
**16. SVETLOSNI SIGNALI –
UPRAVLJANJE SAOBRAĆAJEM
POMOĆU SVETLOSNIH SIGNALA**

SADRŽAJ

16. SVETLOSNI SIGNALI – UPRAVLJANJE SAOBRAĆAJEM POMOĆU SVETLOSNIH SIGNALA	1
16.1 OPŠTE O SVETLOSNIM SIGNALIMA - kriterijumi uvođenja i rada signala	1
16.1.1 Uvod	2
16.2 Individualna izolovana signalisana raskrsnica	4
16.2.1 Uvod	4
16.2.2 Kružne raskrsnice	5
16.2.3 Proračun načina rada svetlosnih signala	6
16.3 Osnovne teoretske postavke	7
16.3.1 Zasićen saobraćajni tok	7
16.3.2 Postupak određivanja zasićenog toka	9
16.3.3 Kapacitet raskrsnice	13
16.3.4 Primeri određivanja vrednosti zasićenog toka osnovnom metodom	13
16.4 Elementi signalnog plana	18
16.4.1 Vremenski gubici tokom zelenog intervala i efektivno zeleno vreme	18
16.4.2 Zaštitno vreme u okviru signalnog plana	19
16.5 Proračun signalnog plana po modelu WEBSTER-A	23
16.5.1 Primer primene modela Webster-a	25
16.6 Proračun signalnog plana po modelu HCM iz 2000.god.	27
16.6.1 Utvrđivanje merodavnog obima saobraćaja	28
16.6.2 Vrednost idealnog zasićenog toka	28
16.6.3 Proračun faktora uticaja levih skretanja	30
16.6.4 Utvrđivanje minimalnih zelenih vremena	31
16.6.5 Faktor iskorišćenja traka u posmatranoj grupi traka	31
16.6.6 Utvrđivanje kapaciteta i odnosa protok kapacitet	32
16.6.7 Kritične grupe, dužina ciklusa i preraspodela zelenih vremena	32
16.6.8 Model proračuna vremenskih gubitaka vozila na raskrsnici	33
16.6.9 Nivo usluge	35
16.7 Metoda proračuna signalnih planova - upravljanje signalnim grupama	36
16.7.1 Signalne grupe i faze	36
16.7.2 Utvrđivanje saglasnih sekvenci	37
16.7.3 Metoda proračuna signalnog plana	39
16.7.3.1 <i>Primer proračuna signalnog plana</i>	40
16.8 Sekundarni pokazatelji efikasnosti rada raskrsnice na kojoj se saobraćajem upravlja pomoću svetlosnih signala	44
16.8.1 Broj vozila u redu	45
16.8.2 Verovatnoća pojave reda koji može blokirati prethodnu raskrsnicu	45
16.8.3 Broj zaustavljanja vozila	47
16.8.4 Potrošnja goriva	48

16. SVETLOSNI SIGNALI – UPRAVLJANJE SAOBRAĆAJEM POMOĆU SVETLOSNIH SIGNALA¹

16.1 OPŠTE O SVETLOSNIM SIGNALIMA - kriterijumi uvođenja i rada signala



¹ U pisanju ovog dela rukopisa pisanih predavnaja korišćen je veliki broj izvora od kojih su osnovni

- Udžbenik **Upravljanje saobraćajem pomoću svetlosnih signala-I deo**, autori M.Osoba, S.Vukanović, B. Stanić., izdanje Saobraćajni fakultet Beograd 1999.god.
- “ **Metode proračuna signalnih planova i izbora načina rada signalisanih raskrsnica**, autora S Vukanovića , Tehnika separat Saobraćaj 5-6, str. 21-27., Beograd.
- **Postupak utvrđivanja kapaciteta i nivoa usluge po metodi HCM 2000**, autora S.Vukanovića, Tehnika- separat Saobraćaj 2/2004god.

Spisak literature u prilogu namenjen je čitaocima zainteresovanim za detaljnije i šire izučavanje prethodno izložene materije. Registar pojmova napravljen je selektivno, sa namerom da čitaoca uputi na ona mesta u knjizi gde su značajniji pojmovi iz oblasti upravljanja saobraćajem sadržajnije pomenuti ili objašnjeni, a upućuje i na pominjanje značajnijih autora iz iste oblasti.

16.1.1 Uvod

Korisnici gradske mreže veoma često se susreću sa signalisanom raskrsnicom, individualnom ili onom koja je deo nekog kompleksnog sistema upravljanja saobraćajem. Pravila ponašanja na signalisanoj raskrsnici su svakom korisniku mreže poznata. Poštovanje odavno definisanih pravila ponašanja na signalisanoj raskrsnici obezbeđuje njeno pravilno funkcionisanje. Nepoštovanje pravila ponašanja povlači mogućnost ugrožavanja života ostalih učesnika u saobraćaju. Postojanje signalisane raskrsnice na mreži ne znači da je na najbolji način sprovedeno vođenje tokova preko nje. Ne često smo u situaciji da sebi postavljamo pitanje zbog čega ja na tom mestu signalisana raskrsnica i zbog čega toliko dugo čekana na promenu signalnog pojma i dobijanja prava prolaza. Kriterijumi uvođenja svetlosnih signala su poznati i grubo se mogu svrstavati u 5 osnovnih grupa:

1. Kriterijumi protoka. Osnovni kriterijum je obim saobraćaja ili pešaka u određenom periodu vremena (ili vremenski gubici vozila na sporednom prilazu),
2. Kriterijumi prioriteta (prioritet vozila JMMP-a, vozila posebne namene)
3. Kriterijum saobraćajnih nezgoda (“humani kriterijum”). Učestanosti i vrsta saobraćajnih nezgoda na posmatranoj raskrsnici mogu prema ovom kriterijumu u datom momentu zahtevati uvođenje svetlosnih signala,
4. Režimski kriterijumi. Kod ove grupe ne postoje uvek jasno izraženi kvantifikatori. Potreba za uvođenjem signalisane raskrsnice se javlja ili usled određene promene režima ili zbog uvođenja koordinisanog vođenja tokova na potezu na kome se nalazi i posmatrana raskrsnica, ili kontrole pristupa
5. Kombinovani kriterijumi.

1. Kriterijum protoka vozila

broj traka	po prilazu			
glavna ul.	sporedna ul	voz/h (g.ul.oba smer)	voz/h (sporedna ulica -jedan smer)	napomena
1	1	500 (300)*	150 (100)*	>8h neprekidno
2 ili više	1	600	150	>8h
2 ili više	2 ili više	600	200	>8h
1	2 ili više	500	200	>8h

* minimum 16 sati u toku dana (V. Britanija)

2. Kriterijum prekidanje glavnog toka

broj traka	po prilazu		
glavna ul.	sporedna ul.	voz/h na glavnoj ulici ukupno oba smer	voz/h na sporednoj ulici jedan prilaz
1	1	750	75
2 ili više	1	900	75
2 ili više	2 ili više	900	100
1	2 ili više	750	100

* 8h neprekidno u toku dana

3. Kriterijum protoka pešaka

voz/h na glavnoj ulici oba smer		broj pešaka na opterećenijem peš. prelazu
sa razdelnim ostrvom	bez razdelnog ostrva	
1000*	600	150
85%	85%**	85%**

* 8h neprekidno

** u manjim naseljima

3. Kriterijum nezgode

A) Standardni metod

- sa mat. štetom 1
- sa lako povređenim 5
- sa teško povređenim 50
- sa poginulim 150

Ako je zbir veći od 50 (100) neophodno je ispitati uzroke, preduzeti odgovarajuće mere i na kraju odlučiti se za uvođenje svetlosnih signala.

B) Švedska metoda konfliktnosti

4. Kriterijum progresivne koordinacije

Odstojanje između signala ne obezbeđuje da se vozila kreću projektovanim brzinama ($L > 300\text{m}$)

Eliminisanje ometanja glavnog toka

Bez obzira o kojoj grupi kriterijuma je reč, kada se odluči da se uvede signalisana raskrsnica postavlja se pitanje kako će svetlosni signali raditi, odnosno kakva je zakonitost davanja prava prolaza pojedinim tokovima u zoni raskrsnice.

Vozila se na signalisanoj raskrsnici opslužuju po nekom redu. Zakon opsluživanja je da unutar nekog vremena koje se ciklično menja svaki tok određeno vreme ima pravo prolaza, a ostatak prepušta ostalim korisnicima (konfliktnim). Koliko traje taj vremenski ciklus, kakva je raspodela vremena za pojedine tokove unutar ciklusa i kakve su zaštite između pojedinih faza predstavlja osnovni korak pri utvrđivanju rada svetlosnih signala. Ako se ovaj korak pogrešno ili nepotpuno reši može se desiti da se signalisana raskrsnica pretvori u svoju suprotnost, tj. da se na njoj poveća broj nezgoda i u krajnjoj meri da počne da je koristi manji broj korisnika nego što je predviđeno. Kriterijumi rada svetlosnih signala mogu biti različiti. Hijerarhijski posmatrano postoje dve vrste kriterijuma kada je signalisana raskrsnica u pitanju i to: strategijski kriterijum (daju odgovor na pitanje da li uvesti ili ne svetlosne signale), operativni kriterijum (daje odgovor na pitanje šta na raskrsnici minimizirati odnosno maksimizirati).

Kriterijumi rada svetlosnih signala koji se danas najčešće koriste su:

1. Kriterijum minimiziranja vremenskih gubitaka odnosno linearne kombinacije vremenskih gubitaka i broja zaustavljenih vozila ispred signala
2. Kriterijum maksimiziranja kapaciteta
3. Kriterijum maksimalno prihvatljive dužine reda
4. Kriterijum minimiziranja ukupnih troškova korisnika

U praksi modeli i postupci proračuna rada svetlosnih signala su najčešće bazirani na kriterijumu 1 ili 2 .

Svetlosni signali mogu raditi u fiksnom režimu rada (sa nekoliko podvarijanti rada) odnosno kada su signalni planovi utvrđeni na osnovu istorijskih podataka o saobraćaju. Obično se koristi termin FT strategija upravljanja. Svetlosni signali mogu raditi i kao zavisni od promena u saobraćajnim parametrima (protok, brzina, gustina, dužina reda i dr.) i zovu se često adaptibilni sistemi rada svetlosnih signala.

U narednom tekstu prikazane su metode optimizacije zasnovane na kriterijumu 1 ili 2, a koje se primenjuju kod sistema u FT strategiji rada. U poglavljima detaljno su prikazani adaptibilni sistemi rada signala i koordinisani rad signala.

16.2 Individualna izolovana signalisana raskrsnica

16.2.1 Uvod

U teorijskim razmatranjima i praksi se pojavljuju termini "individualna signalisana raskrsnica" ili "izolovana signalisana raskrsnica" koji ne znače isto. Suština je u tome da se raskrsnica upravljana svetlosnim signalima, u ovom slučaju, razmatra samostalno, bez vođenja računa o susednim signalisanim raskrsnicama na mreži, i specifičnim uticajima koje njihov rad može imati na saobraćajni zahtev koji se opslužuje na razmatranoj raskrsnici (individualna izolovana signalisana raskrsnica). Dolazak vozila na prilaze ovako razmatrane raskrsnice može se smatrati slučajnom pojavom, a njen probabilistički karakter je osnova za optimizaciju upravljanja saobraćajnim procesom i proračun njegovih efekata. Prema tome pravilni termin je *individualna izolovana signalisana raskrsnica*. Sledi da individualne raskrsnice u smislu hardverskog upravljanja ne moraju uvek biti i izolovane odnosno da dolazak vozila nije uvek slučajan. U slučaju da je individualna raskrsnica pod uticajem ostalih raskrsnica čitaoc se upućuje na postupke utvrđivanja rada signalisane raskrsnice date u tački 16.5. U ostalim slučajevima prikazane metode u tekstu se mogu uz određena ograničenja ravnopravno koristiti.

Mada je prostorna integracija upravljačkih sistema zasnovanih na svetlosnoj signalizaciji logična pojava i već decenijama aktuelan trend, signalisana raskrsnica i dalje postoji u osnovi sistema u čijim se okvirima razrešavaju fundamentalni upravljački problemi i formuliše upravljačka strategija. Beograd je prema podacima iz 2000. godine na užem području grada raspolagao sa 450 raskrsnica kontrolisanih svetlosnim

signalima, od kojih je 128 funkcionisalo kao individualne, a ostale su bile u nekom od sistema linijske ili zonske kontrole.

U okviru razmatranja problema upravljanja na signalisanoj raskrsnici, u ovom materijalu su definisani brojni činioci neophodni za celovito razumevanje i tumačenje saobraćajnog procesa, kao i osnovni principi upravljanja njime pomoću svetlosnih signala. Predstavljeni su izabrani alternativni pristupi proračunu rada svetlosnih signala, uz neophodne podatke za njihovu primenu i primere koji ih ilustruju.



16.2.2 Kružne raskrsnice

Kružna raskrsnica je specifična u smislu regulisanja saobraćaja i samo u pojedinim retkim situacijama se koriste sistemi za upravljanje saobraćajem svetlosnim signalima. Motiv za to su najčešće kapacitivno kritična stanja ili kontinualan tok na nekom od prilaza (blizak zasićenju) koji praktično blokira ulivanje vozila sa narednog ili narednih prilaza u kružni tok (Slika 16.1). Iskustva u primeni signalisanih kružnih raskrsnica su još uvek skromna a najčešće se mogu sresti u Španiji.



Slika 16.1

16.2.3 Proračun načina rada svetlosnih signala

U funkcionalnom smislu raskrsnica predstavlja najstrožiji element saobraćajne mreže. To je mesto gde se presecaju putanje saobraćajnih tokova različitog usmerenja, gde pojedini tokovi menjaju pravac, gde se odvija niz manevara, donose i realizuju odluke vozača da na jedan ili drugi način nastave svoje kretanje, mesto gde se najčešće realizuju presecanja pešačkih i tokova vozila. U tom smislu raskrsnica predstavlja prostor povećane koncentracije konflikata i povećanog rizika od nastajanja nezgoda. U funkcionalnom smislu, raskrsnica je prostor na čije korišćenje "polazu pravo" različiti saobraćajni tokovi, koji to pravo ne mogu realizovati istovremeno. Upravljački je neophodno regulisati odvijanje saobraćajnog procesa tako da se svi prisutni zahtevi opsluže prema određenom kriterijumu, a da to ne ugrozi bezbednost saobraćaja i bude funkcionalno što efikasnije.

Svetlosni signali vrše vremensku raspodelu prava korišćenja površine raskrsnice na konkurentne (konfliktne) saobraćajne tokove u skladu sa izabranim kriterijumom upravljanja.

Osnovne prednosti svetlosnih signala u odnosu na ostale nivoe upravljanja su jednoznačnost upravljačke informacije, fleksibilnost u radu, jednostavna promena upravljanja, mogućnost rada zavisnog od niza odabranih činilaca saobraćaja i okruženja, neprekidnost rada i sl.

Kriterijumi upravljanja saobraćajem pomoću svetlosnih signala mogu biti različiti u zavisnosti od specifičnosti lokacije raskrsnice i karaktera tokova koji se na njoj pojavljuju. Osnovna dva kriterijuma u optimizaciji rada svetlosnih signala su danas prisutna u teorijskim razmatranjima i stručnoj literaturi i to:

- Vremenski gubici vozila na signalisanoj raskrsnici (d)
- Kapacitet saobraćajne trake, prilaza ili raskrsnice (K)

Rezultat optimizacije za dati ulazni, merodavni protok i unapred definisanu raspodelu tokova po fazama, stanjima je dužina ciklusa i preraspodela zelenih vremena. Ove izlazne veličine se pretaču u *signalni plan* i *plan tempiranja signala*

Zasićeni tok odnos potencijalni *kapacitet* i merodavni protok predstavljaju i osnovne *ulazne veličine* pri proračunu rada signala. Pored njih, od značaja je i *geometrija raskrsnice* na kojoj se saobraćajni proces odvija (širina prilaza, broj saobraćajnih traka, radijusi skretanja, uzdužni nagibi itd.).

Faza (signalno stanje) je period tokom koga se opslužuje odgovarajuća kombinacija tokova (najčešće beskonfliktnih ili sa "lakšim" tipom konflikta² koji je upravljački prihvatljiv). Konfliktna kretanja se opslužuju u različitim fazama (vremenski razdvojenim intervalima). Redosled i trajanje pojedinih intervala "zelenog svetla" pridruženih fazama

² Konflikt između toka pravo i levog skretanja iz suprotnog smera funkcionalno je nepovoljan, ali je upravljački prihvatljiv i često se u okviru signalnih planova primenjuje. Gotovo redovno se prihvata i primenjuje i konflikt između vozila u skretanju i pešačkih tokova na bočnim prilazima raskrsnice.

predstavljaju izlazne rezultate proračuna rada signala. Konačan vid formulacije upravljanja je plan tempiranja signala u kome je za svaki od signala predstavljen trenutak davanja svake od upravljačkih indikacija (signalnog pojma).

U daljem tekstu su detaljnije izloženi alternativni pristupi određivanju zasićenog saobraćajnog toka i kapaciteta signalisane raskrsnice sa preporukama za praktičnu primenu. Zatim su detaljno objašnjeni pojmovi i određivanje vremenskih gubitaka i zaštitnih vremena između susednih faza signalnog plana.

U praksi upravljanja saobraćajem se koriste nekoliko pristupa proračunu rada svetlosnih signala na signalisanoj raskrsnici: fazni pristup, formulisan u okviru klasičnog Webster-ovog modela, pristup dat u novom priručniku HCM iz 2000.god. i pristup zasnovan na signalnim stanjima, koji je osnova "metode kritičnih tokova". Sve navedene metode pretpostavljaju da raskrsnica radi na osnovu unapred utvrđenih merodavnih protoka i da promena signalnog plana nije moguća usled trenutne promene veličina protoka(takozvana FT strategija).

Metode Webstera i HCM 2000 su prikazane za slučaj FT strategija. Metoda kritičnih tokova koja je dominantna pri proračunu rada složenih sistema upravljanja na signalisanim raskrsnicama nije prikazana i čitaoc se upućuje na izvornu literaturu.

Za slučaj gde postoje mogućnost dobijanja podataka o veličini protoka kontinualno postoje druge metode koje su prikazane u tački 16.7 (adaptibilni sistemi upravljanja saobraćajem).

Proračun načina rada signala povezan je sa vrednovanjem efekata projektovanog upravljanja. Upravljanje putem svetlosnih signala se sprovodi da bi se ostvarili povoljniji efekti u odnosu na alternativne hijerarhijske nivoe upravljanja ili na neko prethodno upravljanje posredstvom svetlosnih signala. Funkcionalno vrednovanje je neophodan deo procesa projektovanja rada svetlosnih signala, jer je ono način da se proverí ispravnost predviđenih mera i unapred sagledaju njihove posledice. Vrší se na osnovu analitičkih izraza za pojedine pokazatelje u funkciji signalnog plana (trajanja zelenog signalnog pojma i ciklusa). Osnovni pokazatelji efikasnosti rada svetlosnih signala predstavljeni su u tački 16.6 rukopisa i delimično u tački 16.5 - Nivo usluge.

16.3 Osnovne teoretske postavke

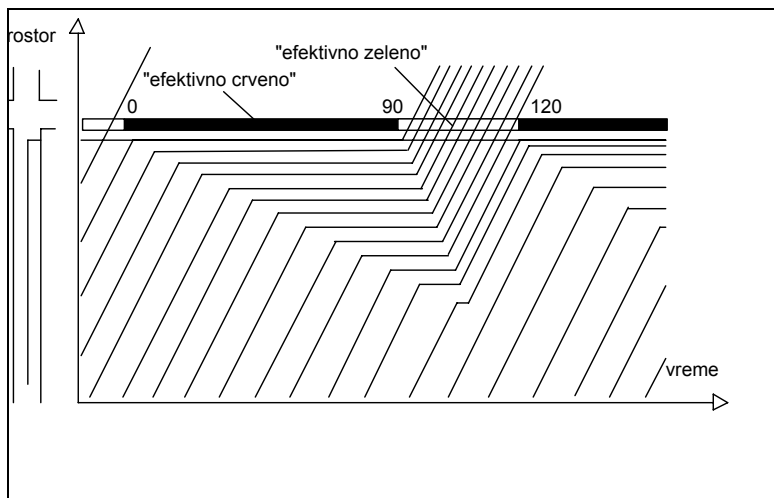
16.3.1 Zasićen saobraćajni tok

Upravljanje saobraćajem na raskrsnici pomoću svetlosnih signala, već je istaknuto, u suštini se svodi na raspodelu raspoloživih resursa (vremena) na konkurentne tokove, u skladu sa odnosom njihove veličine i raspoloživog kapaciteta prilaza raskrsnice na kome se javljaju (odnos saobraćajne potražnje i saobraćajne ponude).

