# MODERNA SVETLOSNO SIGNALISANA I INTELIGENTNA RASKRSNICA

*By* Milan Radivojević

WORD COUNT 48734
TIME SUBMITTED 08-OCT-2020 02:07PM
PAPER ID 63873711

UNIVERZITET SINGIDUNUM
BEOGRAD
DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE

# DOKTORSKA DISERTACIJA

## MODERNA SVETLOSNO SIGNALISANA I INTELIGENTNA RASKRSNICA

MENTOR:

Prof. dr Marko Tanasković

STUDENT: Milan Radivojević

BROJ INDEKSA: 466059/2015

Beograd, 2020.god.

Mentor: Doc. dr Marko Tanasković, Univerzitet Singidunum Beograd

ČLANOVI KOMISIJE:

1. Prof. dr Marko Tanasković
2. Prof. dr Marina Marjanović Jakovljević
3. Prof. dr Zoran Stević

Datum odbrane

_____

SINGIDUNUM UNIVERSITY
BELGRADE
DEPARTMENT FOR DOCTORAL STUDIES

# DOCTORAL THESIS

## MODERN LIGHT SIGNALED AND SMART INTERSECTION

MENTOR:

Prof. dr Marko Tanasković

STUDENT: Milan Radivojević

INDEX NUMBER: 466059/2015

Belgrade, 2020

Mentor: Marko Tanasković, associate professor, Singidunum University, Belgrade

THE COMISSION MEMEBERS:

1. Marko Tanasković, associate professor

2. Prof. Marina Marjanović Jakovljević, PhD

3. Prof. Zoran Stević, PhD

Date of defense

_____

# ZAHVALNICA

Dugujem veliku zahvalnost svom mentoru, Prof. dr Marku Tanaskoviću, za neizmernu pomoć, podršku i poverenje koje mi je ukazao i koji me je na pravi način uputio i vodio kroz celi postupak istraživanja. Posebno se zahvaljujem Prof. dr Zoranu Steviću, koji je svojim sugestijama, komentarima i savetima doprineo poboljšanju kvaliteta ovog rada.

Hvala saradnicima i kolegama Instituta za rudarstvo i metalurgiju u Boru koji su mi pomogli u toku pripreme i realizacije doktorske disertacije.

Zahvaljujem se roditeljima, članovima porodice, posebno ćerki Sofiji, za pruženu podršku i razumevanje, kao i za sva odricanja koja su bila neminovna prilikom izrade ove disertacije.

Milan D. Radivojević

# MODERNA SVETLOSNO SIGNALISANA I INTELIGENTNA RASKRSNICA

*Rezime:* Istraživanja koja su sprovedena u okviru disertacije poslužila su za definisanje algoritama i softverske strukture adaptivnih sistema koji se mogu primeniti u oblasti regulisanja saobraćaja na svetlosno signalisanim raskrsnicama. Utvrđen je model za proračun signalnog plana semaforizovanih četvorokrakih raskrsnica sa dve i više faza na kojima se saobraćaj može odvijati u uslovima nezasićenih i prezasićenih saobraćajnih tokova. U disertaciji je izvršena posebna analiza, kao i testiranje funkcionisanja predloženih adaptivnih sistema za regulisanje saobraćaja za slučajeve kada kroz raskrsnicu prolaze vozila sa pravom prioriteta i kada se nalaze u zonama dileme.

*Ključne reči:* Regulisanje saobraćaja, semafori, signalni plan, protok vozila, adaptivni sistemi, detektori.

*Naučna oblast*: Saobraćajno inženjerstvo

# MODERN LIGHT SIGNALED AND SMART INTERSECTION

*Abstract:* The research conducted within this thesis served to define the algorithms and software structures of adaptive systems that can be applied in the field of traffic regulation at light-signaled intersections. A model for the calculation of the signal plan for four-way intersection, regulated by traffic lights, with two or more stages at which traffic can take place under conditions of unsaturated (non-congested) and saturated (congested) traffic flows, has been established. A special analysis was conducted, as well as testing of functionality of suggested adaptive systems for traffic regulation in cases when there are emergency vehicles passing through the intersection, and when such vehicles are in the dilemma zone.

*Key words:* traffic regulation, traffic lights, signal plan, traffc flows, adaptive systems, detectors.

*Scientific area*: Traffic engineering

## SKRAĆENICE KORIŠĆENE U RADU

ASUS - *Adaptvni sistem upravljanja saobraćajem*
CEMT - *Evropska konferencija ministara saobraćaja (Conférence Européenne des Ministres des Transports)*
DP - *Daljinski put,*
GP - *Glavni prilaz*
HCM - *Priručnik o propusnoj moći puteva* (*The Highway Capacity Manual – publikacija Nacionalne akademije nauka Sjedinjenih Američkih Država*),
IVHS - *Intelligent Vecl 19 Highway System*
OECD - *Međunarodna organizacija za ekonomsku saradnju i razvoj* (*Organisation for Economic Cooperation and Development)*
OUN - *Organizacija Ujedinjenih Nacija,*
PAJ – *Jedinice putničkih automobila*
PDS - *Prosećan broj vozila na dan za određeni mesec*
PGDS - *Prosećan broj vozila na dan za određenu godinu*. PGDS može biti određen za sva vozila i za pojedinačnu kategoriju vozila (PA – putnički automobil, LTV – lako tereno vozilo, TTV – teško teretno vozilo, AV – autovoz, BUS – autobus)
PP - *Pristupni put,*
SP - *Sabirni put,*
SPR - *Sporedni prilaz*
VI - *Virtuelni instrument*
VP - *Vezni put,*
WHO - *Svetska zdravstvena organizacija* (*World Health Organization*),

## SADRŽAJ


**UVOD** ..... **19**

**1. OSNOVNI ELEMENTI DRUMSKOG SAOBRAĆAJA I RASKRSNICA** ..... **24**

**1.1. Saobraćajni tok i osnovni parametri saobraćajnog toka** ..... **26**

*1.1.1. Upravljanje drumskim saobraćajem i regulisanje saobraćaja* ..... 28

**1.2. Raskrsnice** ..... **30**

*1.2.1. Osnovni tipovi površinskih raskrsnica* ..... 32

*1.2.2. Kapacitet i nivo usluga raskrsnice* ..... 35

1.2.2.1. Kapacitet semaforizvane raskrsnice ..... 36

1.2.2.2. Stepen zasićenja saobraćajne trake ..... 37

1.2.2.3. Vremenski gubici na semeforizovanim raskrsnicama ..... 38

1.2.2.4. Efikasnost rada i nivoi usluga semaforizovanih raskrsnica ..... 40

**2. UČESNICI I BEZBEDNOST UČESNIKA U DRUMSKOM SAOBRAĆAJU** ..... **42**

**2.1. Pojam i osnovni faktori bezbednosti saobraćaja** ..... **42**

*2.1.1. Čovek kao faktor bezbednosti saobraćaja* ..... 43

*2.1.2. Vozilo kao faktor bezbednosti saobraćaja* ..... 44

*2.1.3. Put kao faktor bezbednosti saobraćaja* ..... 45

*2.1.4. Okruženje kao faktor bezbednosti saobraćaja* ..... 46

**2.2. Učesnici u drumskom saobraćaju** ..... **46**

**2.3. Zakoni i drugi normativni akti u oblasti bezbednosti saobraćaja** ..... **48**

**3. REGULISANJE SAOBRAĆAJA NA RASKRSNICAMA** ..... **51**

**3.1. Horizontalna signalizacija** ..... **52**

*3.1.1. Uzdužne oznake na kolovozu* ..... 52

*3.1.2. Poprečne oznake na kolovozu* ..... 53

*3.1.3. Ostale oznake na kolovozu* ..... 54

*3.1.4. Prednosti i nedostaci horizontalne signalizacije* ..... 55

**3.2. Vertikalna signalizacija** ..... **55**

*3.2.1. Znakovi obaveštenja za vođenje saobraćaja* ..... 56

**3.3. Svetlosna signalizacija** ..... **57**

*3.3.1. Kriterijumi za uvođenje svetlosnih signala na raskrsnicama* ..... 59

*3.3.2. Prednosti i nedostaci svetlosne signalizacije* ..... 60

**4. UPOTREBA SAOBRAĆAJNE SIGNALIZACIJE I NAČINI REGULISANJA SAOBRAĆAJA NA POVRŠINSKIM RAKRSNICAMA** ..... **61**

**4.1. Svetlosno signalisana raskrsnica** ..... **64**

*4.1.1. Proračun signalnog plana, fazni plan i plan tempiranja signala* ..... 66

**5. INTELIGENTNA SVETLOSNO SIGNALISANA RASKRSNICA** ..... **72**

5.1. **Pregled literature i analiza sadržaja naučnih radova koji obrađuju problemiku semaforizovanih raskrsnica** ..... 72

**5.2. Razvoj i osnovne karakteristike adaptvnih sistema upravljanja saobraćajem** ..... **75**
*5.2.1. SCATS* ..... 77
*5.2.2. SCOOT* ..... 77
*5.2.3. UTOPIA* ..... 78
*5.2.4. OPAC* ..... 78
*5.2.5. PRODYN* ..... 78
*5.2.6. CRONOS* ..... 79
*5.2.7. MOTIO* ..... 79
*5.2.8. Ostali adaptivni sistemi upravljanja saobraćajem* ..... 79
**5.3. Elementi inteligentne svetlosno signalisane raskrsnice** ..... **80**
**5.4. Programsko rešenje adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem na izolovanoj površinskoj raskrsnici** ..... **81**
*5.4.1 Hardverska struktura sistema* ..... 81
*5.4.2. Programska podrška sistema* ..... 82
*5.4.3. Programsko rešenje za rad adaptivnog sistema upavljanja saobraćajem* ..... 82

***5.4.3.1. Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica*** ..... **85**
5.4.3.1.1. Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica sa fiksnim režimom rada i konstantnim vrednostima prosečnih tokova vozila bez i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme ..... 89
5.4.3.1.2. Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intezitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme ..... 93
5.4.3.1.3. Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme ..... 98
5.4.3.1.4. Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica sa različitim dnevnim signalnim planovima i mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme ..... 99
***5.4.3.2. Četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa adaptivnim režimom rada, četiri faze i mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama ..... 100***

**5.5. Testiranje funkcionisanja raskrsnica i dobijeni rezultati ..... 106**
*5.5.1. Dvofazna semaforizovna raskrsnica sa fiksnim režimom rada bez i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* ..... 106
*5.5.2. Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intezitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* ..... 109

*5.5.3. Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* ....112
*5.5.4. Dvofazna semaforizovana raskrsnica sa fiksnim režimom rada, različitim dnevnim signalnim planovima i mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* ....114
*5.5.5. Četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa adaptivnim režimom rada, četiri faze i mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* ....115

**6. DETEKCIJA VOZILA, PEŠAKA I OSTALIH OBJEKATA UPOTREBOM VIDEO DETEKTORA ....118**

**6.1. Video detektori ....118**

*6.1.1. Programsko rešenje za određivanje položaja i brzine vozila* ....119
*6.1.2. Programsko rešenje za detekciju i određivanje protoka vozila i pešaka* ....123

**7. PREGLED PREDNOSTI I NEDOSTATAKA INTELIGENTNE SVETLOSNO SIGNALISANE RASKRSNICE U ODNOSU NA RASKRSNICU SA FIKSNIM REŽIMOM RADA ....130**

**ZAKLJUČAK I PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA ....132**

**LITERATURA ....134**

PRILOG 1: **E – PUTEVI U REPUBLICI SRBIJI** ....**140**

PRILOG 2: **PRVI SAOBRAĆAJNI ZNAKOVI SLIČNI DANAŠNJIM KORIŠĆENI SU U NEMAČKOJ OD 1907. DO 1910.GODINE ....140**

PRILOG 3: **SAOBRAĆAJNI ZNAKOVI KORIŠĆENI U NEMAČKOJ OD 1910-1927. GODINE ....141**

PRILOG 4: **PRVI MEĐUNARODNI SAOBRAĆAJNI ZNAKOVI ....141**

PRILOG 5: **PRVI SEMAFORI** ....**141**

PRILOG 6: **VREMENSKA NERAVNOMERNOST SAOBRAĆAJNOG TOKA** ....**142**

PRILOG 7: **PRETVARANJE NEHOMOGENOG U USLOVNO HOMOGEN SAOBRAĆAJNI TOK** ....**144**

PRILOG 8: **ANALITIČKI IZRAZ ZA IZRAČUNAVANJE ZASIĆENOG TOKA ....145**

PRILOG 9: **ODREĐIVANJE ZAŠTITNOG VREMENA** ....**146**

PRILOG 10: **PREGED SAOBRAĆAJNIH ZNAKOVA KOJI SE NAJČEŠĆE KORISTE U BLIZINI ILI PODRUČJU RASKRSNICE ....150**

PRILOG 11: **DETEKTORI ....150**

PRILOG 12: **ZONA DILEME ....153**

PRILOG 13: **PREDSTAVLJANJE SLIKE U DIGITALNOM OBLIKU ....156**

PRILOG 14: **BLOK DIJAGRAMI SEMAFORIZOVANIH RASKRSNICA ....158**

**PREGLED SLIKA**


Slika 1. *Struktura kolovoza* .....24

Slika 2. *Saobraćajna traka za isključivanje* .....24

Slika 3. *Saobraćajna traka za uključivanje* .....24

Slika 4. *Deo autoputa* .....24

Slika 5. *Pravilna površinska četvokraka raskrsnica* .....30

Slika 5a. *Denivelisana raskrsnica* .....30

Slika 6. *Konfliktne tačke na:* ***a****. pravilnoj četvorokrakoj i* ***b****. kružnoj raskrsnici* .....31

Slika 7. *Područje površinske raskrsnice (oivičeno žutom linijom)* .....32

Sika 8. *Trokrake, četvorokrake i raskrsnica sa više krakova* .....32

Slika 9. *Kružna raskrsnica* .....32

Slika 10. *Nekanalisana (a.) i kanalisana (b.) trokraka raskrsnica* .....33

Slika 11. *Semaforizovana raskrsnica* .....33

Slika 12. *Standardna nesignalisana raskrsnica* .....34

Slika 13. *Nestandardna nesignalisana raskrsnica* .....34

Slika 14. *Osnovne komponente vremenskih gubitaka na semaforizovanim raskrsnicama* .....38

Slika 15. *Osnovni elementi faktora "čovek"* .....43

Slika 16. *Osnovni elementi faktora „vozilo"* .....45

Slika 17. *Osnovni elementi faktora "put"* .....45

Slika 18. *Saobraćajne nezgode sa povređenim i poginulim licima u Republici Srbiji* .....47

Slika 19. *Neisprekidane (a.) i isprekidane (b.) razdelne linije u području raskrsnice* .....52

Slika 20. *Prelaz biciklističke staze preko kolovoza paralelan sa pešačkim prelazom* .....53

Slika 21. *Vrste strelica* (*a., b., c., d.* i *e.*) *i strelice na biciklističkim površinama (f.)* .....54

Slika 22. *Kanalisana raskrsnica* .....54

Slika 22a. *Polje za usmeravanje i saobraćajno ostrvo* .....54

Slika 23. *Saobraćajni znakovi koji se najčešće koriste na raskrsnicama* .....55

Slika 24. *Znakovi za vođenje saobraćaja* .....57

Slika 25a. *Vozačka i pešačka lanterna i svetlosne oznake* .....57

Slika 25. *Semafori sa tri boje postavljeni po vertikalnoj i horizontalnoj osi* .....58

Slika 26. *Semafori sa grafičkim simbolima (a.) i sa dodatnim svetlosnim saobraćajnim znakom (b.)* .....58

Slika 27. *Svetlosni saobraćajni znakovi za regulisanje kretanja po saobraćajnim trakama* .....58

Slika 28. *Semafori za regulisanje kretanja pešaka, biciklista i tramvaja* .....58

Slika 29. *Saobraćajni znakovi na nosačima semafora* .....59

Slika 30. *Definisanje namene saobraćajnih površina upotrebom horizontalne signalizacije* .....61

Slika 31. *Vođenje i usmeravanje saobraćajnih tokova u područjima raskrsnica* .....62

Slika 32. *Označavanje pojedinih saobraćajnih znakova na kolovozu* .....62

Slika 33. *Saobraćajni znakovi kojima se određuje redosled prvenstva prolaza na raskrsnici* ....62

Slika 34. *Određivanje redosleda prvenstva prolaza saobraćajnim znakovima* .....63

Slika 35. *Saobraćajni znakovi koji upozoavaju vozače da nailaze na ukrštanje sa sporednim putem* .....63

Slika 36. *Regulisanje saobraćaja na kružnoj raskrsnici vertikalnom i horizontalnom signalizacijom* .....64

Slika 37. *Saobraćajni znakovi kojima se reguliše saobraćaj na kružnim raskrsnicama* .....64

Slika 38. *Semaforizovana raskrsnica sa tokovima vozila* .....67

Slika 39. *Plan tempiranja signala i raspored signalnih pojmova na semaforima* .....68

Slika 40. *Semaforizovana raskrsnica sa tokovima vozila i pešaka* .....69

Slika 41. *Plan tempiranja signala za raskrsnicu na slici 40*.....70

Slika 42. *Konfliktni saobraćajni tokovi na semaforizovanoj raskrsnici* .....70

Slika 43. *Matrica zaštitnih vremena za raskrsnicu sa slike 41.* .....71

Slika 44. *Šematski prikaz hardverske strukture adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem* ..76

Slika 45. *Centralizovan adaptivni sistem* ..... 76

Slika 46. *Decentralizovan adaptivni sistemi* ..... 76

Slika 47. *Svetlosno signalisana raskrsnica* ..... 80

Slika 48. *Inteligentna svetlosno signalisana raskrsnica* ..... 80

Slika 49. *Šematski prikaz funkcionalne strukture adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem na semaforizovanoj raskrsnici* ..... 81

Slika 50. *Model adaptivnog sistema upravljanja sobraćajem na semaforizovanoj izolovanoj raskrsnici* ..... 82

Slika 51. *Generisanje ciklusa i dužina zelenog svetla* ..... 83

Slika 52. *Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica* ..... 85

Slika 53. *Osnovni algoritam semaforizovane dvofazne raskrsnice* ..... 87

Slika 54. *Prolaz vozila sa pravom prioriteta* ..... 88

Slika 55. *Plan tempiranja za tokove pešaka* ..... 88

Slika 56. *Treptuće zeleno svetlo za pravac A-C* (*a.*) i *pravac B-D* (*b.*) ..... 89

Slika 57. *Struktura dela osnovnog algoritma za unos prosečnih vrednosti saobračajnih tokova* ..... 90

Slika 58. *Određivanje realne dužine trajanja ciklusa* ..... 90

Slika 59. *Prednja ploča VI-a sistema za upravljanje saobraćajem sa fiksnim režimom rada bez detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* ..... 91

Slika 60. *Prednja ploča VI-a sistema za upravljanje saobraćajem sa fiksnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* ..... 92

Slika 61. *Prednja ploča VI-a sistema za upravljanje saobraćajem sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intezitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* ..... 94

Slika 62. *Deo osnovnog agloritma, između tačaka F i G, sistema za upravljanje saobraćajem semaforizovane dvofazne raskrsnice sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intezitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* ..... 95

Slika 63. *Određivanje vremena opsluživanja vozila u toku aktuelnog ciklusa* ..... 96

Slika 64. *Izgled prednje ploće VI-a adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem na dvofaznoj četvorokrakoj semaforizovanoj raskrsnici* .....98

Slika 65. *Deo osnovnog algoritma sa slike 53., između tačaka F i G* .....99

Slika 66. *Prednja ploča sistema za upravljanje saobraćajem na semaforizovanoj raskrsnici sa četiri različita dnevna signalna plana* .....100

Slika 67. *Četvorokraka semaforizovana raskrsnica – četiri faze* .....101

Slika 68. *Predja ploča VI sistema semaforizovane raskrsnice, četiri faze – adaptivni sistem rada* .....101

Slika 69. *Trepćuće zeleno svetlo* .....103

Slika 70. *Osnovni algoritam semaforizovane raskrsnice, četiri faze – adaptivni sistem rada* ..104

Slika 71. *Deo osnovnog algoritma sa slike 69, između tačaka F i G* .....105

Slika 72. *Prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama dvofazne semaforizovne raskrsnice sa fiksnim režimom rada bez mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....107

Slika 73. *Stepeni zasićenja saobraćajnih traka dvofazne semaforizovne raskrsnice sa fiksnim režimom rada bez mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....107

Slika 74. *Prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama dvofazne semaforizovne raskrsnice sa fiksnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....108

Slika 75. *Stepeni zasićenja saobraćajnih traka dvofazne semaforizovne raskrsnice sa fiksnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....108

Slika 76. *Prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama četvorokrake dvofazne semaforizovane raskrsnice sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intenzitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....110

Slika 77. *Stepeni zasićenja saobraćajnih pristupnih traka četvorokrake dvofazne semaforizovane raskrsnice sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intenzitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....110

Slika 78. *Prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama četvorokrake dvofazne semaforizovane raskrsnice sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....112

Slika 79. *Stepeni zasićenja pristupnih traka četvorokrake dvofazne semaforizovane raskrsnice sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....112

Slika 80. *Prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama četvorokrake dvofazne semaforizovane raskrsnice sa fiksnim režimom rada, različitim dnevnim signalnim planovima i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....114

Slika 81. *Stepeni zasićenja pristupnih traka četvorokrake dvofazne semaforizovane raskrsnice sa fiksnim režimom rada, različitim dnevnim signalnim planovima i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....114

Slika 82. *Prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama četvorokrake semaforizovane raskrsnice sa adaptivnim režimom rada, četiri faze i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....115

Slika 83. *Stepeni zasićenja pristupnih traka četvorokrake semaforizovane raskrsnice sa adaptivnim režimom rada, četiri faze i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....116

Slika 84. FLIR TrafiCam: *Otkriva pokretna i nepomična vozila na semaforizovanim raskrsnicama, detektovani podaci prenose se u računarski sistem na dalju obradu* .....118

Slika 85. TrafiData 690: *Inteligentna termovizijska kamera. Koristi se za detekciju vozila i pešaka na semaforizovanim raskrsnicama* .....118

Slika 86. FLIR ITS644 AID*: Termovizijska kamera za detekciju saobraćajnih nezgoda požara i prikupljanje drugih podataka* .....118

Slika 87. ThermiBot2: *Ineligentna termovizijska kamera. Koristi se za prikupljanje podataka o saobraćaju na signalisanim raskrsnicama* .....118

Slika 88. *Šematski prikaz povezivanja termovizijske kamere sa personalnim računarom* .....119

Slika 89. *Izgled prednje ploče virtuelnog instrumenta za određivanje brzine vozila* .....120

Slika 90. *Položaji vozila* $x_1, x_2, x_3, \ldots x_{n-1}, x_n$ *u trenucima* $t_1, t_2, t_3, \ldots t_{n-1}$ *i* $t_n$ .....121

Slika 91. *Algoritam – izračunavanje brzine vozila* .....122

Slika 92. *Blok dijagram virtuelnog instrumenta za određivanje brzine vozila* .....122

Slika 93. *Algoritam – detekcija vozila (pešaka) i određivanje broja i protoka vozila (pešaka)* .....124

Slika 94. *Prednja ploča VI-a za detekciju, brojanje i izračunavanje protoka vozila (pešaka)* .....125

Slika 95. *Blok dijagram VI-a za detekciju i određivanje broja i protoka vozila (pešaka)* .....126

Slika 96. *Semaforizvana raskrsnica sa instalisanim video detektorima* .....126

Slika 97. *Deo algoritma sa slike 96. između tačaka K i L* .....127

Slika 98. *Algoritam dvofazne semaforizovane raskrsnice sa preskakanjem faze* .....128

Slika 99. *Prednja ploča VI-a semaforizovane raskrsnice sa preskakanjem faze* .....129

## PREGLED TABELA


Tabela 1. *Vrste i tipovi puteva prema funkcionalnoj klasifikaciji* .....26

Tabela 1. *Dozvoljene vrste i opremanje raskrsnica* .....35

Tabela 3. *Nivoi usluge i prosečni vremenski gubici* .....41

Tabela 4. *Kriterijum protoka vozila na glavnom i sporednom pravcu* .....60

Tabela 5. *Kriterijum protoka pešaka* .....60

Tabela 6. *Vrednosti tokova vozila i zasićenih tokova saobraćajnih traka raskrsnice sa slike 38* .....67

Tabela 7. *Vrednosti tokova vozila i zasićenih tokova saobraćajnih traka. raskrsnice sa slike 40.* .....69

Tabela 8. *Intenzitet i broj neopsluženih vozila tokom ciklusa dvofazne semaforizovane raskrsnice sa fiksnim režimom rada i mogučnošću detekcije vozila sa prioritetom i vozila u zonama dileme* .....109

Tabela 9. *Stepeni zasićenja i dužine trajanja ciklusa semaforizovane dvofazne raskrsnice sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intenzitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....111

Tabela 10. *Intenzitet i broj neopsluženih vozila tokom ciklusa semaforizovane dvofazne raskrsnice sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intenzitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* ..... 111

Tabela 11. *Stepeni zasićenja i dužine trajanja ciklusa semaforizovane dvofazne raskrsnice sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* ..... 113

Tabela 12. *Intenzitet i broj neopsluženih vozila tokom ciklusa semaforizovane dvofazne raskrsnice sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* ..... 113

Tabela 13. *Stepeni zasićenja i dužine trajanja ciklusa semaforizovane raskrsnice sa adaptivnim režimom rada, četiri faze i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme* .....116

## UVOD

Danas se sa pravom smatra da je drumski saobraćaj jedan od osnovnih elemenata na kojima počiva svako savremeno društvo. Drumski prevoz, odnosno drumski saobraćaj je najmasovniji oblik prevoza putnika, stvari i tereta na kratka i srednja rastojanja i odvija se na putevima obezbeđujući povezivanje i komunikacije između krajeva jedne zemlje, države kao i povezivanje zemlje kao celine sa ostalim delovima sveta. Kao deo kopnenog saobraćaja predstavlja izuzetno važan činilac ukupnog privrednog i društvenog razvoja svake zemlje. Jedna od osnovnih karakteristika drumskog saobraćaja je masovnost učesnika u njemu, što zahteva posebno upravljanje, njegovo regulisanje i kontrolu. Pored prednosti koje pruža, omogućujući pre svega prevoz „od vrata do vrata“, drumski saobraćaj izaziva i niz štetnih posledica: zagađenje životne okoline, stvaranje buke, zastoje u saobraćaju, ugrožavanje okoline prevozom opasnih materija, požare i druge posledice. Najštetnije posledice saobraćaja su saobraćajne nezgode, koje, osim što ogromnim troškovima opterećuju svako društvo, imaju za posledicu i veliki broj stradalih lica [1]. Zbog toga je opravdana potreba postojanja jedinstvenih pravila za regulisanje kretanja učesnika u saobraćaju da bi se ublažile štetne posledice i izbegli mogući konflikti na putevima. Organizacija kretanja učesnika u drumskom saobraćaju pomoću pravila, obuhvata sve uslove i situacije kretanja. Regulisanje saobraćaja pravilima je uvedeno čak pre nekoliko vekova, radi regulisanja kretanja konjanika i zaprežnih vozila. Poznato je, primera radi, da obeležavanje puteva i putnih pravaca potiče još iz rimskog doba kada su se za obeležavanje koristili kameni stubovi visine oko 1,5 metara ukopani u zemlju [2]. Njihova funkcija je bila da pokazuju udaljenost između mesta na odgovarajućem putnom pravcu i da predstave graditelje puteva iz tog vremena. U srednjem veku pojavljuju se prvi višesmerni znakovi na raskrsnicama koji daju upustva o gradovima i mestima do kojih vode putevi koji se ukrštaju na raskrsnicama.

Prvi asfaltni put u drumskom saobraćaju izgrađen je početkom dvadesetog veka u Monte Karlu, a dvadesetak godina kasnije u Italiji je izgrađena prva automagistrala. U istom periodu započela je izgradnja automagistrala i u Nemačkoj[1]. Danas, najveću ukupnu dužinu automobilskih puteva imaju Sjedinjene Američke Države, zatim slede Brazil, Kina i druge. Sjedinjene Američke Države takođe imaju i najrazvijeniju mrežu autoputeva, a odmah iza njih su Kina, Japan, Indija, Rusija i zapadnoevropske zemlje. U pojedinim regionima sveta autoputevi sačinjavaju jedinstvene saobraćajne sisteme (u Severnoj Americi – Panamerički put, u Evropi – panevropski koridori) koji imaju važnu ulogu u ostvarivanju međunarodnih veza i integrisanje saobraćajnih sistema pojedinih zemalja.

Republika Srbija spada u države sa dobro razvijenom mrežom puteva ukupne dužine 42.692 km [3]. Putnu mrežu čine javni (državni putevi prvog i drugog reda – klasa A i B, opštinski putevi i ulice) i nekategorisani putevi. Državni putevi su javni putevi kojima se Republika Srbija povezuje sa mrežom evropskih puteva, sa mrežom najvažnijih puteva susednih zemalja i sa većim gradovima, naseljima i okruzima na teritoriji Republike. U okviru mreže puteva prvog reda, 2.150 km puteva u Srbiji pripada evropskoj mreži (E - putevi)[2] puteva [4]. Opštinski putevi su putevi koji povezuju područje lokalne samouprave (grada ili opštine) ili područje lokalne samouprave sa državnim putevima. Nekategorisani putevi su putevi značajni u okviru naselja, koji su dostupni većem broju korisnika i proglašeni su kao takvi odlukom odgovarajićeg nadležnog organa.

Pojavom automobila, intenzivan razvoj automobilske industrije, koji je započeo osamdesetih godina devetnaestog veka, i korišćenje automobila u drumskom saobraćaju nastala je potreba za većom bezbednosti kretanja, što je dovelo do toga da saobraćajni znakovi[3] i pravila za regulisanje saobraćaja postanu posebno značajni za ovu oblast. Prva pravila za regulisanje automobilskog

---

[1] U centru Beograda ulice su bile popločane drvenim kockama sve do početka dvadesetog veka[1].

[2] Prilog 1.

[3] Prilozi 2. i 3.

saobraćaja bila su uvedena u Sjedinjenim Američkim Državama tokom 1896. godine da bi ubrzo posle toga usledilo njihovo uvođenje i u drugim zemljama. Pravila su tokom vremena, posebno zbog porasta korišćenja automobila i izgradnje puteva, menjana i dopunjavana uvođenjem više detalja i orjentisana na primenu tehničkih sredstava za upravljanje saobraćajem, posebno upotrebom saobraćajnih znakova, svetlosnih signala i oznaka na kolovozu. Razvoj međunarodnog drumskog saobraćaja, koji je započeo tokom dvadesetog veka, zahtevao je unifikaciju pravila za regulisanje drumskog saobraćaja koji se obavlja na široj teritoriji i između pojedinih država. Prvo međunarodno usaglašavanje pravila kretanja u drumskom saobraćaju realizovano je u Parizu 1909. godine kada je doneta prva međunarodna konvencija o putnom i automobilskom saobraćaju. Tom prilikom prihvaćeni su i prvi saobraćajni znakovi[4]. Posle toga usledile su konvencije i u drugim gradovima: Pariz, 1926. godine kada su donete Međunarodna konvencija o putnom saobraćaju i Međunarodna konvencija o autotransportu (dopunjene tokom 1931. godine Konvencijom o pravilima kretanja automobila između američkih država), zatim Ženeva, 1949. godine kada je donesen i Protokol o signalizaciji na putevima. Cilj Konvencije o drumskom saobraćaju bio je doprinos razvoju međunarodnog saobraćaja i povećanje njegove bezbednosti. Konvenciju je prihvatio veliki broj razvijenih zemalja (78), među kojima i Jugoslavija, što je obezbedilo unifikaciju nacionalnih pravila drumsog saobraćaja. Između ostalih, Konvencija je razrešila i tri osnovne grupe pitanja: zahteve koje moraju ispunjavati vozači automobila i dokumente koje moraju posedovati u međunarodnom saobraćaju; osnovne zahteve učesnika u drumskom saobraćaju za bezbednost saobraćaja i važne tehničke zahteve za bezbedno kretanje saobraćajnih sredstava. Protokol o putnoj signalizaciji, koji je prihvatilo 38 zemalja, među kojima je i tadašnja Jugoslavija, utvrdio je sistem putnih znakova, način njihovog postavljanja duž puta i osnove svetlosne signalizacije.

Usled izrazitog porasta broja motornih vozila u periodu od 1950. do 1960. dodine, doneti dokumenti iz 1949. godine nisu više mogli da zadovolje zahteve mnogo intenzivnijeg i bržeg kretanja saobraćajnih sredstava. Zbog toga je 1964. godine, u okviru Evropske ekonomske komisije OUN, započet rad na izradi novih dokumenata. Novembra 1968. godine u Beču na Konferenciji OUN o drumskom saobraćaju donete su nove konvencije: Konvencija o drumskom saobraćaju i Konvencija o putnoj signalizaciji. Konvencija o putnom saobraćaju iz 1968. godine sadrži, osim preciznih i detaljnih pravila za regulisanje kretanja automobila i pešaka na putevima, i potrebne uslove i pravila za kretanje tramvaja, biciklista, mopedista, invalidskih kolica, zaprežnih vozila, stoke i dr. U tom dokumentu navode se definicije za niz pojmova od važnosti za jedinstvenu saobraćajnu terminologiju, utvrđuju se obaveze potpisnika konvencije, obrađuje posebno signalizacija, propisi i naredbe za regulisanje saobraćaja, utvrđuje obavezno ponašanje pri preticanju, vožnji u koloni, ukrštanju, brzini kretanja i rastojanju vozila, reguliše se kretanje vozila javnog saobraćaja, utvrđuje se ponašanje u slučaju saobraćajnih nezgode, regulišu se osnovni uslovi koje moraju ispunjavati javni putevi i vozila u saobraćaju, osnovna pravila saobraćaja i sistem saobraćajnih znakova kao i osnovni uslovi za sticanje prava na upravljanje motornim vozilima [4]. Kod nas (u Jugoslaviji) je, 1965. godine, donet prvi Osnovni zakon o bezbednosti saobraćaja na javnim putevima. Od tada pa do danas, pored ostalih, doneti su Republički Zakon o bezbednosti saobraćaja na putevina, Zakon o javnim putevima, Pravilnik o saobraćajnoj signalizaciji i druga podzakonska akta čije su dopune i izmene, radi usaglašavanja sa međunarodnim propisima o drumskom saobraćaju i poboljšanja uslova, kvaliteta i bezbedosti saobraćaja u celini, vršene u više navrata.

Železnica, koja je sredinom devetnaestog veka bila u punom zamahu, posebno u Engleskoj, koristila je sistem semafora. Ta verzija semafora imala je dve staklene ploče na kojima su tokom dana ispisane reči „kreni“ i „stani“ (noću su se staklene ploče osvetljavale gasnim lampama

[4] Prilog 4.

crvenom i zelenom bojom) koje su signalizirale da li voz može proći ili ne. Engleski železnički inženjer i pronalazač John Peake Knight (Najt) predložio je da se ove metode svetlosne signalizacije prilagode i za kontrolu drumskog saobraćaja.

Prvi semafor[5], sličan onom koji je koristila železnica, postavljen je decembra 1868. godine ispred Britanskog parlamenta u Londonu. Semafor je imao obojene trake crvene i zelene boje koje su pokazivale da li je kretanje dozvoljeno ili nije. Njime se upravljao ručno, polugom pri samom postolju semafora, kojom se traka pomerala tako da bude vidljiva crvena ili zelena boja. Prvi moderni električni semafor sa crvenim i zelenim svetlima postavljen je 1912. godine u Slot Lejk Sitiju (Sjedinjene Američke Države). Podsećao je na četvorostranu kućicu za optice koja se je nalazila na vrhu stuba. Semafor je kasnije usavršio Džejms Hodž (Klivlend), a novitet u radu je bila promenljivost brzine kojom se menjaju signali na semaforu kako bi olakšali rad policijskim i vatrogasnim službama. Prvi semafor koji je regulisao saobraćaj u sva četiri smera na raskrsnici i sa tri boje (pored crvene i zelene, ubačena je žuta, kao boja upozorenja), napravljen je 1920. godine u Detroitu. Ubrzo nakon toga, odnosno nakon dve godine, u Hjustonu je uvedena prva automatska kontrola umreženih raskrsnica. U Evropi je prvi semafor postavljen 1924.godine u Berlinu. Petnaest godina kasnije, novembra 1939. godine, prvi semafor postavljen je i u Srbiji, odnosno u Beogradu na raskrsnici ulica Kralja Aleksandra, Kneza Miloša i Takovske.

Nakon Drugog svetskog rata, zbog naglog povećanja broja vozila i ostalih učesnika u saobraćaju, započela je sveobuhvatna modernizacija semafora i drugih signalnih uređaja, tako da se danas savremeni signalni uređaji sa upravljanjem zavisnim od količine, gustine i brzine saobraćaja, primenjuju širom sveta. Za rad takvih uređaja sve više se koriste računarski sistemi koji su se počeli primenjivati od šezdesetih godina prošlog veka. Obrada velikog broja podataka i saobraćajnih parametara, memeorisanje i velika brzina obrade podataka afirmisale su danas njihovu primenu i u oblasti regulisanja saobraćaja.

Osnovne hipoteze od kojih se pošlo u istraživanja, čiji su rezultati prezentirani u disertaciji, su:

1. Postoji mogućnost definisanja algoritma za praćenje svih relevantnih parametara saobraćaja u olasti raskrsnice,
2. Moguće je projektovati bazu podataka za monitoring svih parametara saobraćaja, uključujući i meteorološke, na osnovu koje se mogu predložiti rešenja za poboljšanje uslova odvijanja saobraćaja i ukupnog stanja životne sredine (zagađenje vazduha, buka i drugo) u oblasti raskrsnice i
3. Na osnovu prikupljenih podataka, moguće je napraviti opšti model, simulirati moguće situacije i vršiti predikciju.

Cilj istraživanja, koja su realizovana radi provere utvrđenih pretpostavki, je sveobuhvatna i detaljna analiza saobraćaja u oblasti raskrsnice i utvrđivanje mera za poboljšanje uslova odvijanja saobraćaja sa funkcionalnog, ekološkog i ekonomskog aspekta. U toku naučnog i istraživačkog rada korišćene su različite metode kako bi bili zadovoljeni osnovni metodološki zahtevi – objektivnost, pouzdanost, opštost i sistematičnost.

U skladu sa izabranom problematikom, definisanim ciljevima istraživanja i postavljenim naučnim hipotezama radi definisanja naučnih i stručnih zaključaka i iznalaženja mogućih rešenja upotrebljena je teorijska analiza uz korišćenje rezultata istraživanja iz međunarodne i domaće naučne i stručne literature, odnosno saznanja naučnika i drugih autora koji su istraživali problematiku kojom se bavi ovaj rad. Tokom rada korišćene su i druge metode i to: analiza postojećih dostignuća, odnoso rešenja, razvoj neophodnog hardvera i softvera kao nadogradnja na postojeća, standardna rešenja, modelovanje i simulacija, metode dokazivanja, generalizacije i specijalizacije, implementacija i vrednovanje (evaluacija) predloženih rešenja i druge metode.

[5] Prilog 5.

Složena struktura i važnost upravljanja radom površinskih raskrsnica predstavljaju jedan od najznačajnijih problema u oblasti saobraćajnog inženerstva. Zbog toga je ova problematika, tokom proteklih nekoliko decenija bila predmet mnogobrojnih istraživanja koja su omogućavala rešavanje postojećih problema i poboljšanja postojećih rešenja upravljanja saobraćajem na raskrsnicama. Rezultati velikog broja istraživanja koja su do danas realizovana i koja su u toku, odnose se na adaptivne sisteme za kontrolu i regulisanje saobraćaja na semaforizvanim raskrsnicama kod kojih se rad semaforskih uređaja i upravljački parametri, kao što su ciklus i raspodela trajanja zelenog svetla, prilagođavaju neravnomernostima u saobraćajnim tokovima na ovim delovima putne mreže.. Danas se širom sveta koristi veliki broj adaptivnih sistema koji rade u realnom vremenu kao što su SCATS, SCOOT, UTOPIA i mnogi drugi. Ono što je karakteristično za većinu ovih sistema je nedostatak odgovarajućih algoritama i osnovnih elemenata upravljačke logike na osnovu čega bi se ostvario uvid u strukturu i način njihovog rada.

U ovoj disertaciji, pored ostalog, predloženo je i nekoliko mogućih rešenja realizacije adaptivnih sistema upravljanja saobraćajem koja se odnose na dvofaznu i četvorofaznu semaforizovanu raskrsnicu. Predložena rešenja obuhvataju osnovne elemente hardverske strukture sistema, odgovarajuće algoritme, programska rešenja - blok dijagrame (koji su urađeni upotrebom programskog paketa LabVIEW i koji su dati kao posebni prilozi u okviru disertacije) i teorijske osnove na kojima se zasniva funkcionisanje sistema. U okviru teorijskih osnova posebno je obrađena metodologija određivanja vrednosti ciklusa koja se tokom vremena usklađuje sa neravnomernostima saobraćajnih tokova, odnosno promenama protoka vozila na pristupnim prilazima raskrsnice, kao i sa promenama uzrokovanim prisustvom vozila u zonama dileme ili prolaskom vozila sa pravom prioriteta. Takođe je detaljno opisana mogućnost praćenja odvijanja saobraćaja na semaforizovanim raskrsnicama upotrebom odgovarajućih dijagrama koji se, tokom rada sistema, kontinuirano generišu i prikazuju na instalisanoj opremi. Algoritmi i priloženi blok dijagrami, kao i odgovarajuća objašnjenja omogućavaju detaljan uvid u strukturu i način funkcionisanja predloženih adaptivnih sistema kao celine.

Aplikativna rešenja predloženih sistema omogućavaju funkcionisanje sistema u uslovima kada kroz raskrsnicu ne prolaze vozila sa pravom prioriteta i ne nalaze se u zonama dileme (normalno odvijanje saobraćaja) i u uslovima kada su takve situacije prisutne. Rešenja obuhvataju i uslove preskakanja faze kada na pristupnim prilazima sporednog puta nema protoka vozila, niti pešaka na pešačkim prelazima preko glavnog puta. Problem prolaska vozila sa prioritetom se posebno ističe jer u takvim slučajevima najčešće dolazi do pojave prezasićenosti saobraćajnih tokova, stvaranja gužvi i do pojave situacija koje se negativno odražavaju na odvijanje saobraćaja u području raskrsnice. Rešenja omogućavaju efikasno upravljanje saobraćajem u takvim uslovima, kao i nakon završetka prolaska vozila sa prioritetom, kada za relativno kratko vreme dovode raskrsnicu u prvobitno stanje, odnosno u stanje normalnog odvijnja saobraćaja. Predložena rešenja testirana su odgovarajućom računarskom simulacijom.

Funkcionisanje sistema bazira se na kontinuiranom prikupljanju podataka o položajima, brzinama i vrednostima protoka vozlla i pešaka koje se ostvaruje upotrebom detektora instalisanih na raskrsnici. Postoje različite vrste detektora[6], ali je u disertaciji, zbog jednostavnosti instalacije, održavanja i mogućnosti povezivanja sa računarskim sistemima, posebna pažnja posvećena video detektorima, odnosno video i termovizijskim kamerama. Korišćenje termovizijskih kamera omogućva da sistemi funkcionišu tokom 24 časa dnevno kao i u otežanim vremenskim uslovima (kiša, magla, snežne padavine i drugo). Mada većina kamera ima sopstveni softver za detekciju objekata i određivanje njihovog položaja i brzine, u disertaciji je predloženo i prezentovano jedno od mogućih rešenja sa kamerama koje ne poseduju takav softver, ali koje povezane sa odgovarajućim računarskim sistemom omogućavaju efikasnu realizaciju navedenih aktivnosti.

[6] Prilog 11.

Takvo rešenje iziskuje znatno manje troškove instalacije kamera i njihovog preventivnog održavanja na semaforizovanim raskrsnicama.

Aplikativna rešenja koja se koriste za kontrolu rada instalisanih kamera, prikupljanje i obradu podataka i kontrolu rada semaforskih uređaja instalisana su na računarskom sistemu koji je deo semaforizovane inteligentne raskrsnice. Pored toga, računarski sistem omogućava i memorisanje podataka o svim relevantnim parametrima saobraćaja koji se odvija na raskrsnici. Takvi podaci se, između ostalog, kasnije mogu upotrebiti za dodatne analize i dokumentovanje određenih situacija koje su se dogodile u području raskrsnice.

Rad sadrži sedam poglavlja. U prvom poglavlju definisani su i ukratko obrazloženi osnovni pojmovi koji se odnose na odvijanje drumskog saobraćaja, posebno u oblasti raskrsnica, i koji se kao takvi razmatraju u poglavljima disertacije. Drugo poglavlje sadrži podatke o učesnicima u saobraćaju i njihovoj bezbednosti, kao i o zakonskim regulativima, propisima i protokolima koji su na snazi u Republici Srbiji i svetu i koji regulišu ovu materiju. U trećem poglavlju dat je kratak osvrt na postojeće načine regulisanja saobraćaja na raskrsnicama, nedostatke i prednosti, kao i pregled osnovnih elemenata koji utiču na izbor odgovarajućeg načina regulisanja saobraćaja. Četvrto poglavlje nadovezuje se na treće i sadrži opis i vrste signalizacija u drumskom saobraćaju sa posebnim osvrtom na one elemente koji se odnose na raskrsnice i koji se na njima koriste. Sadržaji inteligentne svetlosno signalisane raskrsnice dati su u petom poglavlju. Ovo poglavlje, između ostalog, obuhvata:

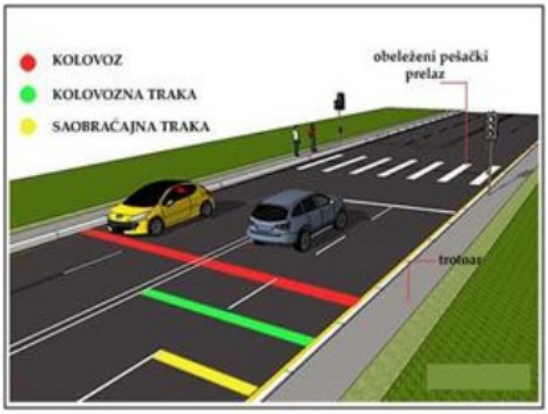
- osnovne karakteristike, šta se od nje očekuje, pretpostavke,
- elemente ineligentne raskrsnice,
- predlog rešenja jedne raskrsnice,
- izrada hardvera, algoritama i sofrvera neophodnog za uvođenje inteligentne raskrsnice,
- dizajniranje sistema za akviziciju podataka o saobraćaju,
- predlog novih algoritama za obradu prikupljenih podataka,
- izrada softvera za implementaciju predloženih algoritama i
- testiranje funkcionisanja raskrsnice i dobijeni rezultati.

U šestom poglavlju obrađeni su video detektori i metodologija određivanja položaja, brzine i protoka vozila na semaforizovanim raskrsnicama upotrebom video i termovizijskih kamera. Sedmo poglavlje sadrži pregled prednosti i nedostataka ineligentne svetlosno signalisane raskrsnice u odnosu na trenutno postojeća rešenja.

# 1. OSNOVNI ELEMENTI DRUMSKOG SAOBRAĆAJA I RASKRSNICA

Jedan od osnovnih elemenata drumskog saobraćaja je put. Put predstavlja izgrađenu, odnosno utvrđenu površinu koju, kao saobraćajnu površinu, mogu koristiti svi, ili određeni učesnici u saobraćaju, pod uslovima određenim zakonom, ili drugim propisima. Put koji je nadležni državni organ proglasio kao put od opšteg značaja i koji mogu koristiti svi, ili određeni učesnici u saobraćaju naziva se *javni put*. U javne puteve spadaju državni putevi (autoputevi), opštinski putevi i ulice. Ostali putevi čine grupu *nekategorisanih puteva*.

Površina javnog puta po kojoj se odvija saobraćaj, odnosno kretanje vozila naziva se *kolovoz*. Po kolovozu vozila se mogu kretati u jednom, ili u oba smera. Uzdužni deo kolovoza namenjen za saobraćaj vozila u jednom smeru je kolovozna traka, a obeleženi uzdužni deo kolovozne trake kojim se može kretati jedna kolona vozila naziva se saobraćajna traka (slika 1.). Posebne vrste saobraćajnih traka su: saobraćajne trake za uključivanje (slika 2.) i isključivanje (slika 3.) vozila, zatim saobraćajne trake za spora vozila namenjena sporim vozilima koja se kreću brzinama manjim od određenih, trake za vozila javnog saobraćaja (koriste se isključivo za kretanje vozila javnog prevoza putnika) i biciklističke trake koje se koriste za saobraćaj bicikala, mopeda i lakših tricikala. Na mnogim putevima, a posebno na autoputevima, postoje i obeleženi uzdužni delovi, zautavne trake, (slika 4.) koji se koriste za vozila koja se zbog nepredviđenih razloga moraju zaustaviti.



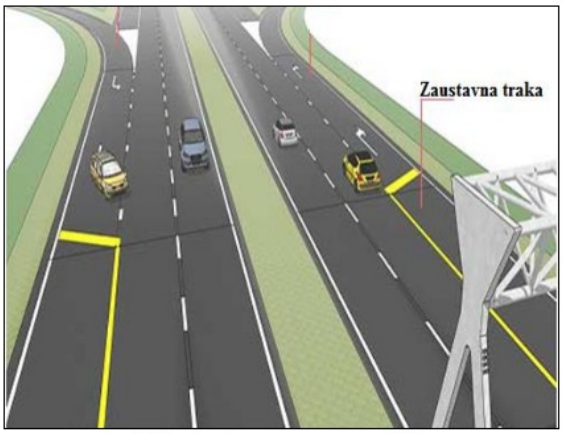

Slika 1. *Struktura kolovoza [5]*



Slika 2. *Saobraćajna traka za uključivanje [5]*



Slika 3. *Saobraćajna traka za isključivanje [5]*




Slika 4. *Deo autoputa [5]*

Stanje i karakteristike kolovoza u velikoj meri utiču na način odvijanja saobraćaja na putu. Stanje kolovoza određeno je njegovim elementima od kojih su najvažniji: ravnost površine kolovoza, širina kolovoza i broj saobraćajnih traka, prijanjanje kolovozne površine i odvodnjavanje kolovoza. Loš kvalitet kolovozne površine ima negativan uticaj koji se pre svega ispoljava na narušavanje normalnog kretanja vozila, smanjenje stabilnosti vozila, izazivanju vibracije točkova i produžavanju zaustavnog puta vozila. Šire kolovozne trake utiču na smanjenje naprezanja i zamora vozača prilikom kretanja a naročito pri preticanju i mimoilaženju. Sa druge strane veća širina saobraćajnih traka omogućava veće brzine kretanja vozila, što može imati negativan uticaj na odvijanje saobraćaja. Prijanjanje kolovozne površine je veoma bitan elemenat jer neposredno utiče na vrednost koeficijenta trenja između površine kolovoza i pneumatika vozila, odnosno na intenzitet sile koja deluje na vozilo pri kočenju.

Putevi se, prema vrsti saobraćaja koji se na njima odvija, dele na *puteve za saobraćaj motornih vozila* koji su namenjeni za saobraćaj vozila Zakonom definisana kao motorna vozila i *puteve za mešoviti saobraćaj* koji se koriste za kretanje svih vrsta vozila i korisnika u saobraćaju. Prvoj grupi puteva pripadaju *autoputevi*, gde se saobraćaj odvija po fizički razdvojenim jednosmernim kolovozima sa najmanje po dve vozne trake u jednom smeru uz potpuno obezbeđenje kontinuiteta osnovnih saobraćajnih tokova bez presecanja u istom nivou i *putevi rezervisani za saobraćaj motornih vozila* na kojima se saobraćaj motornih vozila odvija na jedinstvenom, ili razdvojenom kolovozu i imaju najmanje dve vozne trake za dvosmerni saobraćaj. Osnovni tokovi mogu se presecati u istom, ili različitom nivou. Druga grupa puteva obuhvata *ostale puteve* i *ulice u naseljnim mestima*.

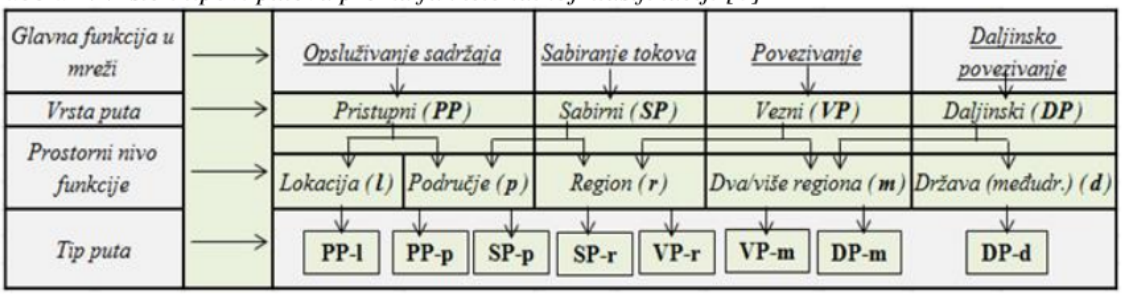
Na deonicama, delovima putnog pravca na kojima nema bitne promene saobraćajnog opterećenja, kroz naseljena mesta bitno je postojanje trotoara i staza za pešake. Takođe je, na putevima za mešoviti saobraćaj, gde se pored motornih vozila kreću i biciklisti, potrebno postojanje biciklističke trake, ili posebnog puta, biciklističke staze, koji je isključivo namenjen za kretanje bicikala. Pojava pešaka i biciklista na kolovozu gde ne postoje pešačke i bicklističke trake, izaziva posebnu opasnost za bezbednost saobraćaja[7].

Državni i opštinski putevi, ulice i nekategorisani putevi, kao što je već istaknuto, čine putnu mrežu jedne države. Putna mreža je jedan od osnovnih sistema povezivanja i opsluživanja svih sadržaja u prostoru, bilo direktno, ili posredno povezivanjem sadržaja sa terminalima železničkog, vazdušnog, ili vodenog saobraćajnog sistema. Povezujući delove jedne države i državu sa okruženjem, putna mreža, a posebno vangradski deo, podržava prostorni razvoj njenih delova i države kao celine. U okviru zadataka koje ona ima u ostvarivanju ciljeva prostornog razvoja, definisane su *osnovne i posebne funkcije* puteva kao elemenata putne mreže.

Grupu osnovnih funkcija puta čine: *opsluživanje, sabiranje, povezivanje* i *daljinsko povezivanje*. Opsluživanje podrazumeva obezbeđenje pristupa do i od pojedinačne lokacije, ili prostorne celine i vođenje saobraćajnih tokova do i/ili od deonica višeg funkcionalnog nivoa putne mreže. Sabiranje je funkcija prikupljanja pojedinačnih saobraćajnih tokova koji se na taj način objedinjuju i povezaju sa regionalnim saobraćajnim težištem, ili deonicom višeg funkcionalnog nivoa. Objedinjavanje urbanih naselja i njihovo priključenje na deonice najvišeg funkcionalnog nivoa putne mreže ostvaruje se funkcijom povezivanja pojedinih područnih i/ili regionalnih težišta. Najzad, daljinsko povezivanje regionalnih i državnih saobraćajnih težišta predstavlja najvišu funkciju puta koja omogućava povezivanje većih odstojanja međuregionalnog, državnog i međudržavnog dometa. Prema funkciji koju obavljaju razlikuju se četiri vrste puteva, a u zavisnosti od prostornog nivoa na kome se odvija funkcija puta, navedene vrste formiraju osam funkcionalnih tipova puteva. Vrste i tipovi puteva prikazani su u Tabeli 1.

[7] O bezbednosti saobraćaja detaljnije se govori u drugom poglavlju.

Tabela 1. *Vrste i tipovi puteva prema funkcionalnoj klasifikaciji [6]*




Posebne funkcije puta obuhvataju prateće usluge učesnicima u drumskom saobraćaju kao što su snabdevanje gorivom, servis, odmorišta, pristup do stajališta i drugo. Funkcije su po vrsti, intenzitetu i broju definisane u skladu sa funkcionalnom vrstom putnog pravca, ili deonice, pri čemu ne smeju ni na koji način umanjiti kvalitet osnovnih funkcija, nivo bezbednosti saobraćaja i nivo usluga puta.

### 1.1. Saobraćajni tok i osnovni parametri saobraćajnog toka

Ako se posmatra odvijanje saobraćaja na proizvoljnoj deonici puta, može se uočiti da se vozila kreću različitim brzinama, da se međusobno sustižu, pretiču i da jedno vozilo svojim načinom kretanja utiče na druga vozila. Što je broj vozila na deonici veći, veći su i izraženiji međusobni uticaji vozila, deonica se teže savlađuje, dolazi do čestih zagušenja, povećeva se verovatnoća da dođe do saobraćajnih nezgoda i drugo. Imajući u vidu značaj i važnost drumskog saobraćaja za privredni i društveni razvoj jedne zemlje i društva kao celine, razrešenje ovih problema je veoma bitno. Ono u osnovi obuhvata ostvarenje što veće bezbednosti, brže savlađivanje deonice, bolje iskorišćavanje kapaciteta saobraćajnice i izbegavanje zagušenja. Za njihovo razrešenje danas se najčešće koriste rezultati teorije saobraćajnog toka, naučne discipline koja se bavi izučavanjem uslova odvijanja saobraćaja na putevima.

Saobraćajni tok predstavlja skup svih vozila koja se istovremeno kreću posmatranim delom puta u istom poretku, sa istog izvorišta i imaju isti cilj putovanja. Način na koji se saobraćajni tok odvija utiče na mogućnost razrešavanja i usaglašavanja navedenih problema. Saobraćajni tokovi se odvijaju u zavisnosti od velikog broja faktora među kojima su najznačajniji: tehničko-eksploatacione karakteristike puta (širina, podužni nagib, zakrivljenost, stanje kolovoza itd.), struktura toka, tj. vrste vozila u toku (putnička, teretna, autobusi, autovozovi, traktori, motocikli itd.), svojstva vozila (gabaritne dimenzije, vučne karakteristike, efikasnost kočionog sistema itd.), regulativne mere (ograničenja brzine, zabrane kretanja itd.), vremenske prilike (sneg, kiša, suvo) i doba dana. Istovremeno delovanje dva, ili više navedenih faktora utiče na složenost opisivanja zakonitosti kretanja vozila u saobraćajnom toku, a ono što još više usložnjava problem je i činjenica da su osnovni uticajni faktori promenljivi u prostoru i vremenu. Iz navedenih razloga, rešenja za opisivanje kretanja vozila u saobraćajnom toku urađena su korišćenjem odgovarajućih modela. Pri tome su se tokom vremena razvili modeli za dve osnovne vrste toka: *neprekidni* i *prekidni saobraćajni tok*. Kod neprekidnog saobraćajnog toka ne postoje spoljašnji uticaji koji mogu prouzrokovati prekide toka, prekidi toka su isključivo uslovljeni interakcijom vozila, kao, primera radi, na autoputu, na dužim deonicama dvosmernih puteva između raskrsnica i drugo. Prekidni tok se odlikuje povremenim zaustavljanjima toka usled načina kontrole saobraćaja, kao što je slučaj kod semaforskih uređaja na semaforizovanim raskrsnicama, stop znakova na nesemaforizovanim raskrsnicama i drugo. S obzirom na različite uslove odvijanja toka na pojedinim elementima saobraćajne mreže, danas se teorija saobraćajnog toka bavi izučavanjem

uslova i opisivanjem odvijanja saobraćaja na otvorenim deonicama autoputa, zatim na potezima izlivnih i ulivnih rampi na autoputevima, potezima vangradskih i gradskih dvosmernih puteva, semaforizovanim i nesemaforizovanim raskrsnicama.

Teorija saobraćajnog toka je naučna disciplina koja izučava uslove kretanja motornih vozila u saobraćajnim tokovima na mreži drumskih saobraćajnica. Njeni osnovni zadaci su istraživanje i definisanje osnovnih veličina saobraćajnih tokova i njihovih karakteristika. Analize rezultata istraživanja zavisnosti osnovnih parametara saobraćajnog toka omogućavaju upravljanje saobraćajnim tokovima na putnoj mreži. Drugim rečima, praktična namena opštih saznanja iz teorije saobraćajnog toka ogleda se u vrednovanju postojeće mreže ili njenih pojedinih delova u cilju utvrđivanja realnih potreba za poboljšanje postojeće mreže ili njenih pojedinih delova, na osnovu čega se vrši identifikacija uskih grla u prostoru (na mreži) i vremenu. Takođe se identifikuju uzročnici uskih grla i kvalitetno definišu adekvatne mere koje treba preduzeti u cilju eliminisanja uskih grla. Rezultati se takođe koriste za stvaranje odgovarajućeg alata potrebnog za definisanje neophodne analitičke osnove o uslovima odvijanja saobraćaja na posmatranim mrežama, postojećim i projektovanim, pri dostignutim i očekivanim zahtevima saobraćaja, koja je potrebna za planiranje i raspodelu saobraćajnih tokova, programiranje transportnih zadataka i predviđanje odgovarajućih mera radi podizanja nivoa bezbednosti na putnoj mreži.

Zbog složenosti saobraćajnog toka na čije odvijanje utiče više faktora, do danas ne postoji jedinstvena teorija na osnovu koje se saobraćajni tok modelira već je većina predloženih modela dobijena na osnovu empirijskih podataka. Zavisno od cilja na kom nivou se posmatraju karakteristike saobraćajnog toka, razlikuju se *makroskopski* i *mikroskopski modeli*. Makroskopski modeli opisuju ponašanje ukupnog saobraćajnog toka koristeći prosečne vrednosti brzine, gustine i intenziteta toka posmatrajuci ga kao kontinuiranu celinu, dok mikroskopski modeli opisuju saobraćajne tokove polazeći od zakonitosti kretanja pojedinih vozila i njihove interakcije. U daljem radu, za opisivanje saobraćajnog toka, koristitće se makroskopske veličine. Prethodno sledi definicija i kratak opis sadržaja ovih veličina.

*Brzina saobraćajnog toka*: u modelima saobraćajnog toka, sa teoretskog gledišta najčešće se koristi srednja prostorna brzina koja se definiše kao:

$$v_s = \frac{S}{\sum_{i=1}^{N} ti/N} = \frac{NS}{\sum_{i=1}^{N} ti} \qquad (1)$$

gde su: $v_s$ – prosečna prostorna brzina saobraćajnog toka (km/h), $S$ – dužina posmatrane deonice (km), $t_i$ – vreme putovanja (h) $i$–tog vozila i $N$ – ukupan broj posmatranih vozila na deonici $S$.

*Saobraćajno opterećenje* (obim, ili volumen) deonice definiše se kao ukupan broj vozila koji prođe u nekom vremenskom intervalu kroz poprečni presek deonice. Jedinice u kojima se izražava ovaj parametar su: broj vozila po minutu (voz/min), po času (voz/h), po danu (voz/dan), ili broj vozila po mesecu (voz/mes). Vrednosti saobraćajnog opterećenja menjaju se tokom godine, meseca, sedmice i tokom dana. Vremenska neravnomernost saobraćajnog opterećenja[8] javlja se kao posledica potrebe da se, u toku ovih vremenskih perioda, ljudi i materijalna dobra premeštaju sa jednog mesta na drugo. Za proučavanje karakteristika saobraćajnog toka najčešće se koriste grafički, ili tabelarni prikazi promena prosečnog godišnjeg dnevnog saobraćajnog opterećenja u toku godine (*PGDS*) koji se definiše kao:

$$PGDS = \frac{Ukupan\ broj\ vozila\ godišnje}{365\ dana}\ (voz/dan) \quad \text{i} \qquad (2)$$

[8] Vremenska neravnomernost detaljnije je opisana u Prilogu 6.

prosečnog dnevnog saobraćajnog opterećenja (*PDS*) u toku meseca ili sedmice:

$$PDS = \frac{Ukupan\ broj\ vozila\ u\ mesecu\ ili\ nedelji}{Broj\ dana\ u\ mesecu\ ili\ nedelji} \quad (voz/dan) \qquad (3)$$

Za gradske deonice posebno su značajne sedmične i dnevne promene saobraćajnog opterećenja.

*Intenzitet saobraćajnog toka, saobraćajno opterećenje izraženo u voz/h, ili saobraćajni protok* jednak je broju vozila koja u jedinici vremena prođu kroz određeni poprečni presek saobraćajnice. Kao jedininica vremena koristi se čas (h). U literaturi se označava simbolom *q*, ili *Q* i izražava se u jedinicama broj vozila po satu (voz/h). *Maksimalna vrednost intenziteta saobraćajnog toka* u preovladajućim uslovima saobraćaja, puta i načina regulisanja saobraćaja naziva se *kapacitet (c)* ili *propusna moć* deonice, odnosno dela putne mreže. Pod saobraćajnim uslovima podrazumeva se sastav saobraćaja i izražava se proporcionalnim odnosom putničkih automobila, teretnih vozila i rekreacionih vozila. Putni uslovi odnose se na geometrijske karakteristike puta, kao što su horizontalne i vertikalne krivine, broj i širina saobraćajnih traka, projektovana brzina i konfiguracija saobraćajnih traka. Uslovi kontrole saobraćaja odnose se na način regulisanja i imaju značajan uticaj na kapacitet saobraćajnog objekta. Tako primera radi, saobraćajni objekti ili delovi puta imaće različite vrednosti kapaciteta zavisno od toga da li se saobraćaj reguliše saobraćajnim signalima i znakovima, da li je režim saobraćaja jednosmerni ili dvosmerni itd.

*Gustina saobraćajnog toka (k)* predstavlja broj vozila na jediničnoj dužini traka ili čitavog kolovoza. Izražava se kao broj vozila po kilometru (voz/km). Relacija koja povezuje prosečnu prostornu brzinu, intenzitet i gustinu saobraćajnog toka predstavlja osnovnu jednačinu saobraćajnog toka i glasi:

$$q = v_s \cdot k \qquad (4)$$

U zavisnosti od vrednosti ovih parametara definiani su nivoi usluga za svaki tip puta i funkcionalni deo putne mreže. Nivo usluge predstavlja kvalitativnu meru koja karakteriše uslove u saobraćajnom toku, odnosno brzinu i vreme putovanja, saobraćajne smetnje na putu, slobodu manevrisanja, komfor i udobnost. Postoje šest nivoa usluga koji su označeni slovima od *A* do *F* [2]. Na nivou *A* najbolji su uslovi saobraćaja. Na ovom nivou ostvareni su uslovi slobodnog saobraćajnog toka sa velikim brzinama, relativno malom vrednošću gustine saobraćajnog toka i punom slobodom manevrisanja. Nivoi usluga od *B* do *E* karakterišu se rastom gustine saobraćajnog toka i smanjivanjem brzina. Na nivou *D* brzina je značajno ograničena a mogućnosti manevrisanja male. Nivo usluge E odlikuju uslovi nestabilnog toka sa vožnjom u kolonama i mogućnostima trenutnog zastoja. U osnovi, ovaj nivo određuje maksimalnu vrednost intenziteta saobraćajnog toka na posmatranom funkcionalnom delu putne mreže.Velika vrednost gustine saobraćajnog toka i usiljen tok karakteristični su za najlošiji nivo usluge *F*. Karakterističan je za prekidni saobraćajni tok.

### *1.1.1. Upravljanje drumskim saobraćajem i regulisanje saobraćaja*

Upravljanje drumskim saobraćajem je proces koji se realizuje sa ciljem da saobraćaj na konkretnoj putnoj mreži, ili nekom od njenih delova, bude racionalan, bezbedan, efikasan, što jeftiniji i dovoljno brz. Proces upravljanja drumskim saobraćajem obuhvata: ocenu stanja sistema putne mreže, analizu dobijenih informacija i izbor upravljačkih postupaka, realizaciju usvojenih rešenja i kontrolu stanja u saobraćaju. Na taj način se ostvaruje osnovni zadatak upravljanja saobraćajem koji u osnovi podrazumeva što efikasnije iskorišćenje mogućnosti postojeće

saobraćajne mreže radi postizanja što kvalitetnijeg zadovoljenja aktuelnih saobraćajnih zahteva. Upravljanje saobraćajem uključuje mnoštvo različitih mera: organizacione, tehničke, ekonomske, zakonodavne i druge. Navedene mere odnose se na vozače, putne uslove i saobraćajne tokove, kao i na režime kretanja radi obezbeđenja visoke propusne i prevozne sposobnosti puteva i urednog i bezbednog kretanja. Upravljanje saobraćajem na gradskoj i vangradskoj putnoj mreži obuhvata puteve kontrolisane horizontalnom i vertikalnom signalizacijom, puteve sa denivelisanom raspodelom saobraćajnih tokova, puteve sa automatizovanim podsistemima upravljanja i kontrole, inteligentne puteve i autoputeve (IVHS sistemi koji se realizuju u tehnološki naprednijim zemljama i koji obezbeđuju adaptivno upravljanje i informisanje učesnika u realnom vremenu o važnim činiocima za njihovo kretanje), zatim kontrolu poštovanja pravila „desne“ ruke, kontrolu uz pomoć policije, kontrolu vremenskom i prostornom podelom, upravljanje i kotrolu putem „inteligentne“ raskrsnice i drugo.

Regulisanje saobraćaja je upravljačka funkcija i predstavlja skup analitičkih, tehničkih, sistemskih, programskih, računarskih i drugih postupaka, metoda i modela pomoću kojih se obezbeđuje racionalno korišćenje svih mogućnosti saobraćajne infrastrukture i drugih elemenata saobraćajnog sistema sa ciljem da saobraćaj na konkretnoj putnoj mreži bude racionalan, bezbedan i efikasan. Regulisanje saobraćaja i saobraćajnih tokova na drumskim saobraćajnicama je veoma složena funkcija čija složenost proizilazi iz heterogenosti i složenosti mreža drumskih saobraćajnica na kojima se reguliše saobraćaj i složenosti saobraćajnih tokova koji se javljaju na putnoj i uličnoj mreži i njenim elementima, putevima, ulicama i različitim tipovima čvorova i raskrsnica, u gradskim i vangradskim područjima. Za regulisanje saobraćaja koriste se: *propisi na osnovu kojih se reguliše saobraćaj*, *sredstva i uređaji za regulisanje saobraćaja* i *organi za regulisanje i kontrolu saobraćaja*.

Procenjuje se da danas veliki uticaj na bezbednost saobraćaja imaju propisi. Propisima i pravilima određuje se ponašanje svih učesnika u saobraćaju (vozila, pešaci i putnici) i, po pravilu, propisuju se odgovarajućim zakonima i podzakonskim aktima jedne države. Time se omogućava izbegavanje određenih konflikata i racionalno, organizovano i bezbedno korišćenje površina na kojima se odvija saobraćaj. Pored zakona i podzakonskih akata koje donose države pojedinačno, postoje i određeni broj međunarodnih propisa koji omogućavaju unificiranje pravila za regulisanje drumskog saobraćaja. Najznačajniji među njima je Konvencija o drumskom saobraćaju doneta u Beču 1968. godine i dopunjena u Ženevi 1971. godine.

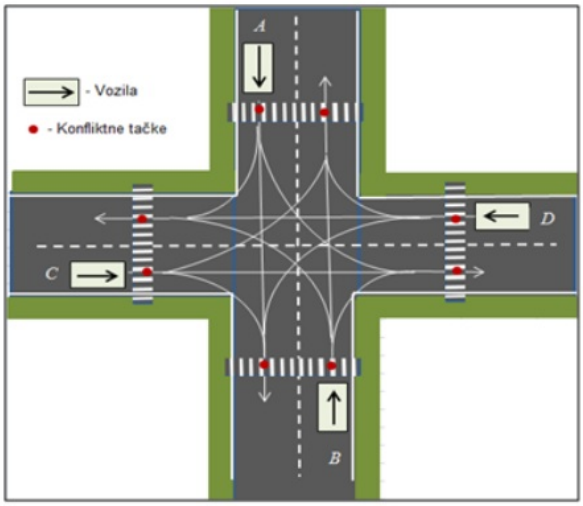
Sredstva i uređaji koji se koriste za regulisanje saobraćaja mogu se podeliti u dve grupe i to : *statička saobraćajna signalizacija i oprema* i *dinamička svetlosna signalizacija, uređaji i oprema.* Statička saobraćajna signalizacija obuhvata horizontalnu i vertikalnu signalizaciju kojima se vrši obeležavanje kolovoza na putevima i ulicama, odnosno postavljanje saobraćajnih znakova, zaštitnih, odbojnih, elastičnih i pešačkih ograda i pokazivača smerova koji služe za obezbeđenje i označavanje ivice puta. Drugu grupu sredstava i uređaja čine promenljivi saobraćajni znaci, semafori sa jednobojnim, dvobojnim i trobojnim svetlosnim signalima kojima se reguliše pravo prolaza vozila i pešaka na mestima sukobljavanja i presecanja saobraćajnih tokova, zatim upravljački uređaji za upravljanje radom semafora, indikatori brzina i drugi.

Organi za regulisanje i kontrolu saobraćaja na putevima su uglavnom pripadnici saobraćajne policije. U reonima vojnih objekata i u izuzetnm situacijama saobraćaj mogu regulisati i određeni vojni organi.

U zavisnosti od karakteristika delova putne mreže na kojoj se reguliše saobraćaj, regulisanje saobraćaja može biti: *regulisanje saobraćaja na putevima, na gradskim saobraćajnicama* i *na putnim i uličnim ukrštanjima.* Regulisanje saobraćaja na putevima obuhvata rešavanje saobraćaja na deonicama autoputeva, višetračnih i dvotračnih puteva, pretežno vangradskog tipa. Pri tome se uglavnom koristi statička horizontalna i vertikalna signalizacija u reševanju kontrole brzine vozila, kontrole pristupa na putevima nižeg ranga, označavanja kritičnih mesta na putevima, preglednosti za preticanja, prioriteta na putnim ukrštanjima i drugo. Na gradskim saobraćajnicama (magistrale, autoputevi, gradske i prigradske arterije, glavne, sabirne i ulice lokalnog karaktera, kao i ulice sa posebnom namenom kao što su biciklističke staze i ulice za javni saobraćaj), za regulisanje saobraćaja koriste se sve vrste saobraćajne signalizacije i opreme. Regulisanje saobraćaja na putnim i uličnim ukrštanjima podrazumeva rešavanje saobraćaja na prepletima, ukrštajnim rampama, prioritetnim, signalisanim, kružnim i složenim raskrsnicama..

