B bit će dozvoljeno kretanje svih vozila na sporednoj cesti (Zagorska) i pješaka koji prelaze cestu na glavnim privozima. U trenutku trajanja faze A raskrižjem je zabranjeno kretanje vozila i pješaka iz faze B i obrnuto.

Najvažniji ulazni podatak potreban za proračun prometnih parametara raskrižja je prometno opterećenje. Brojanje prometa izvedeno je ručno i unutar vršnog sata, a prikupljene vrijednosti prometnog opterećenja za svaki manevar prikazane su u tablici.

Tablica 18. Podatci o brojanju prometa sa semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska)

Prometno opterećenje (voz/h)			
Privoz Selska sjever			
Kategorija vozila	Lijevo	Ravno	Desno
Ukupno vozila	93	576	124
Teška vozila	3	16	5
Laka vozila	90	560	119
Pješaci	63		
Privoz Zagorska istok			
Kategorija vozila	Lijevo	Ravno	Desno
Ukupno vozila	149	203	60
Teška vozila	4	7	4
Laka vozila	145	196	56
Pješaci	38		
Privoz Zagorska zapad			
Kategorija vozila	Lijevo	Ravno	Desno
Ukupno vozila	75	164	70
Teška vozila	3	7	3
Laka vozila	72	157	67
Pješaci	56		
Privoz Selska jug			
Kategorija vozila	Lijevo	Ravno	Desno
Ukupno vozila	172	708	195
Teška vozila	4	10	6
Laka vozila	168	698	189
Pješaci	50		

6.1.2. Izlazni podatci dobiveni korištenjem različitih metodologija za proračun prometnih parametara semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska)

Prometni parametri izračunati su primjenom HCM, HBS, New South Wales i New Zealand metodologije, a njihove vrijednosti prikazane su u tablicama 19., 20, 21 i 22.

Tablica 19. Vrijednosti prometnih parametara semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska) izračunate prema HCM metodologiji.

Prometni trak	Propusna moć (voz/h)	Stupanj zasićenja	Rep čekanja (voz)	Vrijeme kašnjenja (s/voz)	Razina usluge
Privoz Selska sjever					
Lijevo	100	1.006	6.4	129.4	F
Ravno	544	0.748	15.7	28.2	C
Ravno/desno	474	0.748	13.4	42.8	D
Privoz Zagorska istok					
Lijevo	245	0.660	6.6	36.7	D
Ravno/desno	496	0.576	9.7	24.3	C
Privoz Zagorska zapad					
Lijevo	214	0.380	3.0	30.7	C
Ravno/desno	496	0.513	8.0	22.1	C
Privoz Selska jug					
Lijevo	172	1.085	12.9	127.5	F
Ravno	489	0.908	20.3	43.9	D
Ravno/desno	592	0.908	24.7	40.8	D

Tablica 20. Vrijednosti prometnih parametara semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska) izračunate prema HBS metodologiji.

Prometni trak	Propusna moć (voz/h)	Stupanj zasićenja	Rep čekanja (voz)	Vrijeme kašnjenja (s/voz)	Razina usluge
Privoz Selska sjever					
Lijevo	143	0.649	1.7	66.1	D
Ravno	681	0.845	5.7	54.4	D
Ravno/desno	681	1.027	30.8	189.2	F
Privoz Zagorska istok					
Lijevo	212	0.702	1.5	51.1	D
Ravno/desno	573	0.458	0.4	25.8	B
Privoz Zagorska zapad					
Lijevo	202	0.371	0.3	28.9	B
Ravno/desno	574	0.407	0.4	25.1	B
Privoz Selska jug					
Lijevo	171	1.005	8.2	199.5	F
Ravno	689	1.026	17.5	117.7	F
Ravno/desno	688	1.312	85.8	480.4	F

Tablica 21. Vrijednosti prometnih parametara semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska) izračunate prema NSW metodologiji

Prometni trak	Propusna moć (voz/h)	Stupanj zasićenja	Rep čekanja (voz)	Vrijeme kašnjenja (s/voz)	Razina usluge
Privoz Selska sjever					
Ravno/lijevo	500	0.681	11.5	29.8	C
Ravno	533	0.681	11.9	24.1	B
Desno	119	1.099	11.5	155.5	F
Privoz Zagorska istok					
Ravno/lijevo	479	0.774	14.1	33.4	C
Desno	231	0.274	2.2	37.9	C
Privoz Zagorska zapad					
Ravno/lijevo	529	0.496	8.7	27.6	B
Desno	162	0.456	2.9	44.0	D
Privoz Selska jug					
Ravno/lijevo	629	0.823	21.0	33.6	C
Ravno	496	0.823	15.7	30.8	C
Desno	159	1.228	28.7	320.0	F

Tablica 22. Vrijednosti prometnih parametara semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska) izračunate prema New Zealand metodologiji

Prometni trak	Propusna moć (voz/h)	Stupanj zasićenja	Rep čekanja (voz)	Vrijeme kašnjenja (s/voz)	Razina usluge
Privoz Selska sjever					
Ravno/lijevo	500	0.681	11.5	29.5	C
Ravno	533	0.681	11.9	24.1	C
Desno	119	1.099	11.5	154.6	F
Privoz Zagorska istok					
Ravno/lijevo	480	0.772	14.1	32.9	C
Desno	238	0.226	2.2	36.8	D
Privoz Zagorska zapad					
Ravno/lijevo	529	0.476	8.3	27.2	C
Desno	162	0.456	2.9	43.0	D
Privoz Selska jug					
Ravno/lijevo	629	0.823	21.0	33.2	C
Ravno	496	0.823	15.7	30.8	C
Desno	159	1.288	28.7	319.1	F