Određivanje kapaciteta raskrsnice upravljane svetlosnim signalima (njenih pojedinih prilaza ili saobraćajnih traka) i projektovanje upravljanja saobraćajnim procesom na njoj neposredno su povezani sa pojmom **zasićenog saobraćajnog toka**. Termin

"zasićenje" koristi se za stanja saobraćajnog procesa na raskrsnici regulisanoj svetlosnim signalima kada je saobraćajni zahtev blizak kapacitetu raskrsnice. Da bi stanje na nekoj raskrsnici bilo zasićeno, neophodno je da na prilazu raskrsnice postoji toliki red vozila koja čekaju "zeleni interval", da nakon isteka tog intervala i "pražnjenja" reda pred narednim "crvenim signalom" ostane bar jedno vozilo, a da pri tome odgovarajući izlaz raskrsnice bude slobodan³.

Na Slika 16.2 prikazan je, na prostor-vreme dijagramu, tipičan ciklus rada signala sa zasićenim "zelenim intervalom". Vozila se nakupljaju pred "crvenim signalom" formirajući red koji se tokom "zelenog intervala" prazni, ali ne uspeva da se potpuno rasformira pre nastupanja sledećeg "crvenog intervala".



Slika 16.2

Veličina saobraćajnog toka koji tokom određenog perioda sa prilaza može da prođe signalima kontrolisanom raskrsnicom zavisi od maksimalno mogućeg protoka vozila ograničenog signalnim planom, geometrijom prilaza (oblik i broj saobraćajnih traka), karakterom toka vozila i ponašanjem vozača. Za njeno određivanje i korišćenje u postupku proračuna rada signala definiše se **zasićen saobraćajni tok** (po saobraćajnoj traci ili grupi traka iste namene) na prilazu raskrsnice kao **broj vozila koja bi sa prilaza ušla u raskrsnicu kada bi tokom celog sata za njih bilo obezbeđeno pravo prolaza (zeleni signalni pojam) i na prilazu postojao neprekidan saobraćajni zahtev u obliku homogenog toka putničkih automobila**. Zasićen tok se izražava u vozilima na sat "zelenog" [voz/sat].

Uslov o 100% "zelenog svetla" u definiciji zasićenog toka ukazuje da se radi o hipotetičkoj situaciji. Uslov o homogenosti toka takođe predstavlja idealizaciju. Zato se zasićen saobraćajni tok na prilazu raskrsnice upravljane svetlosnim signalima može posebnom metodologijom eksperimentalno utvrditi na samom prilazu, tokom realnog zelenog intervala. Tok se "homogenizuje" primenom PAJ⁴ jedinica, a dobijeni rezultati

³ Stanja vršnog opterećenja u kojima postoji blokada bilo na izlazu ili u samoj raskrsnici spadaju u takozvana prezasićena ili stanja blokade.

⁴ PAJ (Putnički Automobil Jedinica) se koristi za "homogenizaciju" saobraćajnih tokova različite strukture radi jedinstvenog razmatranja, a dobija se primenom odgovarajućih ekvivalenata na vozila u toku koja ne pripadaju kategoriji "putničkog automobila".

zatim ekstrapoliraju na hipotetički sat "zelenog svetla". Za slučaj raskrsnice sa Slike 1, pojednostavljeno posmatrano i uz pretpostavku da je prikazani interval upravo prosečan, zasićen saobraćajni tok trake bi bio 1200voz/sat (jer tokom 30 sekundi zelenog intervala biva opsluženo deset vozila).

S obzirom na dominantan uticaj usvojene vrednosti zasićenog toka na proračun i efekte rada svetlosnih signala, značajno je njeno tačno određivanje. Za tu svrhu se koriste različiti pristupi i modeli.

U klasičnoj teoriji (Webster, Cobbe, 1965-67.), veličina zasićenog toka zavisi prvenstveno od širine posmatranog prilaza, odnosno širine traka, nagiba prilaza, radijusa prilikom skretanja (dakle od geometrije raskrsnice), lokacije raskrsnice u gradskim okvirima, strukture toka itd.

U kasnijim radovima engleske škole (Kimber, Simens, 1982.) zasićen tok je i dalje zavisao od širine trake, ali vrednosti su znatno više nego one iz sedamdesetih godina, a u model su uvedeni i uticaji kompozicije prilaza⁵, dvojnih traka iste namene, perioda dana, meteoroloških uslova itd.

Razlike u pristupima definisanju zasićenog toka, u preporučenim vrednostima i karakteru saobraćajnog okruženja, uticale su na veliki broj istraživanja u svetu i kod nas. Na bazi istraživanja veličine i karaktera zasićenog toka u našim gradovima formulisan je pristup koji se preporučuje za praktičnu primenu u nas i koji je prikazan u sledećem poglavlju.

16.3.2 Postupak određivanja zasićenog toka

Na osnovu iskustava stečenih tokom dugogodišnjih istraživanja zasićenog saobraćajnog toka može se istaći nekoliko važnih činjenica koje su osnova modela preporučenog za korišćenje u našim uslovima.

(A) - Zasićen tok ima više kategorija; osnovna, polazna veličina je "idealni zasićen tok" koji ima jedinstvenu vrednost od 2290 PAJ/sat; ova vrednost predstavlja najpovoljniju kombinaciju brojanja vozila u malim intervalima zelenog perioda; idealni zasićen tok podrazumeva optimalne uslove u saobraćajnom toku i okruženju, disciplinovane i agresivne vozače, povoljne meteorološke i druge uslove, traku pravo na raskrsnici pravilne geometrije (širine 3m i dužine saobraćajne trake na prilazu veće od 35m), bez nagiba prilaza, trajanje zelenog perioda od jednog sata, odsustvo ometanja od strane pešaka i drugih vozila;

(B) - U stvarnim uslovima, dakle na postojećoj uličnoj mreži, realizacija idealnog zasićenog toka je veoma retka jer ni vozači, a ni druge okolnosti ne dostižu idealne uslove istovremeno; ono što se beleži brojanjima je neka transformacija idealnog zasićenog toka, po vrednosti uvek manja od njega; takav tok je nazvan "operativan tok"

⁵ Misli se na način na koji je prilaz raskrsnici "složen" i razvijen u odnosu na osu saobraćajnice i ivice kolovoza.

(radni) i on je osnova za sve dalje proračune; operativan tok je tok koji pripada zasićenim stanjima ali se od idealnog zasićenog toka razlikuje zbog uticaja stanja u kome je zabeležen;

(C) - Veličina operativnog toka zavisi od tipa signalnog plana odnosno broja i tipa konflikata u pojedinim fazama signalnog plana, tipa (namene) trake, od ponašanja vozača i stanja okruženje i od veličine grada kome pripada posmatrana raskrsnica;

(D) - Operativni tok može biti ravnomerno raspoređen tokom zelenog intervala ali se može pojaviti i samo tokom dela tog intervala (na njegovom početku ili kraju); veličina operativnog toka zavisi i od međudnosa tokova u jednoj fazi; operativan tok ima maksimalnu vrednost od 2120 vozila, a njegova minimalna korigovana vrednost iznosi 600⁶ vozila na sat "zelenog svetla";

Maksimalnu vrednost ili vrednost blisku idealnom zasićenom toku operativan tok dostiže po pravilu u velikom gradu, ako su u pitanju agresivni i vešti vozači i ako je signalni plan sa malim brojem konflikata među tokovima.

Postupak proračuna zasićenog toka sastoji se od tri koraka:

I korak predstavlja utvrđivanje veličine operativnog toka po tipu trake ili grupe traka (dve ili tri trake pravo, dve trake levo i sl.) i po tipu signalnog plana (faze ili stanja). Najviše vrednosti operativnog toka ima signalni plan bez konflikata sa tzv. "čistim" ili zaštićenim fazama (leva skretanja regulisana direkcionim signalom odvijaju se bez konflikta sa vozilima iz suprotnog smera), a najniže vrednosti ima operativni tok za "klasičan", dvofazni signalni plan na raskrsnici sa mešovitim trakama.

II korak proračuna predstavlja korekciju veličine operativnog toka zbog uticaja pešaka⁷ (trake za skretanja ili mešovite trake), konflikata tokova u levom skretanju sa suprotnim tokom i strukture saobraćajnog toka (učešća komercijalnih vozila);

III korak prilagođavanja veličine operativnog toka je korekcija koja je uzrokovana veličinom grada: u grupu velikih gradova spadaju gradovi sa više od 300 hiljada stanovnika, srednje veliki imaju između 40 hiljada i 300 hiljada, a mali gradovi imaju manje od 40 hiljada stanovnika; uticaj veličine grada u suštini predstavlja uticaj ponašanja vozača u sistemu, njihove discipline, "agresivnosti", načina korišćenja raspoloživog vremena tokom "zelenog intervala".

⁶ Ako vrednost zasićenog saobraćajnog toka jedne saobraćajne trake (nakon primene korekcionih faktora na njegovu operativnu vrednost) iznosi manje od 600voz/sat, usvaja se ova vrednost kao minimalna i referentna za dalje proračune.

⁷ Ukoliko ne postoji tačan podatak o veličini toka, on se može pretpostaviti;

Model zasićenog toka u skraćenom obliku⁸ glasi:

$$S_i = S_{op} * N * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 \quad [\text{voz/sat "zelenog"}] \quad (1)$$

- S_{op} - operativan tok (Tabele 1, 2 i 3),
 N - broj traka iste namene,
 f_1 - uticaj pešaka (Tabela 4),
 f_2 - uticaj konfliktnog toka (Tabela 5),
 f_3 - uticaj strukture toka (Tabela 6),
 f_4 - uticaj veličine grada (Tabela 7).

Određivanje veličine operativnog toka S_{op} se vrši korišćenjem osnovnih tabela:

Tabela 1: TRAKA PRAVO (voz/sat)

	Tip signalnog plana:		
	A*	B	C
S_{op}	1600	1900	2120

^{*)} Objasnjenja simbola slede.

A - leva skretanja iz suprotnog smera se opslužuju istovremeno (u istoj fazi) sa prioritetnim tokom pravo, ometaju ga i doprinose znatnom umanjenju vrednosti zasićenog toka; najčešći slučaj kod dvofaznog signalnog plana;

B - različit tretman levih skretanja u odnosu na konfliktni tok: u jednom stanju tokovi pravo se odvijaju skupa sa konfliktnim levim skretanjem, a u drugom stanju su konfliktna leva zaustavljena, a tok pravo neometan; operativna vrednost zasićenog toka je između minimalne (pri ometanjima levim skretanjima) i maksimalne (bez ometanja), pa se, ne znajući relativno trajanje dvaju stanja, pri proračunu usvaja srednja vrednost; višefazan⁹ signalni plan;

C - tokom celog ciklusa nema konflikta između toka pravo i levih skretanja iz suprotnog smera; kod višefaznog signalnog plana sa zaštićenim levim skretanjima;

Tabela 2: POSEBNA TRAKA ZA SKRETANJE (voz/sat)

	Traka za levo ili desno skretanje
S_{op}	max 1750 - 1800; preporučeno 1500

⁸ Osim navedenih, postoje i uticaji koji potiču od nagiba kolovoza, parkiranih vozila na kolovozu, stajališta autobusa, meteoroloških uslova, stanja kolovoza itd.

⁹ "Višefazan", znači sa više od dve faze ili signalna stanja.

Tabela 3: MEŠOVITA TRAKA (pravo i levo; pravo i desno) (voz/sat)

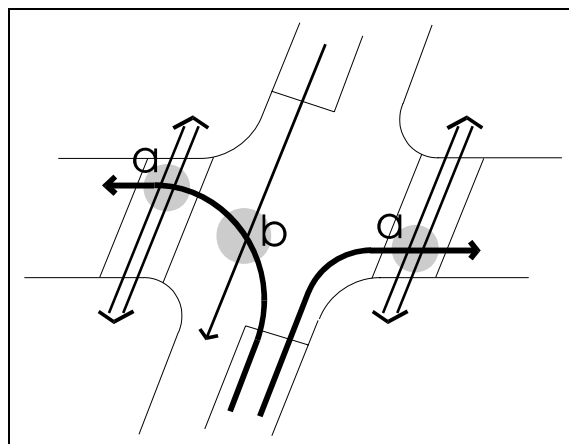
	Procenat vozila u skretanju										
	<5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	>50
S _{op}	1550	1538	1490	1450	1430	1400	1370	1360	1350	1330	*

^{*)} Ako je u mešovitoj traci procenat vozila u skretanju veći od 50, treba otvoriti posebnu traku za skretanje ili ispitati neophodnost postojanja smeru pravo u režimu saobraćaja raskrsnice.

Mešovita traka za levo i desno - 1470 (voz/sat);
 Mešovita traka za sve smerove - 1250 (voz/sat).

Tabela 4: Uticaj PEŠAKA na vozila u skretanju (Slika 16.3 - slučaj "a")

	Intenzitet pešačkog toka [pešaka/sat]											
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	
f ₁	0,97	0,95	0,92	0,87	0,82	0,76	0,69	0,62	0,57	0,53	0,50	



Slika 16.3

Tabela 5: Uticaj KONFLIKTNOG TOKA u istoj fazi (Slika 16.3 - slučaj "b")

	Intenzitet konfliktnog toka [voz/sat]											
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	>500	
f ₂	0,97	0,94	0,90	0,83	0,75	0,67	0,60	0,56	0,53	0,51	0,51	

Tabela 6: Uticaj STRUKTURE TOKA

	Procenat komercijalnih vozila u toku							
	5	7	10	12	15	17	20	25
f ₃	0,97	0,95	0,92	0,90	0,87	0,85	0,83	0,79

Tabela 7: Uticaj VELIČINE GRADA (broja stanovnika)

	< 40.000	40.000 - 300.000	> 300.000
f ₄	0,85	0,90	1,0

16.3.3 Kapacitet raskrsnice

Kapacitet raskrsnice upravljane svetlosnim signalima zbir je kapaciteta svih njenih prilaza, odnosno zbir kapaciteta pojedinih grupa traka na prilazima. On predstavlja maksimalnu veličinu saobraćajnog toka koji tokom jednog sata može da prođe raskrsnicom u realnim uslovima saobraćaja i pri aktuelnom načinu upravljanja. Prevođenje saobraćajnog toka, koji na neki način predstavlja "idealni kapacitet", na realne uslove i vrednost realnog kapaciteta vrši se njegovim prevođenjem sa hipotetičkog "sata zelenog vremena" na stvaran udeo "zelenog intervala" u ciklusu rada svetlosnih signala (stvarno trajanje zelenog signalnog pojma tokom realnog intervala vremena od jednog sata).

$$K_i = S_i * \frac{z}{C} = S_i * \lambda_j \quad (\text{voz/sat}) \quad (2)$$

Kapacitet saobraćajne trake ili grupe traka se proračunava pomoću izraza:

K_i - kapacitet grupe traka (i) na prilazu,

S_i - zasićen saobraćajni tok [voz/sat],

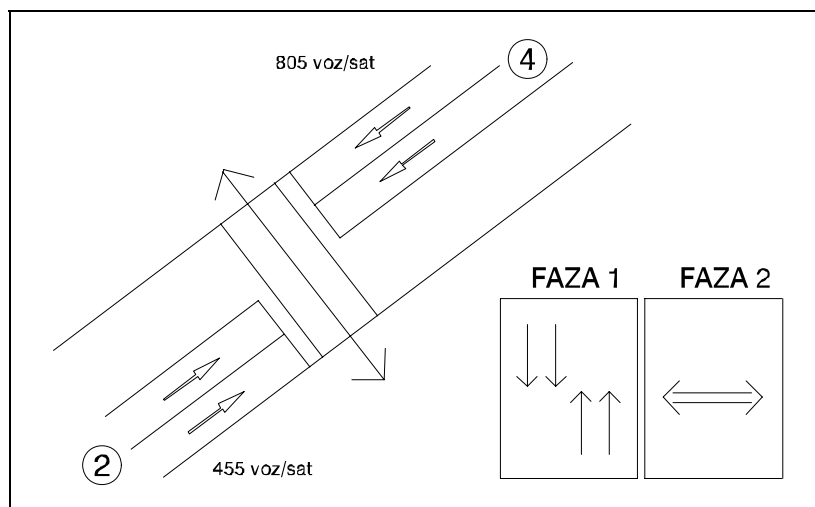
λ_j - odnos pripadajućeg efektivnog zelenog intervala (z_j) i ciklusa (C).

Za slučaj sa Slika 16.2 kapacitet posmatranog prilaza iznosi 300voz/sat, jer je odnos trajanja zelenog intervala i dužine ciklusa 0,25 (30/120), a zasićen saobraćajni tok 1200voz/sat (ako se zanemare drugi uticajni faktori na zasićeni tok).

16.3.4 Primeri određivanja vrednosti zasićenog toka osnovnom metodom

Primer A:

Izračunati veličinu zasićenog toka i kapacitet prilaza čvora prikazanog na Slika 16.4. Čvor je lociran na uličnoj mreži velikog grada, a pešaci su disciplinovani.



Slika 16.4

Iz prikaza se može uočiti da postoje dve različite zaštićene faze: u prvoj se kreću vozila (smerovi 2-4 i 4-2), a u drugoj pešaci. Operativni tok oba prilaza je na najvišem nivou. Koristeći Izraz 1 i Tabelu 1 dobija se:

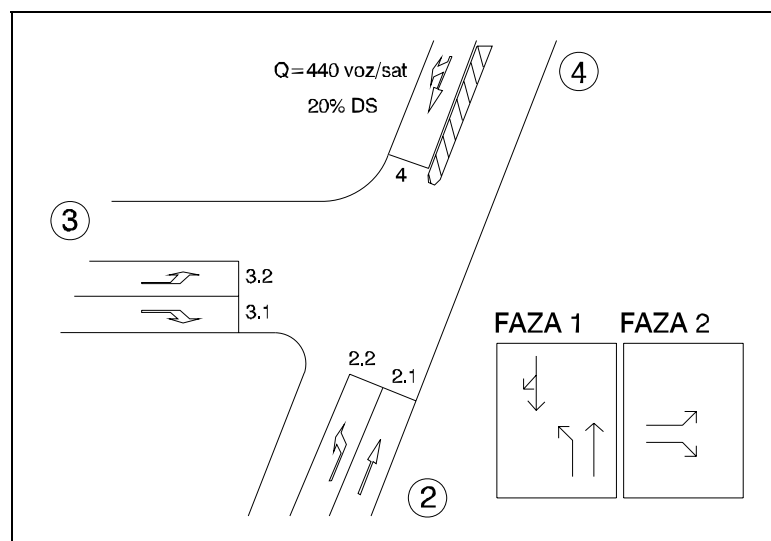
$$S_2=S_4=2120*2*1,0*1,0*1,0*1,0=4240 \text{ (voz/sat "zelenog")}$$

Kapacitet prilaza proračunava se pomoću izraza (2) i za "zeleni interval" od 80 sekundi i trajanja ciklusa od 120 sekundi on iznosi:

$$K_{2-4}=K_{4-2}=4240*80/120=4240*0,66=2827 \text{ (voz/sat)}$$

Primer B:

Izračunati veličine zasićenog toka za prilaze na "T" raskrsnici sa dvofaznim signalnim planom lociranoj u malom gradu (Slika 16.5).