### 1.2. Raskrsnice

Delovi putne mreže, pored puteva, odnosno deonica, su i mesta na kojima dolazi do ukršatanja puteva i ulica. Ukrštanja puteva i ulica mogu se svrstati u tri grupe i to: *ukrštavanje puteva bez presecanja saobraćajnih tokova*, gde spadaju ukrštanja jednosmernih puteva i prepleti, *ukrštavanje puteva u nivou* (nesignalisane i signalisane raskrsnice) i *složena ukrštanja*, koja uključuju petlje, čvorove, kružne raskrsnice i spregnute raskrsnice. U daljem tekstu posebna pažnja posvećena je problematici koja se odnosi na raskrsnice. Raskrsnice predstavljaju mesta, u naseljima, ili van naselja, na saobraćajnoj mreži gde se ukrštaju dva, ili više putnih pravaca. Mogu biti *površinske* (slika 5.), kod kojih se putevi ukrštaju u jednom nivou, i *denivelisane* – ukrštavanje puteva izvedeno je u dva, ili više nivoa (slika 5a.). Odgovarajuća merenja, istraživanja i predložena rešenja koja su prezentovana u disertaciji, odnose se na površinske raskrsnice.



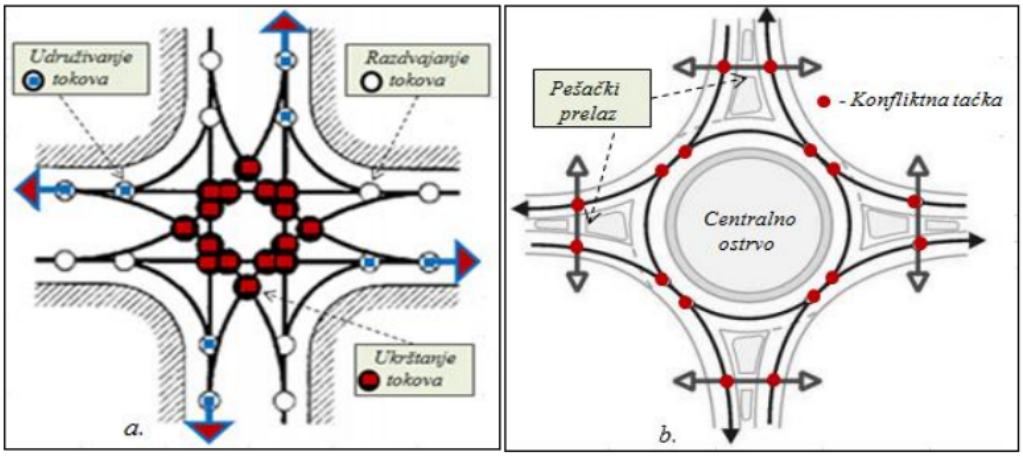
Slika 5. *Pravilna površinska četvokraka raskrsnica*


Slika 5a. *Denivelisana raskrsnica [7]*

Površinska raskrsnica ima najmanje tri kraka. Kraci raskrsnice su prilazni putevi koji vode saobraćaj istog, ili suprotnog usmerenja do i iz raskrsnice i koji mogu biti jednosmerni, ili dvosmerni. Ako se putni pravci ukrštaju pod pravim, ili približno pravim uglom, raskrsnica ima pravilnu geometriju. U suprotnom, radi se o raskrsnicama nepravilne geometrije.

Sa funkcionalnog aspekta raskrsnica je najsloženiji elemenat saobraćajne mreže. Na raskrsnici se presecaju putanje saobraćajnih tokova različitog usmerenja, pojedini tokovi menjaju pravac, presecaju se tokovi vozila i pešaka, odvijaju se različiti manevri i drugo. Sve to ukazuje da je to prostor sa povećanom koncentracijom konflikata i povećanim rizikom nastajanja saobraćajnih nezgoda. Konflikt na raskrsnici je svaki događaj nastao u toku vožnje kada zbog pogrešnog reagovanja, ili nereagovanja jednog, ili više motorizovanih učesnika u saobraćaju dođe do mogućnosti nastanka saobraćajne nezgode. Konflikti na raskrsnicama događaju se na unapred poznatim mestima, *konfliktnim tačkama*. Na tim mestima saobraćajni tokovi se presecaju, razdvajaju, udružuju ili prepliću, pa u zavisnosti od toga konfliktne tačke se dele na tačke: ukrštanja, razdvajanja, udruživanja i preplitanja.

Na slici 5. prikazana je pravilna četvorokraka raskrsnica sa osam konfliktnih tačaka, koje nastaju na mestima gde se presecaju tokovi vozila sa pešacima (crveni kružići) i prilazima koji su označeni slovima A, B, C i D. Broj konfliktnih tačaka zavisi od tipa raskrsnice i broja priključnih krakova kao i od saobraćajnog opterećenja, upotrebljenih mera za kanalisanje raskrsnice i drugo. Primera radi, na slici 6. prikazana je četvorokraka raskrsnica sa dva dvosmerna puta i kružna raskrsnica sa četiri prilaza. Četvorokraka raskrsnica ima ukupno 40 konfliktnih tačaka: 16 ukrštanja, osam razdvajanja, osam udruživanja i osam na pešačkim prelazima (prikazane su na slici 5.). Za razliku od nje, kružna raskrsnica ima šesnaest konfliktnih tačaka. Na površinskim raskrsnicama konfliktne tačke nastaju i na mestima gde se preseca tok vozila sa biciklistima.




Slika 6. *Konfliktne tačke na:* ***a****. pravilnoj četvorokrakoj [8] i* ***b****. kružnoj [9] raskrsnici*

Ako na raskrsnici vozila sa svakog prilaza imaju mogućnost da nastave svoje kretanje pravo, skrenu levo, ili desno, takva raskrsnica funkcioniše pod *punim režimom rada, ili nerestriktivnim programom*. U slučaju da su neka od skretanja zabranjena, sa bilo kog prilaza, raskrsnica je u *redukovanom režimu rada* (restriktivni program).

Saobraćajna površina koja predstavlja zbir površina delova prilaznih puteva i dela neposrednog ukrštanja krakova, naziva se područje, ili oblast raskrsnice. Područje raskrsnice je ograničeno onim tačkama (slika 7.) na pojedinačnim prilaznim putevima u kojima počinje, zbog raskrsnice, da se na bilo koji način, podužnom, ili poprečnom profilu, menja oblik puta (širina kolovoza, trake za prestrojavanje i skretanje vozila, mere za kanalisanje saobraćaja i drugo).

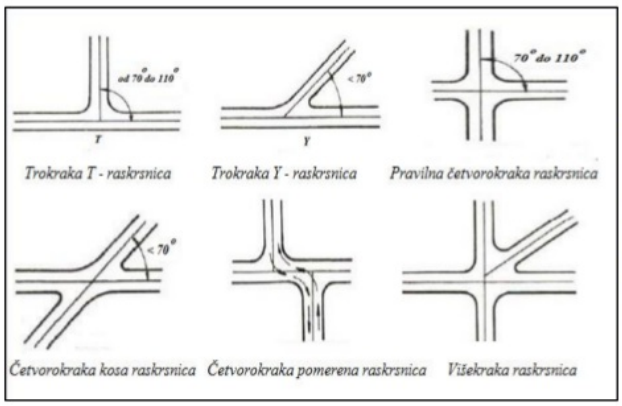


Slika 7. *Područje površinske raskrsnice (oivičeno žutom linijom) [7]*

### *1.2.1. Osnovni tipovi površinskih raskrsnica*

Postoje više kriterijuma na osnovu kojih se može vršiti odgovarajuća klasifikacija površinskih raskrsnica. Tako se prema načinu kretanja vozila kroz raskrsnicu, površinske raskrsnice dele na *direktne* (putni pravci presecaju se u središtu raskrsnice) i *kružne*. Osnovni tipovi površinskih direktnih raskrsnica prikazani su na slici 8. Broj i međusobni položaj prilaza raskrsnici može biti različit, pa u zavisnosti od toga razlikuju se trokrake, četvorokrake i višekrake raskrsnice, kao i raskrsnice sa pravilnom geometrijom i kose raskrsnice. Površinske kružne raskrsnice (slika 9.) su specifična ukrštanja dva, ili više puteva na kojima se saobraćaj odvija kruženjem oko središnjeg elementa (centralno ostrvo) i manevrima ulivanja, prestrojavanja i izlivanja.

Prema saobraćajnom uređenju, odnosno načinu odvijanja i vođenja saobraćaja u oblasti raskrsnice, raskrsnice mogu se podeliti na *kanalisane*, *polukanalisane* i *nekanalisane*. Saobraćajno uređenje obuhvata određivanje prioritetnih pravaca, ograničavanje upotrebe puta, ili njegovog dela u odnosu na vrstu saobraćaja, ograničenja brzine kretanja vozila i mera za usporavanje saobraćaja, određivanje zona usporenog saobraćaja, područja za pešake i područja ograničene brzine, kao i određivanje drugih obaveza učesnika u saobraćaju. Kanalisanje saobraćajnih tokova prestavlja kontrolisano vođenje saobraćajnih tokova između elemenata koji mogu, kada su u pitanju površinske raskrsnice, biti označeni na kolovozu odgovarajućom horizontalnom signalizacijom. Pri tome se svakom saobraćajnom toku, ili samo nekima, obezbeđuje posebna saobraćajna površina u oblasti raskrsnice, čime se znatno smanjuje broj stvarnih konfliktnih tačaka (slika 10.). Saobraćajno uređenje uvek se, po pravilu, označava propisanom signalizacijom.

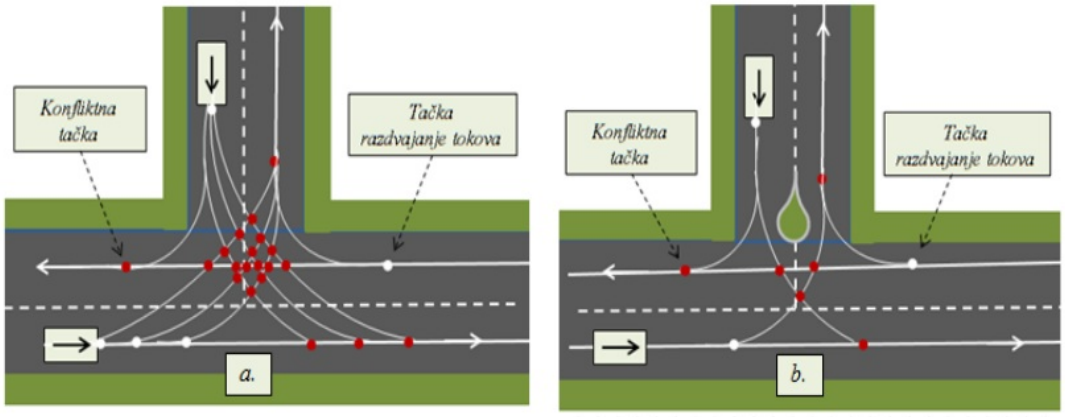



Sika 8. *Trokrake, četvorokrake i raskrsnica sa više krakova [7]*

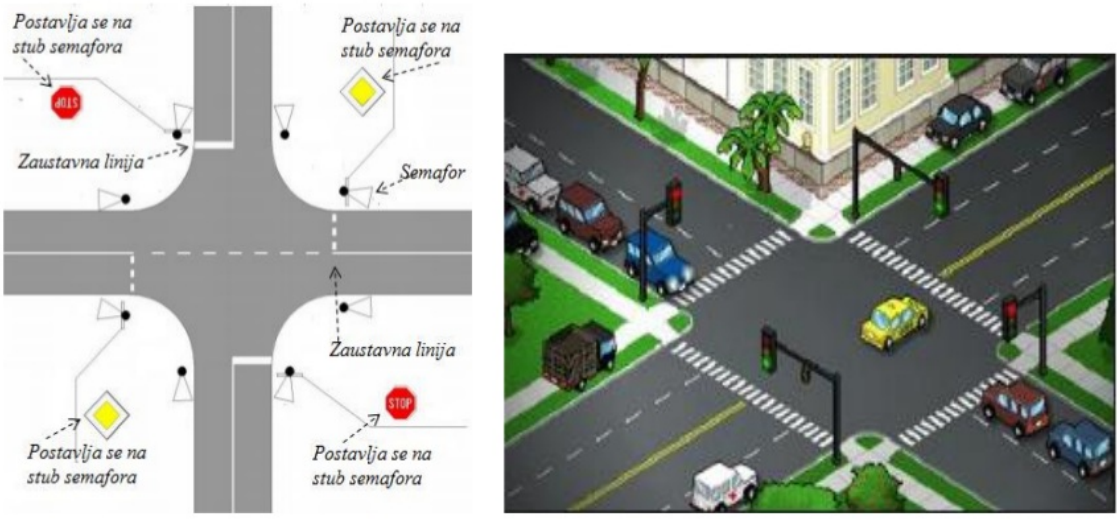



Slika 9. *Kružna raskrsnica [10]*

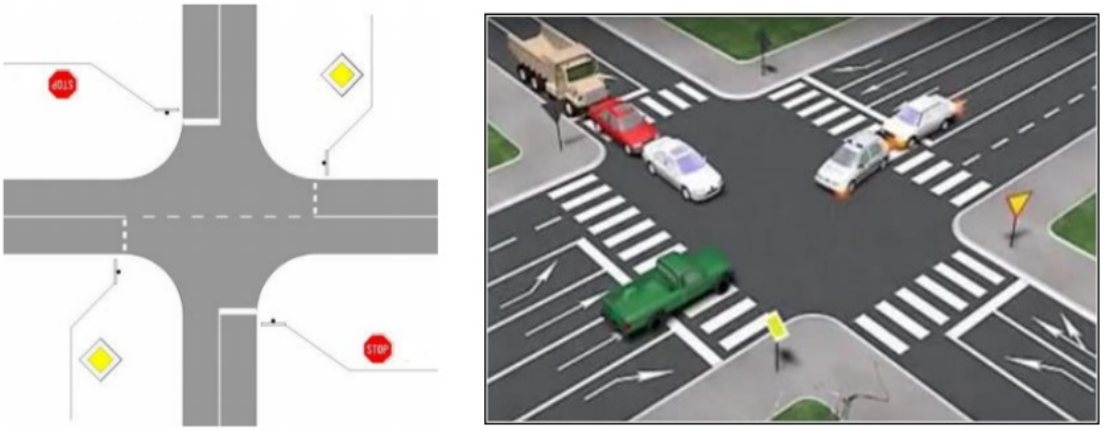
Površinske raskrsnice se, prema načinu regulisanja saobraćaja mogu podeliti na *signalisane* (*semaforizovane*) (slika 11.), na kojima se pravo prvenstva prolaza reguliše svetlosnom signalizacijom i *nesignalisane* (slike 12. i 13.), na kojima je pravo prolaska regulisano saobraćajnim znacima i opštim pravilima saobraćaja, najčešće pravilom desne ruke. Uobičajen naziv za raskrsnicu na kojoj je saobraćaj regulisan saobraćajnim znacima je *prioritetna raskrsnica*. Na pojedinim raskrsnicama, signalisanim i nesignalisanim, u naseljenim mestima, prilazni putevi raskrsnici obično su podeljeni u veći broj saobraćajnih traka od kojih određene grupe traka mogu imati pravo istovremenog kretanja vozila. Takve grupe saobraćajnih traka nazivaju se *kompatibilne* grupe i sa aspekta konflikata radi se o „dozvoljenim" konfliktima na raskrsnici.



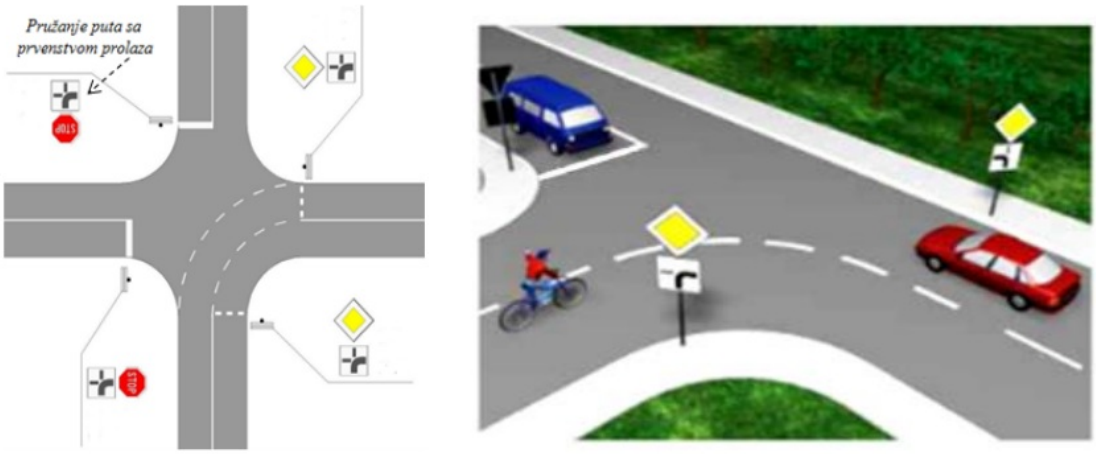

Slika 10. *Nekanalisana (a.) i kanalisana (b.) trokraka raskrsnica*




Slika 11. *Semaforizovana raskrsnica [7]*



Slika 12. *Standardna nesignalisana raskrsnica [7]*




Slika 13. *Nestandardna nesignalisana raskrsnica [7]*

Od svih tipova raskrsnica, nesignalisane su najzastupljenije na putnoj i uličnoj mreži. Jedan od razloga za takvo stanje je jednostavnost regulisanja saobraćaja i relativno niska cena izgradnje i održavanja takvih raskrsnica. Na ovim raskrsnicama prvenstvo prolaza reguliše se saobraćajnim znacima „Put sa prvenstvom prolaza“, koji se postavlja na glavnim, prioritetnim prilazima (GP) i „Ukrštanje sa putem sa pravom prvenstva prolaza“ ili „Obavezno zaustavljanje - STOP“, koji se postavljaju na sporednim prilazima (SPR) raskrsnice. Najčešći tip nesignalisanih raskrsnica su *standardne nesignalisane raskrsnice* (slika 12.) sa tri, ili četiri kraka, kod kojih se prioritetni prilazi nalaze jedan naspram drugog. Posebnu grupu nesignalisanih raskrsnica predstavljaju *nestandardne nesignalisane raskrsnice* (slika 13.), na kojima prioritetni pravac menja pravac pružanja, odnosno u središtu raskrsnice skreće levo, ili desno u odnosu na prvobitni pravac. Ove raskrsnice su, zbog nasleđene putne i ulične mreže, relativno česte kod nas i u mnogim Evropskim zemljama.

Svrha izgradnje i oblikovanja površinskih raskrsnica je, u suštini, obezbeđivanje bezbednog saobraćaja i brze i ekonomične raspodele saobraćajnih tokova (ukrštanja, preplitanja, udruživanja, razdvajanja i drugo) u oblastima gde se ukrštaju dva, ili više putnih pravaca. One se moraju projektovati tako da se u njima što ređe javljaju konflikti između učesnika u saobraćaju i da su istovremeno vremenski gubici u saobraćajnim tokovima što manji. Ova dva uslova potrebno je ispuniti uz što manja finansijska ulaganja. Pri tome se na površinskim raskrsnicama, u zavisnosti

od njihovog značaja u mreži puteva, odnosno od kategorije puteva koji se ukrštaju, koriste prostorna, odnosno horizontalna i vertikalna (odnose se na denivelisane raskrsnice) i vremenska raspodela saobraćajnih tokova. Horizontalna raspodela podrazumeva dodavanje posebnih saobraćajnih traka na kojima se usmeravaju pojedinačni pravci, dok je vremenska raspodela veštačko prekidanje pojedinačnih saobraćajnih tokova sa ciljem da se stvore vremenski intervali koje koriste vozila iz drugog saobraćajnog toka. U nastavku ovog dela detaljnije se ne opisuju načini realizacije i sadržaji horizontalne raspodele saobraćajnih tokova, jer bi to izašlo iz sadržajnih okvira disertacije. Ukazuje se samo na činjenicu da vrsta i način raspodele saobraćajnih tokova na površinskim raskrsnicama utiču na projektovanje tehničkih elemenata i na opremanje raskrsnice u celini, odnosno utiču na projektovanje i izgradnju odgovarajuće vrste raskrsnice. Tabela 2. prikazuje uticaj kategorizacije puteva na vrstu i opremanje raskrsnica [8]. Prikazani elementi odnose se na raskrsnice u naseljenim mestima. Kod raskrsnica izvan naselja moguća su i određena odstupanja koja se moraju bazirati na odgovarajućim stručnim obrazloženjima. Potrebno je naglasiti da ukrštanje dva, ili više puteva, koje u osnovi predstavlja čvor na putnoj mreži, nije samo po sebi dovoljan razlog da se na mestu ukrštanja gradi raskrsnica. Za izgradnju raskrsnice, pored ukrštanja puteva, značajni su i drugi kriterijumi kao što su adekvatnost lokacije i položaja predviđene raskrsnice u putnoj mreži nekog naselja, nivo saobraćajne propusnosti i kriterijum saobraćajne bezbednosti predviđene raskrsnice. Detaljniji sadržaji ovih kriterijuma dati su u literaturi [8].

Tabela 2. *Dozvoljene vrste i opremanje raskrsnica*

| *Vrsta →* | *Pristupni put* | | *Sabirni put* | | *Vezni put* | | *Daljinski put* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Tip ↓* | *PP-l* | *PP-p* | *SP-p* | *SP-r* | *VP-r* | *VP-m* | *DP-m* | *DP-d* |
| *PP-l* | ● *1* | ● *1* | ○ *'(2)* | ○ | | | | |
| *PP-p* | ● *1* | ● *1* | ● *2* | ○ *'(2)* | ○ | | | |
| *SP-p* | ○ *'(2)* | ● *2* | ● *2* | ● *2* | ○ *'(3)* | ○ | | |
| *SP-r* | ○ | ○ *'(2)* | ● *2* | ● *2* | ● *3* | ○ *'(3)* | ○ | |
| *VP-r* | | ○ | ○ *'(3)* | ● *3* | ● *3* | ● *3* | ○ *'(3)* | ○ |
| *VP-m* | | | ○ | ○ *'(3)* | ● *3* | ● *3** | ● *3** | ○ *(3)** |
| *DP-m* | | | | ○ | ○ *'(3)* | ● *3** | ● *3** | ● *3** |
| *DP-d* | | | | | ○ | ○ *(3)** | ● *3** | ● *3** |

*Legenda:*

*● → dozvoljena vrsta raskrsnice*
*○ → uslovno dozvoljena vrsta raskrsnice*
*○ → samo izuzetno*

*1 → pravilo "desne ruke" ili saobraćajni znaci*
*2 → kanalisana raskrsnica (suza ili trougao)*
*3 → posebne trake za skretanje i/ili semaforizacija raskrsnice*
*( ) → uslovno dozvoljeno*
** → posebne trake za skretanje i/ili semaforizacija raskrsnice, razdelna ostrva, pešačka ostrva i drugo. Moguća denivlisana raskrsnica*

### *1.2.2. Kapacitet i nivo usluga raskrsnice*

Raskrsnice, kao mesta gde dolazi do ukrštanja saobraćajnih tokova, sa aspekta kapaciteta i nivoa usluga, predstavljaju potencijalno kritična mesta na putnoj i uličnoj mreži. Načini na kojima se odvija saobraćaj uslovljavaju da, na površinskim raskrsnicama, dolazi do povremenih zaustavljanja saobraćajnih tokova. Uslovi odvijanja saobraćaja na raskrsnicama u istom nivou

zavise od načina regulisanja saobraćaja koji se, u većini slučajeva, ostvaruje upotrebom znaka STOP i semafora. U uslovima prekidnih saobraćajnih tokova, koji su karakteristični za površinske raskrsnice, stanja u saobraćajnom toku opisuju se pomoću sledećih veličina: *stvarna vrednost toka*, *vrednost protoka, zasićenost toka, interval sleđenja* i *vremenski gubici*.

Postupci za proračun kapaciteta standardnih prioritetnih raskrsnica pojavili su se u naučnoj i stručnoj literaturi tokom sedamdesetih godina prošlog veka, a njihova praktična primena započela je desetak godina kasnije [11]. Procedura za proračun kapaciteta standardnih prioritetnih raskrsnica koristi model prihvatljivog intervala sleđenja (vreme), koji u osnovi podrazumeva da vozač na sporednom prilazu raskrsnici *mora* da odredi *kada je vremenski interval sleđenja* između vozila na glavnom pravcu dovoljno veliki da izvrši kretanje kroz raskrsnicu i *trenutak* kada to da uradi. Pri tome se proračun i analiza kapaciteta standardnih nesignalisanih raskrsnica zasnivaju na verovatnoći korišćenja slobodnih vremenskih inretvala (intervala sleđenja) za prolazak vozila koja vrše sporedne manevre kroz središte raskrsnice. Modeli za proračun kapaciteta kružnih raskrsnica razvijeni su tek krajem dvadesetog veka, dok modeli za nestandardne nesignalisane raskrsnice nisu definisani ni do danas [11]. U daljem radu opisani su kapacitet i nivo usluga semaforizovanih raskrsnica.

#### 1.2.2.1. Kapacitet semaforizvane raskrsnice

Osnovni razlog upotrebe semafora, odnosno svetlosnih signala za regulisanje saobraćaja na površinskim raskrsnicama je međusobno vremensko razdvajanje konfliktnih tokova vozila i pešaka na karakterističnim mestima. Svetlosni signali imaju zadatak da upravljaju saobraćajnim tokovima na taj način što će omogućiti da se u jednom periodu vremena na raskrsnicama opslužuju vozila jedne grupe tokova (bezkonfliktnih, ili konfliktno kompatibilnih) pri čemu će se za to isto vreme prikupljati vozila druge grupe tokova. Potom se opslužuje druga grupa vozila, za isti, ili različit vremenski interval, nakon čega se ciklus periodično ponavlja[9]. Opsluživanje vozila vrši se na osnovu *signalnog plana* koji na jednoznačan način opslužuje sve tokove grupisane u okviru faza. Svetlosni signali mogu raditi u *fiksnom režimu rada,* kada su signalni planovi utvrđeni na osnovu prethodno prikupljenih podataka o saobraćaju, i kao *adaptivni sistemi*, kada svetlosni signali rade u zavisnosti od promena saobraćajnih parametara kao što su protok, brzina, gustina i drugo.

Pre određivanja kapaciteta semaforizovane raskrsnice, potrebno je prethodno definisti pojmove idealnog zasićenog saobraćajnog toka, operativnog toka ($S_{op}$, *voz/h*), i zasićenog toka saobraćajne trake, prilaza ili grupe traka iste namene ($S_i$, *voz/h*). Idealni zasićeni saobraćajni tok predstavlja maksimalni broj vozila koja za jedan čas prođu kroz poprečni presek trake, ili grupe traka pod pretpostavkom da zeleni signal (vreme koje im je dodeljeno) traje jedan čas, pri čemu za to vreme na prilazu raskrsnice postoji neprekidan saobraćajni zahtev u obliku homogenog toka putničkih automobila [12], [13]. Uslov o homogenosti toka predstavlja idealizaciju stanja na raskrsnici, pa se u proračunima realni saobraćajni tokovi prevode u uslovno homogene primenom odgovarajućih ekvivalenata, pri čemu se realna vozila prevode u jedinice putničkih automobila, PAJ jedinice[10]. Idealni zasićeni tok podrazumeva optimalne uslove u saobraćajnom toku i okruženju, disciplinovane vozače, povoljne meteorološke i druge uslove, traku pravo na raskrsnici pravilne geometrije (širine 3m i dužine saobraćajne trake na prilazu veće od 35m [14]), trajanje zelenog svetla od jednog časa, odsustvo ometanja od pešaka i ostalih vozila i drugo. Idealni zasićeni tok ima jedinstvenu vrednost od 2290 PAJ/h [13]. Međutim u stvarnim uslovima, na postojećim semaforizovanim raskrsnicama, realizacija idealnog zasićenog toka je praktično neostvarljiva, jer okolnosti pod kojima bi se realizovao, nikada istovremeno ne dostižu idealne uslove. Saobraćajni tok koji se realizuje u realnim, stvarnim uslovima je *operativni tok trake, ili*

[9] Semaforizovane raskrsnice, ciklus, faza i signalni plan detaljnije se razmatraju u četvrtom poglavlju disertacije.
[10] Vrednosti ekvivalenata dati su u Prilogu 7.

*grupe traka iste namene*. Operativni tok pripada zasićenim stanjima ali se od idealnog razlikuje zbog uticaja stanja u kome je registrovan. Operativni tok je osnovni parametar za sve proračune koji se odnose na semaforizovane raskrsnice. Njegova vrednost zavisi od signalnog plana, namene trake, stanja okruženja i veličine grada kome pripada raskrsnica. Najveća vrednost operativnog toka iznosi 2120 voz/h, a najmanja 600 voz/h [13].

Zasićeni tok saobraćajne trake, prilaza, ili grupe traka predstavlja maksimalan broj vozila koja mogu proći raskrsnicu pri raspoloživim uslovima saobraćajnog toka, geometriji prilaza i upravljačkim parametrima u slučaju kada je na semaforu konstantan zeleni signal tokom jednog časa. Uslovi saobraćajnog toka obuhvataju veličinu i strukturu toka, raspodelu prema smerovima kretanja, uticaj pešaka i parkiranja u području raskrsnice i drugo. Geometrija prilaza podrazumeva broj i širinu saobraćajnih traka i uzdužni nagib, dok se upravljački parametri ogledaju kroz elemente signalnog plana. Zasićeni tok izračunava se na osnovu relacije [9]:

$$S_i = S_{op} \cdot N \cdot (f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot \ldots \cdot f_n) \qquad (5)$$

gde su $N$ – broj traka u okviru grupe i $f_1, f_2, \ldots f_n$ – redukcioni faktori za prilagođavanje konkretnim uslovima. Obrasci za proračun redukcionih faktora i detaljne analize idealnog zasićenog toka dati su u HCM (*Highway Capacity Manual*) 2000. U HCM-u definisano je jedanaest redukcionih faktora, ali se u praksi najčešće koristi skraćeni oblik realicije (5) koji sadrži četiri redukciona faktora [9], [12]. Analitički oblik relacije (5) u skraćenom obliku i vrednosti redukcionih faktora u njemu, kao i vrednosti operativnog toka u zavisnosti od signalnog plana i namene traka, dati su u Prilogu *8*.

U opštem slučaju, dakle kada je deo vremena ciklusa koji se odnosi na trajanje zelenog signala proizvoljno, kapacitet saobraćajne trake ($c_i$ , *voz/h*), prilaza, ili grupe traka određuje se na osnovu relacije:

$$c_i = S_i \cdot [\frac{g_i}{C}] \qquad (6)$$

gde su $g_i$ – vreme trajanja zelenog signala (s) koji se odnosi na $i$-tu saobraćajnu traku, ili grupu traka i $C$ – vreme trajanja (s) jednog ciklusa. Zbir kapaciteta svih prilaza raskrsnice predstavlja *ukupan kapacitet* semaforizovane raskrsnice[11].

### 1.2.2.2. Stepen zasićenja saobraćajne trake

Stepen zasićenja $X_i$ $i$-te saobraćajne trake, ili grupe traka definiše se kao količnik intenziteta saobraćajnog toka $q_i$ i kapaciteta $c_i$ trake, odnosno:

$$X_i = \frac{qi}{ci} = \frac{qi \cdot C}{Si \cdot gi} \qquad (7)$$

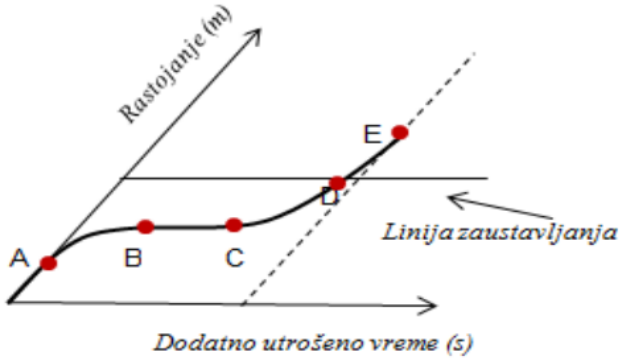
Ako su vrednosti $X_i$ na svim trakama jedne raskrsnice manje od jedinice, onda na raskrsnici vladaju uslovi nezasićenih saobraćajnih tokova u kojima nema neopsluženih vozila na kraju ciklusa. U takvim slučajevima utvrđeno saobraćajno rešenje je održivo. Vozila su neopslužena kada moraju više od jednom da se zaustave kako bi prošla raskrsnicom. Do takvih situacija dolazi kada je na raskrsnici veliki broj vozila. Takva stanja obično se nazivaju stanjima prezasićenih saobraćajnih tokova i za njih su vrednosti *Xi,* za sve, ili samo za neke trake, veće od jedinice.

---

[11] Pored analitičkog modela za određivanje kapaciteta svetlosno signalisane raskrsnice definisanog u američkom HCM-u, postoje i drugi modeli kao što su kanadski CCG (*Canadian Capacity Guide*), nemački RAS, australijski SIDRA i drugi.

### 1.2.2.3.Vremenski gubici na semeforizovanim raskrsnicama

Vremenski gubici vozila na signalisanim raskrsnicama predstavljaju dodatno utrošeno vreme putovanja koje se javlja kao posledica prolaska vozila kroz raskrsnicu (slika 14.). Oni su osnovni pokazatelj kvaliteta realizacije saobraćajnog procesa na raskrsnici i ulazni parametar u postupak optimizacije rada svetlosnih signala.




Slika 14. *Osnovne komponente vremenskih gubitaka na semaforizovanim raskrsnicama*

Uzroci pojave vremenskih gubitaka mogu biti različiti. U ovom delu navode se samo oni koji su najčešće prisutni na svetlosno signalisanim raskrsnicama: usporenje i ubrzanje vozila u oblasti raskrsnice, formiranje redova, mirovanje vozila ispred linije zaustavljanja, neravnomerno nailaženje vozila, prezasićenost saobraćajnih tokova i drugi. Pojava vremenskih gubitaka može se objasniti na osnovu slike 14. koja prikazuje zavisnost rastojanja vozila i dodatnog utrošenog vremena. Na delu krive od A do tačke B vremenski gubici nastaju kao posledica usporenja vozila koje je u oblasti raskrsnice i približava se liniji zaustavljanja. U tački B vozilo se zaustavlja i ostaje u stanju mirovanja na delu od B do tačke C. Za to vreme vozilo je deo formiranog reda. U tački C vozilo započinje ubrzano kretanje da bi u tački D prešlo liniju zaustavljanja i, u tački E, napustilo raskrsnicu. Vrednosti vremenskih gubitaka, kada su poznate vrednosti trajanja ciklusa $C$ i zelenog signala $g_i$, mogu se odrediti na osnovu Webster-ovih formula za slučajeve kada na raskrsnici vladaju uslovi nezasićenih saobraćajnih tokova [15]:

$$d_i = 0.9 \cdot \left[ \frac{0.5C\left(1-\frac{gi}{C}\right)^2}{1-\frac{gi}{C}} + \frac{Xi^2}{2qi(1-Xi)} \right] \quad \text{(s/voz)}$$

odnosno, obzirom da je $Xi < 1$,

$$d_i \approx 0.45 \cdot C \cdot (1 - gi / C) \qquad (8)$$

za uslove nezasićenih saobraćajnih tokova i

$$d_i = 0.5C\left(1 - \frac{gi}{C}\right) + \frac{T}{2}(X_i - 1) \quad \text{(s/voz)} \qquad (9)$$

za slučaj prezasićenih saobraćajnih tokova, pri čemu su $d_i$ – prosečni vremenski gubici po vozilu *i*-te trake, ili grupe traka, $C$ - dužina ciklusa, $gi$ - vreme trajanja zelenog svetla (odeljak 4.1. u disertaciji) i $T$ – vreme analize stanja koje je obično konstantno i iznosi 15 min, 30 min ili 60 min [12].

Sa druge strane, prema Priručniku o propusnoj moći na putevima HCM (*Highway Capacity Manual*) 2010., prosečni vremenski gubici po vozilu *i*-te trake, ili grupe traka, kada su poznati ciklus i dužina trajanja zelenog svetla, na signalisanim raskrsnicama određuju se izrazom [12], [15], [16]:

$$d_i = d_{1i} + d_{2i} + d_{3i} \tag{10}$$

$$d_{1i} = \frac{0.5C\left(1-\frac{gi}{C}\right)^2}{1-\left[min(1,Xi)\cdot\frac{gi}{C}\right]} \tag{11}$$

$$d_{2i} = 900\cdot T\cdot\left[(X_i - 1) + \sqrt{(Xi-1)^2 + \frac{4\cdot Xi}{ci\cdot T}}\right] \tag{12}$$

gde su:

$d_{1i}$ - prosečni uniformni vremenski gubici (s/voz)
$d_{2i}$ - prosečni dodatni vremenski gubici (s/voz),
$d_{3i}$ - prosečni inicijalni vremenski gubici (s/voz)

Vremenski gubici $d_{2i}$ - predstavljaju prosečne gubitke usled neravnomernih nailazaka vozila na raskrsnici ili gubitke vremena nastale u uslovima prezasićenih tokova uz uslov da se opsluže sva vozila u vremenskom intervalu $T$.

Gubici vremena $d_{3i}$ - nastaju kao posledica postojanja inicijalnih redova na raskrsnici. Inicijalni red u *i-toj* saobraćajnoj traci nastaje onda kada je $Xi > 1$, odnosno kada posle nekog perioda analize $n$ u toj traci postoje i dalje neopslužena vozila. Neopslužena vozila u ovom periodu usloviće u sledećem periodu $n+1$ pojavu dodatnih vremenskih gubitaka $d_{3i}$, nastalih usled postojanja inicijalnog reda neopsluženih vozila $N_{ni}$. Ovi gubici vremena zavise od veličine inicijalnog reda ($N_{ni}$), trajanja vremena analize $T$ i veličine $Xi$. Dužina inicijalnog reda, u *i-toj* saobraćajnoj traci, u periodu analize $n+1$ jednaka je [6], [12]:

$$N_{(n+1)i} = max\,[0,\ N_{ni} + c_i\cdot T\cdot(Xi - 1)] \tag{13}$$

dok se vremenski gubici $d_{3i}$, nastali usled postojanja inicijalnog reda, izračunavaju po relaciji:

$$d_{3i} = \frac{1800\cdot Nni\cdot(1+ui)\cdot ti}{ci\cdot T} \tag{14}$$

gde su $ti$ - vreme trajanja prezasićenosti u okviru vremena $T$, u *i-toj* traci i $ui$ - parametar vremenskih gubitaka u *i-toj* traci definisani relacijama:

$$ti = min\{\ T,\ \frac{Nni}{ci\cdot[1-min(1,Xi)]}\ \} \tag{15}$$

i

$$ui = 0, \text{ za } ti < T \text{ i } ui = 1 - \frac{ci\cdot T\cdot[1-min(1,Xi)]}{Nni}, \text{ za ostale vrednosti } ti. \tag{16}$$

Uniformni vremenski gubici za slučaj postojanja inicijalnog reda u *i-toj* traci izračunavaju se po formuli [12]:

$$d_{1i} = d_{si} \cdot \frac{ti}{T} + d_{ui} \cdot \frac{(T-ti)}{T} \qquad (17)$$

pri čemu su $d_{si} = d_{1i}$, za $Xi = 1$, odnosno $d_{si} = 0.5 \cdot C \cdot (1 - gi / C)$ i $d_{ui} = d_{1i}$ za datu, konkretnu vrednost $Xi$.

Kada u *i-toj* traci ili grupi traka postoji inicijalni red moguća su tri slučajai to:

- posle perioda analize *n* inicijalni red je potpuno opslužen, odnosno $N_{(n+1)i} = 0$ $(Xi \leq 1)$. Za izračunavanje uniformnih vremenskih gubitaka koristi se relacija (17), pri čemu *ti* predstavlja deo perioda analize *T* u kome je saobraćajni tok zasićen, dok $T - ti$ predstavlja deo perioda *T* u kome je saobraćajni tok nezasićen,
- u sledećem periodu analize n+1 i dalje postoji neopsluženi red vozila koji može biti manji ili jednak inicijalnom redu iz prethodnog perioda analize, odnosno $N_{(n+1)i} \leq N_{ni}$ $(Xi \leq 1)$. Za ovaj slučaj vrednost vremena prezasićenosti $ti = T$, dok se vrednost parametra *ui* izračunava (jer zavisi od *Xi*) na osnovu relacije (16). Uniformni vremenski gubici iznose $d_{si}$, i
- u sledećem periodu analize $n+1$ postoji neopsluženi red vozila veći od inicijalnog reda u prethodnom periodu *n*, tj. $N_{(n+1)i} > N_{ni}$ $(Xi > 1)$. U ovom slučaju $ti = T$, $ui = 1$ i uniformni vremenki gubici $d_{si}$.

### 1.2.2.4. Efikasnost rada i nivoi usluga semaforizovanih raskrsnica

Pri projektovanju, oblikovanju i opremanju raskrsnica mora se prevashodno voditi računa o tome da se u njima što ređe javljaju konflikti između učesnika u saobraćaju, da su istovremeno vremenski gubici u saobraćajnom toku što manji i da se ova dva uslova ispune uz što manja finansijska ulaganja Za realizaciju ovih načela upotrebljavaju se opšti principi oblikovanja površinskih raskrsnica [8]:

- uslovi vožnje na raskrsnicama treba da budu, što je više moguće, jednaki uslovima na delu puta pre raskrsnice,
- uslovi saobraćajne bezbednosti na raskrsnici treba da budu optimalni i
- propusnost raskrsnice ne sme uticati na propusnost odseka između dve uzastopne raskrsnice.

U zavisnosti od toga koliko se sadržaji ovih principa praktično ostvaruju određuje se efikasnost rada raskrsnice. Procena efekata semaforizovane raskrsnice kao složenog sistema je veoma složen zadatak. Osnovni kriterijumi koji se koriste pri ovoj proceni mogu se svrstati u nekoliko celina i to:

- primarni kriterijumi (vremenski gubici vozila, ukupan broj zaustavljanja, vreme putovanja svih vozila),
- bezbednosni kriterijumi (broj konfliktnih tačaka, ukupan broj saobraćajnih nezgoda i drugo),
- ekonomski kriterijumi (potrošnja goriva, troškovi eksploatacije),
- ekološki kriterijum (zagađenje vazduha, buka, vizuelno narušavanje prostora i drugo) i
- korisnički kriterijumi koji se odnose na stepen zadovoljstva korisnika, odnosno učesnika u saobraćaju [12].

Za određivanje efikasnosti rada, a posebno nivoa usluga semaforizovane raskrsnice, najbitnija je grupa primarnih kriterijuma, odnosno vremenski gubici koji se javljaju na ovim raskrsnicama. U Tabeli 3. date su vrednosti vremenskih gubitaka koje odgovaraju nivoima usluga od A do F.

Ukupni vremenski gubici, ukupan broj zaustavljanja vozila, potrošnja goriva i troškovi eksploatacije predstavljali su, a i danas su, najčešći kriterijum za optimizaciju rada semaforizovanih raskrsnica. Međutim, pored ovih kriterijuma, danas se sve više insistira na značaju ekoloških kriterijuma, posebno na zagađenju vazduha koje je u velikoj meri prisutno u oblasti raskrsnica.

Tabela 3. *Nivoi usluge i prosečni vremenski gubici [17],[18]*

| *Nivo usluge* | *Prosečni vremenski gubici (s/voz)* |
|---|---|
| A | $\leq 5$ |
| B | veći od $5 \leq 10$ |
| C | veći od $10 \leq 20$ |
| D | veći od $20 \leq 30$ |
| E | veći od $30 \leq 45$ |
| F | veći od 45 |

## 2. UČESNICI I BEZBEDNOST UČESNIKA U DRUMSKOM SAOBRAĆAJU

U uvodu disertacije istaknuto je da drumski saobraćaj u prvom redu karakteriše masovnost učesnika u njemu i da ima značajnu prednost u odnosu na ostale oblike saobraćaja. Međutim, pored prednosti koje pruža, drumski saobraćaj izaziva i niz štetnih posledica od kojih su svakako najštetnije saobraćajne nezgode. Prema podacima Svetske zdravstvene organizacije (WHO, 2009a) u svetu svake godine od posledica saobraćajnih nezgoda smrtno nastrada skoro 1,3 miliona ljudi i oko 50 miliona biva povređeno. Procenjeno je, ukoliko se ne preduzmu odgovarajuće akcije usmerene ka unapređenju bezbednosti saobraćaja, da će se stanje u bezbednosti saobraćaja pogoršati, pa se očekuje porast smrtnog stradanja u saobraćaju za oko 67% do 2020. godine [19].

### 2.1. Pojam i osnovni faktori bezbednosti saobraćaja

I pored štetnih posledica i negativnih efekata koje izaziva drumski saobraćaj, savremeno društvo pokazuje permanentnu potrebu za razvojem i stalnim poboljšanjem kvaliteta drumskog saobraćaja, pa se danas sve više ističe neophodnost preduzimanja odgovarajućih aktivnosti radi smanjivanja njegovih stetnih posledica. Skup aktivnosti i mera kojima se prate, izučavaju, i objašnjavaju pojavni oblici, uzroci, uslovi i drugi faktori zbog kojih dolazi do saobraćajnih nezgoda, ugrožavanja ljudi i imovine u saobraćaju i strategija i taktika u sprečavanju saobraćajnih nezgoda i drugih negativnih efekata, kao i mera koje se preduzimaju i spovode u cilju smanjivanja ovakvih posledica i efekata drumskog saobraćaja, u osnovi predstavlja bezbednost saobraćaja. Razlikuju se dva aspekta bezbednosti saobraćaja: aktivna i pasivna bezbednost. Merama aktivne bezbednosti postiže se smanjenje saobraćajnih nezgoda i ostalih negativnih efekata saobraćaja, dok se pasivna bezbednost odnosi na smanjivanje štetnih posledica saobraćajnih nezgoda koje su se već dogodile.

Bezbednost saobraćaja je posebna naučna disciplina koja izučava međuzavisnost saobraćajnog i drugih procesa u društvu, sa jedne i štetnih posledica saobraćaja sa druge strane [1]. Izučava zakonitosti nastanka štetnih posledica saobraćaja i metode njihovog smanjivanja sa ciljem optimizacije saobraćaja i smanjivanja štetnih posledica [20]. Pri tome u znatnoj meri koristi dostignuća i znanja prirodnih, tehničkih i društvenih nauka, kao i rezultate ostalih naučnih disciplina saobraćajne nauke: organizacija saobraćaja, regulisanje saobraćaja, saobraćajno pravo i druge. U procesu izučavanja zakonitosti nastanka štetnih posledica, bezbednost saobraćaja, kao naučna disciplina, posebno je fokusirana na saobraćajne nezgode, zauzimanje životnog prostora, iscrpljivanje prirodnih resursa i zagađivanje okoline (buka, izduvni gasovi, otpadni materijali i drugo) i na negativne psihološke i socijalne uticaje saobraćaja na čoveka, sa ciljem da se što više smanje svi štetni efekti drumskog saobraćaja uz njegovo nesmetano odvijanje.

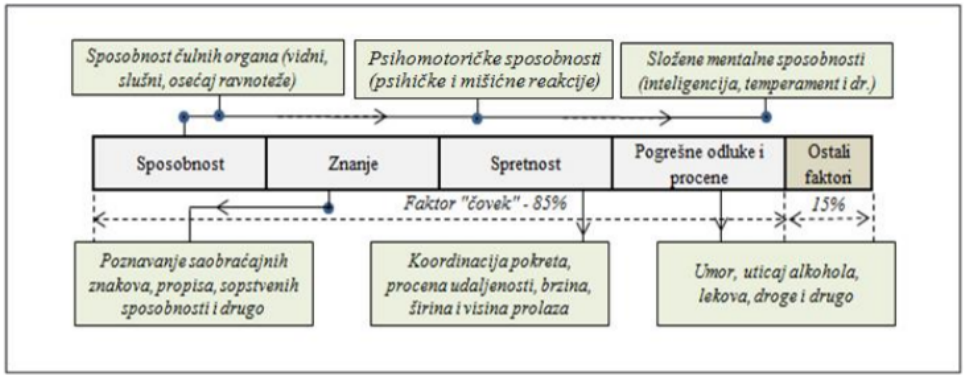
Intenzivan razvoj ove naučne discipline započeo je početkom dvadesetog veka i do danas se odvijao u nekoliko faza [20]. Posebno je značajan period od tridesetih do sedamdesetih godina dvadesetog veka kada su se jasno izdiferencirali osnovni elementi kojima se može *upravljati* saobraćajnim situacijama (vozilo, putevi, vozač i obučenost vozača i obaveza poštovanja pravila saobraćaja) i kada su se u razrešavanju problema bezbednosti saobraćaja uključili, pored pravnika, inženjeri, psiholozi, sociolozi, policijski stručnjaci i drugi. U istom periodu, u Sjedinjenim Američkim Državama i drugim razvijenim zemljama, javljaju se prvi stručnjaci za bezbednost saobraćaja i formiraju se posebni organi državne uprave za bezbednost saobraćaja i gradnju puteva. Kod nas su, posebno zbog kasnijeg razvoja, ozbiljniji radovi iz oblasti bezbednosti saobraćaja, nastali tek šezdesezih godina prošlog veka. Značajan doprinos razvoju nauke iz ove oblasti dale su i daju brojne međunarodne saobraćajne organizacije koje su svojom aktivnošću stvarale uslove i podsticale razmenu iskustava i važnih informacija između država, unapređenje sistema praćenja saobraćajnih nezgoda, saradnju na izučavanju pojedinih faktora bezbednosti saobraćaja i drugo.

U literaturi i praksi često su prisutna poređenja država, regiona, opština i delova putne mreže prema nivoima bezbednosti saobraćaja na tim područjima. Za definisanje i utvrđivanje nivoa bezbednosti saobraćaja koriste se odgovarajući pokazatelji koji mogu biti direktni i indirektni. Direktni pokazatelji daju kvantitativne prikaze posledica saobraćajnih nezgoda i u njima se najčešće navode podaci o smrtno stradalim i povređenim licima i o veličini materijalne štete. Sa druge strane, indirektni pokazatelji, kao što su procenat korišćenja sigurnosnih pojaseva, žaštitne opreme, prekoračenja brzine i drugi, na indirektan način definišu nivoe bezbednosti saobraćaja. Direktni i indirektni pokazatelji mogu biti apsolutni i relativni.

Postoje mnogo faktora koji utiču na bezbednost saobraćaja. Brojnost faktora i njihova heterogenost proizilaze iz same složenosti drumskog saobraćaja gde se međusobno prepliću subjektivni faktor i karakteristike čoveka kao vozača sa jedne strane i tehnički, prirodni i društveni faktori, sa druge strane. Međutim, i pored toga svi faktori mogu se grupisati u četiri celine faktora koji utiču na bezbednost saobraćaja i to: *čovek*, *vozilo*, *put* i *okruženje* [1], [19]. Od ovih celina najznačajniji je faktor "čovek" koji, u ukupnoj bezbednosti saobraćaja, učestvuje sa 85%, dok se preostalih 15% odnosi na ostale faktore [1].

### *2.1.1. Čovek kao faktor bezbednosti saobraćaja*

U saobraćaju, a posebno u drumskom - zbog svojih karakteristika i značaja na opštem i individualnom planu i zahteva savremenog života, učestvuje veliki broj ljudi čija je struktura veoma heterogena kako prema polu, prema starosti i kategoriji učešća (vozači, pešaci, ili putnici), tako i prema psihofizičkim karakteristikama i prema sposobnostima. Čovek, a posebno vozač, njegova psihofizička konstitucija, obuka u saobraćaju, kao i opšta saobraćajna kultura, su jedan od najznačajnijih i najkompleksnijih faktora bezbednosti saobraćaja. Kao vozač u saobraćaju, čovek prima informacije vezane za prilike na putu i uzevši u obzir vozilo i saobraćajne propise, određuje ponašanje i način kretanja votila. Pri tome do izražaja dolaze njegove osobine, kao što su sposobnost, spretnost, znanje i donošenje odgovarajućih, pogrešnih, ili ispravnih odluka i procena. Ove osobine vozača predstavljaju osnovne elemente faktora "čovek". Sadržaji ovih elemenata prikazani su na slici 15.




Slika 15. *Osnovni elementi faktora "čovek"*

Učešće ljudi u drumskom saobraćaju, nezavisno od toga da li se radi o vozačima, pešacima, ili putnicima, zahteva da svaki učesnik poseduje određene psihofičke sposobnosti. Naime, u drumskom saobraćaju čovek se neminovno suočava sa potrebom brzog donošenja odluka kako u upravljanju sa nekom od saobraćajnih sredstava, tako i u preduzimanju određene akcije za koju proceni da u datoj situaciji ima najbolji ishod. On mora, kao učesnik u savremenom drumskom

saobraćaju, istovremeno da obavlja nekoliko funkcija, a posebno da: posmatra izvore podataka i informacija, da registruje i shvati poruke, da vrši selekciju podataka i informacija, da donosi odluke i da izvrši odgovarajuće radnje. Ovakve, veoma složene zahteve nije moguće uvek lako zadovoljiti, pre svega zbog ograničenih psihofizičkih sposobnosti ljudi (ograničena mogućnost uočavanja, ograničene čulne sposobnosti, kvalitet pažnje i drugo) i zbog toga, kada se zbog složenosti saobraćajnih situacija postave pred čoveka zahtevi koji prevazilaze njegove performanse ili kada se u određenom momentu zahtevi povećavaju i prevaziđu njegove trenutne sposobnosti, dolazi do negativnih pojava koje se ispoljavaju kao neracionalne i štetne odluke, ili kao saobraćajne nezgode. Na visinu zahteva posebno utiču [1]:

- brzina kretanja – sa povećanjem brzine smanjuje se vreme uočavanja pojava, obrade podataka i donošenje odluka,
- složenost saobraćajne situacije – broj učesnika na putu, veći zahtevi na raskrsnicama nego na pravom putu, veći zahtevi u naseljenim mestima nego van njih,
- stanje puta – bolji put, manji zahtevi,
- stanje signalizacije i sistema komunikacija – bolji, jasniji i potpuniji sistem manji zahtevi i više vremena za obradu podataka i donošenje odluka i
- okolina puta.

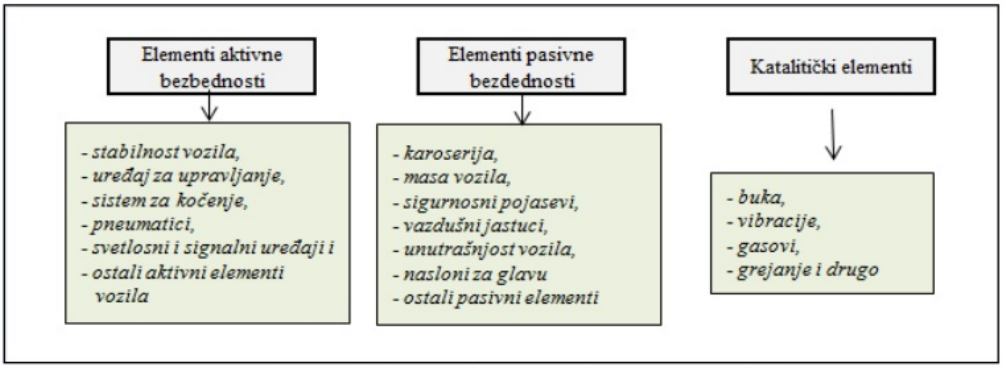
Činjenica da su saobraćajni zahtevi veoma složeni i da se u takvim okolnostima uvek nastoji da se oni na određeni način zadovolje, podrazumeva da vozač poseduje odgovarajuću psihofizičku sposobnoct, poznavanje propisanih pravila, tehniku vožnje i da ima dovoljno iskustva, što mu omogućava široke mogućnosti predviđanja i izbegavanja kritičnih situacija. Drugim rečima, u uslovima složenih saobraćajnih situacija vozač mora imati sposobnost izbora najpovoljnijeg režima kretanja zavisno od karakteristika vozila, stanja na putu i klimatskih uslova, da poseduje sigurnost i snalaženje u složenim i opasnim situacijama, brzo koncentrisanje pažnje na opasne situacije, dobru koordinaciju pokreta, brzu i tačnu reakciju, kao i pouzdano upravljanje vozilom i korišćenje odgovarajuće signalizacije pri kretanju.

Utvrđivanje psihofizičkih osobina učesnika u drumskom saobraćaju, posebno vozača motornih vozila, je veoma značajna aktivnost u oblasti bezbednosti saobraćaja, naročito zbog činjenice da se danas proizvode snažna i brza vozila koja postaju dostupna velikom broju građana. Po pravilu, ono se ostvaruje odgovarajućom zdravstvenom kontrolom građana i selekcijom. Obuka učesnika u saobraćaju je takođe bitan elemenat faktora "čovek". Osnovna pažnja u sistemu obuke sve se više usmerava prema vozačima motornih vozila jer oni upravljaju sredstvima koja su najveći potencijalni izvor opasnosti u drumskom saobraćaju.

### *2.1.2. Vozilo kao faktor bezbednosti saobraćaja*

Vozilo predstavlja bitan faktor bezbednosti saobraćaja. Njegovo ućešće u ukupnoj bezbednosti saobraćaja iznosi, u Evropi i u Sjedinjenim Američkim Državama, oko tri procenta [1]. Jedan od razloga za relativno malo učešće vozila verovatno leži i u činjenici da je ponekad veoma teško utvditi da li je neki nedostak (ili neka neispravnost na vozilu) izazvao sobraćajnu nezgodu, ili je posljedica nezgode. Na slici 16. prikazani su osnovni elementi faktora "vozilo".

Jedna od karakteristika moderne industrije je stalno usavršavanje mehaničke opreme vozila. Vozila su sve udobnija, prijatnija za vožnju i brža, ali i opasnija za bezbednost saobraćaja. Zbog toga se danas pitanju konstrukcije vozila u tehničkom pogledu pridaje posebna pažnja, jer je to jedan od važnih činilaca od koga zavisi veća bezbednost na putevima. Tom pitanju posvećuje se posebna pažnja kako u procesu proizvodnje i održavanja, tako i u pasivnom korišćenju vozila.

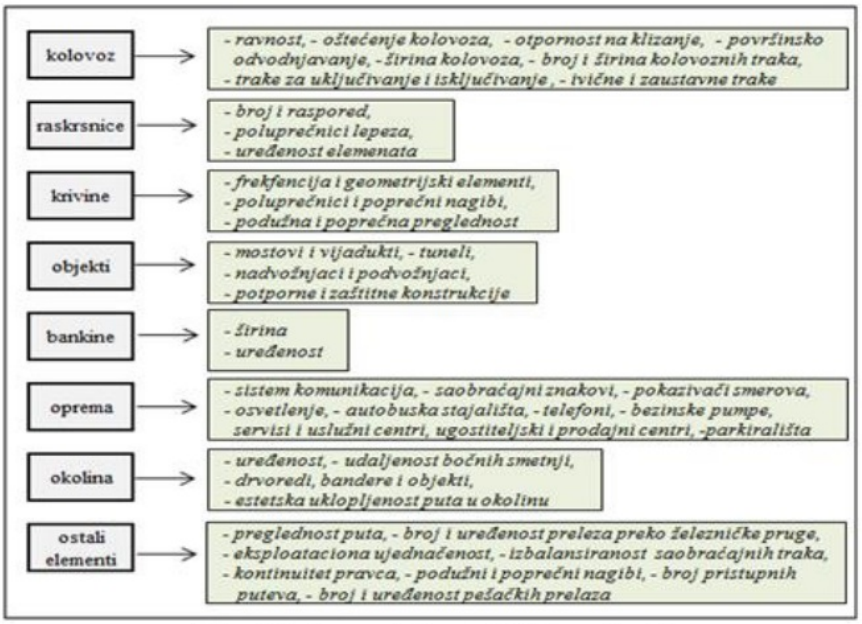



Slika 16. *Osnovni elementi faktora „vozilo“*

Elementi aktivne bezbednosti vozila neposredno utiču na nastanak saobraćajne nezgode, dok su pasivni elementi tehničko-konstrukcioni elementi vozila čiji je zadatak da, u slučaju nastanka saobraćajne nezgode, ublažavaju njene posledice. Katalitički parametri obuhvataju one parametre vozila koji mogu ostvariti nepovoljan uticaj na ostale faktore, posebno na vozača i na taj način uticati na nastanak saobraćajne nezgode.

### *2.1.3. Put kao faktor bezbednosti saobraćaja*

U strukturi faktora od kojih zavisi bezbednost drumskog saobraćaja put zauzima značajno mesto. Ovakva konstatacija potkrepljuje se činjenicom da postoji znatan broj elemenata puta koji mogu biti neposredni ili posredni uzroci saobraćajnih nezgoda. Pored toga što određuje okolnosti odvijanja saobraćaja, put utiče na vozača i na vozilo, stvara uslove za dejstvo drugih faktora i ima značajan uticaj na težinu saobraćajnih nezgoda. Osnovni elementi puta za bezbednost drumskog saobraćaja su: kolovoz, raskrsnice, krivine, objekti, bankine, oprema, okolina i ostali elementi. Na slici 17. prikazana je struktura osnovnih elemenata puta.




Slika 17. *Osnovni elementi faktora “put”*

Najznačajniji element faktora "put" koji utiče na bezbednost saobraćaja je stanje kolovoza. O uticaju i posledicama stanja kolovoza bilo je više govora u prethodnom poglavlju. Oštećenje gornje površine, pojava udarnih rupa i drugo mogu izazvati katastrofalne posledice po bezbednost saobraćaja. Najčešće promene stanja kolovoza su prve kiše i prvi sneg i mesta sa lošim kolovoznim zastorom. Vremenski uslovi i prvi sneg, koji se najčešće zadržava na kolovozu, mogu da izazovu ozbiljne probleme u saobraćaju i utiču na bezbednost odvijanja saobraćaja na putu. Na odvijanje saobraćaja, odnosno na faktor "put", u znatnoj meri utiču i prepreke pored puta, broj i raspored priključnih puteva, raskrsnice, kao i ostali elementi čija je struktura data na slici 17.

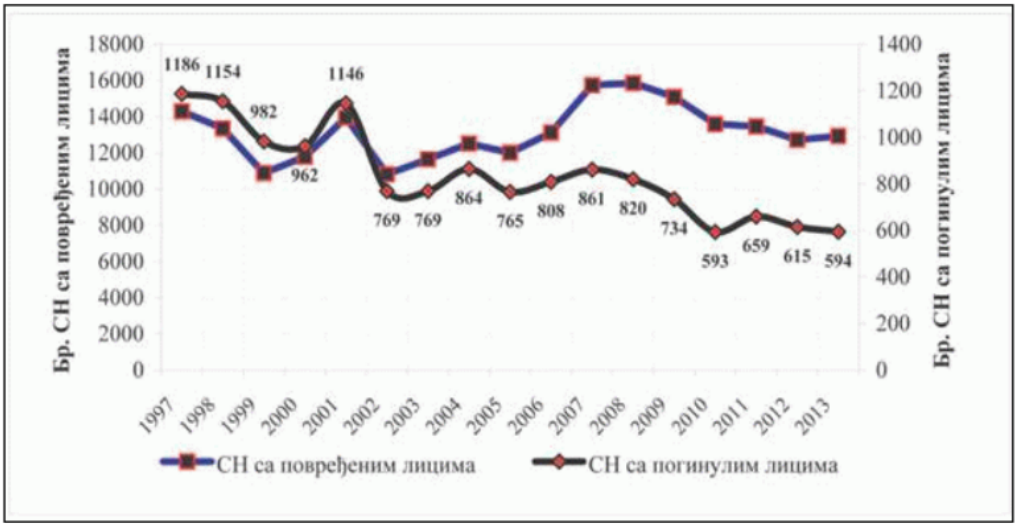
### *2.1.4. Okruženje kao faktor bezbednosti saobraćaja*

Četvrta grupa faktora koja utiče na bezbednost saobraćaja, odnosi se na okruženje. Okruženje ili okolina kao faktor bezbednosti saobraćaja, sadrži razne elemente od kojih se ovde navode najznačajniji i to: metereološke prilike, opšta kultura učesnika u saobraćaju, porodica, uticaj roditelja, standard pojedinaca, prisustvo saputnika, neposredna policijska kontrola, skrivene kamere, važeći zakonski akti i propisi i drugi.

Neki od elemenata koji utiču na faktor okoline su, primera radi, neočekivane padavine (grad, kiša, sneg) koje izazivaju povećanje rizika od nastanka saobraćajne nezgode, usporavaju saobraćaj i otežavaju njegovo odvijanje. Istraživanja koja su vršena u Republici Srbiji pokazala su da pojava grada najviše utiče na rizik saobraćajne nezgode, a posebno na rizik nezgoda mladih i neiskusnih vozača [20]. Sledeći elemenat je loš uticaj roditelja mladih vozača koji imaju blag stav prema pijanstvu dece koja upravljaju motornim vozilom ili nekom od prekršaja. Takođe u ovoj grupi faktora spada i uticaj saobraćajne policije na odvijanje i bezbednost saobraćaja. Neka istraživanja pokazala su da redovna kontrola brzine kretanaja vozila smanjuje njenu prosečnu vrednost čak i do 4 km/h [20]. Neposredna kontrola brzina brzo deluje, ali su njeni efekti prostorno ograničeni i vremenski relativno kratki. Takođe se pokazalo da skrivene kamere imaju znatno veći uticaj na smanjivanje broja prekoračenja brzina i broja saobraćajnih nezgoda u odnosu na vidljive kamere, i to kako na konkretnim deonicama, tako i na svim putevima.

## 2.2. Učesnici u drumskom saobraćaju

Drumski saobraćaj omogućava bezbednu i efikasnu razmenu dobara, dopremanje sirovina, otpremanje gotovih proizvoda, poslovna i rekreativna putovanja, kulturne manifestacije i mnogobrojne druge aktivnosti koje prožimaju aktivnosti savremenog sveta. Kao značajna ljudska delatnost, drumski saobraćaj je u znatnoj meri unapredio životni standard ljudi u celini, ali je u isto vreme, u mirnodopskim uslovima, odneo i veliki broj ljudskih života. Primera radi, prema direktnim pokazateljima bezbednosti saobraćaja, u Republici Srbiji je u periodu od 1997. do 2013. godine poginulo 15.928, a teže, ili lakše povređeno (slika 18.) je 315.854 lica [21]. Republika Srbija se nalazi u grupi najnebezbednijh zemalja u Evtopi (jedino je Rumunija nebezbednija) [21]. Saobraćajne nezgode sa teškim povredama i smrtnim ishodom najčešće se dešavaju na lokalnim putevima, ulicama i državnim putevima kroz naseljena mesta. Potrebno je takođe istaći da saobraćajne nezgode nisu samo saobraćajni, već ekonomski, zdravstveni i socijalni problem društva koji nastaje kao posledica propusta u saobraćaju, pogrešnih stavova, neznanja, neobrazovanosti i nekulutre učesnika u saobraćaju, kao i nedovoljne posvećenosti upravljanju bezbednošću saobraćaja. Struktura nastradalih lica u saobraćajnim nezgodama je heterogena: deca, mladi vozači od 19 do 25 godina, lica starija više od 65 godina, pešaci, biciklisti, vozači, putnici, motociklisti i drugi. Sve ovo još jednom ukazuje na činjenicu da bezbednost saobraćaja u najvećoj meri zavisi od čoveka, kao učesnika u saobraćaju, njegovog karaktera, temperamenta, njegove inteligencije, njegovih unutrašnjih resursa i individualne reakcije na situacije u saobraćaju.




Slika 18. *Saobraćajne nezgode sa povređenim i poginulim licima u Republici Srbiji [21]*

Na osnovu analize saobraćajnih nezgoda i sadržaja njihovih posledica, najrizičnije grupe učesnika u saobraćaju su [21]:

- vozači i putnici u putničkim vozilima, starosti od 17 do 35 godina,
- pešaci,
- vozači, pešaci i putnici stariji od 65 godina,
- deca putnici u putničkim vozilima,
- biciklisti,
- vozači i putnici na traktorima,
- vozači kojima je oduzeta saobraćajna dozvola zbog nesavesnog upravljanja vozilom,
- vozači komercijalnih vozila i
- vozači i putnici mopeda i motocikala.

Republika Srbija je 2015. godine usvojila *Strategiju bezbednosti na putevima Republike Srbije za period od 2015. do 2020. godine* („Službeni glasnik RS“, br. 64/2015) u kojoj su, između ostalog, utvrđene mere koje se odnose na navedene grupe učesnika u saobraćaju i koje je potrebno realizovati u narednih pet godina kako bi se, do 2020. godine, dostiglo stanje bezbednosti saobraćaja kao u najrazvijenijim državama Evropske unije. Kada je reč o unapređenju bezbednosti učesnika u saobraćaju, u Strategiji se posebno ističe:

1. Na unapređenje bezbednosti pešaka, koji najviše stradaju na deonicama državnih puteva koji prolaze kroz naseljena mesta, potrebno je delovati kroz unapređenje saobraćajne infrastrukture namenjene pešacima, unapređenje znanja vozača i pešaka o rizicima u saobraćaju, savremen pristup upravljanja brzinama na saobraćajnicama duž pešačkih koridora i izgradnjom pešačkih staza uz frekfentne saobraćajnice i državne puteve u naseljenim mestima. Deca u drumskom saobraćaju najvećim delom učestvuju kao pešaci od kuće do škole i nazad. Za njihovu bezbednost najvažnija je svest roditelja o rizicima kojima se deca izlažu i sistem edukacije dece o bezbednom ponašanju u saobraćaju.
2. Najčešći faktori koji doprinose nastanku saobraćajnih nezgoda, u kojima učestvuju mladi vozači, su neprilagođena brzina, nepropisno preticanje, vožnja pod uticajem alkohola, nepropisna upotreba sredstava za komunikaciju u toku vožnje i drugo. Smanjenjem uticaja i eliminisanjem ovih faktora kroz unapređenje saobraćajnog obrazovanja i vaspitanja mladih u periodu pre sticanja prava na obuku za polaganje vozačkog ispita, unapređenje stavova roditelja neposredno vezanih za važnost njihove uloge u procesu razvoja mladih vozača, unapređenje obuke

u auto školama, efikasnija kontrola ponašanja i drugo, utiče i uticaće na izgradnju bezbednog ponašanja mladih učesnika u saobraćaju. Time će se u znatno većoj meri smanjiti i njihovo učešća u saobraćajnim nezgodama.

3. Unapređenje bezbednosti biciklista i motociklista realizovati promovisanjem upotrebe zaštitnih sredstava, unapređenjem procesa obuke biciklista i motociklista na svim nivoima, prilagođavanjem saobraćajne infrastrukture za ovu kategoriju učesnika i drugo.

4. Za osobe starije od 65 godina karakteristično je opadanje psihomotornih sposobnosti što neposredno utiče na njihovo bezbedno učestvovanje (kao vozači, a posebno kao pešaci) u saobraćaju. Unapređenje bezbednosti ove kategorije učesnika u saobraćaju potrebno je realizovati kroz njihovu edukaciju i informisanje o opadanju psihofizičkih sposobnosti i povećanom riziku u saobraćaju, o uticaju lekova na sposobnost za vožnju. Takođe je potrebno preispitivanje prednosti i nedostatke uvođenja dodatnih zdravstvenih pregleda za ovu kategoriju učesnika.

5. Pravci za unapređenje bezbednosti saobraćaja u oblasti korišćenja komercijalnih vozila i traktora obuhvataju profesionalizaciju i edukaciju vozača komercijalnih vozila, edukaciju vozača traktora u pogledu poštovanja saobraćajnih propisa, intenzivniju kontrolu rada i odmora vozača i drugo.

Vožnja pod uticajem alkohola ili psihoaktivnih supstanci predstavlja veliku opasnost za bezbednost saobraćaja, naročito kada je reč o mladim vozačima. Takvi vozači, zbog smanjenih psihofizičkih sposobnosti, voze rizičnije pri čemu im istovremeno slabi kontrola nad vozilom kojim upravljaju. Za promenu stavova i svesti ovih vozača, pored kontinuirane edukacije, bitno je uspostavljanje efikasnog sistema nadzora i kontrole, kao i sankcionisanja onih koji čine ovakve prekršaje.

Grupu učesnika, koja svojim visokorizičnim ponašanjem ugrožava ostale učesnike u saobraćaju, čine vozači kojima je oduzeta saobraćajna dozvola zbog nesavesnog upravljanja vozilom. Njih posebno karakteriše učestalo kršenje saobraćajnih propisa, često ulaženje u rizične situacije, zanemarivanje ostalih korisnika puteva, nepoštovanje svetlosne saobraćajne signalizacije, nepropisno preticanje, upravljanje vozilom brzinama koje su znatno iznad dozvoljenih i drugo. Uticaj na ovu grupu vozača potrebno je ostvariti uspostavljanjem efikasnog sistema kontrole i sistema za rehabilitaciju. Za one čije ponašanje i dalje ostaje nepromenjeno vršiti trajnu suspenziju saobraćajne dozvole.

Treću grupu visokorizičnih učesnika u saobraćaju čine vozači skloni prekoračenju dozvoljene brzine. Za promenu ponašanja ovih vozača neophodno je preduzimanje dodatnih mera prevencije i posebnih mera edukacije i represije.