Usporedbom izlaznih vrijednosti prikazanih u tablicama 19, 20, 21 i 22 može se primjetiti kako nema većih odstupanja u vrijednostima propusne moći. Razlog tome je korištenje jednakog modela za njezin proračun u svim navedenim metodologijama. Mala odstupanja javljaju se zbog korištenja različitih parametara koji utječu na izračun propusne moći semaforiziranog raskrižja kao što su zasićeni tok, faktor vršnog sata, faktor prilagodbe za teška vozila i slično. Budući da se u sve četiri analizirane metodologije koristi jednako prometno opterećenje kao ulazni parametar čak i mala odstupanja u vrijednostima propusne moći mogu dovesti do različitosti u proračunu ostalih parametara. Usporedbom rezultata New South Wales i New Zealand metodologije (tablice 21 i 22) može se primjetiti kako u njima

gotovo nema razlike iz razloga što koriste zajedničke smjernice za izračun i namjenjene su jednakim uvjetima. Jedina razlika između New South Wales i New Zealand metodologije očituje se u određivanju razine usluge gdje New South Wales metoda ima blaži kriterij.

Kako bi se pobliže objasnilo koja od navedenih metodologija je prihvatljivija za prometne uvjete u Republici Hrvatskoj vrijednosti prosječnog vremena kašnjenja dobivene izračunom prema HCM i HBS metodologiji usporedit će se sa vrijednostima prosječnog vremena kašnjenja dobivenih terenskim istraživanjem. Vrijednosti dobivene izračunom prema New South Wales i New Zealand metodologiji izostavljene su iz ove usporedbe iz razloga što koriste „standard left“ model koji nije primjenjiv u Republici Hrvatskoj.

Tablica 23. Usporedba vrijednosti vremena kašnjenja na semaforiziranom raskrižju izračunatih prema HCM i HBS metodologiji i vrijednosti prikupljenih terenskim istraživanjem

Prosječno vrijeme kašnjenja (s/voz)			
Prometni trak	HCM	HBS	Izmjerene vrijednosti
Privoz Selska sjever			
Lijevo	**129.4**	66.1	103.8
Ravno	**28.2**	54.4	21.5
Ravno/desno	**42.8**	189.2	30.8
Privoz Zagorska istok			
Lijevo	**36.7**	51.1	36.6
Ravno/desno	24.3	**25.8**	34.9
Privoz Zagorska zapad			
Lijevo	**30.7**	28.9	31.4
Ravno/desno	22.1	**25.1**	30.9
Privoz Selska jug			
Lijevo	127.5	**199.5**	166.2
Ravno	**43.9**	117.7	38.1
Ravno/desno	**40.8**	480.4	46.9

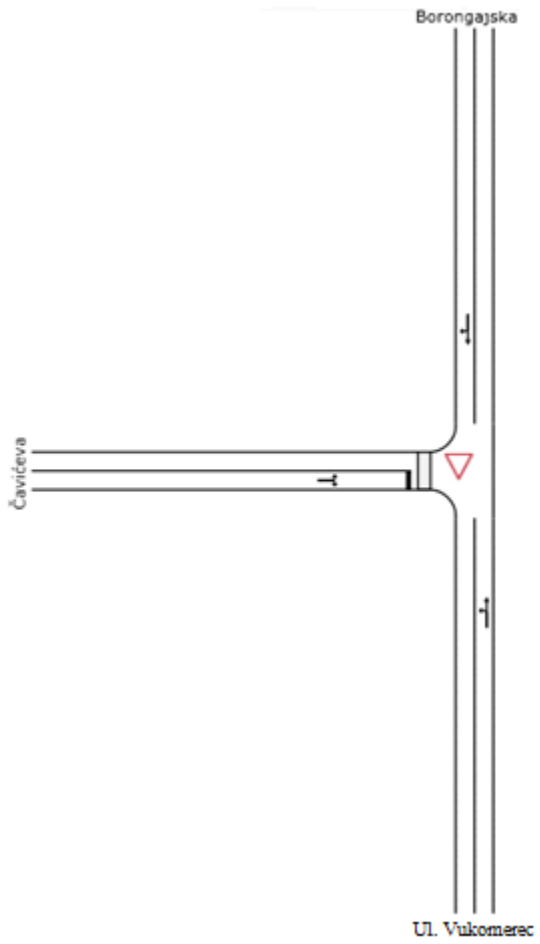
Iz tablice 23 može se vidjeti kako su odstupanja vremena kašnjenja izračunatih prema HCM metodologiji znatno manja nego što je slučaj kod HBS metodologije, te se može zaključiti kako je HCM metodologija prihvatljivija za proračun prometnih parametara semaforiziranih raskrižja u Republici Hrvatskoj.

6.2. Usporedba analiziranih metoda na primjeru nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec)

Raskrižje Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec nalazi se na istočnom dijelu grada Zagreba u neposrednoj blizini znanstveno sveučilišnog kampusa Borongaj. Glavna prometnica raskrižja je Borongajska cesta - Ul. Vukomerec koja se proteže od raskrižja sa Ul. Donje Svetice do raskrižja s Prodanskom ulicom i Ul. Siniše Glavaševića. Sporedna prometnica ovog raskrižja je Ul. Marijana Čavića koja se proteže od raskrižja sa Slavonskom avenijom do raskrižja sa Borongajskom cestom i Ul. Vukomerec. Glavna prometnica raskrižja ima uvjete ravnomjernog prometnog toka dok se na sporednom privozu mogu javiti kraći repovi čekanja u periodu jutarnjeg i popodnevnog vršnog sata. Promet na raskrižju reguliran je znakom obaveznog zaustavljanja na sporednom privozu.