Slika 16.5

Koristeći izraz 1 i Tabele 1, 2 i 5 dobijaju se tražene vrednosti zasićenog toka. Traka "pravo" na prilazu 2 opslužuje se bez ometanja skretanjima iz suprotnog smera, pa operativni tok uzima maksimalnu vrednost iz Tabele 1 (koriguje se samo faktorom uticaja veličine grada iz Tabele 7):

$$S_{2,1}=2120*1,0*1,0*1,0*0,85=1802 \text{ (voz/sat)}$$

Uticaj konfliktnog toka na levo skretanje sa prilaza 2 može se tumačiti dvojako, u zavisnosti od broja raspoloživih saobraćajnih traka "na izlazu" prilaza 3. Ako su raspoložive dve trake onda vozila u levom skretanju nisu ometena tokovima sa prilaza 4 koji su u desnom skretanju, intenzitet ometajućeg toka pravo iznosi $Q_{42}=440*0,8=352$ voz/sat, pa je $f_2=0,6$ (Tabela 5):

$$S_{2,2}=1500*1,0*0,6*1,0*0,85=765 \text{ (voz/sat)}$$

U slučaju da je na "izlazu" prilaza 3 raspoloživa samo jedna saobraćajna traka, sva vozila sa prilaza 4 ometaju realizaciju levog skretanja ($Q_4=440$ voz/sat), pa je korekcionni faktor manji ($f_2=0,53$), a vrednost zasićenog toka iznosi:

$$S_{2,2}=1500*1,0*0,53*1,0*0,85=676 \text{ (voz/sat)}$$

$$S_2=S_{2,1}+S_{2,2}=1802+676=2478 \text{ (voz/sat)}$$

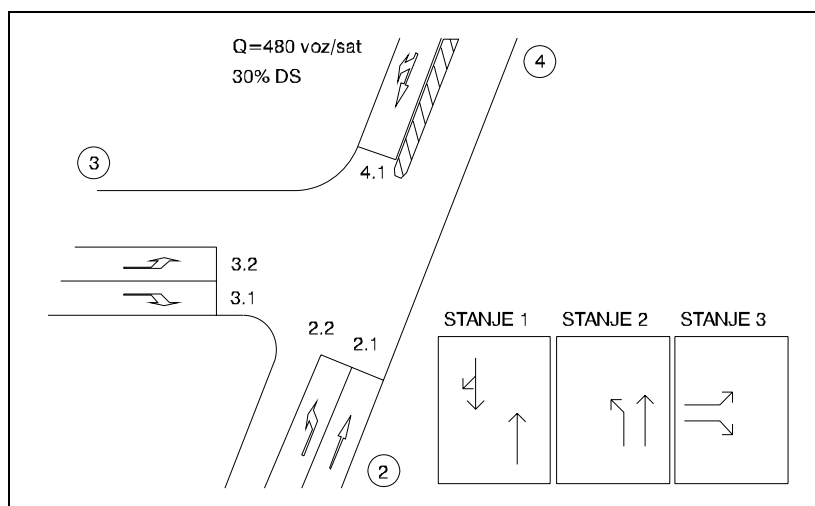
Koristeći Tabele 3 i 4 dobijaju se sledeći rezultati za preostala dva prilaza:

$$S_3=S_{3,1}+S_{3,2}=2*1500*1*1,0*1,0*1,0*0,85=2550 \text{ (voz/sat); } (S_{3,1}=S_{3,2})$$

$$S_4=1450*1,0*1,0*1,0*0,85=1233 \text{ (voz/sat)}$$

Primer C:

Ako je učešće komercijalnih vozila u toku 20%, a raskrsnica locirana u gradu od 100.000 stanovnika, izračunati zasićene tokove za signalni plan prema šemi prikazanoj na Slika 16.6.



Slika 16.6

Kada je signalni plan složeniji po strukturi, zasićeni tokovi se izračunavaju po stanjima (fazama):

Stanje 1: $S_{4,1}=1400*1,0*1,0*0,83*0,90=1046 \text{ (voz/sat)}$

$$S_{2,1}=2120*1,0*1,0*0,83*0,90=1584 \text{ (voz/sat)}$$

Stanje 2: $S_{2,2}=1500*1,0*1,0*0,83*0,90=1121 \text{ (voz/sat)}$

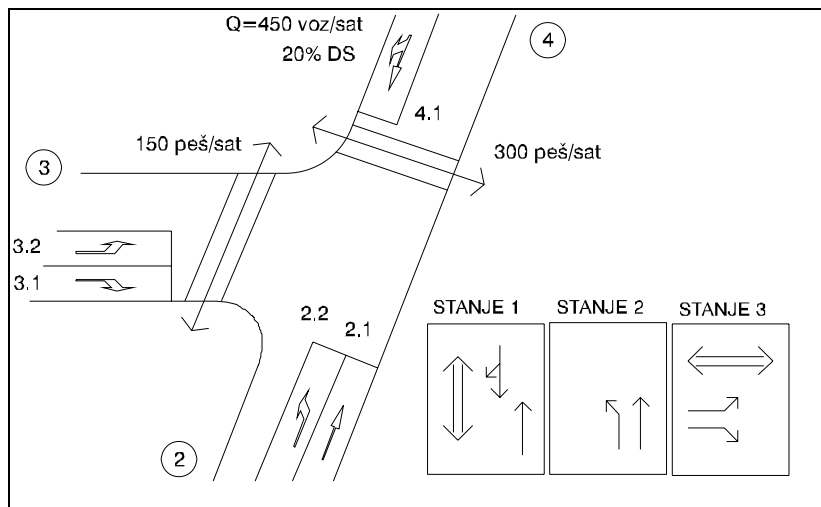
$S_{2,1}$ - kao i u prethodnom stanju

Stanje 3: $S_{3,1}=S_{3,2}=1500*1,0*1,0*0,83*0,90=1121 \text{ (voz/sat)}$

Prilikom proračuna određivanja zasićenog toka za traku 2.1 potrebno je voditi računa da ona ima pravo kretanja u stanju 1 i stanju 2, i da je u oba slučaja to kretanje neometano (zato je i primenjena maksimalna vrednost operativnog toka iz Tabele 1). Ta vrednost je korigovana uticajem strukture toka i veličine grada. pri proračunu kapaciteta treba voditi računa da traka 2.1 ima "zeleni interval" tokom dva stanja.

Primer D:

Izračunati zasićene tokove na "T" raskrsnici za zadati signalni plan (Slika 16.7), za slučaj da na raskrsnici postoje pešački tokovi i da je ona locirana u velikom gradu.



Slika 16.7

Obzirom da u stanjima 1 i 3 postoje konflikti pešaka i vozila u skretanju signalni plan spada u tip B, a iz Tabela 1, 2, 3 i 4 sledi:

Stanje 1: $S_{4,1}=1450*0,92*1,0*1,0*1,0=1334$ (voz/sat)
 $S_{2,1}=2120*1,0*1,0*1,0*1,0=2120$ (voz/sat)

Stanje 2: $S_{2,2}=1500*1,0*1,0*1,0*1,0=1500$ (voz/sat)
 $S_{2,1}$ - kao i u prethodnom stanju

Stanje 3: $S_{3,1}=1500*1,0*1,0*1,0*1,0=1500$ (voz/sat)
 $S_{3,2}=1500*0,76*1,0*1,0*1,0=1140$ (voz/sat)

Ako se uporede primeri D i C (traka 4.1) uočava se razlika u veličini zasićenog toka za slučaj prisustva i odsustva pešačkih tokova, kao i veliki uticaj veličine grada i povoljnije strukture toka na veličinu zasićenog toka koji uticaj pešaka kompenziraju.

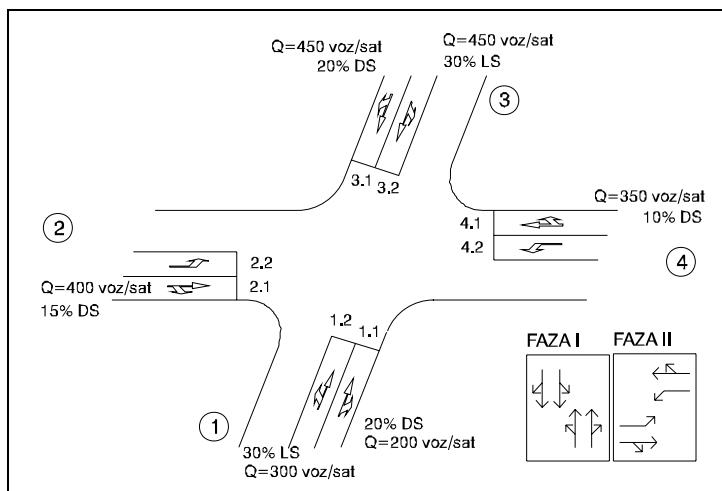
Primer E:

Izračunati zasićene tokove na četvorokrakoj raskrsnici prikazanoj na Slika 16.8 za slučajeve kada je signalni plan dvofazan i trofazan (Slika 16.9). Raskrsnica je locirana u velikom gradu i na njoj nema pešačkih tokova.

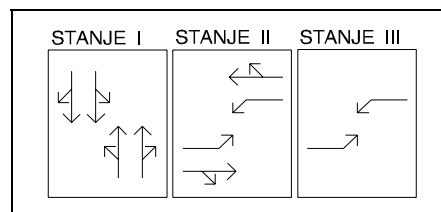
Dvofazan signalni plan (K_t - intenzitet konfliktnog toka):

Faza I: $S_{1,1}=1450*1,0*1,0*1,0*1,0=1450$ (voz/sat)
 $S_{1,2}=1400*1,0*0,51*1,0*1,0=714$ (voz/sat)- $K_t>500$ (voz/sat)
 $S_1=S_{1,1}+S_{1,2}=1450+714=2164$ (voz/sat)

$S_{3,1}=1450*1,0*1,0*1,0*1,0=1450$ (voz/sat)
 $S_{3,2}=1400*1,0*0,56*1,0*1,0=784$ (voz/sat)- $K_t=410$ (voz/sat)
 $S_3=S_{3,1}+S_{3,2}=1450+784=2234$ (voz/sat)



Slika 16.8



Slika 16.9

Faza II:

$$S_{2.1} = 1490 * 1,0 * 1,0 * 1,0 * 1,0 = 1490 \text{ (voz/sat)}$$

$$S_{2.2} = 1500 * 1,0 * 0,6 * 1,0 * 1,0 = 900 \text{ (voz/sat)} - K_i = 350 \text{ (voz/sat)}$$

$$S_2 = S_{2.1} + S_{2.2} = 1490 + 900 = 2390 \text{ (voz/sat)}$$

$$S_{4.1} = 1538 * 1,0 * 1,0 * 1,0 * 1,0 = 1538 \text{ (voz/sat)}$$

$$S_{4.2} = 1500 * 1,0 * 0,56 * 1,0 * 1,0 = 840 \text{ (voz/sat)} - K_i = 400 \text{ (voz/sat)}$$

$$S_4 = S_{4.1} + S_{4.2} = 1538 + 840 = 2378 \text{ (voz/sat)}$$

Trofazan signalni plan (tri signalna stanja):

Stanja I i II su ista kao i u slučaju dvofaznog signalnog plana.

Stanje III je u ovom slučaju zaštićena faza, pa su zasićeni tokovi:

$$S_{2.2} = S_{4.2} = 1500 * 1,0 * 1,0 * 1,0 * 1,0 = 1500 \text{ (voz/sat)}$$

Primer sa tri stanja ilustruje slučaj kada ista traka ili tok (traka za levo skretanje) ima dva različita režima opsluživanja tokom svog "zelenog perioda": jednim je skretanje dozvoljeno (uz konflikt sa suprotnim smerom), a drugim je skretanje zaštićeno (beskonfliktno). Korektna vrednost zasićenog toka trake u ovom slučaju bi se dobila ponderisanjem vrednosti za dva različita stanja u skladu sa trajanjem svakog od njih tokom signalnog plana. Za slučaj iz primera pri 20 sekundi zelenog intervala stanja II i 30 sekundi zelenog intervala stanja III, zasićeni tok trake 2.2 bi iznosio:

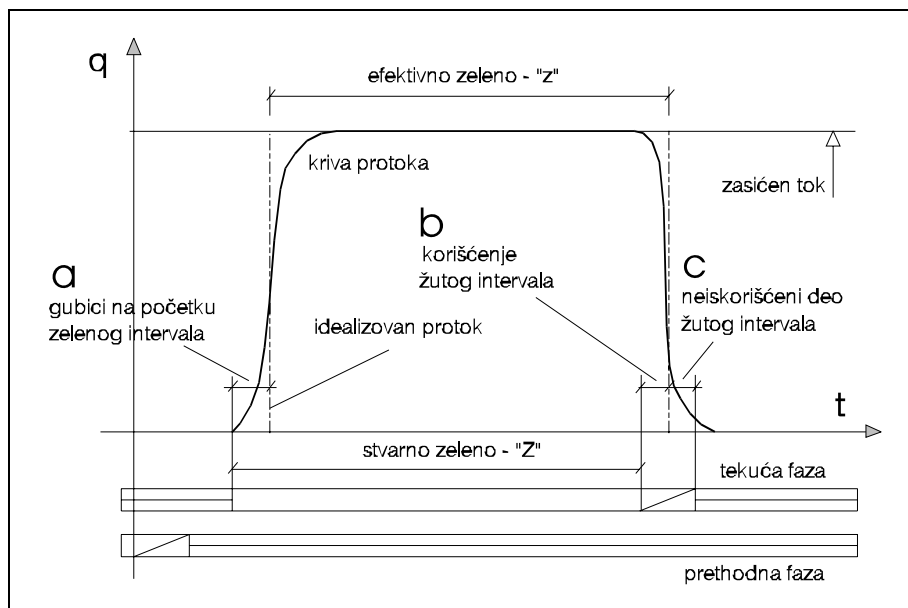
$$S_{2.2} = (20 * 900 + 30 * 1500) / (20 + 30) = 1260 \text{ voz/sat.}$$

16.4 Elementi signalnog plana

16.4.1 Vremenski gubici tokom zelenog intervala i efektivno zeleno vreme

Protok vozila sa prilaza preko linije zaustavljanja tokom intervala dozvoljenog prolaza (zeleni i žuti signalni pojam) nije konstantan. Njegova karakteristična vremenska raspodela predstavljena je q-t dijagramom (Slika 16.10). Glatkost krive je rezultat statističke obrade većeg uzorka zasićenih zelenih intervala i svođenja intervala posmatranja na beskonačno malu meru. Realnija matematička predstava raspodele protoka je posredstvom histograma jer se radi o pojavi diskretnog karaktera koja se osmatra utvrđivanjem protoka u takođe diskretnim vremenskim intervalima (obično po 6 sekundi).

Nemogućnost trenutnog dostizanja vrednosti zasićenog toka prilikom pojavljivanja zelenog signalnog pojma kao i nemogućnost trenutnog svođenja toga toka na nulu u trenutku gubitka žutog signalnog pojma su logične posledice inercijalnosti u kretanju vozila i karakterističnog ponašanja i reakcije vozača. Sa upravljačkog gledišta u ta dva slučaja se tokom prelaznog režima pojavljuje deo neiskorišćenog teorijskog kapaciteta prilaza. Pošto je osnovna upravljačka dimenzija vreme, ovaj neiskorišćeni kapacitet se svodi i iskazuje u vremenskim jedinicama, i naziva se vremenskim gubicima tokom "zeleno faze" (čine ga gubici na početku zelenog i neiskorišćeni deo žutog intervala).



Slika 16.10

Činjenica da se teorijski raspoloživo vreme za prolazak raskrsnicom ne koristi u potpunosti navodi na određivanje vremenskog intervala za koji se može smatrati da se potpuno koristi i koji se naziva *efektivno zeleno vreme*. Radi se o fiktivnom intervalu koji se određuje svođenjem prolaska ukupnog toka vozila tokom zelenog i žutog signalnog pojma na vreme koje bi tom toku bilo potrebno da prođe liniju zaustavljanja pri konstantnom maksimalnom intenzitetu protoka - zasićenom toku. To fiktivno vreme se

svakako razlikuje od stvarno raspoloživog zelenog koje prikazuje signal na prilazu raskrsnice (ako ne po trajanju, onda sigurno po "lokaciji" u signalnom planu). Na q-t dijagramu ovaj interval se određuje svođenjem krive protoka na ortogonalnu formu, pri čemu su integrali funkcija (površina omeđena t-osom i linijama) u oba slučaja jednaki. Intervali prelaznog režima protoka se praktično "dele" na po dva dela: izgubljeno vreme i deo koji pripada efektivnom zelenom vremenu.

U odnosu na stvarno zeleno vreme efektivno zeleno vreme je kraće za vremenske gubitke na početku, ali je duže za deo žutog intervala koji se koristi (Slika 16.10).

$$z = Z - a + b \quad (\text{s}) \quad (4)$$

$$Z + \bar{Z} = z_{\text{eff}} + d = z_{\text{eff}} + d' + d''$$

Potrebno je zapaziti i činjenicu da je zbir stvarnog zelenog i žutog vreme jednak zbiru efektivnog zelenog, gubitaka na početku zelenog i neiskorišćenog žutog vremena.

Realan kapacitet prilaza (saobraćajne trake ili grupe traka iste namene) raskrsnice upravljane svetlosnim signalima računa se prema ranije izloženom izrazu (2) uz napomenu da je u njemu navedeno "z" efektivno zeleno vreme.

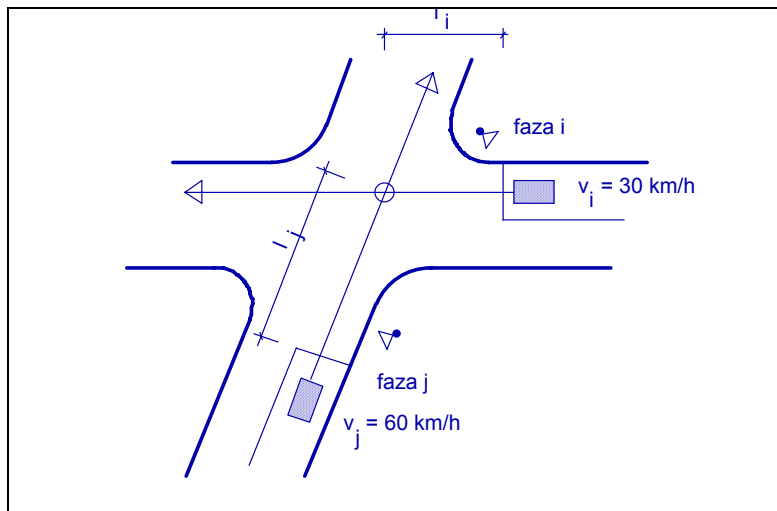
16.4.2 Zaštitno vreme u okviru signalnog plana

Efikasnost regulisanja tokova na raskrsnici upravljanoj svetlosnim signalima i bezbednost koja se tom prilikom obezbeđuje, rezultat su između ostalog i smanjene konfliktnosti saobraćajnog režima raskrsnice (smanjeni broj i "težina" konflikata tokova). Saobraćajni tokovi koji se opslužuju u okviru jedne faze (ili signalnog stanja) nemaju konflikta sa tokovima koji se opslužuju u okviru drugih faza jer su vremenski razdvojeni intervali njihovog pojavljivanja u raskrsnici.