### 2.3. Zakoni i drugi normativni akti u oblasti bezbednosti saobraćaja

Uloga zakona, podzakonskih i drugih normativnih akata u ostvarivanju i unapređenju bezbednosti saobraćaja je veoma značajna i važna mera u skupu elemenata koji su obuhvaćeni upravljanjem drumskim saobraćajem. Da bi se u zakone ugradili napredni stručni stavovi i napredna dostignuća, neophodno je da se stalno prate svetska iskustva, razvoj teorije i ostvareni praktični rezultati u oblasti bezbednosti saobraćaja. Ovome znatno doprinose brojne međunarodne organizacije među kojima se posebno ističu OECD, OUN, CEMT, Savet Evrope, Evropska unija i druge.

Imajući u vidu da su stradanja u saobraćajnim nezgodama globalni problem i prihvatajući stav da se bezbednošću saobraćaja može upravljati, Generalna skupština OUN je u maju 2010. godine usvojila rezoluciju *Unapređenje bezbednosti saobraćaja na putevima* kojom se period od 2011. do 2020. godine proglašava decenijom akcije u bezbednosti saobraćaja, sa ciljem da se stabilizuje, a zatim prepolovi prognozirani broj poginulih u saobraćajnim nezgodama [21]. Ovo je potrebno ostvariti doslednim sprovođenjem naučnih i stručnih principa kroz odgovarajuće aktivnosti na

nacionalnom, regionalnom i globalnom nivou. Prihvatajući činjenicu da se bezbednošću saobraćaja može upravljati smernice utvrđene navedenom rezolucijom, mnoge zemlje u svetu izgradile su organizovani i zaštitni sistem i uspešno sprovode upravljanje u praksi, neprestano smanjujući broj nastradalih bez obzira na porast broja registrovanih vozila i povećenja obima saobraćaja. U Evropi, značajne rezultate u toj oblasti, ostvaruju Velika Britanija, Švedska, Norveška, Holandija i druge. Drugu grupu čine države (Makedonija, Hrvatska, Crna Gora, Srbija, Rumunija, Bugarska i druge) koje su načelno prihvatile ideju o mogućnostima smanjivanja broja nastradalih, ali još uvek nisu izgradile snažan zaštitni sistem i ne uspevaju upravljati bezbednošću saobraćaja, beležeći još uvek velike oscilacije u broju nastradalih u saobraćajnim nezgodama. Ostale države, među kojima su Indija, Turska i većina država sa afričkog kontinenta, još uvek nisu prihvatile ideju o upravljanju bezbednošću saobraćaja [1], [21].

Sistem bezbednosti saobraćaja u Republici Srbiji, uređen je Ustavom, priznatim međunarodnim izvorima, zakonima i odgovarajućim podzakonskim aktima. U zakonskim aktima ugrađena su savremena rešenja u upravljanju bezbednošću saobraćaja, kao i obaveze koje je Republika Srbija preuzela i pokazala opredeljenje da se u ovoj oblasti približi najrazvijenijim državama Evrope. Zakoni koji prvenstveno uređuju sistem bezbednosti saobraćaja su Zakon o bezbednosti saobraćaja na putevima i Zakon o javnim putevima.

Zakon o bezbednosti saobraćaja na putevima utvrđuje nadležne republičke i lokalne institucije za bezbednost saobraćaja, uređuje deo sistema koji se odnosi na puteve, vozače i vozila i sadrži odredbe kojima se uređuju prava i obaveze organa nadležnih za kontrolu i regulisanje saobraćaja, kao i sadržaje značajne za bezbednost saobraćaja.

Upravljanje, zaštita i održavanje javnih puteva uređeni su Zakonom o javnim putevima. Pojedine odredbe ovog zakona odnose se na sve javne puteve, a pojedine samo na državne, dok je lokalnim samoupravama ostavljena mogućnost da svojim aktima urede zaštitu i održavanje lokalnih puteva i ulica. Najvažnija odredba ovog zakona koja se odnosi na bezbednost saobraćaja je obaveza upravljača[12] javnog puta da obezbedi nesmetano i bezbedno odvijanje saobraćaja na putu.

Pored ova dva zakona, određeni segmenti bezbednosti saobraćaja na putevima uređeni su i odgovarajućim odredbama drugih zakona i to: Krivični zakonik, Zakon o prekršajima, Zakon o policiji, Zakon o komunalnoj policiji, Zakon o opštem upravnom postupku, Zakon o obaveznom osiguranju u saobraćaju, Zakon o vanrednim situacijama, Zakon o zdravstvenoj zaštiti i Zakon o osnovama sistema obrazovanja i vaspitanja. Zakoni, izmene i dopune delova pojedinih zakona i odredbi koje se odnose na bezbednost saobraćaja, objavljeni su i objavljuju se u službenim glasnicima Republike Srbije i dostupni su svim učesnicima u drumskom saobraćaju.

Pravni okvir u sistemu bezbednosti saobraćaja na putevima, pored navedenih zakona, sadrži i veliki broj podzakonskih akata koji su doneti na osnovu Zakona o bezbednosti saobraćaja na putevima, ili na osnovu ostalih zakona koji regulišu ovo materiju. To su najčešće pravilnici, uredbe, upustva i odluke. Donose ih Vlada Republike Srbije, resorna ministarstva i drugi ovlašćeni državni organi. Pravilnicima se razrađuju i podrobno regulišu propisi: o saobraćajnim znakovima, o znacima što ih daju ovlašćena lica u saobraćaju na putevima, o registraciji motornih i priključnih vozila, o obrascima saobraćajne i vozačke dozvole, o uređajima, opremi, dimenzijama i ukupnim masama vozila u saobraćaju na putevima, o tehničkim normativima i osnovnim uslovima koje putevi, njihovi elementi i objekti na njima moraju ispunjavati sa aspekta bezbednosti saobraćaja, o zdravstvenim uslovima koje moraju ispunjavati vozači motornih vozila i drugo. Kao primer navode se: Pravilnik o tehničkim sredstvima za usporavanje saobraćaja na putu, Pravilnik o saobraćajnoj

[12] Za magistralne, regionalne i autoputeve nadležno je JP "Putevi Srbije", dok su za lokalne puteve i ulice nadležne opštine, ili preduzeća za održavanje puteva.

signalizaciji (horizontalna, vertikalna i svetlosna signalizacija), Pravilnik o načinu regulisanja saobraćaja na putevima u zoni radova, zatim Naredba o saobraćaju motornih i priključnih vozila na putevima u zimskim uslovima, Naredba o ograničenju brzine kretanja na svim, ili samo na nekim putevima na teritoriji republike i drugo.

# 3. REGULISANJE SAOBRAĆAJA NA RASKRSNICAMA

Sa stanovišta uslova odvijanja saobraćaja, raskrsnice predstavljaju kritična mesta na mreži drumskih saobraćajnica. Zbog toga, prilikom izgradnje, ili rekonstrukcije puteva veoma je važno pravilno dimenzionisati raskrsnice i u skladu sa potrebama definisati adekvatan tip regulisanja saobraćaja. Ako više različitih tipova raskrsnica u funkcionalnom smislu može zadovoljiti zahteve za protokom koji se javljaju na prilaznim putevima, neophodno je proveriti koje od mogućih rešenja raskrsnice predstavlja optimalno rešenje. Prihvatanje jednog od mogućih rešenja bez prethodne provere funkcionalnih mogućnosti raskrsnice može dovesti do toga da raskrsnica zbog nedovoljnih kapacitivnih sposobnosti bude kritično mesto na posmatranom putnom pravcu, ili da bude predimenzionisana i nedovoljno iskorišćena. Ukoliko raskrsnica ne može da odgovori potrebama i zahtevima za protokom dolazi do pada nivoa usluge što se manifestuje povećanjem troškova eksploatacije i povećanjem štetnih uticaja na okolinu [18]. Nasuprot tome, raskrsnica koja ima veći kapacitet od zahtevanog, obično zauzima veliku površinu i zahteva velika početna ulaganja koja se eksploatacijom ekonomski ne mogu opravdati.

Pored geometrijskih karakteristika i karakteristika tokova vozila i pešaka, za izbor optimalnog rešenja su veoma važne veličina zasićenog toka i kapacitet raskrsnice. Na osnovu veličine i karakteristika zatheva za protokom i kapacitivnih karakteristika raskrsnice, mogu se utvrditi parametri na osnovu kojih se definišu uslovi odvijanja saobraćaja i nivo usluge. O metodama proračuna kapaciteta raskrsnica detalnije je bilo govora u prvom poglavlju disertacije. Na ovom mestu potrebno je naglasiti činjenicu da su u dosadašnjoj praksi, korišćene različite metode za proračun kapaciteta i nivoa usluge i da su u okviru istih institucija razvijani različiti postupci za razne tipove raskrsnica u okviru kojih su definisani različiti parametri za ocenu nivoa usluge. Korišćenje različitih parametara za ocenu uslova odvijanja saobraćaja komplikovalo je poređenje predloženih rešenja različitih tipova raskrsnica, a neka rešenja nisu bila adekvatno obuhvaćena ni jednim od verifikovanih postupaka. Međutim, u poslednjih deset i više godina pojavili su se postupci koji imaju jednoznačne i uporedive parametre kao izlazni rezultat proračuna i analiza nivoa usluge na različitim tipovima raskrsnica. Danas se u okviru izbora optimalnog rešenja raskrsnice, najčešće koristi postupak Highway Capacity Manual 2000 (*HCM−2000*) u okviru koga su prosečni vremenski gubici po vozilu, kao osnovni pokazatelj kvaliteta realizacije saobraćajnog procesa na raskrsnici, definisani kao izlazni rezultat analiza koje se sprovode na klasičnim prioritetnim, signalisanim i kružnim raskrsnicama.

Imajući u vidu da su raskrsnice, sa aspekta bezbednosti saobraćaja, kritična mesta na drumskoj mreži, neophodno je da se na ovim segmentima, na adekvatan način, reguliše saobraćaj. Cilj regulisanja saobraćaja na raskrsnicama je obezbeđenje racionalnog korišćenja svih mogućnosti i elemenata raskrsnice kako bi se saobraćaj na njoj odvijao racionalno, bezbedno i efikasno. Regulisanje saobraćaja na raskrsnicama ostvaruje se odgovarajućim propisima, horizontalnom i vertikalnom signalizacijom, dinamičkom svetlosnom signalizacijom i delovanjem organa za regulisanje i kontrolu saobraćaja (pripadnici saobraćajne policije i određeni vojni organi). O regulisanju saobraćaja propisima bilo je reči u prvom i drugom poglavlju. U ovom poglavlju detaljnije se opisuju osnovni elementi horizontalne, vertikalne i svetlosne signalizacije i njihove prednosti i nedostaci. Načini regulisanja saobraćaja horizontalnom, vertikalnom i svetlosnom signalizacijom detaljnije su opisani u narednom poglavlju.

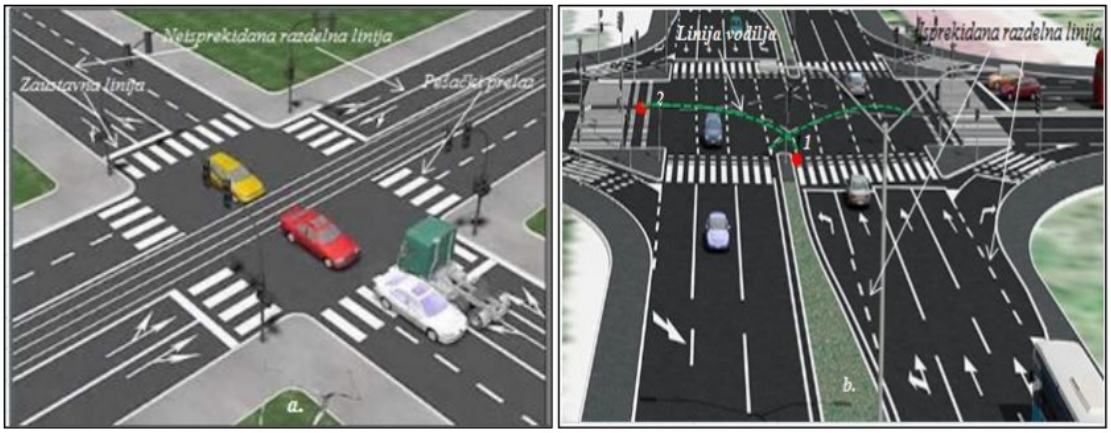
## 3.1. Horizontalna signalizacija

Horizontalna signalizacija spada u grupu statičkih sredstava za regulisanje saobraćaja i definiše se kao skup posebno oblikovanih *geometrijskih elemenata* (linija, figura i polja) i natpisa čijim se kombinovanjem i ugradnjom, na kolovozu, ili na drugim saobraćajnim površinama kao što su trotoari, parkirališta i druge, formiraju odgovarajuće *oznake*. Osnovni elementi horizontalne signalizacije su linija, figura i polja i oni se po pravilu propisuju državnim standardima. Prema položaju oznaka u odnosu na simetralu kolovoza, oznake na kolovozu dele se na *uzdužne*, *poprečne* i *ostale oznake* (linije, strelice, natpisi i druge). Podela oznaka može se izvršiti i prema trajnosti, na kratkotrajne i dugotrajne, prema svetloodbojnosti, na obične i svetlootbojne, kao i prema primenjenim postupcima ugradnje i prema vrsti materijala za ugradnju. Oznake na kolovozu obeležavaju se na saobraćajnicama sa savremenim kolovoznim zastorom. Mogu biti bele i žute boje. Oznake žute boje koriste se samo kao: oznake na kolovozu i trotoaru na kojima je zabranjeno parkiranje, privremene oznake na kolovozu prilikom izvođenja radova na putu, linije za odvajanje saobraćajnih traka za kretanje vozila javnog prevoza putnika i oznake kojima se obeležavaju mesta za određene namene (autobuska stajališta, taksi vozila, policija i drugo) [9].

### *3.1.1. Uzdužne oznake na kolovozu*

Uzdužne oznake na kolovozu su linije koje se pružaju uporedo sa osom puta i služe za određivanje načina korišćenja kolovozne površine na putevima i ulicama. Uzdužne oznake grupisane su kao: razdelne linije, ivične linije i linije vodilje.

Razdelne linije razdvajaju kolovoz na kolovozne trake, odnosno saobraćajne trake i izvode se kao neisprekidane, isprekidane i kombinovane. Neisprekidana uzdužna linija označava zabranu prelaženja preko nje i zabranu kretanja po njoj. Koristi se na mestima gde je zbog bezbednosti saobraćaja potrebno zabraniti preticanja, ili usporiti saobraćaj. Najčešće su to mesta na otvorenim deonicama na kojima nije obezbeđena zadovoljavajuća preglednost, zatim u području raskrsnice (slika 19., pod *a*.), autobuskog stajališta, benzinske pumpe, naplatne rampe, u neposrednoj blizini pešačkog, ili biciklističkog prelaza, prelaza puta preko železničke pruge, semaforizovane, ili kanalisane raskrsnice, kao i delovima puta gde su izvedeni denivelisani građevinski elementi kao što su pešačka ostrva i razdelne trake.




Slika 19. *Neisprekidane (a.) i isprekidane (b.) razdelne linije u području raskrsnice [7]*

Na deonicama gde je potrebno razdvajanje kolovozne trake na putu sa samo po jednom saobraćajnom trakom za svaki smer, ili za razdvajanje kolovozne trake na saobraćajne trake, koristi se razdelna isprekidana linija. Razdelna isprekidana linija koristi se i na prilaznim kracima raskrsnice (slika 19., pod *b*.) za obeležavanje posebnih saobraćajnih traka za levo i desno skretanje, kao i mešovitih traka za skretanja levo i desno i kretanje pravo. Takođe se koristi i kao linija vodilja čija je uloga da vodi vozilo kroz raskrsnicu u levom skretanju. Linija vodilja se obeležava tako da opisuje putanju levog točka vozila od zamišljenog završetka neisprekidane linije na prednoj strani pešačkog prelaza (tačka 1. na slici 19., pod *b*.) do iste takve tačke na drugom pešačkom prelazu (tačka 2. na istoj slici).

Ivične linije upotrebljavaju se za označavanje ivica kolovozne površine. Mogu biti isprekidane, ako je dozvoljen prelaz preko ivične linije i neisprekidane kada prelaz nije dozvoljen.

### *3.1.2. Poprečne oznake na kolovozu*

Poprečne oznake na kolovozu su zaustavna linija, pešački prelazi, prelazi biciklističkih staza preko kolovoza, kosnici i graničnici. Postavljaju se na kolovozu tako da zahvataju jednu, ili više saobraćajnih traka.

U zavisnosti od funkcije koju ima, linija zaustavljanja može biti neisprekidana i isprekidana. Neisprekidana linija zaustavljanja postavlja se:

- ispred svetlosnog saobraćajnog znaka i označava mesto na kolovozu neposredno pre koga vozač mora da zaustavi vozilo ako mu je svetlosnim signalom zabranjen prolaz,
- na prilazu raskrsnici sa putem sa prvenstvom prolaza gde je postavljen saobraćajni znak "Obavezno zaustavljanje" i označava mesto na kolovozu neposredno pre koga vozač mora da zaustavi vozilo i
- ispred znaka "Zabrana prolaza bez zautavljanja" koji označava blizinu carine, policije, ili naplatne rampe.

Na prioritetnoj raskrsnici, na putu sa prvenstvom prolaza, gde je postavljen saobraćajni znak "Ukrštanje sa putem sa prvenstvom prolaza", zatim ispred školskih pešačkih prelaza i na trakama za skretanje u levo, postavlja se isprekidana linija zaustavljanja.

Pešački prelaz, kao poprečna oznaka, označava deo površine kolovoza namenjen za prelaz pešaka i obeležava se na mestima gde se u istom nivou ukrštaju saobraćajni tokovi pešaka i vozila (slika 20.). Slično tome, prelaz biciklističke staze preko kolovoza je deo površine kolovoza namenjen isključivo za prelaz biciklista.




Slika 20. *Prelaz biciklističke staze preko kolovoza paralelan sa pešačkim prelazom [7]*

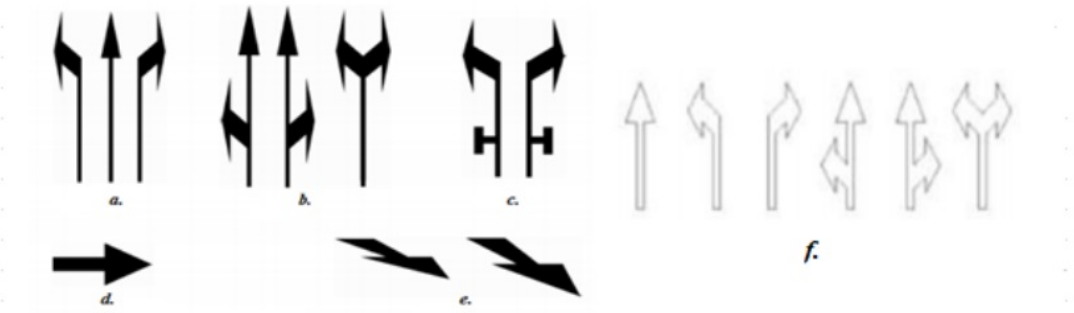
.

Ostale poprečne oznake koriste se uglavnom na autoputevima pa se u ovom delu detaljnije ne obrađuju. Više detalja o njima može se proćitati u literaturi [9] i [10].

### *3.1.3. Ostale oznake na kolovozu*

Grupa *Ostale oznake na kolovozu* obuhvata: strelice, polja za usmeravanje saobraćaja, linije usmeravanja, natpisi, oznake za označavanje površina za posebne namene, obeležavanje mesta za parkiranje i oznake na predmetima uz ivicu kolovoza.

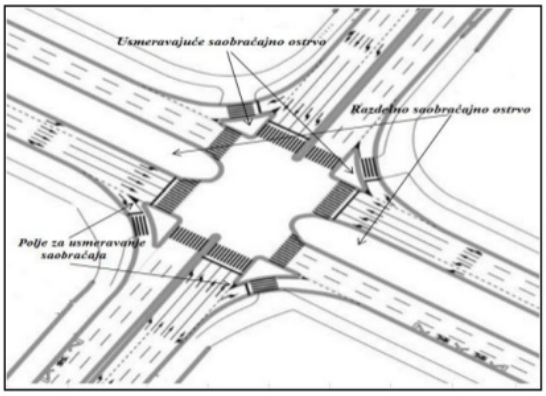
Strelica na kolovozu koristi se za obeležavanje obaveznog smera kretanja vozila, ako je ubeležena u saobraćajnoj traci oivičenoj neisprekidanim linijama i za obaveštavanje vozača o nameni saobraćajnih traka, ako je ubeležena u traci oivičenoj isprekidanim linijama.




Slika 21. *Vrste strelica* (*a*., *b*., *c*., *d*. i *e*.) *i strelice na biciklističkim površinama (f.) [9]*

Strelicama se može označiti jedan smer (slika 21., pod *a*.), dva smera (*b*.), prestrojavanje na dve bliske raskrsnice gde se prestrojavanje mora izvesti pre prve raskrsnice (*c*.), smer kretanja u garažama (*d*.), skretanje saobraćaja i smer kretanja na biciklističkim površinama (*f*.).

Za označavanje površina na kojima je zabranjen saobraćaj i na kojima nije dozvoljeno zaustavljanje, ili parkiranje vozila, koriste se polja za usmeravanje saobraćaja. Na kolovozu se obeležavaju kada usled nedostatka prostora, ili iz nekog drugog opravdanog razloga nije moguće izvesti izdignuta saobraćajna ostrva. Sačinjavaju ih nizovi uporednih linija koja se obeležavaju pod uglom od 30° u odnosu na osu kolovoza, ili su, kao što je na saobraćajnicama u naseljenim mestima, potpuno pokrivena belom bojom. Kada su obeležena, odnosno kada se nalaze ispred izdignutih saobraćajnih ostrva (slike 22a. i 22.), onda služe za vođenje vozila pored ostrva.







Slika 22*a*. *Kanalisana raskrsnica [22]* *Slika 22. Polje za usmeravanje i saobraćajno ostrvo [22]*

Saobraćajna ostrva na raskrsnicama namenjena su za razdvajanje motorizovanih od nemotorizovanih učesnika u saobraćaju, ili razdvajanje pojedinačnih tokova motornih vozila (umeravajuća i razdelna saobraćajna ostrva). Izvode se kao denivelisane površine, ili kao površine koje su obeležene oznakama horizontalne signalizacije. Usmeravajuća saobraćajna ostrva su osnovni elementi kanalisanja saobraćajnih tokova na raskrsnicama (slika 22a.). Moguća su dva oblika, trougao i suza. Izvode se kao izdignuti delovi (slika 22.) ili, kada to iz opravdanih razloga nije moguće, kao oznake horizontalne signalizacije. Razdelna ostrva, ili razdelne trake izvode se duž kolovoza, u osi, ili paralelno sa osom kolovoza i namenjene su razdvajanju kolovoznih traka (slika 22.) čime se postiže bolja zaštita vozila od saobraćaja iz suprotnog smera i veća bezbednost u saobraćaju nemotorizovanim učesnicima prilikom njihovog prelaska raskrsnice. Pored usmeravajućih i razdelnih, na raskrsnicama potoje i saobraćajna ostrva za pešake i biciklističke prelaze. Namena im je da štite pešake i bicikliste od eventualnih udara vozila i da im omogući čekanje dok se ne stvore uslovi za njihov bezbedan prelaz raskrsnice.

U grupi ostalih oznaka na kolovozu spadaju i linija usmeravanja, natpisi, oznake za označavanje površina za posebne namene i oznake za obeležavanje mesta za parkiranje. Linija usmeravanja koristi se za vođenje vozila ispred fiksne prepreke na sredini ili ivici kolovoza i za označavanje promene slobodne površine kolovoza u slučajevima kada se povećava ili smanjuje broj saobraćajnih traka. Posebnu celinu ove grupe čine natpisi koji se postavljaju na kolovozu sa ciljem da se učesnicima u saobraćaju prikažu nazivi mesta, brojevi puta, položaj pojedinih objekata i drugo. Oznake za označavanje površina za posebne namene obeležavaju površine na kojima je zabranjeno zaustavljanje i parkiranje jer su rezervisana za vozila posebne namene kao što su autobusi, taksi vozila, vozila hitne pomoći, policije i drugo.

### *3.1.4. Prednosti i nedostaci horizontalne signalizacije*

Horizontalna signalizacija ima posebno važnu funkciju, jer korisnicima puta pruža neophodne informacije za bezbednu vožnju. Njena prednost je u neposrednosti i kontinuitetu kojima vodi vozača i daje mu potrebne informacije za vožnju bez odvraćanja pažnje sa puta i saobraćaja koji se na njemu odvija. Horizontalna signalizacija učesnicima u saobraćaju daje jasne, razumljive i nedvosmislene informacije koje im omogućavaju blagovremene i odgovarajuće reakcije, zatim usmerava i vodi vozače i na taj način pozitivno utiče na protok saobraćaja. Takođe najavljuje mesta sa pešačkim i biciklističkim prelazimana i raznim natpisima, simbolima i drugim oznakama vozaču daje važne informacije za odvijanje saobraćaja.

Pored prednosti, horizontalna signalizacija ima i nedostatke. Jedan od najizraženijih nedostaka je potpuna, ili delimična nevidljivost oznaka horizontalne signalizacije u slučaju kada je kolovoz prekriven snegom. Njihova vidljivost može biti smanjena i zbog mokrog kolovoza, ili istrošenosti.

## 3.2. Vertikalna signalizacija

Drugu celinu statičkih sredstava i uređaja za regulisanje saobraćaja čini vertikalna signalizacija. Vertikalna signalizacija predstavlja skup posebno kodiranih oznaka, koje se realizuju u vidu različitih saobraćajnih znakova, postavljenih u vertikalnoj ravni u odnosu na saobraćajne površine, radi pružanja potrebnih informacija učesnicima u saobraćaju. Saobraćajni znakovi su osnovni elementi vertikalne signalizacije koji omogućavaju orjentisanje, usmeravanje i kanalisanje učesnika u saobraćaju prema unapred definisanom režimu saobraćaja na putnoj mreži.

Vertikalna signalizacija se najčešće deli prema funkciji znakova, prema njihovom značenju, stepenu standardizacije i načinu izrade, kao i prema stalnosti informacija na znakovima. Podela prema značenju je najpoznatija i najraširenija i često se označava kao osnovna podela saobraćajnih

znakova. Podela prema značenju, koja je definisana Pravilnikom o saobraćajnoj signalizaciji, obuhvata četiri grupe saobraćajnih znakova i to:

- saobraćajni znakovi opasnosti (grupa I),
- saobraćajni znakovi izričitih naredbi, zabrana, ograničenja i obaveza (grupa II),
- saobraćajni znakovi obaveštenja (grupa III) i
- dopunske table (grupa IV).

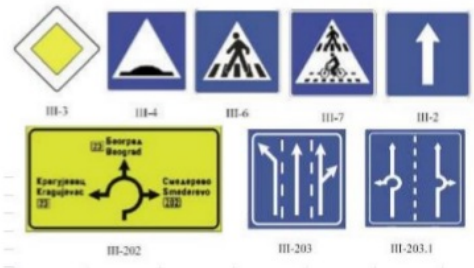
Saobraćajni znakovi postavljaju se sa desne strane puta pored kolovoza u smeru kretanja vozila. Na slici 23. prikazano je po nekoliko saobraćajnih znakova[13], iz svake grupe, koji se najčešće koriste na raskrsnicama. Dopunske table obično se postavljaju ispod donje ivice odgovarajućeg saobraćajnog znaka prve, druge ili treće grupe i na taj način bliže određuje njegovo značenje.



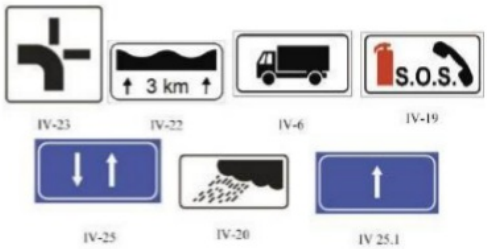
saobraćajni znakovi I grupe




saobraćajni znakovi II grupe



saobraćajni znakovi III grupe




saobraćajni znakovi IV grupe

Slika 23. *Saobraćajni znakovi koji se najčešće koriste na raskrsnicama [13]*

Ne ulazeći detaljnije u problematiku koja je vezana za podelu vertikalne signalizacije prema ostalim kriterijumima, ovde se samo ukazaje na činjenicu da se danas uglavnom koristi vertikalna signalizacija sa stalnim sadržajem, odnosno saobraćajni znakovi čije se značenje ne menja od momenta postavljanja do ukidanja. Međutim na pojedinim mestima saobraćajne mreže primenjuje se i vertikalna signalizacija sa izmenljivim sadržajem, pri čemu je na jednoj signalnoj poziciji moguće menjati značenje znaka u zavisnosti od zahteva saobraćaja i izabrane strategije upravljanja saobraćajem.

### *3.2.1. Znakovi obaveštenja za vođenje saobraćaja*

Vođenje saobraćaja predstavlja skup različitih saobraćajnih znakova, putokaza čija je namena da korisnicima daje potrebna obaveštenja o prostiranju putnih pravaca i/ili o rasporedu naseljenih mesta na njima. Vođenje saobraćaja može se ostvariti na više načina, ali se najčešće primenjuju dva sistema: vođenje saobraćaja po nazivima odredišta i vođenje saobraćaja po brojevima putnih

[13] Značenja saobraćajnih znakova data su u Pravilniku o saobraćajnoj signalizaciji [13].

pravaca. U primeni je najčešće kombinacija ova dva sistema. U Republici Srbiji vođenje saobraćaja isključivo po brojevima se za sada ne primenjuje.




Slika 24. *Znakovi za vođenje saobraćaja [13]*

Kada se radi o raskrsnicama u nivou, vođenje saobraćaja na putevima koji se na njima ukrštaju obuhvata četiri stepena obaveštenja korisnika: prethodno obaveštenje, obaveštenje o prestrojavanju, obaveštenje o skretanju i potvrdno obaveštenje. Zakon o bezbednosti saobraćaja Republike Srbije obavezuje vozača koji se približava određenoj raskrsnici da, u prvom stepenu, prilagodi vožnju uslovima raskrsnice a potom, u drugom stepenu, vozilom izvrši prestrojavanje i zauzimanje položaja na saobraćajnoj traci predviđenoj za prolazak kroz raskrsnicu u smeru u kojem želi nastaviti kretanje.

### 3.3. Svetlosna signalizacija

Svetlosna signalizacija, kao jedno od sredstava za regulisanje saobraćaja, pripada grupi dinamičke svetlosne signalizacije i čine je *uređaji za davanje svetlosnih signala* (semafori) koji se koriste za regulisanje saobraćaja i označavanje radova i prepreka na putu. Svetlosnoj signalizaciji pripadaju i *svetlosne oznake na putu* koje služe za obeležavanje ivice kolovoza i putnih objekata. U ovom odeljku i u sledećem poglavlju detaljnije se obrađuju semafori. O svetlosnim oznakama na putu može se više pročitati u literaturi [13].

Semafori se koriste za regulisanje [13]:

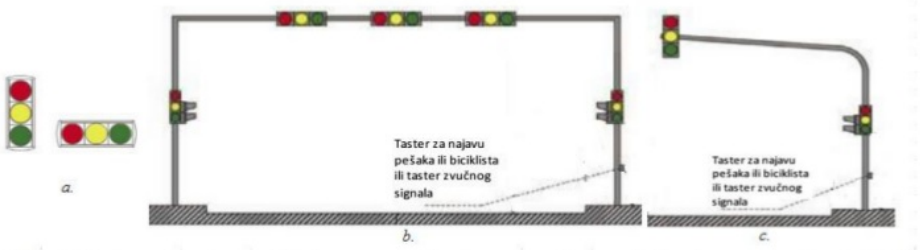
- kretanja vozila,
- kretanje pešaka,
- kretanje tramvaja,
- kretanje bicikala,
- prelaza puta preko železničke pruge u nivou i
- pristupa vozila.

U daljem tekstu opisuju se semafori kojima se reguliše kretanje vozila, pešaka, biciklista i tramvaja. Semafori emituju svetlosne saobraćajne znakove, odnosno svetla, crvene, žute, zelene i bele boje i mogu biti i sa grafičkim simbolima koji dodatno objašnjavaju, odnosno definišu na koju kategoriju korisnika se odnosi svetlosni signalni pojam. Izvori svetlosnih boja montirani su u posebnom kućištu (lanterna) koje je postavljeno i učvršćeno na odgovajućem nosaču. Na slici 25a prikazane su vozačka i pešačka lanterna i odgovarajuće oznake svetlosne signalizacije.




Slika 25a. *Vozačka i pešačka lanterna i svetlosne oznake.[23]*

Kretanje vozila reguliše se semaforima sa tri boje svetla u obliku kruga. Svetla se postavljaju po vertikalnoj osi, jedno ispod drugog, redom: crveno gore, žuto u sredini i zeleno dole, a ako je semafor postavljen iznad saobraćajne trake, svetla mogu biti postavljena horizontalno jedno pored drugog redom: crveno levo, žuto u sredini i zeleno desno (slika 25.).




Slika 25. *Semafori sa tri boje postavljeni po vertikalnoj i horizontalnoj osi [13]*

Na semaforu sa tri boje svetla, promena boja obavlja se redom: zelena → žuta → crvena → žuta istovremeno sa crvenom → zelena. Za vreme trajanja zelenog svetla opslužuje se odgovarajuća kombinacija, odnosno grupa saobraćajnih tokova, najčešće beskonfliktnih, ili sa tipom konflikta koji je upravljački prihvatljiv. Ovo vreme naziva se faza, ili signalno stanje svetlosnih uređaja raskrsnice.

Semaforima sa tri boje svetla i sa grafičkim simbolom jedne, ili dve strelice (slika 26., pod *a*.) reguliše se kretanje vozila po smerovima na raskrsnici [23]. Na pojedinim mestima semafori sa tri boje svetla imaju dodatni svetlosni saobraćajni znak u obliku zelene strelice (slika 26., pod *b*.) koji se postavlja sa odgovarajuće strane semafora u visini na kojoj se nalazi zeleno svetlo [9].



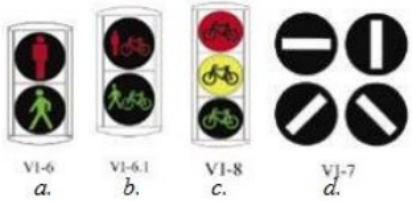

Slika 26. *Semafori sa grafičkim simbolima (a.) i sa dodatnim svetlosnim znakom (b.)[13]*

Za regulisanje kretanja vozila po saobraćajnim trakama koriste se svetlosni saobraćajni znakovi sa simbolima crvene, zelene i žute boje na tamnoj podlozi (slika 27., pod *a*.). Znakovi se postavljaju iznad svih saobraćajnih traka tako da se odgovarajući simbol nalazi iznad trake na koju se odnosi. Ispred semafora sa tri boje svetla često se postavljaju semafori za regulisanje brzine kreatanja vozila (slika 27., pod *b*.), koji preporučuju brzine kojom vozilo treba da se kreće da bi na trobojnom semaforu imalo slobodan prolaz

Semafori za regulisanje kretanja pešaka i biciklista (slika 28, pod *a*. i *b*.) imaju dve boje svetla, crveno i zeleno.



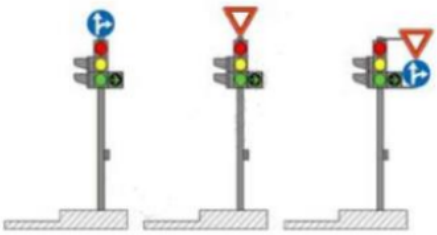

Slika 27. *Svetlosni saobraćajni znakovi za regulisanje kretanja po saobraćajnim trakama [13]*




Slika 28. *Semafori za regulisanje kretanja pešaka, biciklista i tramvaja [13]*

Svetla mogu biti postavljena u vertikalnoj, ili horizontalnoj osi. U vertikalnoj osi svetla su postavljena jedno ispod drugog, (crveno gore, zeleno svetlo dole), dok su, u slučaju horizontalnog postavljenja, jedno pored drugog, (crveno levo, a zeleno svetlo desno). Kretanje bicikala i mopeda po biciklističkim trakama može se regulisati upotrebom semafora sa 11 boje svetla koja se postavljaju po vertikalnoj osi jedno ispod drugog (slika 28., pod *c*.). Za regulisanje kretanja tramvaja koriste se semafori za davanje svetla bele boje oblika položene, uspravne i kose crte na tamnoj pozadini (slika 28., pod *d*.).

Semafori se postavljaju pored i iznad kolovoza. Osnovni semafor za regulisanje kretanja vozila postavlja se na prilazu raskrsnici, pored kolovoza, na nosač sa desne strane u smeru kretanja vozila, na visini od 2.2 m do 2.5 m. Semafori koji se postavljaju iznad kolovoza postavljaju se na visini od 4.5 m do 6 m [13]. Ako je potrebno da se na raskrsnicama, pored semafora, postave i saobraćajni znakovi učvršćeni na nosačima semafora, onda se to realizuje na način prikazan na slici 29. Raskrsnice na kojima se saobraćaj reguliše svetlosnom signalizacijom[14] obično se, u literaturi i u praksi, kao što je već istaknuto, nazivaju semaforizovane, ili svetlosno signalisane raskrsnice.



Slika 29. *Saobraćajni znakovi na nosačima semafora [7]*

### *3.3.1. Kriterijumi za uvođenje svetlosnih signala na raskrsnicama*

Dugo vremena se, nakon pojave i instalacije semafora sa tri boje svetla, smatralo da je uvođenje svetlosnih signala na raskrsnicama obavezno i da predstavlja rešenje za sve saobraćajne probleme. Polazeći od takvog shvatanja, često se događalo da su svetlosni signali, instalisani na raskrsnicama bez dovoljnog opravdanja, doveli do pogoršanja saobraćaja, što se je manifestovalo kroz duže zadržavanje vozila, zagušenja i slično.

Da bi se uvela svetlosna signalizacija na određenoj raskrsnici, ili delu putne mreže, potrebno je da budu zadovoljeni određeni preduslovi. Preduslovi su definisani, sistematizovani i sadržani u kriterijumima za uvođenje svetlosne signalizacije. Kriterijumi su različiti, zavisno od specifičnosti lokacije raskrsnice i karaktera saobraćajnih tokova koji se na njoj odvijaju. U praksi se najčešće primenjuju sledeći kriterijumi: *protok i vremenski gubici*, *broj zaustavljanja, kapacitet raskrsnice, potrošnja goriva, troškovi eksploatacije, bezbednost sobraćaja, ekološki kriterijumi* i drugi. Kriterijum protoka i vremenskih gubitaka je osnovni kriterijum za uvođenje svetlosne signalizacija i obuhvata tri vrste kriterijuma i to [9]:

- kriterijum protoka vozila na glavnom i sporednom pravcu,
- kriterijum prekidanja glavnog toka, i
- kriterijum protoka pešaka.

U tabelama 4. i 5., kao primer, prikazani su podaci za kriterijum protoka vozila na glavnom i sporednom prilazu i kriterijum protoka pešaka. Navedeni kriterijumi definisani su američkim

[14] Trajanje žutog svetla na semaforu iznosi tri sekunde za brzine do 60 km/h, odnosno četiri sekunde za brzine veće od 60 km/h. Žuto svetlo zajedno sa crvenim traje dve sekunde. U slučaju da se na kraju zelenog svetlosnog pojma koristi trepćuće svetlo, ono mora trajati četiri sekunde tako da naizmenični intervali uključeno-isključeno traju po 0,5 sekundi [13].

standardima, ali se koriste i u Republici Srbiji. Referentne vrednosti ovih kriterijuma razlikuju se, zavisno od zemalja u kojima se primenjuju.

Tabela 4. *Kriterijum protoka vozila na glavnom i sporednom pravcu [9]*

| Broj traka po prilazu | | Minimalni protok u glavnoj ulici (voz/h) | Minimalni protok u sporednoj ulici u jednom, opterećenijem smeru (voz/h) | Napomena |
|---|---|---|---|---|
| Glavna ulica | Sporedna ulica | | | |
| 1 | 1 | 500 | 150 | > 8 h neprekidno |
| 2 ili više | 1 | 600 | 150 | > 8 h |
| 2 ili više | 2 ili više | 600 | 200 | > 8 h |
| 1 | 2 ili više | 500 | 200 | > 8 h |

Tabela 5. *Kriterijum protoka pešaka [9]*

| | | Minimalni protok u glavnoj ulici u oba smera (voz/h) | | Minimalni protok pešaka na opterećenijem pešačkom prelazu (peš/h) |
|---|---|---|---|---|
| | | Sa razdel.ostrvom | Bez razdel.ostrva | |
| Škola u blizini | Da | | 800 | 250 |
| | Ne | 1000 | | 150 |
| | Ne | | 600 | 150 |

Ne ulazeći u detaljnije opisivanje preostalih kriterijuma ovde je potrebno naglasiti da se smatra, kada je reč o kriterijumu bezbednosti, da je potrebno uvesti svetlosne signale na raskrsnici ako je broj saobraćajnih nezgoda na njoj jednak, ili veći od pet na godišnjem nivou.

### *3.3.2. Prednosti i nedostaci svetlosne signalizacije*

Primena svetlosne signalizacije u regulisanju drumskog saobraćaja ima određene prednosti u odnosu na ostale vrste regulisanja, ali i nedostatke. Pozitivni efekti primene svetlosne signalizacije na raskrsnicama i na ostalim delovima putne mreže ogledaju se u boljem iskorišćenju kapaciteta ulične i putne mreže, smanjenju vremena ukupnog čekanja na mreži, smanjenju broja zaustavljanja, povećanju bezbednosti učesnika u saobraćaju, mogućnosti promene režima kretanja i davanja prioriteta pojedinim učesnicima u saobraćajnom toku i drugi. U lokalnom, linijskom i zonskom regulisanju saobraćaja, primena svetlosnih signala značajno doprinosi poboljšanju uslova kretanja saobraćajnih tokova i fleksibilnijem upravljanju saobraćajem. Svetlosni signali integrisani sa ostalim informacionim i drugim tehnologijama doprinose razrešavanju problema između sve većih zahteva u okviru drumskog saobraćaja i mogućnosti njegovog regulisanja.

Pored nevedenih prednosti, svetlosna signalizacija ima i određene nedostatke. Jedan od naročito izraženih nedostataka ogleda se u neophodnosti kontinuiranog praćenja i kontrole rada elemenata svetlosne signalizacije i u visokim troškovima redovnog preventivnog i prediktivnog održavanja. Naime, pošto je svetlosna signalizacija namenjena javnoj upotrebi i pošto se veći deo njenih komponenata nalazi na otvorenim javnim površinama, ona je izložena uticaju različitih atmosferskih uslova, neovlašćenom otuđenju i oštećenjima, saobraćajnim nezgodama i drugim faktorima koji mogu ugroziti njenu celovitost i funkcionalnost. To zahteva praćenje, stalnu kotrolu rada i u slučaju oštećenja, dotrajalosti, ili otuđenja, njenu zamenu. Sa druge strane, tehnologija, koja je u osnovi komponeneta svetlosne signalizacije uglavnom elektronske prirode, nameće stalnu potrebu za njenim stalnim usavršavanjem kako bi bila prilagođena savremenim strategijama upravljanja saobraćajem, što takođe zahteva da se, zbog tehnološkog zastarevanja, češće vrši njena zamena.

# 4. UPOTREBA SAOBRAĆAJNE SIGNALIZACIJE I NAČINI REGULISANJA SAOBRAĆAJA NA POVRŠINSKIM RAKRSNICAMA

Regulisanje saobraćaja i saobraćajnih tokova na drumskim saobraćajnicama delimično i u opštim crtama, obrađeno je u prvom poglavlju disertacije. Posebno je naglašeno da je regulisanje drumskog saobraćaja veoma složena funkcija i da njena složenost proizilazi iz heterogenosti i složenosti mreža drumskih saobraćajnica na kojima se reguliše saobraćaj i složenosti saobraćajnih tokova koji se javljaju na putnoj i uličnoj mreži i njenim elementima. Za realizaciju ove funkcije koriste se: *propisi na osnovu kojih se reguliše saobraćaj*, *sredstva i uređaji za regulisanje saobraćaja* i *organi za regulisanje i kontrolu saobraćaja*. U prethodnom poglavlju detaljno su opisani elementi, prednosti i nedostaci sredstava i uređaja, odnosno horizontalne, vertikalne i svetlosne signalizacije za regulisanje saobraćaja. U ovom poglavlju detatljnije se opisuju načini korišćenja horizontalne i vertikalne signalizacije, sa posebnim osvrtom na sadržaje i elemente metoda koje se odnose na regulisanje saobraćaja na površinskim raskrsnicama. Upotreba svetlosne signalizacije obrađena je u posebnom delu ovog poglavlja.

Zahvaljujući činjenici da učesnicima u saobraćaju pruža jasne, razumljive i nedvosmislene informacije koje im omogućavaju blagovremene reakcije, horizontalna signalizacija se u savremenoj regulaciji saobraćaja nametnula kao veoma značajno i upotrebljivo sredstvo za regulisanje drumskog saobraćaja. Uz upotrebu oznaka na kolovozu, horizontalna signalizacija može dati celovito rešenje za kontinuirano vođenje, obaveštavanje, naređivanje i razdvajanje tokova, čime se potpuno otklanja mogućnost zabune učesnika u saobraćaju. Zbog toga se često ističe da ona predstavlja jednu od najvažnijih komponenti saobraćajne opreme.

Osnovne funkcije horizontalne signalizacije su:

- prostorno definisanje namene saobraćajnih površina,
- vođenje i usmeravanje saobraćajnih tokova u područjima raskrsnica na putnoj i uličnoj mreži,
- označavanje ivica kolovoza i razdelnih ostrva,
- prenos pisanih informacija i
- označavanje pojedinih saobraćajnih znakova na kolovozu.

Kada je reč o upotrebi horizontalne signalizacije za označavanje i definisanje namene saobraćajnih površina u područjima raskrsnica, ona se realizuje označavanjem pešačkih prelaza (slika 30., pod *a*. i slika 31., pod *b*.), saobraćajnih ostrva za pešake (slika 31., pod *b*.), usmeravajućih ostrva za motorizovane učesnike (slika 31., *c*.) i druge. Na delovima putne mreže van raskrsnica horizontalna signalizacija se koristi za označavanje saobraćajne trake rezervisane za vozila javnog prevoza putnika (slika 30., pod *b*.), za označavanje biciklističkih staza (slika 30., pod *c*.) i drugo.



*a*. *b*. *c*.

Slika 30. *Definisanje namene saobraćajnih površina upotrebom horizontalne signalizacije [24]*
*a. Pešački prelazi, trake za prestojavanje, zaustavna linija*
*b. Saobraćajna traka rezervisana za kretanje vozila javnog prevoza putnika*
*c. Biciklistička staza*

Deo horizontalne signalizacije, čija je funkcija vođenje i usmeravanje saobraćaja na raskrsnicama, realizuje se označavanjem saobraćajnih traka na prilazima namenjenih za prestrojavanje vozila koja skreću levo, ili desno (slike 30. i 31., pod *a*.), obeležavanjem linija vodilja (slika 31., pod *a*.), polja za usmeravanje saobraćaja (slika 31., pod *b*.) i drugo. Na slici 32. prikazana su tri saobraćajna znaka na kolovozu, u području raskrsnice, čije je označavanje realizovano upotrebom horizontalne signalizacije.



*a*. *b*. *c*.

Slika 31. *Vođenje i usmeravanje saobraćajnih tokova u područjima raskrsnica [24]*




*a*. *b*. *c*.

Slika 32. *Označavanje pojedinih saobraćajnih znakova na kolovozu [24]*

Osnovne funkcije vertikalne signalizacije, kao jedno od tehničkih sredstava za regulisanje i upravljane saobraćajnim tokovima, je kanalisanje i usmeravanje kretanja prema unapred definisanom režimu saobraćaja i omogućavanje orjentisanja učesnika u saobraćaju na putnoj mreži. Navedene funkcije realizuju se upotrebom saobraćajnih znakova. Podela, značenja i način postavljanja saobraćajnih znakova utvrđeni su odgovarajućim podzakonskim aktima, u Republici Srbiji podzakonski akt koji reguliše ovu materiju je Pravilnik o saobraćajnoj signalizaciji.

Kada je reč o regulisanju saobraćaja na raskrsnicama upotrebom vertikalne signalizacije, u disertaciji su detaljnije obrađeni oni segmenti koji se odnose na nesignalisane prioritetne raskrsnice. Na ovim raskrsnicama pravo prvenstva prolaska reguliše se saobraćajnim znakovima (slika 33.) i opštim pravilima saobraćaja, najčešće pravilom desne ruke. U Prilogu 9. dat je pregled i ostalih saobraćajnih znakova koji se najčešće koriste u neposrednoj blizini i u područjima površinskih raskrsnica.




Slika 33. *Saobraćajni znakovi kojima se određuje redosled prvenstva prolaza na raskrsnici [13]*

Na prioritetnim raskrsnicama regulisanje saobraćaja vertikalnom signalizacijom ostvaruje se postavljanjem saobraćajnih znakova sa prvenstvom prolaza i na taj način se određuje redosled prolaza, odnosno glavni i sporedni put (slika 34.). Učesnici u saobraćaju obavezni su da postupaju u skladu sa saobraćajnim znakovima i oznakama na kolovozu.




Slika 34. *Određivanje redosleda prvenstva prolaza saobraćajnim znakovima, a. standardna i b. nestandardna prioritetna raskrsnica [25]*

Na glavnom putu ispred raskrsnice (slika 34.) postavlja se saobraćajni znak "Put sa prvenstvom prolaza" (slika 33.) kojim se vozači obaveštavaju da se nalaze na glavnom putu, odnosno da u toj raskrsnici imaju prednost prolaska u odnosu na vozila koja dolaze sa bočnih puteva. Na sporednim putevima ispred raskrsnice se postavlja saobraćajni znak "Obavezno zaustavljanje" ili "Ustupanje prvenstva prolaza" (slika 33.) koji upozorava vozače da nailaze na raskrsnicu sa glavnim putem i da moraju propustiti sva vozila na glavnom putu, odnosno da ne smeju vozilima stupiti na glavni put sve dok se njime kreću vozila koja bi oni svojim ulaskom u raskrsnicu ometali i ugrozili njihovo bezbedno kretanje. Na glavnom putu na raskrsnici može se postaviti jedan od saobraćajnih znakova opasnosti (slika 35.), na rastojanju od 150 m do 250 m ispred raskrsnice, koji upozorava vozače da nailaze na ukrštanje sa sporednim putem [13]. Ovi znakovi označavaju blizinu ukrštanja odnosno spajanja puteva na kojim se put sa prvenstvom prolaza ukršta odnosno spaja sa sporednim putem. Simboli na znakovima mogu biti različiti što zavisi od stvarne situacije na putu. Ovi znakovi postavljaju se samo ako je na sporednom putu, koji se ukršta odnosno spaja sa putem sa prvenstvom prolaza ispred ukrštanja odnosno spajanja postavljen saobraćajni znak „Ustupanje prvenstva prolaza" ili znak „Obavezno zaustavljanje".




Slika 35. *Saobraćajni znakovi koji upozoavaju vozače da nailaze na ukrštanje sa sporednim putem*

U raskrsnici sa kružnim tokom, gde se spajaju dva, ili više puteva, saobraćaj se reguliše saobraćajnom signalizacijom, ili pravilom desne strane. Najefikasniji način regulisanja saobraćaja vrši se tako što se prednost prolaska daje vozilima koja se nalaze u kružnom toku (slika 36.). Na taj način omogućava se brzo rasterećenje raskrsnice. Na ulazu u raskrsnicu postavlja se saobraćajni znak „Ustupanje prvenstva prolaza" i znak "Kružni tok saobraćaja" (slika 37.). Vozila koja ulaze u kružni tok moraju ustupiti prednost prolaska vozilima koja se već nalaze u kružnom toku

saobraćaja. Postoje raskrsnice sa kružnim tokom saobraćaja koje su regulisane na taj način da se prednost prolaska određuje na osnovu "pravila desne strane". Kod ovih raskrsnica ni na jednom pristupnom pravcu prema kružnom toku ne postavlja se saobraćajni znak „Ustupanje prvenstva prolaza". Ispred kružne raskrsnice, na udaljenosti između 150 m i 250 m, postavlja se znak "Raskrsnica sa kružnim tokom saobraćaja" (slika 37.), kojim se vozači obaveštavaju o nailasku na raskrsnicu [13].



Slika 36. *Regulisanje saobraćaja na kružnoj raskrsnici vertikalnom i horizontalnom signalizacijom [25]*




Slika 37. *Saobraćajni znakovi kojima se reguliše saobraćaj na kružnim raskrsnicama*

Regulisanje saobraćaja na raskrsnicama, gde se ukrštaju putevi od kojih nijedan nije put sa prvenstvom prolaza, realizuje se "pravilom desne ruke", ili horizontalnom i svetlosnom signalizacijom.

### 4.1. Svetlosno signalisana raskrsnica

Površinska raskrsnica na kojoj se regulisanje saobraćaja obavlja upotrebom semafora često se, u praksi i literaturi, naziva svetlosno signalisana, ili semaforizovana raskrsnica. Na njoj su, na odgovarajućim nosačima, montirani semafori koji emituju svetlosne saobraćajne znakove, ili signale zelene, žute i crvene, a u slučaju da se radi o regulisanju kretanja šinskih vozila, i bele boje. Svetlosni signali imaju zadatak da regulišu saobraćajne tokove po principu da u jednom periodu vremena na raskrsnici opslužuju vozila (omoguće prolaz kroz raskrsnicu) jedne grupe bezkonfliktih, ili konfliktno kompatibilnih, dok se za to isto vreme prikupljaju vozila druge grupe tokova, a zatim u narednom periodu, koji može biti isti, ili ne kao prethodni, opslužuju vozila druge grupe nakon čega se proces ponavlja. 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 zaštitnog vremena[15]. Način rada svetlosnih signala, po pravilu, formuliše se u obliku signalnog plana i plana tempiranja signala. Signalni plan predstavlja jednoznačan plan opsluživanja svih tokova, gde su oni grupisani u okviru faza, ili stanja. Faza (signalno stanje) je vreme tokom koga se opslužuje odgovarajuća kombinacija, odnosno grupa saobraćajnih tokova, najčešće beskonfliktnih, ili sa "lakšim" tipom konflikta koji je upravljački prihvatljiv. Konfliktna kretanja se opslužuju u različitim fazama, odnosno vremenski razdvojenim intervalima. Redosled i trajanje pojedinih intervala "zelenog svetla" pridruženih fazama predstavljaju izlazne rezultate proračuna rada signala. Vreme koje protekne između dva uzastopna početka iste faze, ili vreme od početka paljenja jedne kombinacije signalnih pojmova do ponovnog paljenja iste kombinacije, predstavlja *ciklus semaforizovane raskrsnice*. Maksimalna

[15] Detaljnije o zaštitnom vremenu u Prilogu 10.

preporučena vrednost trajanja ciklusa je 120 s [26]. U toku jednog ciklusa realizuju se sve faze koje ciklus obuhvata. Osnovni problem koji je potrebno razrešiti, kada se radi o izolovanim svetlosno signalisanim raskrsnicama, je proračun i optimizacija signalnog plana što podrazumeva određivanje vremena trajanja ciklusa i broja faza i određivanje delova raspoloživog zelenog vremena svakoj fazi.

Za određivanje vrednosti trajanja ciklusa i pojedinačnih faza u ciklusu, odnosno proračuna signalnog plana raskrsnice postoje više metoda, ali se danas najviše koristi Webster-ova metoda. Ona se uglavnom primenjuje za proračun rada semafora na pojedinačnim, izolovanim raskrsnicama. Polazna tačka Webster-ovog modela proračuna signalnog plana je izraz za vremenske gubitke vozila na prilazima signalisane raskrsnice (prvo poglavlje, odeljak 1.2.2.). Prema ovom modelu vrednost trajanja ciklusa može se izračunati po formuli [27]:

$$C = \frac{1.5 \cdot L + 5}{1 - Y} \tag{18}$$

gde veličina $L$ - predstavlja ukupno izgubljeno, odnosno neiskorišćeno vreme na raskrsnici tokom ciklusa i određuje se na osnovu relacije:

$$L = n \cdot d + \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \tag{19}$$

gde su $n$ – broj faza signalnog plana, $d$ – prosečni gubici vremena po vozilu tokom „zelene faze“ i $\Delta t_i$ – zaštitno vreme (ili svecrveno vreme) između faze „ i“ i naredne faze. Veličina $Y$ – predstavlja koeficijent iskorišćenja kapaciteta raskrsnice i određuje se po relaciji:

$$Y = \sum_{i=1}^{n} Y_i \tag{20}$$

pri čemu je $Y_i = max_j\{y_j(i)\} = max_j(q_i / S_i)$ i $y_i = q_i / S_i$ - koeficijent iskorišćenja $i$-te saobraćajne trake. Dužina trajanja $i$-te faze („zeleno vreme“ ) može se izračunati po relaciji:

$$g_i = \frac{Y_i}{Y} \cdot (C - L) \tag{21}$$

Veličine $C$, $L$ i $g_i$ - izražavaju se u sekundama.

U zavisnosti od toga kako se *odvijaju leva skretanja vozila na semaforizovanoj raskrsnici* moguća su tri tipa signalnih planova i to [9], [12]:

- tip A: leva skretanja se opslužuju istovremeno (u istoj fazi) sa prioritetnim tokom pravo (dozvoljena leva skretanja). Ovo je najčešći slučaj kod dvofaznog signalnog plana,
- tip B: u jednom delu ciklusa tokovi pravo odvijaju se zajedno sa konfliktnim levim skretanjima, a u drugom delu leva skretanja su zaštićena i
- tip C: tokom celog ciklusa nema konflikata između toka pravo i levih skretanja iz suprotnog smera (zaštićena leva skretanja), odnosno tokovi pravo i tokovi levo opslužuju se u različitim fazama, što je karakteristično za višefazne signalne planove sa zaštićenim levim skretanjima.

Učesnici saobraćaja na putnoj mreži su, između ostalih, i pešaci. Pešaci su najčešći, najsporiji i najmanje zaštićeni učesnici u saobraćaju. Njihovo individualno ponašanje zahteva posebnu zaštitu, naročito u urbanim sredinama gde se njihovi smerovi kretanja prepliću sa drugim učesnicima u saobraćaju. Pešački tokovi imaju značajan uticaj na semaforizovanu raskrsnicu u pogledu njenog kapaciteta i bezbednosti saobraćaja na njoj. Pešački prelaz u području raskrsnice, kao mesto gde se ukrštaju tokovi vozila i pešaka, može biti različitih dimenzija koje zavise od više faktora. Što su pešački prelazi duži, ili što su udaljeniji od raskrsnice, povećava se vreme trajanja ciklusa kako bi

se obezbedilo zaštitno vreme između vozila i pešaka, ali povećanje ciklusa može izazvati i veće vremenske gubitke i ugroziti nivo usluge rasksrsnice. Sve to ukazuje na potrebu detaljne analize karakteristika pešačkih tokova na svetlosno signalisanim raskrsnicama kao jednog od uslova poboljšanja strategije upravljanja svetlosnim signalima.

Pešački tokovi mogu biti opsluženi zajedno sa tokovima vozila (eng: *The two-way crossing signal plane*), ili im može biti dodeljena posebna faza (eng: *The scramble crossing signal plane*). Svaki od ovih načina ima svoje prednosti i nedostatke. Danas se u praksi najviše koristi prvi način koji podrazumeva opsluživanje pešačkih tokova zajedno sa tokovima vozila. Međutim, kada se radi o raskrsnicama sa veoma intenzivnim tokovima vozila i pešaka, ovaj način opsluživanja nije preporučljiv. Na takvim semaforizovanim raskrsnicama, drugi način opsluživanja je znatno efikasniji, posebno ako su naročito izražena i desna skretanja.

### *4.1.1. Proračun signalnog plana, fazni plan i plan tempiranja signala*

Signalni plan u osnovi predstavlja način rada svetlosnih signala na semaforizovanoj raskrsnici. Signalni plan jednoznačno određuje opsluživanje svih saobraćajnih tokova koji su grupisani u odgovarajuće faze. Proračun signalnog plana obuhvata nekoliko koraka i to:

- izbor tipa signalnog plana,
- određivanje operativnog toka za svaku saobraćajnu traku,
- izračunavanje zasićenog toka za svaku saobraćajnu traku,
- izračunavanje koeficijenta iskorišćenja za svaku saobraćajnu traku,
- određivanje zaštitnog vremena izmedu susednih faza,
- određivanje zaštitnog vremena pešaka,
- izračunavanje ukupnih vremenskih gubitaka na raskrsnici,
- izračunavanje trajanja ciklusa i
- izračunavanje trajanja svake pojedinačne faze.

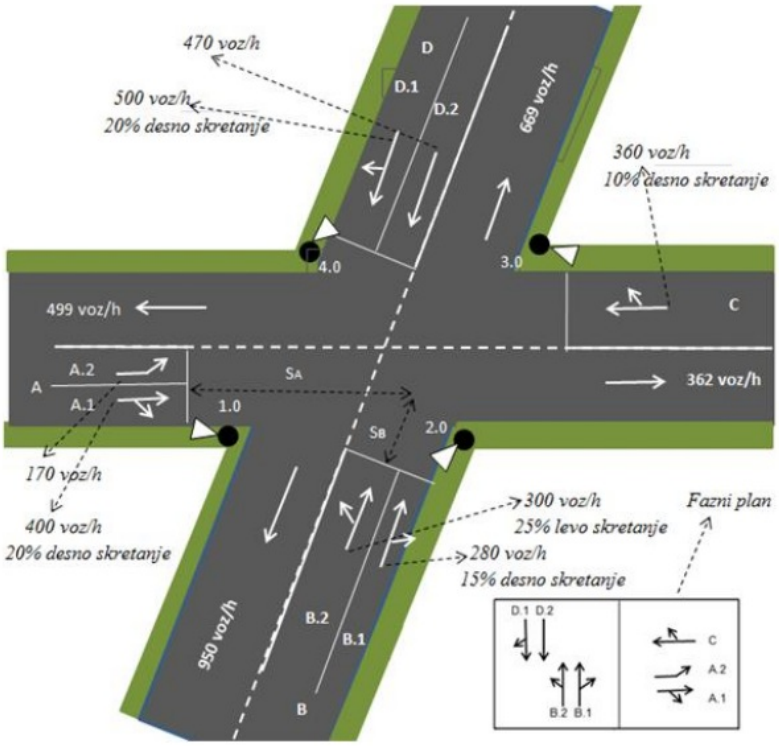
Na osnovu dobijenih rezultata proračuna izrađuje se fazni plan i plan tempiranja signala. Fazni plan je grafički prikaz distribucije tokova po grupama saobraćajnih traka u okviru jedne faze, dok je plan tempiranja konačna formulacija upravljanja, gde se za svaki svetlosni uređaj daje grafički prikaz vremenskih koordinata svih signalnih pojmova. Na primeru koji sledi ilustrovan je način proračuna signalog plana i grafički prikaz distribucije tokova (fazni plan) i plana tempiranja signala semaforizovane raskrsnice. Protoci vozila na prilazima raskrsnici označeni su slovima A, B, C, D,... , u okviru pojedinih saobraćajnih traka simbolima A.1, A.2, B.1, B.2, B.3 itd, a pešački protoci malim slovima a, b, c, d itd.

*Primer 1.*

Na slici 38. prikazana je četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa protocima vozila na prilazima i po saobraćajnim trakama i ostalim njenim elementima. Neka su prosečni gubici vremena po vozilu na raskrsnici u toku „zelenog“ dela faze d = 4 s/voz, $S_A$ = 48 m i $S_B$ = 48 m. Raskrsnica je bez pešačkih tokova i locirana je u gradu sa preko 300.000 stanovnika. Izvršiti proračun signalnog plana (odrediti dužinu trajanja ciklusa, i pojedinačnih faza), odrediti fazni plan i pikazati plan tempiranja signala.

- tip signalnog plana: tip A – leva skretanja opslužuju se u istoj fazi sa prioritetnim tokom pravo, ciklus ima dve faze,
- vrednosti operativnih tokova za svaku saobraćajnu traku određeni su na osnovu priloženih tabela u Prilogu 8,
- vrednosti zasićenih tokova za svaku saobraćajnu traku izračunati su na osnovu relacije date u Prilogu 9. Pri tome su za sve trake redukcioni faktori $f_1$, $f_3$ i $f_4$ jednaki jedinici, dok je faktor $f_2$

jednak *0.94* za trake D.1 i D.2, 0.6 za traku A.2, *0,51* za traku B.2 i *0,9* za traku C, a za ostale $f_2$ = 1. Izračunate vrednosti zasićenih tokova prikazane su u Tabeli 6.




Slika 38. *Semaforizovana raskrsnica sa tokovima vozila*

Tabela 6. *Vrednosti tokova vozila i zasićenih tokova saobraćajnih traka raskrsnice sa slike 38.*

| | *Faza I* | | *Faza II* | | *Faza I* | | *Faza II* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Traka* | D.1 | D.2 | A.1 | A.2 | B.1 | B.2 | C |
| $q_i$ | 500 | 470 | 400 | 170 | 280 | 300 | 360 |
| $S_i$ | 1363* | 1504* | 1450 | 900* | 1490 | 729* | 1377* |
| $y_i$ | 0,37 | 0,31 | 0,28 | 0,19 | 0,19 | 0,41 | 0,26 |
| $Y_i$ | $Y_1 = 0,41$ | | $Y_2 = 0,28$ | | | | |
| Y | $Y = Y_1 + Y_2 = 0,69$ | | | | | | |

* *Vrednosti Sop korigovane redukcionim faktorom f2 - uticaj konfliktnog toka*

-vrednost koeficijenata iskorišćenja $y_i = q_i / S_i$ prikazani su Tabeli 6.

-vrednost zaštitnog vremena izračunata je na osnovu relacije date u Prilogu 9. i vrednosti rastojanja $S_A$ i $S_B$, uz pretpostavku da su $v_A$ = 30 km/h i $v_B$ = 60 km/h, i iznosi $\Delta t$ = 4s.

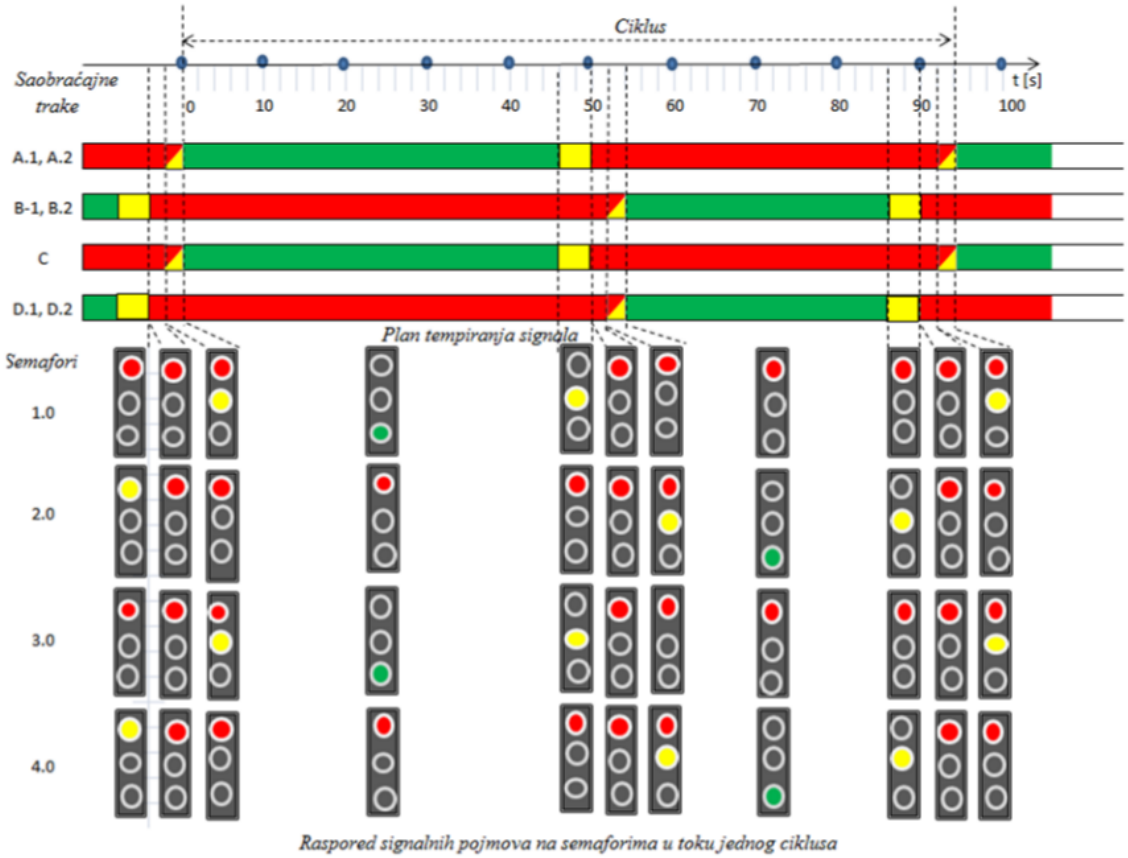
Na osnovu dobijenih podataka, prikazanih u Tabeli 6., i broja faza u ciklusu dobija se:

$$L = n \cdot d + \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i = 2 \cdot 4 \text{ s} + 4 \text{ s} + 4 \text{ s} = 16 \text{ s},$$

$$C = \frac{1.5 \cdot L + 5}{1 - Y} = \frac{1.5 \cdot 16\ s + 5\ s}{1 - 0{,}69} = 94\text{s i}$$

$$g_1 = \frac{Y_1}{Y}\cdot(C - L) = \frac{0{,}41}{0{,}69}\cdot(94\ s - 16\ s) = 46\ \text{s} \qquad g_2 = \frac{0{,}28}{0{,}69}\cdot(94\ s - 16\ s) = 32\ \text{s}$$

Fazni plan, kao grafički prikaz distribucije tokova vozila po grupama saobraćajnih traka raskrsnice sa slike 38., u okviru pojedinačnih faza, prikazan je na slici 38. Plan tempiranja signala za raskrsnicu sa slike 38. prikazana je na slici 39.




Slika 39. *Plan tempiranja signala i raspored signalnih pojmova na semaforima*

U drugom delu ovog primera posmatra se raskrsnica slična prethodnoj (slika 40.), ali se u ovom slučaju posmatraju, pored tokova vozila (protoci sa istim numeričkim vrednostima) i tokovi pešaka. Pretpostavlja se da je rastojanje od linije zausatvljanja na prilazu A do konfliktne tačke ($S_A$ = 48 m) iste dužine kao i ekvivalentno rastojanje na prilazu B ($S_B$ = 48 m) i da su dužine pešačkih prelaza na prilazima A i C ($L_{PP}'$ = 12 m) i prilazima B i D ($L_{PP}''$ = 12 m), takođe jednake. Rastojanja između pešakih prelaza su Dp' = Dp" = 54 m. Neka je intenzitet pešačkog toka na svakom pešačkom prelazu pojedinačno 100 pešaka/h ($f_1$ = 0,95). Pešački tokovi opslužuju se zajedno sa tokovima vozila. Raskrsnica je locirana u gradu sa preko 300.000 stanovnika ($f_4$ = 1), a prosečni gubici vremena po saobraćajnoj traci iznose d = 4 s. Potrebno je odrediti signalni plan i plan tempiranja signala.

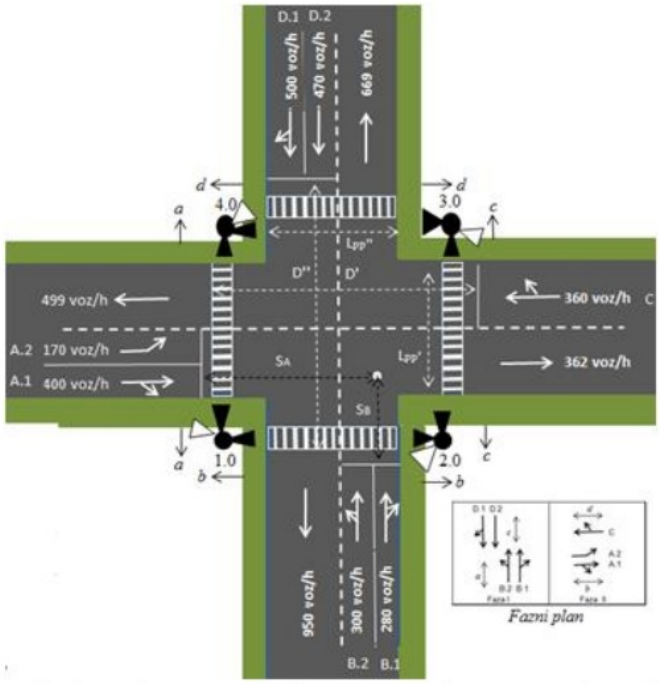
Za određivanje signalnog plana koriste se iste relacije kao i u prethodnom delu ovog primera i odgovarajuće podatke iz Tabele7.:

$$L = n\cdot d + \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i = 2\cdot 4\ \text{s} + 4\ \text{s} + 4\ \text{s} = 16\ \text{s},$$

uz napomenu da veličina L – ne uključuje zaštitna vremena za pešake (Prilog 10.)