6.2.1. Prikupljanje ulaznih podataka nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec)

Raskrižje Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec klasičan je tip T – raskrižja. Glavni privoz sa sjeverozapada (Borongajska cesta) sastoji se od jednog ulaznog prometnog traka (zajednički prometni trak za ravno i desno) i jednog izlaznog prometnog traka širine 3 m. Vozila koja ulaze u raskrižje s ovog privoza zadržavaju pravo prvenstva prolaska u odnosu na sva druga vozila u raskrižju. Glavni privoz s jugoistoka (Ul. Vukomerec) sastoji se od jednog ulaznog prometnog traka (zajednički prometni trak za ravno i lijevo) i jednog izlaznog prometnog traka širine 3 m. Vozila koja skreću lijevo s ovog privoza mogu ući u raskrižje nakon što propuste sva vozila koja skreću desno sa sjeverozapadnog privoza. Sporedni privoz (Ul. Marijana Čavića) sastoji se od jednog ulaznog prometnog traka (zajednički prometni trak za lijevo i desno) i jednog izlaznog prometnog traka širine 3 m. Vozila koja ulaze u raskrižje s ovog privoza obavezna su se zaustaviti i propustiti sva vozila sa glavne prometnice. Pješački prijelaz označen je samo na sporednom privozu raskrižja i njegova širina iznosi 5 metara.



Slika 21. Geometrijski prikaz nesemaforiziranog raskrižja Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec unutar SIDRA INTERSECTION programskog paketa.

Na slici 21 prikazan je geometrija raskrižja korištena prilikom izračuna prometnih parametara nesemaforiziranog raskrižja primjenom HCM modela implementiranog u SIDRA INTERSECTION programskom paketu. Jednaka geometrija raskrižja koristit će prilikom ručnog izračuna prometnih parametara raskrižja primjenom HBS metodologije. Prilikom korištenja New South Wales i New Zealand metodologije ovaj geometrijski model prilagodit će se „standard left“ modelu.

Osim geometrije raskrižja kao ulazni podatci prilikom proračuna prometnih parametara raskrižja koristit će se podatci o prometnom opterećenju. Ovi podatci prikupljeni su ručnim brojanjem na raskrižju Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec u periodu vršnog sata. Podatci o brojanju prometa prikazani su u tablici 24.

Tablica 24. Podatci o brojanju promata sa nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec)

Prometno opterećenje (voz/h)		
Privoz Borongajska		
Kategorija vozila	Ravno	Desno
Ukupno vozila	153	167
Teška vozila	6	5
Laka vozila	147	162
Pješaci	0	
Privoz Ul. Vukomerec		
Kategorija vozila	Ravno	Lijevo
Ukupno vozila	357	305
Teška vozila	6	3
Laka vozila	351	302
Pješaci	0	
Privoz Ul. Marijana Čavića		
Kategorija vozila	Lijevo	Desno
Ukupno vozila	61	59
Teška vozila	5	2
Laka vozila	56	57
Pješaci	27	

6.2.2. Izlazni podatci dobiveni korištenjem različitih metodologija za proračun prometnih parametara nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec)

Izlazni podatci o vrijednostima prometnih parametara raskrižja dobiveni korištenjem HCM, HBS, New South Wales i New Zealand metodologije prikazani su u tablicama 25, 26, 27 i 28.

Tablica 25. Vrijednosti prometnih parametara nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec) izračunate prema HCM metodologiji.

Prometni trak	Propusna moć (voz/h)	Stupanj zasićenja	Rep čekanja (voz)	Vrijeme kašnjenja (s/voz)	Razina usluge
Privoz Borongajska					
Ravno/desno	1613	0.216	0	0	A
Privoz Ul. Vukomerec					
Ravno/lijevo	1455	0.494	5.8	4.5	A
Privoz Ul. Marijana Čavića					
Lijevo/desno	392	0.333	1.5	12.6	B

Tablica 26. Vrijednosti prometnih parametara nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec) izračunate prema HBS metodologiji.

Prometni trak	Propusna moć (voz/h)	Stupanj zasićenja	Rep čekanja (voz)	Vrijeme kašnjenja (s/voz)	Razina usluge
Privoz Borongajska					
Ravno/desno	1355	0.236	0	0	A
Privoz Ul. Vukomerec					
Ravno/lijevo	1188	0.557	3.3	6.8	A
Privoz Ul. Marijana Čavića					
Lijevo/desno	228	0.526	3.5	32.9	D

Tablica 27. Vrijednosti prometnih parametara nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec) izračunate prema NSW metodologiji.

Prometni trak	Propusna moć (voz/h)	Stupanj zasićenja	Rep čekanja (voz)	Vrijeme kašnjenja (s/voz)	Razina usluge
Privoz Borongajska					
Ravno/desno	1090	0.309	2.4	8.0	A
Privoz Ul. Vukomerec					
Ravno/lijevo	1859	0.375	0	2.6	A
Privoz Ul. Marijana Čavića					
Lijevo/desno	674	0.187	0.7	9.3	A

Tablica 28. Vrijednosti prometnih parametara nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec) izračunate prema New Zealand metodologiji.

Prometni trak	Propusna moć (voz/h)	Stupanj zasićenja	Rep čekanja (voz)	Vrijeme kašnjenja (s/voz)	Razina usluge
Privoz Borongajska					
Ravno/desno	1090	0.309	2.4	7.5	A
Privoz Ul. Vukomerec					
Ravno/lijevo	1859	0.375	0	2.1	A
Privoz Ul. Marijana Čavića					
Lijevo/desno	674	0.187	0.7	8.4	A

Iz tablica 25, 26, 27 i 28 mogu se vidjeti znatne razlike u vrijednostima propusne moći svakog privoza raskrižja. Razlog tome su različite vrijednosti kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja karakterističnih za svaku korištenu metodologiju. Također se može vidjeti kako su izračunate vrijednosti prosječnog vremena kašnjenja prilično male što je rezultiralo visokim ocjenama razine usluge na svakom privozu. Bitnija razlika očituje se kod izračunate vrijednosti prosječnog vremena kašnjenja prema HBS metodologiji za sporedni privoz raskrižja gdje ocjena razine usluge iznosi D. Kako bi se jednostavnije utvrdilo koja je od korištenih metodologija prihvatljivija za korištenje na nesemaforiziranim raskrižjima u

Republici Hrvatskoj vrijednosti prosječnog vremena kašnjenja izračunate prema HCM i HBS metodologiji usporedit će se sa stvarnim vrijednostima izmjerenim na raskrižju. New South Wales i New Zealand metodologija izostavljene su iz ovog istraživanja zbog korištenja drugačijih uvjeta vožnje.