Kakvo i koliko će biti razdvajanje intervala tokom kojih se opslužuju nekompatibilni tokovi (čiji se međusobni konflikt upravljački sprečava) zavisi od geometrije konkretne raskrsnice i rezultat je proračuna zaštitnih vremena. Slika 16.11 ilustruje tipičan slučaj konflikta dvaju tokova koji je potrebno bezbedno realizovati u okviru signalnog plana. Tok koji gubi pravo prolaska raskrsnicom predstavljen je poslednjim vozilom koje u okviru dozvoljenog intervala ulazi u raskrsnicu, a tok koji dobija pravo prolaska predstavlja prvo vozilo u redu pred linijom zaustavljanja.

$$\Delta t_{i-j} = \frac{l_i}{V_i} - \frac{l_j}{V_j} + 1 \quad (\text{s}) \quad (5)$$

Opšti izraz za proračun zaštitnog vremena uzima u obzir ekstremne slučajevne kretanja vozila dvaju tokova čiji konflikt se sprečava: toka "i" koji gubi pravo prolaza prestankom njegove faze i toka "j" koji to pravo dobija u sledećoj fazi signalnog plana



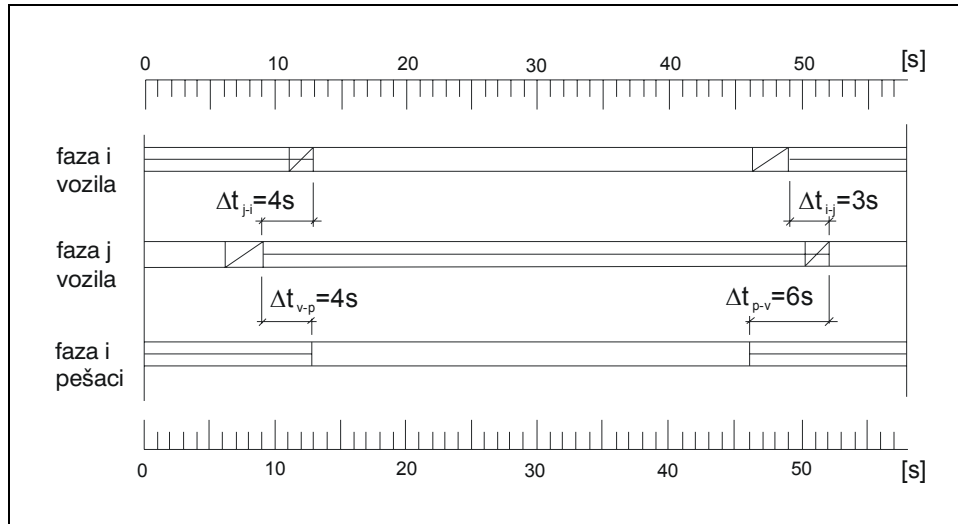
Slika 16.11

Trenutkom gubitka prava prolaska raskrsnicom tokova jedne faze se smatra trenutak pojavljivanja crvenog signalnog pojma na odgovarajućim prilazima raskrsnice, odnosno trenutak prestanka "žutog intervala". To je poslednji trenutak kada vozilo sa tog prilaza legalno prelazi liniju zaustavljanja, ulazi u centralni prostor raskrsnice i kreće se ka potencijalnoj konfliktnoj tački sa tokom iz sledeće faze. Da bi ovo vozilo prošlo tu konfliktnu tačku pre nailaska vozila konfliktnog toka i da bi time bila potpuno otklonjena mogućnost konflikta sa njima potrebno je da protekne određeno vreme. To vreme je rezultat rastojanja koje vozilo prelazi od linije zaustavljanja trake "i" do konfliktno tačke i brzine kojom se ono kreće. Logično je da vozilo koje ulazi u raskrsnicu u poslednjem trenutku "žutog intervala" čini to brzinom koja je povećana, da bi "stiglo" da prolazak raskrsnicom obavi u dozvoljenom intervalu i bezbedno. Radi sigurnosti, pri proračunu neophodne bezbedne zaštite pretpostavlja se nepovoljnija varijanta: da se ovo vozilo kreće ka konfliktnoj tački brzinom manjom od realno očekivane ($V_i=30\text{km/h}$).

Vozilo koje dobija pravo prolaza u narednoj fazi ne pojavljuje se u konfliktnoj tački trenutno. Ono najranije legalno polazi sa linije zaustavljanja trake "j" u trenutku pojavljivanja zelenog signalnog pojma na pripadajućem signalu. Da bi stiglo do konfliktno tačke sa vozilom iz prethodne faze potrebno je da savlada put od svoje zaustavne linije do te tačke. Vreme koje mu je za to potrebno ulazi u proračun zaštitnog vremena sa negativnim predznakom i za njegov iznos se može umanjiti prethodno izračunato vreme vozila iz faze koja gubi pravo prolaza. Ovo vreme takođe zavisi od dužine puta i brzine kojom se on savladava. Verovatno je da će ta brzina biti u klasi nižih jer prvo vozilo najčešće polazi iz stanja mirovanja (mada je moguć i takozvani "leteći start"). Ponovo se radi veće sigurnosti pri proračunu pretpostavlja da se ovo vozilo kreće nepovoljnijom brzinom od realno očekivane ($V_j=60\text{ km/h}$).

Treći činilac u izrazu za izračunavanje zaštitnog vremena je fiksna sekunda koja se uvek dodaje prethodnim činiocima. Ona uvećava zaštitno vreme predstavljajući dodatnu sigurnost i kompenzirajući sva uopštavanja i pojednostavljenja koja su tokom proračuna uvođena (zanemarivanje širina i dužina vozila, neprecizno merenje dužina puteva do tačke konflikta, zaokruživanja na celobrojne vrednosti). Sva prethodno učinjena povećanja stepena sigurnosti dozvoljavaju da se konačno izračunato zaštitno vreme zaokruži i na manju celobrojnu vrednost bez bojazni da će to biti uzrok nebezbednog upravljanja.

Izračunato i usvojeno zaštitno vreme između dveju sukcesivnih faza je u planu tempiranja signala interval $\Delta t_{i,j}$ između trenutka pojavljivanja crvenog signalnog pojma na prilazima koji gube pravo prolaska raskrsnicom ("i") i trenutka pojavljivanja zelenog signalnog pojma na prilazima koji zatim dobijaju pravo prolaska ("j"). Ono postoji pri svakoj promeni faza ili signalnih stanja koje obuhvataju nepoželjne konflikte (Slika 16.12).

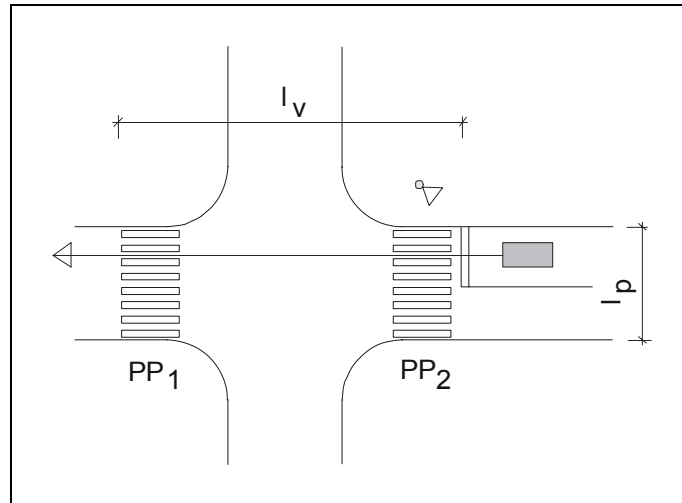


Slika 16.12

U svakoj od faza signalnog plana biva opsluživan veći broj tokova. Tako se na prelazu između dveju faza zaštitno vreme može izračunati za svaki par konfliktnih tokova koji pripadaju različitim fazama. U signalnom planu se, međutim između dve susedne faze pojavljuje samo po jedno zaštitno vreme i to je najveće među svim izračunatim za konkretnu izmenu faza.

Da bi se pouzdano usvojila i u signalni plan ugradila odgovarajuća zaštitna vremena izračunavaju se zaštite između svih, režimom signala razdvojenih, konfliktnih tokova. Radi preglednosti i jasnijeg uočavanja ova se vremena zapisuju u okviru matrice zaštitnih vremena (to je istovremeno i matrica kompatibilnosti tokova). Radi se o kvadratnoj matrici gde svakom od postojećih tokova na raskrsnici pripadaju po jedan red i po jedna kolona. U preseku redova i kolona koji pripadaju beskonfliktnim kretanjima ili istoj fazi (stanju) nema zaštitnog vremena, dok se za sve ostale preseke upisuju izračunata zaštitna vremena. Zatim se tokovi grupišu po fazama i jasno uočavaju najveće vrednosti zaštita za svaku izmenu faza sa kojima se ulazi u proračun signalnog plana i plan tempiranja signala.

Zaštitna vremena se obezbeđuju i između konfliktnih tokova vozila i pešaka koji pripadaju susednim fazama. Logika je slična onoj u proračunu za vozila ali ima i specifičnosti. One su pre svega vezane za tretman konfliktne tačke koja u ovom slučaju više nije materijalna tačka u preseku trajektorija kretanja konfliktnih tokova. U slučaju konflikta vozila i pešaka ona prerasta u konfliktnu površinu koju predstavlja pešački prelaz na kome se razmatrani pešaci pojavljuju (PP1 i PP2 na Slika 16.13).



Slika 16.13

U proračunu zaštitnog vremena ponovo je prvi član namenjen kretanju koje gubi pravo prolaza. Ako se u fazi koja gubi to pravo kreću vozila onda poslednjem legalno opsluženom vozilu treba izvesno vreme da prođe najudaljeniju tačku mogućeg konflikta sa pešacima sledeće faze (leva ivica prelaza PP1 na Slika 16.13, ako se PP1 i PP2 opslužuju simultano). To vreme je određeno rastojanjem od linije zaustavljanja sa koje vozilo ulazi u raskrnicu do najudaljenije ivice konfliktnog pešačkog prelaza na prilazu kojim ono napušta raskrnicu i brzinom kretanja vozila. Ponovo se za brzinu pretpostavlja vrednost koja garantuje veću sigurnost ($V_v=30\text{km/h}$). Vremenska zaštita između vozila i pešaka se izračunava izrazom:

$$\Delta t_{v-p} = \frac{l_v}{V_v} + 1 \quad (\text{s}) \quad (6)$$

Drugi član iz proračuna za zaštitu vozila od vozila u slučaju zaštite pešaka izostaje. Naime, to bi bilo vreme koje je pešacima potrebno da sa svoje "startne" pozicije dođu do konfliktne tačke. Smatra se da pešak stupanjem na kolovoz makar jednom nogom već biva u zoni konflikta, pa je ovo vreme sasvim kratko i u proračunu se izostavlja. Kao drugi član izraza za zaštitno vreme ovde se pojavljuje fiksna sekunda dodatne sigurnosti.

U slučaju da pešačka faza prestaje, a nastupa faza sa konfliktnim tokom vozila prvi član izraza za zaštitno vreme je namenjen vremenu potrebnom da pešaci napuste konfliktnu "tačku" (površinu). Ako je u poslednjoj sekundi zelenog svetla za pešake pešak stupio na kolovoz njemu je potrebno da pređe put jednak dužini prelaza (širini prilaza raskrsnice) da bi na suprotnoj ivici saobraćajnice napustio kolovoz. Za brzinu kretanja pešaka se uzima prosečnih 5km/h , ali se za konkretne slučajeve brzina pešaka može smatrati i nešto nižom ($1,2$ do $1,4\text{m/s}$) i time štiti sporija pešačka populacija (stari, deca, hendikepirani).

$$\Delta t_{p-v} = \frac{l_p}{V_p} + 1 \quad \left(\Delta t_{p-v} = \frac{l_p}{V_p} - \frac{l_v}{V_v} + 1 \right) \quad (\text{s}) \quad (7)$$

Vozilu iz faze koja dobija pravo prolaza potrebno je izvesno vreme da do konfliktnog pešačkog prelaza dođe, pa bi se za taj iznos moglo umanjiti neophodno zaštitno vreme. Put koji ono treba da savlada jednak je rastojanju od linije zaustavljanja sa koje kreće do najbliže ivice pešačkog prelaza sa konfliktnim pešacima. Pretpostavlja se maksimalna brzina ovog vozila u iznosu od $V_v=60\text{km/h}$. Međutim, u najvećem broju slučajeva pešački prelaz sa konfliktnim pešačkim tokovima nalazi se već na 1m od linije zaustavljanja sa koje vozilo kreće (prelaz PP2 na Slici 12), tako da ovaj član izraza uzima veoma male vrednosti i često izostaje iz izraza. U slučaju da PP2 ne postoji drugi član izraza bi postojao i bio baziran na rastojanju do prelaza PP1 (izraz 7 u zagradi). Obavezna fiksna sekunda se dodaje prethodno izračunatim članovima.

Zaštitno vreme za pešake inicijalno ne učestvuje u proračunu signalnog plana. Pešački zeleni intervali se lociraju između početaka crvenog i zelenog intervala konfliktnih vozačkih faza i štite se izračunatim zaštitnim vremenima. Tek ako je ovako određen zeleni interval koji se na pešačkim signalima prikazuje kraći od 5 sekundi interveniše se u signalnom planu i uvećava pešački zeleni interval da bi iznosio bar 5 sekundi.

Ni kraće prikazivanje (trajanje) zelenog signalnog pojma ne bi predstavljalo nebezbedno rešenje, jer je ona namenjena samo "startovanju" pešaka, a bezbedan prelazak preko saobraćajnice u odnosu na narednu vozačku fazu pešacima obezbeđuje izračunato zaštitno vreme. Ipak, ima dosta šanse da zeleno svetlo koje traje manje od 5 sekundi ne bude ni primećeno, da se pešak "uspava" i ne odreaguje na vreme. Tada je česta reakcija započinjanje prelaska tokom već početnog crvenog intervala, pri čemu izračunato zaštitno vreme više ne garantuje izbegavanje konflikta sa vozilima iz naredne faze signalnog plana.

Pored izloženog pristupa određivanju zaštitnih vremena u literaturi i praksi se preporučuju i koriste i druge formule koje polaze od istih opštih principa ali detaljnije razmatraju pojedine elemente procesa (vreme percepcije i reakcije, ubrzanje i usporenje vozila).

16.5 Proračun signalnog plana po modelu WEBSTER-A

Polazna tačka Webster-ovog modela proračuna signalnog plana je izraz za vremenske gubitke vozila na prilazu signalisane raskrsnice. Kao kriterijum proračuna trajanja ciklusa rada signala uzimaju se prosečni vremenski gubici vozila na svim prilazima raskrsnice i izračunavaju upravljačke promenljive koje će obezbediti minimalnu vrednost ovog kriterijuma.

Na osnovu izraza za vremenske gubitke izveden je i izraz za optimalno trajanje ciklusa. On ima smisla uz uslov da je vrednost imenioca pozitivna, odnosno da ne postoje saobraćajni zahtevi bliski zasićenju. U protivnom je potrebno pristupiti izmeni plana faza ili izmeni režima saobraćaja na raskrsnici.

$$C_o = \frac{1.5 * L + 5}{1 - Y} \quad (s) \quad (8)$$

Veličina L predstavlja izgubljeno, odnosno neiskorišćeno vreme tokom ciklusa. To je deo ciklusa kada nijedna faza ne koristi svoje efektivno zeleno vreme. Izračunava se, korišćenjem izraza (9), kao zbir zaštitnih vremena između faza $\Delta t_{i,j}$, vremenskih gubitaka ($d=a+c$), na početku zelenih intervala ("a", na Slika 16.10) i neiskorišćenih delova žutih intervala tokom ciklusa ("c", na Slika 16.10). Ukoliko je zbir "a" i "c" jednak trajanju žutog intervala ($a=b$ na Slika 16.10) i iznosi 3 sekunde (specijalan slučaj), efektivno zeleno vreme traje koliko i stvarno zeleno. Neiskorišćeno vreme ciklusa se i tada izražava kao zbir izgubljenih vremena i zaštitnih vremena ciklusa. Pri tom ne treba gubiti iz vida da se iza broja 3 "kriju" vremenski gubici na početku zelenog i neiskorišćeno žuto, a ne trajanje žutog intervala.

$$L = n * d + \sum_{i=1}^n \Delta t_{i-j} \quad (s) \quad (9)$$

- n - broj faza signalnog plana,
 d - vremenski gubici tokom "zelene faze" (intervala "zeleno+žuto"),
 $\Delta t_{i,j}$ - zaštitno vreme između faze "i" i naredne faze.

U imeniocu izraza za trajanje ciklusa se pojavljuje veličina "Y". Ona predstavlja zbir maksimalnih vrednosti "y_j" za svaku od faza "i" ciklusa (Izraz 10). Veličina "y_j" predstavlja odnos protoka i zasićenog toka saobraćajne trake "j". "Y_i" je maksimalna vrednost ovog pokazatelja među vrednostima za sve trake ili grupe traka koje pripadaju "i"-toj fazi signalnog plana, a posredstvom "Y"-a samo "najopterećenije" trake svake od faza bivaju merodavne za proračun trajanja ciklusa.

$$Y = \sum_{i=1}^n Y_i, \quad Y_i = \max_j \{y_j(i)\} = \max_j \left\{ \frac{Q_i}{S_i} \right\} \quad (10)$$

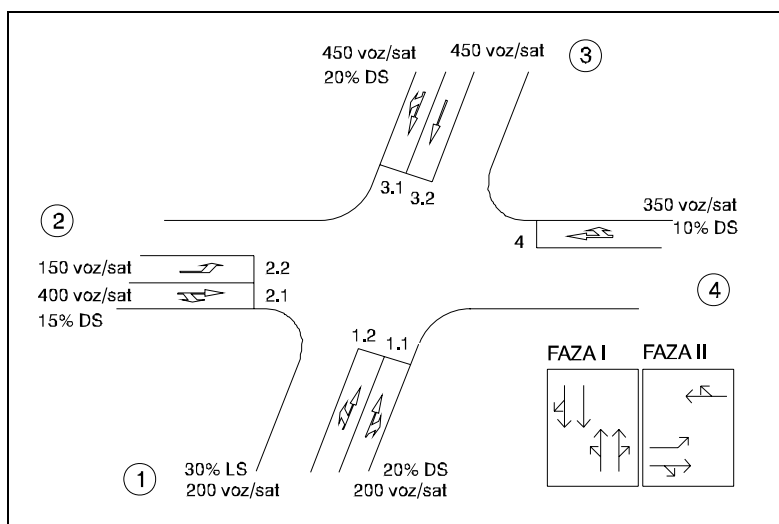
Izračunata vrednost trajanja ciklusa (u prihvatljivom rasponu između 30 i 120 sekundi) se zaokružuje na celobrojnu ili najbližu celobrojnu vrednost deljivu sa pet. Naredni korak predstavlja preraspodela raspoloživog efektivnog zelenog vremena ciklusa na konkurentna kretanja (faze). Ona se obavlja srazmerno iskorišćenjima idealnog kapaciteta merodavnih traka svake od faza signalnog plana.

$$z_i = \frac{Y_i}{Y} * (C - L) \quad (s) \quad (11)$$

Model Webster-a je praktično primenljiv u slučajevima dvofaznih i trofaznih signalnih planova. Veći broj faza obezbeđuje manju konfliktnost tokova u okviru faza ali istovremeno znači i manju iskorišćenost raspoloživog vremena ciklusa (veći broj zaštitnih i izgubljenih vremena) i veću vrednost "Y"-a (zbir većeg broja "Y_i"). To iziskuje trajanje optimalnog ciklusa koje prevazilazi u praksi prihvatljiv maksimum.

16.5.1 Primer primene modela Webster-a

Za raskrsnicu na Slika 16.14 i za priložen plan faza potrebno je odrediti elemente signalnog plana metodom Webster-a. Pri tom koristiti standardne tabelarne i grafičke forme (tabelu iskorišćenja idealnog kapaciteta po trakama, matricu zaštitnih vremena, plan tempiranja signala).