Tabela 7. *Vrednosti tokova vozila i zasićenih tokova saobraćajnih traka raskrsnice sa slike 40.*

| | *Faza I* | | *Faza II* | | *Faza I* | | *Faza II* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Traka* | D.1 | D.2 | A.1 | A.2 | B.1 | B.2 | C |
| $q_i$ | 500 | 470 | 400 | 170 | 280 | 300 | 360 |
| $S_i$ | 1295 | 1504 | 1378 | 855 | 1416 | 693 | 1308 |
| $y_i$ | 0,39 | 0,31 | 0,29 | 0,2 | 0,2 | 0,43 | 0,28 |
| $Y_i$ | $Y_1 = 0,43$ | | $Y_2 = 0,29$ | | | | |
| $Y$ | $Y = Y_1 + Y_2 = 0,72$ | | | | | | |




Slika 40. *Semaforizovana raskrsnica sa tokovima vozila i pešaka*

$$C = \frac{1.5 \cdot L + 5}{1 - Y} = \frac{1.5 \cdot 16\ s + 5\ s}{1 - 0{,}72} = 104\text{s i}$$

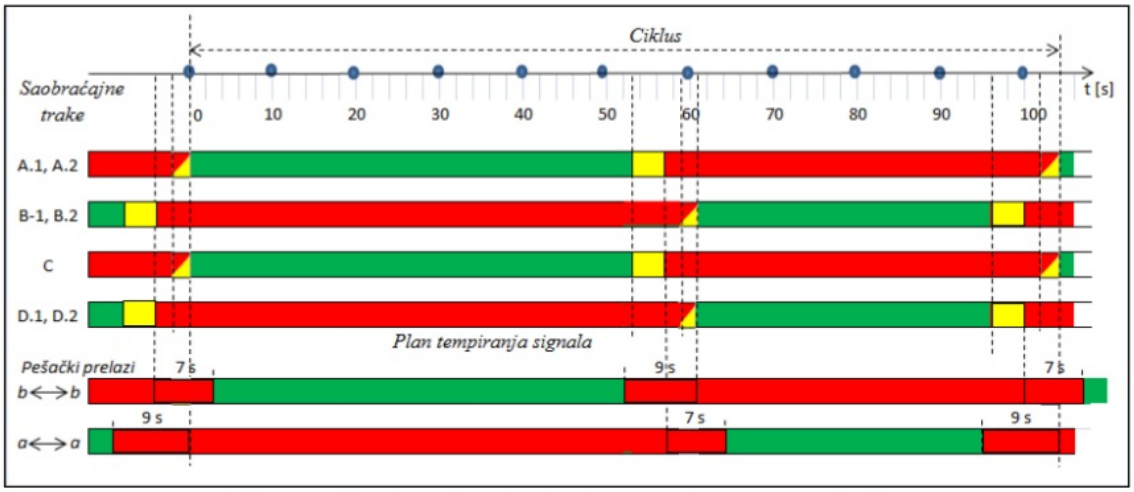
$$g_1 = \frac{Y_1}{Y} \cdot (C - L) = \frac{0{,}43}{0{,}72} \cdot (104\ s - 16\ s) = 53\ \text{s} \qquad g_2 = \frac{0{,}29}{0{,}72} \cdot (104\ s - 16\ s) = 35\ \text{s}.$$

Zaštitna vremena za pešake izračunavaju se po obrascima[16]:

$$t_{zpp} = \frac{D}{V_{min}} + 1 = \frac{54\ m}{8{,}35\ m/s} + 1 = 7\ \text{s} \quad \text{i} \quad t_{zpk} = \frac{L_{pp}}{V_p} + 1 = \frac{12\ m}{1{,}4\ m/s} + 1 = 9\ \text{s}$$

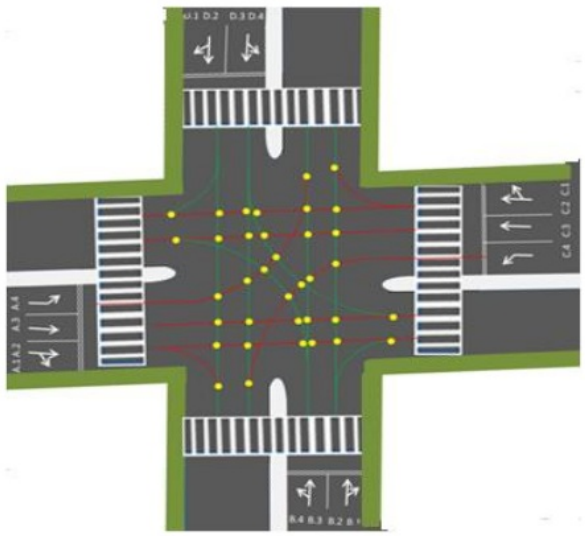
[16] Prilog 10.

Na slici 40. prikazan je i fazni plan, kao grafički prikaz distribucije tokova vozila po grupama saobračajnih traka i pešaka na raskrsnici, u okviru pojedinačnih faza. Plan tempiranja signala za ovu raskrsnicu prikazan je na slici 41.




Slika 41. *Plan tempiranja signala za raskrsnicu na slici 40.*

Da bi se pouzdano usvojila i u signalni plan ugradila odgovarajuća zaštitna vremena, neophodno je da se izračunaju sva zaština vremena između svih režimom signala razdvojenih konfliktnih tokova. Za određivanje vrednosti ovih vremena u praksi se najčešće koriste matrice zaštitnih vremena. Na slici 42. prikazana je, primera radi, proizvoljna semaforizovana raskrsnica sa razdvojenim (crveni i zeleni) konfliktnim tokovima. Konfliktne tačke označene su žutom bojom.



Slika 42. *Konfliktni saobraćajni tokovi na semaforizovanoj raskrsnici*

Radi preglednosti i jasnijeg uočavanja, zaštitna vremena zapisuju se u matricu zaštitnih vremena (slika 43.) koja je istovremeno i matrica kompatibilnosti tokova. To je kvadratna matrica gde svakom od postojećih tokova (mogu biti tokovi vozila i tokovi pešaka) na raskrsnici pripada po jedan red i po jedna kolona. U preseku redova i kolona koji pripadaju beskonfliktnim kretanjima, ili istoj fazi nema zaštitnog vremena, dok se za sve ostale preseke (slici 43, oznake "x" u matrici)

upisuju izračunata zaštitna vremena ($t_{A.1/D.2}$, $t_{A.2/D.2}$, ... $t_{C.2/D.3}$, $t_{C.2/B.2}$, itd.). Na kraju se tokovi grupišu po fazama i jasno uočavaju najveće vrednosti zaštitnih vremena, za svaku izmenu faza, sa kojima se ulazi u proračun signalnog plana i plan tempiranja signala.

| | A.1 | A.2 | A.3 | A.4 | B.1 | B.2 | B.3 | B.4 | C.1 | C.2 | C.3 | C.4 | D.1 | D.2 | D.3 | D.4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A.1 | | | | | | | | | | | | | | x | | |
| A.2 | | | | | x | x | x | x | | | | | | x | x | |
| A.3 | | | | | | x | x | x | | | | | | x | x | x |
| A.4 | | | | | | x | x | | | | | | | x | x | x |
| B.1 | | x | | | | | | | | | | | | | | |
| B.2 | | x | x | | | | | | x | x | x | x | | | | |
| B.3 | | x | x | x | | | | | | x | x | x | | | | |
| B.4 | | x | x | x | | | | | | | x | x | | | | |
| C.1 | | | | | | x | | | | | | | | | | |
| C.2 | | | | | | x | x | | | | | | x | x | x | x |
| C.3 | | | | | | x | x | x | | | | | | x | x | x |
| C.4 | | | | | | x | x | x | | | | | | | x | x |
| D.1 | | | | | | | | | | x | | | | | | |
| D.2 | x | x | x | x | | | | | | x | x | | | | | |
| D.3 | | x | x | x | | | | | | x | x | x | | | | |
| D.4 | | | x | x | | | | | | x | x | x | | | | |

Slika 43. *Matrica zaštitnih vremena za raskrsnicu sa slike 41.*

Zaštitno vreme između dve faze je veoma bitan elemenat za proračun signalnog plana. Na osnovu priloženog primera evidentno je da se u svakoj fazi signalnog plana opslužuje veći broj tokova. Tako se zaštitno vreme na prelazu između dve faze 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. Vrednost zaštitnog vremena, koja se po pravilu koristi pri proračunu signalnog plana, je najveće vreme među svim izračunatim za konkretnu izmenu faza.

# 5. INTELIGENTNA SVETLOSNO SIGNALISANA RASKRSNICA

Danas se u svetu i kod nas veliki broj gradova, zbog sve većeg broja vozila na putevima i porasta intenziteta saobraćaja, suočava sa problemima regulisanja saobraćaja, naročito na površinskim svetlosno signalisanim raskrsnicama. U skladu sa tim, preduzimane su i preduzimaju se odgovarajuće mere koje su uglavnom usmerene na najefikasnije moguće korišćenje raspoložive gradske infrastrukture.

## 5.1. Pregled literature i analiza sadržaja naučnih radova koji obrađuju problematiku semaforizovanih raskrsnica

Problem upravljanja radom izolovane površinske raskrsnice bio je i još uvek je jedan od najznačajnijih problema u oblasti saobraćajnog inženjerstva. Njegova složena struktura i važnost su predmet mnogobrojnih istraživanja u kojima istraživači svojim pristupima doprinose rešenju i poboljšanju već postojećih rešenja upravljanja radom površinskih raskrsnica. Procena efekata rada semaforizovane raskrsnice kao složenog sistema vrši se, kao što je izneto u delu 1.2.2.4., na osnovu kriterijuma (objektivna funkcija) koji se mogu svrstati u pet grupa i to [12], [28]:

- primarna grupa kriterijima: vremenski gubici vozila, ukupan broj zaustavljanja, dužina reda čekanja i drugi,
- bezbednosni kriterijumi: broj konfliktnih tačaka i saobraćajnih nezgoda,
- ekonomski kriterijumi: potrošnja goriva i troškovi eksploatacije uređaja za regulisanje saobraćaja,
- grupa ekoloških kriterijuma: zagađenje vazduha, buka, narušavanje okolnog prostora i
- korisnički kriterijumi: zadovoljstvo korisnika (vozači, pešaci, putnici, opštinski i drugi organi vlasti) koji su u vezi sa radom i korišćenjem semaforizovane raskrsnice.

Tokom proteklih nekoliko decenija, upravljanje radom semaforizovane raskrsnice, bilo je predmet analiza i istraživanja velikog broja istraživača. Vremenski gubici vozila, broj zaustavljanja, bezbednosni kriterijumi, ekonomski i ekološki kriterijumi najčešće su se koristili kao objektivne funkcije koje su učestvovale u optimizaciji odgovarajućih parametara svetlosno signalisane raskrsnice.

Cilj istraživanja u okviru ove disertacije je detaljna analiza saobraćaja u oblasti raskrsnice, posebno semaforizovane, i utvrđivanje predloga rešenja za poboljšanje uslova odvijanja saobraćaja sa funkcionalnog, ekonomskog i ekološkog aspekta. Poboljšanje uslova odvijanja saobraćaja u funkcionalnom smislu podrazumeva smanjenje (minimiziranje) vremenskih gubitaka vozila na raskrsnici, smanjenje broja zaustavljanja i smanenje dužine redova čekanja vozila, što zahteva posebnu ocenu i analizu signalnih planova, odnosno dužine trajanja ciklusa i zelenih vremena u okviru odgovarajućih faza. Pri tome se za ocenu odgovarajućih parametara i optimizaciju rada svetlosnih signala, kao objektivna funkcija, najviše koristi grupa primarnih kriterijuma, odnosno vremenski gubici vozila koja prolaze kroz raskrsnicu. Minimiziranjem vremenskih gubitaka i ukupnog broja zaustavljanja ostvaruje se i smanjenje potrošnje goriva, zagađenje vazduha i nivo buke. U disertaciji se posebno ukazuje i na mogućnost korišćenja solarne energije, kao jednog od obnovljivih izvora energije, za rad signalnih uređaja na raskrsnici.

Jedan od prvih modela upravljanja radom izolovane površinske raskrsnice, na kojoj se regulisanje saobraćaja realizuje svetlosnom signalizacijom, predložio je Webster tokom 1958. godine. Na osnovu Webster-ovog modela vrši se proračun ciklusa i raspodela zelenih vremena relacije (18) i (21), na izolovanoj svetlosno signalisanoj raskrsnici.

Pieter Pretorius sa saradnicima, ističu da su modeli koji su kasnije razvijeni, u cilju poboljšanja Webster-ovog modela, imali dva nedostatka i to [29]:

- modeli su primenljivi samo na raskrsnicama u uslovima nezasićenih saobraćajnih tokova u kojima su zahtevi manji od kapaciteta raskrsnice i gde su dužine redova vozila uravnotežene i

- modeli su razvijeni za izolovane raskrsnice, pri čemu se pretpostavlja da je pristizanje vozila slučajno (ne i za slučajeve sa niskim ili visokim nivoima fluktuacija u pristizanju vozila).

Pretorius takođe ukazuje da se kao mera efikasnosti semaforizovane raskrsnice, u oblasti saobraćajnog inzenjerstva, najčešće koristi vreme zadržavanja vozila. U praksi se, za određivanje vremena zadržavanja vozila, kao kriterijumske funkcije, koriste različiti modeli koji se, u osnovi mogu grupisati u dve celine: modeli koji koriste tehniku Monte Carlo Simulation (danas se retko koriste) i analitički modeli (koriste odgovarajuće analitičke procedure - teoriju redova za procenu dužina redova vozila i vremena zadržavanja). Zbog složenosti saobraćajnih operacija na raskrsnicama, neophodne su odgovarajuće pretpostavke pojednostavljenja, pa su zbog toga svi analitički modeli u osnovi aproksimativni.

Tokom 1963.godine Miler je prvi koristio princip adaptivnog upravljanja saobraćajem predloživši rešenje koje je omogućavalo izračunavamje vremenskih gubitaka na semaforizovanim raskrsnicama.

U radu Ahmeda Boumediene i saradnika, ukazano je na uticaj zasićenog toka na vremenske gubitke, dužinu redova i druge parametre semaforizovane raskrsnice [28]. Naime, u formulama za izračunavanje dužine ciklusa koje su, na osnovu Webster-ovog modela, uključile i druge faktore koji utiču na dužinu ciklusa a koje su predložili Webster i Cobbe, zatim Miler i kasnije Akcelik, koristi se zasićeni tok saobraćajne trake kao osnova za izračunavanje dužina signala, kapaciteta raskrsnice i stepena zasićenja. Pri tome se je pretpostavljalo da je zasićeni tok tokom trajanja zelenog signalnog pojma konstantan. Međutim istraživanja i rezultati merenaja koja su izvršena u četiri različita mesta, pokazali su da zasićeni tok postepeno raste nekoliko sekundi nakon pojave zelenog signalnog pojma, zatim ostaje približno konstantan do 56 - 60 sekundi trajanja zelenog svetla, a potom dolazi do opadanja koje traje sve do isteka vremena zelenog svetla. Na osnovu ovih rezultata autori predlažu da maksimalna dužina trajanja zelenog svetla u okviru jednog ciklusa ne bude veća od 45 sekunde, dok se kao donja granica, odnosno najmanja dužina, predlaže 20 sekundi. Izvan ovog intervala realne vrednosti vremenskih gubitaka, dužine reda, kapaciteta raskrsnice i stepena zasićenja znatno odstupaju od odgovarajućih vrednosti koje su dobijene pod pretpostakom da je zasićeni tok konstantan tokom ukupnog vremena trajanja zelenog svetla u okviru ciklusa.

Na zavisnost kapaciteta svetlosno signalisane raskrsnice od zasićenog toka i važnost da se ova činjenica posebno uzima u obzir pri projektovanju raskrsnica, ukazao je i Robert Stokes [30].

Richard B. Allsop je autor *SIGSET*-a, jednog od prvih softverskih rešenja za upravljanje semaforizovanom raskrsnicom [31]. To je Fortran program koji izračunava ciklus i raspodelu zelenog svetla izolovane semaforizovane raskrsnice. Dužine trajanja zelenog svetla i ciklusa, ako je potrebno, izračunavaju se tako da minimiziraju, u odnosu na raskrsnice sa fiksnim režimom rada, vremenske gubitke po vozilu za sva vozila koja prolaze kroz raskrsnicu. Program je znatno poboljšao proračun odgovarajućih parametara, u odnosu na prethodne metode, uključujući u proračun sve saobraćajne tokove u okviru faza umesto samo jednog.

Feng-Bor Lin sa sardanicima obradili su jedno od mogućih rešenja za adaptivnu kontrolu saobraćaja, odnosno optimizaciju trajanja signalnih pojmova u realnom vremenu na izolovanim raskrsnicama, koja se bazira na podacima o dolasku vozila dobijenih sa detektora instaliranih ispred raskrsnice i podacima generisanim odgovarajućim prediktorima [32]. Rešenje se odnosi na izolovane raskrsnice kod kojih, iz praktičnih razloga, nije moguće postaviti detektore na dovoljno velikoj udaljenosti kako bi dobijeni podaci i informacije o prispeću vozila bili upotrebljivi za realizaciju odgovarajuće optimizacije.

Rahmi Akçelik je, tokom 1981.godine definisao obrasce, za izračunavanje vremenskih gubitaka vozila, broj zaustavljanja i dužinu reda na prilazima izolovane raskrsnice uzimajući u obzir kapacitet i zasićeni tok saobraćajnih traka [33].

Na mogućnost primene lanaca Markova u određivanju vremenskih gubitaka i dužine redova čekanja, pri promenljivim uslovima na izolovanoj raskrsnici (vremenski promenljivi saobraćajni tokovi na prilazima rasksnici i brzina pristizanja vozila koja ne sledi Poisson-ovu raspodelu), ukazali su (1990) Hing Wu i Werner Brilon [34]. Lance Markova koristili su, za izradu algoritma za kontrolu signalnih pojmova na izolovanoj semaforizovanoj raskrsnici i Khalil M. Ahmad Yousef, JN Al-Karaki i Ali Mohamed Shatnawi (2010) [35].

De Schutter i B. De Moor (1998) opisali su model koji prikazuje dužine redova vozila na prilazima četvorokrake semaforizovane rakrsnice u funkciji vremena [36]. Kao objektivne funkcije koristili su nekoliko veličina među kojima su i srednja vrednost dužina redova i srednja vrednost vremena čekanja vozila na svim prilazima raskrsnice koje zavise od dužina redova ćekanja. Dokazali su da se preko ovih funkcija može izvršiti optimizacija trajanja signalnih pojmova, uzimajući u obzir i mogućnost promene dužine trajanja žutog, zelenog i crvenog svetlosnog pojma na semaforima raskrsnice, kao i ciklusa u celini. Xiaohua i Yangzhou uveli su (2003) hibridni sistem optimizacije pri čemu su koristili srednju vrednost redova vozila na raskrsnici za određivanje optimalnog signalnog plana. Leeuwaarden je 2006. godine odredio funkciju verovatnoće dužine reda i vremena kašnjenja na osnovu koje je dobio raspodelu dužina redova i vremena kašnjenja, što je omogućilo da se veličine koje određuju karakteristike semaforizovane raskrsnice analiziraju na bazi vrednosti varijansi i procenata raspodele [37]. Helbing i Mazloumian (2009) analizirali su elemente kontrole signala koji se baziraju na optimizaciji vremena putovanja i redova vozila i pri tome otkrili različite režime rada, od kojih se neki karakterišu završetkom zelenog svetlosnog pojma nakon što se opslužuje i poslednje vozilo u redu, što podrazumeva da se sva vozila jednom zaustavljaju, dok drugi uključuju efekat “sporije - je - brže”, gde odloženo uključivanje svetlosnih signala smanjuje prosečno vreme putovanja [38].

Emad I Abdul Kareem i Aman Jantan (2011) predlažu, kao dodatnu komponentu sistema za kontrolu svetlosnih signala, monitoring sistem (koriste se video kamere instalisane na raskrsnici), koji bi posebno registrovao stanje saobraćajnih tokova na prilazima raskrsnici, zagušenja, ili normalno odvijanja saobraćaja i time omogućio znatno efikasniji rad sistema kao celine [39].

Mogućnost korišćenja posebnih softverskih rešenja (agenti) za kontrolu svetlosnih signala na raskrsnicma predložili su (2000) Roozemond i Rogier [40]. Ruey-Shu CHEN sa sardnicima opisali su adaptivnu kontrolu saobraćaja, posebno kada se radi o koordinaciji rada raskrsnica, korišćenjem agenata, čija je uloga prikupljanje i obrada podataka o vrednostima saobraćajnih parametara, razmena informacija između agenata i donošenje odluka i aktiviranje odgovarajućih signalnih pojmova [41]. Kao kriterijumska funkcija korišćeno je ukupno vreme zadržavanja po vozilu. Rezultati simulacije pokazali su da je vreme zadržavanja za 37% manje u odnosu na fiksni režim rada semaforskog sistema [41].

Kontrolu rada semafora u realnom vremenu, upotrebom bežične senzorske mreže, obradilisu (2007), Malik Tubaishat sa saradnicima [42]. Za procenu efekata rada semaforizovane raskrsnice, kao objektivnu funkciju, koristili su propusnost raskrsnice i minimiziranje vremena zadržavanja vozila. Slično njima, Khalil M. Ahmad Yousef sa saradnicima (2010), takođe predlažu, da se za kontrolu saobraćaja na semaforizovanim raskrsnicama, koristi bežična senzorska mreža sastavljena od dve celine: bazne stanice (kontrolera) i grupe senzora koji omogućavaju prikupljanje podataka o broju vozila koja prilaze i napuštaju raskrsnicu, o brzini i dužini vozila i druge [35]. Na bazi ovih podataka i korišćenjem lanaca Markova, izvršena je maksimizacija propusnosti raskrsnice uz istovremeno minimiziranje prosečne dužine redova čekanja i prosečne vrednosti vremena zadržavanja vozila. Binbin Zhou (2011), u svojim istraživanjima koja su realizovana, u oblasti kontrole saobraćaja u realnom vremenu na semaforizovanim raskrsnicama, korišćenjem bežične

senzorske mreže, ističe da su na taj način ostvareni znatno bolji rezultati u povećanju propusnosti raskrsnice i smanjenju vremena zadržavanja vozila u odnosu na raskrsnice gde se koristi fiksni režim rada semafora [43]. Na kraju, kada je reč o bežičnim senzorskim mrežama, koje se mogu koristiti u upravljanju semaforizovane raskrsnice, potrebno je istaći da su se ovim problemom, pored već navedenih autora, bavili i Qingfeng Huang, Nazmus Nafi i J.Y. Khan 2012., Amnesh i saradnici 2012.,Nellore K. i Hancke G, I Rashid Husian sa saradnicima 2013. To ukazuje da danas u svetu postoji veliko interesovanje za njihovo korišćenje u oblasti kontrole i upravljanja svetlosnim signalima pre svega zbog njihove jednostavnije instalacije, nižih cena u odnosu na druga rešenja i značajno manjih troškova njihovog održavanja. [44], [45], [46], [47], [48].

### 5.2. Razvoj i osnovne karakteristike adaptvnih sistema upravljanja saobraćajem

Upotreba računarskih sistema i informatičke tehnologije, kao i različitih izuzetno sofisticiranih adaptivnih sistema za upravljanje saobraćajem sve više se koriste u oblasti saobraćajnog inženerstva. Njihov osnovni zadatak je povećanje efikasnosti, reagovanje na incidentne situacije na raskrsnici, smanjenje troškova ažuriranja signalnih planova i održavanje visokog stepena bezbednosti saobraćaja. Razvoj računara, ubrzan razvoj novih tehnologija i razvoj različitih tipova senzora za detekciju uslova i podataka o vrednostima parametara o saobraćaju omogućili su kreiranje ovih kompleksnih sistema namenjenih upravljanju radom svetlosnih signala na izolovanim i svetlosno signalisanim raskrsnicama u liniji. Danas postoji veliki broj adaptivnih sistema širom sveta koji su instalisani na različitim lokacijama, koriste različitu opremu, rade u raličitim uslovima i ostvaruju različite rezultate. Zajedničko za većinu sistema je nedostatak informacija o suštinskim detaljima načina rada, korišćenim algoritmima i ostalim elementima upravljačke logike.

Prvi adaptivni sistemi upravljanja saobraćajem pojavili su se, kao što je već istaknuto, tokom 1963. godine, kada je razvijena strategija upravljanja saobraćajem koja je u sebi sadržala model koji je, sa ciljem optimizacije performansi instalisanog svetlosnog sistema na raskrsnici, kombinovao vremenske uštede sa različitim stanjima na raskrsnici. Na osnovu tih istraživanja razvijeno je više metoda za adaptibilno upravljanje saobraćajem.

Prema nekim autorimau, u procesu razvoja adaptivnih sistema upravljanja saobraćajem, mogu se uočiti tri generacije ovakvih sistema i to [49]:

- prva generacija adaptivnih sistema koji sadrže programe nastale analizom prethodnih (istorijskih) podataka o saobraćaju sačuvanih u memoriji računara. Najznačajniji predstavnik ove generacije je australijski adaptivni sistem SCATS,
- sistemi druge generacije koji uključuju kreiranje i primenu signalnih planova u realnom vremenu na osnovu podataka o parametrima saobraćaja dobijenih sa detektora. Promene planova se primenjuju periodično na svakih 5 do 10 minuta. Tipičan predstavnik ove generacije adaptivnih sistema je SCOOT sistem i
- sistemi treće generacije koji su potpuno prilagodivi uslovima saobraćaja na raskrsnicama. Kod ovih sistema vremena trajanja svetlosnih signala menjaju se tako da se njihov rad prilagođava trenutnim vrednostima promenljivih parametara saobraćajnog toka.

Adaptivni sistemi upravljanja saobraćajem su veoma kompleksni sistemi čija je funkcija upravljanje radom svetlosnih signala na svetlosno signalisanim raskrsnicama. Hardverska struktura takvih sistema je veoma složena. U opštem slučaju, kada se radi o adaptivnom sistemu koji je implementiran na izolovanoj raskrsnici, njegove osnovne komponete su detektori podataka o vrednostima parametara saobraćaja, odgovarajući računarski sistem, kontroler izvora svetlosnih signala i semaforski uređaji. Šematski prikaz hardverske stukture takvog sistema dat je na slici 44.

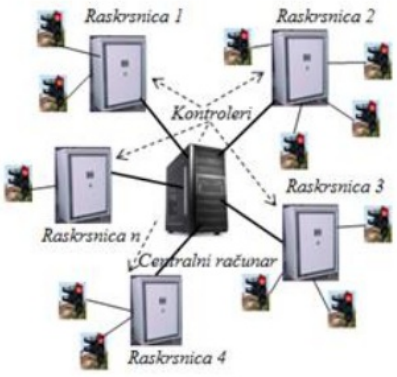



Slika 44. *Šematski prikaz hardverske strukture adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem*

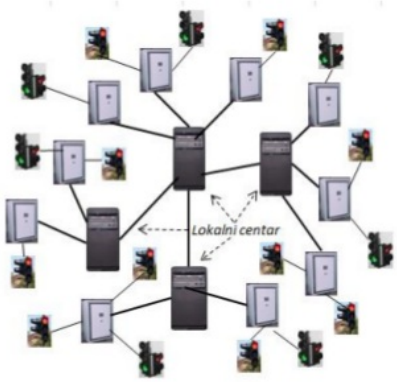
Detektori[17] prikupljaju podatke o vozilima i pešacima u oblasti raskrsnice i dostavljaju ih računarskom sistemu, gde se memorišu i obrađuju. Na osnovu analize, obradom dobijenih rezultata, u računarskom sistemu formira se odgovarajuća upravljačka odluka koja se upućuje kontroleru, a otuda dalje ka semaforskim uređajima.

Adaptivni sistemi mogu se u mnogim slučajevima, a naročito kada se radi o raskrsnicama u liniji, ili o grupnoj koordinaciji, međusobno povezati. U zavisnosti od toga na koji način su povezani, odnosno kakva je njihova arhitektura, mogu se razikovati tri grupe adaptibilnih sistema i to:

- centralizovani adaptivni sistem (slika 45.): bazira se na centralnom računaru i komunikacijama ka pojedinačnim kotrolerima na raskrsnicama. Prednost ovog sistema je u tome da su svi relevantni podaci iz detektora i drugih izvora dostupni na jednom mestu.
- decentralizovani adaptivni sistemi (slika 46.): ovi sistemi ne moraju da imaju samo jedan centralni računar, već se sistem organizuje u više regionalnih grupa koje imaju svoje lokalne centre koji međusobno komuniciraju i




Slika 45. *Centralizovan adaptivni sistem*




Slika 46. *Decentralizovan adaptivni sistem*

- distribuirani adaptivni sistemi: sistemi su slični decentralizovanim samo što se kod ovih sistema koristi mrežni usmerivač (ruter) koji omogućava međusobno povezivanje kontrolera, prenos podataka i razmenjivanje poruka između njih.

Danas postoji veliki broj adaptivnih sistema koji su implementirani širom sveta i rade u realnim uslovima, ali i onih koji se još uvek nalaze na nivou naučnih istraživanja i laboratorijskih testiranja radi uvida u njihovu strukturu i logiku rada. Nekoliko najpoznatijih adaptivnih sistema koji se danas koriste u svetu opisani su u nastavku.

[17] O detektorima i ostalim komponentama ASUS-a više u Prilogu 11. delu koji se odnosi na elemente inteligente raskrsnice

### *5.2.1. SCATS*

SCATS, akronim od „*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*“, je inteligentan, decentralizovan i kompjuterizovan transportni sistem upravljanja saobraćajem. Sistem je razvijen u Sidneju tokom sedamdesetih godina prošlog veka i 1982. godine implementiran u Melburnu. Od 1983. godine koristi se i na putnoj mreži Zapadne Australije. Sistem se sastoji od regionalnih podsistema koji predstavljaju grupe raskrsnica sa koordinisanim radom. Svaki region ima jednu kritičnu raskrsnicu na osnovu koje se određuje ciklus za sve raskrsnice unutar tog regiona. Maksimalan broj raskrsnica kojima je moguće upravljati upoterbom ovog sistema je 16.000 [49].

Za prilagođavanje trajanja ciklusa SCATS koristi dva parametra: stepen zasićenosti i protok saobraćaja. Parametri se mere u toku svakog ciklusa, uz pomoć taktičkih detektora koji se postavljaju uz zaustavnu liniju i strateških detektota koji se pozicioniraju ispred raskrsnice, i na osnovu dobijenih rezultata proračunavaju se dužine trajanja ciklusa, signalnih faza i faznih pomaka. Sistem ima osam različitih načina rada [49], [50]. Pored načina kojim se vrši prilagođavanje upravljanja saobraćajem u realnom vremenu, sistem poseduje i mogućnosti koordinacije uz pomoć časovnika, automatsko upravljanje u kome se svaka raskrsnica posmatra kao izolovana, davanje prioriteta interventnim vozilima i drugi. Sistem ne poseduje mogućnost davanja prioriteta vozilima javnog prevoza, ali ima komponente koje mogu identifikovati neuobičajna zagušenja i upravljanje saobraćajem u slučaju incidenata. SCATS sistem je, uz pomoć softvera za emulaciju *Wintraff*, moguće povezati sa mikrosimulacionim softverima *Paramics, Aimsun* i *VISSIM*.

SCATS sistem je dugi niz godina u upotrebi, izuzetno je stabilan sistem, prihvačen je i koristi se, pored Australije, u mnogim gradovima i regionima širom sveta, Teheran, Mašhed, Novi Zeland, Šangaj, Hong Kong, Dablin, Aman i drugi.

### *5.2.2. SCOOT*

SCOOT sistem (*Split Cycle Offset Optimization Technique*) razvijen je u saradnji kompanije Transport Research Laboratory (TRL) i dobavljača saobraćajnih sistema u Velikoj Britanoji. Prva verzija ovog adaptivnog sistema testirana je tokom 1970. godine u Glazgovu, a u upotrebu je uveden od 1979. godine i od tada do danas je instalisan u preko 200 gradova u četrnaest država širom sveta [49]. Sistem ima centralizovanu arhitekturu i namenjen je za guste saobraćajne mreže. Snabdeven je detektorima koji su postavljeni na 100-300 m od raskrsnice. Na osnovu podataka dobijenih sa detektora SCOOT sistem vrši optimizaciju odgovarajućih performansi na raskrsnici koja može biti: *optimizacija dužina ciklusa* koja se vrši prema kriterijumu minimizacije vremenskih gubitaka, *optimizacija pomaka* - vrši se u toku svakog ciklusa za svaku raskrsnicu sa njenim susednim raskrsnicama prema kriterijumu minimizacije vremenskih gubitaka i broja zaustavljanja i *optimizacija trajanja zelenih vremena* prema kriterijumu jednakosti zasićenosti saobraćajnih tokova. Sistem poseduje mogućnost davanja prioriteta vozilima javnog prevoza putnika. Od ostalih karakteristika potrebno je naglasiti tehniku merenja saobraćaja (eng. *Traffic metering*) koja omogućava zadržavanje saobraćaja izvan gradskih centara da bi se održalo slobodno kretanje vozila u opterećenim zonama. Sadrži i softverske module INGRID (eng. *Integated Incident Detection*) i ASTRID (eng. *Automatic SCOOT Traffic Information Datebase*) koji registruju incidentne situacije, odnosno arhiviraju podatke koje sistem koristi. Sistem se može povezati sa softverskim paketima CORSIM i VISSIM [49].

SCOOT sistem je baziran na jasnom modelu i čvrstim teoretskim postavkama, ima veliki broj instalacija i pogodan je u opsluživanju tokova koji su bliski zasićenim, složenim kombinacijama intenziteta tokova i nepredviđenih varijacija u tokovima. Obezbeđuje velike količine podataka što je veoma bitno za rad sistema i naknadne analize.

### *5.2.3. UTOPIA*

Kompanije FIAT Research Centre, ITAL TEL i MIZAR Automation razvile su i dizajnirale adaptivni siatem UTOPIA (*Urban Traffic Optimization by Integrated Automation*) koji je prvi put primenjen na širem području Torina 1984. godine. Sistem ima modularnu i distributivnu strukturu koja je organizovana na dva nivoa: zonsko i lokalno upravljanje saobraćajem. Oba nivoa imaju posmatrački i upravljački nivo. Zonski posmatrački modul vrši predikciju zahteva i pravaca kretanja vozila u intervalima od tri minuta, a upravljački modul optimizaciju mrežne funkcije na osnovu brzine vozila i zasićenih tokova u intervalima od 30 minuta. Nivo lokalnog upravljanja čine SPOT (*System for priority and optimization of traffic*) jedinice u kontrolerima. Posmatrački modul SPOT jedinice, na osnovu podataka koje dobija od detektora i podataka o stanjima svetlosnih signala, vrši procenu redova, prognozu nailaska vozila javnog prevoza putnika, određuje procenat vozila u skretanju, zasićenje tokova i detektuje zagušenja i incidente. Prema poziciji razlikuju se dva tipa detektora: ulazni, postavljeni na 75-105 m ispred raskrsnice koji imaju ulogu merenja dolaznih vozila i modeliranja redova i detektori na izlaznim kracima raskrsnice koji vrše procenu procenta vozila u skretanju i zasićenih tokova. Lokalni upravljački modul vrši minimizaciju funkcije troškova korišćenjem tehnike linearnog programiranja, pri čemu postoji mogućnost korišćenja većeg broja kriterijuma optimizacije performansi raskrsnice, kao što su, primera radi, minimizacija vremenskih gubitaka, vremena zaustavljanja, vremena putovanja, tačnosti vozila javnog prevoza putnika i drugi.

Posebne osobine UTOPIA sistema su mogućnosti davanja prioriteta vozilima javnog prevoza putnika unutar procesa optimizacije, zatim rad sa fiksnim planovima koji se smenjuju u toku dana, ručni režim rada i druge. Moguće je povezivanje sistema sa velikim brojem softverskih paketa za mikrosimulaciju, kao što su VISSIM, *Aimsun, Paramics*, HUTSIM, NETSIM, CUBE i drugi. Obzirom da je sistem distribuiran, optimizacija procesa rada svetlosnih signala realizuje se razmenom podataka između kotrolera, pri čemu svaki komunicira sa susednim. Zbog ovog načina rada sistem je mnogo zavistan od komunikacione infrastrukture i svaki kvar, ili devijacija na njoj stvara značajne poteškoće i odstupanja u funkcinisanju sistema.

### *5.2.4. OPAC*

OPAC adaptivni sistem (*Optimized Policies for Adaptive Control*) je distribuirani sistem upravljanja i koristi algoritam za dinamičku optimizaciju koji proračunava trajanje signalnih pojmova sa ciljem minimizacije ukupnih vremenskih gubitaka i broja zaustavljanja na raskrsnicama. Algoritam koristi izmerene i modelirane saobraćajne zahteve za određivanje vremena trajanja stanja koja su ograničena minimalnim i maksimalnim zelenim vremenom. Razvijen je na Lowell Univerzitetu u Masačusetsu, a prva verzija implementirana je u Restonu, Severna Virdžinija tokom 1998. godine. Sistem nema mogućnosti davanja prioriteta vozilima javnog prevoza putnika. Moguće je povezivanje sistema sa mikrosimulacionim softverom NETSIM.

### *5.2.5. PRODYN*

PRODYN (*Programmation Dinamique*) je sistem upravljanja saobraćajem u realnom vremenu razvijen u Francuskoj i sličan je sistemima OPAC i UTOPIA [50]. To je sistem sa decentralizovanim upravljanjem saobraćajem, pri čemu se optimizacija vrši korišćenjem tehnike „rolling horizon“. Ovom tehnikom se na svakih pet sekundi određuje prognoza nailaska vozila, vrši se procena redova i ukazuje na moguća blokiranja susednih raskrsnica. Sistem ima mogućnosti

davanja prioriteta vozilima javnog prevoza putnika. Simulacije je moguće vršiti uz pomoć softvera SITRA.

### *5.2.6. CRONOS*

CRONOS je adaptivni sistem upravljanja saobraćajem u zonama od nekoliko raskrsnica razvijem tokom 1990. godine u Francuskoj (*L'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurruté*). Sličan je sistemima OPAC i PRODYN, ali ima mogućnost izbora između distribuirane i centralizovane arhitekture. U sistemu CRONOS raskrsnica predstavlja skup bezbednosnih ograničenja i sva rešenja koja zadovoljavaju ta ograničenja su moguća. Sistem ima tri modula: modul za prognozu nailaska vozila za celu raskrsnicu na osnovu podataka dobijenih od detektora, modul za simulaciju koji pretpostavlja raspodelu vozila unutar raskrsnice i modula za optimizaciju promene signalnog stanja. Kriterijum optimizacije je minimiziranje vremenskih gubitaka. Detekcija vozila realizuje se obradom video signala. Upotreba video detekcije omogućava integraciju sa sistemima za automatsko određivanje uzroka koji izazivaju saobraćajne nezgode na raskrsnicama. Davanje prioriteta vozilima javnog prevoza putnika integrisano je u proces optimizacije.

### *5.2.7. MOTION*

Adaptivni sistem MOTION (*Method for Optimization of Traffic signals In Oline-controled Networks*) je centralizovani sistem upravljanja saobraćajem razvijen u Nemačkoj. Sistem vrši optimizaciju koordinacije raskrsnica korišćenjem modela za proračun vremenskih gubitaka i vremena zaustavljanja i na svakih 5-15 minuta kreira, ili bira okvirne signalne planove. Odluke za lokalno upravljanje semaforima donose se u kotrolerima na osnovu odgovarajućih algoritama. Detekcija vozila moguća je upotrebom bilo koje tehnologije ako su detektori postavljenji na deset do pedeset metara od zaustavne linije [49]. Sistem omogućava davanje prioriteta vozilima javnog prevoza putnika. Dobre karakteristike ovog sistema potvrđuju brojne instalacije u mnogim zemljama Evrope i Azije. MOTION je jedini instalisan i aktivan adaptibilni sistem u Republici Srbiji, u Beogradu na petnaest raskrsnica u Bulevaru kralja Aleksandra [49].

### *5.2.8. Ostali adaptivni sistemi upravljanja saobraćajem*

Pored sitema koji su ukratko opisani, postoje i drugi adaptivni sistemi upravljanja saobraćajem i to [49]: BALANCE (nemački adaptivni sistem), ACA LITE (*Adaptive Control Software Lite* – proizvod američkog projekta Federalne agencije za autoputeve), ITACA (sistem sličan SCOOT-u razvijen u Španiji), NWS Voyage, ImFlow, Quic Trac, LA ACST, SyncroGeen, Centracs, KADENCE, SURTRAC i drugi.

Svi ovi sistemi, kao i oni prethodno opisani, imaju određene prednosti i nedostatke. Dakle, ne postoji najbolji, najkvalitetniji adaptivni sistem. Ipak, na osnovu sadržaja koji su prethodno izneti, može se zaključiti da bi kvalitetan adaptivni sistem trebalo da ima mogućnost upotrebe različitih strategija upravljanja u različitim situacijama i uslovima u saobraćajnom toku. Drugim rečima potrebno je da adaptivni sistem za upravljanje saobraćajem bude takav da odgovara predmetnoj lokaciji, organizaciji koja njime upravlja, postojećoj infrastrukturi i pravcima daljeg razvoja načina i sredstava regulisanja saobraćaja.

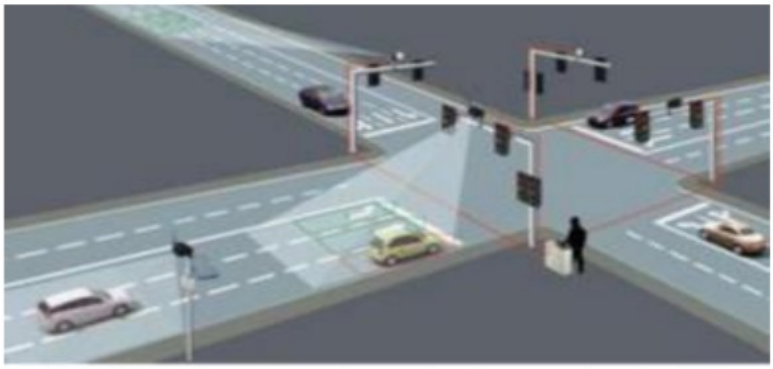
### 5.3. Elementi inteligentne svetlosno signalisane raskrsnice

Inteligentna svetlosno signalisana raskrsnica je površinska raskrsnica na kojoj se regulisanje saobraćaja realizuje korišćenjem adaptivnih sistema upravljanja saobraćajem u kojima se upravljački parametri, kao što su ciklus, raspodela vremena trajanja zelenog svetla i drugo, prilagođavaju neravnomernostima u saobraćajnom toku. Mnoge institucije odgovorne za bezbednost saobraćaja posebno na semaforizovanim raskrsnicama na kojima je prisutna velika promenljivost saobraćajnih zahteva, donose odluke o instalaciji nekog od adaptivnih sistema upravljanja saobraćajem (ASUS). Međutim takve sisteme proizvodi i prodaje veliki broj kompanija širom sveta koje se nadmeću na tržištu i posebno štite svoju intelektualnu svojinu, pa se pri nabavci određenog sistema od isporučioca dobija veoma malo informacija o detaljima i načinu rada sistema kao celine. Proizvođači štite svoju intelektualnu svojinu tako što objavljuju samo određenu količinu i tip informacija koje se odnose na odgovrajući ASUS, pri čemu kupcima onemogućavaju pristup algoritmima i osnovnom programskom kodu sistema. Zbog toga se stručna javnost i organi koji donose odluke suočavaju sa velikim poteškoćama kada je u pitanju detaljno upoznavanje sa karakteristikama sistema i donošenja odluka o njihovoj kupovini.

Elementi inteligentne svetlosno sugnalisane raskrsnice čine skup elemenata semaforizovane raskrsnice i skup komponenata, odnosno sistem za kontrolu rada uređaja koji omogućava da se upravljački parametri, kao što su ciklus, raspodela vremena trajanja zelenog svetla i drugo, prilagođavaju neravnomernostima u saobraćajnom toku. Na slikama 47. i 48. prikazane su, u cilju uočavanja odgovarajućih razlika, klasična i inteligenta svetlosno signalisana raskrsnica. O elementima semaforizovane raskrsnice bilo je više reči u prethodnom poglavlju disertacije. S toga se u ovom delu navode samo komponente sistema koje obezbeđuju prilagođavanje upravljačkih parametara saobraćajnim tokovima na semaforisanoj raskrsnici. To su: detektori, video i termovizijske kamere,koji obezbeđuju potrebne podatke o protocima, brzinama i položajima vozila



Slika 47. *Svetlosno signalisana raskrsnica [7]*



Slika 48. *Inteligentna svetlosno signalisana raskrsnica [51]*

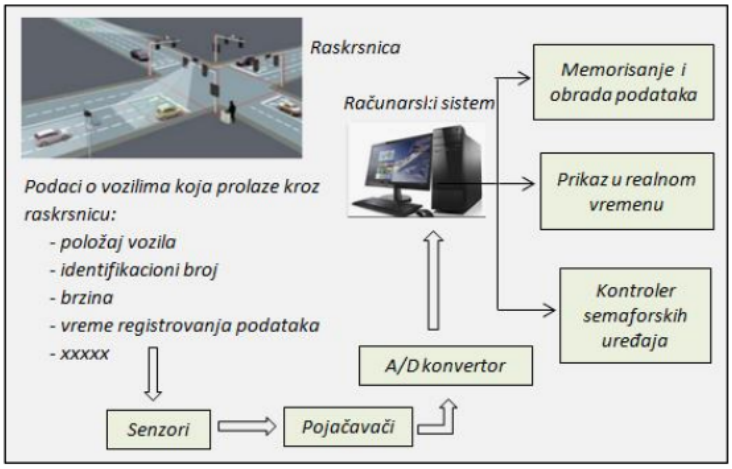
u području raskrsnice, senzori za detekciju vrednosti koncentraija izduvnih gasovai, odgovarajući računarski sistem i programabilni logički kotroler – povezuje računarski sistem sa semaforima.

## 5.4. Programsko rešenje adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem na izolovanoj površinskoj raskrsniciza

Ovaj deo disertacije obuhvata programsko rešenje kojim se realizuje određivanje optimalne vrednosti ciklusa i raspodela dužina trajanja zelenog vremena, u okviru faza izolovane svetlosno signalisane raskrsice, koje se prilagođavaju promenama saobraćajnog toka na raskrsnici. Proračun ciklusa i zelenih vremena zasniva se na minimizaciji ukupnih prosečnih vremenskih gubitaka vozila, koja prolaze kroz raskrsnicu, u toku određenog vremenskog perioda. U tom periodu, za svako vozilo koje prolazi kroz raskrsnicu, preuzimaju se podaci o njegovom položaju i brzini, kao i podaci o intenzitetima saobračajnih tokova na prilaznim trakama raskrsnice. Podaci se potom dostavljaju računarskom sistemu gde se memorišu i kasnije se koriste za odgovarajuću obradu. Podaci se preuzimaju korišćenjem detektora koji su instalisani u području raskrsnice. Predložena rešenja odnose se na izolovanu signalisanu raskrsnicu u slučajevima nezasićenih i prezasićenih saobraćajnih tokova.

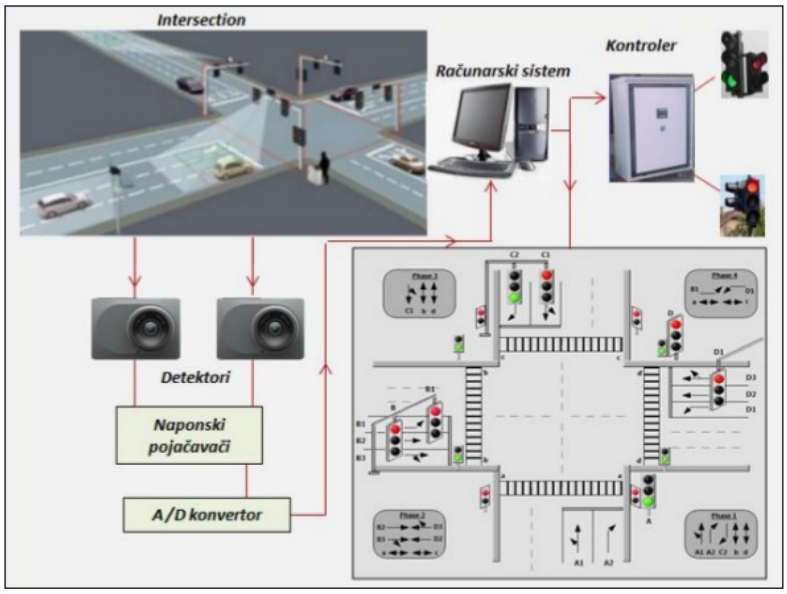
### *5.4.1. Hardverska struktura sistema*

Adaptivni sistem upravljanja saobraćajem sastoji se iz dva modula: hardverskog i softveskog kao i dodatne opreme koja se koristi za međusobno povezivanje hardverskih delova. Na slici 49. šematski je prikazana funkcionalna struktura sistema.




Slika 49. *Šematski prikaz funkcionalne strukture adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem na semaforizovanoj raskrsnici*

Električni signali koji se dobijaju na izlazu senzora, zbog relativno malih vrednosti vode se dalje na ulaz odgovarajućeg pojačavača. Tako pojačani signali dovode se na ulaz A/D konvertora gde se transformišu u digitalne električne signale, a potom, u tom obliku, na ulaz PC računara. U PC računaru podaci se, upotrebom odgovarajućeg softvera, memorišu, obrađuju i dobijeni rezultati upućuju kontroleru semaforskih uređaja, memorišu i/ili se vrši njihov prikaz bilo u grafičkom, ili numeričkom obliku. Grafički, ili numerički prikaz izlaznih rezultata omogućava praćenje i kontrolu rada semaforskih uređaja. Na slici 50. prikazan je model adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem na izolovanoj semaforizovanoj raskrsnici.




Slika 50. *Model adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem na semaforizovanoj izolovanoj raskrsnici*

### *5.4.2. Programska podrška sistemu*

Pored neophodnih hardverskih komponenata, funkcionisanje predloženog sistema zahteva i odgovarajuću softversku podršku. Paralelno sa razvojem hardvera razvijeni su i softverski alati i okruženja za realizaciju akvizicionih, mernih i kontrolnih sistema bazirani na PC računarima. Za realizaciju softvera za akvizicione sisteme koji su podržani PC računarima postoje više načina. Kada je reč o sistemu čiji je model prikazan na slici 50, za izradu aplikativnog softvera korišćen je programski paket LabVIEW, koji predstavlja, na određen način, standard u oblasti softvera za virtuelnu instrumentaciju.

Virtuelna instrumentacija predstavlja metodologiju za projektovanje uređaja, koja koristi PC računar i posebne hadverske komponente za akviziciju podataka, digitalnu konverziju signala i računarske programe koji omogućavaju prikupljanje podataka, obradu i prikaz dobijenih rezultata na računaru. U osnovi to je spoj hardverskih i softverskih elemenata kojima se, između ostalog, ostvaruje funkcija automatizacije sistema koji tačno odgovara potrebama za koje je projektovan.

Osnovni elemenat programskog paketa LabVIEW je virtuelni instrument (*VI*) koji se posebno kreira za svaku mernu metodu ili sistem. Sastoji se iz prednje ploče i blok dijagrama. Prednja ploča je grafički korisnički interfejs instrumenta i sadrži odgovarajuće vizuelne elemente preko kojih korisnik zadaje parametre procesa i učestvuje u procesu merenja, kontrole i praćenja dobijenih rezultata. Na blok dijagramu unosi se programski kod (u obliku dijagrama) koji omogućava funkcionisanje virtuelnog instrumenta.

### *5.4.3. Programsko rešenje za rad adaptivnog sistema upavljanja saobraćajem*

Virtuelni instrument, odnosno pogramsko rešenje adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem na izolovanoj svetlosno signalisanoj raskrsnici, razvijen je primenom programskog paketa LabVIEW. *VI* je koncipiran tako da omogućava izračunavanje i očitavanje dužine trajanja ciklusa, vremena zelenog svetla i tekućeg vremena faze koja je u opertivnom stanju, ukupne vremenske gubitke i drugo, kao i praćenje rada semaforskih uređaja.

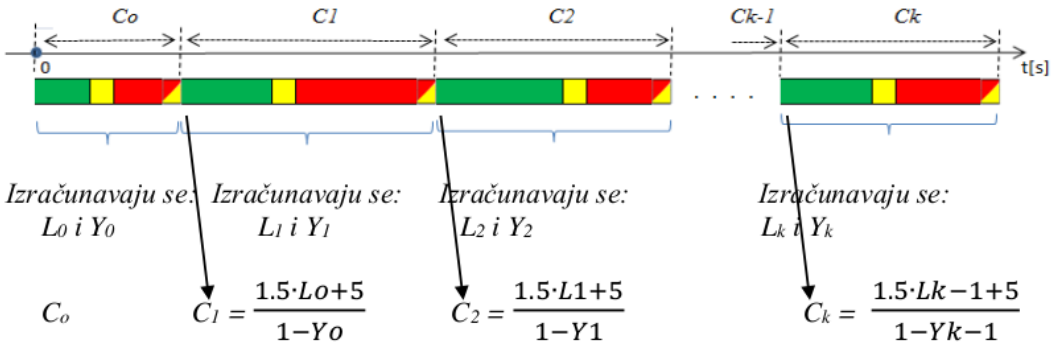
Programsko rešenje adaptivnog sistema za slučaj nezasičenih saobraćajnih tokova na izolovanoj raskrsnici, bazira se na Webster-om obrascu (18) za određivanje optimalne vrednosti dužine ciklusa semaforizovane raskrsnice, odnosno:

$$C = \frac{1.5 \cdot L + 5}{1 - Y}$$

pri čemu su, kao što je već izneto, $L$ - ukupni prosečni gubici vremena po vozilu:

$$L = \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} (d1i + d2i) + n \cdot \Delta ti$$

gde su $m$ - broj prilaznih saobraćajnih traka, $n$ - broj faza u okviru ciklusa i $\Delta t_i$ - zaštitno vreme. Veličina $Y$ - određena je relacijom (20), a veličine $d_{1i}$ i $d_{2i}$ relacijma (11) i (12). Na osnovu vrednosti ciklusa izračunava se dužina trajanja zelenog svetla (21) za svaku fazu pojedinačno. Formula za izračunavanje dužine ciklusa, pored toga što se odnosi na slučajeve nezasićenih saobraćajnih tokova, podrazumeva da su saobraćajni tokovi $q_1$, $q_2$, ... i $q_m$ konstantni u posmatranom vremenskom periodu i da je vrednost ukupnih prosečnih vremenskih gubitaka optimalna. Tokom vremena može doći do promena intenziteta saobraćajnih tokova, vremenskih gubitaka i drugo, što dovodi do pojave zasićenosti, nemogućnosti opsluživanja svih vozila u toku određene faze, formiranja redova čekanja i do značajnog povećanja vremenskih gubitaka. Međutim, ukoliko se obezbedi da se paraleno sa ovim promenama menja vrednost dužine trajanja ciklusa (slika 51.), onda je moguće da se ovakve pojave u znatnoj meri spreče i da se saobraćaj odvija u uslovima nezasićenih tokova.




Slika 51. *Generisanje ciklusa i dužina zelenog svetla*

Programsko rešenje koje je prezentovano u disertaciji obezbeđuje realizaciju procesa generisanja signalnog plana, odnosno određivanje dužine trajanja ciklusa i zelenog svetla za svaku fazu. Proces se odvija jednom u toku svakog ciklusa, ili u toku unapred određenog periodičnog vremenskog intervala koji zavisi od uslova odvijanja saobraćaja na raskrsnici, i uspostavlja plan za naredni ciklus baziran na izmerenim parametrima (intenziteti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama raskrsnice i prosečnih vremenskih gubitaka po vozilu) u prethodnom ciklusu, odnosno izabranom vremenskom intervalu [52], slika 51. Primera radi, u toku inicijalnog ciklusa $C_o$ mere se protoci saobraćaja na prilazima raskrsnice, izračunavaju se prosečne vrednosti inteziteta saobraćajnih tokova ($q_1$, $q_2$, $q_3$, ... $q_m$) za ovaj period vremena i izračunava se ukupna vrednost stepena iskorišćenja raskrsnice, veličina $Y_0$. Na kraju ovog ciklusa, korišćenjem dobijenih rezultata, izračunava se vrednost novog, sledećeg cikluasa $C_1$. Ako se dobija da je $C_1 = C_o$, onda je promena signalnih pojmova na semaforskim uređajima ista kao i tokom ciklusa $C_o$, a ako je $C_1 \neq C_o$, onda se plan tempiranja usklađuje sa dužinama zelenog svetla u okiru utvrđenih faza. Tokom ciklusa $C_1$,

odnosno drugog po redu vremenskog intervala, mere se i izračunavaju se nove prosečne vrednosti intenziteta saobraćajnih tokova i vrednost veličine $Y_1$ koje se, na kraju ciklusa (vremenskog intervala), koriste za određivanje vremena trajanja ciklusa $C_2$ i tako redom. U praksi se obično smatra da je za raskrsnice u gradskim područjima prihvatljivi nivo usluga "C", za koji prosečni vremenski gubici po vozilu iznose od 20-35 sekundi (kao krajnje prihvatljiv nivo uzima se "D"), pa se u mnogim slučajevima problem adaptivnih sistema svodi na usklađivanje vrednosti ciklusa samo sa vrednostima intenziteta saobraćajnih tokova na prilaznim trakama raskrsnice [53].

Nakon utvrđivanja dužine ciklusa, na osnovu relacije (21), izračunavaju se dužine zelenog svetla za svaku fazu. Tokom ciklusa mogu se pojaviti dodatne optimizacije, kao što su preskakanje faze (ako na nekoj od prilaznih saobraćajnih traka dođe do zasićenja, onda se neka od najmanje "opterećenih" faza preskaće i daje prednost traci u kojoj je došlo do zasićenja), produženje (produžava se žuto svetlo da bi se smanjio uticaj zona dileme na pristupnim prikazima raskrsnice) ili prekidanje (slučaj davanja prioriteta vozilima hitne pomoći, milicije, vozilima protivpožarne zaštite i drugo).

Veličina $C_o$ je inicijalna vrednost dužine ciklusa. Ona se bira iz mogućih dopustivih vrednosti za datu raskrsnicu koje su unapred određene. Na osnovu ove vrednosti, nakon oduzimanja izgubljenog vremena $L$ tokom ciklusa, određuju se dužine trajanja zelenog svetla (relacija 21.) za svaku fazu, $g_{01}, g_{02}, \ldots g_{0n}$. Ovo rešenje predstavlja inicijalno rešenje na početku rada semaforskog sistema, koje će potom, iz ciklusa u ciklus, biti modifikovano na način kako je opisano.

Regulisanje saobraćaja na svetlosno signalisanim raskrsnicama može se realizovati na više načina, što zavisi od brojnih faktora: lokacija raskrsnice, intenziteti saobraćajnih tokova na prilaznim trakama, tokova pešaka i drugi, kao i od utvrđenih ciljeva koje je potrebno ostvariti primenom sistema semafora na odgovarajućoj raskrsnici. U disertaciji su predložena rešenja za raskrsnice koje mogu funkcionisati u uslovima nezasićenih i prezasićenih[18] tokova i koje su najčešće prisutne, ili koje će biti prisutne u praksi i to:

- četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa fiksnim režimom rada i
- četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa adaptivnim režimom rada.

Pri tome su, kada se radi o raskrsnicama sa fiksnim režimom rada, prezentovana rešenja za:

- četvorokraku dvofaznu semaforizovanu raskrsnicu sa fiksnim režimom rada bez mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme i
- četvorokraku dvofaznu semaforizovanu raskrsnicu sa fiksnim režimom rada i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme.

Rešenja za adaptivni sistem rada prezentovana su za:

- četvorokraku dvofaznu semaforizovanu raskrsnicu sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intenzitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme.
- četvorokraku dvofaznu semaforizovanu raskrsnicu sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme.
- četvorokraku dvofaznu semaforizovanu raskrsnicu sa različitim dnevnim signalnim planovima i mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme.
- četvorokraku semaforizovanu raskrsnicu sa adaptivnim režimom rada, četiri faze i mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme.

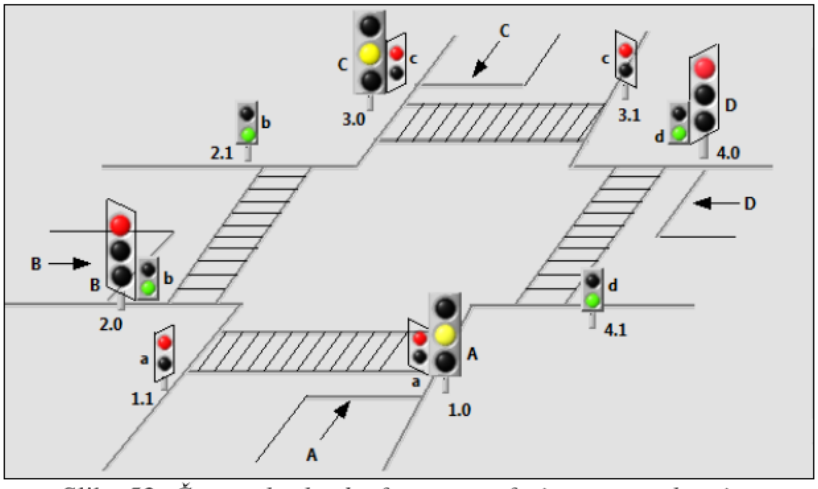
U slučaju prezasićenih tokova određivanje dužine aktuelnog ciklusa vrši se tako što se neopslužena vozila iz prethodnog ciklusa (zbog dužine prolaza vozila sa prioritetom, ili naglog povećanja saobtaćajnih tokova na prilaznim trakama) „prebacuju" u aktuelni, pri čemu njihovi

[18] Nezasićeni saobraćajni tokovi podrazumevaju da su u svim saobraćajanim trakama, koje su deo raskrsnice, vrednosti stepena zasićenja manje ili jednakke jedinici.
Prezasićeni saobraćajni tokovi podrazumevaju da je bar u jednoj saobraćajnoj traci, koja je deo raskrsnice, vrednost stepena zasićenja veća od jedinice

intenziteti predstavljaju početne vrednosti prosečnih intenziteta koji se određuju tokom tog ciklusa. Naime, ako se, primera radi, na osnovu vrednosti saobraćajnih tokova, dobijenih na kraju ciklusa $C_{k-1}$, i relacije (18) dobija dužina ciklusa $C_k$ koja je veća od 120 sekundi, ili od unapred projektovane vrednosti *C3* (što može biti slučaj kod raskrsnica sa fiksnom dužinom ciklusa), onda je to pokazatelj da sva vozila tokom ciklusa $C_k$ neće biti opslužena. Intenziteti ovih, neopsluženih vozila se sada pojavljuju kao početne vrednosti saobraćajnih tokova koji se određuju za vreme trajanja ciklusa $C_k$ i koji će se, na kraju ovog ciklusa, koristiti za određivanje, odnosno proračun ciklusa $C_{k+1}$. Način određivanja detaljnije je opisan u delu 5.4.3.1.3.

### *5.4.3.1. Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica*

Na slici 52. dat je šematski prikaz izolovane četvorokrake semaforizovane raskrsnice koja može funkcionisati sa fiksnim ili sa adaptivnim sistemom rada semafora.




Slika 52. *Četvorakraka dvofazna semaforizovana raskrsnica*

Kao ulazni parametri za proračun ciklusa i dobijanje izlaznih veličina značajnih za kontrolu i praćenje rada ovakve raskrsnice, koriste se:

- prosečni vremenski gubici vremena po vozilu na raskrsnici tokom „zelene faze“ (*d*),
- vrednost zaštitnog vremena za vozila (*t*),
- vrednosti zasićenih saobraćajnih tokova na prilaznim saobrćajnim trakama $S_A$, $S_B$, $S_C$ *i* $S_D$,
- prosečne vrednosti intenziteta saobraćajnih tokova na prilaznim saobraćajnim trakama *Qa*, *Qb*, *Qc i Qd*, ili *pA*, *pB*, *pC* i *pD*,
- vrednost zaštitnog vremena za pešake na početku faze ($t_{zpp}$),
- vrednost zaštitnog vremena za pešake na kraju faze ($t_{zpk}$) i
- broj vozila koja tokom ciklusa prolaze kroz poprečmi presek saobraćajnih prilaznih traka raskrsnice *nA*, *nB*, *nC i nD*.

Prosečni vremenski gubici raskrsnice tokom „zelene faze“, kada se radi o programskom rešenju, unose se preko kotrole definisane na prednoj ploči *VI*. Vrednost zaštitnog vremena za vozila izračunava se na osnovu matrice zaštitnih vrmenena za datu raskrsnicu, i takođe se neposredno unosi preko odgovarajuće kontrole na prednjoj ploči virtuelnog instrumenta. Zaštitna vremena za pešake određuju se na osnovu geometrijske strukture raskrsnice (*Prilog 9.*) i unose se takođe, upotrebom odgovarajućih kontrola. Vrednosti zasićenih saobraćajnih tokova $S_A$, $S_B$, $S_C$ i $S_D$ određuju se na osnovu odgovarajućih tabela (*Prilog 8.*) i direktno se unose u programski kod. Određivanje i unos prosečnih vrednosti saobraćajnih tokova, obzirom na određene specifičnosti

sistema za upravljanje saobraćajem, opisani su uz svaku raskrsnicu posebno. Za slučaj potrebe da se propuste vozila sa pravom prioriteta koriste se tasteri *A-C*, za pravac A-C i taster *B-D*, za pravac B-D. Pravo prioriteta ukida se naknadnim pritiskom na odgovarajući taster, mada je moguće da se vreme trajanja i programski ograniči.

Izlazne veličine programskih rešenja, pored tekućeg datuma i dnevnog vremena ($T_d$), su:

- vremenska osa ($z$),
- vrednost ciklusa ($C$), dužina prinudno produženog (zbog vozila sa prioritetom) ciklusa ($D$),
- stvarna, realna dužina ciklusa ($C_{real} = C_r$), kapaciteti saobraćajnnih traka ($ca, cb, cc, cd$),
- zeleno svetlo faze 1 ($g_1$), zeleno svetlo faze 2 ($g_2$),
- stepeni zasićenja saobraćjnih traka ($Xa, Xb, Xc, Xd$),
- dužina trajanja žutog svetla za pravac A-C, $x_1 = T_z(A\text{-}C)$,
- dužina trajanja žutog svetla za pracac B-D, $x_2 = T_z(B\text{-}D)$,
- dužina faze 1 ($g_1 + x_1$), taster za prolaz ($m1=1$ili $0$) vozila sa prioritetom, pravac A-C,
- dužina faze 2 ($g_2 + x_2$), taster za prolaz ($m2=1$ili $0$) vozila sa prioritetom, pravac B-D,
- tekuće vreme faze 1 ($f_1$), tekuće vreme faze 2 ($f_2$),
- maksimalne vrednosti stepena iskorišćenja kapaciteta u okviru faza ($Y_1$ *i* $Y_2$),
- vrednost maksimalnog stepena iskorišćenja kapaciteta raskrsnice ($Y$),
- ukupni vremenski gubici raskrsnice ($L$),
- indikator $x0$ da se vozilo nalazi u zoni dileme ($x0 = 1$ili $0$) na pravcu A-C,
- indikator $y0$ da se vozilo nalazi u zoni dileme ($y0 = 1$ili $0$) na pravcu B-D,
- vreme prolaska kroz raskrsnicu vozila sa prioritetom ($p1$) za pravac A-C i
- vreme prolaska kroz raskrsnicu vozila sa prioritetom ( $p2$), za pravac B-D.

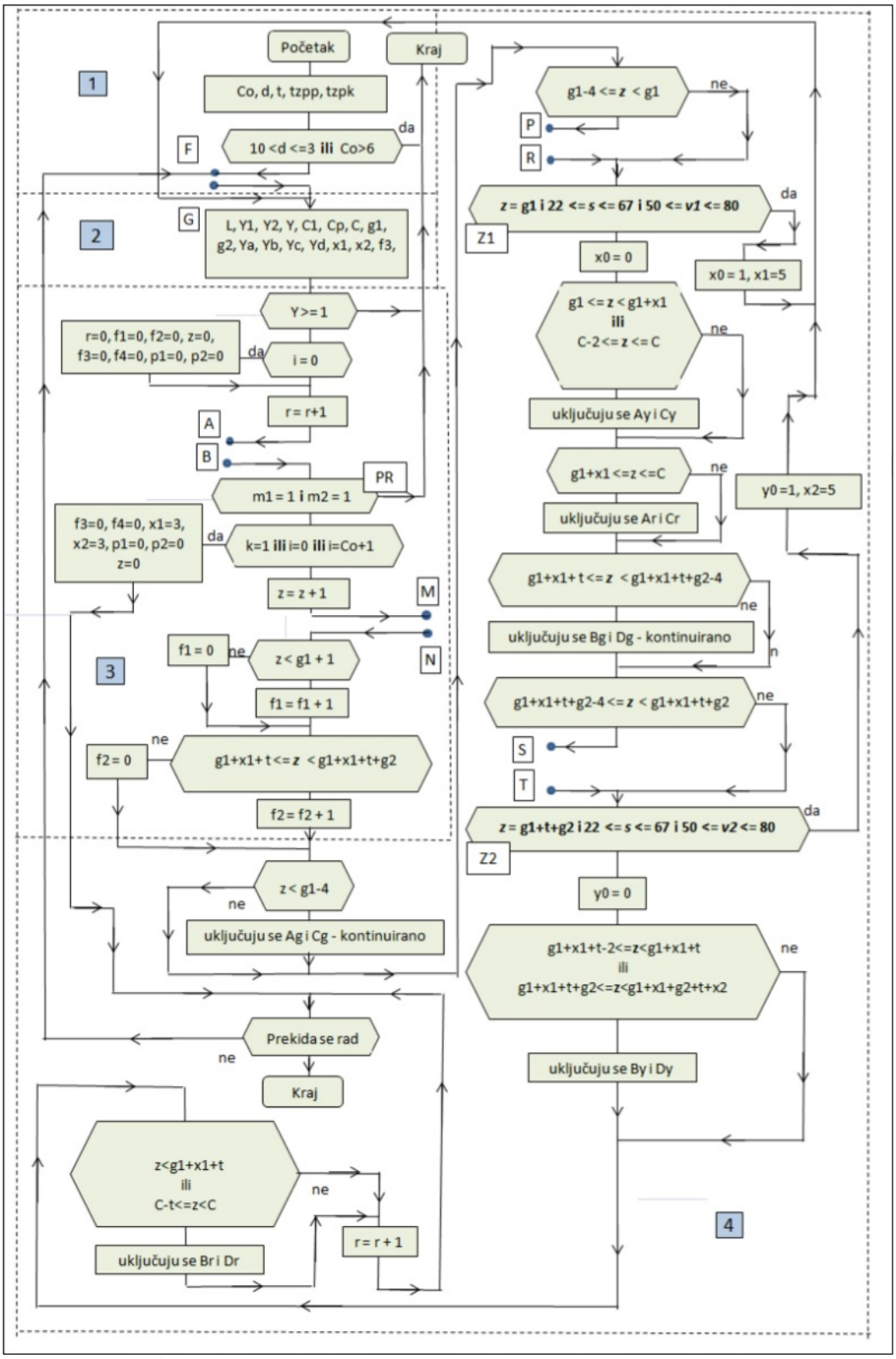
Vrednosti izlaznih veličina prikazuju se na prednjoj ploči virtuelnog instrumenta u numeričkom, ili u numeričkom i grafičkom obliku. Na prednjoj ploči sa grafičkim prikazom data su tri dijagrama koja prikazuju: *Broj vozila koja za deo ciklusa prodju kroz poprecni presek* saobraćajne trake, *Prosečan protok vozila* i *Stepen zasićenosti* saobraćajnih traka u zavisnosti od vremena, za sve pristupne prilaze raskrsnice, računajući vreme od momenta pokretanja programa, odnosno uključivanja sistema u rad.

U momentu pokretanja programa za kontrolu rada semafoskog sistema, sve izlazne veličine resetuju se na odgovarajuće početne vrednosti. Prekid rada programskog rešenja može se realizovati u bilo kom trenutku ciklusa. Naknadno pokretanje programa uzrokuje početak rada semaforskog sistema sa zelenim svetlosnim pojmom na prilazu A-C (početak faze 1).

Osnovni algoritam i elementi programskog rešenja za regulisanje saobraćaja na semaforizovanoj četvorokrakoj dvofaznoj raskrsnici prikazan je na slici 53. Algoritam sadrži, pored prikazanih delova, još pet podcelina i to:

- određivanje i unos prosečnih vrednosti saobračajnih tokova *Qa, Qb, Qc i Qd* (između tačaka F i G),
- prolaz vozila sa pravom prioriteta (između tačaka A i B)
- realizacija plana tempiranja za pešačke tokove (između tačaka M i N),
- treptuće zeleno svetlo za pravac A-C (tačke P i R) i
- treptuće zeleno svetlo za pravac B-D (tačke S i T).

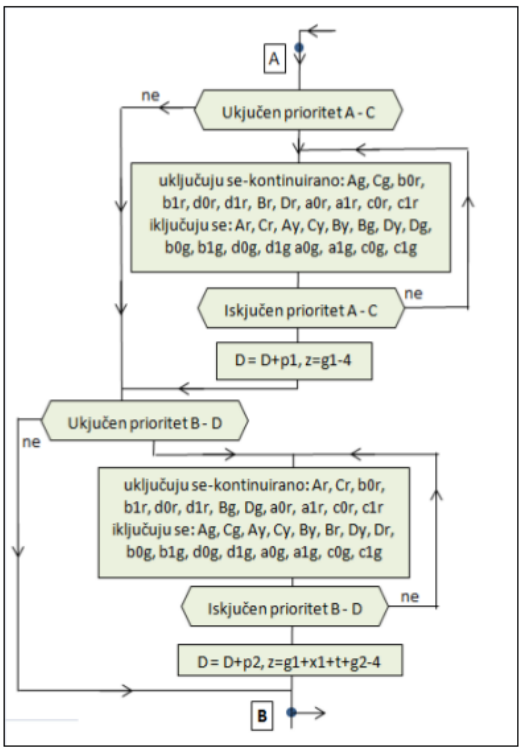
Zadnje četiri podceline identične su za sve tipove četvorokrakih dvofaznih semaforizovanih raskrsnica i prikazane su redom na slikama 54., 55. i 56., dok je prva karakteristična za svaku pojedinačnu raskrsnicu i njen sadržaj prikazan je uz opis svake od navedenih dvofaznih raskrsnica.