Tablica 29. Usporedba vrijednosti vremena kašnjenja na nesemaforiziranom raskrižju izračunatih prema HCM i HBS metodologiji i vrijednosti prikupljenih terenskim istraživanjem

Prosječno vrijeme kašnjenja (s/voz)			
Prometni trak	HCM	HBS	Izmjerene vrijednosti
Privoz Borongajska			
Ravno/desno	**0**	**0**	0
Privoz Ul. Vukomerec			
Ravno/lijevo	4.5	**6.8**	7.17
Privoz Ul. Marijana Čavića			
Lijevo/desno	**12.6**	32.9	15.9

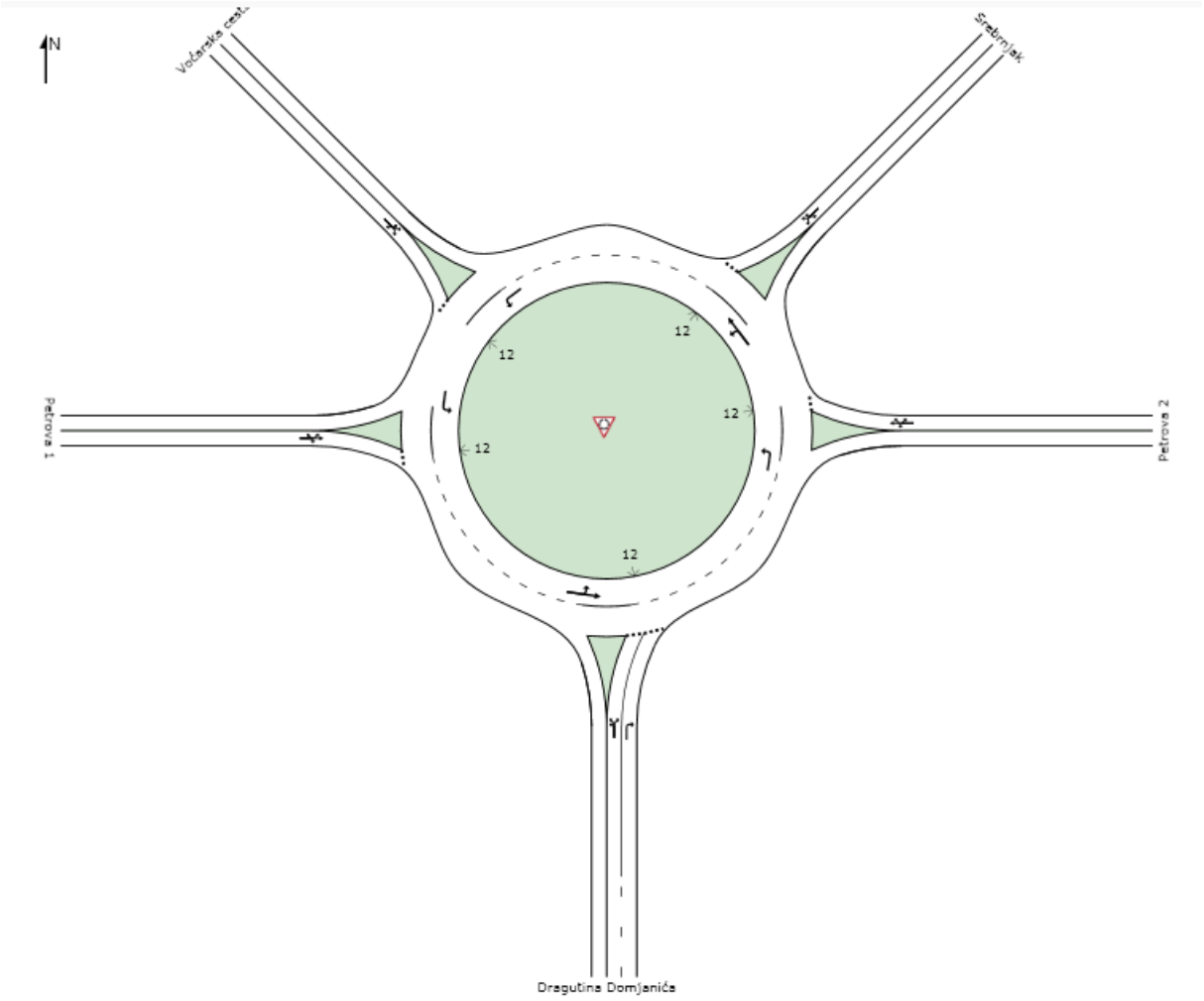
Iz tablice 29 može se vidjeti kako su vrijednosti prosječnog vremena kašnjenja na privozima glavne prometnice izračunate prema HCM i HBS metodologiji prilično izjednačene sa vrijednostima prikupljenim terenskim istraživanjem. Također se može primjetiti kako je vrijednost vremena kašnjenja na sporednom privozu izračunata prema HCM – u znatno bliža izmjerenim vrijednostima od vrijednosti izračunatih prema HBS – u. Temeljem svega navedenog HCM metodologija uzima se kao prihvatljivija za proračun prometnih parametara ovakvog tipa raskrižja u Republici Hrvatskoj.

6.3. Usporedba analiziranih metoda na primjeru kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica)

Kružno raskrižje Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica smješteno je u centru grada Zagreba u neposrednoj blizini Kvaternikovog trga. Raskrižje se sastoji od pet privoza i dvotračnog kružnog dijela. Promet u raskrižju reguliran je prometnim znakovima uz manja zagušenja i kraće repove čekanja u periodu jutarnjeg i popodnevnog vršnog sata.