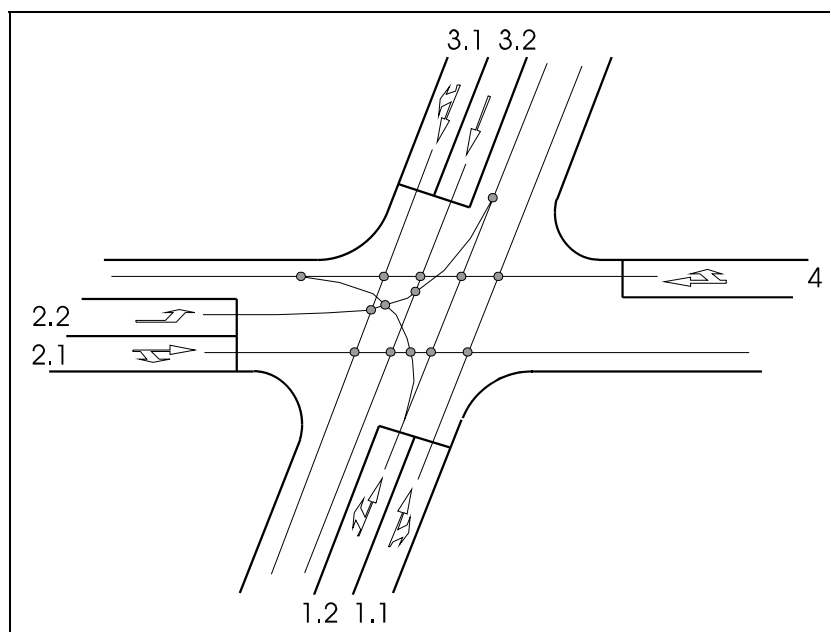
Slika 16.14

Na osnovu podataka o režimu saobraćaja, planu faza i saobraćajnom zahtevu izračunavaju se vrednosti iskorišćenja idealnog kapaciteta po trakama (Tabela 8).

Tabela 8 - Proračun stepena iskorišćenja idealnog kapaciteta

	FAZA I		FAZA II		FAZA I		FAZA II
traka	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4
Q_j	200	200	400	150	450	450	350
S_j	1450	714	1490	900	1450	1550	1538
y_j	0,137	0,28	0,268	0,166	0,31	0,29	0,227
$Y_{i\max}$			0,268		0,31		
Y	0,578						

Na osnovu geometrije raskrsnice i plana faza izračunavaju se zaštitna vremena između tokova koji pripadaju različitim fazama i među njima određuju ona vremena koja će predstavljati zaštitu između faza signalnog plana. Na Slika 16.15 su prikazane tačke konflikta koje su tom prilikom uzimane u obzir, a Tabela 9 predstavlja matricu zaštitnih vremena za razmatranu raskrsnicu.



Slika 16.15

Tabela 9 - Matrica zaštitnih vremena

$\Delta t_{i,j}$	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4
1.1	X	X	1	X	X	X	3
1.2	X	X	1	2	X	X	2
2.1	3	3	X	X	1	2	X
2.2	X	2	X	X	2	3	X
3.1	X	X	2	1	X	X	1
3.2	X	X	2	1	X	X	1
4	1	3	X	X	3	3	X

Primenom izraza (9) (uz pretpostavku da su gubici na startu i neiskorišćeno žuto jednaki 3 sekunde) i izraza (8) izračunava se optimalno trajanje ciklusa, a pomoću izraza (11) i efektivna (z) i stvarna (Z) zelena vremena faza signalnog plana. Oznaka "Ž" odnosi se na "žuto vreme" u okviru signalnog plana. Odgovarajući plan tempiranja signala (faza) prikazan je na Slika 16.16.

$$L = n * d + \sum_{i=1}^n \Delta t_i = 2 * 3 + (3 + 3) = 12s$$

$$C_o = \frac{1,5 * L + 5}{1 - Y} = \frac{1,5 * 12 + 5}{1 - 0,578} = 54,5 \Rightarrow 55s$$

$$z_1 = \frac{Y_1}{Y} * (C - L) = \frac{0,31}{0,578} * (55 - 12) = 23s$$

$$Z_1 = z_1 + d - \check{Z} = 23 + 3 - 3 = 23s$$

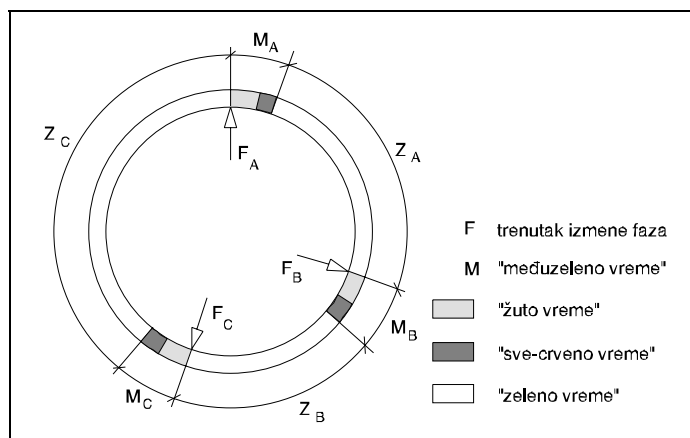
$$z_2 = \frac{Y_2}{Y} * (C - L) = \frac{0,268}{0,578} * (55 - 12) = 20s$$

$$Z_2 = z_2 + d - \check{Z} = 20 + 3 - 3 = 20s$$

C=55s

Faza	0	10	20	30	40	50	55	10	20	30	40	50	55
1			17		40				17		40		
2		11			46			11			46		

Slika 16.16



Slika 16.17

16.6 Proračun signalnog plana po modelu HCM iz 2000.god.

U novoj verziji Priručnika HCM-a iz 2000. godine (poglavlje 16 priručnika), dopune, izmene i modifikacije u odnosu na ranije verzije su izvršene u sledećim delovima:

- utvrđivanje merodavnog obima saobraćaja
- vrednosti idealnog zasićenog toka
- proračun faktora za leva skretanja,
- postupak proračuna minimalnih zelenih vremena i dužine ciklusa
- proračun faktora iskorišćenosti traka u posmatranoj grupi traka
- utvrđivanje odnosa protok kapacitet
- kritične grupe, granične vrednosti ciklusa, preraspodela zelenih vremena
- model proračuna vremenskih gubitaka na raskrsnici
- proračun faktora progresije,
- nivo usluge - granične vrednosti vremenskih gubitaka za pojedine nivoe usluge

16.6.1 Utvrđivanje merodavnog obima saobraćaja

Uticaj faktora vršnog časa je posebno analiziran i dat je postupak utvrđivanja merodavnog obima saobraćaja kao ulazne veličine u daljim proračunima kapaciteta i nivoa usluge. Relacija za utvrđivanje merodavnog protoka (Q) se u obliku koji je dat u poslednjoj verziji koristi kod nas već nekoliko godina [20] i glasi

$$Q_m = \frac{Q}{FVC}$$

gde je

Q_m - merodavan protok za dalje proračune (voz/čas)

Q - izmeren, prognoziran, očekivan protok (voz/čas)

FVČ - faktor vršnog časa

16.6.2 Vrednost idealnog zasićenog toka

Mnogobrojna istraživanja koja su sprovedena u proteklom periodu u više različitih gradova u Sjedinjenim Američkim Državama, pokazala su da vrednost idealnog zasićenog toka po traci na prilazu signalisane raskrsnice treba da bude veći od 1800 vozila u toku sata zelenog svetla. Rezultat toga je povećanje idealne vrednosti zasićenog toka na 1600 - 1800 vozila na sat zelenog svetla za traku pravo na centralnom gradskom području odnosno 1700 - 1900 vozila na sat zelenog svetla za traku pravo na ostalim gradskim područjima (poglavlje X priručnika). Preporuka i dalje ostaje da se, kada je to moguće, sprovedu istraživanja u cilju utvrđivanja lokalnih vrednosti zasićenog toka. Obrazac za proračun zasićenog toka grupe traka je ostao isti kao i u prethodnoj verziji iz 1994. godine dopunjen novim relacijama za pojedine faktore uticaja. U tabeli 10 date su relacije za utvrđivanje faktora uticaja na idealni zasićeni tok.

Tabela 10.

Faktor	Izraz	Opis	Napomena
Širina trake	$f_w = 1 + \frac{W - 3.6}{9}$	W=širina trake u m	Za w>2.4m,
Učešće teretnih vozila u toku	$f_{hv} = \frac{100}{100 + \%HV(ET - 1)}$	%HV=učešće teretnih vozila u toku	ET=3 za teška, ET=2 za laka teretna vozila
Uspón	$f_g = 1 - \frac{\%G}{200}$	%G=veličina uspona u %	-6<G<+10
Parkirana vozila	$f_p = \frac{N - 0.1 - \frac{18N_m}{3600}}{N}$	N=broj traka, Nm=broj parking manevara na sat	$f_p = 1$, , ako nema parkiranja
Stajališta autobusa	$f_b = \frac{N - \frac{14.4N_b}{3600}}{N}$	Nb=broj autobusa na sat koja koriste stajalište	0<Nb<250
Tip zone	$f_p = 0.9, centra ln a, f_p = 1.0, ostale$		
Iskorišćenje traka	$f_{lu} = \frac{Q}{Q_i N}$	Q=ukupan protok Qi=najveći protok u jednoj od traka	$f_{lu} = 1$, za N=1
Leva skretanja	$f_{lt} = 0.95$, zaštićena faza, posebna traka $f_{lt} = \frac{1}{1 + 0.05P_{lt}}$, zaštićena faza, mešovita traka	%Plt= proporcija levih skretanja u traci	Za ostale slučajeve date su posebne relacije u apendiksu C, poglavlja 16 priručnika
Desna skretanja	$f_{rt} = 0.85$, posebnatraka $f_{rt} = 1 - 0.15P_{rt}$, mesovitatraka	Prt= proporcija desnih skretanja	
Pešaci, biciklisti u konfliktu sa desnim skretanjima	$f_{Rpb} = 1 - P_{rt}(1 - A_{pb})(1 - P_{RTa})$ $A_{pbt} = 1 - \frac{Q_p * C}{200}$ gde je Q= tok konfliktni pešaka, C=trajanje ciklusa Z= trajanje zelenog za pešake	Prt=proporcija desnih skretanja Prta=Proporcija desnih skretanja koji idu pod zaštićenim vremenom, fazom Apb= faktor prilagođavanja	Za ostale slučajeve (uticaj bicikla, leva skretanja i konfliktni pešački tokovi) data je procedura u apendiksu D, poglavlja 16 priručnika

Napomena : Sva domaća iskustva ukazuju da faktor uticaja širine trake kako je dat u priručniku, odnosno u tabeli 10 ne odgovara našim realnim situacijama (20)

16.6.3 Proračun faktora uticaja levih skretanja

Faktor uticaja levih skretanja kao i u prethodnoj verziji iz 1994. godine, zavisi od toga da li je:

- zajednička ili posebna traka za leva skretanja;
- zaštićena, dopuštena ili zaštićena + dopuštena faza;
- koliki je procenat vozila u levom skretanju iz zajedničke trake;
- koliki je iznos toka na suprotnom prilazu;

Na osnovu ove zavisnosti izvršena je podela na 6 (u ranijoj verziji 7) slučajeva. Pojedini slučajevi su pretrpeli izmene u odnosu na prethodnu verziju iz 1994. godine, odnosno izmenjeni su sledeći slučajevi:

- posebna traka, dopuštena faza;
- posebna traka, zaštićena faza;
- posebna traka, zaštićena + dopuštena faza;
- zajednička traka, dopuštena faza;
- zajednička traka, zaštićena faza;
- zajednička traka, dopuštena+zaštićena faza;

U novoj verziji, model za proračun faktora uticaja levih skretanja zavisi od broja traka na suprotnom prilazu, odnosno različiti su modeli za prilaz sa jednom trakom i prilaz sa više traka. Faktor uticaja levih skretanja za dopuštene faze LT (mešovite ili samo namenjene levim skretanjima) se proračunava preko izraza:

$$f_{LT} = [fm + 0.91(N - 1)] / N, \text{ za suprotni prilaz sa više traka}$$

gde je:

$$fm = [zf / z][1 / \{1 + P_L(E_{L1} - 1)\}]$$

$$f_{min} = 2(1 + P_L) / z$$

$$f_{max} = 1.00$$

$$f_{LT} = fm$$

odnosno

$$fm = [zf / z] + [(zq - zf) / z][1 / \{1 + P_{LT}(E_{L2} - 1)\}] + [zu / z][1 / \{1 + P_{LT}(E_{L1} - 1)\}]$$

$$f_{min} = 2(1 + P_{LT}) / z$$

$$f_{max} = 1.00$$

Parametri u prethodnim relacijama su:

z - efektivno zeleno vreme za posmatranu grupu traka

zf - deo zelenog vremena koje koriste vozila koja idu pravo pre nego što se pojavi vozilo koje skreće levo i usled čekanja da se isprazni red iz suprotnog pravca, blokira zajedničku traku,

zq - deo zelenog vremena koje koriste vozila iz suprotnog toka za pražnjenje reda,

zu - deo zelenog vremena koje ne koriste vozila iz suprotnog toka,

PLT - procenat levih skretanja u zajedničkoj ili zasebnoj traci,

EL - ekvivalent za leva skretanja,

N - broj traka u posmatranoj grupi traka,

fmin - minimalna vrednost faktora za leva skretanja,

fmax - maksimalna vrednost faktora za leva skretanja.

16.6.4 Utvrđivanje minimalnih zelenih vremena

Minimalni zeleno vreme u slučaju da se istovremeno ne puštaju kompatibilni pešački tokovi se utvrđuje na osnovu lokalnih iskustava, pravila odnosno standarda. U slučaju da tok ide istovremeno sa kompatibilnom pešačkom grupom minimalno zeleno vreme se utvrđuje na osnovu sledećih relacija:

$$Z_{min}=3.2 +L/V_p +(0,81Q_p/B), \text{ za } B > 3m$$

$$Z_{min}=3.2 +L/V_p +(0,027Q_p), \text{ za } B < 3m,$$

gde je:

Zmin - minimalno zeleno vreme (s)

L - dužina pešačkog prelaza (m)

Vp - brzina pešaka (m/s)

B - širina pešačkog prelaza (m)

Q - pešački tok (peš/ciklusu)

16.6.5 Faktor iskorišćenja traka u posmatranoj grupi traka

Faktor iskorišćenosti traka (IT) proračunava se na osnovu sledećeg obrasca:

$$IT = (V_{gi} \cdot N) / V_g$$

gde je:

Vg - obim saobraćaja za posmatranu grupu traka (voz/ čas),

Vgi - obim saobraćaja za najopterećeniju traku u posmatranoj grupi traka u vozilima na čas,

N - broj traka u posmatranoj grupi.

Vrednost faktora 1.00 može se koristiti u dva slučaja:

- ukoliko je protok uniformno raspoređen po svim trakama posmatrane grupe traka,
- ukoliko je odnos V/K (protok/kapacitet) veći od jedan.

Ukoliko na raskrsnici preovladavaju prosečni uslovi ili raspodela toka po trakama nije poznata, faktor iskorišćenosti traka se određuje iz Tabele 11.

Tabela 11. Faktor iskorišćenosti traka IT

Grupa traka	Broj traka u grupi	Procenat vozila u najopterećenijoj traci NT (%)	Faktor iskorišćenosti traka IT
Pravo ili zajednička	1	100.0	1.00
	2	52.5	1.05
	3	36.7	1.10
Samo levo	1	100.0	1.00
	2	51.5	1.03
Samo desno	1	100.0	1.00
	2	56.5	1.13

16.6.6 Utvrđivanje kapaciteta i odnosa protok kapacitet

Kapacitet trake ili grupe traka se utvrđuje na osnovu relacije:

$$K_i = S_i \frac{z_i}{C} (\text{voz} / h)$$

gde je:

K - kapacitet

S - vrednost realnog zasićenog toka

Z - trajanje zelenog vremena za traku ili grupu traka i (s)

C - trajanje ciklusa (s)

Odnos protok kapacitet se iskazuje preko faktora zasićenja, odnosno:

$$X_i = \frac{Q_m}{K} = \frac{Q_{m_i}}{\frac{z_i}{C} S_i} = \frac{Q_{m_i} C}{z_i S_i}$$

gde je

X- stepen zasićenja

16.6.7 Kritične grupe, dužina ciklusa i preraspodela zelenih vremena

Utvrđivanje ukupnih kritičnih protoka i zasićenog toka za raskrnicu u celini dato je sledećom relacijom:

$$Y = \sum \left(\frac{Q}{S} \right)_k \left(\frac{C}{C - L} \right)$$

gde je:

Y - suma kritičnih vrednosti Q/S faza ili stanja k

C - ciklus (s)

L - ukupni gubici u ciklusu (međuzelena i zaštitna vremena) (s)

Kritični odnos Q/S se utvrđuje za svako stanje ili fazu. Najveća od izračunatih vrednosti u pojedinoj fazi ili stanju se uzima kao merodavna za datu fazu ili stanje. Kod jednostavnijih slučajeva (dvofazni i trofazni sistemi upravljanja) postupak proračuna Y je jednostavan kao i odabir kritičnog Y po fazama ili stanjima. Za složenije slučajeve dat je veoma detaljan opis postupka utvrđivanja merodavnih, kritičnih Y po fazama ili stanjima (strana 13-17 u poglavlju 16).

U slučaju da je $X < 1$ za sve grupe tokovi će biti opsluženi unutar projektovanog ciklusa i preraspodele zelenih vremena. Kod slučajeva kada je merodavan protok mali i dužina ciklusa je mala ali je vrednost Y veća. Preporučuje se stoga pažljiv odabir dužine ciklusa kada su merodavni protoci mali i X značajno manji od 1.

Dužina ciklusa se može na osnovu prethodno datih relacija utvrditi na sledeći način:

$$C = \frac{LX_c}{\left[X_c - \sum_i \left(\frac{Q}{S} \right)_i \right]}$$

trajanje zelenih vremena za određenu grupu i kao:

$$Z_i = \frac{Q_i C}{S_i X_i}$$

gde je:

X_c - kritičan stepen zasićenja za raskrnicu (maksimalno izračunat ili željeni)

Ovaj postupak ne treba mešati sa klasičnim metodama proračuna dužine ciklusa. Postupak je namenjen utvrđivanju graničnih vrednosti dužine ciklusa ispod kojih ne treba ići jer bi se pojavila stanja prezasićenja.

16.6.8 Model proračuna vremenskih gubitaka vozila na raskrsnici

Ukupni gubici usled zaustavljanja za posmatranu grupu traka se određuju preko obrasca:

$$d = d_1 \cdot PF + d_2 + d_3$$

$$d_1 = \frac{0.5C(1 - \frac{z}{C})^2}{1 - \left[\min(1, X) \frac{z}{C} \right]}$$

$$d_2 = 900T \left[(X - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8klX}{KT}} \right]$$

$$d_3 = \frac{1800N(t + u)t}{KT}$$

gde je:

d_1 - uniformni gubici u sekundama po vozilu

d_2 - gubici usled slučajnog dolaska vozila na raskrnicu u sekundama po vozilu

d_3 - gubici nastali usled preostalih vozila u redu iz prethodnog ciklusa

PF - Faktor kvaliteta progresije i tipa kontrole, određuje se iz Tabele 4.

Za individualne signalisane raskrsnice vrednost ovog faktora je 1.

X - Q/K odnos protoka i kapaciteta

C - dužina ciklusa (s)

K - kapacitet grupe traka u voz/čas

z - efektivno zeleno vreme za posmatranu grupu traka (s)

T - period osmatranja odnosno period za koji se vrši proračun (u časovima)

k - faktor vrste upravljanja. Za FT strategije k je 0,5

l=1 - ako prethodna raskrznica nije pod detektorskom najavom

N - inicijalni red na početku perioda T

t - trajanje neostvarenih zahteva u periodu T(h)

u - parametar

T=0 - za N=0, inače

$$t = \min \left[T, \frac{N}{K(1 - \min(1, X))} \right]$$

u=0 za t<T, inače

$$u = 1 - \frac{KT}{N(1 - \min(1, X))}$$

Kao i u prethodnoj verziji ove relacije važe za slučajevne odnosa Q/K do 1 (članovi 1 i 2 u datoj relaciji). Ukoliko je zahtev veći od kapaciteta odnosno postoji zaostali red tada se ovaj obrazac proširuje sa članom d_3 i sa oprezom može koristiti do vrednosti Q/K= 1.2. Pored pobrojanih izmena, izvršene su i određene manje modifikacije u cilju poboljšanja preglednosti i razumljivosti postupka za operativne i projektantske svrhe.