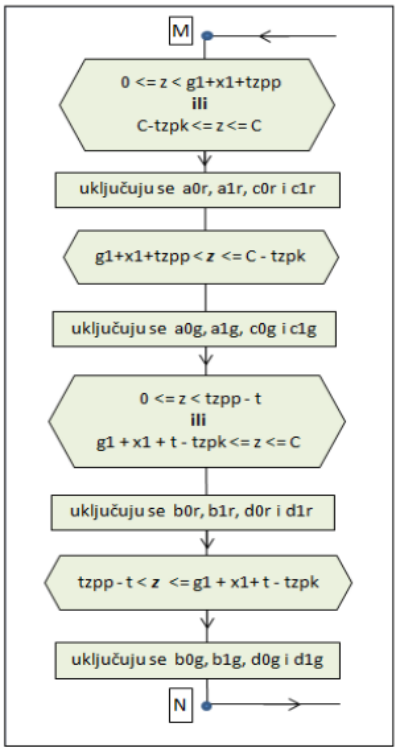

Slika 53. *Osnovni algoritam semaforizovane dvofazne raskrsnice*

Algoritam sadrži četiri celine. Prva celina (1) obuhvata unos vrednosti prosečnih vremenskih gubitaka po vozilu tokom „zelene faze“ (*d*), prosečnih vrednosti saobraćajnih tokova *Qa, Qb, Qc i Qd* (deo osnovnog algoritma između tačaka F i G, slika 53.), vrednosti inicijanog ciklusa *Co* (veća ili jenaka šest sekundi) i zaštitnih vremena za vozila (*t*) i za pešake ($t_{zpp}$ i $t_{zpk}$). Vrednosti veličina *d* i zaštitnih vremena su pozitivne. Minimalna vrednost zaštitnog vremena za vozila utvrđena je Zakonom i iznosi dve sekunde. U zavisnosti od geometrije raskrsnice i uslova odvijanja saobraćaja na njoj, zaštitno vreme za vozila može biti i veće od dve sekunde. Ukoliko se unose vrednosti koje su van navedenih intervala, program se ne izvršava.

U okviru druge celine (2) vrši se izračunavanje vrednosti ukupnih vremenskih gubitaka na raskrsnici (*L*), maksimalnih vrednosti stepena iskorišćenja kapaciteta ($Y_1$, $Y_2$ *i Y*), dužine trajanja ciklusa (*C, C1, D i* $C_{real}$), vrednosti zelenog svetla prve ($g_1$) i druge ($g_2$) faze i vrednosti stepena zasićenja saobraćajnih traka. Dobijene vrednosti i vrednosti trajanja žutog svetla za pravce A-C ($x_1$) i B-D ($x_2$) prikazju se na prednjoj ploči *VI*-a.

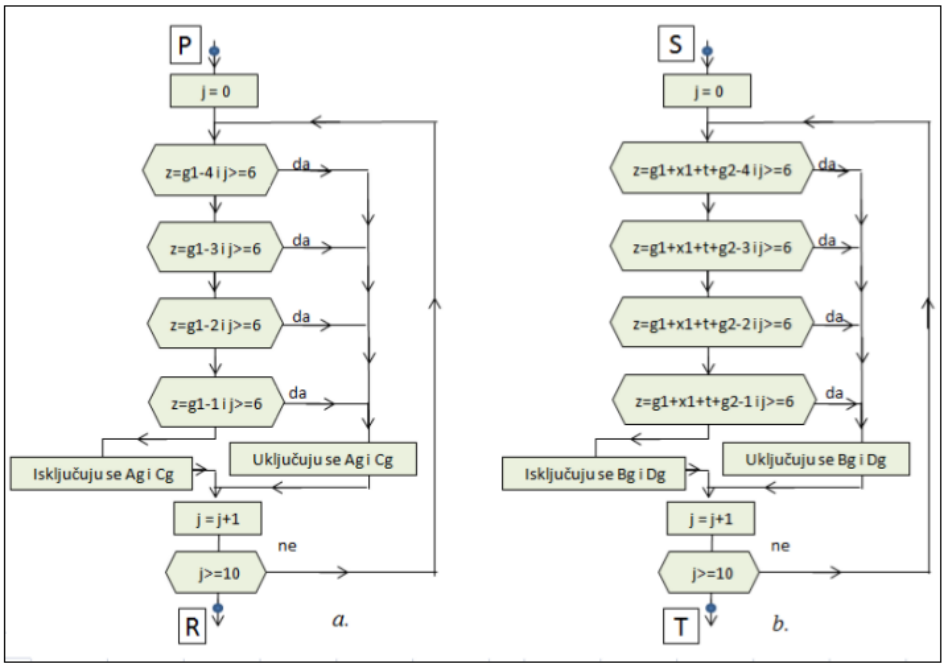



Slika 54. *Prolaz vozila sa pravom prioriteta*




Slika 55. *Plan tempiranja za tokove pešaka*

Treća celina algoritma (3) obuhvata podcelinu, slika 54., koja prikazuje sadržaj rada semaforskog sistema u uslovima kada kroz raskrsnicu, u pravcu A-C ili B-D, prolaze vozila sa pravom prioriteta (vatrogasna kola, kola hitne pomoći, policija i drugo) i podcelinu, slika 55., koja definiše plan tempiranja za pešačke tokove. U okviru ove celine takođe se definišu vremenska osa (*z*) i tekuća vremena zelenog svetla $f_1$ i $f_2$ u okviru prve i druge faze i omogućava se prikazivanje vrednosti ovih veličina na prednoj ploči virtuelnog instrumenta. Vremenska osa ponavlja se posle svakog ciklusa i predstavlja osnovnu veličinu na bazi koje se u četvrtoj celini (4) realizuje plan tempiranja signala, odnosno uključivanje i isključivanje odgovarajućih signalnih pojmova na semaforskim uređajima. Plan tempiranja signala je realizovan tako da se početak zelenog svetla prve faze ($g_1$) poklapa sa početkom (z = 0) vremenske ose.




Slika 56. *Treptuće zeleno svetlo za pravac A-C* (*a*.) i *pravac B-D* (*b*.)

Četvrta celina (4) obuhvata formiranje i realizaciju plana tempiranja za vozila uključujući i treptuća zelena svetla za pravce A-C i B-D (slika 56.), kao i rad semafora u uslovima kada se vozila nalaze u dilema zoni. Veličina dilema zone definisana je u skladu sa podacima prikazanim u Tabeli 7p. (*Prilog 12*.). Vozila se nalaze u dilema zoni ako su, u momentu pojave žutog signalnog pojma na semaforu pristupnog prilaza, na rastojanju do zaustavne linije većem od 22 m i manjim od 67 m i pri tome imaju brzinu veću od 50 km/h i manju od 80 km/h.

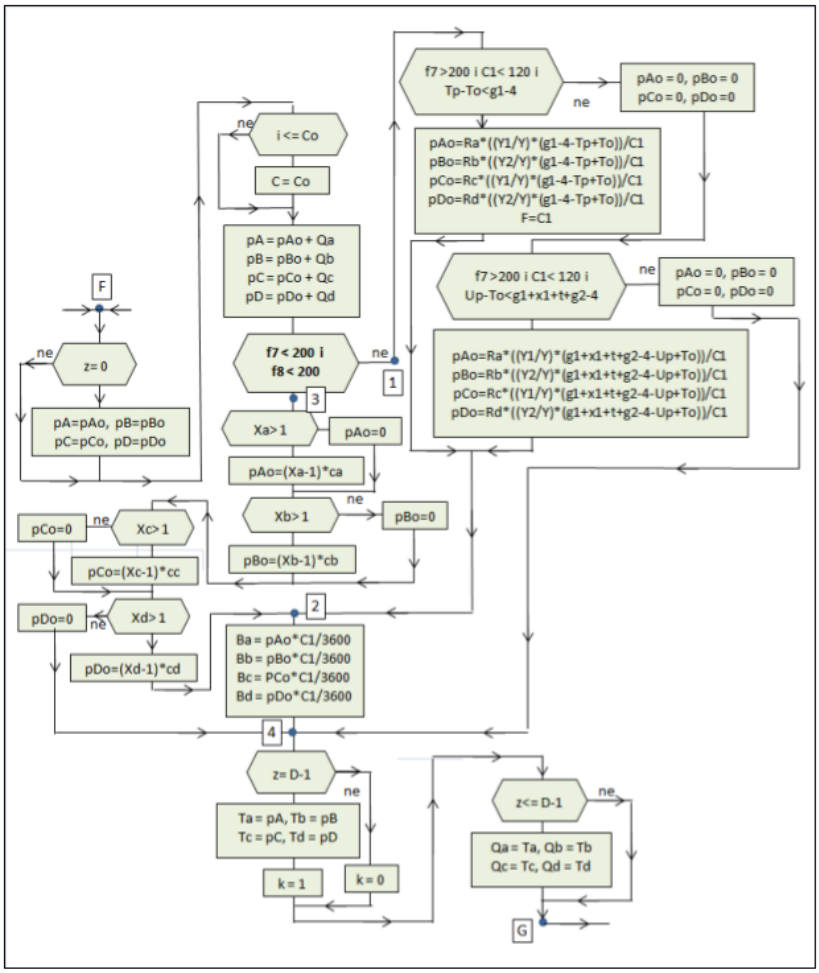
5.4.3.1.1. Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica sa fiksnim režimom rada i konstantnim vrednostima prosečnih tokova vozila bez i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme

Predloženi sistemi sa fiksnim režimom rada ovih semaforizovanih raskrsnica baziraju se na algoritmu prikazanom na slici 53., s tim što su, za sistem bez mogućnoti detekcije vozila sa prioritetom i vozila u zonama dileme, tačke A i B kratko spojene, a delovi algoritma PR, Z1 i Z2 izostavljeni. Na slici 57. prikazan je deo osnovnog algoritma, identičan za obe raskrsnice, koji obezbeđuje unos prosečnih saobraćajnih tokova na prilaznim trakama raskrsnice, a na slikama 59. i 60. prednje ploče odgovarajućih *VI*-a ovih sistema. Vrednosti intenziteta saobraćajnih tokova *Qa, Qb, Qc i Qd* prethodno su određene brojanjem saobraćaja na prilazima raskrsnice u toku određenog vremenskog perioda i tokom vremena ostaju konstantne.

Ako je na raskrsnici instalisan sistem koji ne vrši detekciju vozila sa prioritetom, niti vozila u zonama dileme, raskrsnica radi sa stalnom vrednošću ciklusa koja je određena na osnovu prosečnih vrednosti saobraćajnih tokova i ukupnih vremenskih gubitaka. Stepeni zasićenja prilaznih saobraćajnih traka takođe su konstantni tokom vremena, što podrazumeva da se na raskrsnici saobračaj odvija u uslovima nezasićenih tokova, odnosno da se tokom ciklusa opslužuju sva vozila koja su zatražila prolaz kroz raskrsnicu.

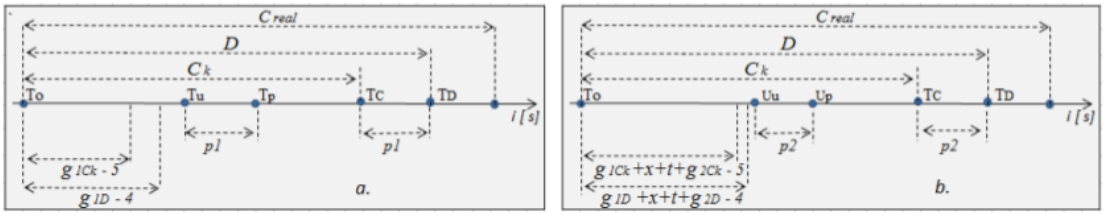
,

Međutim, ako na raskrsnici funkcioniše sistem sa fiksnim režimom rada sa mogućnošću detekcije vozila sa prioritetom i vozila u zonama dileme i ako, kroz raskrsnicu u toku ciklusa prolaze vozila sa prioritetom, na pravcu A-C, ili na pravcu B-D,onda dolazi do promena dužine vec



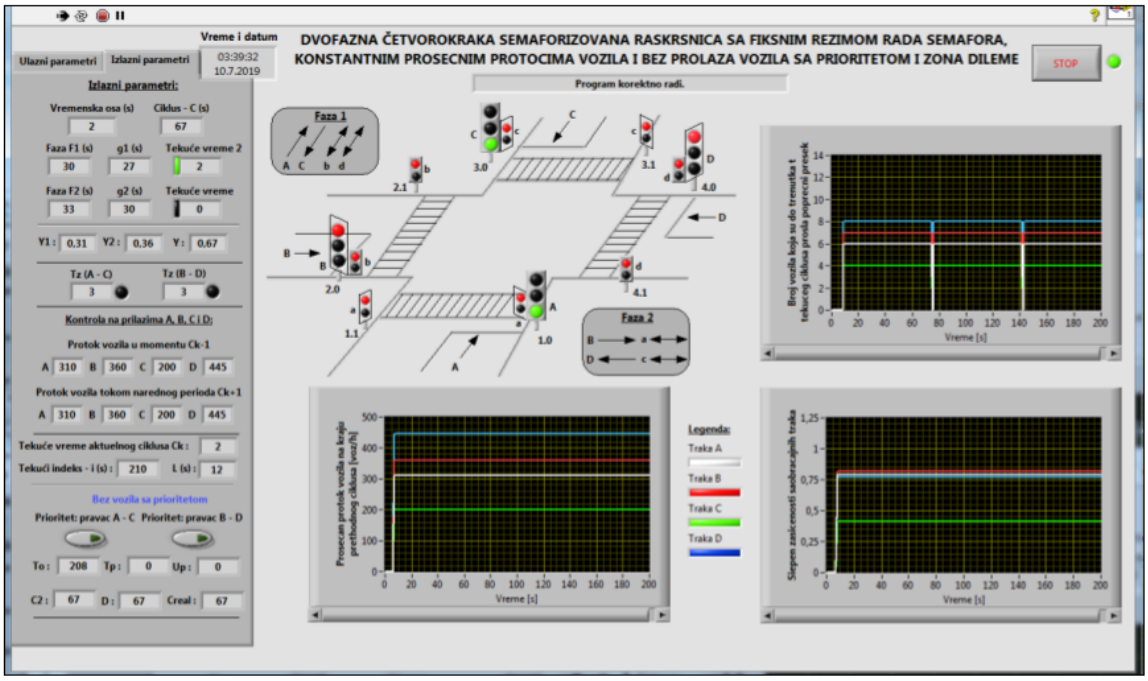

Slika 57. *Struktura dela osnovnog algoritma za unos prosečnih vrednosti saobračajnih tokova*

izračunatog ciklusa i dužine trajanja zelenog svetla. Zbog toga će, u ovakvim slučajevima, realna, stvarna dužina trajanja aktuelnog ciklusa ($C_{real}$) imati drugu vrednost u odnosu na onu ($C1 = C = C_k$) izračunatu na osnovu postojećih ulaznih parametara. Vrednost realnog ciklusa određuje se na sledećei način. Neka su (slika 58.), na realnoj vremenskoj osi *i*, veličine:




Slika 58. *Određivanje realne dužine trajanja ciklusa, a. prolaz vozila sa prioritetom kroz raskrsnicu na pravcu A-C, b. prolaz vozila sa prioritetom kroz raskrsnicu na pravcu B-D*

- $T_o$ – trenutak početka aktuelnog, posmatranog ciklusa tokom kojeg može doći do prolaza vozila sa pravom prioriteta,
- $T_u$ – trenutak aktiviranja tastera za prolaz vozila sa prioritetom na pravcu A-C,
- $T_p$ – trenutak isključenja tastera za pravac A-C
- $U_u$ – trenutak aktiviranja tastera za prolaz vozila sa prioritetom na pravcu B-D,
- $U_p$ – trenutak isključenja tastera za pravac B-D

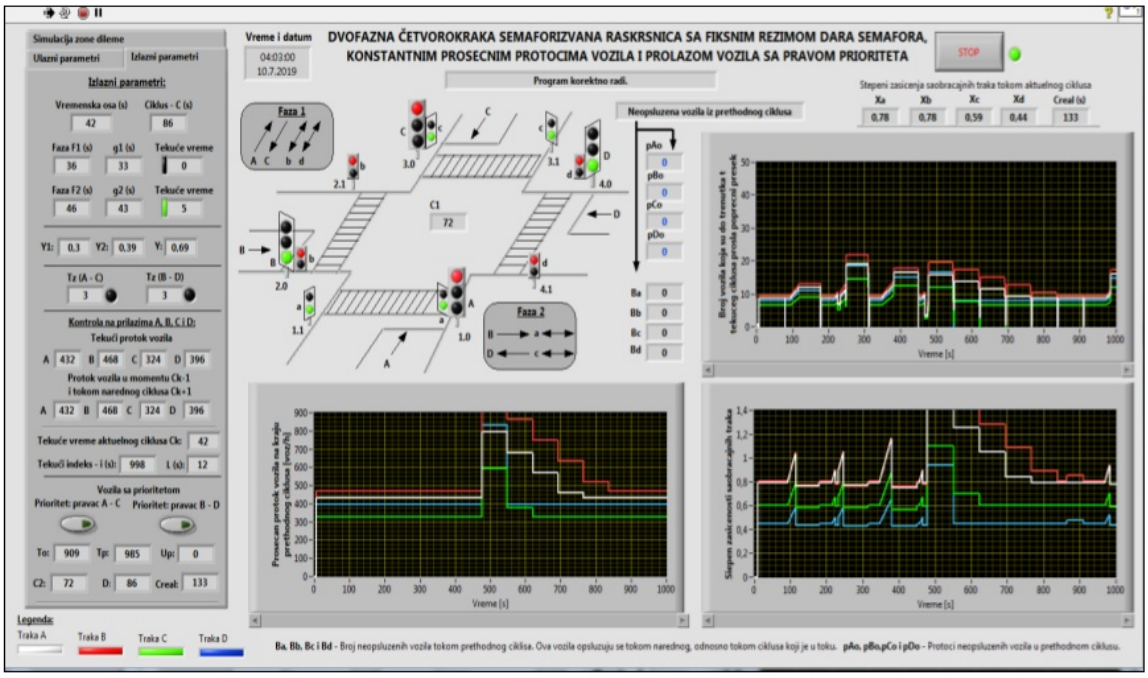



Slika 59. *Prednja ploča VI-a sistema za upravljanje saobraćajem sa fiksnim režimom rada bez detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

i neka je, primera radi, tokom ciklusa proščo vozilo sa prioritetom kroz raskrsnicu i to od trenutka $T_u$ do $T_p$ na pravcu A-C (slika 58 *a*.). Kad god se uključuje taster[19] za pravac A-C veličina $z$ – uzima vrednost $g_{1Ck}$ *-5*, gde je $g_{1Ck}$ dužina trajanja zelenog svetla za ovaj pravac određena na bazi proračunate vrednost ciklusa $C_k$, i na taj način obezbeđuje kontinuirano zeleno svetlo za nesmetan prolaz vozila sa pravom prioriteta. Kada se taster isključi $z$ – uzima vrednost $g_{1D}$ *- 4*, gde je $g_{1D}$ dužina trajanja zelenog svetla izračunata na bazi vrednosti prinudno produženog tekućeg ciklusa $D$, obezbeđujući treptuće zeleno svetlo na semaforima za pravac A-C čime se vozačima stavlja do znanja da će se nakon četiri sekunde, na pristupnom semaforu, aktivirati crveno svetlo. Vrednost veličine z – dalje se povećava sve do trenutka $T_D$ (tada je $z=D$) nakog čega je $z = 0$, odnosno počinje novi ciklus. Slično tome, kad god se uključuje taster za pravac B-D, $z$ – uzima vredbnost $g_{1Ck}+x_1+t+g_{2Ck}$ *- 5* (obezbeđuje se kontinuirano zeleno svetlo i nesmetan prolaz vozila sa prioritetom duž pravca B-D), a kada se isključuje, vrednost $g_{1D}+x_1+t+g_{2D}$ *- 4* (početak treptućeg zelenog svetla za ovaj pravac). Vrednost veličine $z$ – se dalje povećava sve dok ne dostigne vrednost $D$ (u trenutku $T_D$) nakon čega započinje novi ciklus. Dužina prinudno produženog ciklusa

[19] Pre uključenja tastera *m1* ili *m2*, vrednost ciklusa je $C = C1$.

$D$ jednaka je zbiru proračunatog ciklusa $C_k$ i ukupnog vremena trajanja prolaza vozila sa prioritetom kroz raskrsnicu, odnosno




Slika 60. *Prednja ploča VI-a sistema za upravljanje saobraćajem sa fiksnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

$$D = C_k + p_1$$

ili za slučaj prikazan na slici 58 *a*.

$$D = C_k + p_1 = T_D - T_o$$

Sa slike 58 *a*. takođe se vidi da se stvarna dužina ciklusa, za slučaj kada je tokom aktuelnog ciklusa bio prolaz vozila sa prioritetom kroz raskrsnicu, na pravcu A-C, može odrediti kao:

$$C_{real} = (T_u - T_o) + (T_p - T_u) + [(T_D - T_o) - (g_{1D} - 4)]$$

odnosno

$$C_{real} = T_p - T_o + D - (g_{1D} - 4) \qquad (22)$$

gde je $T_p$ – trenutak kada je isključen taster nakon završetka prolaza vozila sa pravom prioriteta duž pravca A-C. Na isti način pokazaje se, da se dužina realnog ciklusa, ako je $U_p$ –trenutak isključenja

tastera nakon završetka poslednjeg prolaza za pravac B-D, može izračunati po relaciji:

$$C_{real} = U_p - T_o + D - (g_{1D} + x_1 + t + g_{2D} - 4) \qquad (23)$$

Nakon završetka ovog ciklusa započinje naredni, novi ciklus. Na počeku i tokom novog ciklusa protoci vozila su najčešće znatno veći nego što bi bili da u prethodnom nije bilo prolaza vozila sa prioritetom. Međutim, dužina trajanja novog proračunatog ciklusa je ista (kao ona bez prioritetnih vozila), tako da je moguće da, u ovom kao i u mnogim drugim nepredvidim slučajevima, tokom ciklusa ne budu opslužena sva vozila, što dovodi do većeg broja zaustavljanja, do povećanja vremenskih gubitaka i potrošnje goriva, kao i do porasta stepena zagađenja životne okoline.

Ako se u toku ciklusa desi da se neko vozilo nađe u zoni dileme, sistem identifikuje prisustvo takvog vozila i automatski produžava trajanje žutog svetla (sa tri na pet sekundi) na pristupnom semaforu kako bi omogućio bezbedan prolaz vozila kroz raskrsnicu.

Određivanje početnih vrednosti intenziteta saobraćajnih tokova *pAo, pBo, pDo* i *pDo*, za slučajeve kada kroz raskrsnicu prolaze vozila sa prioritetom, detaljno je opisano u delu 5.4.3.1.3. disertacije. Ovde je potrebno samo naglasiti da je moguće da, posle prolaza vozila sa prioritetom kroz raskrsnicu, intenziteti neopsluženih vozila koji se „prebacuju“ iz aktuelnog ciklusa ($C_{k-1}$) u naredni ($C_k = C1$) budu veći nego što je u ciklusu $C_k$ moguće opslužiti vozila. Tada se deo intenziteta neopsluženih vozila ponovo „prebacuje“ u sledeći ciklus ($C_{k+1}$). Realizacija ovog dela rada sistema prikazana je između tačaka 3. i 4. dela osnovnog algoritma na slici 57.

Sistem semaforizovane raskrsnice sa fiksnim režimom rada i konstantnim vrednostima prosečnih tokova vozila sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme, iako vrši korekciju ciklusa kada kroz raskrsnicu prolaze vozila sa prioritetom, nije adaptivni sistem u smislu kako je to definisano u odeljku 5.3. disertacije. Međutim, njegova prednost je u tome što, nakon završetka prolaska vozila sa prioriteom kroz raskrsnicu, za relativno kratko vreme, uspostavlja odvijanje saobraćaja sa nezasićenim saobraćajnim tokovima. .

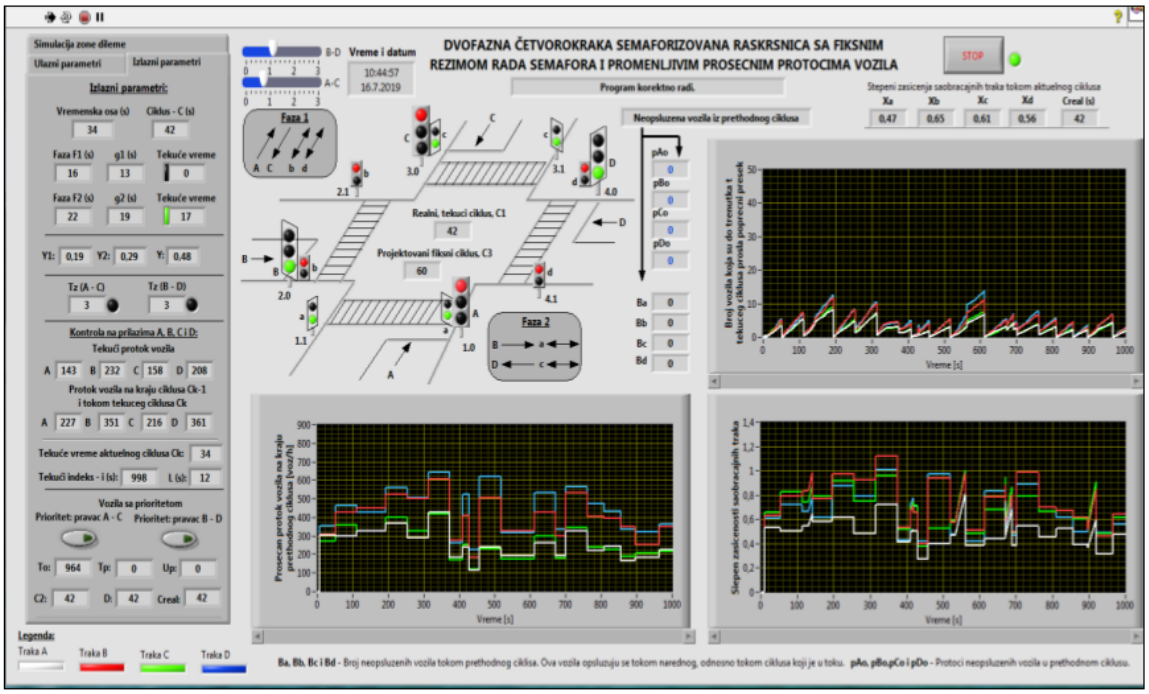
Aplikacija za rad sistema urađena je korišćenjem programskog paketa LabVIEW. Operacije naznačene u algoritmu realizuju se u okviru *While petlje* koja se periodično ponavlja sa periodom od jedne sekunde. Trepćuće zeleno svetlo programski je realizovano pomoću dve posebne *While petlje* u kojima se, tokom jedne sekunde, ostvaruje deset ciklusa sa periodom od po 0,1 sekunde.

Rad programa može se prekinuti na bilo kom mestu pritiskom na dugme STOP na prednjoj ploči *VI*-a.

5.4.3.1.2. Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intenzitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme

U velikom broju slučajeva saobraćaj na raskrsnicama odvija se u uslovima koji odgovaraju ovom sistemu rada semafora. Naime, na raskrsnici se unapred definiše, odnosno projektuje fiksna dužina ciklusa (*C3*) pretpostavljajući da će tokom vremena prosečne vrednosti saobraćajnih tokova, na osnovu kojih je izračunata vrednost *C3*, biti konstantne. Međutim, u stvarnosti se ove vrednosti menjaju iz časa u čas, tokom dana ili nedelje, zatim kroz raskrsnicu mogu tokom ciklusa prolaziti vozila sa pravom prioriteta i drugo, što sve može dovesti do pojave prezasićenih tokova i do zagušenja u saobraćaju. Sa druge strane, u slučajevima smanjenja protoka vozila može doći, zbog fiksne dužine ciklusa, do povećenja vremenskih gubitaka i koncentracije izduvnih gasova i do dodatnog zagađenja životne okoline.

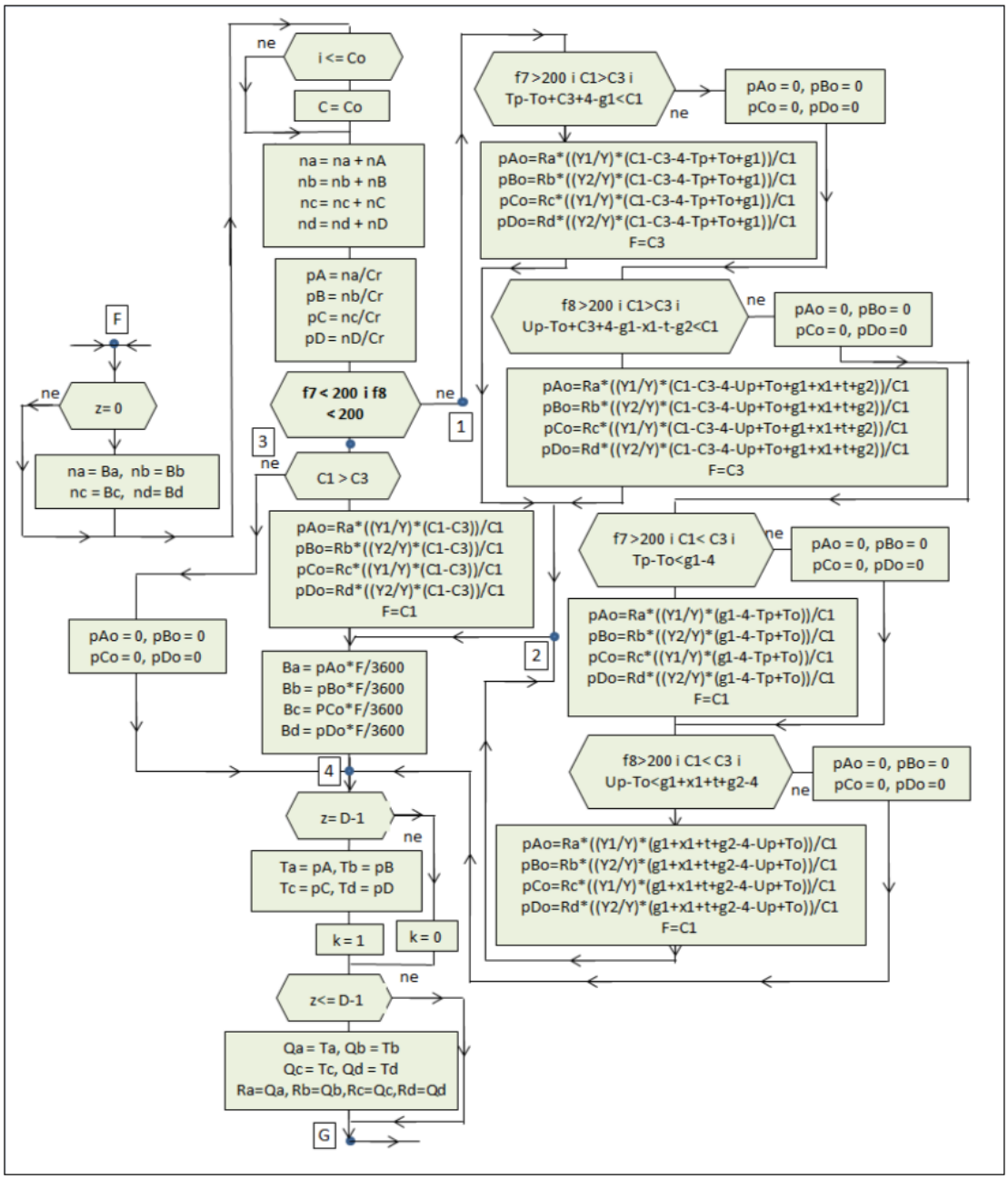
Sistem koji se predlaže u disertaciji i koji se može koristiti za regulisanje saobraćaja na ovakvim raskrsnicama, je adaptivni sistem i u velikoj meri vrši eliminaciju uzroka koji dovode do navedenih i sličnih negativnih pojava. Funkcioniše tako što najpre, na osnovu stvarnih vrednosti prosečnih saobračajnih tokova na prilaznim trakama, izračunava odgovarajuću realnu dužinu ciklusa *C1*, a zatim upoređuje dobijenu vrednost sa vrednošću projektovanog fiksnog ciklusa *C3*. *Ako tokom ciklusa kroz raskrsnicu ne prolaze vozila sa prioritetom i ako je C1<C3, sistem omogućava da raskrsnica radi sa dužinom ciklusa C1 i time u znatnoj meri smanjuje vreme čekanja vozila na raskrsnici. Ukoliko je C1>C3, raskrsnica funkcuoniše sa ciklusom dužine C3*. Kada kroz raskrsnicu, tokom određenog ciklusa, prolaze vozila sa prioritetom, sistem obezbeđuje rad sa realnim ciklusom ($C_{real}$) čija dužina zavisi od vremena za koje vozila prođu kroz raskrsnicu, trenutka uključenja odgovarajućeg tastera i pravca kojim vozila prolaze.




Slika 61. *Prednja ploča VI-a sistema za upravljanje saobraćajem sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intenzitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

Rad sitema zasniva se, kao što je već izneto, na osnovnom algoritmu prikazanom na slici 53. Na slici 61. prikazan je sadržaj prednje ploće *VI-a* opisanog sistema, a na slici 62. deo osnovnog algoritma između tačaka F i G kojim se određuju prosečne vrednosti saobraćajnih tokova vozila tokom ciklusa i intenziteti i broj neopsluženih vozila u okviru akuelnog ciklusa. Način određivanja promenljivih prosečnih vrednosti tokova vozila na pristupnim trakama semaforizovanih raskrsnica, prikazan je u okviru dela u kome se opisuje funkcionisanje semaforizovane raskrsnice sa četiri faze. U ovom delu, u tekstu koji sledi, opisuje se način određivanja intenziteta i broja neopsluženih

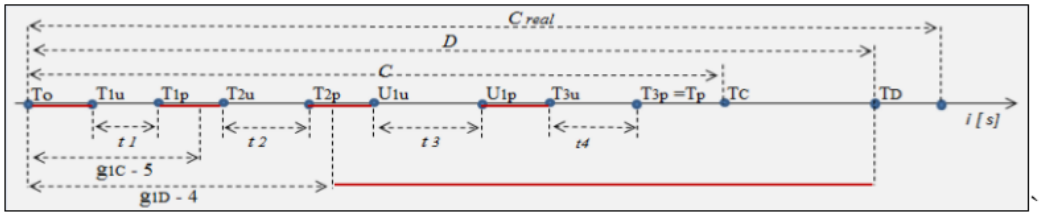
vozila koji se koristi za sve tipove raskrsnica navedenih u disertaciji a koje funkcionišu sa sistemima za upravljanje saobraćajem koji ove podatke obezbeđuju.




Slika 62. *Deo osnovnog agloritma, između tačaka F i G, sistema za upravljanje saobraćajem semaforizovane dvofazne raskrsnice sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intenzitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

Neka su veličine *pAo, pBo, pCo i pDo* redom intenziteti neopsluženih vozila tokom tekućeg ciklusa. Obzirom da nisu opslužena u tekućem, ona se opslužuju u sledećem ciklusu, što podrazumeva da ih je potrebno uključiti na početku tog ciklusa. Dakle, *pAo, pBo, pCo* i *pDo* predstavljaju početne vrednosti intenziteta saobraćajnih tokova *pA, pB, pC* i *pD* na poćetku sledećeg ciklusa. Ako su u prethodnom ciklusu opslužena sva vozila, onda su $pAo = 0$, $pBo = 0$, $pCo = 0$ i $pDo = 0$.

Vrednost ciklusa, dobijena na osnovu stvarnih, realnih vrednosti inteziteta saobraćajnih tokova označena je simbolom *C1*. Ona može biti veća ili manja od projektovane *C3*. Bilo da je $C1 > C3$, ili $C1 < C3$, u oba slučaja postoji mogućnost, da tokom ciklusa prolaze vozila sa pravom prioriteta ili da uopšte ne prolaze. Ako vozila sa prioritetom prolaze kroz raskrsnicu, vrednost dužine ciklusa raste sve dok prolaz traje, i po završetku prolaza $C = C1 + p = D$, gde je *p* vreme za koje vozila sa prioritetom prođu kroz raskrsnicu. Prolaz vozila sa prioritetom može se desiti jednom ili više puta i u tom slučaju, tokom ciklusa, postoji deo vremena u kome se ostala vozila ne opslužuju (čekaju dok se ne završi prolaz prioritetnih vozila) i drugi deo tokom kojeg se opslužuju. Vreme oppsluživanja ($V_{ops}$) vozila, ako je zadnji taster koji se isključuje *m1* (pravac A-C), može se odrediti, slika 63., na sledeći način:




Slika 63. *Određivanje vremena opsluživanja vozila u toku aktuelnog ciklusa*

$$V_{ops} = (T_{1u} - T_o) + (T_{2u} - T_{1p}) + (U_{1u} - T_{2p}) + (T_{3u} - U_{1p}) + D - (g_{1D} - 4)$$

i, obzirom da je $D = C1 + p = C1 + (T_{1p} - T_{1u}) + (T_{2p} - T_{2u}) + (U_{1p} - U_{1u}) + (T_{3p} - T_{3u})$, dobija se

$$V_{ops} = Tp - To + C1 - (g_{1D} - 4), \text{ ako je } C1 < C3, \text{ ili} \quad (24a)$$
$$V_{ops} = Tp - To + C3 - (g_{1D} - 4), \text{ ako je } C1 > C3. \quad (24b)$$

Na sličan način može se dobiti da je vreme opsluživanja za slučaj da je zadnji taster koji se isključuje *m2* (pravac B-D):

$$V_{ops} = Up - To + C1 - (g_{1D} + x_1 + t + g_{2D} - 4), \text{ ako je } C1 < C3, \text{ ili} \quad (25a)$$
$$V_{ops} = Up - To + C3 - (g_{1D} + x_1 + t + g_{2D} - 4), \text{ ako je } C1 > C3. \quad (25b)$$

Ako je $C1 > C3$ i tokom ciklusa prolaze vozila sa prioritetim, pri čemu je vreme opsluživanja vozila (24b), odnosno (25b) veće od *C1*, onda za to vreme kroz raskrsnicu prolaze sva vozila koja su ispostavila takav zahtev, pa je $pAo = pBo = pCo = pDo = 0$. Ako taj uslov nije ispunjen, onda su vrednosti ovih veličina različite od nule i iznose:

$$pAo = (Ra*(Y1/Y)*(C1 - L) - Ra*(Y1/Y)*(V_{ops} - L))/C1$$
$$pBo = (Rb*(Y2/Y)*(C1 - L) - Rb*(Y2/Y)*(V_{ops} - L))/C1$$
$$pCo = (Rc*(Y1/Y)*(C1 - L) - Rc*(Y1/Y)*(V_{ops} - L))/C1$$
$$pDo = (Rd*(Y2/Y)*(C1 - L) - Rd*(Y2/Y)*(V_{ops} - L))/C1$$

$$\begin{aligned} pAo &= Ra*((Y_1/Y)*(C1\text{-}C3\text{-}4\text{-Tp+To}+g_{1D}))/\text{C1}, \\ pBo &= Rb*((Y_2/Y)*(C1\text{-}C3\text{-}4\text{-Tp+To}+g_{1D}))/\text{C1}, \\ pCo &= Rc*((Y_1/Y)*(C1\text{-}C3\text{-}4\text{-Tp+To}+g_{1D}))/\text{C1}, \\ pDo &= Rd*((Y_2/Y)*(C1\text{-}C3\text{-}4\text{-Tp+To}+g_{1D}))/\text{C1}, \end{aligned} \tag{26}$$

za slučaj da je ispunjen uslov (24b) i $V_{ops} < C1$, odnosno:

$$\begin{aligned} pAo &= Ra*((Y_1/Y)*(C1\text{-}C3\text{-}4\text{-Up+To}+g_{1D}+x1+t+g_{2D}))/C1, \\ pBo &= Rb*((Y_2/Y)*(C1\text{-}C3\text{-}4\text{-Up+To}+g_{1D}+x1+t+g_{2D}))/C1, \\ pC\ o &= Rc*((Y_1/Y)*(C1\text{-}C3\text{-}4\text{-Up+To}+g_{1D}+x1+t+g_{2D}))/C1, \\ pDo &= Rd*((Y_2/Y)*(C1\text{-}C3\text{-}4\text{-Up+To}+g_{1D}+x1+t+g_{2D}))/C1, \end{aligned} \tag{27}$$

za slučaj (25b) i $V_{ops} < C1$.

Vozila sa prioritetom mogu prolaziti kroz raskrsnicu i u slučajevima kada je $C1 <$ C3. Pri tome se može desiti da je vreme opsluživanja (24a), odnosno (25a) duže ili kraće od $C1$. U prvom slučaju za vreme trajanja ciklusa kroz raskrsnicu prolaze sva vozila koja su zahtevala prolaz, pa su $pAo = pBo = pCo = pDo = 0$, odnosno ne postoje neopslužena vozila tokom ciklusa. Međutim, u drugom slučaju kada je vreme opsluživanja vozila manje od $C1$, tokom aktuelnog ciklusa neće kroz raskrsnicu proći sva vozila, već će jedan broj ostati za sledeći ciklus. Intenziteti tokova ovih vozila, koji se kao početne vrednosti pojavljuju u sledećem ciklusu, iznose:

$$\begin{aligned} pAo &= Ra*((Y_1/Y)*(g_{1D}\text{-}4\text{-Tp+To}))/C1, \\ pBo &= Rb*((Y_2/Y)*(g_{1D}\text{-}4\text{-Tp+To}))/C1, \\ pCo &= Rc*((Y_1/Y)*(g_{1D}\text{-}4\text{-Tp+To}))/C1, \\ pDo &= Rd*((Y_2/Y)*(g_{1D}\text{-}4\text{-Tp+To}))/C1, \end{aligned} \tag{28}$$

za slučaj da je ispunjen uslov (24a) i $V_{ops} < C1$, odnosno:

$$\begin{aligned} pAo &= Ra*((Y_1/Y)*(g_{1D}+x1+t+g_{2D}\text{-}4\text{-Up+To}))/C1, \\ pBo &= Rb*((Y_2/Y)*(g_{1D}+x1+t+g_{2D}\text{-}4\text{-Up+To}))/C1, \\ pCo &= Rc*((Y_1/Y)*(g_{1D}+x1+t+g_{2D}\text{-}4\text{-Up+To}))/C1, \\ pDo &= Rd*((Y_2/Y)*(g_{1D}+x1+t+g_{2D}\text{-}4\text{-Up+To}))/C1, \end{aligned} \tag{29}$$

za slučaj (25a) i $V_{ops} < C1$.

Na kraju, ako u toku ciklusa ne prolaze vozila sa prioritetom i ako je dužina obračunatog ciklusa $C1 < C3$, vrednosti veličina $pAo$, $pBo$, $pCo$ i $pDo$ jednake su nuli, a ako je $C1 > C3$ vrednosti su:

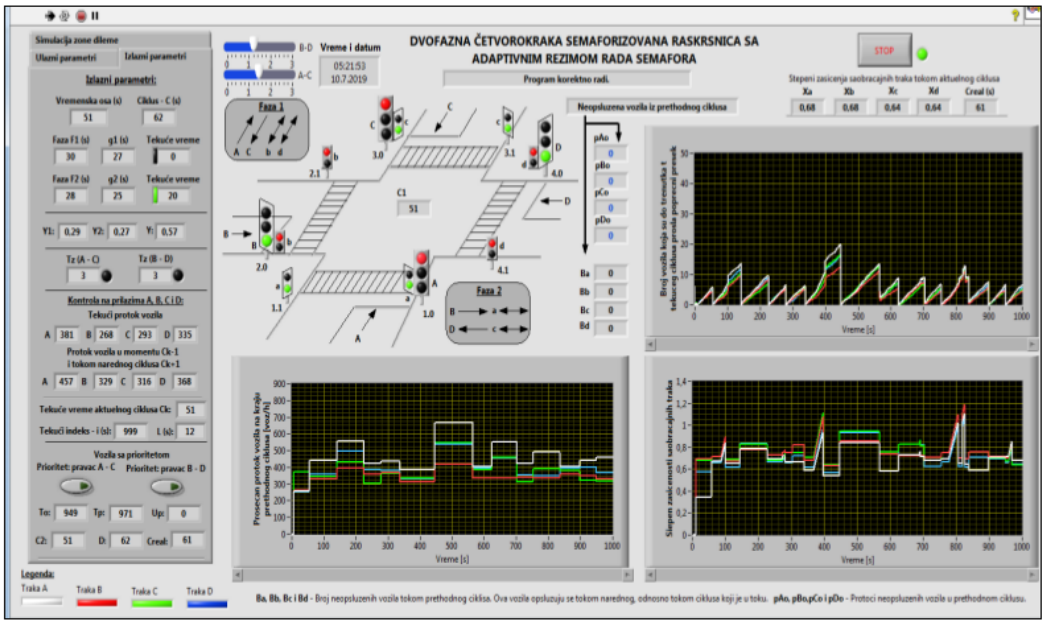
$$
\begin{aligned}
pAo &= Ra*((Y_1/Y)*(C1-C3))/C1,\\
pBo &= Rb*((Y2/Y)*(C1-C3))/C1,\\
pCo &= Rc*((Y1/Y)*(C1-C3))/C1,\\
pDo &= Rd*((Y2/Y)*(C1-C3))/C1.
\end{aligned}
\tag{30}
$$

Deo algoritma na slici 62. obuhvata sve ove slučajeve, pri čemu segment između tačaka 1.i 2. obuhvata situacije kada kroz raskrsnicu prolaze vozila sa pravom prioriteta, a deo od tačke 3. do tačke 4. slučajeve kada takvih prolaza nema. Razgraničenje ovih slučajeva realizovano je veličinama *f7* (za taster *m1*) i *f8* (za taster *m2*). Naime, ukoliko se tasteri ne uključuju, vrednosti *f7* i *f8* se, tokom ciklusa, posle svake sekunde povećavaju se za 1, a ako su uključeni za 200. Broj 200 je proizvoljno izabran. Na taj način, nakon islkjučenja tastera *m1* ili *m2* sačuvana je informacija da li je tokom ciklusa bilo prolaza vozila (*f7,* ili *f8* je veće od 200) sa prioritetom ili ne.

Na osnovu izračunatih vrednosti intenziteta neopsluženih vozila određuje se broj neopsluženih vozila za svaku pristupnu saobraćajnu traku $Ba = pAo*F$, $Bb = pBo*F$, $Bc = pCo*F$ i $Bd = pDo*F$ tokom odgovarajućeg ciklusa, gde je $F = C1$, *za* $C1 < C3$ *i* $F = C3$, *za* $C1 > C3$.

5.4.3.1.3. Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme

Funkcionisanje ove raskrsnice je identično prethodnoj. Jedina razlika je u tome što je kod ove raskrsnice projektovana vrednost ciklusa *C3* = 120 sekundi.

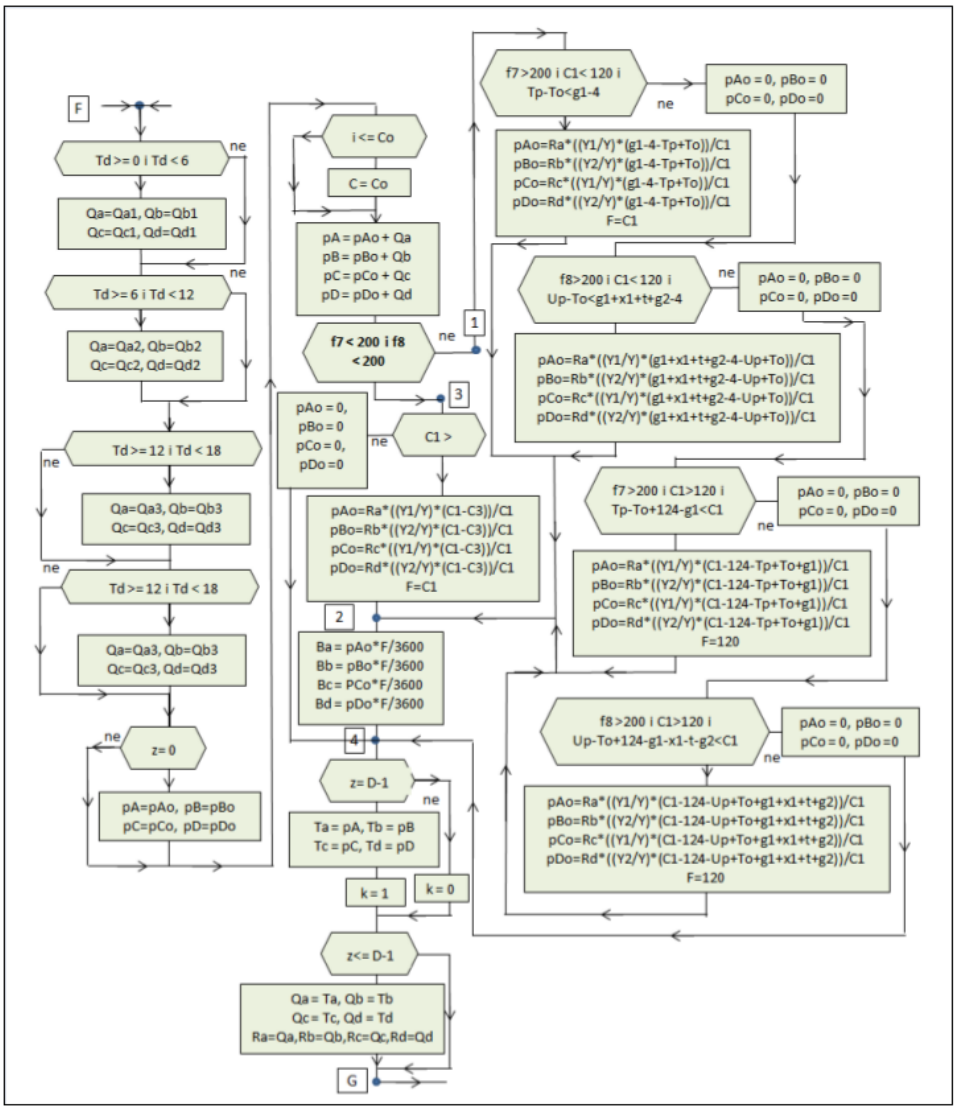



Slika 64. *Izgled prednje ploće VI-a adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem na dvofaznoj četvorokrakoj semaforizovanoj raskrsnici*

Sistem za upravljanje saobraćajem radi na osnovu algoritma sa slike 53. i podceline osnovnog algoritma između tačaka F i G (slika 62.) u kojoj je vrednost veličine *C3*=120 s. Na slici 64. prikazana je sadržina prednje ploče *VI-a* ovog sistema.

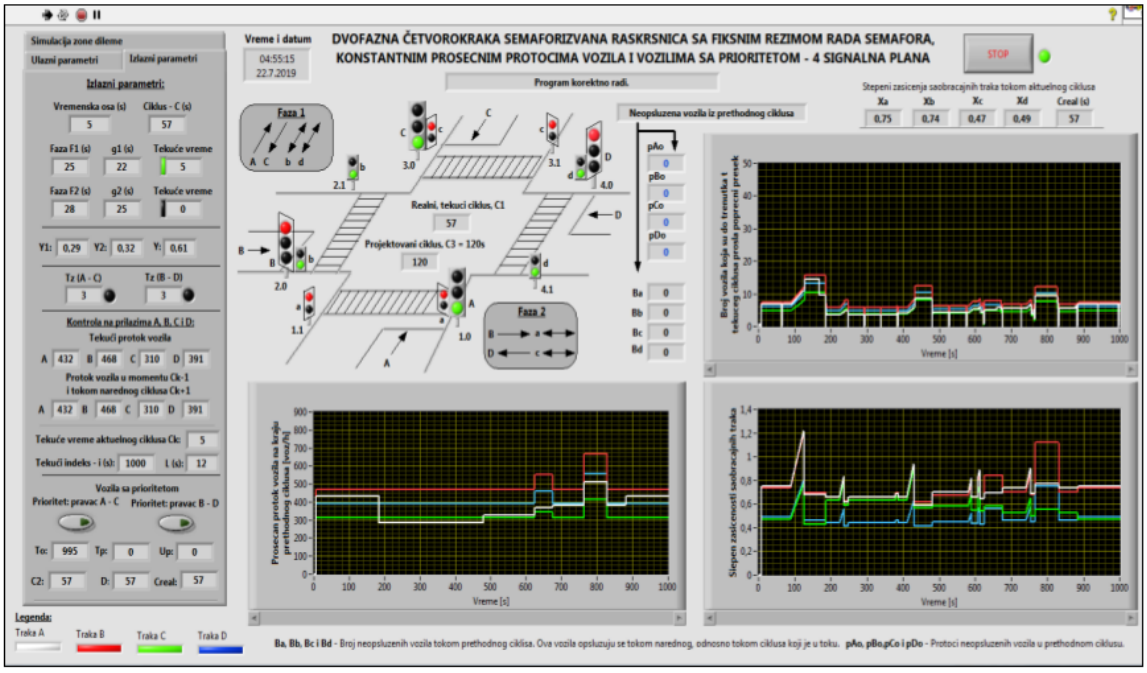
5.4.3.1.4. Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica sa različitim dnevnim signalnim planovima i mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme

Raskrsnica sa više dnevnih signalnih planova može funkcinisati sa dva ili više planova tokom dana. U disertaciji je prezentovana semaforizovana raskrsnica sa četiri signalna plana u toku dana. Sa aspekta sistemskog i programskog rešenja, ona predstavlja celinu od četiri serijski povezane dvofazne raskrsnice sa projektovanom fiksnom dužinom ciklusa (*C3*) i promenljivim prosečnim protocima vozila, pri čemu je *C3* = 120s. Rad raskrsnice bazira se na osnovnom algoritmu (slika 53.) i podcelini, između tačaka F i G, čija je struktura prikazana na slici 65.




Slika 65. *Deo osnovnog algoritma sa slike 53., između tačaka F i G*

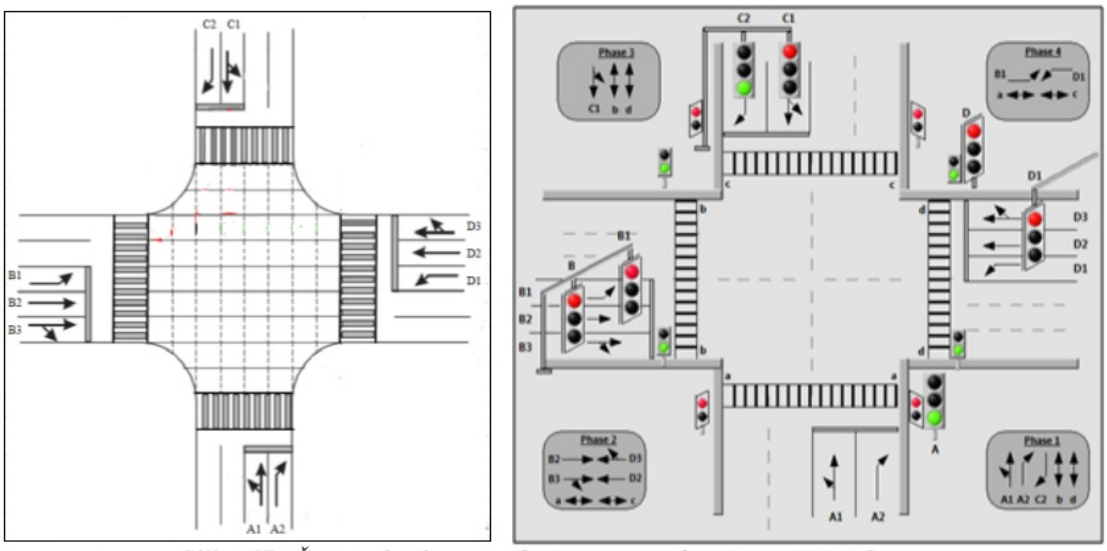
Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica sa četiri različita dnevna signalna plana po pravilu se projektuje na bazi dnevne časovne neravnomernosti saobraćajnih protoka na prilazima raskrsnici. U ovom slučaju posmatraju se četiri vremenska intervala u toku dana i to: od 0 – 6 sati, od 6 – 12 sati, od 12 – 18 sati i od 18 - 24 sata. Na osnovu višednevnih merenja i brojanja saobraćaja određene su, za svaki od navedenih vremenskih intervala, prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na prilazima raskrsnici i to: $Q_{a1}$, $Q_{b1}$, $Q_{c1}$ *i* $Q_{d1}$ – prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na prilazima A, B, C i D redom u vremenskom intervalu od 0 – 6 sati, zatim prosečne vrednosti saobraćajnih tokava za drugi i treći vremenski interval, odnosno $Q_{a2}$, $Q_{b2}$, $Q_{c2}$ *i* $Q_{d2}$, $Q_{a3}$, $Q_{b3}$, $Q_{c3}$ *i* $Q_{d3}$ i, za vremenski interval od 18 – 24 sata, $Q_{a4}$, $Q_{b4}$, $Q_{c4}$ *i* $Q_{d4}$. Na osnovu vrednosti ovih veličina određuju se vrednosti ciklusa (*C1*), dužine trajanja zelenog svetla za svaki vremenski interval i ostale izlazne veličine. Dobijeni rezultati prikazaju se na prednjoj ploči *VI*-a za ovaj sistem (slika 66.).



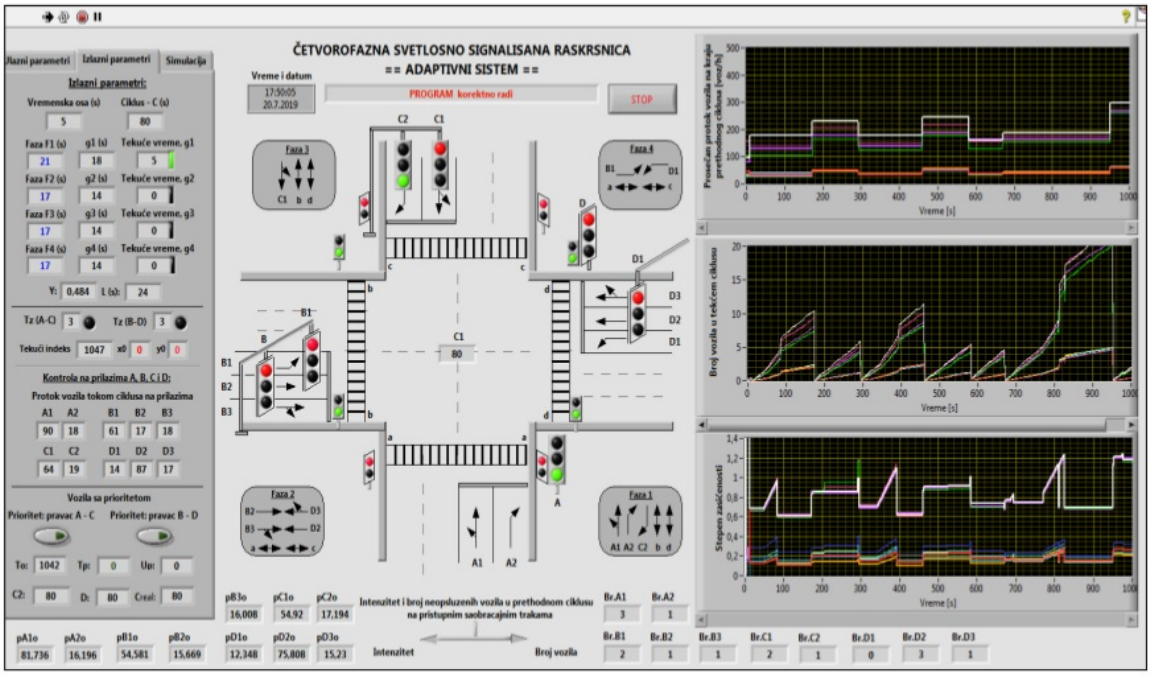

Slika 66. *Prednja ploča VI-a sistema za upravljanje saobraćajem na semaforizovanoj raskrsnici sa četiri različita dnevna signalna plana*

### *5.4.3.2. Četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa adaptivnim režimom rada, četiri faze i mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

Na slici 67. prikazana je četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa punim režimom rada i sa ukupno deset saobraćajnih traka i četiri pešačka prelaza na pristupnim prilazima. Tokovi vozila i pešaka grupisani su u četiri faze i to: (A1, A2, C2, b ↔ b, d ↔ d), (B2, B3, D2, D3, a ↔ a, c ↔ c), (C1, b ↔ b, d ↔ d) i (B1, D1, a ↔ a, c ↔ c). Izabrana je situacija pri kojoj nema konflikata između tokova pravo i levih skretanja iz suprotnog smera. Svakako da se grupisanje tokova može ostvariti i na drugi način, ali je bitno da se u okviru faza raspodele bezkonfliktni tokovi ili tokovi sa dozvoljenim konfliktima, kao što je, primera radi, slučaj kada se tokovi u levom skretanju opslužuju zajedno sa tokovima pravo, tako da vozila pravo imaju prednost.




Slika 67. *Četvorokraka semaforizovana raskrsnica – četiri faze*




Slika 68. *Prednja ploča VI sistema semaforizovane raskrsnice, četiri faze – adaptivni sistem rada*

Metoda adaptivnog upravljanja saobraćajem na četvorokrakoj svetlosno signalisanoj raskrsnici sa četiri faze u okviru ciklusa, koja je prezentovana u disertaciji, bazira se takođe na Webster-om obrascu (18) za određivanje optimalne vrednosti dužine ciklusa semaforizovane raskrsnice. Na slici 68. prikazan je deo prednje ploče virtuelnog instrumenta, a na slici 70. osnovni algoritam adaptivnog sistema za upravljanje saobraćajem na izolovanoj četvorokrakoj raskrsnici sa četiri faze u toku ciklusa. Ulazne veličine su zaštitno vreme za vozila i zaštitna vremena za pešake. Prezentovana metoda obezbeđuje, kao i kod sistema adaptivnog upravljanja saobraćajem na

dvofaznoj semaforizovanoj raskrsnici, realizaciju procesa generisanja signalnog plana na osnovu podataka koje obezbeđuju odgovarajući detektori kao posebne komponente sistema. Podaci se koriste za određivanje prosečnih vrednosti saobraćajnih tokova, kao i za, u slučaju da se vozila nalaze u zonama dileme, promenu dužine trajanja žutog svetla.

Algoritam adaptivnog sistema za regulisanje saobraćaja na četvorokrakoj površinskoj raskrsnici sa deset pristupnih saobraćajnih traka i četiri pešačka prelaza je sličan osnovnom algoritmu adaptivnog sistema dvofazne raskrsnice. Razlika je samo u delu algoritma između tačaka F i G (slika 71.) koji se koristi za određivanje prosečnih vrednosti saobraćajnih tokova *Qa1, Qa2, Qb1, ... Qd3*.

Oznake koje su navedene u osnovnom algoritmu (slika 70.) i u njegovim delovima predstavljaju:

- A1, A2, B1, B2, B3, C1, C2, D1, D2 i D3 – pristupne saobraćajne trake. Oznake B1, C1, C2 i D1 označavaju i semaforske uređaje koji se odnose na odgovarajuće saobraćajne trake,
- A, B i D – semaforski uređaji koji se odnose na saobraćajne trake A1 i A2, zatim za B2 i B3 i D2 i D3, respektivno,
- *z* – vremenska osa, a, b, c i d – pešačke lanterne,
- nA1, nA2, nB1, nB2, nB3, nC1, nC2, nD1, nD2 i nD3 – broj vozila koja tokom ciklusa prođu kroz proizvoljan poprečni presek odgovarajuće saobraćajne trake,
- pA1, pA2, pB1, pB2, pB3, pC1, pC2, pD1, pD2 i pD3 – tekući protoci vozila,
- Qa1, Qa2, Qb1, Qb2, Qb3, Qc1, Qc2, Qd1, Qd2 i Qd3 – prosečni tokovi vozila tokom ciklusa,
- *L* – izgubljeno vreme tokom ciklusa, *C* – dužina trajanja ciklusa, *Y* – koeficijent iskorišćenja kapaciteta raskrsnice, $g_1$, $g_2$, $g_3$ *i* $g_4$ – vrednosti trajanja zelenog vremena odgovarajućih faza, $f_1$, $f_2$, $f_3$ i $f_4$ – tekuće zeleno vreme, *D* – prinudno produženi tekući ciklus zbog vozila sa prioritetom,
- $f_5$ i $f_6$ – parametri za kontrolu dilema zone, x0 i y0 – indikatori prisustva vozila u zoni dileme, *t* – zaštitno vreme za vozila, *tzpp* i *tzpk* – zaštitna vremena za pešake na početku i na kraju faze, p1 i p2 – vreme za koje je prinudno produžen tekući ciklus, ako su p1= p2 = 0, tada je *D* = *C*,
- *C1* – obračunata, na osnovu prosečnih protoka vozila, vrednost dužine trajanja ciklusa,
- $x_1$ i $x_2$ – dužina trajanja žutog svetla za pravac A-C, odnosno B-D,
- r, g i y u indeksu označavaju redom: r – crveno, g – zeleno i y - žuto
- $C_o$ – inicijalna vrednost ciklusa, r – tekuće vreme, *i* – tekući indeks.

Osnovni algoritam sadrži četiri celine. Prva celina (1) omogućava unos vrednosti zaštitnog vremena za vozila (*t*), zaštitnih vremena za pešake (*tzpp* i *tzpk*) i preuzimanje vrednosti broja vozila na pristupnim prilazima raskrsnici (nA1, nA2, .... nD3). Vrednosti prosečnih gubitaka vremena po vozilu tokom „zelene faze“ (*d*) i zasićenih tokova (SA1, SA2, ... SD3) unose se direktno u odgovarajući programski kod. Između tačaka F i G povezuje se deo algoritma prikazanog na slici 71., koji omogućava, relacija (27), određivanje prosečnih vrednosti saobraćajnih protoka na prilaznim saobraćajnim trakama raskrsnice tokom aktuelnog ciklusa. Na osnovu ovih vrednosti izračunava se dužina trajanja (*C1*) narednog ciklusa. Veličina *C3* je projektovana vrednost ciklusa i njena vrednost ne može biti veća od 120 s, odnosno *C3* = 120 s.

Druga celina (2) obuhvata izračunavanje, na osnovu relacija (28), (29) i (30), vrednosti veličina $Y1 = Y_{1k}$, $Y2 = Y_{2k}$, $Y3 = Y_{3k}$, $Y4 = Y_{4k}$, $Y = Y_k$, zatim dužine trajanja ciklusa ($C1 = C_{1,k+1}$), trajanje zelenog svetla u okviru svake faze (g1 = $g_{1,k+1}$, g2 = $g_{2,k+1}$, g3 = $g_{3,k+1}$, g4 = $g_{4,k+1}$) i vrednosti kapaciteta i stepena zasićenosti prilaznih saobraćajnih traka. Dužine trajanja žutog svetla ($x_1$ i $x_2$) iznose tri, ili pet sekundi što zavisi od toga da li se vozila ne nalaze, ili nalaze u zoni dileme. Vrednosti su definisane u četvrtoj celini osnovnog algoritma. Između tačaka M i N halazi se podcelina, slika 55., koja definiše plan tempiranja za pešačke tokove.

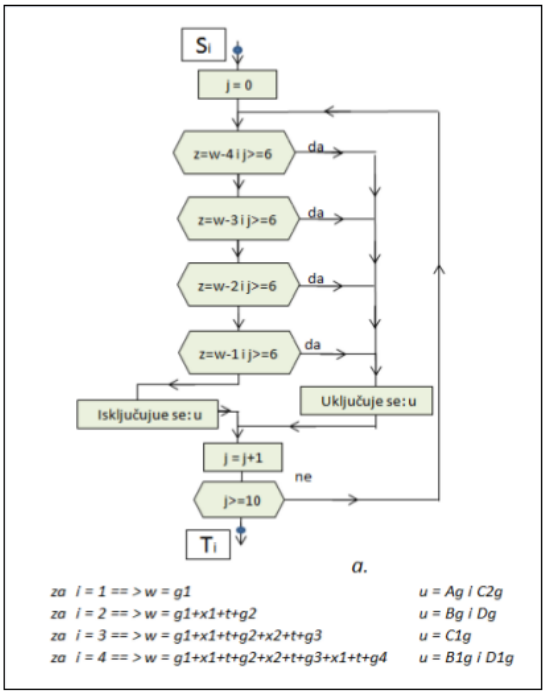
Treća celina algoritma (3) definiše vremensku osu (*z*) i tekuća vremena zelenog svetla $f_1$, $f_2$, $f_3$ i $f_4$ u okviru prve, druge, treće i četvrte faze. Između tačaka A i B celina sadrži deo algoritma (slika

54.) koji određuje funkcionisanje raskrsnice u uslovima da kroz raskrsnicu prolaze vozila sa pravom prioriteta.

U okviru četvrte celine (4) realizuje se plan tempiranja za tokove vozila. Plan tempiranja signala je realizovan tako da se početak zelenog svetla prve faze ($g_1$) poklapa sa početkom vremenske ose. Celina sadrži algoritme, kao posebne delove osnovnog (slika 69.), koji se povezuju između tačaka $S_i$ i $T_i$ ($i$ = 1, 2, 3 i 4) i koriste se za dobijanje treptućeg zelenog svetla. Celina omogućava i izbor dužina trajanja žutog svetla za slučaj da se vozila nalaze, ili ne u zoni dileme. U zavisnosti od vrednosti veličina x0 i y0 vrši se izbor dužina trajanja žutog svetla $x_1$ – za pravac A-C i $x_2$ – za pravac B-D.

Na osnovu opisanog algoritma izrađeno je odgovarajuće programsko rešenje adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem na navedenoj raskrsnici. Programsko rešenje urađeno je korišćenjem programskog paketa LabVIEW.