6.3.1. Prikupljanje ulaznih podataka kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica)

Raskrižje Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica petokrako je kružno raskrižje vanjskog promjera 28 m sa središnjim otokom promjera 12 m i dvotračnim kružnim dijelom ukupne širine 8 m. Južni privoz (UL. Dragutina Domjanića) sastoji se od dva ulazna prometna traka (poseban prometni trak za desno skretanje i prometni trak za ostale manevre u raskrižju) i jednog izlaznog traka širine 3 m. Svi ostali privozi sastoje se od jednog ulaznog i jednog izlaznog prometnog traka širine 3 m. Pješački prijelazi širine 5 m obilježeni su na svakom privozu raskrižja na udaljenosti od 1 m od zaustavne linije.



Slika 22. Geometrijski prikaz kružnog raskrižja Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica unutar SIDRA INTERSECTION programskog paketa.

Na slici 22 prikazana je geometrija kružnog raskrižja korištena prilikom izračuna njegovih prometnih parametara primjenom HCM modela implementiranog u SIDRA INTERSECTION programskom paketu. Jednaka geometrija raskrižja koristit će se i prilikom izračuna prometnih parametara prema drugim metodologijama, ali će se prilikom primjene New South Wales i Nev Zealand metodologije prilagoditi „standard left“ modelu.

Osim geometrije raskrižja kao ulazni podatak u proračunima će se koristiti prikupljeni podatci o prometnom opterećenju prikazani u tablici 30.

Tablica 30. Podatci o brojanju promata sa kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica)

Prometno opterećenje (voz/h)				
Privoz Ul. Dragutina Domjanića				
Kategorija vozila	J - Z	J - SZ	J - SI	J - I
Ukupno vozila	43	154	74	223
Teška vozila	3	4	4	3
Laka vozila	40	150	70	220
Pješaci	89			
Privoz Petrova istok				
Kategorija vozila	I - J	I - Z	I - SZ	I - SI
Ukupno vozila	35	148	108	55
Teška vozila	4	4	6	5
Laka vozila	31	144	102	50
Pješaci	41			
Privoz Petrova zapad				
Kategorija vozila	Z - SZ	Z - SI	Z - I	Z - J
Ukupno vozila	28	34	205	19
Teška vozila	1	1	4	1
Laka vozila	27	33	201	18
Pješaci	103			
Privoz Srebrnjak				
Kategorija vozila	SI - I	SI - J	SI - Z	SI - SZ
Ukupno vozila	44	61	79	10
Teška vozila	1	4	2	1
Laka vozila	43	57	77	9
Pješaci	46			
Privoz Voćarska ulica				
Kategorija vozila	SZ - SI	SZ - I	SZ - J	SZ - Z
Ukupno vozila	6	111	91	9
Teška vozila	0	3	3	1
Laka vozila	6	109	88	8
Pješaci	38			

6.3.2. Izlazni podatci dobiveni korištenjem različitih metodologija za proračun prometnih parametara kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica)

U tablicama 31, 32, 33 i 34 prikazane su vrijednosti propusne moći, stupnja zasićenja, repa čekanja, vremena kašnjenja i razine usluge kružnog raskrižja Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica izračunatih primjenom HCM, HBS, NSW i New Zealand metodologije.

Tablica 31. Vrijednosti prometnih parametara kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica) izračunate prema HCM metodologiji.

Ulaz	Propusna moć (voz/h)	Stupanj zasićenja	Rep čekanja (voz)	Vrijeme kašnjenja (s/voz)	Razina usluge
Privoz Ul. Dragutina Domjanića					
J	728	0.405	1.3	10.3	B
J(D)	729	0.332	1.0	9.0	A
Privoz Petrova istok					
I	814	0.462	1.7	10.5	B
Privoz Petrova zapad					
Z	823	0.378	1.2	8.9	A
Privoz Srebrnjak					
SI	716	0.295	0.8	8.6	A
Privoz Voćarska ulica					
SZ	786	0.321	0.9	8.1	A

Tablica 32. Vrijednosti prometnih parametara kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica) izračunate prema HBS metodologiji.

Ulaz	Propusna moć (voz/h)	Stupanj zasićenja	Rep čekanja (voz)	Vrijeme kašnjenja (s/voz)	Razina usluge
Privoz Ul. Dragutina Domjanića					
J	841	0.357	2.9	6.3	A
J(D)	842	0.600	2.4	5.8	A
Privoz Petrova istok					
I	919	0.457	3.4	6.2	A
Privoz Petrova zapad					
Z	902	0.316	2.9	5.8	A
Privoz Srebrnjak					
SI	756	0.383	2.3	6.3	A
Privoz Voćarska ulica					
SZ	836	0.590	2.3	5.8	A

Tablica 33. Vrijednosti prometnih parametara kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica) izračunate prema NSW metodologiji.

Ulaz	Propusna moć (voz/h)	Stupanj zasićenja	Rep čekanja (voz)	Vrijeme kašnjenja (s/voz)	Razina usluge
Privoz Ul. Dragutina Domjanića					
J	779	0.610	5.4	12.5	A
J(L)	405	0.112	0.5	10.6	A
Privoz Petrova istok					
I	797	0.457	3.2	9.3	A
Privoz Petrova zapad					
Z	523	0.575	4.9	15.7	B
Privoz Srebrnjak					
SI	534	0.382	2.4	13.4	A
Privoz Voćarska ulica					
SZ	557	0.412	2.7	13.0	A

Tablica 34. Vrijednosti prometnih parametara kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica) izračunate prema New Zealand metodologiji.