Tabela 12. Vrednosti parametra l u zavisnosti od stepena zasićenja na prethodnoj raskrsnici za tok koji dolazi na posmatranu raskrnicu

Stepen zasićenja	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	>1.0
L	0.922	0.858	0.769	0.650	0.500	0.314	0.090

16.6.9 Nivo usluge

Na osnovu izračunatih vrednosti vremenskih gubitaka po trakama ili grupama saobraćajnih traka utvrđuje se nivo usluge ¹⁰.

Tabela 13. Nivo usluge, HCM-2000

Nivo usluge	Vremenski gubici po vozilu(s/vozilu)
• A	• <10
• B	• >10-20
• C	• >20-35
• D	• >35-55
• E	• >55-80
• F	• >80

U novom priručniku se preporučuje da se pored izračunavanja vremenskih gubitaka po trakama vrši proračun vremenskih gubitaka i nivoa usluge po prilazima odnosno i prosečnih za celu raskrsnicu. Izračunavanje vremenskih gubitaka na prilazu na kojem postoji više grupa vrši se na osnovu sledeće relacije:

$$D_A = \frac{\sum d_i Q_i}{\sum Q_i}$$

gde je:

A - oznaka prilaza

I - oznaka grupe

D - gubici za grupu i

Q - protok za grupu i

D - ukupni gubici na prilazu A za sve grupe i koje pripadaju prilazu A

Značajno je, uvođenjem vremenskih gubitaka kao izmeritelja nivoa usluge, uočiti da isti zavisi od:

- odnosa z/C
- stepena zasićenja
- faktora kvaliteta progresije
- tipa kontrole
- kvaliteta plotuna vozila
- trajanja zasićenja

To znači da se na nivo usluge može uticati izmenom navedenih elemenata [11], [15].

¹⁰ Granične vrednosti vremenskih gubitaka za pojedine nivoe usluge značajno su promenjene u odnosu na izdanje iz 1994.god.

16.7 Metoda proračuna signalnih planova - upravljanje signalnim grupama¹¹

16.7.1 Signalne grupe i faze

Uvedimo sledeće definicije:

- **Tok** - vozila određenih kategorija (PA, BUS) ili pešaci koji koriste određenu traku (putanju) u zoni čvora,
- **Grupa** - sastoji se iz jednog ili više tokova koji uvek primaju identične pojmove od kontrolera u određenom vremenu "t" (dve trake za pravo na prilazu),
- **Saglasne grupe** - (tokovi) one koje nemaju konfliktne tačke u zoni čvora, te mogu u istovremeno dobiti zeleno vreme,
- **Nesaglasne grupe** - (tokovi) one koje imaju konfliktne tačke u zoni čvora i ne mogu istovremeno dobiti zeleno vreme,
- **Klika** - više saglasnih grupa koje mogu istovremeno dobiti zeleno vreme.
- **Stanje** - deo ciklusa u kojem signalni pojam "zeleno" egzistira za određenu kliku
- **Sekvenca** - bilo koji mogući redosled stanja (klika) unutar ciklusa pri čemu svaka grupa dobija, bar jednom, zeleno vreme. Često se koristi i termin plan stanja odnosno kod upravljanja fazama plan faza.
- **Faza** - deo ciklusa u kome za unapred definisane tokove uvek egzistira signalni pojam "zeleno".

Danas u svetu načelno postoje dva pristupa u određivanju signalnog plana i to:

1. Upravljanje Fazama (Stage Based Approach ili Phase Based Approach). Unapred se definiše plan faza (sekvenca) za koju se vrši proračun signalnog plana. Takođe se unapred definišu minimalna zelena vremena, međuzelena vremena i opseg u kojem se može nalaziti dužina ciklusa.

2. Upravljanje signalnim grupama (Group Based Approach). Ispitivanje koji od mogućih redosleda grupa, odnosno klika daje optimalan ciklus, po kriterijumu max K (Kapacitet) i min D (vremenski gubici).

Kod faznih uređaja određeni tokovi uvek rade zajedno u skladu sa unapred definisanom faznom podelom. Kod upravljanja signalnim grupama saglasne grupe rade zavisno od sekvence koja je u toku. To znači da u toku nekog dužeg perioda mogu različite sekvence da se smenjuju u zavisnosti od zahteva.

Broj saglasnih klika zavise od matrice saglasnih grupa koja se definiše na početku utvrđivanja načina rada svetlosnih signala. Sledi da broj utvrđenih klika (koji zavisi od matrice saglasnih grupa) i redosled klika definiše broj saglasnih sekvenci ili planova

¹¹ Na osnovu originalne verzije: S. Vukanović, TEHNIKA, Separat - Saobraćaj br. 5-6 (1996) 21-27

stanja [7]. Iz prethodnog prikaza sledi da je u proračunima rada svetlosnih signala baziranih na signalnim grupama potrebno sprovesti dva osnovna koraka i to:

- Korak A

Utvrđivanje saglasnih odnosno mogućih sekvenci na osnovu prethodno date matrice saglasnih grupa i izračunatih saglasnih klika

- Korak B

Proračun signalnih planova za svaku od saglasnih sekvenci i izbor optimalnog signalnog plana.

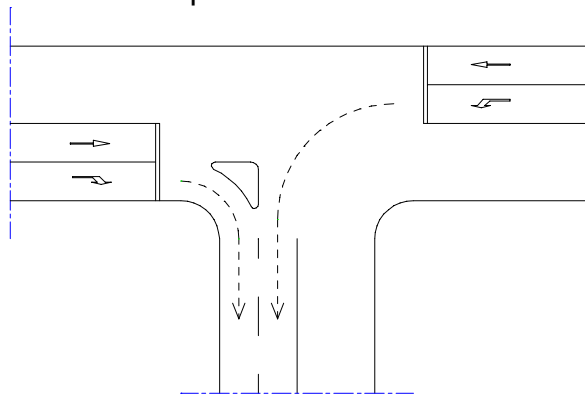
16.7.2 Utvrđivanje saglasnih sekvenci

Iz diskusije u prethodnoj tački sledi da se korak A, utvrđivanje saglasnih sekvenci, može sprovesti kroz sledeći algoritam:

1. utvrditi merodavne tokove u zoni čvora u skladu sa osnovnim režimom kretanja,
2. utvrditi matrice saglasnih grupa,
3. utvrditi saglasne klike i sve saglasne sekvence, odnosno planove stanja.

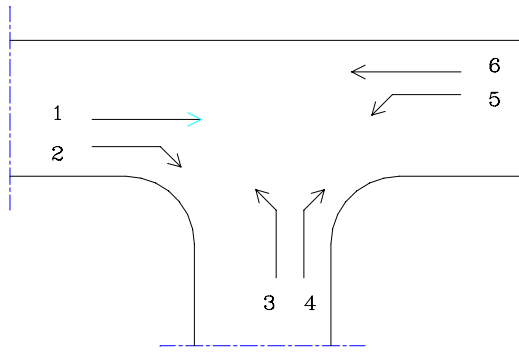
Koraci 1. i 2. u algoritmu su standardni i ne treba ih posebno objašnjavati.

Utvrđivanje saglasnih odnosno nesaglasnih grupa (korak 3) je složen zadatak. Osnovna definicija nesaglasnih grupa je da su to one grupe (tokovi) koje mogu da ostvare konflikt tipa ukrštanje ili ulivanje. Kod kanalisanih raskrsnica određena ulivanja, kao što su desno i levo iz suprotnog smera (Slika 16.18), ne moraju uvek biti nesaglasni. Jasno je da matrica nesaglasnih grupa (radi jednostavnosti ovde se grupa poistovećuje sa tokom) zavisi od geometrije raskrsnice i željene strategije upravljanja koja značajno zavisi i od intenziteta pešačkih tokova.



Slika 16.18

Broj klika i mogućih sekvenci raste kao broj grupa na raskrsnici raste. Problem je moguće rešiti bez posebnih računanja kada broj grupa nije velik. No u slučaju većeg broja grupa (>8) postoji veliki broj rešenja koje je teško bez primene određenog matematičkog aparata rešiti. Da bismo razumeli vezu između klika i sekvenci u narednom delu dat je jednostavan primer trokake raskrsnice gde svaki tok, radi jednostavnosti predstavlja jedni grupu. Na Slici 16.9 prikazana je raskrsnica sa tokovima kao i matrica saglasnih tokova (Slika 16.19a).



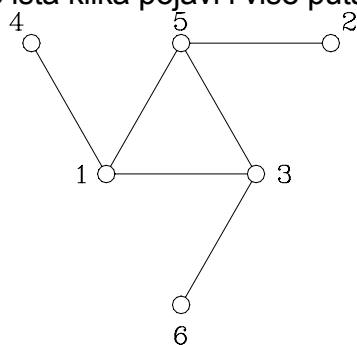
Slika 16.19

MATRICA KONFLIKTNOSTI

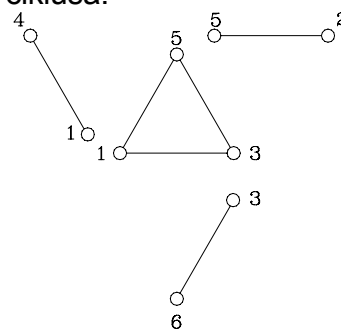
tokovi	1	2	3	4	5	6
1	○	○				○
2	○	○	○	○		○
3		○	○	○		
4		○	○	○	○	○
5				○	○	○
6	○	○		○	○	○

Slika 16.19a

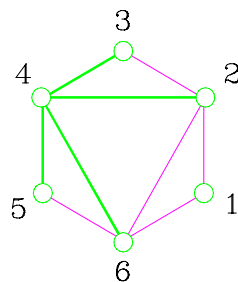
Na osnovu matrice saglasnih tokova (grupa) formiran je graf saglasnih grupa (Slika 16.19c). Na osnovu grafa saglasnih grupa formiran je graf saglasnih klika (Slika 16.19d). Sa grafa klika uočavaju se sledeće klike: klika C - tokovi 4, 5, 6; klika D - tokovi 2, 4, 6; klika A - tokovi 1, 2, 6; klika B - tokovi 2, 3, 4. Sada stanje možemo definisati kao deo ciklusa u kojem se pojavljuje određena, prethodno definisana, klika. Redosled klika može biti različit, a jedan izabrani redosled čini jednu sekvencu. Takođe moguće je, ako se sve grupe pojavljuju u nekim drugim klikama, pojedine saglasne klike u daljim proračunima ne uzimati u obzir. To znači da od redosleda, odnosno broja kombinacija klika, zavisi i broj sekvenci ili broj planova stanja. Kod složenijih raskrsnica moguće je da se jedna te ista klika pojavi i više puta unutar ciklusa.



GRAF KONFLIKTNOSTI

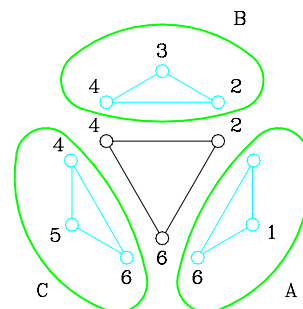


KONFLIKTNE KLIKE



SAGLASNE GRUPE

Slika 16.19 c

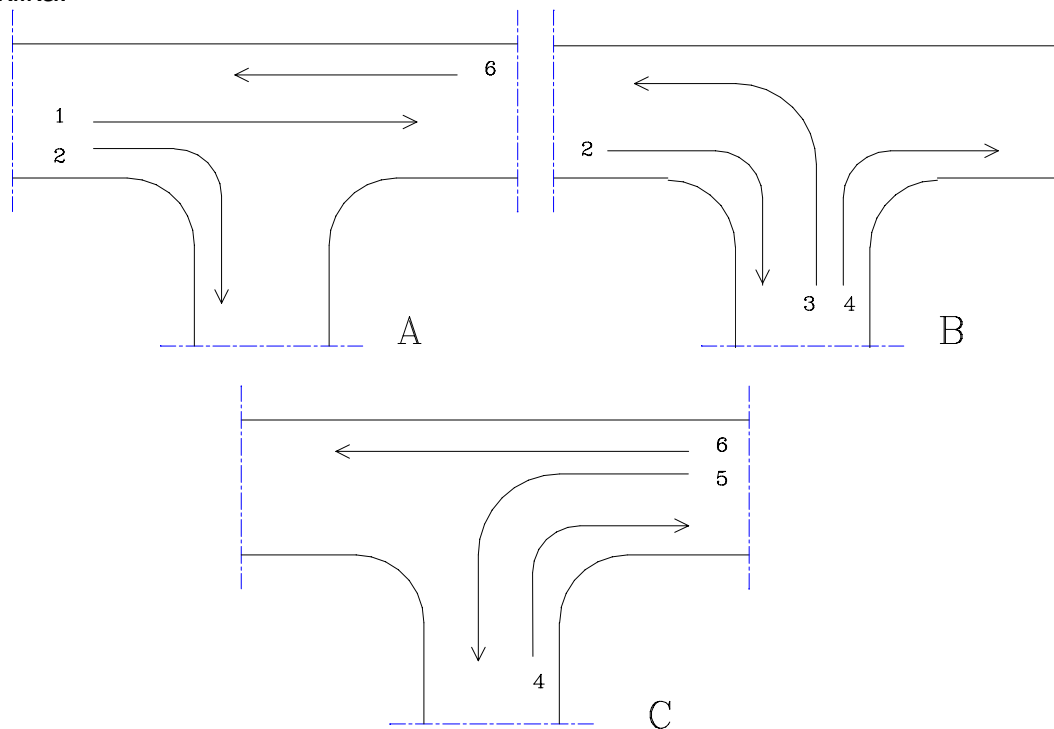


SAGLASNE KLIKE

Slika 16.19 d

Na slici 16.19e prikazana je jedna od saglasnih sekvenci koja se sastoji od stanja A (klika u kojoj idu grupe 1, 6 i 2), stanja B i stanja C. Klika D nije uzeta u daljim proračunima u obzir jer su sve posmatrane grupe već pojavile u drugim klikama. U tabeli 14 označene su grupe koje dobijaju zeleno vreme u pojedinim stanjima (oznaka 1

dobija zeleno, 0 ne dobija zeleno vreme u stanju "x"). Iz tabele se uočava veza između stanja i klika.



Slika 16.19 e

Tabela 14.

Stanje	1	2	3	4	5	6
A	1	1	0	0	0	1
B	0	1	1	1	0	0
C	0	0	0	1	1	1

Iz ovog kratkog prikaza može se zaključiti koliki je značaj utvrđivanja saglasnih klika i saglasnih sekvenci. Kada se utvrde sve saglasne (izvodljive) sekvence postavlja se problem njihove selekcije i svođenja na realan broj. Takođe, utvrđivanje efekata kao što su kapacitet, potrošnja goriva, broj zaustavljanja i sl. usložava se povećanjem broja saglasnih sekvenci. Sledi da je reč o postupku koji zahteva za svaku saglasnu sekvencu proračun upravljačkih parametara i očekivanih efekata te izbor one (ili onih) sekvence koja daje optimalno rešenje (**Korak B**).

16.7.3 Metoda proračuna signalnog plana

Imajući u vidu da se sa softverima proizvođača ne može raspolagati i da njihovo korišćenje pretpostavlja određene preduslove, u narednom tekstu dat je opis postupka utvrđivanja optimalnog signalnog plana kao i metod proračuna signalnog plana i zelenih vremena za određenu kombinaciju klika odnosno za izabranu sekvencu. Metod je izvorno data u Australijskom priručniku za proračun načina rada svetlosnih signala. Skoro identičan metod dat je u priručniku HCM iz 1994 godine.

Postupak se može koristiti pri utvrđivanju signalnih planova na raskrsnicama na kojima se upravlja sa i bez detektorskih najava.

Prikazani postupak sastoji se, za prethodno generisane sekvence (Korak A), iz sledećih koraka. Za prvu od izabranih sekvenci izvrši se proračun sume kritičnih tokova T kroz sledeće korake:

1. definisanje minimalnih zelenih vremena za svaku grupu (Z_{min})
2. definisanje međuzelenih vremena (vremena zaštite između nesaglasnih grupa)
3. utvrđivanje sume kritičnih tokova (T), dužine ciklusa i preraspodele zelenih vremena.
4. ispitivanje da li su zadovoljeni kriterijumi optimizacije (najčešće je to stepen zasićenja X_p ili vremenski gubici D, odnosno nivo usluge). Na nomogramu na slici 4 prikazana je veza između protoka, zasićenog toka, odnosa z/C , nivoa usluge i kapaciteta. Sa nomograma se, ilustracije radi, može zaključiti kako pojedini parametri utiču na nivo usluge. U slučaju da su zadovoljeni kriterijumi optimizacije proračunati signalni plan se "pamti", u protivnom se zaboravlja.
5. za narednu od izabranih sekvenci postupak se ponavlja od koraka 1 do 4. U slučaju da su kriterijumi optimizacije bolji nego u prethodnom slučaju proračunati signalni plan se "pamti" a prethodni briše. U protivnom pamti se prethodni signalni plan i postupak se ponavlja za naredne saglasne sekvence od koraka 1 do koraka 5.

Korak 1 u algoritmu je najčešće bez obzira na sekvencu nepromenjen pa se često u radu mogu koristiti samo koraci od 2-5. Koraci od 1-5 čine suštinu postupka izbora optimalnog signalnog plana. Sam metod proračuna sadržan je u koracima 1-3.

Navedeni postupak pretpostavlja korišćenje odgovarajućih računarskih paketa pomoću kojih je moguće veoma brzo izračunati i izabrati optimalan ciklus i preraspodelu zelenih vremena. Takođe moguće je za neke druge ulazne saobraćajne veličine izračunati brzo novi signalni plan. Jednom definisane saglasne sekvence za datu raskrsnicu su nepromenjene sve dok ne dođe do izmene režima ili matrice saglasnih grupa. To znači da se korak A u postupku ne ponavlja.

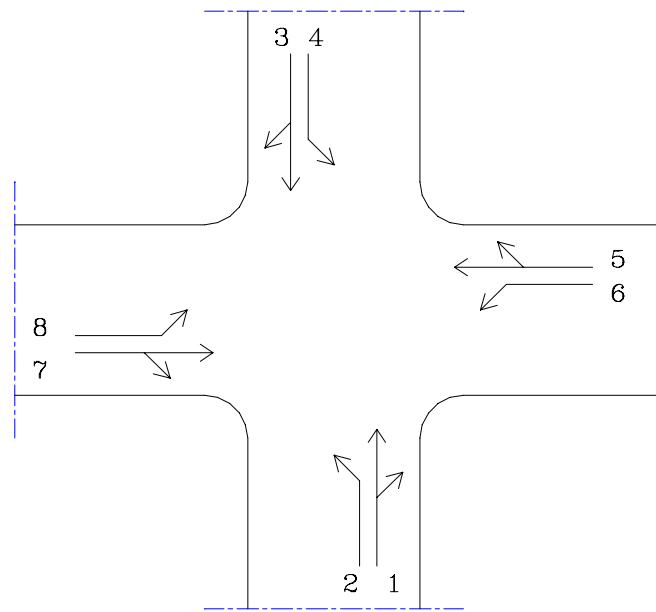
Nakon proračuna signalnog plana preostaje izrada plana tempiranja i definisanje načina prelaska sa jednog na drugi signalni plan. Drugi signalni plan se može bitno razlikovati od prethodnog a to zavisi od ulaznih saobraćajnih veličina.

U slučaju da ni jedna od ispitivanih sekvenci nezadovoljava potrebno je ili sniziti željeni nivo usluge ili preprojektovati režim saobraćaja na raskrsnici. U poslednjem slučaju ponavlja se u proračunu i korak A i korak B.

16.7.3.1 Primer proračuna signalnog plana

Kao kriterijum optimizacije uzet je stepen zasićenja " X_p ". U priručniku HCM iz 1985. i 1994. [10] koristi se kao kriterijum i nivo usluge iskazan preko vremenskih gubitaka. Potrebno je naglasiti da stepen zasićenja direktno utiče na veličinu vremenskih gubitaka ali je prikladniji u razmatranjima kada se analizira i kapacitet.