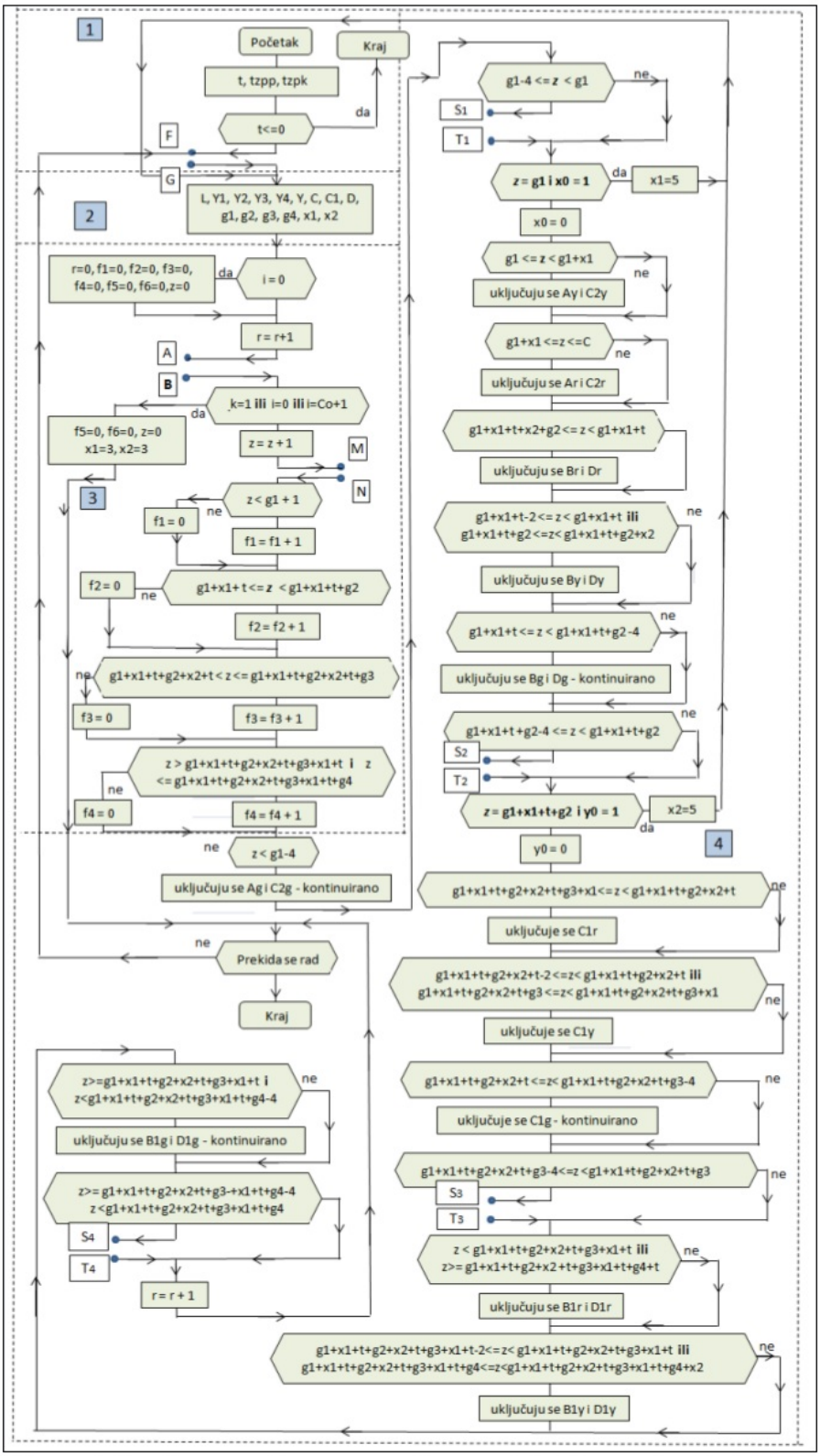
Prosečne vrednosti intenziteta saobraćajnih tokova izračunavaju se tako što se dužina ciklusa podeli na $m$ jednakih vremenskih inetvala $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \ldots \Delta t_i \ldots = \Delta t_m = \Delta t$ ($\Delta t$ = 1s), pri čemu vrednost $m$ - zavisi od dužine trajanja cuklusa, i izmeri (detektuje) broj vozila $nT_i$, koja 34 odgovarajući vremenski interval prolaze kroz poprečni presek pristupne trake T 34 de su sa T ϵ {*a1, a2, b1,b2, b3, c1, c2, d1, d2, d3*} redom označene pristupne saobraćajne trake A1, A2, B1, B2, B3, C1, C2, D1 ,D2 i D3 (slika 67.). Na osnovu ovih vrednosti određuju se prosečni tokovi vozila tokom ciklusa i koeficijenti islorišćenja kapaciteta raskrsnice po relacijama:



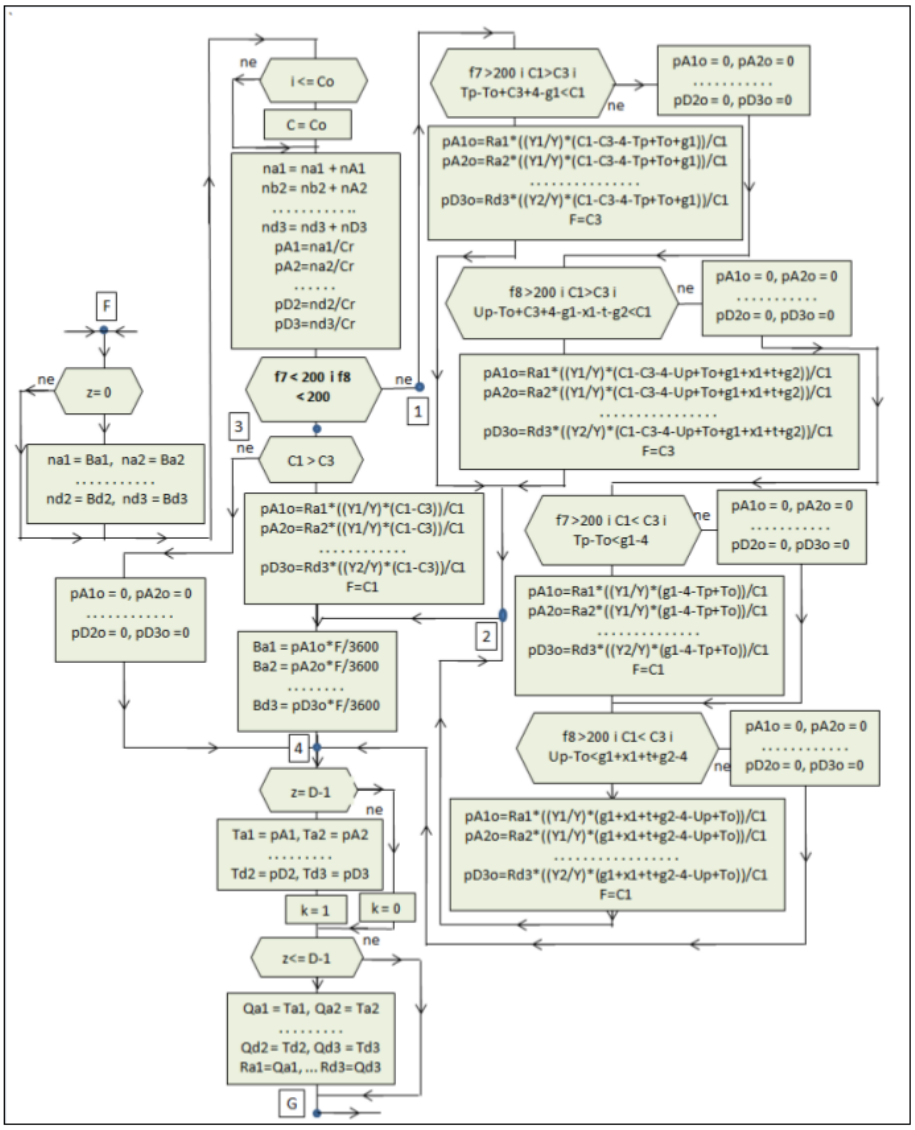

Slika 69. *Treptuće zeleno svetlo*

$QT_k = \frac{\sum_{i=1}^{m} nTi}{C1,k}$, gde je $C_{1,k} = \sum_{i=1}^{m} \Delta ti$ dužina trajanja k-og ciklusa, k = 0, 1, 2, 3, ... (31)

$Y_k = \sum_{j=1}^{4} Yjk$, gde su $Y_{jk} = max_j(QT_k / ST)$, $ST$ – zasićeni tok saobraćajne trake T (32)




Slika 70. *Osnovni algoritam semaforizovane raskrsnice, četiri faze – adaptivni sistem rada*




Slika 71. *Deo osnovnog algoritma sa slike 70, između tačaka F i G*

i j =1, 2, 3, 4 – oznaka faze. Vrednosti dobijene na osnovu prethodnih relacija predstavljaju ulazne parametre za sledeći ciklus, odnosno $C_{1,k+1}$, čija se dužina određuje na osnovu relacije (18):

$$C_{1,k+1} = (1.5 \cdot L_k + 5) / (1 - Y_k) \tag{33}$$

i $L_k = L = 4 \cdot (t + d)$ - ukupni vremenski gubici tokom ciklusa $C_k$, pri čemu su $t$ – zaštitno vreme za vozila i $d$ - vrednost prosečnih gubitaka vremena po vozilu tokom „zelene faze".

Nakon utvrđivanja dužine ciklusa, na osnovu relacije (21), izračunavaju se dužine zelenog svetla za svaku fazu, a zatim kapaciteti ($cT_{k+1}$) i stepeni zasićenja ($XT_{k+1}$) za svaku pristupnu saobraćajnu traku:

$$g_{j,k+1} = (Y_{jk} / Y_k) \cdot (C_{1,k+1} - L) \quad cT_{k+1} = ST \cdot (g_{j,k+1} / C_{1,k+1}) \quad XT_{k+1} = QT_k / cT_{k+1}, \; j = 1, 2, 3, 4 \tag{34}$$

I u ovom slučaju se tokom ciklusa mogu pojaviti dodatne optimizacije, kao što su preskakanje faze (ako na nekoj od prilaznih saobraćajnih traka dođe do zasićenja, onda se neka od najmanje "opterećenih" faza preskače i daje prednost traci u kojoj je došlo do zasićenja), produženje (produžava se žuto svetlo da bi se smanjio uticaj zona dileme na pristupnim prikazima raskrsnice), ili prekidanje (slučaj davanja prioriteta vozilima hitne pomoći, milicije, vozilima protivpožarne zaštite i drugo). Ako kroz raskrsnicu, tokom aktuelnog ciklusa $C_k$ , prolaze vozila sa pravom prioriteta, onda dolazi do prinudnog produženja ciklusa, pa se njegova realna vrednost ($C_{real,k}$), određuje saglasno relacijama (22) i (23).

### 5.5. Testiranje funkcionisanja raskrsnica i dobijeni rezultati

Funkcionisanje četvorokrake semaforizovane raskrsnice testirano je računarskom simulacijom. Program za simulaciju je urađen korišćenjem LabVIEW programskog paketa [54], [55], [56]. U suštini program je identičan onom koji koristi sistem rada semafora u realnim uslovima. Razlika je samo u tome što se u programu za simulaciju koristi poseban simulator (umesto odgovarajućih detektora) kao generator saobraćajnih tokova vozila i što se elementi plana tempiranja signala u procesu njegove realizacije, umesto kontroleru, direktno upućuju semaforskim uređajima. Testiranje je izvršeno za sve tipove navedenih cetvorokrakih raskrsnica u uslovima nezasićenih i prezasićenih saobraćajnih tokova.

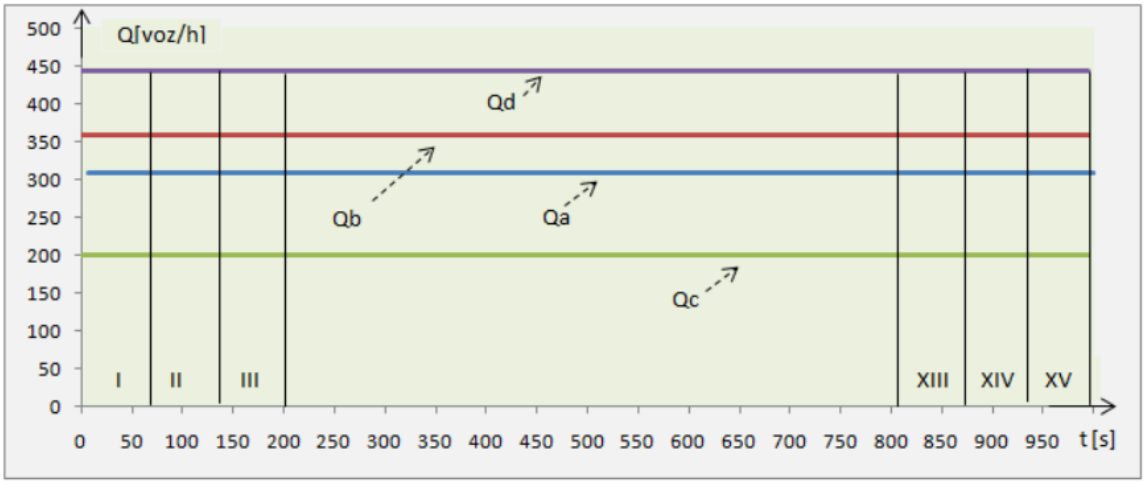
Testiranje rada raskrsnice realizovano je tako da obuhvata:

- odvijanje saobraćaja u uslovima kada može doći do toga da kroz raskrsnicu, tokom ciklusa, prolaze vozila sa pravom prioriteta i/ili da neka od njih budu u zonama dileme i
- odvijanje saobraćaja u uslovima kada kroz raskrsnicu ne prolaze vozila sa prioritetom i ima ili nema vozila u zonama dileme. Prvi slučaj je posebno značajan zbog činjenice da, u uslovima kada kroz raskrsnicu prolaze vozila sa pravom prioriteta, može doći do promene dužina trajanja proračunatog ciklusa i zelenog svetla, zatim do promene kapaciteta raskrsnice i do promene stepena zasićenja na pristupnim trakama, što, nakon završetka prolaza navedenih vozila, može izazvati poremećaj u opsluživanju ostalih vozila, do pojave zagušenja u saobraćaju i drugo. Zbog toga je bitno sagledati i utvrditi kako se ponašaju rešenja predloženih sistema rada, koja su prezentovana u ovoj disertaciji, u takvim okolnostima. U oba slučaja registrovane su:
  - prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama raskrsnice,
  - vrednosti stepena zasićenja saobraćajnih traka i
  - odgovarajuće vrednosti dužine trajanja ciklusa.

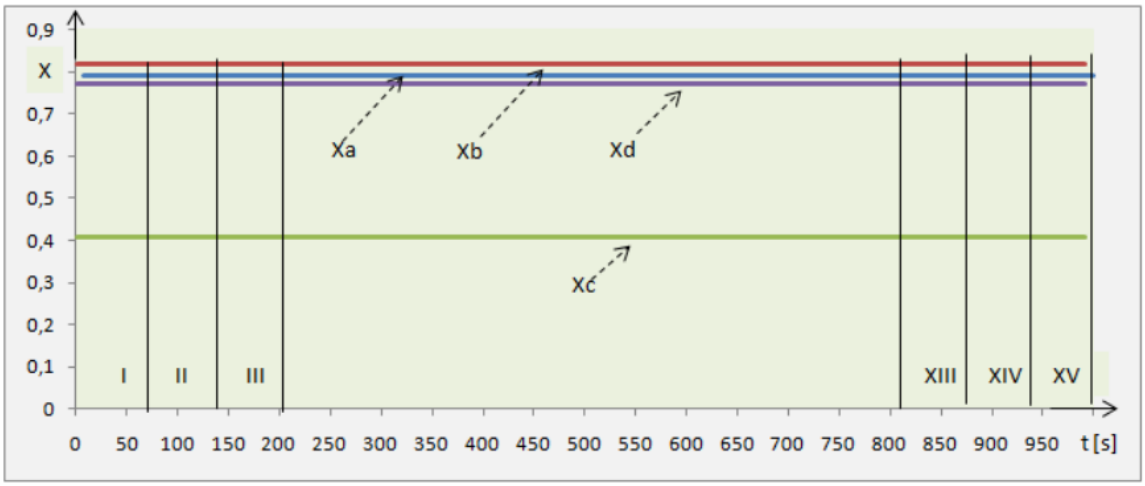
Rezultati testiranja evidentirani su za period rada sistema do 1000 sekundi.

#### *5.5.1. Dvofazna semaforizovna raskrsnica sa fiksnim režimom rada bez i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme,*

Rad dvofazne semaforizovane raskrsnice sa fiksnim režimom rada semafora i bez mogućnosti detekcije prolaza vozila sa pravom prioriteta i prisustva vozila u zonama dileme, testiran je na primeru četvorokrake raskrsnice sa vrednostima ulaznih parametara: $SA$ = 1000 voz/h, $SB$ = 1010 voz/h, $SC$ = 1327 voz/h, $SD$ = 1250 voz/h, $Qa$ = 310 voz/h, $Qb$ = 360 voz/h, $Qc$ = 200 voz/h i $Qd$ = 445 voz/h.Vrednosti ostalih ulaznih parametara su: $C_o$ = 6s, $d$ = 4s, $t$ = 2s, $t_{zpp}$ = 4s i $t_{zpk}$ = 3s. Raskrsnica radi sa stalnom dužinom ciklusa $C_r$ = 62s. Dobijeni rezultati testiranja prikazani su na slikama 72.i 73.



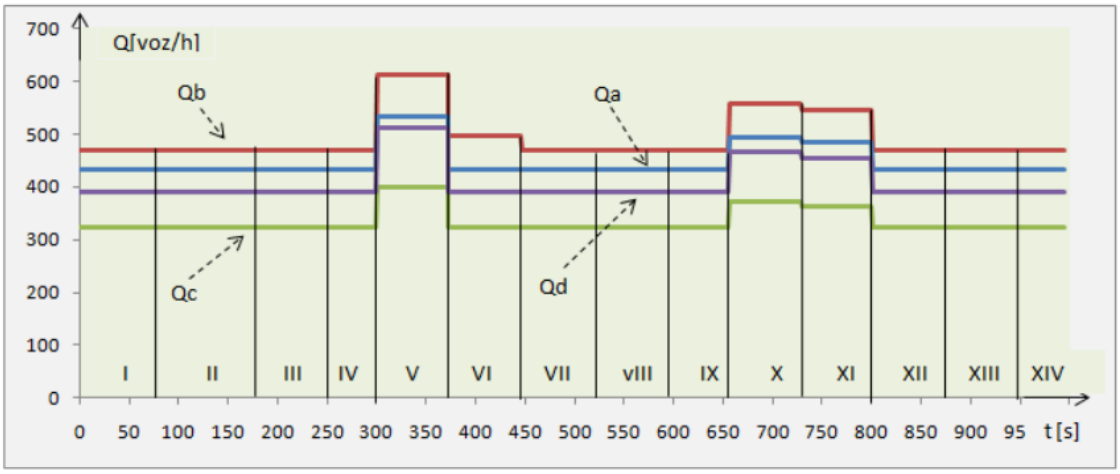

Slika 72. *Prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama dvofazne semaforizovne raskrsnice sa fiksnim režimom rada bez mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*



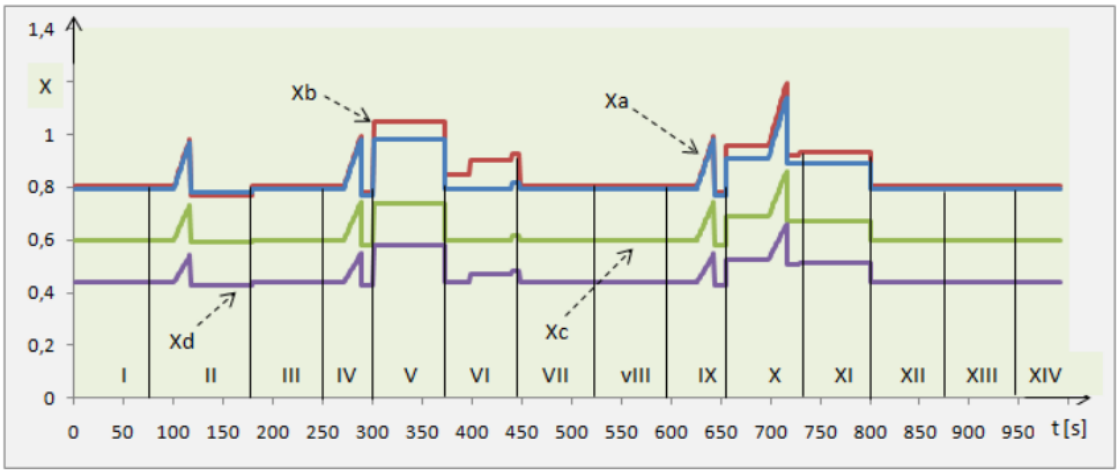

Slika 73. *Stepeni zasićenja saobraćajnih traka dvofazne semaforizovne raskrsnice sa fiksnim režimom rada bez mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

Pri testiranju dvofazne semaforizovane raskrsnice kod koje se mogu detektovati vozila sa prioritetom i vozila u zonama dileme, korišćene su sledeće vrednosti ulaznih parametara: $SA$ = 1450 voz/h, $SB$ = 1200 voz/h, $SC$ = 1440 voz/h, $SD$ =1820 voz/h, $Qa$ = 432 voz/h, $Qb$ = 468 voz/h, $Qc$ = 324 voz/h i $Qd$ = 391 voz/h. Vrednosti vremenskih parametara bile su iste kao kod prethodne raskrsnice. Ako tokom ciklusa kroz raskrsnicu ne prolaze vozila sa prioritetom, niti ima vozila u zonama dileme, raskrsnica radi sa fiksnom dužinom ciklusa $C_r$ = 72s. U toku testiranja praćen je rad raskrsnice u okviru četrnaest ciklusa. Rezultati su prikazani na slikama 74. i 75. Tokom prvog, trećeg, petog, šestog, sedmog, osmog i zadnja četiri ciklusa kroz raskrsnicu nisu prolazila vozila sa prioritetom. U šestom ciklusu detektovana su vozila u zonama dileme na pravcima A-C i B-D. Na početku drugog ciklusa raskrsnica je radila u fiksnom režimu rada, a zatim su tokom narednih 17 sekundi prolazila vozila sa prioritetom. To je dovelo do prinudnog produženja ciklusa sa 72s na $D$ = 90s i do prividnog povećanja stepena zasićenja saobraćajnih traka. Povećanje je prividno, jer tokom prolaza navedenih vozila, raskrsnica u suštini ne funkcioniše, a po završetku njihovog

prolaza, ona nastavlja rad sa istim vrednostima prosečnih saobraćajnih tokova kao i na početku ciklusa, sa prinudno produženim ciklusom $D$ i sa vrednošću trajanja zelenog svetla koja odgovara dužini ciklusa $D$. Linearno povećanje stepena zasićenja ukazuje samo na činjenicu da je tokom ciklusa bilo prolaza vozila sa prioritetom. Međutim, skokovite promene vrednosti, posebno do ili iznad jedinice, ukazuju da je tokom aktuelnog ciklusa moguće da ne budu opslužena sva vozila. Stepeni zasićenja, nakon završetka prolaza, neznatno su manji nego pre, što nije značajno za odvijanje saobraćaja u tekućem ciklusu. Smnanjenje nastaje zbog toga što stepen zasićenja u $i$-toj saobraćajnoj taraci, pre početka prolaza iznosi




Slika 74. *Prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama dvofazne semaforizovne raskrsnice sa fiksnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*




Slika 75. *Stepeni zasićenja saobraćajnih traka dvofazne semaforizovne raskrsnice sa fiksnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

$Xi = Qi/ci = (Qi \cdot C) / (Si \cdot g_C)$, a po završetku $Xi' = (Qi \cdot D) / (Si \cdot g_D)$, odakle se dobija da je $Xi'/Xi = (1 - L/C) / (1 - L/D)$. Kako je $D > C$, sledi da je $Xi' < Xi$.

Veličine $g_C$ i $g_D$ su dužine zelenog svetla koje odgovaraju ciklusima $C$ (ako nema prioritetnog prolaza), odnosno $D$.

Obzirom da se rad semafora, po završetku prolaza, ne nastavlja u onoj tački vremenske ose gde je prekinut, već u tački, odnosno trenutku koji obezbeđuje početak treptućeg zelenog svetla na pristupnim semaforima, realna dužina ciklusa nije jednaka $D$, nego se izračunava na osnovu relacije (22), ili (23). U ovom slučaju dužina drugog ciklusa je $C_r$ = 106s, što se testiranjem i potvrdilo.

Vozila sa pravom prioriteta prolazila su kroz raskrsnicu i tokom četvrtog, devetog i desetog ciklusa i po završetku prolaza, do kraja ciklusa izvestan broj vozila nije bio opslužen. Zbog toga su intenziteti tokova ovih vozila „prebačeni" u naredni, peti, odnosno deseti i jedanaesti ciklus što je izazvalo promenu intenziteta tokova vozila na početku ovih ciklusa (slika 74.). Broj i intenzitet neopsluženih vozila u okviru ova tri ciklusa, prikazani su u Tabeli 8.

Tabela 8. *Intenzitet i broj neopsluženih vozila tokom ciklusa dvofazne semaforizovane raskrsnice sa fiksnim režimom rada i mogućnošću detekcije vozila sa prioritetom i vozila u zonama dileme*

| *Cik* | *Saobr. traka A* | | *Saobr. traka B* | | *Saobr. traka C* | | *Saobr. traka D* | | *p2 (s)* | *Cr (s)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *pAo(v/h)* | *Ba* | *pBo(v/h)* | *Bb* | *pCo(v/h)* | *Bc* | *pDo(v/h)* | *Bd* | | |
| IV | 101 | 2 | 143 | 3 | 76 | 2 | 120 | 2 | 18 | 50 |
| IX | 63 | 1 | 90 | 2 | 47 | 1 | 75 | 2 | 18 | 65 |
| X | 52 | 1 | 77 | 2 | 39 | 1 | 64 | 1 | 19 | 73 |

5.5.2. *Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intenzitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

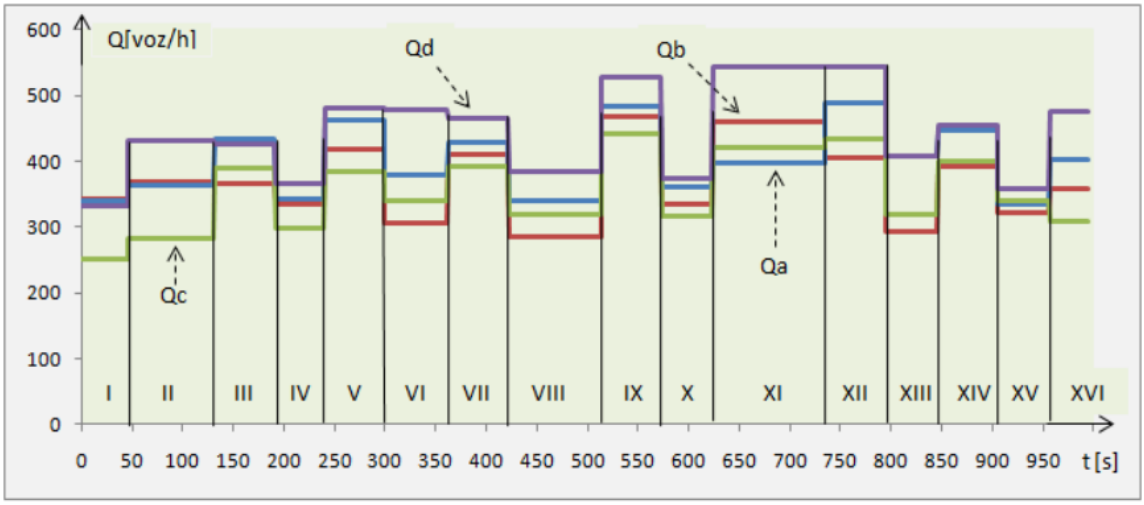
Za razliku od prethodne raskrsnice kod koje su prosečni protoci vozila koja pristižu konstantni tokom vremena, kod ove raskrsnice protoci su promenljivi, pri čemu promene obuhvataju i prosečne tokove vozila koja nisu opslužena u prethodnim ciklusima.

Testiranje prezentovanog rešenja u disertaciji izvršeno je na četvorokrakoj dvofaznoj semaforizovanoj raskrsnici sa vrednošću projektovanog ciklusa $C3$= 60s, vrednostima zasićenih tokova pristupnih saobraćajnih traka $SA$ = 1550 voz/h, $SB$ = 1200 voz/h, $SC$ = 1138 voz/h i $SD$ = 1420 voz/h i ulaznim parametrima $Co$=6s, $d$ = 4s, $t$=2s, $t_{zpp}$=4s i $t_{zpk}$=3s. Dobijeni rezultati prikazani su na slikama 76. i 77. i u tabelama 9. i 10. Testiranjem je obuhvaćeno četrnaest ciklusa tokom kojih je bilo (drugi, treći, osmi i jedanaesti ciklus – linearni rast stepena zasićenja, slika 77.) ili nije bilo prolaza vozila sa prioritetom (preostali ciklusi) i vozila u zonama dileme (šesti ciklus). Tokom jedanaestog ciklusa bila su dva prolaza vozila sa prioritetom.

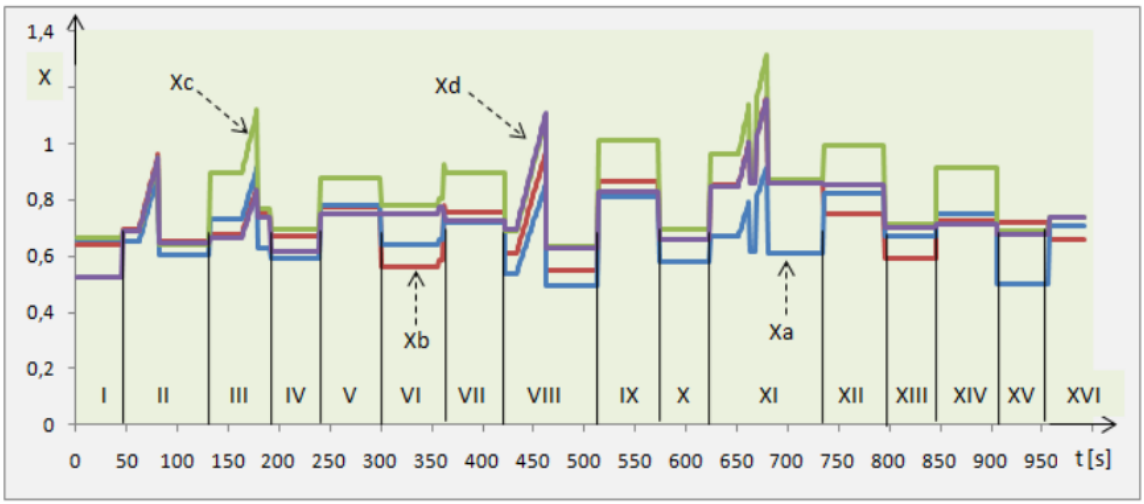
Podaci o neopsluženim vozilima, koji su dobijeni u toku testiranja i koji su prikazani u Tabeli 10., pokazuju da je bilo neopsluženih vozila tokom trećeg, petog, šestog, sedmog, devetog, jedanaestog, dvanaestog i četrnaestog ciklusa. To podrazumeva da se izvestan broj vozila, u toku funkcionisanja raskrsnice, zaustavlja dva ili više puta pre nego što prođu kroz raskrsnicu što utiče na znatno povećanje vremenskih gubitaka vozila i koncetracije izduvnih gasova. Uzroci postojanja neopsluženih vozila su, u ovom slučaju, porast vrednosti prosečnih protoka vozila koji se registruju na početku ciklusa i koji se koriste za određivanje vrednosti veličine $C1$, skraćivanje dužine trajanja ciklusa kada kroz raskrsnicu prolaze vozila sa prioritetom, kao i projektovana dužina ciklusa $C3$.

Jedna od mogućnosti da se smanji broj neopsluženih vozila tokom rada raskrsnice, je povećanje dužine projetovane dužine fiksnog ciklusa $C3$, što se testiranjem sa različitim vrednostima veličine $C3$ pokazalo kao tačno. Međutim, potrebno je imati u vidu da se $C3$ može povećati najviše do 120 s, što predstavlja maksimalnu vrednost ciklusa kojom raskrsnica može raditi i koja je utvrđena Zakonom. Kako raskrsnica radi u okolnostima kada je $C3$ = 120 s, opisano je u sledećem delu u kome je izvršena analiza dobijenih rezultata pri testiranju funkcionisanja

adaptivnog semaforskog sistema na četvorokrakoj dvofaznoj semaforizovanoj raskrsnici sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa prioritetom i vozila u zonama dileme.




Slika 76. *Prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama četvorokrake dvofazne semaforizovane raskrsnice sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intenzitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*




Slika 77. *Stepeni zasićenja saobraćajnih pristupnih traka četvorokrake dvofazne semaforizovane raskrsnice sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intenzitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

Tabela 9. *Stepeni zasićenja i dužine trajanja ciklusa semaforizovane dvofazne raskrsnice sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intenzitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

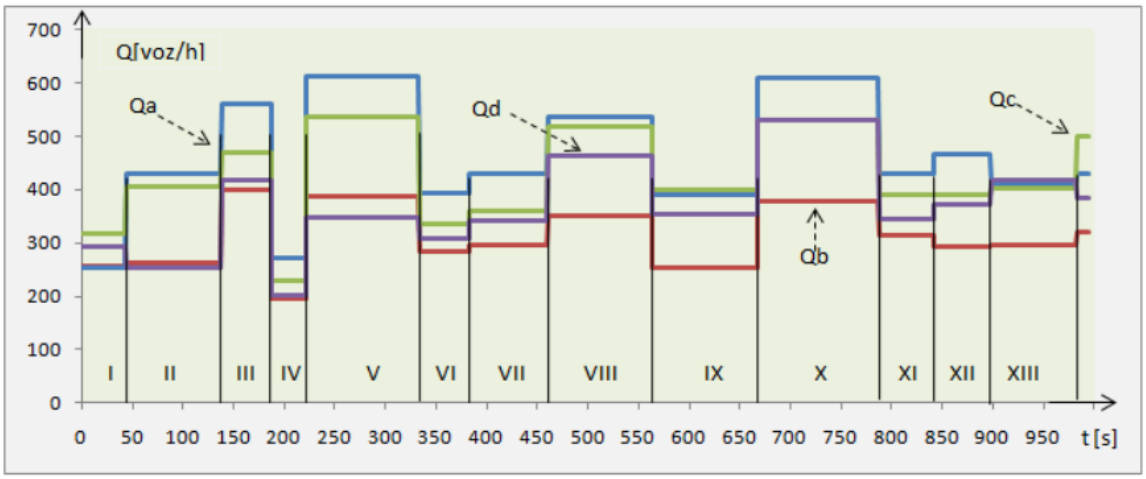
| Cikl. | *Xa* | *Xb* | *Xc* | *Xd* | *x0* | *y0* | *m1* | *m2* | *p1(s)* | *p2(s)* | *C1(s)* | *D(s)* | *Cr(s)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | 0.67 | 0.66 | 0.69 | 0.51 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48 | 48 | 48 |
| II | 0.67 | 0.70 | 0.70 | 0.70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 70 | 86 |
| | 0.60 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | | | 1 | | 20 | | | | |
| III | 0.75 | 0.68 | 0.90 | 0.68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 63 | 76 | 60 |
| | 0.62 | 0.72 | 0.73 | 0.71 | | | | 1 | | 13 | | | |
| IV | 0.59 | 0.68 | 0.70 | 0.60 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48 | 48 | 48 |
| V | 0.79 | 0.78 | 0.90 | 0.77 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 71 | 60 | 60 |
| VI | 0.63 | 0.58 | 0.80 | 0.78 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 61 | 60 | 62 |
| VII | 0.76 | 0.78 | 0.90 | 0.76 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 71 | 60 | 60 |
| VIII | 0.55 | 0.61 | 0.70 | 0.70 | 0 | 0 | 1 | 0 | 30 | 0 | 49 | 79 | 92 |
| | 0.50 | 0.56 | 0.68 | 0.68 | | | | | | | | | |
| IX | 0.82 | 0.88 | 1.01 | 0.82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 102 | 60 | 60 |
| X | 0.58 | 0.68 | 0.70 | 0.68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 50 |
| XI | 0.69 | 0.84 | 0.96 | 0.84 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 12 | 91 | 83 | 111 |
| | 0.60 | 0.87 | 0.88 | 0.87 | | | 0 | 1 | | | | | |
| | 0.60 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | | | 1 | 0 | | | | | |
| XII | 0.83 | 0.78 | 1.00 | 0.88 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 95 | 60 | 60 |
| XIII | 0.68 | 0.60 | 0.70 | 0.70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51 | 51 | 51 |
| XIV | 0.75 | 0.75 | 0.93 | 0.75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 61 | 60 | 60 |
| XV | 0.52 | 0.75 | 0.68 | 0.68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51 | 51 | 51 |
| XVI | 0.70 | 0.68 | 0.75 | 0.75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 57 | 57 | 57 |

Tabela 10. *Intenzitet i broj neopsluženih vozila tokom ciklusa semaforizovane dvofazne raskrsnice sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa, promenljivim intenzitetima saobraćajnih tokova na pristupnim trakama i mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

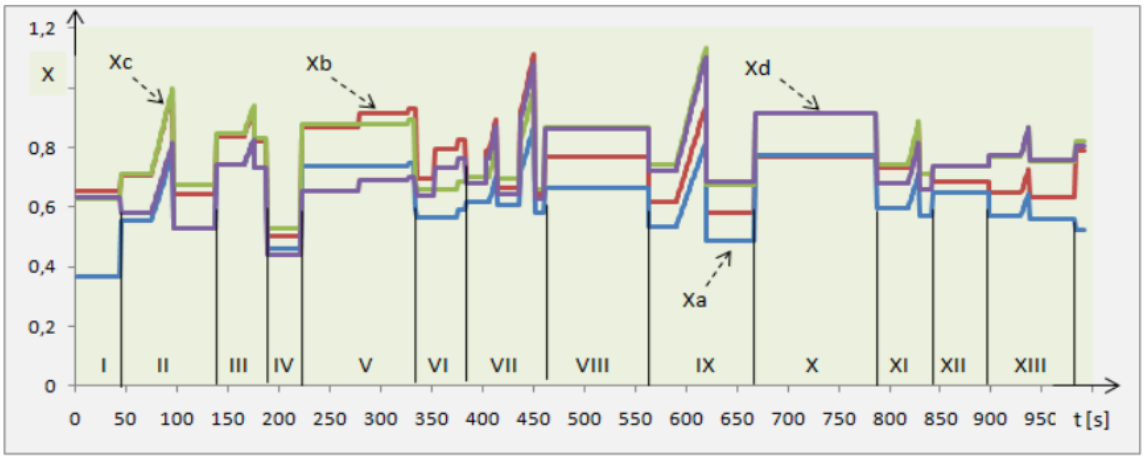
| *Cikl.* | *Saobr. traka A* | | *Saobr. traka B* | | *Saobr. traka C* | | *Saobr. traka D* | | *p1(s)* | *p2(s)* | *Cr (s)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *pAo(v/h)* | *Ba* | *pBo(v/h)* | *Bb* | *pCo(v/h)* | *Bc* | *pDo(v/h)* | *Bd* | | | |
| I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48 |
| II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 86 |
| III | 74 | 1 | 56 | 1 | 67 | 1 | 65 | 1 | 0 | 13 | 73 |
| IV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48 |
| V | 40 | 1 | 38 | 1 | 33 | 1 | 44 | 1 | 0 | 0 | 71 |
| VI | 8 | 0 | 8 | 0 | 8 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 62 |
| VII | 38 | 1 | 36 | 1 | 35 | 1 | 41 | 1 | 0 | 0 | 71 |
| VIII | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 0 | 92 |
| IX | 102 | 3 | 99 | 3 | 94 | 3 | 112 | 3 | 0 | 0 | 60 |
| X | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 |
| XI | 10 | 0 | 13 | 0 | 11 | 0 | 15 | 0 | 11 | 12 | 111 |
| XII | 93 | 3 | 77 | 3 | 82 | 3 | 104 | 3 | 0 | 0 | 60 |
| XIII | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51 |
| XIV | 36 | 1 | 29 | 1 | 32 | 1 | 34 | 1 | 0 | 0 | 60 |
| XV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51 |
| XVI | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 57 |

5.5.3. *Četvorokraka dvofazna semaforizovana raskrsnica sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

Testiranje adaptivnog sistema rada semafora kod koga je vrednost projektovanog ciklusa *C3* = 120s, izvršeno je na raskrsnici sa istim karakteristikama i vrednostima ulaznih parametara kao u prethodnom slučaju. Dobijeni rezultati prikazani su na slikama 78. i 79. i u tabelama 11. i 12. i pokazuju da u funkcionisanju ovog i prethodnog sistema nema bitnih razlika. Rezultati prikazani u Tabeli 12. pokazuju da se broj ciklusa, tokom kojih je bilo neopsluženih vozila, smanjio sa osam na pet, što predstavlja izvesno poboljšanje uslova odvijanja saobraćaja u odnosu na sistem sa vrednošću projektovanog ciklusa od 60s. Međutim, dalje poboljsanje uslova nije moguće više realizovati promenom *C3*, već eventualnim povećanjem broja pristupnih traka, pregrupisavanjem tokova vozila i pešaka u nove faze i formiranjem novog signalnog plana.




Slika 78. *Prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama četvorokrake dvofazne semaforizovane raskrsnice sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*




Slika 79. *Stepeni zasićenja pristupnih traka četvorokrake dvofazne semaforizovane raskrsnice sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

Tabela 11. *Stepeni zasićenja i dužine trajanja ciklusa semaforizovane dvofazne raskrsnice sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

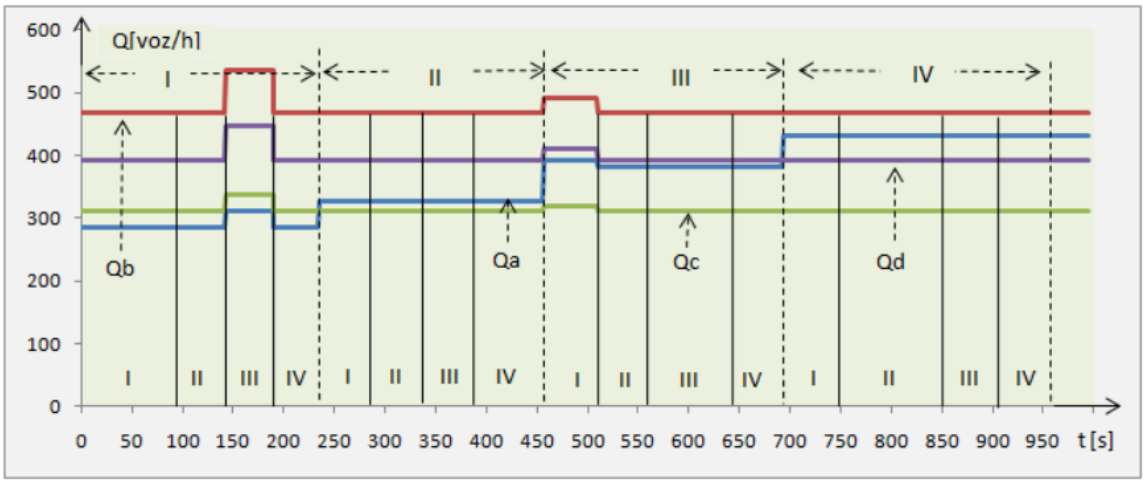
| Cikl. | *Xa* | *Xb* | *Xc* | *Xd* | *x0* | *y0* | *m1* | *m2* | *p1(s)* | *p2(s)* | *C1(s)* | *D(s)* | *Cr(s)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | 0.37 | 0.68 | 0.68 | 0.64 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43 | 43 | 43 |
| II | 0.54 | 0.70 | 0.71 | 0.59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 52 | 74 | 94 |
| | 0.53 | 0.67 | 0.70 | 0.52 | | | 1 | | 22 | | | | |
| III | 0.75 | 0.84 | 0.84 | 0.75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 88 | 99 | 50 |
| | 0.72 | 0.83 | 0.83 | 0.72 | | | | 1 | | 11 | | | |
| IV | 0.47 | 0.50 | 0.52 | 0.46 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34 | 34 | 34 |
| V | 0.77 | 0.90 | 0.89 | 0.69 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 110 | 110 | 112 |
| VI | 0.57 | 0.80 | 0.67 | 0.77 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 47 | 47 | 49 |
| VII | 0.61 | 0.69 | 0.70 | 0.70 | 1 | 0 | 0 | 0 | 11 | 11 | 51 | 73 | 78 |
| | 0.60 | 0.68 | 0.70 | 0.64 | | | 1 | 0 | | | | | |
| | 0.59 | 0.63 | 0.67 | 0.67 | | | 0 | 1 | | | | | |
| VIII | 0.68 | 0.78 | 0,78 | 0.88 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 103 | 103 | 103 |
| IX | 0,54 | 0,61 | 0,75 | 0,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 55 | 85 | 104 |
| | 0,50 | 0,59 | 0,69 | 0,69 | | | 1 | | 30 | | | | |
| X | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.91 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 140 | 120 | 120 |
| XI | 0,60 | 0,74 | 0,77 | 0,69 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 56 | 68 | 54 |
| | 0,58 | 0,68 | 0,76 | 0,66 | | | | 1 | | 12 | | | |
| XII | 0.64 | 0.69 | 0.69 | 0.75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 56 | 56 | 56 |
| XIII | 0.58 | 0.67 | 0.68 | 0.78 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 63 | 72 | 85 |
| | 0.57 | 0.63 | 0.75 | 0.77 | | | 1 | | 9 | | | | |

Tabela 12. *Intenzitet i broj neopsluženih vozila tokom ciklusa semaforizovane dvofazne raskrsnice sa adaptivnim režimom rada i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

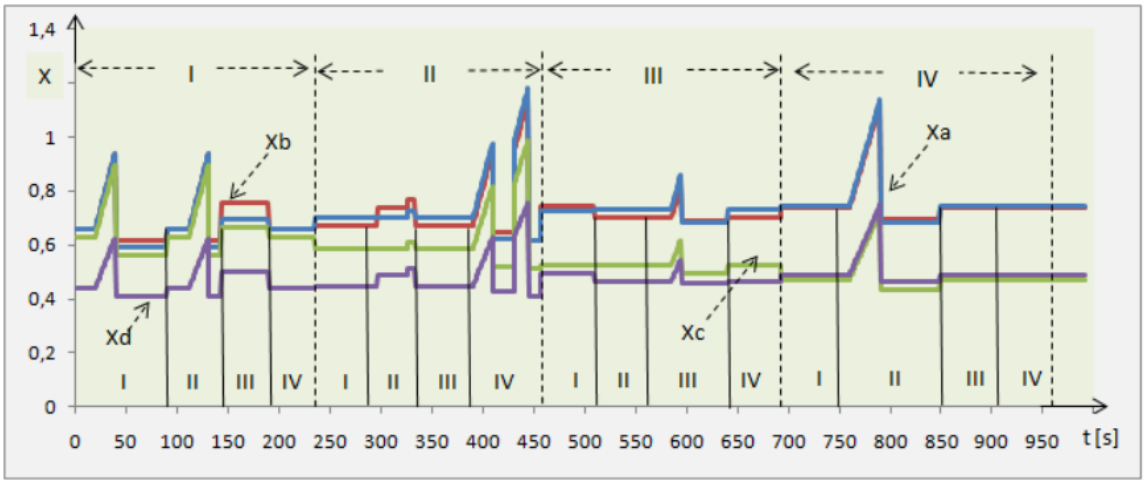
| *Cikl.* | *Saobr. traka A* | | *Saobr. traka B* | | *Saobr. traka C* | | *Saobr. traka D* | | *p1(s)* | *p2(s)* | *Cr (s)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *pAo(v/h)* | *Ba* | *pBo(v/h)* | *Bb* | *pCo(v/h)* | *Bc* | *pDo(v/h)* | *Bd* | | | |
| I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43 |
| II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22 | 0 | 94 |
| III | 169 | 4 | 97 | 2 | 142 | 4 | 102 | 3 | 0 | 11 | 50 |
| IV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34 |
| V | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 112 |
| VI | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 47 |
| VII | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 11 | 78 |
| VIII | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 103 |
| IX | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 0 | 104 |
| X | 62 | 1 | 31 | 0 | 54 | 1 | 43 | 1 | 0 | 0 | 120 |
| XI | 59 | 1 | 33 | 1 | 54 | 1 | 36 | 1 | 0 | 12 | 54 |
| XII | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 56 |
| XIII | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 0 | 85 |

*5.5.4. Dvofazna semaforizovana raskrsnica sa fiksnim režimom rada, različitim dnevnim signalnim planovima i mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme,*

Funkcionisanje ove raskrsnice testirano je okviru četiri različita vremenska intervala u kojima je, radi bolje preglednosti, pretpostavljeno da se tokom intervala menja samo vrednost protoka vozila na prilaznoj traci A, što bitno ne utiče na suštinu njenog rada. Vrednosti ulaznih parametara iznosile su: $SA$ = 1500 voz/h, $SB$ = 1450 voz/h, $SC$ = 1700 voz/h, $SD$ = 1820 voz/h, $Q_b$ = 468 voz/h, $Q_c$ = 310 voz/h, $Q_d$ = 391 voz/h, $Q_{a1} = Q_{aI}$ =286 voz/h, $Q_{a2} = Q_{aII}$ =328 voz/h, $Q_{a3} = Q_{aIII}$ = 381 voz/h i $Q_{a4} = Q_{aIV}$ =432 voz/h, dok su vrednosti vremenskih parametara: $Co$ = 6s, $d$ = 4s, $t$ = 2s, $t_{zpp}$ = 4s i $t_{zpk}$ = 3s. Vremenski intervali tokom kojih je realizovano testiranje obuhvatili su po četiri ciklusa. Dobijeni rezultati prikazani su na slikama 80. i 81.




Slika 80. *Prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama četvorokrake dvofazne semaforizovane raskrsnice sa fiksnim režimom rada, različitim dnevnim signalnim planovima i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*



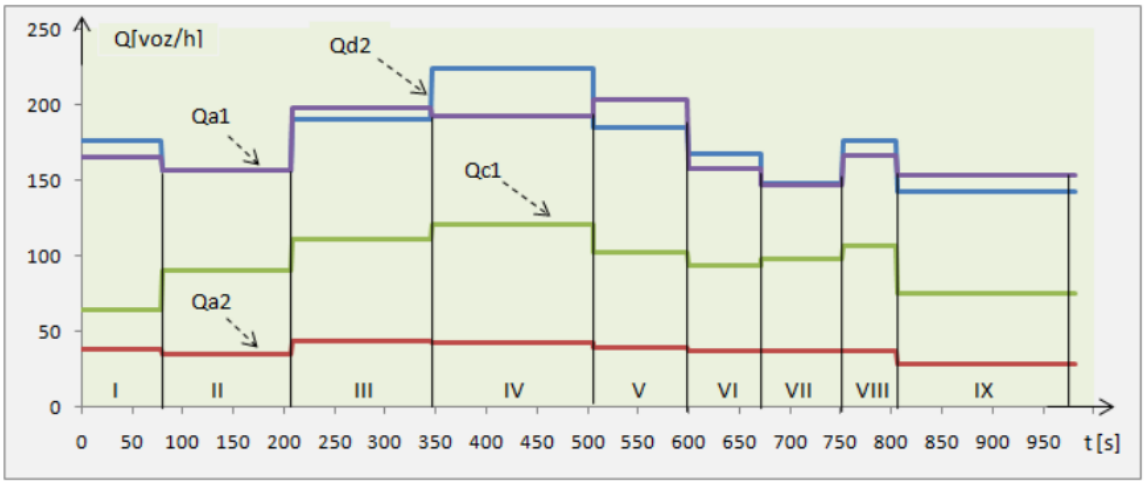

Slika 81. *Stepeni zasićenja pristupnih traka četvorokrake dvofazne semaforizovane raskrsnice sa fiksnim režimom rada, različitim dnevnim signalnim planovima i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

Tokom prvog i drugog ciklusa u prvom vremenskom intervalu, zatim četvrtog ciklusa drugog, u trećem ciklusu trećeg vremenskog intervala i u drugom ciklusu zadnjeg, kroz raskrsnicu su prolazila vozila sa pravom prioriteta, što se može zaključiti po linearnim promenama stepena zasićenja, slika 81. Promene vrednosti prosečnih protoka vozila, slika 80., na početku trećeg ciklusa prvog vremenskog intervala i na početku prvog ciklusa trećeg, nastale su kao posledica toga što u drugom ciklusu prvog i u četvrtom ciklusu drugog vremenskog intervala nisu bila opsluživana sva vozila, pa su intenziteti neopsluženih vozila „prebačeni" u sledeće cikluse. .

Rezultati testiranja takođe pokazuju da se pri prelasku iz jednog vremenskog intervala u drugi ne vrši istovremeno i promena dužine trajanja ciklusa, već sistem omogućava da se zadnji ciklus u prethodnom intervalu završi, pa tek onda preuzima prosečne vrednosti saobraćajnih tokova karakteritične za naredni vremenski interval i određuje dužinu trajanja novog ciklusa. Na taj način se obezbeđuje promena režima rada sistema a da pri tome vozači motornih vozila i pešaci to i ne primećuju.

### 5.5.5. *Četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa adaptivnim režimom rada, četiri faze i mogućnosti detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

Za testiranje funkcionisanja četvorofazne semaforizovane raskrsnice korišćena je četvorokraka raskrsnica sa sledećim karakteristikama i vrednostima ulaznih parametara: $SA1 = 1050$ voz/h, $SA2 = 930$ voz/h, $SB1 = 1200$ voz/h, $SB2 = 1205$ voz/h, $SB3 = 1050$ voz/h, $SC1 = 1250$ voz/h, $SC2 = 1230$ voz/ h, $SD1 = 980$ voz/h, $SD2 = 1140$ voz/h, $SD3 = 990$ voz/h, $Co$ =20s, $d$=4s, $t$ = 2s, $t_{zpp}$ = 4s i $t_{zpk}$ = 3s. Testiranje je izvršeno tokom perioda do 1000 s i pri tome je generisano devet ciklusa.

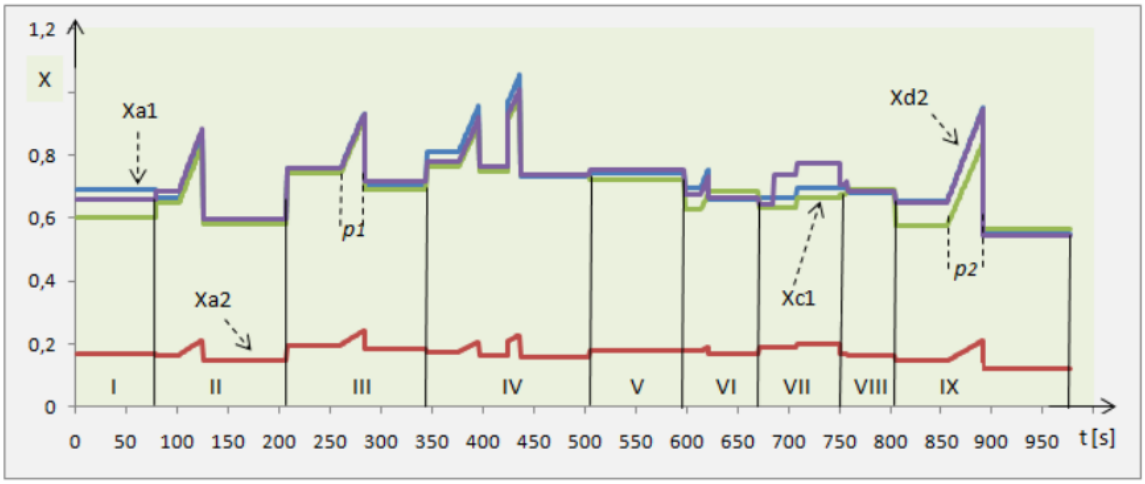



Slika 82. *Prosečne vrednosti saobraćajnih tokova na pristupnim trakama četvorokrake semaforizovane raskrsnice sa adaptivnim režimom rada, četiri faze i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

U toku drugog, trećeg, četvrtog, šestog, osmog i devetog ciklusa kroz raskrsnicu su prolazila vozila sa prioritetom, pri čemu je trajanje prolaza tokom pojedinih ciklusa bilo različito, što se može zaključiti, slika 83., na osnovu vrednosti vremena ($p1$ ili $p2$) linearne promene stepena zasićenja. Tokom osmog ciklusa nisu opslužena sva vozila[20] koja su zatražila prolaz kroz raskrsnicu i ona su

[20] pA1o = 22 voz/h, pA2o = 5 voz/h, pB1o = 10 voz/h, pB2o = pB3o = 4 voz/h, pC1o = 7 voz/h, pC2o = 5 voz/h, pD1o = 3 voz/h, pD2o = 18 voz/h i pD3o = 4 voz/h.

raskrsnicu prošla u devetom, pri čemu su i njihovi protoci „prebačeni“ u isti ciklus. U sedmom ciklusu registrovana su vozila u zonama dileme, što je dovelo do povećanja dužine trajanja ciklusa sa $C1 = 76$ s na $C_r = 80$ s.




Slika 83. *Stepeni zasićenja pristupnih traka četvorokrake semaforizovane raskrsnice sa adaptivnim režimom rada, četiri faze i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

Tabela 13. *Stepeni zasićenja i dužine trajanja ciklusa semaforizovane raskrsnice sa adaptivnim režimom rada, četiri faze i sa mogućnošću detekcije vozila sa pravom prioriteta i vozila u zonama dileme*

| Cikl. | *Xa1* | *Xa2* | *Xc1* | *Xd2* | *x0* | *y0* | *m1* | *m2* | *p1(s)* | *p2(s)* | *C1(s)* | *D(s)* | *Cr(s)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | 0.70 | 0.18 | 0.60 | 0.68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 78 | 78 | 78 |
| II | 0.67 | 0.17 | 0.71 | 0.70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 76 | 100 | 128 |
| | 0.59 | 0.16 | 0.59 | 0.60 | | | 1 | | 24 | | | | |
| III | 0.76 | 0.20 | 0.76 | 0.76 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 96 | 120 | 138 |
| | 0.70 | 0.19 | 0.69 | 0.70 | | | | 1 | | 24 | | | |
| IV | 0.81 | 0.18 | 0.77 | 0.78 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 106 | 140 | 160 |
| | 0,76 | 0,17 | 0,76 | 0,77 | | | 1 | 0 | 20 | 0 | | | |
| | 0,75 | 0,16 | 0,74 | 0,74 | | | 0 | 1 | 0 | 14 | | | |
| V | 0.75 | 0.18 | 0.74 | 0.75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 93 | 93 | 93 |
| VI | 0.71 | 0.18 | 0.63 | 0.68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 79 | 87 | 73 |
| | 0,68 | 0,17 | 0,70 | 0,67 | | | | 1 | | 8 | | | |
| VII | 0.70 | 0.20 | 0,66 | 0.78 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 76 | 76 | 80 |
| VIII | 0,70 | 0,18 | 0,70 | 0,70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 83 | 85 | 54 |
| | 0,69 | 0,17 | 0,69 | 0,69 | | | | 1 | 2 | | | | |
| IX | 0,67 | 0,16 | 0,59 | 0,67 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 73 | 109 | 176 |
| | 0,55 | 0,15 | 0,56 | 0,55 | | | 1 | | 36 | | | | |

U devetom, poslednjem ciklusu koji je generisan tokom testiranja, prolazila su vozila sa pravom prioriteta $p1 = 36$ s. To je dovelo (Tabela 13.) do povećanja ovog ciklusa sa $C1 = 73$s, koliko bi iznosila njegova dužina da prolaza nije bilo, na $C_r = 176$s.

# 6. DETEKCIJA VOZILA, PEŠAKA I OSTALIH OBJEKATA UPOTREBOM VIDEO DETEKTORA

Da bi se izborili sa sve većim saobraćajnim gužvama, koje sigurno neće nestati u narednim godinama, gradske vlasti i preduzeća zadužena za puteve u svetu i kod nas, sve više koriste odgovarajuće tehnologije za prikupljanje podataka o saobraćaju, uvida i analize saobraćajnih situacija u realnom vremenu na pojedinim delovima putne mreže, a posebno na površinskim semaforizovanim raskrsnicama. Prikupljeni podaci se obrađuju i na osnovu dobijenih rezultata realizuje se kontrola rada semafora, odnosno dužina trajanja ciklusa, raspodela vremena trajanja zelenog svetla i drugo. Naime, praćenjem saobraćaja na raskrsnicama, rad semafora može se prilagoditi obimu saobraćaja, što za rezultat ima smanjenje vremena koje vozila provedu u praznom hodu. Na taj način se povećava protočnost vozila i pešaka i olakšava gradski saobraćaj.

Jedan od načina prikupljanja podataka o saobraćaju, koji se već pokazao veoma efikasnim u mnogim slučajevima, je instalacija detektora na semaforizovanim raskrsnicama. Detektori su uređaji za detekciju vozila i merenje saobraćajnih parametara. Mogu se grupisati u četiri grupe i to: *induktivni, pneumatski, mikrotalasni i video detektori*. Zbog svojih posebnih karakteristika kao što su: mogućnost podešavanja nekoliko zona posmatranja i detekcije vozila na raskrsnici, potpuna zamena induktivnih petlji, mogućnosti detekcije prisustva pešaka i incidentne situacije, automatskog prepoznavanja tablica, jednostavnosti montaže i drugo, video detektori i tehnologija video detekcije vozila pokazali su se kao vrlo pouzdan način detekcije vozila na raskrsnicama i danas imaju značajnu ulogu u nadzoru i monitoringu vozila i njihovog kretanja u području raskrsnice.

## 6.1. Video detektori

Video detektori, ili videodetektorske kamere sastoje se od video kamera, digitalnog procesora slike i upravljačkog uređaja. Kamere se postavljaju na onim mestima na raskrsnici koja omogućavaju najbolju preglednost. Da bi se obezbedio kontinuirani rad i efikasno funkcionisanje inteligentne semaforizovane raskrsnice, neophodno je da instalisane kamere prikupljaju podatke o vozilima i pešacima tokom 24 časa dnevno i tokom promenljivih vremenskih uslova.. S toga je najbolje da se kao video detektori na raskrsnicama koriste termovizijke kamere koje mogu detektovati vozila, pešake i druge objekte tokom celog dana kao i u otežanim vremenskim uslovima.

Kompanija FLIR Systems, jedan od svetskih lidera u proizvodnji i implementaciji termovizijskih kamera i drugih sistema, već godinama snabdeva preduzeća zadužena za regulisanje saobraćaja kamerama, odnosno inteligentnim senzorima koji prikupljaju saobraćajne podatke u realnom vremenu na raskrsnicama i drugim mestima putne mreže, koja predstavljaju uska grla u saobraćaju. Funkcionisanje kamera bazira se na vizuelnoj i termalnoj tehnologiji koja omogućava prikupljanje saobraćajnih podataka i parametara (brojanje i klasifikacija vozila, merenje prosečne i trenutne brzine, saobraćajni protok, zauzetost saobraćajnih traka i drugo) koji se, nakon obrade, koriste za kontrolu i upravljanje radom svetlosnih signala i uvida u tokove saobraćaja na raskrsnici. Kamere takođe detektuju prisustvo pešaka u blizini pešačkih prelaza i incidentne situacije u području raskrsnice kao što su vožnja u suprotnom smeru, objekti pali sa vozila, saobraćajni zastoj, kretanje nedozvoljenih vozila, požari, saobraćajne nezgode i drugo. Na slikama 84-87. prikazano je nekoliko tipova kamera kompanije FLIR.

Termalna slika objekata, čija se detekcija vrši, formira se na bazi razlika u intenzitetu (tzv. toplotni kontrast), fluksu njihovog infracrvenog zračenja koje se prima pomoću termovizijske

kamere. Termovizijska kamera omogućava vizuelizaciju toplotnog kontrasta zahvaljujući mogućnosti detektora da razlike u intenzitetu primljenog zračenja, pretvori u električni signal koji se na odgovarajući način može prikazati tako da se, srazmerno toplotnom kontrastu, generiše kontrast vidljive slike. Snaga primljenog zračenja zavisi od emisione moći objekata, a ona sa druge strane od temperature i emisivnosti objekata..



Slika 84. FLIR TrafiCam: *Otkriva pokretna i nepomična vozila na signalisanim raskrsnicama, Detektovani podaci prenose se u računarski sistem na dalju obradu* [57]



Slika 85.TrafiData 690: *Inteligentna termovizijska kamera. Koristi se za detekciju vozila i pešaka na semaforizovanim raskrsnicama* [57]




Slika 86. FLIR ITS644 AID*: Termovizijska kamera za detekciju saobraćajnih nezgoda, požara i prikupljanje drugih podataka* [57]



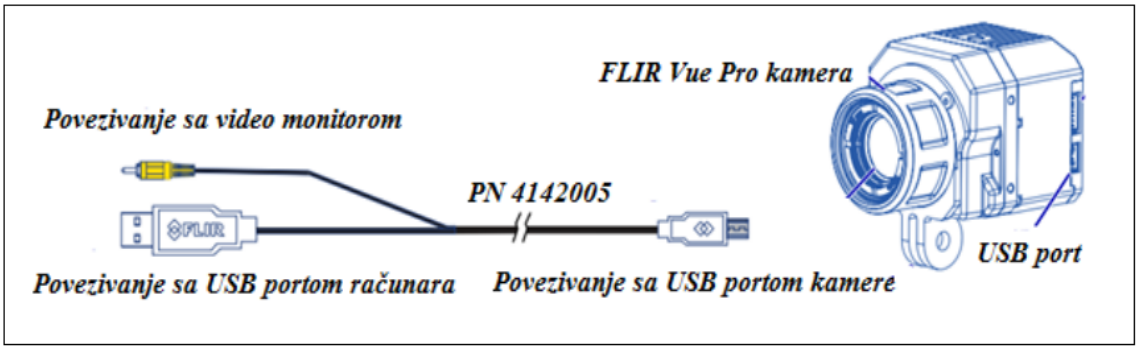

Slika 87. ThermiBot2: *Ineligentna termovizijska kamera. Koristi se za prikupljanje podataka o saobraćaju na signalisanim raskrsnicama* [57]

Digitalni processor slike, odnosno blok za elektronsku obradu signala omogućava prilagođavanje izlaznog signala sa detektora (kamere), u odgovarajući oblik pogodan za dalju upotrebu. Izlazni signali iz bloka za obradu signala mogu se upotrebiti na više načina kao što su:

- dobijanje vizuelne informacije o posmatranim, odnosno detektovanim predmetima,
- kao ulazni podaci za odgovarajući infomacioni sistem,
- u sistemima za automatsko upravljanje za aktiviranje aktuatora koji obezbeđuje reakciju sistema i drugi.

Većina termovizijskih kamera imaju sopstveni procesor koji omogućava autonoman rad kamera. Naime, nakon uključivanja, kamera se inicijalizuje i pokreće sopstveni operativni sistem koji kontroliše rad kamere i omogućava snimanje i elementarnu analizu dobijenih podataka. Termovizijske kamere imaju monitore relativno malih dimenzija tako da se, za njihove ozbiljnije primene u sistemima za nadzor i kontrolu procesa, ne mogu koristiti samostalno. Zbog toga se u

takvim sistemima, kao i u sistemima za upravljanje saobraćajem kamere povezuju sa personalnim računarima formirajući termovizijski sistem podržan računarima. Na slici 88. dat je šematski prikaz povezivanja termovizijske kamere sa personalnim računarom. Takav sistem može biti upotrebljen u različitim sistemima za nadzor i upravljanje procesima.




Slika 88. *Šematski prikaz povezivanja termovizijske kamere sa personalnim računarom [58]*

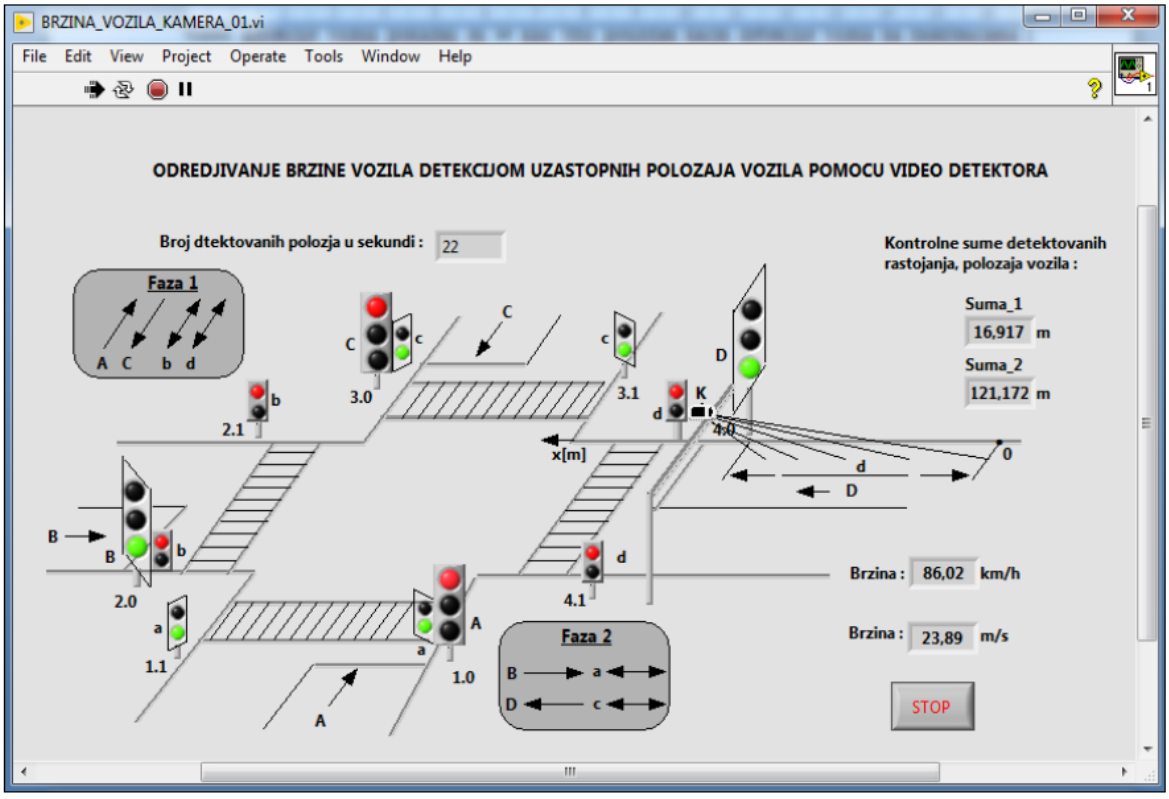
Softverska podrška ovakvom sistemu može biti sopstvene izrade, ili se može upotrebiti neka od već razvijenijih verzija, koja omogućava rad i dodatno daljinsko upravljanje kamerom preko računara.

### *6.1.1. Programsko rešenje za određivanje položaja i brzine vozila*

Da bi se pomoću termovizijske kamere odredili položaj i brzina vozila, neophodno je prethodno izvršiti kalibraciju i instalaciju kamere na odgovarajućoj lokaciji u području raskrsnice i povezivanje kamere sa personalnim računarom. Na taj način dobija se sistem koji omogućava da se podaci o vrednostima saobraćajnih parametara, dobijeni posredstvom kamere, memorišu, obrade i koriste za dalju upotrebu u regulisanju saobraćaja.

Po definiciji, kalibracija predstavlja upoređivanje poznate vrednosti jedne veličine sa nepoznatom vrednošću druge veličine dobijene mernim uređajem. Kamera je u osnovi merni uređaj koji meri dva parametra: *intenzitet zračenja tačke* objekta koji se snima i *položaj svake tačke u dvodimenzionalnom prostoru* koji je dobijen kao projekcija trodimenzionalnog prostora scene koju snima kamera. Kalibracija intenziteta zračenja podrazumeva uporedjivanje sa poznatim intenzitetima u realnom prostoru i stvaranje veze između vrednosti intenzteta zračenja koje kamera registruje i poznatih intenziteta. Kalibracija drugog parametra (geom[44]ijska kalibracija) obuhvata podešavanje žižne daljine objektiva kamere i određivanje položaja kamere u odnosu na scenu u kojoj se nalazi. Geometrijska kalibracija se realizuje upoređivanjem slike dobijene iz kamere s poznatom scenom. Postoje različite metode kalibracija kamera, ali kao što je već istaknuto, većina termovizijskih kamera imaju sopstveni procesor i operativni sistem koji omogućavaju kontrolu i autonoman rad kamera.

U nastavku ovog dela detaljnije je opisana metodologija određivanja brzine vozila upotrebom sistema *kamera - PC računar sa odgovarajućom aplikacijom* čiji je sadržaj prezentovan u ovom delu. Programsko rešenje urađeno je u LabVIEW okruženju. Na slici 89. prikazana je prednja ploča *VI*-a koji se koristi za određivanje brzine vozila. Termovizijska kamera instalisana je u području semaforizovane raskrsnice tako da je optička osa objektiva paralelna sa pravcem puta po kome se vozila kreću ka raskrsnici. Kamera detektuje, odnosno registruje položaje vozila u trenucima $t_1$, $t_2$, $t_3$, ... $t_n$, gde $n$ zavisi od toga kako je podešen rad kamere.




Slika 89. *Izgled prednje ploče virtuelnog instrumenta za određivanje brzine vozila*

Rad kamere je podešen tako da ona, kada se vozilo nalazi na delu pristupnog puta od *0* do *d* metara, generiše *n*-snimaka (frejmova) u sekundi, odnosno izvrši detekciju *n*-položaja vozila, $x_1$, $x_2$, $x_3$, ... $x_{n-1}$, $x_n$ (slika 90.). Dobijeni podaci se, u obliku brojčanog niza, memorišu u računar nakon čega se vrši njihova obrada, odnosno izračunavanje brzine vozila koje se približava kameri. Iz formiranog niza najpre se izabere $k_1$ – prvih članova $x_1$, $x_2$, ... $x_{k1}$, odnosno detektovanih položaja vozila i izračunava se njihova srednja vrenost:

$$X_{1sr} = (x_1 + x_2 + \ldots + x_{k1}) / k_1 \qquad (35)$$

Vrednost $X_{1sr}$ generesina je za vreme $t_1 = k_1 \cdot (1/n)$, gde je $n$ – broj frejmova koje kamera napravi za jednu sekundu. Potom se izračunava srednja vrednost zadnjih $k_2 = k_1$ članova formiranog niza:

$$X_{2sr} = (x_{n-k2+1} + x_{n-k2+2} + \ldots + x_n) / k_2 \qquad (36)$$

pri čemu su vrednosti $x_{n-k2+1}$, $x_{n-k2+2}$, ... $x_n$ detektovane za vreme od $t_2 = 1$ sekunde. Oduzimanjem (35) od (36) i korišćenjem obrasca za izračunavanje brzine tela, dobija se brzina vozila:

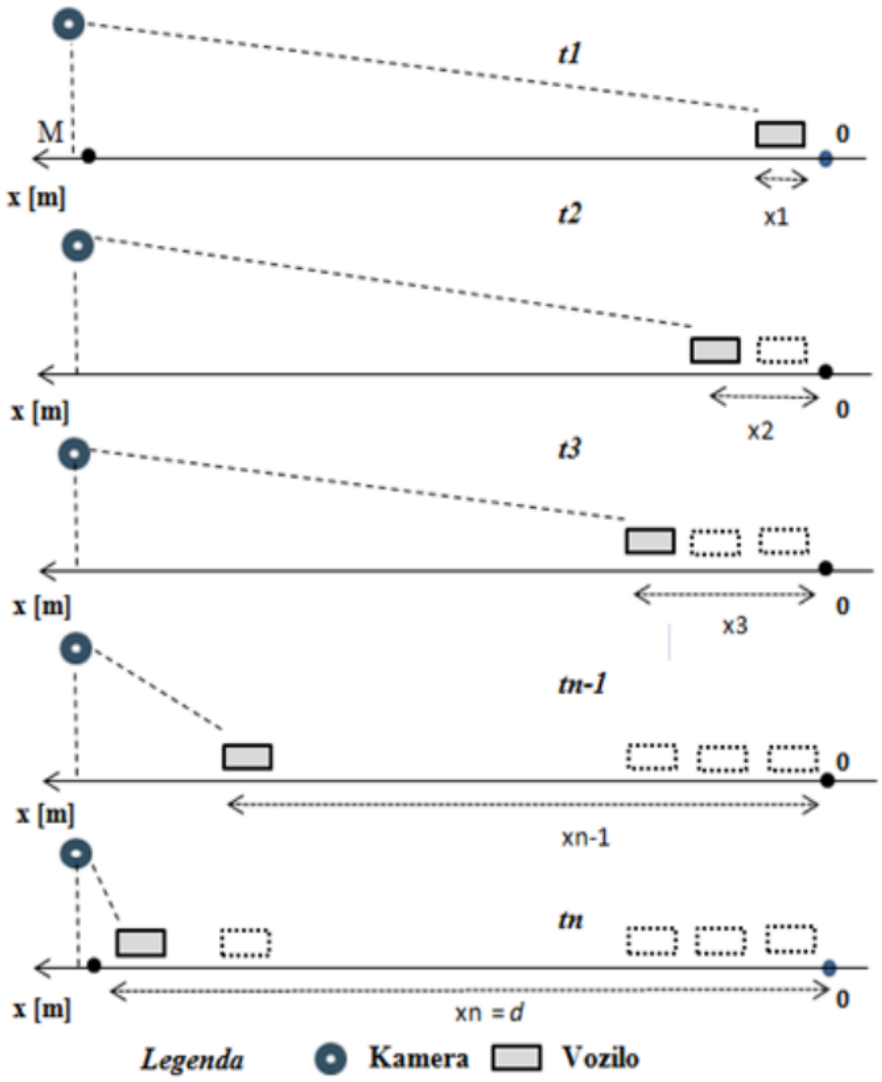
$$v_{sr} = \Delta X / \Delta t, \qquad (37)$$

gde su $\Delta X = X_{2sr} - X_{1sr}$ srednje rastojanje koje je vozilo prešlo za vreme $\Delta t$ i $\Delta t = t_2 - t_1 = 1 - k_1 \cdot (1/n) = (n - k1) / n$.