Ulaz	Propusna moć (voz/h)	Stupanj zasićenja	Rep čekanja (voz)	Vrijeme kašnjenja (s/voz)	Razina usluge
Privoz Ul. Dragutina Domjanića					
J	779	0.610	5.4	11.4	B
J(L)	405	0.112	0.5	9.7	A
Privoz Petrova istok					
I	797	0.457	3.2	8.1	A
Privoz Petrova zapad					
Z	523	0.575	4.9	14.6	B
Privoz Srebrnjak					
SI	534	0.382	2.4	12.3	B
Privoz Voćarska ulica					
SZ	557	0.412	2.7	11.9	B

Iz tablica 31 i 32 može se vidjeti kako su izračunate vrijednosti propusne moći svakog privoza raskrižja prema HCM i HBS metodologiji prilično ujednačene. Razlog tome su prilično jednake vrijednosti kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja koje ovise o geometriji raskrižja. Vrijednosti propusne moći prikazane u tablicama 33 i 34 prilično odstupaju od vrijednosti izračunatih prema HCM i HBS metodologiji iz razloga što NSW i New Zealand metodologija koriste „standard left“ model koji podrazumjeva drugačije uvjete na raskrižju. Budući da propusna moć bitno utječe na izračun ostalih prometnih parametara odstupanja u odnosu na HCM i HBS metodologiju odrazit će se i na ostale rezultate. Kako bi se bolje predočile razlike između HCM i HBS metodologije vrijednosti izračunatih vremena kašnjenja usporedit će se sa stvarnim vrijednostima izmjerenim na raskrižju.

Tablica 35. Usporedba vrijednosti vremena kašnjenja na kružnom raskrižju izračunatih prema HCM i HBS metodologiji i vrijednosti prikupljenih terenskim istraživanjem

Prosječno vrijeme kašnjenja (s/voz)			
Ulaz	HCM	HBS	Izmjerene vrijednosti
Privoz Ul. Dragutina Domjanića			
J	**10.3**	6.3	11.9
J(D)	9.0	**5.8**	7.2
Privoz Petrova istok			
I	**10.5**	6.2	9.2
Privoz Petrova zapad			
Z	**8.9**	5.8	11.3
Privoz Srebrnjak			
SI	8.6	**6.3**	4.9
Privoz Voćarska ulica			
SZ	8.1	**5.8**	4.1

Iz tablice 35 može se vidjeti kako je HCM metodologija preciznija u izračunu prosječnog vremena kašnjenja na južnom, istočnom i zapadnom privozu raskrižja, dok je HBS metodologija preciznija na prometnom traku za desno skretanje južnog privoza, sjeveroistočnom i sjeverozapadnom privozu. Budući da su vrijednosti vremena čekanja na svim privozima jedne i druge metodologije približne stvarnim vrijednostima može se zaključiti kako su obje metodologije primjenjive na kružnim raskrižjima u Republici Hrvatskoj.

7. ZAKLJUČAK

Funkcionalnost semaforiziranih, nesemaforiziranih i kružnih raskrižja očituje se u tri osnovne veličine, a to su prometni tok, propusna moć i razina usluge. Na svaku od ovih veličina utječe određeni broj prometnih parametara o kojima će ovisiti rezultati analize. Prometni parametri koji utječu na prometni tok raskrižja su protok, faktor vršnog sata, brzina, gustoća, intervali slijeđenja i kritične vremenske praznine, signalni plan semaforiziranih raskrižja, rep čekanja i vrijeme kašnjenja. Na propusnu moć utječu vozni uvjeti, prometni uvjeti, postotak teških vozila, pješački tokovi i slično. Za izračun ovih parametara koristile su se različite metodologije kao što su HCM, HBS, NSW i New Zealand kako bi se u konačnici mogla odrediti razina usluge svakog analiziranog raskrižja.

Kod analize semaforiziranih raskrižja svaka od navedenih metodologija koristi jednak model za izračun propusne moći koji ovisi o efektivnom zelenom vremenu, trajanju ciklusa i zasićenom toku. Razlike u izlaznim vrijednostima propusne moći i ostalih prometnih parametara očituju se u tome što HCM i HBS metodologija koriste „standard right“ model specifičan za veći dio svijeta, a NSW i New Zealand metodologija koriste „standard left“ model koji se koristi u Australiji, Novom Zelandu i Velikoj Britaniji. Na izlazne vrijednosti propusne moći, stupnja zasićenja, duljine repa čekanja, prosječnog vremena kašnjenja i razine usluge utječu i razlike u baznim vrijednostima prometnih parametara i vrijednostima različitih faktora prilagodbe kojima metodologije raspolažu.

Prilikom analiziranja nesemaforiziranih raskrižja metodologije koriste različita pravila za upravljanje prometom u raskrižju ovisno o lokalnim uvjetima za koje se metodologija koristi. Te razlike bitno će utjecati na određivanje prioritetnih i konfliktnih tokova u raskrižju a samim time i na izračun ostalih prometnih parametara. Izračun propusne moći nesemaforiziranih raskrižja ovisi o vrijednostima kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja. Bazne vrijednosti ovih parametara različite su za svaku metodologiju. Prema HCM, NSW i New Zealand metodologiji kritična vremenska praznina i vrijeme slijeđenja definirani su kao funkcija geometrije raskrižja, kontrole i uvjeta prometnog toka, dok se prema HBS metodologiji propusna moć izračunava direktno iz baznih vrijednosti ovih parametara.

Proračun prometnih parametara kružnih raskrižja prema svim metodologijama zasniva se na proračunu kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja. Budući da se kao ulazne vrijednosti za izračun ovih parametara koriste geometrijski elementi raskrižja očekivane su

male razlike u izlaznim vrijednostima. Kružna raskrižja vrlo su česta pojava u cestovnoj mreži Australije i Novog Zelanda pa je stoga za očekivati da su metodologije namijenjene za proračun prometnih parametara ovog tipa raskrižja na tom području najpreciznije.