Data je krstasta raskrsnica (Slika 16.20a) sa sledećim oznakama tokova i jednom varijantom matrice saglasnih grupa.



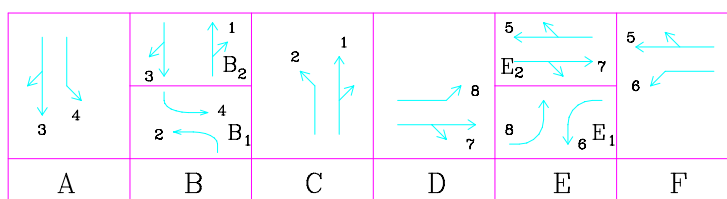
Slika 16.20a

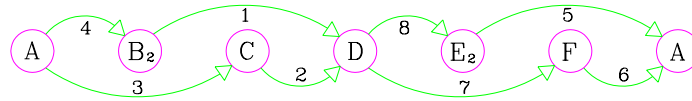
	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

Saglasne grupe

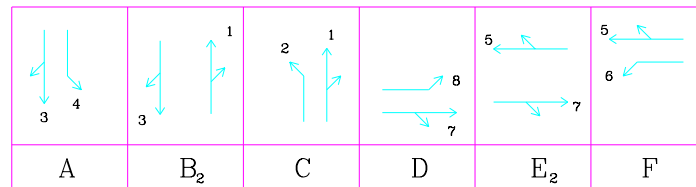
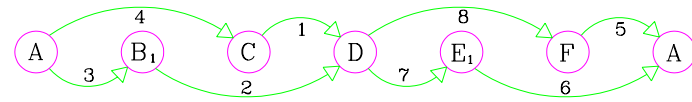
Nesaglasne grupe

Na osnovu date matrice saglasnih grupa i saglasnih klika mogući su sledeći (u 1. koraku) planovi stanja ili sekvenci.





Slika 16.20 b



Slika 16.20 c

Kako grupe B i E imaju dve podvarijante to bi moguće sekvence izgledale kao što je dato na Slikama Slika 16.20 b i Slika 16.20 c.

Da bi se pratilo dalje izlaganje uvedene su sledeće oznake:

q - protok (voz/h)

s - zasićeni tok (voz/h)

l - međuzeleno vreme između konfliktnih grupa (s)

i - gubici na startu i na kraju zelenog(s)

z_{min} - minimalno zeleno vreme (s)

x_p - gornja dozvoljena granica nivoa zasićenja

"j" - oznaka grupe

T - suma kritičnih tokova

i neka su date sledeće relacije za svaku grupu:

$$y=q/s: u=y/x_p: t'=z_{min}+l. t=100u+l:$$

Ulazni podaci za izabranu sekvencu po grupama dati su u narednoj tabeli:

Tabela 15. Ulazni podaci

Grupa	Start	Kraj	i (s)	z_{min}	q	s	l(s)	x_p
1	B2	D	3	7	500	3000	3	0.8
2	C	D	3	7	100	1500	3	0.8
3	A	C	3	7	300	3000	3	0.8
4	A	B2	3	7	65	2500	3 (10)	0.8
5	E2	A	3	7	390	4000	3	0.8
6	F	A	3	7	30	1500	3 (10)	0.8
7	D	F	3	7	800	4000	3	0.8
8	D	E2	3	7	100	1500	3	0.8

Tabela 16. Izlazni podaci

	$y=q/s$	$u=y/x_p$	t	z_m+1	$t^1)$	C=70s z=	C=60s z=	C=70s X_R	C=60s X_R
1	0.17	0.210	24	10	24	20	16	0.59	0.630
2	0.06	0.075	10	10	10	7	7	0.60	0.510
3	0.10	0.125	5	10	15	20	16	0.35	0.375
4	0.04	0.050	8	10	10	7	7	0.40	0.340
5	0.09	0.110	14	10	14	22	18	0.28	0.300
6	0.02	0.025	5	10	10	7	7	0.20	0.170
7	0.19	0.230	26	10	26	22	18	0.60	0.630
8	0.07	0.087	12	10	12	7	7	0.70	0.600

¹⁾ merodavno t. ako je $z_{min}+l>t$ tada $t=z_{min} + l$

Utvrđivanje kritičnih tokova:

- uslov: $(t_1 + t_4) > (t_2 + t_3)$: t_1 i t_4 su kritični tokovi i obrnuto
- uslov: $(t_6 + t_7) > (t_5 + t_8)$: t_6 i t_7 su kritični tokovi i obrnuto

Sledi:

$T_{1,4} = 34$ i $T_{2,3} = 25$ to je $T_{1,4} > T_{2,3}$ itd. te su tokovi 1,4,7 i 6 kritični tokovi.

Kako tokovi označeni sa q_4 i q_6 ne zadovoljavaju polazne uslove ($z_{min} + l < t'$) to je $L=l_1+l_4+l_7+l_6=26s$.

pa su merodavne vrednosti Y i U:

$Y=Y_1 + Y_7 = 0.36$. $U=u_1+u_7=0.44$: U protivnom $Y=Y_1+Y_4+Y_6+Y_7$

Opseg u kojem se može naći ciklus je:

$C_p < C < C_0$; gde je:

$C_p = L/1-U$ (praktična dužina ciklusa):

$C_0 = 1.5L+5/1-(Y_1+..+Y_n)$ (optimalna dužina ciklusa)

Trajanje ciklusa u navedenom primeru može se nalaziti u granicama C_p i C_0 :

$C_p = 50s$ i $C_0 = 80s$.

Za trajanje ciklusa od 70s odnosno od 60s u tabeli 3 proračunata su trajanja zelenih vremena za svaku od grupa. Za tokove koji ne zadovoljavaju početne uslove zadržavaju se minimalna trajanja zelenih vremena. Iz tabele zaključujemo da je uslov $X_p < 0.8$ ispunjen za sve grupe.

Postupak je moguće ponoviti za drugu od prikazanih sekvenci na slici 19b i uporediti izlazne rezultate.

Nakon izbora optimalne sekvence, a na osnovu utvrđenih trajanja zelenih vremena i vremena zaštite, moguće je pristupiti izradi signalnog plana (plana tempiranja).

Prikazani postupak i metoda proračuna rada svetlosnih signala primenjuje se u slučaju upravljanja signalnim grupama na individualnim raskrsnicama. Prikazani postupak odgovara zahtevima današnjih tehnologija i omogućava ispitivanje različitih strategija upravljanja i rangiranja istih na osnovu prethodno proračunatih pokazatelja efikasnosti. Danas su na raspolaganju i računarski programi za ispitivanje i izbor optimalnih

upravljačkih promenljivih. Nameće se zato kao primarno potreba daljeg razvoja postupaka i metoda proračuna i vrednovanja efekata signalnih planova kod upravljanja signalnim grupama.

U svakom slučaju, u opredeljenju načina upravljanja, treba se prvenstveno voditi saobraćajnim zahtevima. To znači da izbor odgovarajućeg saobraćajnog rešenja baziranog na poznavanju merodavnih saobraćajnih slika i jasno definisanih kriterijuma optimizacije i ograničenja može jedino i definisati kakva vrsta kontrolera jedinice je potrebna. U protivnom moguće je da instalirani kontroleri daleko prevazilaze saobraćajne potrebe na raskrsnici. Iako nove tehnologije pružaju velike mogućnosti to ne znači i da upravljanje fazama (kontroleri starije generacije) nije upotrebljivo na nekim jednostavnijim raskrsnicama i u sredinama sa stabilizovanim saobraćajnim zahtevima.

16.8 Sekundarni pokazatelji efikasnosti rada raskrsnice na kojoj se saobraćajem upravlja pomoću svetlosnih signala

Pokazatelji efikasnosti se koriste kao kriterijumi kvaliteta upravljanja signalisanom raskrsnicom. Posebno su neophodni i praktični za analizu "pre i posle", kojom se verifikuje novoprojektovano upravljačko rešenje u odnosu na inicijalno upravljanje. Najčešće se kao pokazatelji usvajaju vremenski gubici, odnosno Nivo usluge kao primarni pokazatelji (vreme putovanja odnosno brzina kod analize poteza) i broj zaustavljanja, procenat zaustavljanja, dužine redova, rezervni kapacitet kao sekundarni pokazatelji efikasnosti.

Istraživanja karakteristika saobraćajnog toka obično su bazirana na satu kao vremenskoj jedinici posmatranja, a uobičajeno je da se tako prezentiraju i rezultati istraživanja. Neravnomernosti toka unutar sata pri tom bivaju zanemarene. Međutim, ima slučajeva kada su te neravnomernosti veoma značajne za realno sagledavanje stanja saobraćajnog procesa i projektovanje odgovarajućeg upravljanja. To se posebno odnosi na periode ekstremnih opterećenja saobraćajne mreže.

Faktor vršnog sata (PHF - Peak Hour Factor) predstavlja numerički kvantifikator neravnomernosti intenziteta saobraćajnog toka koji se javlja tokom najopterećenijeg jednosatnog intervala posmatranja saobraćajnog procesa. Baziran je na petnaestominutnim ili petominutnim intervalima istraživanja toka. Predstavlja odnos saobraćajnog zahteva tokom maksimalnog jednosatnog intervala (vršnog sata) i hipotetičkog zahteva koji pretpostavlja ekstrapolaciju maksimalno opterećenog podintervala vršnog sata na jednosatni period:

$$FVS = \frac{Q}{4 * Q_{max}^{15'}} \quad ili \quad FVS = \frac{Q}{12 * Q_{max}^{5'}} \quad (s) \quad (12)$$

Teorijska vrednost faktora vršnog sata zasnovanog na petnaestominutnim intervalima kreće se u rasponu od 0,25 (celokupno satno opterećenje realizovano tokom jednog petnaestominutnog intervala, a ostala tri su bez opterećenja) do 1 (svi podintervali su ravnomerno opterećeni, pa praktično i nema neravnomernosti protoka tokom sata). Korišćenjem faktora vršnog sata određuje se satna vrednost protoka Q_m , koja je

merodavna za proračun rada svetlosnih signala i vrednovanje efekata upravljanja u stanjima maksimalnog saobraćajnog zahteva:

$$Q_m = \frac{Q}{FVS} \quad (\text{voz/čas}) \quad (13)$$

16.8.1 Broj vozila u redu

Broj vozila u redu, odnosno dužina reda na prilazima raskrsnice su od značaja zbog obezbeđenja dovoljne dužine saobraćajnih traka i izbegavanja blokade normalnog odvijanja saobraćajnog procesa (blokade bliske prethodne raskrsnice ili prilaza saobraćajnici, susednih saobraćajnih traka). Najveću dužinu red dostiže na kraju efektivnog crvenog intervala ($r=C-z$), neposredno pred početak pražnjenja. Koriste se dva alternativna izraza za broj vozila u redu i usvaja veća od izračunatih vrednosti

$$N = \left(\frac{q*r}{2} + q*d \right) \quad (\text{vozila}) \quad (14)$$

$$N = q*r \quad (\text{voz}) \quad (15)$$

Kada su na prilazu prisutna stanja bliska zasićenju (kriterijum je $x > x_0$) red vozila pred signalom se ne prazni u potpunosti i zahvaljujući tome tokom trajanja odgovarajućeg saobraćajnog zahteva broj vozila u redu dostiže vrednost prema izrazu (16). Veličina N_0 ranije je uvedena i izračunava se primenom izraza (21) – primeri poglavlje 16).

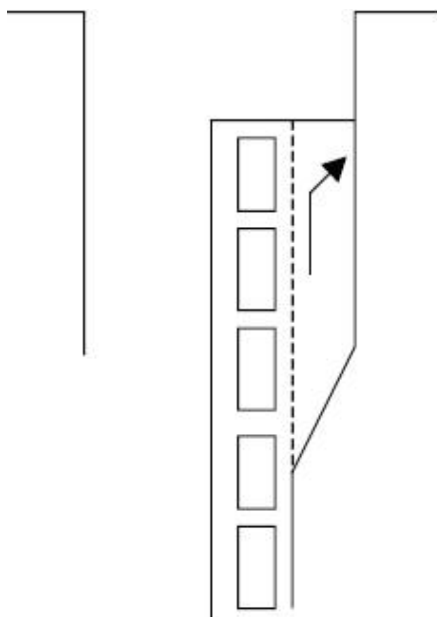
$$N = q*r + N_0 \quad (16)$$

Prosečna dužina reda u traci se izračunava množenjem broja vozila u redu (izrazi 14, 15 ili 16) sa prosečnom dužinom vozila (zavisi od strukture voznog parka i strukture toka na konkretnoj traci) i prosečnim rastojanjem koje vozači ostavljaju između vozila koja stoje u redu.

16.8.2 Verovatnoća pojave reda koji može blokirati prethodnu raskrsnicu¹²

Maksimalna dužina reda ispred zaustavne linije može blokirati druge trake i samim tim smanjiti kapacitet prilaza raskrsnice. Ako autobusi ili tramvaji javnog prevoza imaju posebne trake, može se dogoditi da te trake ne budu pristupačne vozilima javnog prevoza ukoliko su redovi na prilazima suviše dugački.

¹² H.J. van Zuylen, (2002) "Traffic control for intersection" Technische Universiteit Delft.



Slika 16.21 Blokiranje trake

Ako su raskrsnice postavljene na kratkom rastojanju, redovi mogu biti toliko veliki da deonica između raskrsnica bude potpuno ispunjena vozilima.

Prosečan broj vozila u redu u trenutku kada počinje zelena faza je dat jednačinom:

$$\langle Q \rangle = q \cdot R$$

gde je:

q - vozila u s

R - trajanje crvenog vremena

Prava vrednost broja vozila na početku zelene faze varira oko ove prosečne vrednosti. Ove varijacije je neophodno uzeti u obzir prilikom projektovanja potrebnog prostora za formiranje redova.

Ako je raskrsnica na velikom rastojanju od druge raskrsnice i ako nema suženja na putu između te dve raskrsnice, proces nailaženja je Poasonov proces, gde je verovatnoća da u periodu u kom je prosečan broj vozila koja nailaze m naiđe n vozila data jednačinom

$$P(n; m) = e^{-m} \cdot m^n / n!$$

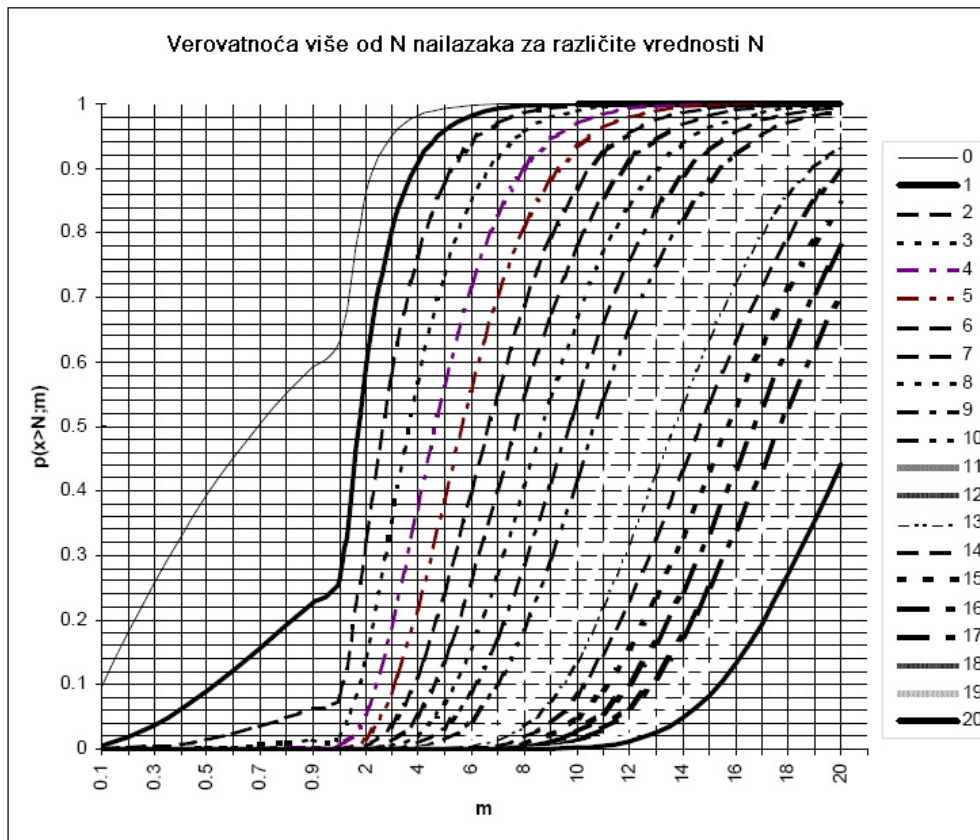
Verovatnoća da u posmatranom periodu ne naiđe više od N vozila je

$$P(x \leq N; m) = e^{-m} \cdot m^0 / 0! + e^{-m} \cdot m^1 / 1! + \dots + e^{-m} \cdot m^N / N!$$

Nas zapravo interesuje suprotno – verovatnoća da će tokom crvene faze naići više od nekog određenog broja vozila:

$$P(x > N; m) = 1 - P(x \leq N; m)$$

Grafički prikaz ove funkcije je dat na narednoj slici. Naprimera, ako je prosečan broj nailazaka tokom crvene faze 10, verovatnoća da će naići više od 10 vozila je 0,42, a verovatnoća da će naići više od 15 vozila je 0,05.



Slika 16.22 Verovatnoća $P(x > N, m)$ da će naići više od N vozila u situaciji kada je prosečan broj nailazaka m

Primer:

Rastojanje između zaustavne linije i izlaza iz garaže je 36 metara. Jedno vozilo zauzima otprilike 6 metara u redu, tako da ima mesta za 6 vozila. Vreme ciklusa je 50 s, zeleno vreme je 26 s, a protok je 720 voz/h. Prosečan broj nailazaka tokom crvene faze je $720 / 3600 \cdot (50 - 26) = 4,8$ vozila. Verovatnoća da će izlaz biti blokiran je na osnovu slike 16.22 jednaka 0,2.

16.8.3 Broj zaustavljanja vozila

Prosečan broj zaustavljanja po vozilu (za određenu traku ili grupu traka) tokom prolaska raskrsnicom računa se pod pretpostavkom da sva vozila koja se pojavljuju tokom crvenog signalnog pojma i tokom pražnjenja reda pred signalom moraju da stanu i priključe se kraju reda. Ista veličina pomnožena sa 100 predstavlja i procenat bar jednom zaustavljenih vozila:

$$P_i = 0.9 * \left(\frac{1 - \lambda_i}{1 - y_i} + \frac{N_0}{q * C} \right) \quad (-) \quad (17)$$

Ukupan broj zaustavljanja vozila tokom jednosatnog intervala rada signala izračunava se na osnovu prosečnog broja zaustavljanja (i startovanja) po vozilu i protoka vozila tokom jednog sata:

$$H_i = P_i * Q_i \quad (-) \quad (18)$$

16.8.4 Potrošnja goriva

Potrošnja goriva je često značajan korisnički i sistemski kriterijum upravljanja saobraćajem i svetlosnim signalima. Povezan je sa energetske, finansijske i ekološke aspekta upravljanja. Proračun se vrši na osnovu prosečne jedinične potrošnje vozila konkretnog voznog parka (podneblja) prilikom manevra koji su uslovljeni radom signala.

$$POTGOR_i = \alpha * D_i + \beta * P_i * Q_i \quad \text{l/sat} \quad (19)$$

Prvi član α je iskazuje potrošnju goriva prilikom rada motora na praznom hodu (α je jedinična potrošnja goriva - (l/sat)), a drugi član iskazuje jediničnu potrošnju goriva pri jednom zaustavljanju vozila (β je potrošnja goriva tokom jednog zaustavljanja i ubrzavanja vozila do brzine u toku).