Izborom vrednosti $k_1 = k_2 = 1$ ili 2, sistem izračunava srednju brzinu vozila na delu $d$ pristupnog puta, a obzirom da je trenutna brzina tela

$$\lim_{\Delta t \to 0} v_{sr} \tag{38}$$

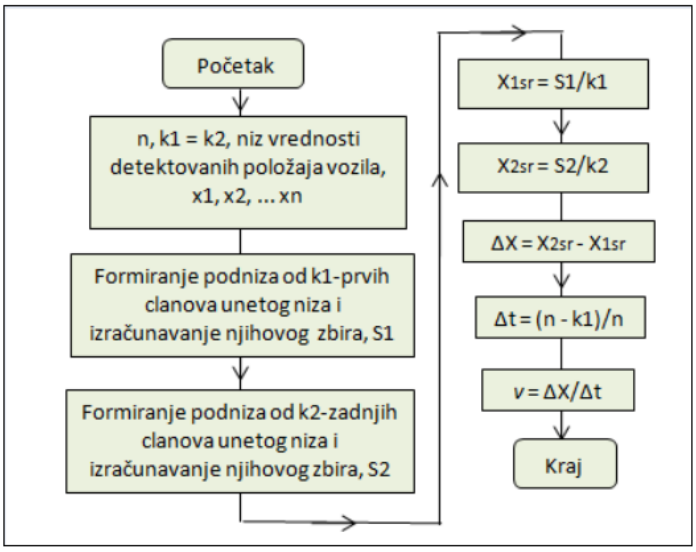
izborom vrednosti za k1 = k2 = n-2, ili n-1, sistem izračunava trenutnu brzinu u tački M na pristupnom putu koja je na rastojanju $d$ od koordinatnog početka.



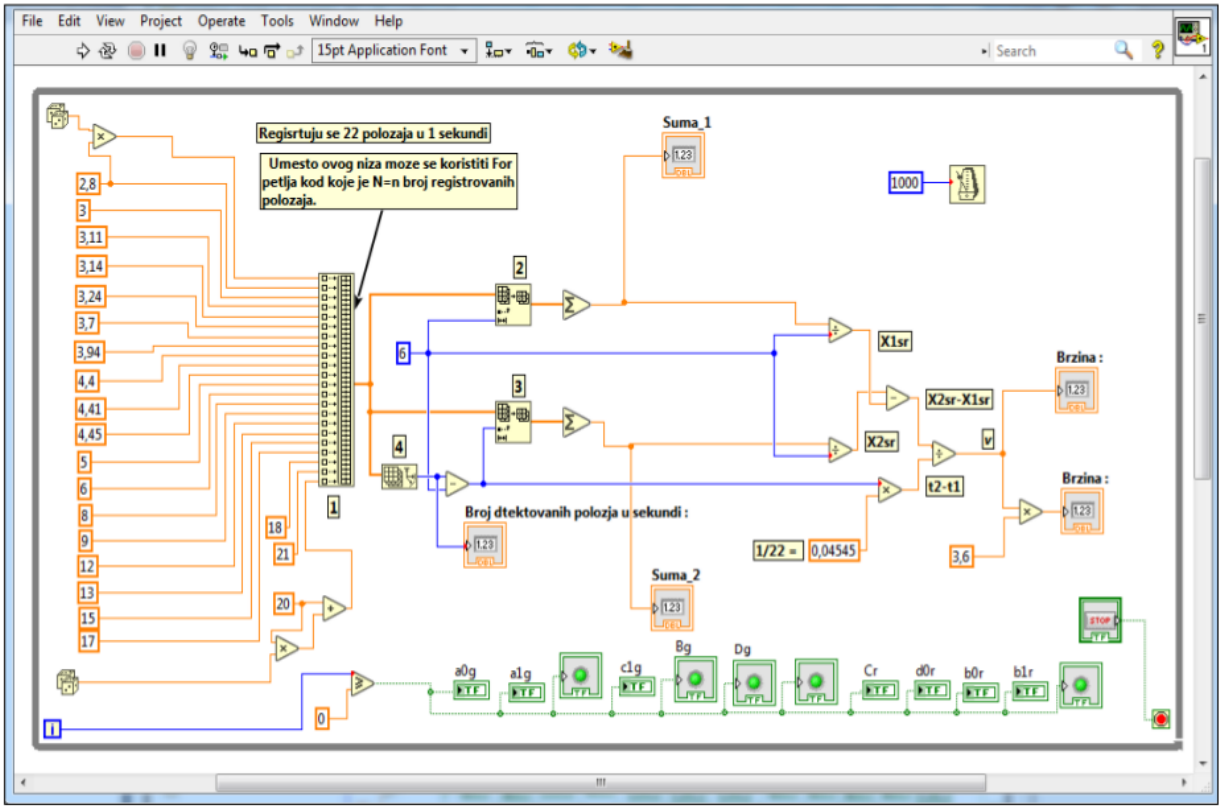

Slika 90. *Položaji vozila $x_1, x_2, x_3, \ldots x_{n-1}, x_n$ u trenucima $t_1, t_2, t_3, \ldots t_{n-1}$ i $t_n$*

Na slici 91. prikazan je algoritam izračunavanja brzine vozila, a na slici 92. odgovarajuće programsko rešenje, odnosno blok dijagram za izračunavanje brzine vozila. Aplikacija preuzima detektovane vrednosti položaja vozila $x_1, x_2, x_3, \ldots x_n$, memorisane u obliku jednodimenzionalnog

niza dužine $n$, i u zavisnosti od vrednosti $k_1 = k_2$ (u programu je $k_1 = k_2 = 6$), posredstvom funkcija 2. i 3. (slika 92.) formira dva podniza, izračunava $X_{1sr}$ *i* $X_{2sr}$ i na osnovu relacije (37), određuje brzinu vozila. Dobijena vrednost prikazuje se na prednjoj ploči *VI*-a.




Slika 91. *Algoritam – izračunavanje brzine vozila*




Slika 92. *Blok dijagram virtuelnog instrumenta za određivanje brzine vozila*

### *6.1.2. Programsko rešenje za detekciju i određivanje protoka vozila i pešaka*

Razvoj modernih računarskih sistema i mogućnosti brze i efikasne obrade podataka i usavršavanje savremenih elektro-optičkih sistema kao što su, primera radi, video i termovizijske kamere visoke rezolucije omogućili su da se u oblasti obrade slike i kompjuterske vizije razvijaju nove metode koje koriste prednosti napretka u hardverskim performansama sistema za viziju. Kompjuterska vizija u osnovi obuhvata metode za prikupljanje, obradu, analizu i razumevanje slike i njen osnovni cilj je analiza podataka iz realnog sveta kako bi se dobile numeričke ili simboličke informacije razumljive i upotrebljive za dalji rad i upotrebu. Izvori iz kojih se uzimaju podaci mogu biti različiti: slike, video sekvence, prikazi sa više kamera i drugi. Da bi sliku bilo moguće obraditi na računaru potrebno je da ona bude u digitalnom formatu, a ako to nije slučaj, sliku je potrebno prethodno digitalizovati.

Sistemi, čiji se rad zasniva na metodama kompjuterske vizije, danas imaju široku primenu u praksi: koriste se za različita merenja, zatim za detekciju i prepoznavanje objekata, kontrolu procesa, sortiranje objekata i drugo. U nastavku ovog odeljka ukratko su opisane metode za detekciju vozila i pešaka korišćenjem video detektora i njihova podela. Takođe je dato i jedno od mogućih aplikativnih rešenja (algoritam i aplikacija) detekcije vozila (pešaka) urađeno upotrebom programskog paketa LabVIEW.

Pouzdana detekcija vozila i pešaka na pristupnim prilazima raskrsnice i pešačkim prelazima predstavlja ključnu osobinu za realizaciju sistema za nadzor i upravljanje saobraćajem na semaforizovnim raskrsnicama. Kako navedene površine u oblasti raskrsnice dele vozila, pešaci i drugi učesnici u saobraćaju, neophodno je detektovati i prepozanti njihovo prisustvo kako bi se omogućio adaptivni rad semafora i izbegavanje potencijalnih saobraćajnih nezgoda. Detekcija i razlikovanje objekata u urbanim područjima su veoma kompleksni zbog velikog broja različitih objekata i sličnosti u percepciji različitih objekata.

Postupak detekcije objekata, u opštem slučaju, može se podeliti u dva dela i to:

- pretprocesiranje slike i
- segmentacija slike.

Pretprocesiranje slike predstavlja poboljšanje i transformaciju originalne slike u formu pogodnu za dalju obradu. U suštini on obuhvata operacije filtriranja šumova, podešavanje sjajnosti slike i podešavanje kontrasta. Većina kamera koje se danas koriste u ovoj oblasti poseduju sopstveni digitalni processor za elektronsku obradu signala koji omogućava dobijanje slika u digitalnom formatu (JPEG, PNG, TIFF) i prilagođavanje izlaznog signala sa detektora (kamere), u odgovarajući oblik pogodan za dalju upotrebu[21].

Segmentacija slike je prvi korak, i jedan od najvažnijih zadataka analize slike i detekcije objekata. Definiše se kao proces koji deli sliku ($R$) na njene sastavne nepreklapajuće delove, regione ($R_i$) i izvlači objekte od interesa. Koristeći terminologiju skupova, segmentacija slike se, u formalnom obliku, može definisati i kao:

$$R = \sum_{i=1}^{n} Ri, \text{ pri čemu je } R_i \cap R_j = \emptyset \text{ za svako } i \text{ i } j \text{ za koje je } i \neq j \qquad (39)$$

Regioni koji proističu iz segmentacije slike potrebno je da zadovolje sledeće uslove [59]:

1. da budu uniformni i homogeni u pogledu neke karakteristike,
2. njihova unutrašnjost treba da bude jednostavna,
3. susedni regioni treba da imaju značajno različite vrednosti u pogledu uniformnih karakteristika,
4. granice svakog segmenta treba da budu što jednostavnije, glatke, i moraju biti prostorno tačne.

[21] Detaljnije o predstavljanju digitalne slike u Prilogu 13.

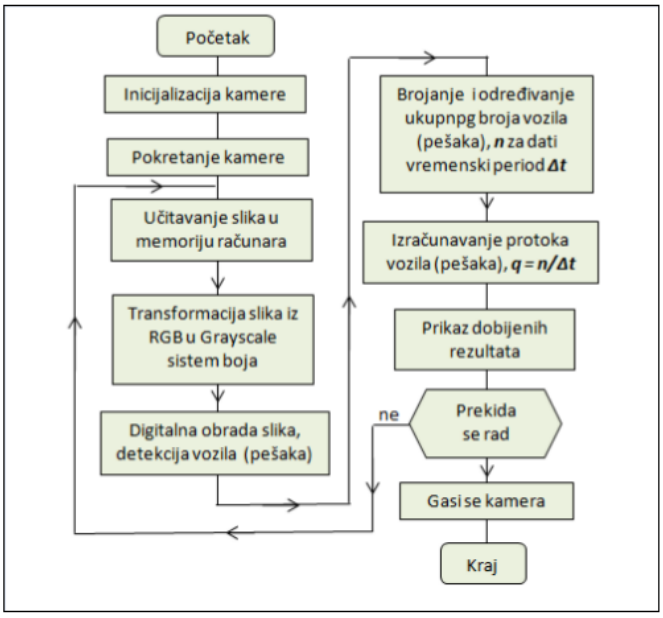
Segmentacija je takođe, jedan od najkritičnijih segmenata u automatskoj analizi slike, jer dobijeni rezultati segmentacije utiču na sve naredne procese analize, kao što su, primera radi, reprezentacija i opis objekta, klasifikacija objekata i interpretacija scene.

U literaturi se navode različite podele kada su u pitanju metode koje se primenjuju pri segmentaciji slika. Međutim, u praksi se izdvajaju dve najčešće korišćene tehnike i to [59]:

- pronalaženje ivica, odnosno izdvajanje samo onih piksela koji pripadaju rubovima objekata i
- izdvajanje regiona, odnosno izdvajanje celog objekta od pozadine pridružujući piksele čija je osvetljenost ispod nekog praga pozadini, a ostale objektu i obrnuto.

O metodama segmentacije slika detaljnije može se pročitati u literatuti [59], [60] i [61]. Takođe, potrebno je naglasiti i činjenicu da je poslednjih godina projektovano više značajnih metoda i algoritama za segmentaciju slike i 2D detekciju objekata, posebno vozila, pešaka i biciklista i izvršena su odgovarajuća poređenja dobijenih rezultata. Poređenja su pokazala da su isti algoritmi postigli mnogo veću tačnost pri detekciji vozila, jer se njihov oblik, za razliku od oblika pešaka i biciklista, ne menja u jedinici vremena [61]. Detekcije pešaka i biciklista i njihova tačnost još uvek su veoma aktuelne teme i predmet opsežnih istraživanja koja se danas realizuju u ovoj oblasti.

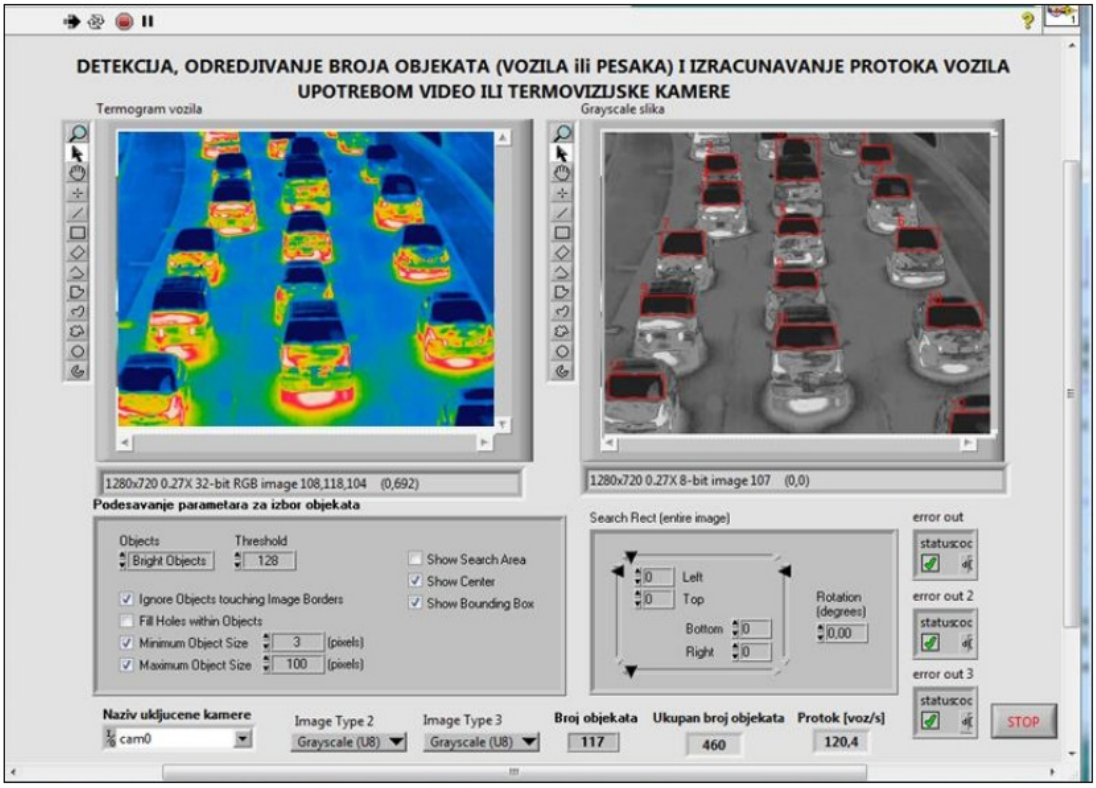
Algoritam aplikacije, koja je predložena u ovoj disertaciji i koja se može upotrebiti za detekciju objekata (vozila i pešaka), brojanje i određivanje protoka vozila pomoću video ili termovizijske kamere, prikazan je na slici 93. Podrazumeva se da je prethodno izvršeno povezivanje kamere sa računarom, odnosno da je konfigurisan računarski podržan video ili termovizijski sistem koji može biti upotrebljen za realizaciju ovog posla.




Slika 93. *Algoritam – detekcija vozila (pešaka) i određivanje broja i protoka vozila (pešaka)*

Na slici 94. prikazana je prednja ploča *VI-a* koji se koristi za praktičnu realizaciju algoritma sa slike 93. Na prednjoj ploči se, pored prikazivanja broja detektovanih vozila u jednoj sekundi (*Broj objekata*), ukupnog broja detektovanih vozila (pešaka) *n* za određeni vremenski period ($\Delta t$), nalaze i dve kontrole i to: *Naziv uključene kamere* kojom se bira kamera koja se uključuje u sistem i *Podešavanje parametara za izbor objekata* – vrši se izbor najmanje i najveće veličine i osvetljenosti objekata koje je potrebno detektovati. Na slici 95. prikazana je struktura blok dijagrama za detekciju i određivanje broja i protoka vozila (pešaka) upotrebom sistema video ili

termovizijska kamera – računar. U ovom slučaju vreme za koje se izračunava protok vozila (pešaka) iznosi $\Delta t = 10$ sekundi. Kada se sistem video ili termovizijska kamera – računar koristi za određivanje prosečnih vrednosti protoka vozila na pristupnim prilazima semaforizovane raskrsnice, onda je u tom slučaju $\Delta t$ najčešće jednako vremenu trajanja aktuelnog ciklusa.



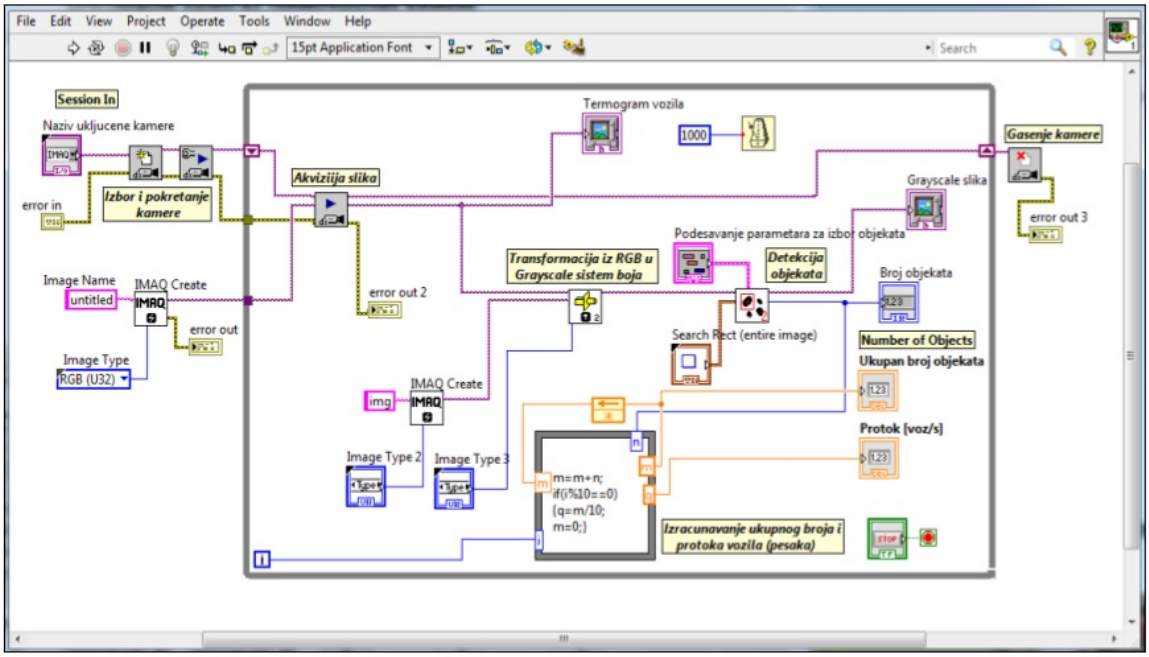

Slika 94. *Prednja ploča VI-a za detekciju, brojanje i izračunavanje protoka vozila (pešaka)*

Aplikacija za detekciju i određivanje broja i protoka vozila (pešaka) koristi jednu *While petlju* unutar koje se nalaze odgovarajuće funkcije (blok dijagram na slici 95.) za:

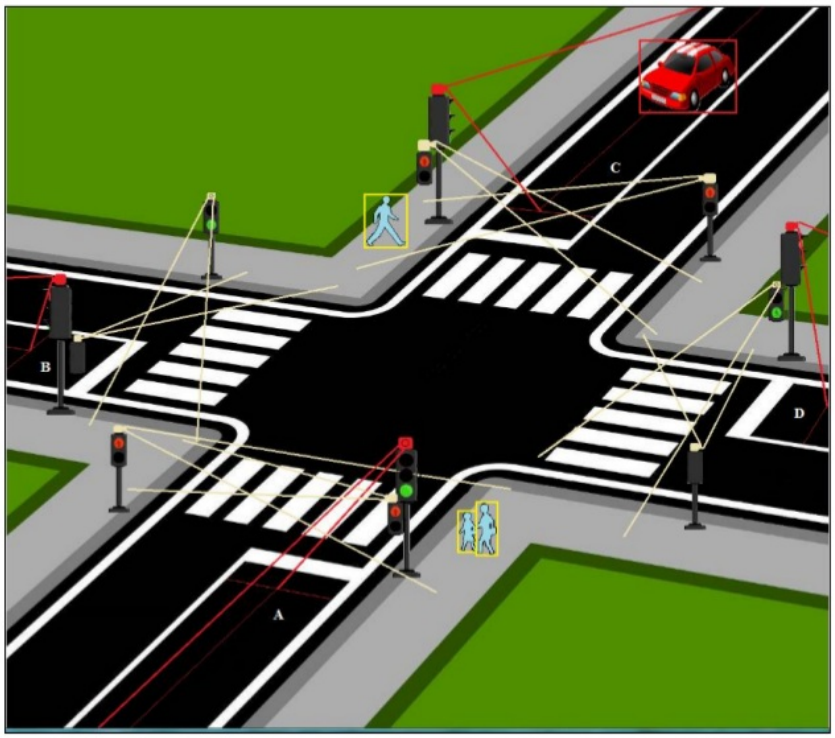
- akviziciju slika,
- transformaciju slike iz RGB u Grayscale sistem boja i
- detekciju objekata.

Pored navedenih funkcija, unutar *Whike petlje* nalazi se *Formula Node* struktura koja omogućava prebrojavanje i određivanje protoka vozila. Funkcije za pokretanje i gašenje kamere nalaze se izvan *While petlje*. Aplikacija takođe omogućava da se, upotrebom pet indikatora, na prednjoj ploči *VI*-a dobijaju termogram i Grayscale slika vozila, broj objekata (vozila) koja se detektuju za 1 sekundu, ukupan broj vozila detektovan za vreme $\Delta t = 10$ sekundi i protok vozila.

Imajući u vidu sve mogućnosti, relativno niske troškove instalacije i održavanja, kao i druge prednosti koje imaju video detektori a posebno kada su podržani računarskim sistemima i odgovarajućim softverom, video i termovizijske kamere mogu se na veoma efikasan način upotrebiti za nadzor, kontrolu i upravljanje saobraćajem na semaforizovanim raskrsnicama. Na slici 96. dat je šematski prikaz jedne semaforizovane raskrsnice na kojoj su instalisane četiri kamere za detekciju vozila (na slici: crvene) i osam kamera (bele) za detekciju pešaka. Kamere za detekciju vozila mogu se tako instalisati da tokom rada, pored detekcije, brojanja i određivanja protoka, istovremeno omogućavaju i određivanje položaja i izračunavanje brzine vozila.

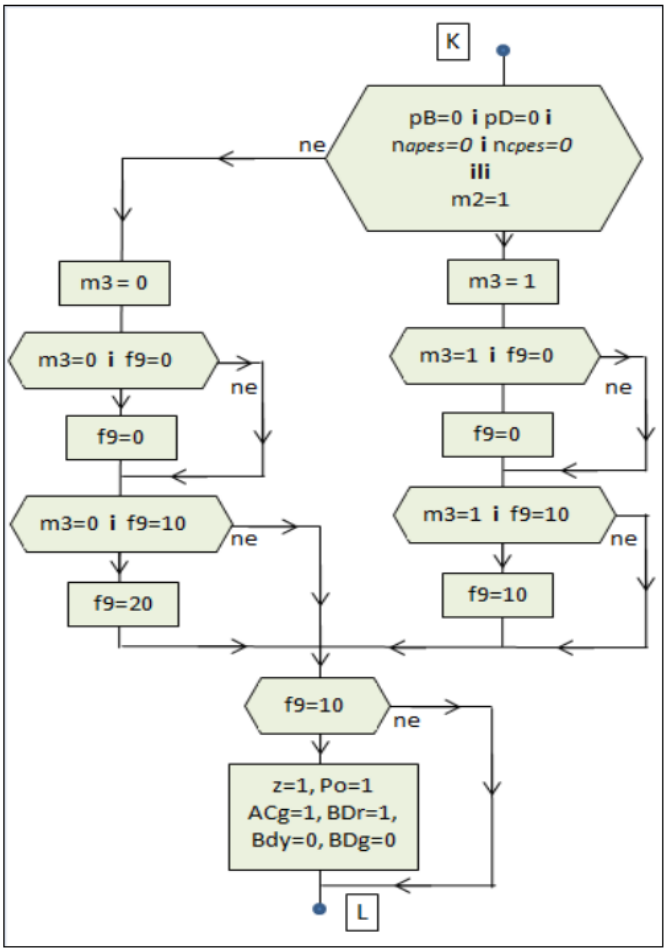



Slika 95. *Blok dijagram VI-a za detekciju i određivanje broja i protoka vozila (pešaka)*

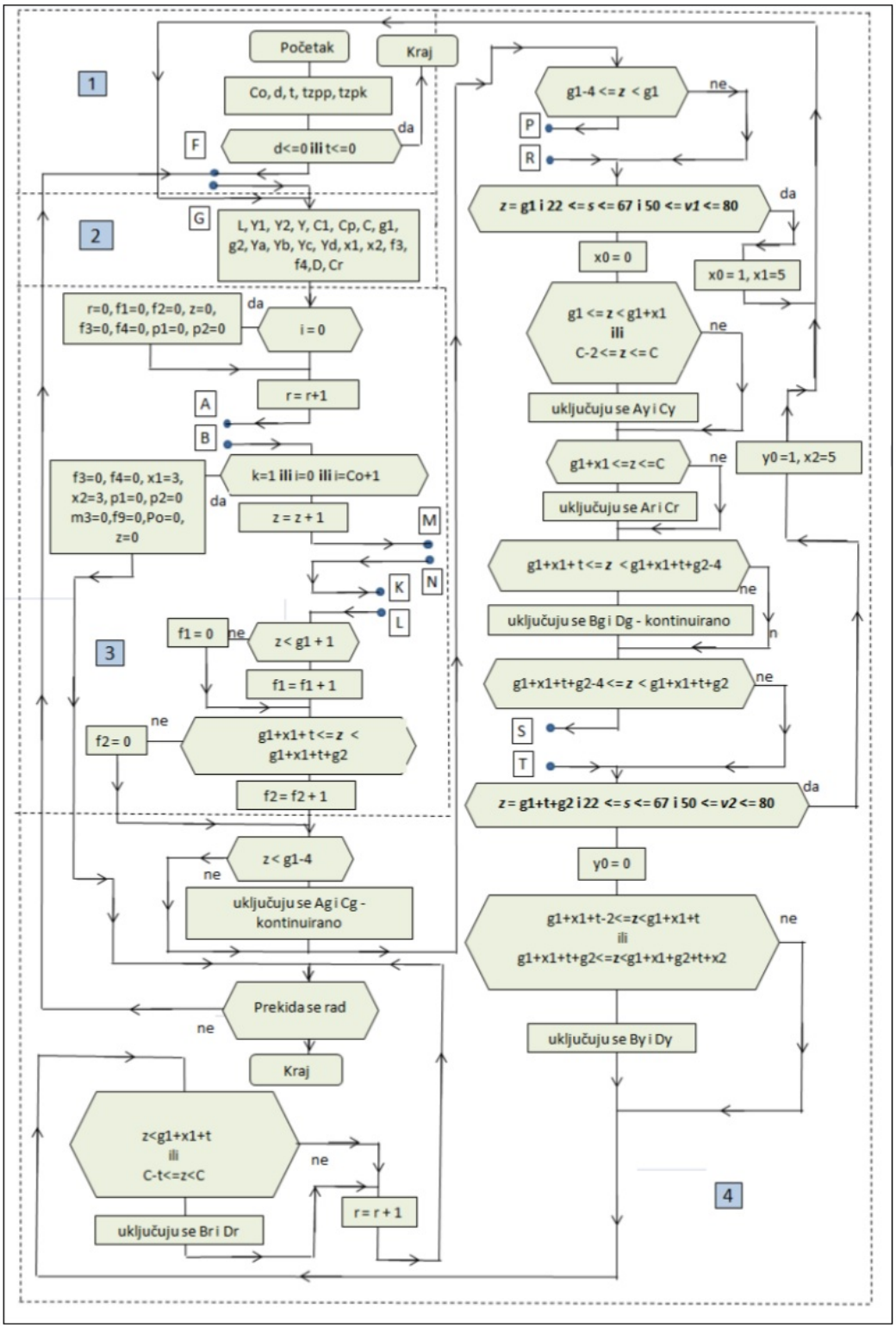



Slika 96. *Semaforizvana raskrsnica sa instalisanim video detektorima*

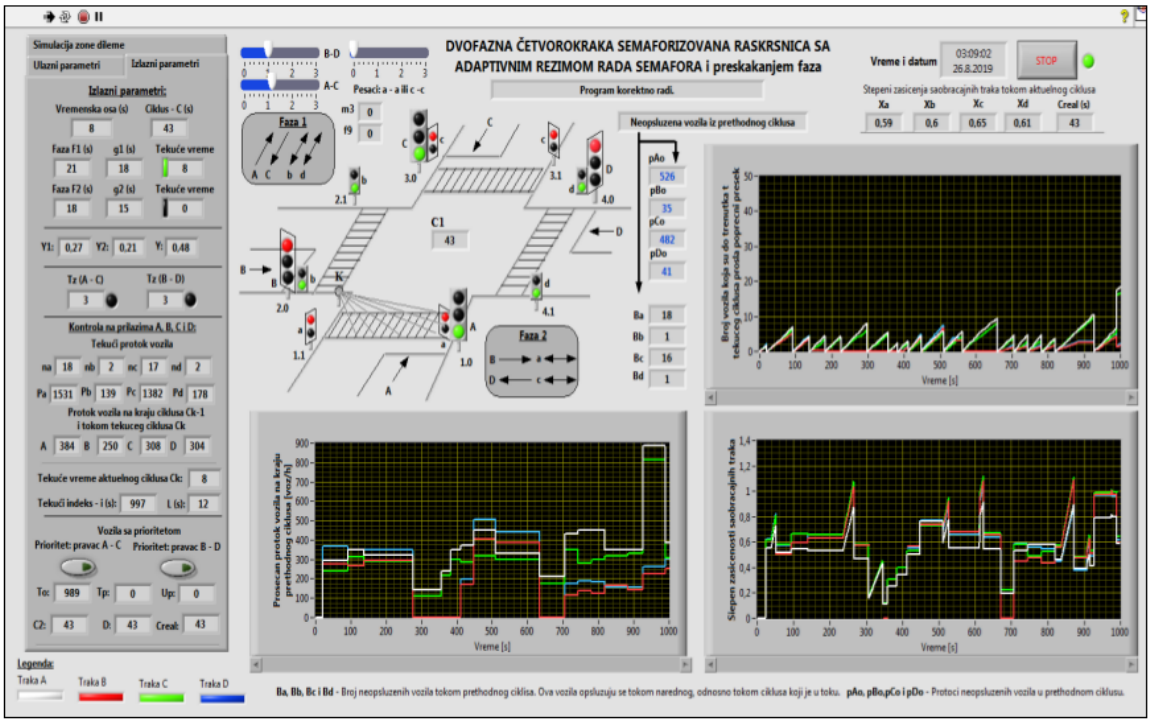
U praksi se često sreće situacija u kojoj su, primera radi, pravac A-C glavni, a pravac B-D sporedni put (slika 96.). Neretko se dešava da na pravcu B-D u dužem vremenskom periodu nema ni jednog vozila koje se kreće ka raskrsnici, niti ima pešaka na pešačkim prelazima preko glavnog puta, što se videodetektorima može uspešno utvrditi. U takvim slučajevima ne postoji potreba da se na pristupnim semaforima pojavljuju zeleni signalni pojmovi za propuštanje vozila duž pravca B-D, niti na semaforima za propuštanje pešaka preko glavnog puta. Drugim rečima, faza tokom koje se omogućava kretanje učesnika u saobraćaju duž navedenih pravaca, može se preskočiti i u tom periodu obezbediti nesmetano kretanje vozila (bez nepotrebnog zaustavljanja) duž glavnog puta. U disertaciji je predloženo jedno od mogućih rešenja za funkcionisanje takve raskrsnice. Odgovarajući algoritam prikazan je na slici 98., dok je na slici 99. prikazana prednja ploča (na kojoj je, zbog preglednosti, izostavljena kamera za detekciju vozila na pravcu B-D – prikazana na slici 89.) *VI*-a semaforizovane raskrsnice sa mogućnošću preskakanje faze. Algoritam je po strukturi isti kao i osnovni algoritam semaforizovane dvofazne raskrsnice (slika 53.), s tim što između tačaka K i L ima poseban dodatak (slika 97.) koji određuje funkcionisanje raskrsnice u uslovima kada na pristupnim prilazima pravca B-D nema vozila i na pešačkim prelazima pravca A-C nema pešaka.




Slika 97. *Deo algoritma sa slike 98. između tačaka K i L*




Slika 98. *Algoritam dvofazne semaforizovane raskrsnice sa preskakanjem faze*




Slika 99. *Prednja ploča VI-a semaforizovane raskrsnice sa preskakanjem faze*

Pored ulaznih i izlaznih parametara čije je značenje opisano u delu 5.4.3.1. ove disertacije, u ovom slučaju koriste se još tri parametra: $m_3$, $f_9$ i $P_o$ kojima se definišu uslovi preskakanja faze i način funkcionisanja raskrsnice u tim uslovima. Primera radi, $m_3 = 1$ podrazumeva da na pravcu B-D nema vozila i da na pešačkim prelazima preko glavnog puta nema pešaka. Ako se tokom vremena detektuje jedno ili više vozila na sporednom putu, ili prisustvo pešaka pored pešačkih prelaza na glavnom putu, ili vozila sa prioritetom na pravcu B-D, parametar $m_3$ dobija vrednost nula i raskrsnica nastavlja dalji rad sa obe faze u okviru ciklusa.

# 7. PREGLED PREDNOSTI I NEDOSTATAKA INTELIGENTNE SVETLOSNO SIGNALISANE RASKRSNICE U ODNOSU NA RASKRSNICU SA FIKSNIM REŽIMOM RADA

Veliki broj sistema koji se danas koriste za kontrolu i upravljanje saobraćajem na površinskim semaforizovanim raskrsnicama rade sa fiksnom dužinom trajanja ciklusa koja je određena na osnovu prethodno istraženih uslova u saobraćaju i izvršenih merenja protoka vozila na prilaznim trakama raskrsnice. Saobraćajni tokovi su grupisani u određeni broj faza pri čemu se svakoj fazi dodeljuje određeni vremenski interval za opsluživanje. Ovakav pristup regulasanju saobraćaja je efikasan pri manjim vrednostima protoka vozila pri čemu je propusna moć raskrsnice veća od zahteva za prolaz vozila kroz raskrsnicu.

Sa druge strane, činjenica je da broj vozila na putevima stalno raste, menjaju se protoci vozila, povećavaju se zahtevi za prolaz vozila kroz raskrsnice i drugo. Povećani zahtevi često su veći od kapaciteta raskrsnica, što može dovesti do zagušenja u saobraćaju. Opsluživanje vozila u takvim uslovima može se uspešno realizovati povećanjem kapaciteta raskrsnice. Međutim, zbog prostornih ograničenja, posebno u gradskim sredinama, često to nije moguće. Zbog toga je potrebno da se za poboljšanje uslova odvijanja saobraćaja koriste druga rešenja. Jedno od tih je inteligentna semaforizovana raskrsnica sa adaptivnim režimom rada sistema semafora gde se, korišćenjem odgovarajućih detektora, računarskog sistema, algoritama i softverskih rešenja, određivanje ciklusa i upravljanje saobraćajem vrši na osnovu protoka vozila na prilazima raskrsnici. Rad sistema ukratko se može opisati sledećim celinama:

a. Detekcija podataka o obimu saobraćaja na pristupnim trakama raskrsnice,
b. Transformacija podataka u protoke vozila,
c. Izračunavanje optimalne dužine ciklusa,
d. Svakoj fazi dodeljivanje vremenskih intervala za opsluživanje vozila,
e. Detektcija vozila sa pravom prioriteta i omogućavanje prolaza kroz raskrsnicu i
f. Detektcija vozila u zonama dileme, produžavanje trajanja žutog svetla radi bezbednog prolaza detektovanih vozila kroz raskrsnicu.

Algoritmi, odgovarajuća softverska rešenja i rezultati testiranja funkcionisanja adaptivnih sistema detaljno su opisani u prethodnim poglavljima disertacije.

Analizirajući funkcionisanje sistema sa adaptivnim režimom rada koji su predloženi u ovoj disertaciji, utvrđene su njihove prednosti u odnosu na sisteme semafora sa fiksnim dužinom trajanja ciklusa i to:

- sposobnost upravljanja nepredvidivim promenama saobraćajnih tokova na prilazima semaforizovane raskrsnice i dinamičan odgovor na promenljive zahteve za prolaz vozila kroz raskrsnicu,
- mogućnost detekcije vozila sa pravom prioriteta prolaza i normalizacija odvijanja saobraćaja nakon prolaska ovih vozila kroz raskrsnicu,
- mogućnost detekcije vozila u zonma dileme i produžavanje žutog svetla radi njihovog bezbednog prolaza kroz raskrsnicu,
- memorisanje podataka o uslovima odvijanja saobraćaja na raskrsnici i mogućnost realizacije naknadnih analiza,

- mogućnost povezivanja sistema sa policijom, vatrogasnom službom, zdravstvenim centrom i lokalnom samoupravom,

- smanjeno zagađenje vazduha,

- smanjena potrošnja goriva,

- smanjenje vremenskih gubitaka,

- u realnom vremenu mogu se pratiti i predvideti tendencije koje se u toku odvijanja saobraćaja mogu pojaviti,

- svetlosnim signalima na semaforima upravlja računarski sistem a ne programabilni logički kontroler pa ne postoji potreba za dodatnom izradom i implementacijom programa koje bi koristio kontroler i

- adaptivni sistemi upravljanja omogućavaju zaštitu od preopterećenja i nestabilnog ponašanja sistema koja nastaju kada se vrednost stepena zasićenja raskrsnice približava jedinici.

Kada je reč o nedostacima adaptivnih sistema za upravljanje saobraćajem na izolovanim semaforizovanim raskrsnicama, potrebno je posebno istaći dva i to:

- kvalitet upravljanja saobraćajem na semaforizovanoj raskrsnici sa adaptivnim sistemom rada zavisi od algoritama koji su razvijeni za upravljanje procesom i od programskih rešenja unešenih u računar, pa se može dogoditi da tim algoritmima i odgovarajućim programima nisu obuhvaćene sve moguće situacije do kojih u radu može doći, što tokom eksploatacije može dovesti do poremećaja u odvijanju saobraćaja i

- regulisanje saobraćaja na raskrsnici obavlja se uz podršku računarskog sistema, pa ukoliko dođe do njegovog kvara, ili oštećenja programa, a da prethodno nije obezbeđeno upravljanje preko rezervnog, može takođe dovesti do značajnog poremećaja u odvijanju saobraćaja na raskrsnici. U takvim slučajevima jedan sistem nije dovoljan za ostvarivanje odgovarajuće pouzdanosti, već je potrebno koristiti dva, ili više identičnih sistema od kojih je jedan aktivan a ostali rade u pozadini. Ako dođe do toga da aktivni sistem iz nekog razloga otkaže, jedan od rezervnih preuzima regulaciju saobraćaja, a prethodni se isključuje.

## ZAKLJUČAK I PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA

Raskrsnice su mesta na saobraćajnoj mreži gde se javljaju konflikti između saobraćajnih tokova i po pravilu predstavljaju kritična mesta na mreži drumskih saobraćajnica. U gradskim i vangradskim naseljima širom sveta i kod nas primenjuju se različite metode kako bi se na ovim mestima što efikasnije upravljalo saobraćajem, kako bi se obezbedilo bezbedno kretanje vozila i pešaka, kraće vreme putovanja, manja potrošnja goriva, manje zagađenje životne sredine i drugo. Iz ovih razloga, prilikom izgradnje, ili rekonstrukcije raskrsnica, veoma je važno pravilno ih dimenzionisati i u skladu sa potrebama definisati odgovarajući tip regulisanja saobraćaja. Ukoliko se ova činjenica zanemari, može se dogoditi da raskrsnica, zbog nedovoljnog kapaciteta bude kritično mesto na posmatranom putnom pravcu, ili, ako je predimenzionisana, da bude i nedovoljno iskorišćena, što dovodi do smanjenja nivoa usluge, povećanja troškova eksploatacije i do povećanja štetnih uticaja na okolinu.

Međutim, zbog prostornih ograničenja, izgradnja novih i proširenje postojećih raskrsnica nije uvek moguće. Zbog toga se nameće potreba da se pronalaze druga rešenja za sve veća zagušenja u saobraćaju. Jedno od rešenja za ublažavanje ovih posledica je optimizacija postojećih načina upravljanja saobraćajem. U ovoj disertaciji predložena su određena rešenja koja se odnose na upravljanje radom semafora na izolovanim semaforizovanim raskrsnicama. Rešenja se baziraju na upotrebi novih tehnologija (senzora, video i termovizijskih kamera) koja omogućavaju dostupnost preciznim podacima o saobraćajnim tokovima u realnom vremenu i sadrže odgovarajuće algoritme i programe koji su urađeni korišćenjem programskog paketa LabVIEW. Predloženi algoritmi su kompletni, pregledni, dovoljno razumljivi i, za razliku od algoritama postojećih sistema, dostupni svim učesnicima u projektovanju, izgradnji i eksploataciji adaptivnih sistema koji bi se koristili na ovakvim i sličnim raskrsnicama. U disertaciji je posebna pažnja posvećena problemu prolaska vozila sa prioritetom i to iz razloga što nijhov prolaz kroz raskrsnicu može uzrokovati promene u odvijanju saobraćaja. One se najčešće manifestuju pojavom prezasićenih tokova u saobraćaju, promenama režima rada semafora i dužine trajanja ciklusa, nemogućnosti da se tokom ciklusa opsluže sva ostala vozila i drugo. Nepovoljne vremenske prilike (kiša, sneg, led, magla i drugo), pored neadekvatnog dimenzionisanja i neefikasne konfiguracije semaforskih sistema, takođe utiču na odvijanje saobraćaja i predstavljaju jedan od uzroka pojave gužvi i vremenskih gubitaka na raskrsnicama. Predložena rešenja, koja su data u ovoj disertaciji, podrazumevaju da su signalni planovi dizajnirani za rad u normalnim vremenskim uslovima.

Prvo rešenje odnosi se na upravljanje radom izolovane semaforizovane raskrsnice sa fiksnim režimom rada, konstantnim protocima vozila na pristupnim prilazima i sa mogućnošću sistema da detektuje prolaz vozila sa prioritetom i vozila u zonama dileme. Model se bazira na Webster-om obrascu za određivaje optimalne dužine ciklusa. Rezultati testiranja pokazali su da raskrsnica sa predloženim rešenjem sistema semafora, po završetku prolaska vozila sa prioritetom, omogućava da se odvijanje saobraćaja postepeno normalizuje, odnosno da se dovede u stanje nezasićenih saobraćajnih tokova, i da kao celina korektno funkcioniše.

Drugo predloženo rešenje odnosi se na četvorokraku dvofaznu semaforizovanu raskrsnicu sa fiksnom dužinom ciklusa, promenljivim prosečnim protocima vozila na pristupnim saobraćajnim trakama i sa mogućnošću detekcije vozila sa prioritetom i vozila u zonama dileme. Predloženi algoritam i programsko rešenje omogućavaju da semafori rade u adaptivnom režimu rada

prilagođavajući dužinu ciklusa neravnomernostima saobraćaja, odnosno prosečnim protocima vozila čije su vrednosti različite u okviru različitih ciklusa. Treće predloženo rešenje je generalizacija prethodnog i odnosi se na adaptivni sistem rada dvofazne semaforizovane raskrsnice. Ono je po sadržaju algoritma i ogovarajućeg programa, kao i po načnu funkcionisanja, identično prethodnom. Razlika je samo u tome što u ovom slučaju, projektovana dužina ciklusa iznosi 120 sekundi.

Rešenje za rad sistema semafora na četvorokrakoj semaforizovanoj raskrsnici sa različitim dnevnim signalnim planovima, koje je predloženo u disertaciji, takođe obezbeđuje adaptivni režim rada jer sistem reaguje na prolaz vozila sa prioritetom i na promene prosečnih protoka vozila koji su različiti u različitim vremenskim intervalima.

Model i metoda optimizacije rada četvorokrake semaforizovane raskrsnice sa četiri faze razvijeni su na osnovu prezentovanog algoritma u disertaciji i programskog rešenja kreiranog upotrebom LabVIEW softverskog paketa. Rešenje, kao i prethodna, obuhvata slučajeve kada se tokovi vozila i pešaka opslužuju u okviru istih faza.

Algoritmi i programska rešenja testirani su računarskom simulacijom. Dobijeni rezultati pokazali su da raskrsnice sa sistemima za upravljanje saobraćajem čiji se rad bazira na ovim rešenjima, korektno funkcionišu u uslovima kada kroz raskrsnice prolaze, ili ne prolaze vozila sa prioritetom, kao i u uslovima kada se pojedina vozila nalaze u zonama dileme. Koristeći podatke o neopsluženim vozilima tokom tekućeg ciklusa, razvijeni model upravlja radom semafora u uslovima nezasićenih i prezasićenih saobraćajnih tokova na taj način što uključuje protoke ovih vozila u proračun vrednosti dužine trajanja narednog ciklusa. Rezultati pokazuju da predložena metoda, u kojoj se na kraju aktuelnog ciklusa izračunate prosečne vrednosti saobraćajnih tokova koriste za određivanje dužine trajanja sledećeg ciklusa i raspodelu zelenog svetla po fazama, omogućava primenu Webster-ovog modela i u uslovima vremenski promenljivih (ne samo konstantnih) saobraćajnih tokova na prilaznim trakama raskrsnice. Sve to ukazuje da se predložena rešenja mogu praktično primeniti na realnim raskrsnicama.

Kada je reč o pravcima budućih istraživanja u ovoj oblasti, bilo bi interesantno raditi na razvoju modela sistema upravljanja saobraćajem sa adaptivnim režimom rada koji bi se koristili u oblasti linijske koordinacije funkcionisanja raskrsnica. Jedan od pravaca daljih istraživanja može biti i rad na razvoju modela za proračun signalnog plana koji bi, pored vremenskih gubitaka uključio i druge kriterijumske funkcije kao što su, primera radi, dužina redova vozila, koncetracija izduvnih gasova, metereološki parametri i drugo. Takođe je potrebno nastaviti rad na usavršavanju postojećih i otkrivanju novih metoda za napajanje semaforskih sistema iz obnovljivih izvora energije, kao i na smanjenju troškova instalacije i eksploatacije odgovarajućih i primenljivih rešenja u toj oblasti.

**LITERATURA**


[1] Tojagić M., *BEZBEDNOST DRUMSKOG SAOBRAĆAJA*, Brčko, EVROPSKI UNIVERZITET BRČKO DISTRIKTA, 2015

[2] Ranković Ž., *Regulisanje saobraćaja, Teorija saobraćajnih tokova (Materijal sa predavanja),* Beograd TEHNIKUM TAURUNUM, Visoka inženjerska škola strukovnih studija Beograd – Zemun, smer Drumski i gradski saobraćaj, 2011. dostupno na: https://www.tehnikum.edu.rs/predmeti/tst_predavanja.pdf

[3] *Putevi-srbije*, nd. str. 1. dostupno na: https://www.moto-berza.com/str/putevi-srbije/

[4] *Regulisanje-Saobracajnih-Tokova*, 2009. str. 1-51. dostupno na: https://www.scribd.com/doc/13134881/t-2-Regulisanje-Saobracajnih-Tokova

[5] *Pojmovi u saobracaju: putevi, kolovoz i staze*, dostupno na: http:/Itablice.com/pojmovi-u-saobracaju-putevi-kolovoz-staze

[6] Vlada Republike Srbije, *Pravilnik o uslovima koji sa aspekta bezbednosti saobraćaja moraju da ispunjavaju putni objekti i drugi elementi javnog puta,* Beograd, Službeni glasnik RS br. 41/09 i 53/10

[7] Panevropski Apeiron Univerzitet, Drumske i gradske saobraćajnice, Raskrsnice, Banja Luka, 2015. str. 1-88., dostupno na http://www.apeiron-uni.eu/lycboardclient/Detail.aspx?DocumentID=21052

[8] Javno preduzeće Putevi Srbije, *Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji*, *Funkcionalni elementi i površine puteva, Raskrsnice i priključci*, Beograd, 2012.

[9] *POJMOVI SAOBRACAJNOG I TRANSPORTNOG INŽENJERSTVA,* dostupno na: https://www.tehnikum.edu.rs/predmeti/rs.predavanja.pdf

[10] *Kružne raskrsnice*, dostupno na: https://www.google.com/search?q=kruzne+raskrsnice

[11] Ruškić N., *Model proračuna kapaciteta četvorokrakih nestandardnih nesignalisanih raskrsnica*, Tehničko rešenje, Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2015.

[12] Jovanović A., *Izbor signalnih planova za upravljanje saobraćajem primenom optimizacije kolonije pčela*, doktorska disertacija, Beograd, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, 2017.

[13] Vlada Republike Srbije, *Pravilnik o saobraćajnoj signalizaciji*, Beograd, Sl. glasnik RS br. 85/17, 2017.

[14] *SKRIPTA-KAPACITETI*, str. 1-3., dostupno na: https://www.scribd.com/document/228552169/SKRIPTA-KAPACITETI

[15] Čelar N., *Analitički modeli vremenskih gubitaka za signalisanu raskrsnicu*, str. 1-6. dostupno na: https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0040-2176/2014/0040-21761404663C.pdf

[16] Sever D., *Traffic engineering Highway Capacity Manual 2010*, Maribor, Univerza v Mariboru, 2015.

[17] *Kapacitet raskrsnice*, str. 1-14. dostupno na: https://www.scribd.com/document/272668525/Kapacitet-raskrsnice
.

[18] Bogdanović V., Simeunović M., Leković M., *POSTUPAK IZBORA OPTIMALNOG REŠENJA RASKRSNICE,* Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, Departman za saobraćaj Trg D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, 2013, str. 1-10

[19] Marjanović S, Radivojev D., *PUT I OKOLINA PUTA KAO FAKTOR BEZBEDNOSTI SAOBRAĆAJA*, Republika Srpska, Banja Luka, 5. Međunarodna konferencija „Bezbjednost saobraćaja u lokalnoj zajednici“, 27 – 28. oktobar 2016. str. 1-9.

[20] ] Lipovac K., *BEZBEDNOST SAOBRAĆAJA*, udžbenik, Beograd, Javno preduzeñe Sluæbeni list SRJ Beograd, Jovana Ristića 1, 2008

[21] *STRATEGIJA BEZBEDNOSTI SAOBRAĆAJA NA PUTEVIMA REPUBLIKE SRBIJE ZA PERIOD OD 2015. DO 2020. GODINE,* Beograd, "Sl. Glasnik Republike Srbije” br. 64/2015

[22] Kostić A.,*RASKRSNICE I SLOZENE RASKRSNICE U NIVOU*, skripte, Beograd, Saobraćajni fakultet Beograd, 2018. str. 1-52.

[23] *Regulisanje i upravljanje saobraćajem i način rada svetlosnih signala,* dostupno na: http://www.apeiron-uni.eu/lycboardclient/Detail.aspx?DocumentID=21052

[24] *Horizontalna signalizacija i znakovi na putu*, dostupno na: https://www.google.com/search?q=Horizontalna+signalizacija,+znakovi+na+kolovozu

[25] *Nestandardne raskrsnice,* dostupno na: https://www.google.com/search?q=nestandardne+raskrsnice

[26] *Regulisanje i upravljanje saobraćajem*, Način rada svetlosnih signala, ITS Tehnologije, INTELIGENTNI TRANSPORTNI SISTEMI (ITS), dostupno na: www.apeiron-uni.eu/lycboardclient/Detail.aspx?DocumentID

[27] *CALCULATION OF TRAFFIC SIGNAL TIMINGS - WEBSTER'S METHOD,* nd. dostupno na: http://www.rhd.gov.bd/Documents/ExternalPublications/Trl/Calculation%20of%20traffic%20signal%20timings-Webster's%20method%20Note13.pdf

[28] Boumediene A., Brahimi K., Belguesmia N.,Bouakkaz K., *SATURATION FLOW VERSUS GREEN TIME AT TWO-STAGE SIGNAL CONTROLLED*

*INTERSECTIONS,* 2010., pp. 1-9. dostupno na: https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3846/1648-4142.2009.24.288-295

[29] Pretorius, P.,Van As S.C. and Troutbeck J., *Issues with the operational analysis of urban intersections*, Proceedings of the 23rd Southern African Transport Conference (SATC 2004), Pretoria, South Africa, 2004. str. 1-14. dostupno na: https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/5699/Pretorius_Issues(2004).pdf

[30] Stokes R., *Comparasion of saturation flow rates at signalized intersections,* 1988., pp. 1-6. dostupno na: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.374.6368&rep=rep1&type=pdf

[31] Allsop R., *SIGSET: A COMPUTER PROGRAM FOR CALCULATING TRAFFIC SIGNAL SETTINGS,* 1971., dostupno na: https://trid.trb.org/view/116637

[32] Feng-Bor L., Cooke D. and Vijayakumar S., *Use of Predicted Vehicle Arrival Information for Adaptive Signal Control-An Assessment,* 1987., pp. 1-10. dostupno na: http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1987/1112/1112-012.pdf

[33] Akçelik R., *Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis*, Seventh reprint,1998., dostupno na: http://www.sidrasolutions.com/Documents/Akcelik_ARR%20123_SignalTiming.pdf

[34] Brilon W.,Wu N., *Delays at Fixed-Time Traffic Signals Under Time-Dependent Traffic Conditions,* 2015., pp. 2-9. dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/259997463

[35] Yousef M., Al-Karaki J. And Shatnawi A., *Intelligent Traffic Liht Flow Control System Using Wireless Sensors Networks,* 2010., pp. 753-766. dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/220586947

[36] De Schutter B., De Moor B., *Optimal traffic light control a single intersection,* 1998. pp. 260-276. dostupno na: ftp://ftp.esat.kuleuven.ac.be/sista/ida/reports/96-90.pdf

[37] Leeuwaarden J., *Delay analysis for the fixed-cycle traffic-light queue*, 2006., pp. 1-16. dostupno na: https://www.eurandom.tue.nl/reports/2006/014-report.pdf

[38] Helbing D., Mazloumian A., *Operation Regimes and Slower-is-Faster-Effect in the Control of Traffic Intersections*, 2009., pp. 1-18. dostupno na: https://arxiv.org/abs/0903.0926

[39] Kareem E. And Jantan A., *An intelligent traffic light monitor system using anadaptive associative memory*, 2011., pp. 1-17. dostupno na: https://pdfs.semanticscholar.org/36cf/dbffeb96a37dcacf1cd93c68f1abce6d4c41.pdf

[40] Roozemond D., Rogier J., *Agent controlled traffic lights,* 2000., str. 1-6. dostupno na: https://pdfs.semanticscholar.org/533d/af8ec3d723ae72fe1804bc8eb4980477076c.pdf

[41] CHEN R., CHEN D. And Yin S., *ACTAM: Cooperative Multi-Agent System Architecture for Urban Traffic Signal Control,* 2005. Str. 1-8. dostupno na: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.99.703&rep=rep1&type=pdf

[42] Tubaishat M., Hongchi S., Yi S.. *Adaptive Traffic Light Control with Wireless Sensor Networks*,2007. str. 187-191. dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/228613082

[43] Binbin Z., Cao J., Zeng X. and Wu H. *Adaptive Traffic Light Control in Wireless Senzor Network-based Intelligent Transportation System,* dostupno na: https://www.academia.edu/4871980/

[44] Huang Q., and Miller R.. *The Design of Reliable Protocols for WirelessTraffic Signal System,* 2002., str. 1-10. dostupno na: https://openscholarship.wustl.edu /cgi/viewcontent.cgi?article=2161&context=cse_research

[45] Nafi N., Khan J.. *A VANET based Intelligent Road Traffic Signalling System,* 2012., str. 1-6. dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/261079855_

[46] Hussian R., Sharma S.,Sharma V., Sharma S., *WSN Applications: Automated Intelligent Traffic Control System Using Sensors,* 2012., str. 1-5. dostupno na: http://www.gyanvihar.org/pdf/10.1.1.646.1673.pdf

[47] Goel A., Ray S., Nidhi C., *Intelligent Traffic Light System to Prioritized Emergency Purpose Vehicles based on Wireless Sensor Network,* 2012., str. 1-4. dostupno na: https://pdfs.semanticscholar.org/27ac/10387e5576b7048c5f0e9043db2213d3f1dd.pdf

[48] Nellore K. and Hancke G., *A Survey on Urban Traffic Management System Using Wireless Sensor Networks,* 2016., str. 1-25. dostupno na: https://mafiadoc.com/mdpi_5981cc631723ddee56f3b375.html

[49] Radivojević D., Raton B., Stanković S., Čelar N., Vukanović S., *Sistemi za adaptibilno upravljanje saobraćajem na gradskoj mreži*, 2017. dostupno na: http://www.researchgate.net/publication/317109724

[50] *Sistemi upravljanja u gradovima* - Skripte - Saobracajni fakultet u Beogradu, Regulisanje saobracajnih tokova, dostupno na: https://www.docsity.com/sr/sistemi-upravljanja-u-gradovima-skripte-saobracajni-fakultet/263312/

[51] Lindov O., Kapo K., Efendić E., *Centri za nadzor i upravljanje saobraćajem kao savremeni segmenti u smanjenju delikvencije i kriminaliteta u gradovima*, Univerzitet u Sarajevu, Fakultet za kriminalistiku, kriminologiju i sigurnosne studije, Zbornik radova, Naučna konferencija Dani kriminalističkih nauka, 2014. str. 1-10.

[52] Gradinescu V., Gorgorin C., Diaconescu R., Cristea V., Iftode L., *Adaptive Traffic Lights Using Car-to-Car Communication,* 2007., str. 1-6. dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/224706176

[53] Cvitanić D., *Predavanja na Sveučilišnom diplomskom studiju iz predmeta PROMETNA TEHNIKA*, Split, 2016. Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, dostupno na: http://e-ucenje.gfmo.ba/predmeti/attachments/article/2106/prometnatehnikazaweb2.pdf

[54] *File Storage Techniques in LabVIEW,* nd. str.1-9. dostupno na: http://web.mst.edu/~cottrell/ME240/Code-hints/File_storage.pdf

[55] Simić-Pejović M., *LabVIEW, Praktikum softverski alati*, nd., Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Katedra za telekomunikacije

[56] Osnovi rada u LabVIEW, nd. str. 1-71. dostupno na: https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_8554/objava_30673/fajlovi/knjigaLW.pdf

[57] *FLIR Systems: Thermal imaging, Night vision and ifrared cameras*, nd. dostupno na: https://www.flir.com/products/trafidata/

[58] FLIR Vue Pro, User's Guide, nd. str. 1-11. dostupno na: https://www.oemcameras.com/pub/media/productattach//v/u/vuepro-users-guide.pdf

[59] Lazarević D., Mišić M., Ćirković B., POSTOJEĆE TEHNIKE ZA SEGMENTACIJU SLIKE, 2014., str. 1-11. dostupno na: http://www.cqm.rs/2014/cd2/pdf/papers/focus_1/10.pdf

[60] Bondžulić B., Petrović V., *MULTISENZORSKO IZDVAJANJE I AŽURIRANJE SLIKE POZADINE U DETEKCIJI POKRETNIH OBJEKATA*, Vojnotehnički glasnik 2/10, str. 1-19.

[61] *Video detekcija pokreta*, nd. dostupno na: http://www.mobotix.rs/stranice.php?menu_id=2&submenu_id=49&strana_id=49

[62] *Prvi semafor*, nd., dostupno na: https://www.google.rs/search?q=prvi+semafor

[63] *Gde su bili prvi semafori u Beogradu*?, 2017., dostupno na: https://www.google.rs/search?q=Semafori+u+Beogradu

[64] Pajković V., Grdinić M., *REGULISANJE SAOBRAĆAJNIH TOKOVA,* nd, dostupno na: https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_7310/objava_19117/fajlovi/Regulisanje%20saobraćajnih%20tokova%20%20_%20Vježbe%201.pdf

[65] *Svetlosna signalizacija,* 2015.,str. 1-30., dostupno na: https://saobracajci.files.wordpress.com/2015/04/08-svetlosna-signalizacija.pdf

[66] *Osnove projektovanja u saobraćaju, Brojanje saobraćaja,* nd., str. 1-28., dostupno na: www.apeiron-uni.eu/lycboardclient/Detail.aspx?DocumentID...

[67] Wu M., Ma W., Li L., *Characterize Dilemma Zone and Minimize its Effect at Coordinated Signalized Intersections*,2013., str. 1-13., dostupno na: https://core.ac.uk/download/pdf/82213153.pdf

[68] *Traffic Control Systems Handbook: Chapter 6. Detectors*, nd., dostupno na: https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop06006/chapter_6.htm

[69] *Svet kompjutera*, 2011, dostupno na: https://www.sk.rs/2011/01/sksc01

[70] Vujičić V., *Uvod u C jezik*, četvrto izdanje, Beograd,Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Boris Kidrič“, Vinča, 1991.

[71] Ritchie D., Kernighan B., *Programski jezik C*, nd. dostu[no na: https://www.google.com/search?q=Dennis+M.+Ritchie+ Brian+W.+Kernighan+Programski+jezik

[72] Petrović V., *UPRAVLJANJE U REALNOM VREMENU*, 2013, str. 1-152., Beograd, Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija

[73] Petruzella F., *Programabilni logički kontroleri*, Prevod četvrtog izdanja, 2011., Beograd, Mikro knjiga

[75] Šimunović I., *Digitalna obrada i analiza slike unutar LabVIEW razvojnog okruženja*, Završni rad, 2018., Bjelovar, Veleučilište u bjelovaru preddiplomski stručni studij mehatronika

[76] Lukić-Hanomihl D., Veljković A., Živančević L., *Kompjuterska vizija – Content base image retrieval,* n.d., str. 1-14., dostupno na: https://www.google.com/search?q=Kompjuterska+vizija+–+ Content+base+image+retrieva

.

***PRILOG 1:*** **E – PUTEVI U REPUBLICI SRBIJI [3]**

***E – putevi klase A***

*E65* – deonica (Crna Gora) Mehov Krš – Kosovska Mitrovica – Priština – Đeneral Janković (Makedonija),

*E70* – deonica (Hrvatska) Batrvoci – Beograd – Vršac – Vatin (Rumunija)

*E75* – deonica (Mađarska) Horgoš – Subotica – Novi Sad – Inđija – Beograd – Pojate – Niš – Grdelica– Preševo (Makedonija)

*E80* – deonica (Crna Gora) Mehov Krš – Kosovska Mitrovica – Priština – Niš – Gradina (Bugarska)

***E - putevi klase B***

*E662* – deonica Subotica – Sombor – Bezdan

*E761* – deonica (Bosna i Hercegovina) Ktroman –Kraljevo – Požega – Pojate – Paraćin – Zaječar – Vrška Čuka (Bugarska)

*E763* – deonica Beograd – Požega – Nova Varoš – Gostun (Crna Gora)

*E771* – deonica (Rumunija) Đerdap – Kladovo –Zaječar – Niš

*E851* – deonica (Albanija) Vrbnica – Prizren – Priština

***PRILOG 2:*** **PRVI SAOBRAĆAJNI ZNAKOVI SLIČNI DANAŠNJIM KORIŠĆENI SU U NEMAČKOJ OD 1907. DO 1910.GODINE [1]**




*Opasna krivina na levo*




*Opasna krivina na desno*




*Udubljenja na kolovozu*




*Izbočine na kolovozu*




*Prelaz preko pruge*




*Ukrštanje puteva*




*Dvostruka krivina*



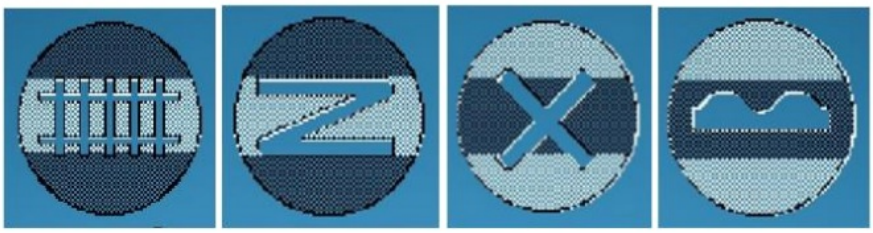

*Opasna nizbrdica*

***PRILOG 3*: SAOBRAĆAJNI ZNAKOVI KORIŠĆENI U NEMAČKOJ OD 1910-1927. GODINE [1]**



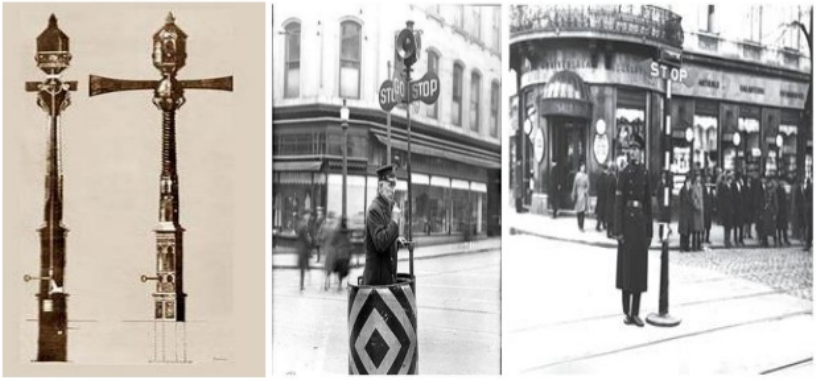
*Raskrsnica* *Oštra krivina* *Neravan put* *Železnički prelaz*

***PRILOG 4*: PRVI MEĐUNARODNI SAOBRAĆAJNI ZNAKOVI [4]**



*Železnički prelaz* *Oštra krivina* *Raskrsnica puteva* *Neravan put*

***PRILOG 5:* PRVI SEMAFORI**




*Prvi semaforski uređaji (Najt) [62]* *Semafori postavljeni u Londonu 1868. Godine [62]*



*Semafor u Slot Lejk Sitiju iz 1912. Godine [63]*



*Prvi semafor u Berlinu postavljen 1924. godine [63]*





*Prvi semafor u Srbiji-postavljen 1939.[1]*



*Semafori u Beogradu-294 semafora, 1968.godine [63]*

## *PRILOG 6:* VREMENSKA NERAVNOMERNOST SAOBRAĆAJNOG TOKA

Poznavanje vremenske nervnomernosti saobraćajnog toka je veoma bitno pri projektovanju puteva i elemenata pune mreže, kao i pri regulisanju saobraćaja na postojećoj mreži puteva. Za rešavanje praktičkih problema potrebno je izučavanje sledećih neravnomernosti saobraćajnog toka:

- časovna neravnomernost u toku dana, odnosno 24 časa,
- časovna neravnomernost u toku godine, odnosno 8.760 časova,
- dnevna neravnomernost u toku nedelje (sedam dana),
- dnevna neravnomernost u toku meseca,
- dnevna neravnomernost u toku godine,
- mesečna neravnomernost u toku godine i
- neravnomernost toka po jedinicama manjim od jenog sata u toku vršnog časa opterećenja.

*Časovna neravnomernost saobraćajnog toka, ili protoka u toku dana, ili 24 časa* predstavlja promenu protoka po pojedinim satima. Iskazuje se za svaki sat peko indeksa neravnomernosti toka:

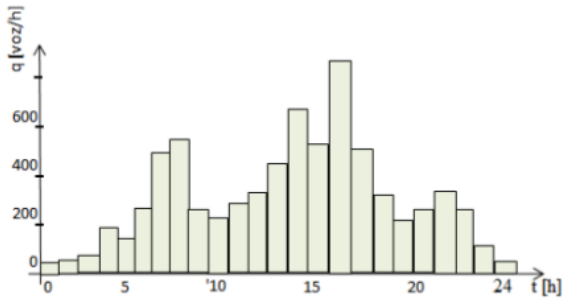
$$f_{hi} = \frac{qhi}{qsr}, \qquad q_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^{24} qhi}{24}, \qquad f_{hi} = \frac{24 \cdot qhi}{\sum_{i=1}^{24} qhi}, \quad \text{gde su:}$$

$f_{hi}$ – vrednost indeksa neravnomernosti toka u $i$-om času, $q_{hi}$ – saobraćajni protok u $i$-om času i $q_{sr}$ – prosečna vrednost saobraćajnog protoka za 24 časa. Izgledčasovne neravnomernosti saobraćajnog toka za 24 časa prikazan je na slici 1p.

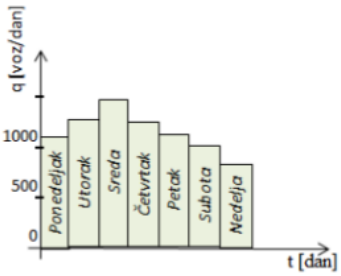
*Dnevna neravnomernost saobraćajnog protoka u toku nedelje* (slika 2p.) predstavlja varijacije protoka u pojedinim danima u nedelji i izražava, se slično kao i časovna neravnomernost protoka u toku dana, kao:

$$f_{di} = \frac{qdi}{qsr}, \qquad q_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^{7} qdi}{7}, \qquad f_{di} = \frac{7 \cdot qdi}{\sum_{i=1}^{7} qdi}, \quad \text{gde su:}$$

$f_{di}$, *i* $q_{di}$ – veličine koje se odnose na dan, a $q_{sr}$ – prosečna vrednost saobraćajnog protoka u toku sedam dana.




Slika 1p. *Časovna neravnomernost saobraćajnog*

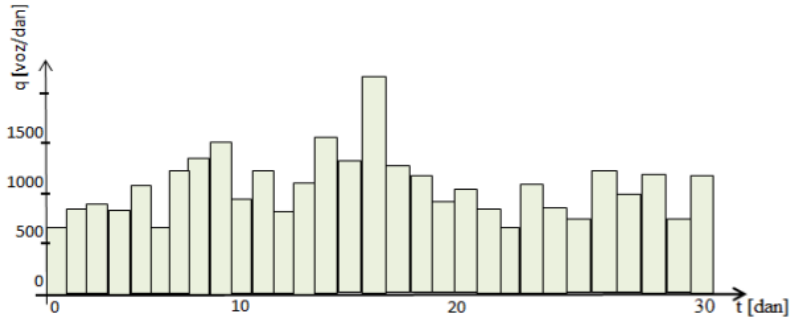



Slika 2p. *Dnevna neravnomernost saobraćajnog protoka u toku dana protoka u toku nedelje*

Na sličan način definišu se i *Dnevna neravnomernost saobraćajnog protoka u toku meseca* (slika 3p.) i *Dnevna neravnomernost saobraćajnog protoka u toku godine* i izražavaju se kao:

$$f_{mi} = \frac{qdi}{qsr}, \qquad q_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^{30} qdi}{30}, \qquad f_{mi} = \frac{30 \cdot qdi}{\sum_{i=1}^{7} qdi},$$

$$f_{gi} = \frac{qdi}{qsr}, \qquad q_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^{365} qdi}{365}, \qquad f_{di} = \frac{365 \cdot qdi}{\sum_{i=1}^{7} qdi},$$



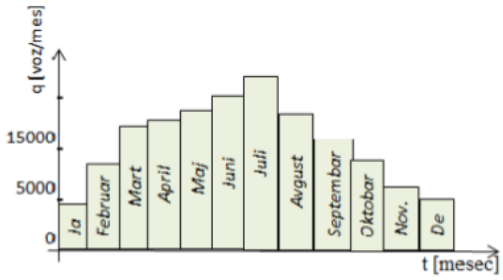

Slika 3p. *Dnevna neravnomernost saobraćajnog protoka u toku meseca*

*Mesečna neravnomernost saobraćajnog toka u toku godine* (slika 4p.) predstavlja promene prosečnog dnevnog saobraćaja po mesecima u toku godine. Izražava se preko indeksa promene za odgovarajući mesec koji se definiše kao odnos prosečnog dnevnog protoka sobraćaja za dati mesec i prosečnog godišnjeg dnevnog saobraćaja.