U ovom diplomskom radu ove četiri metodologije uspoređivane su na tri različita tipa raskrižja u gradu Zagrebu. Proračun prometnih parametara prema HCM, NSW i New Zealand metodologiji izvršen je upotrebom SIDRA INTERSECTION programskog paketa dok je proračun prema HBS metodologiji izvršen ručno. S obzirom na korištenje „standard left“ modela izlazni podatci dobiveni NSW i New Zealand metodologijom promatrani su posebno, a izlazni podatci dobiveni HCM i HBS metodologijom posebno. Uzmu li se u obzir rezultati usporedbe izračunatih vrijednosti prosječnog vremena kašnjenja prema HCM i HBS metodologiji sa stvarnim vrijednostima dobivenim terenskim istraživanjem može se zaključiti kako HCM metodologija daje vrlo precizne rezultate analize i kao takva je primjenjiva za upotrebu u Republici Hrvatskoj.

Literatura

[1] URL:http://estudent.fpz.hr/Predmeti/O/Osnove_prometnog_inženjerstva/Materijali/PROMETNI_TOK_2012.pdf (pristupljeno: svibanj 2016.)

[2] National Research Council: Highway Capacity Manual (HCM) 2000, Transportation Research Board (TRB), National Academies of Science, Washinghton DC, United States, 2000.

[3] National Research Council: Highway Capacity Manual (HCM) 2010, Transportation Research Board (TRB), National Academies of Science, Washinghton DC, United States, 2010.

[4] Novačko, L.: Cestovne prometnice I – nastavni materijali: Proračun razine usluge (HCM), Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2009.

[5] Hozjan, D., Novačko, L.: Cestovne prometnice II: Interna skripta za izradbu seminarskog rada, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2009.

[6] Dadić, I.: Teorija i organizacija prometnih tokova, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2014.

[7] Lanović, Z.: Cestovna telematika – nastavni materijali: Signalni plan, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.

[8] Novačko, L.: Cestovne prometnice II – nastavni materijali: Analiza raskrižja upravljanim prometnim svjetlima, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.

[9] Legac I., Šubić, N., Pilko, H.: Komparativna analiza propusne moći kružnih raskrižja u gradu Zagrebu, Hrvatsko društvo za ceste – Via Vita, Peti hrvatski kongres o cestama Cavtat – Dubrovnik, listopad 2011

[10] Wu, N.: Traffic Quality Assessment at Signalized Intersections – Procedures in the New German Highway Capacity Manual (HBS 2015), Ruhr – Universität Bochum, Bochum, July 2015.

[11] Harders, J., Schmotz, M.: Verkehrsqualität an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage – Kommentar zum HBS 2015, Straßen – verkehrstechnik, 11, Kirsch Baum, Ihr Fachverlag für Verkehr und Technik, Germany, 2015.

[12] Kommission Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: Handbuch für Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) 2015, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV), Köln, Germany, 2015.

[13] SIDRA SOLUTIONS: SIDRA INTERSECTION User Guide, Akcelik & Associates Pty Ltd , Greythorn Victoria, Australia, 2012.

[14] Akmaz, M., M., Çelik, O., N.: Examination of Signalized Intersections According to Australian and HCM (Highway Capacity Manual) Methods Using Sidra Intersection Software, Journal of Civil Engineering and Architecture, 10, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Selcuk University, DAVID PUBLISHING, Konya, Turkey, 2016.

[15] Akçelik, R.: Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis, Research ReportARR no. 123, Australian Road Research Board, Greythorn Victoria, Australia, 1998.

[16] Han, C., Luk, J.: Guide to Traffic Management Part 3: Traffic Studies and Analysis (2nd ed.), Austroads, Sydney, Australia, 2013.

[17] Akçelik, R.: Issues in Performance Assessment of Sign – Controlled Intersections, Paper presented at the 25th ARRB Conference, Perth, Australia, 2012.

[18] Akçelik, R.: An Improved Method for Estimating Sign – Controlled Intersection Capacity, Paper presented at the New Zealand Modeling User Group NZMUGS 2012 Conference, Auckland, 2012.

[19] Akçelik, R.: Some Common and Differing Aspects of Alternative Models for Roundabout Capacity and Performance Estimation, Akcelik and Associates Pty Ltd, Greythorn Victoria, Australia, 2011.

Popis kratica

HCM	(Highway Capacity Manual) priručnik za određivanje propusne moći i razine usluge prometnih objekata
HBS	(Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen) priručnik za projektiranje cestovnih objekata
NAASRA	(National Association of Australian State Road) Nacionalno udruženje za državne ceste Australije
NSW	New South Wales
RiLSA	(Richtlinien für Lichtsignalanlagen) smjernice za određivanje parametara semaforiziranih raskrižja
SIDRA	(Signalised & unsignalised Intersection Design and Research Aid) programski alat za istraživanje i dimenzioniranje semaforiziranih i nesemaforiziranih raskrižja
StVO	(Straßenverkehrsanlagen) pravilnik o upravljanju prometom na cestama