PRIMERI

Minimalna zelena vremena

$$Z_{\min} = Z_{\min D} + MZ_p, (s) \quad (20)$$

gde je:

$$Z_{\min D} = 5(s) \quad MZ_p = \frac{L}{V_p}$$

L - dužina pešačkog prelaza, V - brzina pešaka (1,2 do 1,4 m/s)

Broj zaustavljanja

a) za X (stepen zasićenja) $X = (0.67 + sz/600)$

$$P_i = \frac{1 - \lambda_i}{1 - y_i} \quad (\text{prosečan broj zaustavljanja po vozilu})$$

$$\lambda_i = \frac{z_i}{C} \quad \text{odnos dužine trajanja zelenog vremena i dužine ciklusa}$$

$$y_i = \frac{q_i}{s_i} \quad \text{odnos protoka (q) i zasićenog toka (s)}$$

b) za $X > X_0 = (0.67 + sz/600)$

$$P_i = \frac{1 - \lambda_i}{1 - y_i} + \frac{N_o}{gC} \quad (\text{prosečan broj zaustavljenih vozila u traci "i"})$$

gde je:

qC = prosečan broj pristiglih vozila po ciklusu na traci "i"

$$N_o = \frac{KT_f}{4} \left(\beta + \sqrt{\frac{12(X - X_o)}{QT_f} + \beta^2} \right) \quad (21)$$

gde je:

N_o - prosečan broj vozila u redu pri zasićenju (po jednom ciklusu)

K - kapacitet trake "i" (voz/h)

T_f - trajanje perioda zasićenja u časovima (30min = 0.5)

$$X = \frac{q}{\lambda s} \quad (\text{stepen zasićenja})$$

$$\beta = X - 1$$

U relaciji (21) nisu korišćene oznake signala odnosno trake na signalu "i" ali se podrazumeva da se procenat zaustavljenih vozila računa po saobraćajnim trakama.

Broj zaustavljenih vozila na signalu u traci "i"

$$s = 1500 \text{ voz/h} = 0.416 \text{ voz/s}$$

$$q = 650 \text{ voz/h} = 0.18 \text{ voz/s}$$

$$T_f = 0.5 \text{ h} \quad K = s\lambda = 750 \text{ voz/h}$$

$$\lambda = \frac{z}{C} = \frac{40}{80} = 0.5 \quad z = 40(\text{s}), C = 80(\text{s})$$

$$X = \frac{q}{\lambda s} = \frac{650}{0.5 * 1500} = 0.86$$

$$X_0 = 0.67 + sz/600 = 0.67 + 0.416 * 40 / 600 = 0.65$$

$$X > X_0$$

$$P = \frac{1 - \lambda}{1 - y} + \frac{N_o}{qC}$$

$$N_o = \frac{0.5 * 750}{4} \left(-0.14 + \sqrt{\frac{12(0.86 - 0.65)}{750 * 0.5} + 0.14^2} \right)$$

$$N_o = 0.72$$

$$P = 0.92$$

92% vozila u traci "i" se kompletno zaustavlja odnosno $P * q = 0.92 * 650 =$ broj zaustavljenih vozila u satu

Dužina reda

$$DR = (qR + N) \quad (22)$$

gde je:

q - protok u voz/s

R - trajanje crvenog vremena

N - se utvrđuje uz pomoć relacije (21) za slučajeve $X > X_0$

u protivnom koristi se samo prvi član relacije (22) za utvrđivanje dužine reda

l - prosečna dužina vozila uključujući i međurastojanje vozila

Proračun dužine reda vrši se za svaku traku posebno.

Vremenski gubici vozila u redu ispred signala

$$d = 0.43 \left(\frac{R^2}{C(1-\gamma)} + N_0 \times X \right) \quad (23)$$

gde je:

d - prosečni gubici po vozilu u sekundama u traci "i"

R - trajanje crvenog vremena u sekundama za traku "i"

C - trajanje ciklusa u sekundama

Za slučaj da je $X < X_0$ ne koristi se drugi član u relaciji (23)

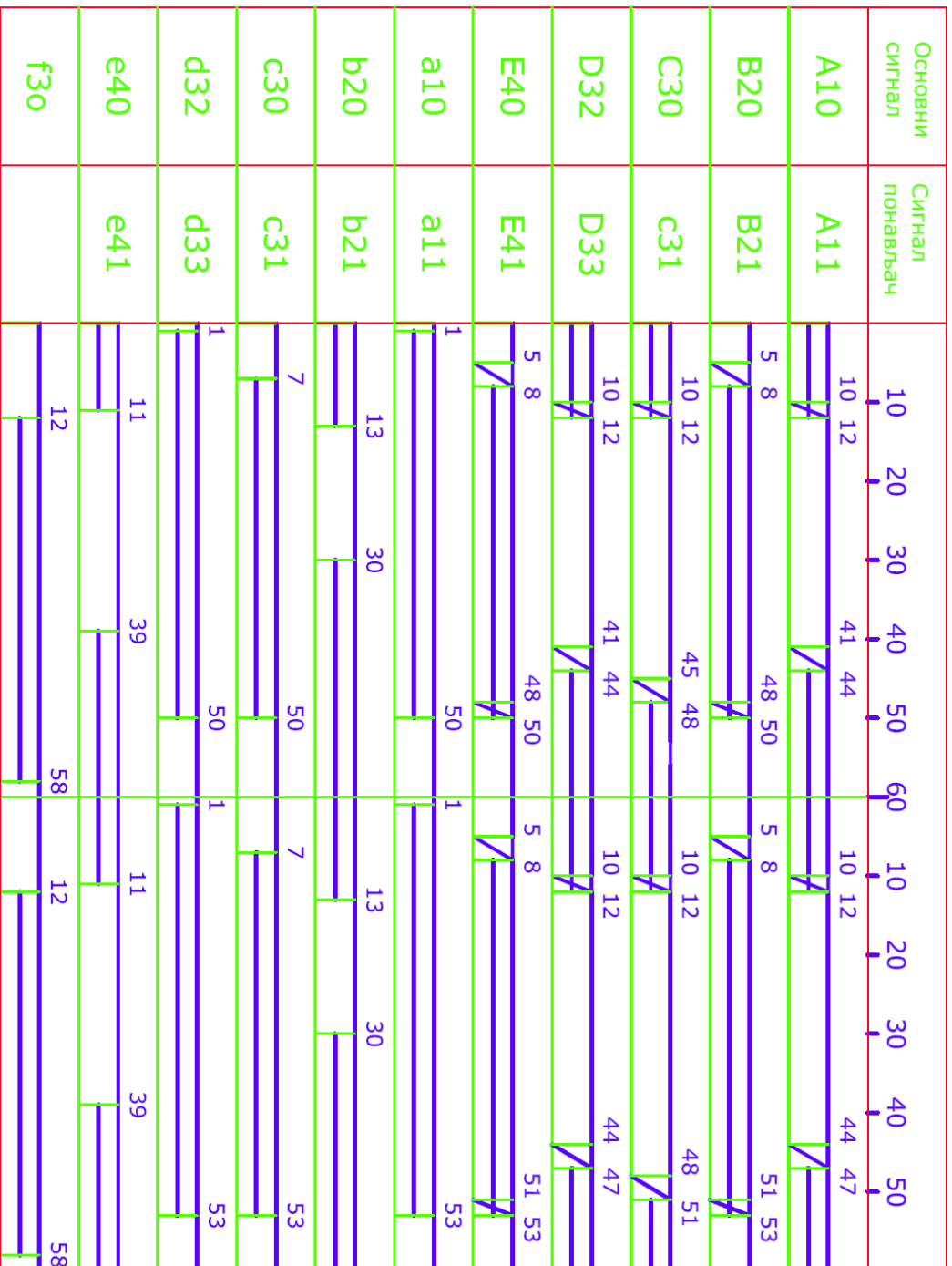
Ukupni gubici u jednom času u traci "i" iznose

$$D = \frac{d \times Q}{3600} \text{ (voz.h/h)}$$

Краља Милана - Милоша Поцера - Војводе Јанка Стојићевића

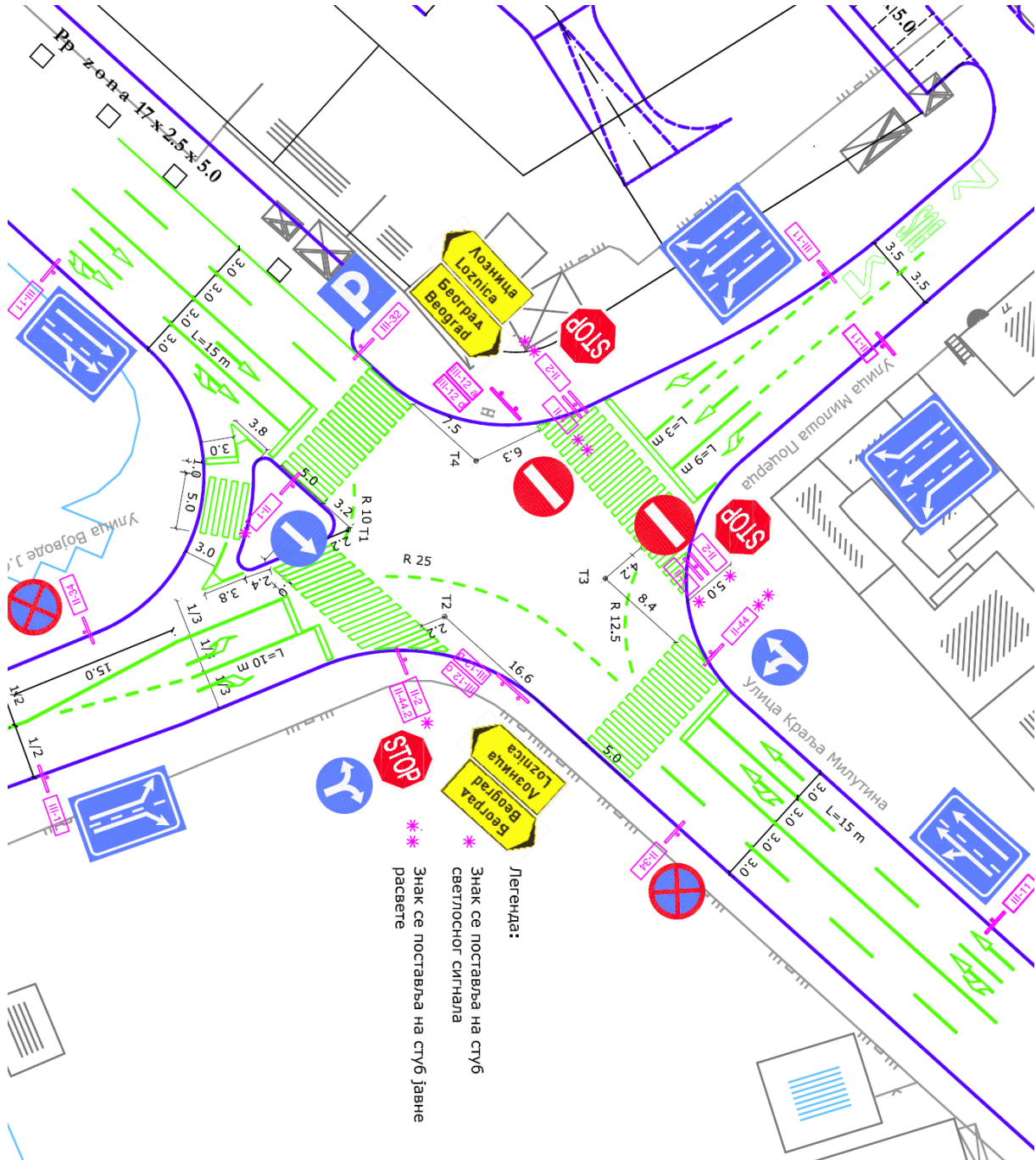
C = 60s

П01

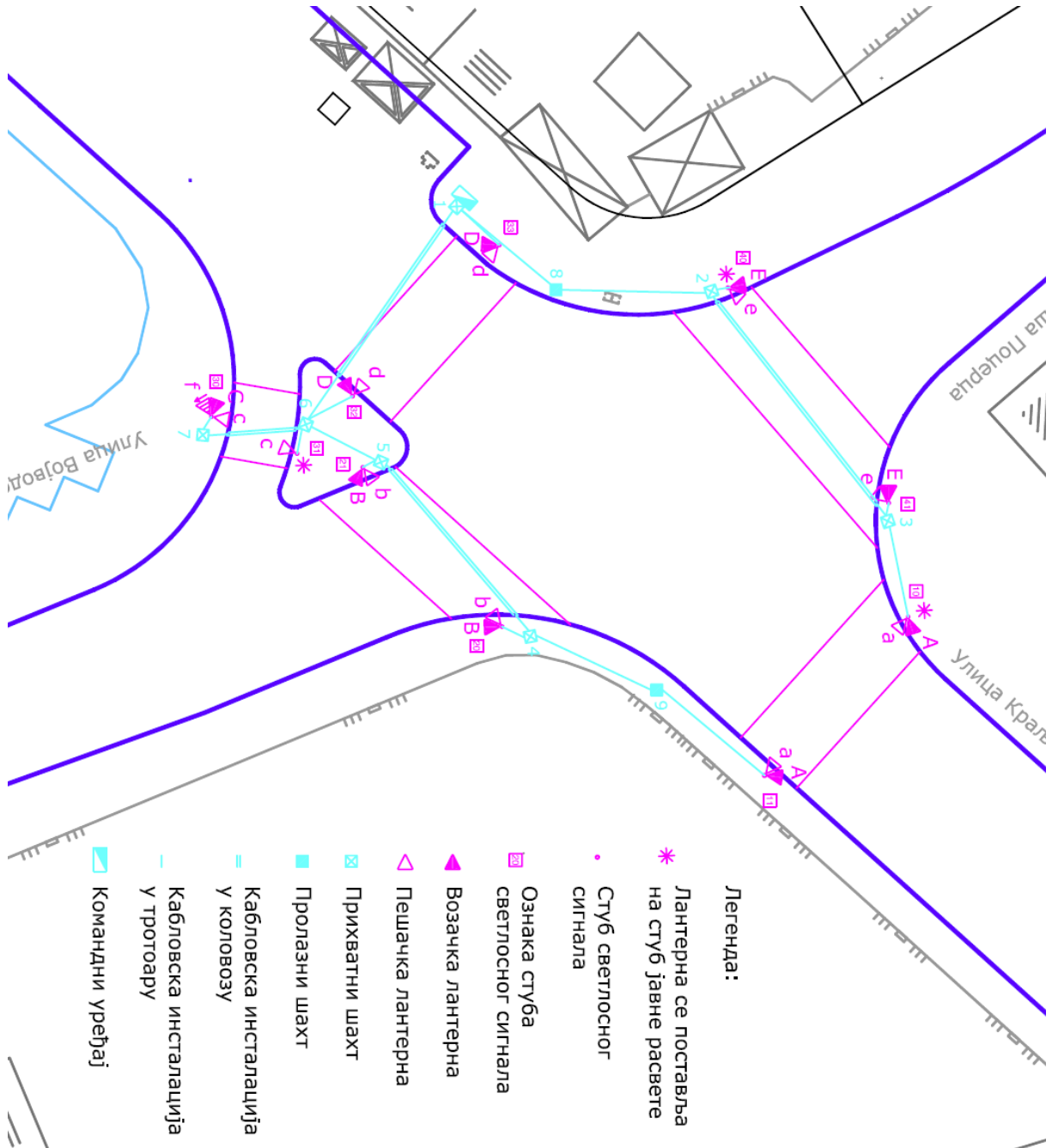


Plan tempiranja

Saobraćajna signalizacija



Mreža kablova na raskrsnici



LITERATURA

- [1]. Webster F., V., (1966), **Traffic Signals**, HMSO, London
- [2]. Stoffers K.E, (1968), "**Scheduling of Traffic Lights- A new approach**", *Transp.Res.* 2, 199-234
- [3]. Vukanović S., (1975), "**Priručnik za proračun vremenskih gubitaka na signalisanim raskrsnicama**", Saobraćajni fakultet, Beograd .
- [4]. Murchland J., Tully Z. (1976), "**Program SQGN: Traffic Signal Sequence Generator**", *UCL, Interim Report*
- [5]. Peterson B. E., (1977), "**Swedish Capacity Manual**", Stockholm.
- [6]. **Highway Capacity Manual** (TRB Special Report 209) - FHA (1985), Vasington.
- [7]. **Highway Capacity Manual** (TRB Special Report) - FHA (2000)., Vasington.
- [8]. Radoš J., Zdravković P., (1975), "**Kapacitet signalisanih raskrsnica**", Saobraćajni fakultet, Beograd.
- [9]. Vukanović S., (1980), "**Vremenski gubici, potrošnja goriva i kapacitet kao kriterijumi rada svetlosnih signala**", Magistarska teza., Saobraćajni fakultet, Beograd.
- [10]. Tarnoff and Parsons, "**Selecting Traffic Signal Control at Individual Intersections**", NCHRP Report 233, Transportation Research Board, DC, 1981.
- [11]. Akcelik, R., "**Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis**", Australian Road Research Board, Research Report, ARR No 123, 1981.
- [12]. Vukanović S., (1983), "**Normativni i deskriptivni kriterijumi rada svetlosnih signala**", Zbornik radova Saobraćajnog fakulteta, Beograd.
- [13]. Vukanović S. (1983), "**POTGOR-model za proračun potrosnje goriva kod vozila na signalisanim raskrsnicama**", Zbornik radova , V YU simpozij o elektroniki u prometu
- [14]. Vukanović S., Rados J., (1983), "**Metode proračuna rada signalisane raskrsnice na kojoj se upravljanje vrši novom generacijom kontrolera**", Zbornik radova, V YU simpozij o elektroniki u prometu
- [15]. Vukanović S., (1987), "**KAPS - računarski program za proračun kapaciteta signalisanih raskrsnica**", Saobraćaj 12, Beograd.
- [16]. Reljić S. (1988), "**TRAFISG: A computer program for signal settings at an isolated under-or oversaturated fixed time controlled intersection**", *Traffic Eng. Control* 29, 562-566
- [17]. Stanić B., (1988), "**Rezultati istraživanja uticaja dužine zelenog perioda i širine saobraćajne trake na intenzitet zasićenog (saobraćajnog) toka**", Saobraćaj 15, pp 855-857, Beograd.

- [18]. Vukanović S., Stanić B., (1990), "**Projektovanje signalisanih raskrsnica metodom HCM iz 1985-prednosti i nedostaci**", Saobraćaj 3-4, str. 217-220., Beograd.
- [19]. Papageorgiou, M., "**Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems**", Pergamon Press, 1991.
- [20]. "**Traffic Engineering Handbook**", ITE, Prentice Hall, 1992.
- [21]. Strong W. D., (1994) "**Changes to Chapter 9 of the 1985 Highway Capacity Manual (Signalized Intersections)**", ITE 1994 Compendium of Technical Papers.
- [22]. Teply S., (1994), "**Principles of Capacity**", ITE 1994 Compendium of Technical Papers.
- [23]. Vukanović S., (1996), "**Metode proračuna signalnih planova i izbora načina rada signalisanih raskrsnica**", Saobraćaj 5-6, str. 21-27., Beograd.
- [24]. Vukanović S., (1996), "**Saobraćajne mreže**", Saobraćajni fakultet, Beograd
- [25]. Vukanović S.,(1996) "**Metode proračuna signalnih planova i izbora načina rada signalisanih raskrsnica**", Tehnika separat saobraćaj 5-6 , str 21-27
- [26]. Vukanović S., Mitić D., (1997), "**Proračun nivoa usluge na signalisanim raskrsnicama po metodi HCM iz 1994**", Put I saobraćaj 3/97 str. 131-135, Beograd
- [27]. Osoba M., Vukanović S., Stanić B., (1998) "**Upravljanje saobraćajem pomoću svetlosnih signala**" (I deo), Saobraćajni fakultet Beograd
- [28]. Vukanović S., (2004) "**Proračun kapaciteta i nivoa usluge na signalisanim raskrsnicama po metodi HCM iz 2000 god.**" Tehnika separat saobraćaj 2/2004.
- [29]. Vukanović S., (2005) "**Analiza nivoa usluge na primarnim gradskim saobraćajnicama**", Tehnika -separat Saobraćaj 5/2005,