Popis slika

Slika 1. Srednja prostorna brzina 6
Slika 2. Srednja vremenska brzina 6
Slika 3. Interval slijeđenja i kritična vremenska praznina između vozila 8
Slika 4. Prikaz tokova po privozima na četverokrakom i T – raskrižju 19
Slika 5. Kružno raskrižje s njemu pripadajućim prometnim tokovima..... 28
Slika 6. Grafikoni multiplikativnih faktora prilagodbe 33
Slika 7. Grafikon za određivanje propusne moći uslijed dozvoljenog perioda za lijeva skretanja 35
Slika 8. Prikaz kretanja prometnih tokova na raskrižju prema StVO standardima..... 39
Slika 9. Grafikon faktora utjecaja pješačkog prometa 42
Slika 10. Grafikoni za određivanje broja mjesta na kojima se vozila pripremaju na skretanje 43
Slika 11. Grafikon vremena kašnjenja u ovisnosti o parametrima R i c 46
Slika 12. Pravilo odvijanja prometa unutar kružnog raskrižja u Njemačkoj..... 47
Slika 13. OD matrica kružnog raskrižja 48
Slika 14. Grafikon faktora utjecaja pješaka kada privoz raskrižja ima jedan prometni trak.... 51
Slika 15. Grafikon faktora utjecaja pješaka u slučaju kada privoz raskrižja ima dva prometna traka 51
Slika 16. Tradicionalni Akçelikov model za određivanje signalnog plana raskrižja 55
Slika 17. Prikaz različitih modela za izračun prometnih parametara kružnih raskrižja 59
Slika 18. Efektivna propusna moć raskrižja i kritični stupanj zasićenja kao funkcija vanjskog promjera izračunati pomoću SIDRA STANDARD modela 61
Slika 19. Geometrijski prikaz semaforiziranog raskrižja Selska – Zagorska unutar SIDRA INTERSECTION programskog paketa. 64
Slika 20. Način definiranja kretanja unutar svake faze korištenjem SIDRA INTERSECTION programskog paketa 65
Slika 21. Geometrijski prikaz nesemaforiziranog raskrižja Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec unutar SIDRA INTERSECTION programskog paketa. 71
Slika 22. Geometrijski prikaz kružnog raskrižja Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica unutar SIDRA INTERSECTION programskog paketa. 75

Popis tablica

Tablica 1. Osnovni pojmovi i parametri za izračun signalnog plana raskrižja 9
Tablica 2. Kombinacije grupa trakova i grupa kretanja 14
Tablica 3. Kriterij za određivanje razine usluge prema HCM - u 18
Tablica 4. Bazne vrijednosti kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja u ovisnosti o manevru u raskrižju 22
Tablica 5. Kriterij za određivanje razine usluge nesemaforiziranog raskrižja po metodologiji HCM 2010. 27
Tablica 6. Izrazi za izračun faktora utjecaja pješaka na ulaznom dijelu kružnog raskrižja 29
Tablica 7. Kriterij za određivanje razine usluge semaforiziranih raskrižja prema HBS – u 37
Tablica 8. Izračun konfliktnih tokova četverokrakog nesemaforiziranog raskrižja 40
Tablica 9. Vrijednosti kritičnih vremenskih praznina i vremena slijeđenja 41
Tablica 10. Kriterij za određivanje razine usluge nesemaforiziranih raskrižja prema HBS – u 46
Tablica 11. Izrazi za određivanje konfliktnih tokova kružnog raskrižja 48
Tablica 12. Bazne vrijednosti faktora A i B u ovisnosti o broju trakova privoza/kružnog dijela raskrižja: 50
Tablica 13. Bazne vrijednosti kritične vremenske praznine i vremena slijeđenja SIDRA STANDARD modela i HCM modela za dvotračnu glavnu cestu 58
Tablica 14. Bazne vrijednosti kritične vremenske praznine i vremena slijeđenja SIDRA STANDARD modela i HCM modela za četverotračnu glavnu cestu 58
Tablica 15. Bazne vrijednosti za ulazni polumjer i ulazni kut u SIDRA STANDARD modelu 60
Tablica 16. Kriterij za određivanje razine usluge prema SIDRA STANDARD i NSW metodologiji u usporedbi sa kriterijem za određivanje razine usluge prema HCM i HBS metodologiji 62
Tablica 17. Signalni plan semaforiziranog raskrižja Selska – Zagorska 65
Tablica 18. Podatci o brojanju prometa sa semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska) 66
Tablica 19. Vrijednosti prometnih parametara semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska) izračunate prema HCM metodologiji. 67
Tablica 20. Vrijednosti prometnih parametara semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska) izračunate prema HBS metodologiji. 67

Tablica 21. Vrijednosti prometnih parametara semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska) izračunate prema NSW metodologiji 68
Tablica 22. Vrijednosti prometnih parametara semaforiziranog raskrižja (Selska – Zagorska) izračunate prema New Zealand metodologiji..... 68
Tablica 23. Usporedba vrijednosti vremena kašnjenja na semaforiziranom raskrižju izračunatih prema HCM i HBS metodologiji i vrijednosti prikupljenih terenskim istraživanjem 69
Tablica 24. Podatci o brojanju promata sa nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec) 72
Tablica 25. Vrijednosti prometnih parametara nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec) izračunate prema HCM metodologiji. 72
Tablica 26. Vrijednosti prometnih parametara nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec) izračunate prema HBS metodologiji. 73
Tablica 27. Vrijednosti prometnih parametara nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec) izračunate prema NSW metodologiji. 73
Tablica 28. Vrijednosti prometnih parametara nesemaforiziranog raskrižja (Borongajska cesta – Ul. Marijana Čavića – Ul. Vukomerec) izračunate prema New Zealand metodologiji. 73
Tablica 29. Usporedba vrijednosti vremena kašnjenja na nesemaforiziranom raskrižju izračunatih prema HCM i HBS metodologiji i vrijednosti prikupljenih terenskim istraživanjem 74
Tablica 30. Podatci o brojanju promata sa kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica) 76
Tablica 31. Vrijednosti prometnih parametara kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica) izračunate prema HCM metodologiji. 77
Tablica 32. Vrijednosti prometnih parametara kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica) izračunate prema HBS metodologiji. 77
Tablica 33. Vrijednosti prometnih parametara kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica) izračunate prema NSW metodologiji. 78
Tablica 34. Vrijednosti prometnih parametara kružnog raskrižja (Ul. Dragutina Domjanića – Petrova ulica – Srebrnjak – Voćarska ulica) izračunate prema New Zealand metodologiji. ... 78
Tablica 35. Usporedba vrijednosti vremena kašnjenja na kružnom raskrižju izračunatih prema HCM i HBS metodologiji i vrijednosti prikupljenih terenskim istraživanjem 79