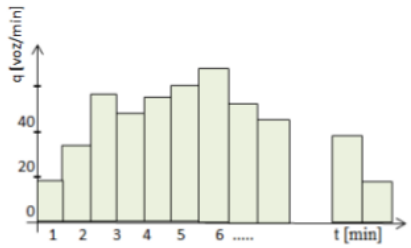
*Neravnomernost toka po jedinicama manjim od jenog sata u toku vršnog časa opterećenja* (slika 5p.): Za neravnomernost saobraćajnog protoka koja se javlja u toku dana postoji *vršni sat* kada kroz putni presek prođe najveći broj vozila u toku 60 minuta. Na našim putevima to je period od deset i tideset do dvanaest časova. Sam vršni časovni saobraćajni tok ima neravnomernost u toku 60 minuta. Pokazatelj neravnomernosti u toku vršnog časa je faktor vršnog časa koji se, za vangradske puteve, definiše kao:

$$Faktor\ vršnog\ časa = q_{maxc} / 12 \cdot q_{max5m}$$

gde su $q_{maxc}$ – maksimalni protok za jedan čas, odnosno protok u vršnom času i $q_{max5m}$ – maksimalni petominutni protok u vršnom času. Vrednost faktora vršnog časa na vangradskim putevima iznosi 0.80 – 0.85.




Slika 4p. *Mesečna neravnomernost saobraćajnog toka u toku godine*




Slika 5p. *Neravnomernost toka po jedinicama manjim od jenog časa*

Pri analizi kapaciteta i nivoa usluge za raskrsnice faktor vršnog časa definiše se kao:

$$Faktor\ vršnog\ časa = q_{maxc} / 4 \cdot q_{max15}$$

gde je $q_{max15}$ - maksimalni petnaestominutni protok u vršnom času

## *PRILOG 7:* PRETVARANJE HEHOMOGENOG U USLOVNO HOMOGEN SAOBRAĆAJNI TOK

Pretvaranje nehomogenog u uslovno homogen saobraćajni tok vrši se preko ekvivalenata (E) kojima se množi broj određene vrste vozila iz saobraćajnog toka kako bi se transformisao u ekvivalentne *jedinice putničkih automobila (PAJ*). Vrednosti ekvivalenata za pojedine vrste vozila date su u priloženoj tabeli [64].

Tabela 1p. *Vrednost ekvivalenata za pojedine vrste vozila.[64]*

| *Vrsta vozila* | *Vrednost ekvivalenta E (PAJ)* |
|---|---|
| motocil | 0,33 |
| bicikl | 0,33 |
| zaprega | 2,5 |
| putnički automobil | 1 |
| teška teretna vozila | 1,75 |
| srednje teretna vozila | 1,75 |
| autobus | 2,25 |

Primera radi, jedan autobus vremenski i prostorno opterećuje put kao 2,25 putnička automobila.

## *PRILOG 8.* ANALITIČKI IZRAZ ZA IZRAČUNAVANJE ZASIĆENOG TOKA

a. Analitički izraz za izračunavanje zasićenog toka saobraćajne trake ili grupe traka iste namene ima oblik:

$$S_i = S_{op} \cdot N \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6 \cdot \ldots f_n, \quad \text{gde } f_1, f_2, \ldots f_n \text{ redukcioni faktori.}$$

U HCM-u 2010 date su vrednosti za jedanaest redukcionih faktora. Za praktičnu upotrebu obično se koristi analitički izraz za određivanje zasićenog toka u skraćenom obliku:

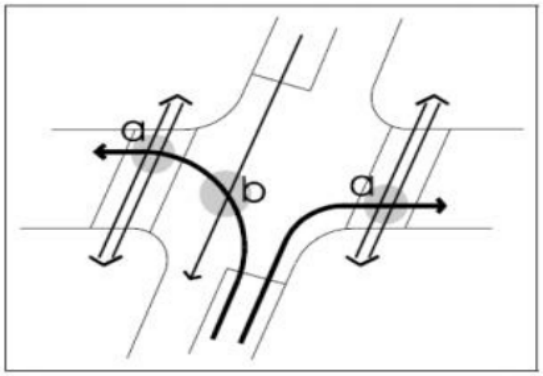
$$S_i = S_{op} \cdot N \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4$$

gde redukcioni faktori $f_1$ , $f_2$ , $f_3$ i $f_4$ određuju redom: uticaj pešaka, uticaj konflktnog toka, uticaj structure toka i uticaj veličine grada. N – broj traka iste namene.

b. Vrednosti redukcionih faktora [9]

Tabela 1p. *Uticaj pešaka na vozila u skretanju, slika 1p., a*

| | *Intenzitet pešačkog toka (pešaka / h)* | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 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 | 0,5 |




*Slika 1p. Konfliktni pešački tokovi i tokovi vozila*

Tabela 2p. *Uticaj konfliktnog toka u istoj fazi, slika 1p.[9]*

| | *Intenzitet konfliktnog toka (voz / h)* | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | > 500 |
| *f2* | 0,97 | 0,94 | 0,9 | 0,83 | 0,75 | 0,67 | 0,6 | 0,56 | 0,53 | 0,51 | 0,51 |

Tabela 3p. *Uticaj strukture toka [9]*

| | *Procenat komercijalnih vozila u toku* | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 5 | 7 | 10 | 12 | 15 | 17 | 20 | 25 |
| *f3* | 0,97 | 0,95 | 0,92 | 0,9 | 0,87 | 0,85 | 0,83 | 0,79 |

Tabela 4p. *Uticaj veličine grada [9]*

| | *Broj stanovnika* | | |
|---|---|---|---|
| | < 40.000 | 40.000 - 300.000 | > 300.000 |
| *f4* | 0,85 | 0,9 | 1 |

c. Vrednosti operativnog toka $S_{op}$ (voz/h) u zavisnosti od signalnog plana i namene traka

Tabela 5p. *Vrednosti $S_{op}$ za traku pravo [9]*

| | *Tip signalnog plana* | | |
|---|---|---|---|
| | A | B | C |
| $S_{op}$ | 1600 | 1900 | 2120 |

Za trake za skretanje u levo ili desno preporučena vrednost operativnog toka je $S_{op}$ = 1500 voz/h.

Tabela 6p. *Vrednosti $S_{op}$ za mešovitu traku (pravo i levo, pravo i desno) [9]*

| | *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 | * |

** Potrebno je otvoriti posebnu traku za skretanje ili preispitati neophodnost postojanja smera pravo u režimu saobraćaja raskrsnice*

Mešovita traka za skretanje levo i desno, Sop = 1470 voz/h
Mešovita traka za sve smerove, Sop = 1250 voz/h

## *PRILOG 9:* ODREĐIVANJE ZAŠTITNOG VREMENA

*a*. Određivanje zaštitnog vremena za tokove vozila

Pri proračunu zaštitnog vremena za vozila uzimaju se ekstremni slučajevi kretanja dva toka, čiji se konflikt želi izbeći, odnosno toka A koji gubi pravo prolaska prestankom njegove faze i toka B koji u sledećoj fazi dobija pravo prolaska (slika 3p., pod *a*.). Trenutak pojave crvenog signalnog pojma na odgovarajućem prilazu raskrsnice smatra se trenutkom gubitka prava prolaska raskrsnicom, odnosno trenutak prestanka intervala žutog svetla. Ako se pretpostavi da se

"poslednje" vozilo na prilazu A kretalo brzinom $v_A$ a vozilo, koje je dobilo pravo prolaska u narednoj fazi i koje najranije kreće sa linije zaustavljanja (prilaz B) u trenutku pojave zelenog signalnog pojma, ima brzinu $v_B$, tada se zaštitno vreme između faze A i faze B računa po obrascu [65]

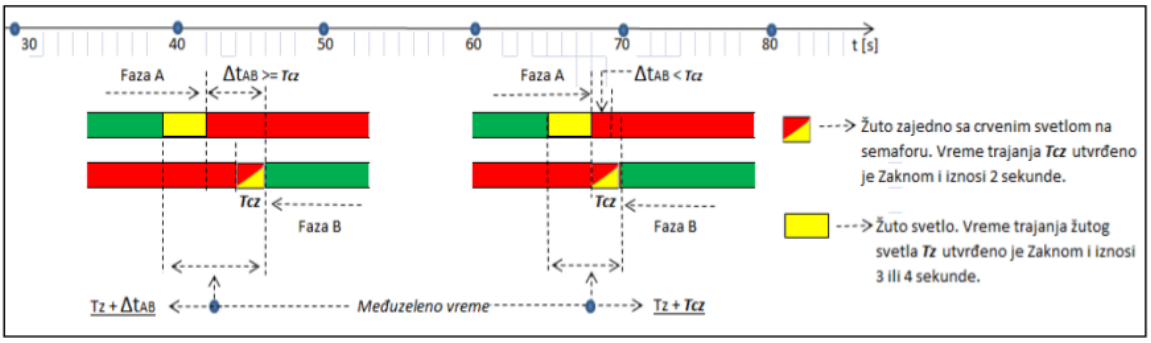
$$\Delta t_{AB} = S_A / v_A - S_B / v_B + 1 \ \text{[s]}.$$

Vrednosti brzina $v_A$ i $v_B$ koje se najčešće koriste pri proračunu zaštitnog vremena $\Delta t_{AB}$ iznose $v_A$ = 30 km/h i $v_B$ = 60 km/h. Slično tome, zaštitno vreme između faze B i faze A izračunava se po relaciji

$$\Delta t_{BA} = S_B / v_B' - S_A / v_A' + 1 \ \text{[s]}.$$

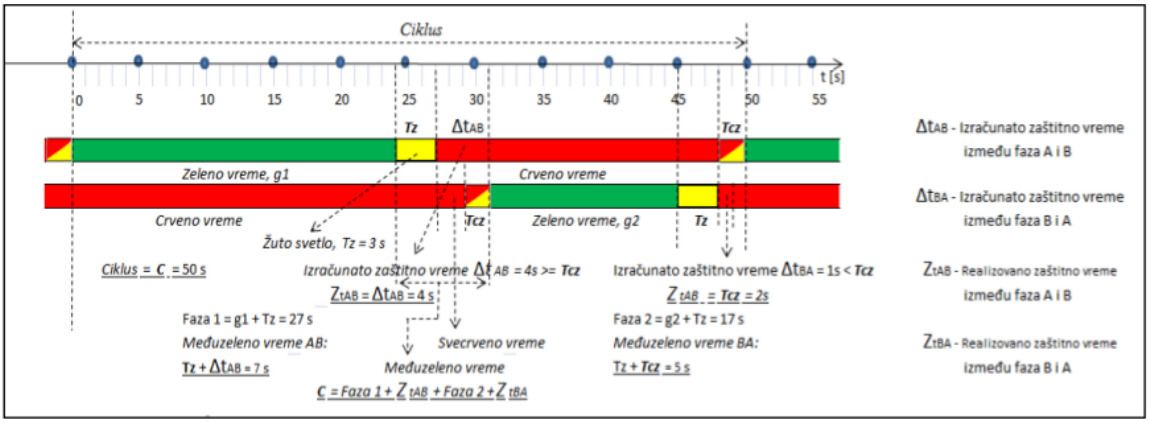
pri čemu su sada $v_B'$ = 30 km/h i $v_A'$ = 60 km/h. *Ako je* $S_A = S_B$ *, onda je* $\Delta t_{AB} = \Delta t_{BA} = \Delta t$.

Rastojanja $S_A$ i $S_B$ vozila na prilazu A, odnosno prilazu B su dužine putanja, po kojima se kreću vozila, računajući ih od linije zaustavljanja do tačke u kojoj se želi izbeći konflikt. Navedene putanje ne moraju biti pravolinijske, već predstavljaju realne dužine pređenih puteva do odgovarajućih konfliktnih tačaka na raskrsnici.

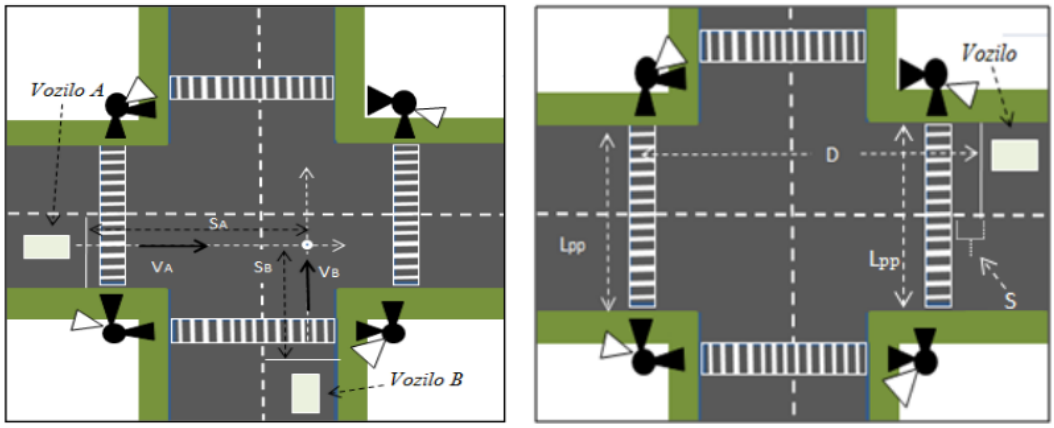



Slika 2p. *Položaj izračunatog i realizovanog zaštitnog vremena i žutog i međuzelenog vremena*

Ako su $\Delta t_{AB} \neq \Delta t_{BA}$, u praksi se za vrednost zaštitnih vremena između faza uzima ista, najveća, vrednost. *Izračunato i usvojeno zaštitno vreme između* dve sukcesivne faze je u planu tempiranja signala *interval između* trenutka pojavljivanja crvenog signalnog pojma na prilazima koji gube pravo prolaska raskrsnicom (*dozvoljeni prolaz:* zeleni + žuti signalni pojam) i trenutka pojavljivanja zelenog signalnog pojma na prilazima koji dobijaju pravo prolaska. Pri tome se može desiti da je izračunato zaštitno vreme, primera radi $\Delta t_{AB}$, veće ili manje od vremena trajanja žutog i crvenog svetla zajedno (ono je utvrđeno *Pravilnikom o saobraćajnoj signalizaciji* i traje $Tcz$ = 2 s). Položaj izračunatog zaštitnog vremena, realizovanonog zaštitnog vremena $Z_{tAB}$ (što je takođe utvrđeno *Pravilnikom o saobraćajnoj signalizaciji*) i dužine vremena između dve faze (*Međuzeleno vreme*) u planu tempiranja signala, prikazani su na slici 2p. U intervalu dela zaštitnog vremena (slučaj $\Delta t_{AB} >= Tcz$),raskrsnica ne propušta ni jedno vozilo. Na slici 2p-1. Prikazan je deo plana tempiranja signala gde su vrednosti zaštitnih vremena između faze A i faze B, odnosno faze B i faze A različite.




Slika 2p-1. *Deo signalnog plana tempiranja*




*a.* *b.*

Slika 3p. *Određivanje zaštitnog vremenaza za tokove vozila (a.) i pešaka (b.)*

*b*. Određivanje zaštitnog vremena za tokove pešaka

Zaštitno vreme se takođe proračunava i za tokove vozila i pešaka. Postoje dva tipa zaštitnog vremena za pešake: $t_{zpp}$ - *zaštitno vreme za pešake na početku faze* i $t_{zpk}$ - *zaštitno vreme za pešake na kraju faze*. Zaštitno vreme za pešake na početku faze omogućava vozilima konfliktnog toka napuštanje raskrsnice pre uključivanja zelenog svetla za pešake i određuje se (slika 3p.,pod *b*.) po relaciji [65]

$$t_{zpp} = \frac{D}{V_{min}} + 1 \ \text{[s]}$$

gde je $V_{min}$ = 30 km/h. Zaštitno vreme za pešake na kraju faze omogućaa pešacima, koji su u poslednjoj sekundi svog zelenog svetla stupili na kolovoz (slika 3p.,pod *b*.), da bezbedno završe prelaz. Njima je potrebo $L_{PP}$ / $V_p$ sekudi da bi pešli kolovoz. Vozilu koje je dobilo pravo prolaza potrebno je izvesno vreme ($S$ / $V_v$, gde su $V_v$ = 60 km/h i $S$ – rastojanje od linije zaustavljanja do

ivice pešačkog prelaza i iznosi oko 1 m) da do konfliktnog pešačkog prelaza dođe, pa se za taj iznos može umanjiti $L_{PP}$ / $V_p$ i za određivanje $t_{zpk}$ – dobija se izraz:

$$t_{zpk} = \frac{L_{pp}}{V_p} - \frac{S}{V_v} + 1 \text{ [s]}$$

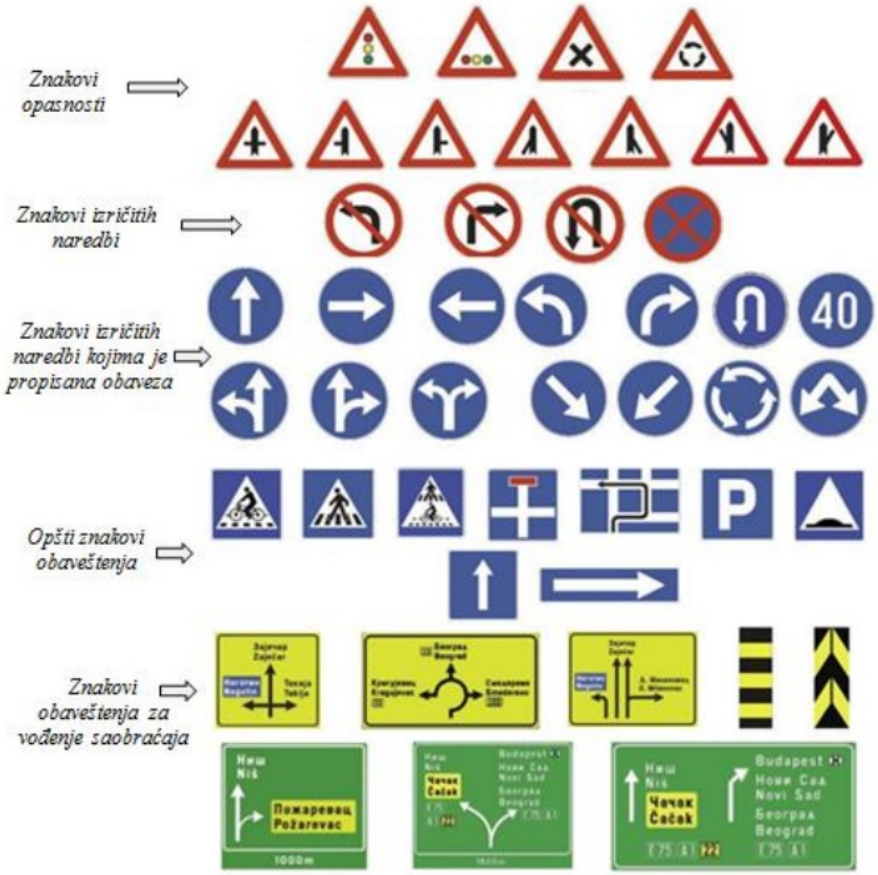
Međutim, kako je pešački prelaz blizu linije zaustavljanja (S = 1 m), to se $S/Vv$ može zanemariti, pa se konačan obrazac za određivanje $t_{zpk}$ – svodi na:

$$t_{zpk} = \frac{L_{pp}}{V_p} + 1 \text{ [s]}$$

gde je $V_p$ – brzina kretanja pešaka. Njena vrednost iznosi 1.2 m/s do 1.4 m/s.

*Zaštitno vreme za pešake ne učestvuje u proračunu signalnog plana.* Pešački zeleni itervali lociraju se između početaka crvenog i zelenog intervala konfliktne vozačke faze i štite se izračunatim zaštitnim vremenima. Ako je ovako određeni interval, koji se na pešačkim uređajima (semafori za pešake) prikazuje, kraći od *pet sekundi* interveniše se u signalnom planu i uvećava zeleni interval za vozila da bi pešački zeleni interval iznosio bar pet sekundi.

## *PRILOG 10:* PREGED SAOBRAĆAJNIH ZNAKOVA KOJI SE NAJČEŠĆE KORISTE U BLIZINI ILI PODRUČJU RASKRSNICE [13]




Slika 1p. *Saobraćajni znakovi koji se koriste u blizini ili području rskrsnice*

Značenje pojedinih saobraćajnih znakova utvrđeno je Pravilnikom o saobraćajnoj signalizaciji.

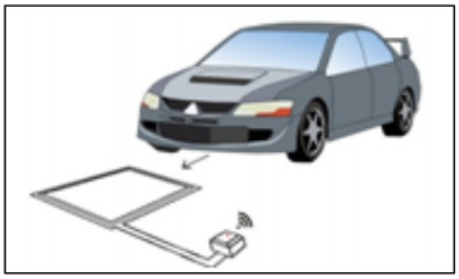
## *PRILOG 11:* DETEKTORI

Detektori su uređaji za detekciju vozila i merenje saobraćajnih parametara. Mogu se grupisati u četiri celine i to: *induktivni, pneumatski, mikrotalasni i video detektori*.

*Induktivni detektori*: ovi detektori (ili induktivne petlje) otkriveni su šezdesetih godina prošlog veka i sastoje se od namotaja bakarne žice. Detektori se postavljaju, najčešće u paru, u asfalt i vrše detekciju vozila koja se zasniva na merenju promene induktivnosti do koje dolazi prlikom prolaska vozila preko njih (slika 1p).

Postavljanjem dve indukivne petlje na određenom rastojanju moguće je:

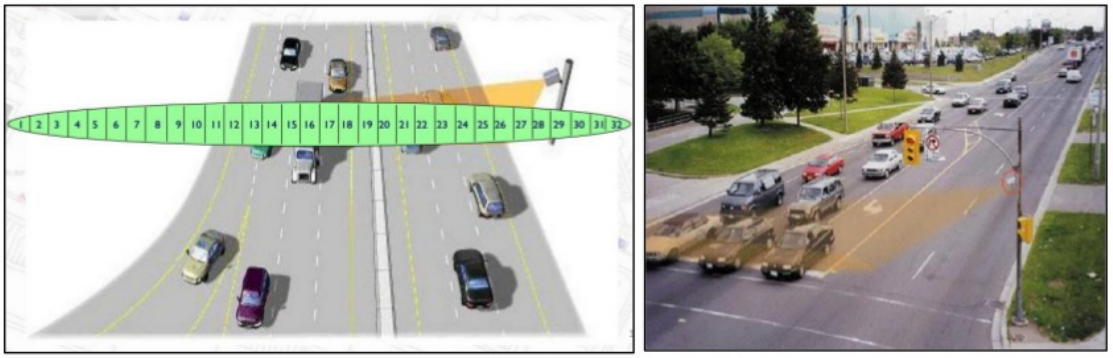
- utvrditi: *vrstu vozila* (do 25 kategorija), *brzinu vozila*, *brzinu saobraćajnog toka* i *vreme sleđenja*,
- odrediti red čekanja u dužini najudaljenijeg detektora od položaja zaustavne linije na raskrsnici,



Slika 1p. *Detekcija vozila induktivnim detektorom [66]*

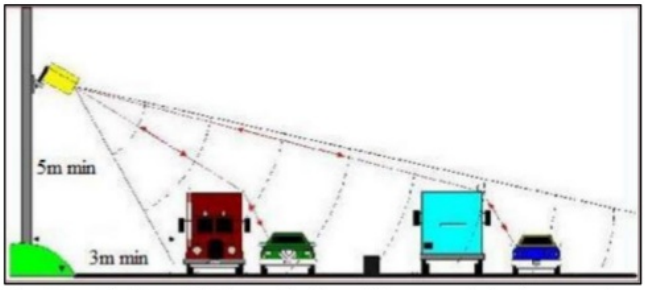
- omogućiti produženje faze prolaska vozila najavom vozila na određenom detektoru, čija udaljenost od zaustavne linije, zavisno od dozvoljene brzine, ostvaruje potreban vremenski interval neophodan za siguran prolazak vozila kroz raskrsnicu.

*Mikrotalasni detektori - radari:* funkcionišu na principu Doplerovog efekta i detektuju isključivo vozila u pokretu. Radar emituje mikrotalasmi snop "crtajući" dug (pokriva širinu kolovoza do 60m) elipsasti trag, podeljen na 32 segmentana, na površini puta (slika 2p). Može se podešavati udaljenost sa koje se detektuje vozilo, moguće je detektovati smer kretanja vozila i jednostavni su za održavanje.



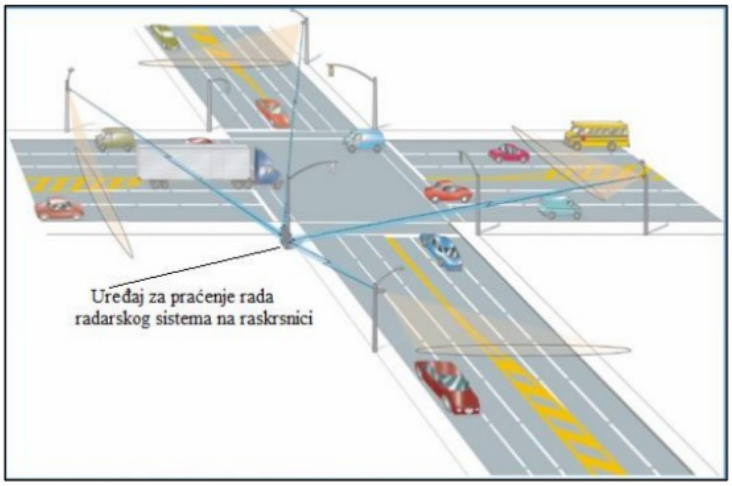

Slika 2p. *Mikrotalasni detektor [66]*

Mikrotalasni detektori daju podatke o *prisustvu vozila, brzini vozila, protoku* i *zauzetosti saobračajne trake.*



Slika 3p. *Detekcija niskih vozila korišćenjem difrakcije talasa [66]*

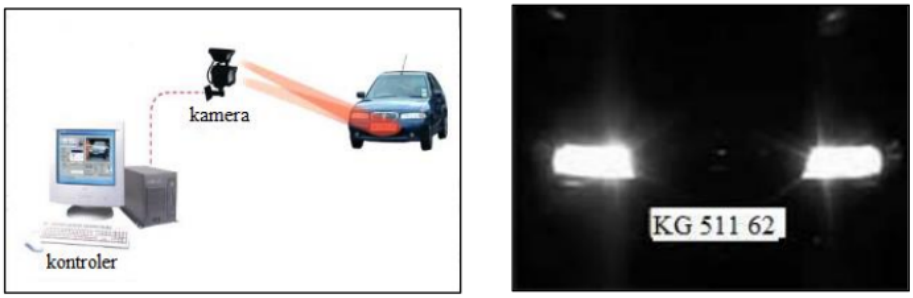
Radari koriste difrakciju talasa (slika 3p) za detekciju iza kamiona ili autobusa. Postavljaju se na visinu od oko 5m od površine kolovoza. Na slii 4p. dat je šematski prikaz radarskog sistema na raskrsnici.



Slika 4p. *Šematski prikaz rada radarskog sistema na rasksrnici [66]*

*Video detektori:* satoje se od video kamera i upravljačkog uređaja. Kamere se postavljaju na onim mestima na raskrsnici koja omogućavaju najbolju preglednost. Tehnologija video detekcije vozila pokazala se kao vrlo pouzdan način detekcije vozila na raskrsnicama i može imati značajnu ulogu u nadzoru i monitoringu vozila i njihovog kretanja u pojasu raskrsnice.


Slika 4p. *Definisanje zona detekcije vozila na raskrsnici [66]*




Slika 5p. *Prepoznavanje registarskih tablica [66]*

Osnovne karateristike video detektora:

- mogućnost podešavanja nekoliko zona posmatranja i detekcije vozila na raskrsnci,
- mogu u potpunosti zameniti induktivne petlje,
- mogu detektovati prisustvo pešaka i incidentne situacije,
- automatsko prepoznavanje tablica (slika 5p.),
- montaža: jedna kamera po saobraćajnoj traci.

## *PRILOG 12:* ZONA DILEME

Dilema zona odnosi se, po pravilu na brze pristupe vozila odgovarajućoj semaforizovanoj raskrsnici. Pod brzim pristupima podrazumevaju se pristupi vozila čija brzina jednaka ili veća od 56 km/h. Ako žuti interval na semaforu počinje kada se vozilo nalazi u zoni neodlučnosti (dilemma zona), vozač može imati poteškoća da odluči da li da zaustavi vozilo ili nastavi dalje. Naglo zaustavljanje može dovesti do sudara zadnjeg kraja, dok nastavak kretanja može dovesti do toga da se vozač zatekne u samoj raskrsnici u trenutku pojave crvenog svetlosnog pojma na semaforu (dozvoljen prolaz vozilima iz konfliktnog pravca), što može izazvati saobraćajnu nezgodu iz konfliktnog pravca. Najčešće saobraćajne nezgode su sudari sa zadnje strane i bočni sudari sa desne strane.

Godine 1960. Gazis, Herman i Maradudin zajedno su izneli pojam zone dileme tipa I. Zona dileme tipa I često predstavlja problem vozačima u pogledu zaustavljanja pre zaustavne linije ili kretanja kroz raskrsnicu u toku trajanja žutog svetla na semaforu. Uzroci postojanja dilemma zona su brzina vozila, ponašanje vozača, plan tempiranja i karakteristike rasrsnice.

U cilju poboljšanja bezbednosti saobaćaja razvijene su brojne metode za smanjenje donošenja odluka u ovakvim kritičnim situacijama: povećanje dužine trajanja žutog svetla, generisanje odgovarajućih indikatora upozorenja (treptuće žuto i zeleno svetlo, uređaji za brojanje zelenih signala i drugo).

Zona dileme tipa I može se posmatrati korišćenjem dve kritične udaljenosti vozila od zaustavne linije u momentu pojavljivanja žutog svetla na semaforu pristupnog prilaza, *Xc* - minimalna udaljenost od linije zaustavljanja na kojoj se vozilo može sigurno zaustaviti pre linije zaustavljanja i *Xo* - maksimalna udaljenost od linije zaustavljanja pri kojoj vozilo može preći i

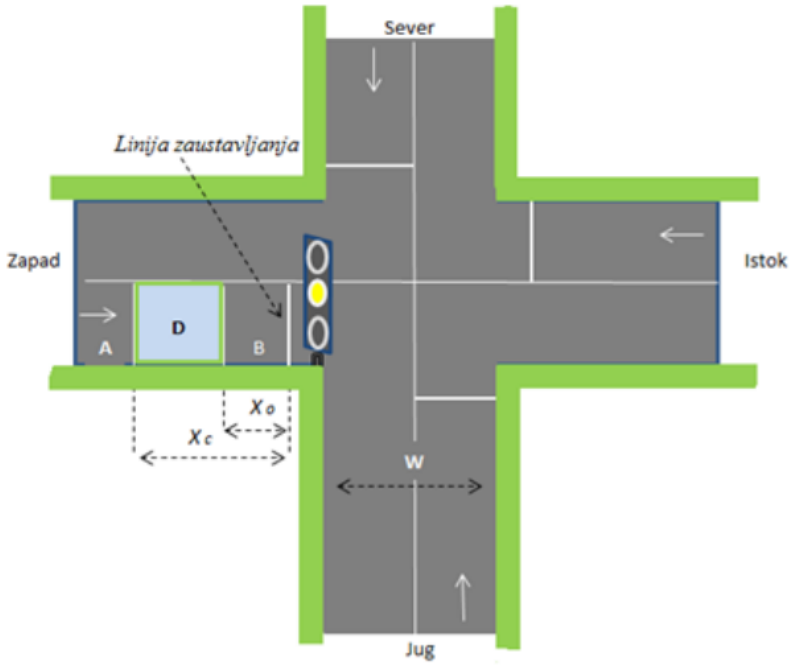
napustiti raskrsnicu do kraja žutog signala (slika 1p.). Vrednosti $Xc$ i $Xo$ mogu se izračunati korišćenjem formula [67]:

$$X_c = V_0 \cdot \delta_1 + V_0^2 / 2a_1 \qquad \text{i}$$

$$X_o = V_0 \cdot \tau + 0.5a_2 \cdot (\tau - \delta_2)^2 - W - L$$

gde su: $V_0$ – brzina pristupa vozila raskrsnici, $\delta_1$ i $\delta_2$ – vreme reagovanja vozača da bi zaustavio vozilo, odnosno da bi prošao kroz raskrsnicu, respektivno, $a_1$ – maksimalno usporenje vozila, $a_2$ – maksimalno ubrzanje vozila, $\tau = T_z$ – vreme trajanja žutog svetla, $W$ – širina raskrsnice *i* $L$ – dužina vozila. Prostor (rastojanje) između $X_c$ *i* $X_o$ je zona dileme tipa I (D), slika 1p. Ako se vozila, u momentu pojave žutog svetlosnog pojma na semaforu, nalaze u prostoru A ili prostoru B, onda za njih ne postoji zona dilema. Ako se pak vozilo, u momentu pojave žutog svetla, nalazi u prostoru D, onda postoji dilema zona i nijedna udaljenost do raskrsnice nije dovoljna za bezbedno zaustavljanje, niti je trajanje žutog svetla dovoljno da bi vozilo prošlo kroz raskrsnicu. U takvoj situaciji vozač ne može odlučiti da li da ubrza vozilo ili ne.

U mnogobrojnim praktičnim rešenjima vrednosti parametara dilema zone tipa I ($a_1$, $a_2$, $\delta_1$ *i* $\delta_2$) su konstantne. Prema istraživanjima koje je realizovao Li sa saradnicima (2010), uz pretpostavku da su vrednosti $a_1 = 3$ m/s$^2$, $a_2 = 0$ i $\delta_1 = \delta_2 = 0.8$ s, dužina dilemma zone za različite vrednosti dužine tralanja žutog svetla, prikazane su u Tabeli 7p.

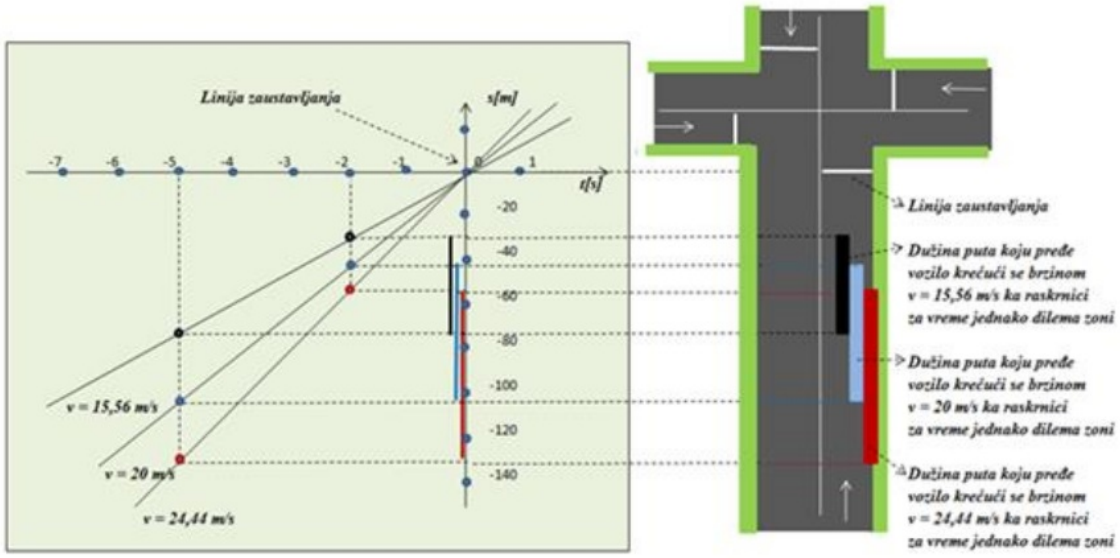



Slika 1p. *Dilema zona tipa I*

Tabela 7p. *Dužina dilema zone tipa I za različite vrednosti vremena žutog svetla [67]*

| *Brzina vozila [km/h]* | *Dužina trajanja žutog svetla* | | | *Dužina trajanja žutog svetla* | | | *Dužina trajanja žutog svetla* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | t = 3 s | | | t = 4 s | | | t = 5 s | | |
| | *Xc [m]* | *Xo [m]* | *Dz [m]* | *Xc [m]* | *Xo [m]* | *Dz [m]* | *Xc [m]* | *Xo [m]* | *Dz [m]* |
| 45 | 36,04 | -7,50 | -- | 36,04 | 5,00 | 31,04 | 36,04 | 17,30 | 18,54 |
| 50 | 43,26 | -3,33 | -- | 43,26 | 10,56 | 32,71 | 43,26 | 24,44 | 18,82 |
| 55 | 51,12 | 0,83 | 50,29 | 51,12 | 16,11 | 35,01 | 51,12 | 31,39 | 19,74 |
| 60 | 59,63 | 5,00 | 54,63 | 59,63 | 21,67 | 37,96 | 59,63 | 38,33 | 31,30 |
| 65 | 68,78 | 9,7 | 59,61 | 68,78 | 27,22 | 41,56 | 68,78 | 45,28 | 23,50 |
| 70 | 78,57 | 13,33 | 65,24 | 78,57 | 32,78 | 45,79 | 78,57 | 52,22 | 26,35 |
| 75 | 89,00 | 17,50 | 71,50 | 89,00 | 38,33 | 50,67 | 89,00 | 59,17 | 29,54 |
| 80 | 100,08 | 21,67 | 78,42 | 100,08 | 43,89 | 56,19 | 100,08 | 66,11 | 33,97 |

Tokom 1974.godine identifkovana je dilema zona tipa II. To je vremenski period u kome vozači odlučuju da li će se, u momentu pojavljivanja zutog svetla na semaforu, zaustaviti ili nastaviti kretanje ka raskrsnici. U tom periodu 10% do 90% vozača odlučuje zaustaviti vozilo u momentu (kada registruju) pojavljivanja žutog signalnog pojma. Izvan ovog intervala, udaljenost i vreme do linije zaustavljanaja koriste se kao mere za granice dilema zone tipa II. Tabela 8p. prikazuje granice dilema zone tipa II, a slika 2p. ilustruje granice dilema zona za vozila koja se približavaju raskrsnici brzinom od 64 km/h, 72 km/h i 88 km/h [67]. Podaci ukazuju na to da granica uzvodne zone dileme II, u kojoj se 90 odsto motorista odluči zaustaviti, leži od 4,5 do 5 sekundi od raskrsnice. Donja granica, u kojoj će 10 posto motorista odlučiti da zaustavi, je 2 do 2,5 sekunde od raskrsnice. Dakle, trajanje zone dilema ne prelazi 3 sekunde, počevši oko dve sekunde unapred od stop linije [68].




Slika 2p. *Granice dilema zone tipa II za vozila koja se približavaju raskrsnici različitim brzinama*

Tabela 8p. *Granice dilema zone tipa II izražene preko rastojanja od zaustavne linije*

| Brzina pristupa | | Početak dilema zone gde je verovatnoća zaustavljanja 0,9 | Početak dilema zone gde je verovatnoća zaustavljanja0,1 |
|---|---|---|---|
| km/h | m/s | | |
| 56 | 15,56 | 77 m | 31 m |
| 64 | 17,78 | 87 m | 37 m |
| 72 | 20 | 100 m | 46 m |
| 80 | 22,22 | 108 m | 52 m |
| 88 | 24,44 | 118 m | 71 m |

## *PRILOG 13.* PREDSTAVLJANJE SLIKE U DIGITALNOM OBLIKU

Slika predstavlja dvodimenzionalnu reprezentaciju objekta ili scene dobijene pomoću nekog optičkog uređaja, najčešće fotoaparata ili kamere.

Digitalna slika, u najširem smislu predstavlja numeričku reprezentaciju dvodimenzionalne slike (vizuelne stvarnosti), pomoću konačnog broja tačaka – piksela, na način koji je pogodan za vizuelni prikaz u ravni. Ona se sastoji od konačnog broja prostorno-diskretnih elemenata, piksela (engl. *pixel - picture element*), čija numerička vrednost predstavlja nivo sjajnosti na određenoj lokaciji u slici. Piksel se može definisati kao najmanja komponenta digitalne slike kojoj je moguće dodeliti određenu vrednost. Digitalna slika (R) se definiše kao dvodimezionalna funkcija dve promenljive (*x i y*) i matematički se predstavlja u obliku matrice (*MxN* - dimenzija frejma, slike u pikselima), pri čemu jedan piksel ima određene koordinate u matrici (*x,y*) i odgovarajući nivo sjajnosti *f(x,y),* odnosno:

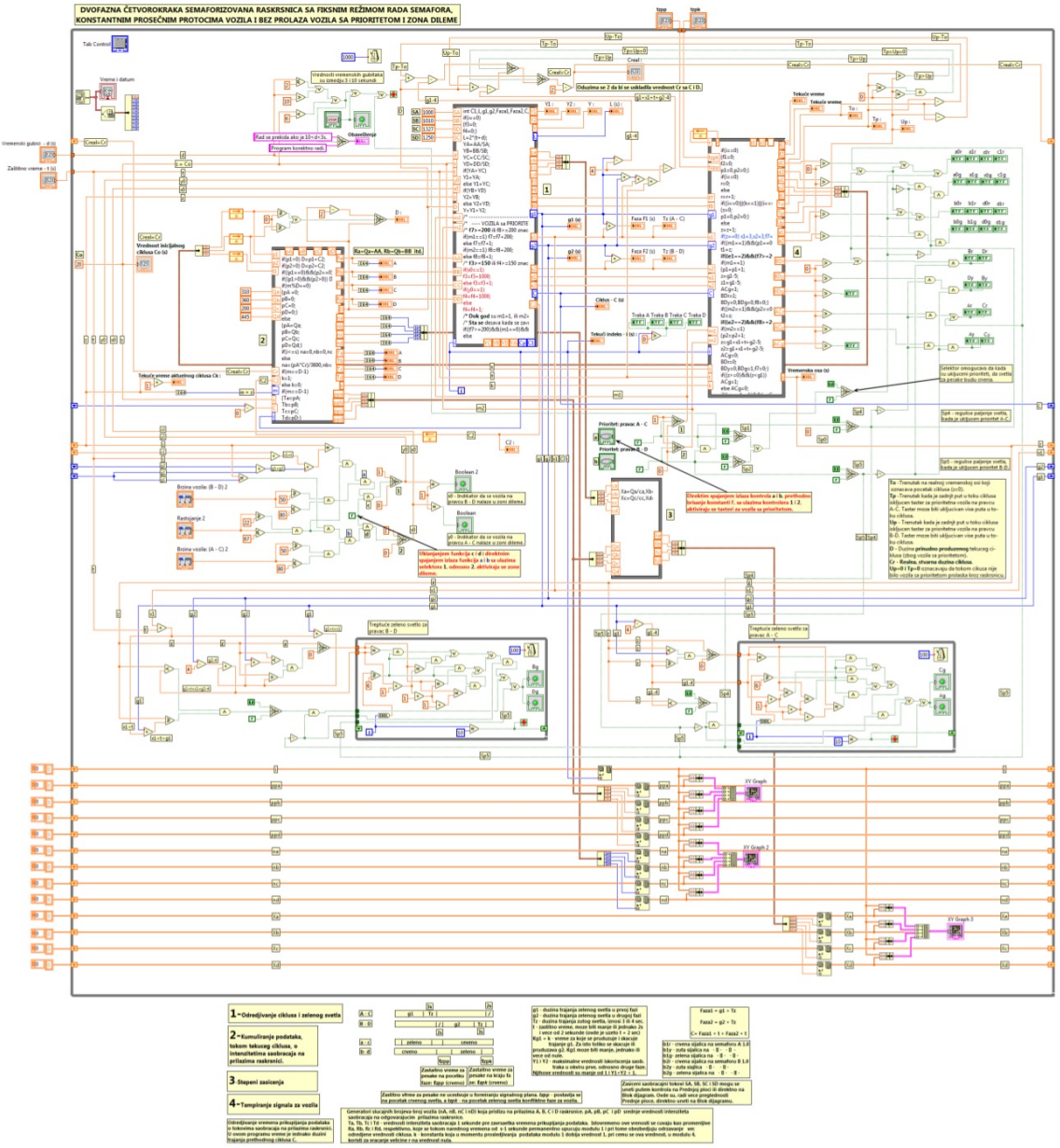
$$R = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,N-1) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix}$$

U daljem tekstu se pod pojmom slika podrazumeva digitalna slika. Broj bitova kojima se predstavlja numerička vrednosti piksela, određuje broj mogućih nivoa sjajnosti u slici. Ukoliko se koristi jedan bit po pikselu (1 bpp), njegova numerička vrednost sjajnosti može imati dve različite vrednosti, pa se u tom slučaju kaže da su *slike binarne*. U praktičnim aplikacijama, najčešće se koriste tzv. *sive slike (monohromatske slike)*, kod kojih se za predstavljanje jednog piksela koristi 8 bita (8 bpp). Ovakve slike omogućuju da piksel ima jednu od ukupno $256 = 2^8$ dozvoljenih nivoa sjajnosti, iz opsega [0, 255]. Slike u boji se predstavljaju kombinacijom podataka iz različitih opsega vidljivog spektra. U skladu sa percepcijom boje kod čovekovog vizuelnog sistema, najčešće se koriste tri boje, odnosno frekvencijska kanala koja odgovaraju crvenoj, zelenoj i plavoj boji. Svaki kanal se predstavlja kao zasebna monohromatska slika, i za ovakve slike se kaže da su predstavljene u RGB prostoru boja (engl. *Red, Green, Blue*). Kod ovakvih slika u boji, predstavljenih u RGB prostoru, jedan piksel predstavlja tri izuzetno bliske tačke (svaka od njih

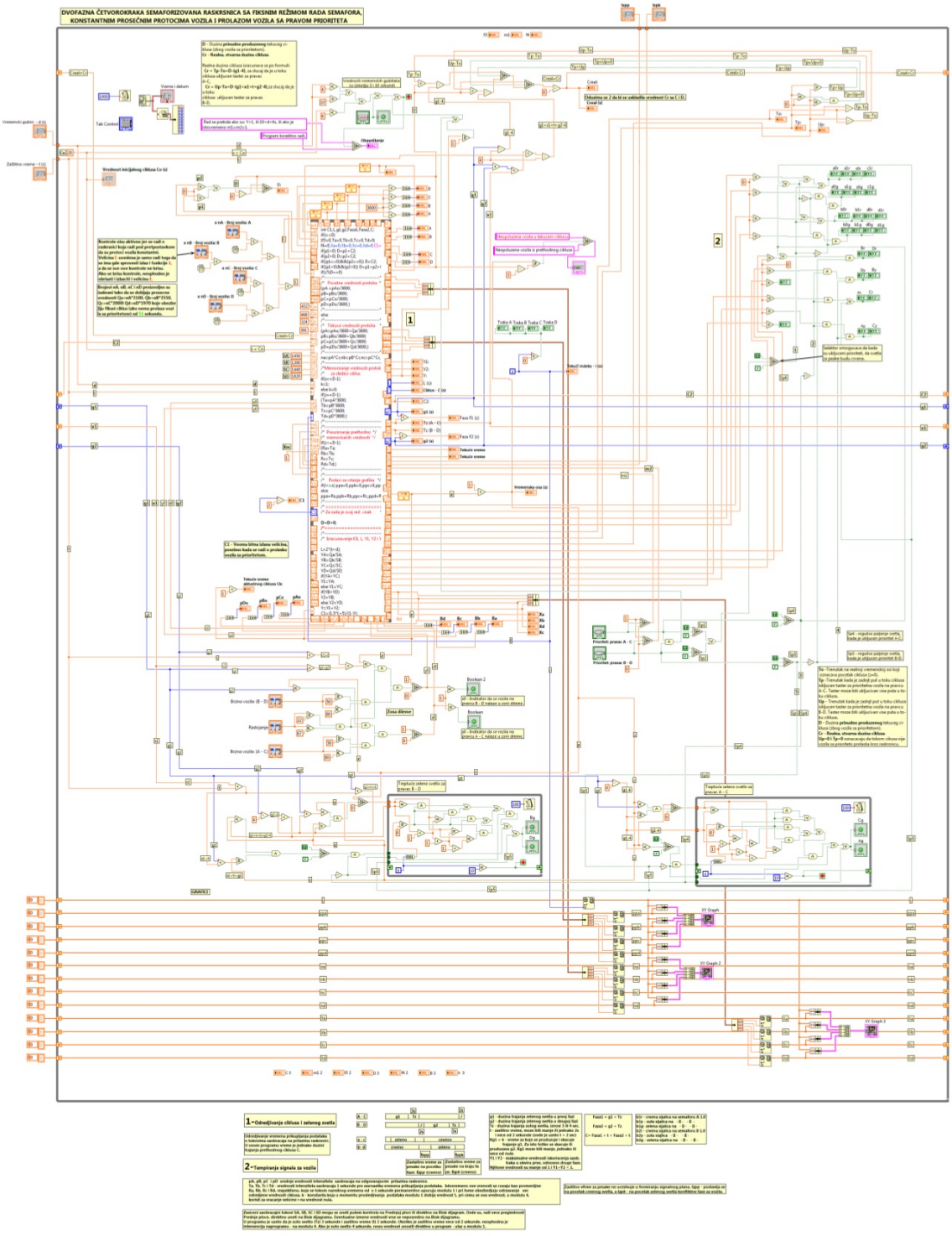
različite boje) i predstavlja se kao uređena trojka, pri čemu svaki element nosi informaciju o intenzitetu piksela u jednom od kanala R, G ili B. Primera radi, prikaz boje na LCD monitoru, rešen je sa tri odvojene „lampice", crvenom, zelenom i plavom, koje zajedno formiraju jedan piksel na ekranu. Ukoliko bi tri lampice koje čine piksele svetlele u odnosu 100-0-0 (R-G-B, u procentima), dobili bismo crvenu boju, 50-0-0 bi rezultovalo zagasito crvenom. Vrednosti 0-0-0 daju crnu, dok 100-100-100 daju belu boju. Ako se pretpostavi da se svaki kanal (boja) boje jednog piksela predstavlja sa 8 bita, broj svih mogućih nijansi boje iznosi $2^8 \times 2^8 \times 2^8 = 2^{24}$. Za ovakve slike se kaže da su 24 bitne i da sadrže približno 16 miliona boja. Broj bita dodeljenih za skladištenje informacija o bojama naziva se dubina boja i 24-bitna dubina boja svakako nije jedina koja se koristi. Kada je reč o jednostavnijoj grafici ili ukoliko je slika namenjena prikazu na uređaju koji ne može da prikaže veliki broj boja poput mobilnog telefona, koriste se palete od 16, 8 ili čak i samo 4 bita, koje redom daju 65526, 256 i 16 boja. Dubina boja je presudan faktor kada je u pitanju veličina fajla, jer ako je za prikaz sadržaja dovoljan 8-bitni umesto 24-bitnog prikaza, veličina fajla će se smanjiti tri puta. Konkretno, nekomprimovana slika veličine 1024 x 768 tačaka zauzima 2,25 MB pri korišćenju 24-bitne palete boja, dok je pri korišćenju 8-bitne palete potrebno samo 0,75 MB [69]. Za vrednost sjajnosti piksela *sive (monohromatske) slike, kao i za intenzitet boje piksela kod slike u boji, koristi jedinstveni termin - intenzitet piksela* U zavisnosti od prakticnih potreba i konkretnih aplikacija, mogu se koristiti i drugi prostori boja, kao što su YCbCr ili HSV.

***PRILOG 14.*** **DIJAGRAM TOKA**

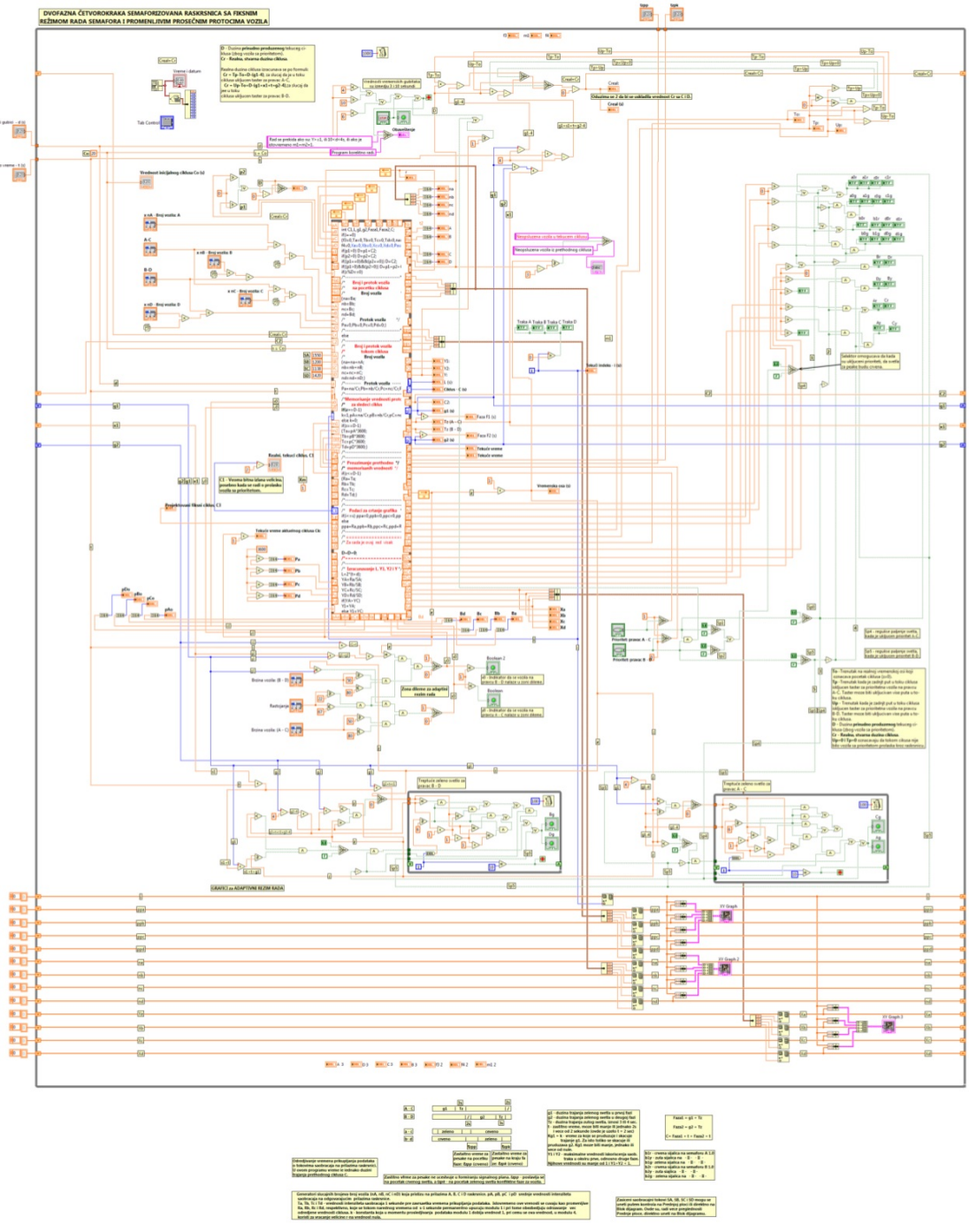
- Dvofazna četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa fiksnim režimom rada semafora, konstantnim prosečnim protocima vozila i bez prolaza vozila sa prioritetom i zona dileme,



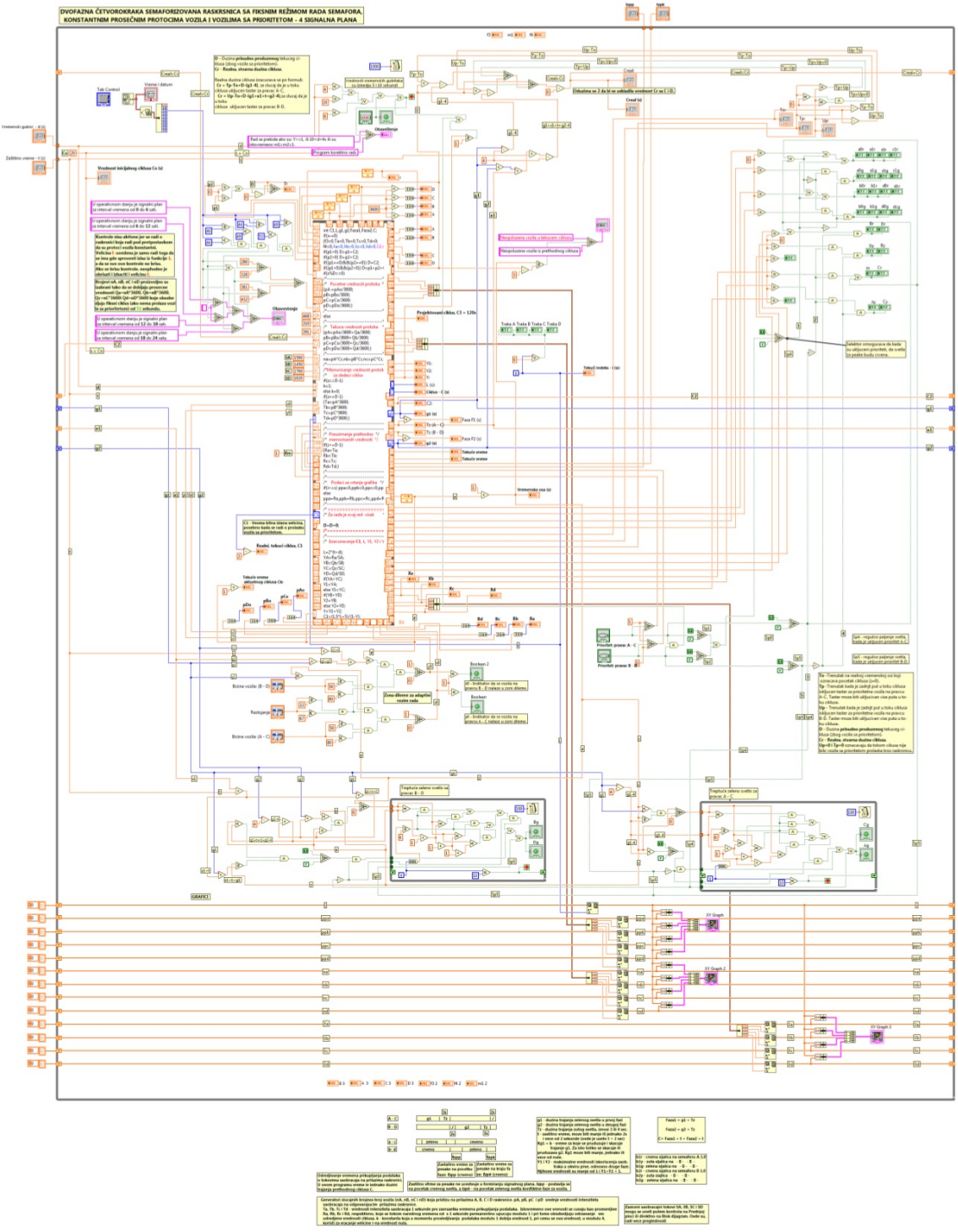
- Dvofazna četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa fiksnim režimom rada semafora, konstantnim prosečnim protocima vozila i prolazom vozila sa pravom prioritetom,



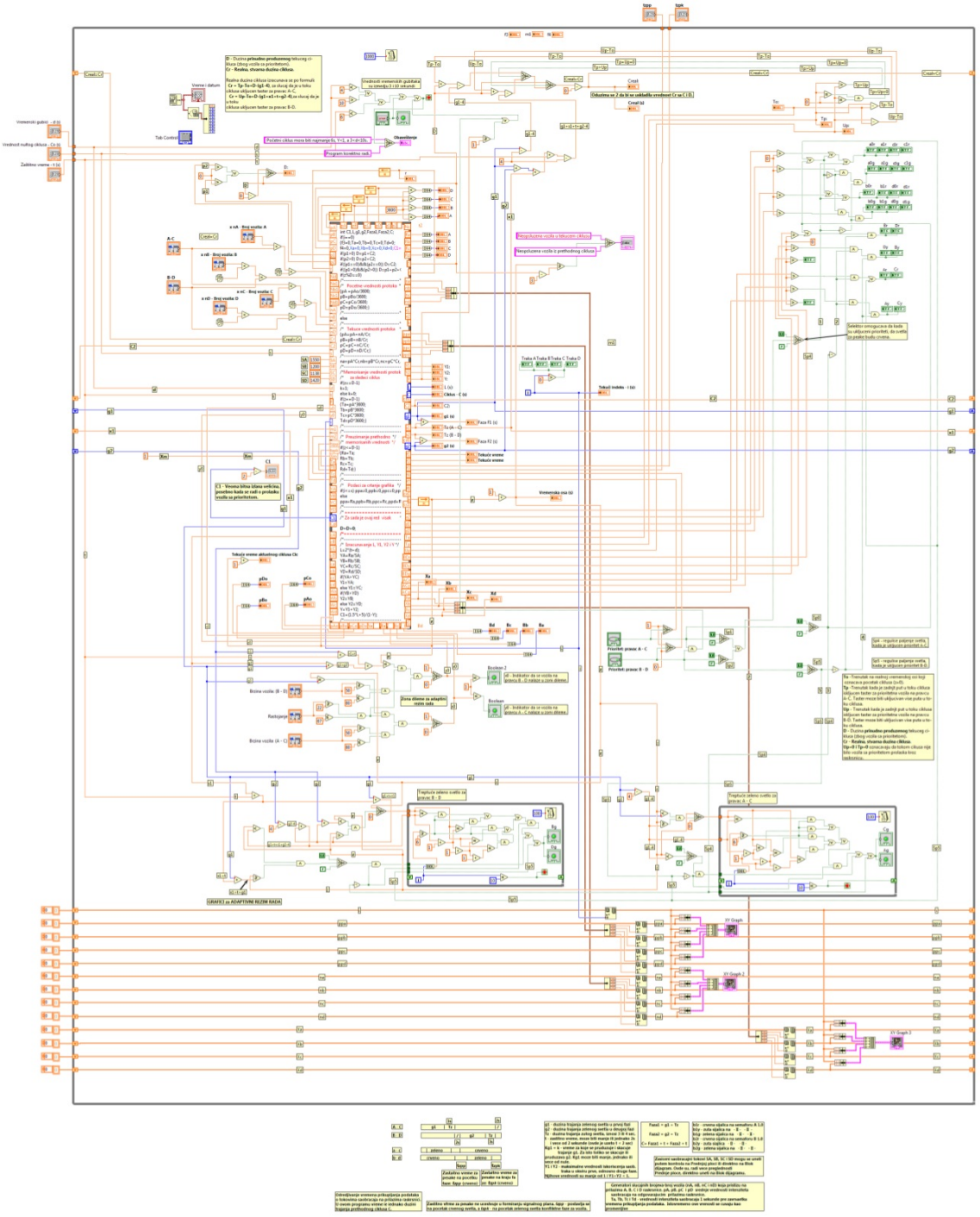
- Dvofazna četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa fiksnim režimom rada semafora i promenljivim prosečnim protocima vozila,



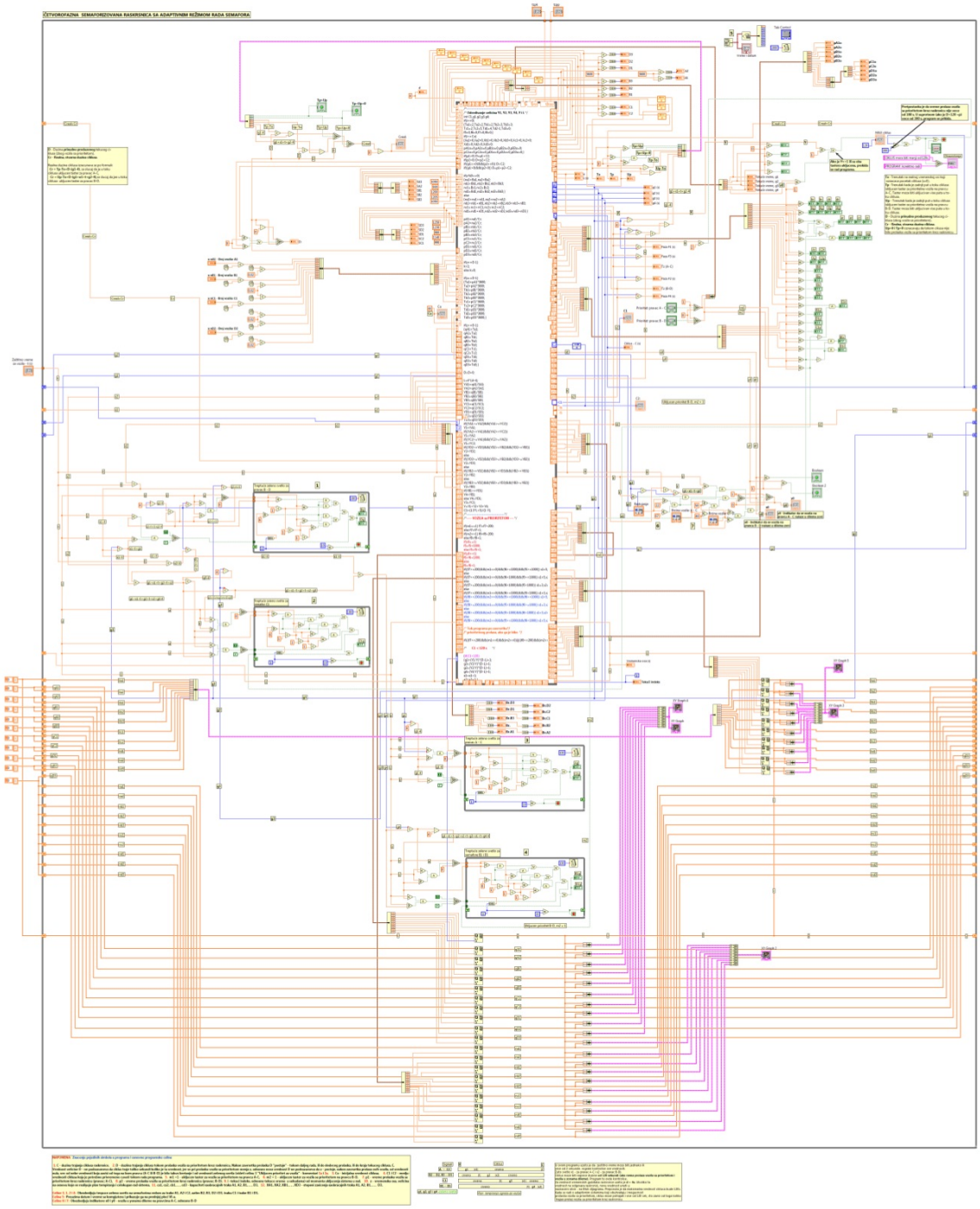
- Dvofazna četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa fiksnim režimom rada semafora, konstantnim prosečnim protocima vozila i vozilima sa prioritetom – 4 signalna plana,



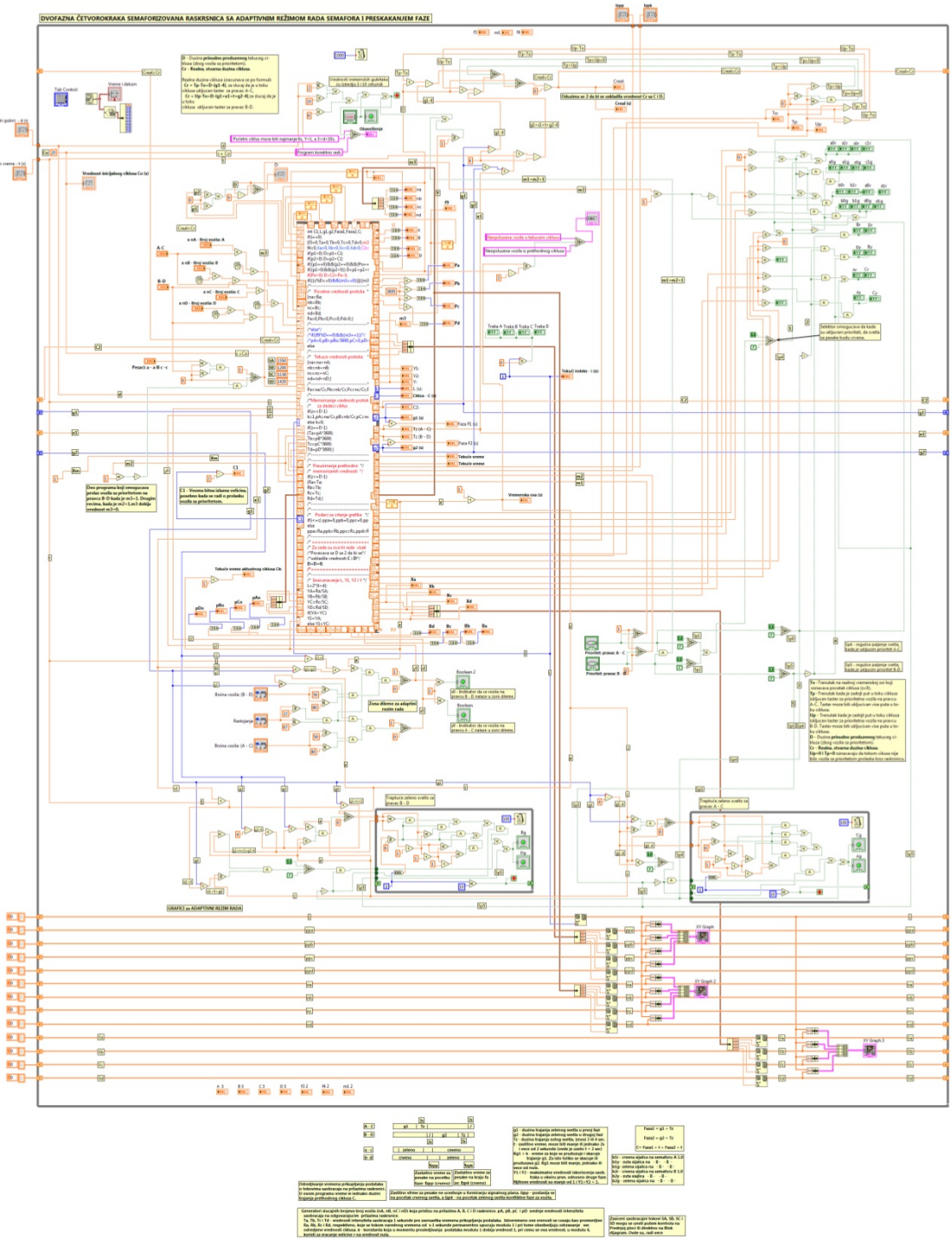
- Dvofazna četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa adaptivnim režimom rada semafora,



- Četvorofazna svetlosno signalisana raskrsniva = Adaptivni sistem =



- Dvofazna četvorokraka semaforizovana raskrsnica sa adaptivnim režimom rada semafora i preskakanjem faze.



## BIOGRAFIJA AUTORA

Milan Radivojević, rođen je 30.06.1988. godine u Beogradu, Opština Savski Venac, Republika Srbija. Osnovnu školu "3. oktobar" u Boru završio je 2003. godine, a srednju Mašinsko elektrotehičku školu u Boru, završio je 2007. godine. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, 28.09.2012., studijski program Poštanski saobraćaj i telekomunikacije - naziv stečenog visokog obrazovanja: Diplomirani inženjer saobraćaja. Na istom fakultetu, 08.10.2014. godine, završio je master studije sa prosečnom ocenom 8,13 - akademski naziv stečenog visokog obrazovanja: Master inženjer saobraćaja. Od 27.10.2014. god. radi u Institutu za rudarstvo i metalurgiju u Boru kao stručni projektant za informacione sisteme. Početkom 2016. godine izabran je u stručno zvanje »Istraživač pripravnik«. Sredinom decembra 2017. godine raspoređen je u Sektor za nauku – istraživački projekti, gde je radio do marta 2019. godine, kada je izabran u zvanje »Istraživač saradnik«. Danas Milan Radivojević, kao istraživač saradnik, radi u Centru za nauku, u odeljenju za istraživanje i razvoj na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja pod nazivom *Uticaj rudarskog otpada RTB Bor na zagađenje vodotoka sa predlogom mera i metoda za smanjenje uticaja na životnu sredinu, TR-37001*. Doktorske akademske studije je upisao na Univerzitetu Singidunum u Beogradu 26.04.2016. godine. Dana 29. juna 2018. godine, Veće Departmana za poslediplomske studije Univerziteta Singidunum u Beogradu donelo je odluku o odobravanju izrade doktorske disertacije pod nazivom „Moderna svetlosno signalisana i inteligentna raskrsnica". Za mentora je imenovan docent.dr Marko Tanasković.

U dosadašnjem periodu Milan Radivojević je kao autor, ili koautor, objavio nekoliko stručnih radova u domaćim i međunarodnim časopisima i učestvovao u radu međunarodnih konferencija na kojima je prezentovao svoje radove i to:

Šarac Dragana, Ožegović Spasenija, Kujačić Momčilo, Radivojević Milan; Upravljanje javnom poštanskom mrežom u uslovima promene vrednosti ekonomskih pokazatelja; Tehnika vol.68, br.1 (2013), str.153-157; grupa M51,

Milan Radivojević, Slavica Miletić, Dušan Radivojević; Realizacija simpleks metode korišćenjem programskog paketa Excel; Bakar 38 (2013) br.2; str.80-91; grupa M52.

S. Miletić, M. Radivojević, D. Radivojević, Implemention of simlex method by the used excel software package, BAKAR 38 (2013) 1 COPPER, Institut za rudarstvo i metalurgiju, Bor, issn: 0351-0212, udc: 669.3, 2013. grupa M11.

Milan Radivojević; Elektronske doznake; Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, broj 10/2014; str.2175-2178; grupa M45.

Milan Radivojević; Kvalitet servisa lokalnih bežičnih mreža; Bakar 41 (2016) br:2; str.69-80; grupa M52

Milan Radivojević, Miša Stević, Zoran Stević, Computer controlled system for thermal analysis of materials, The 5th International Conference on Renewable Electrical Power Sources, October 12-13, 2017, Belgrade, Serbia, Proceedings, 169-173, Editor: Zoran Stević, Publisher: SMEITS, Belgrade, ISBN: 978-86-81505-84-7, grupa M33

Miša Stević, Milan Radivojević, Zoran Stević, Development and application of 3D printers, The 5th International Conference on Renewable Electrical Power Sources, October 12-13,

2017, Belgrade, Serbia, Proceedings, 175-178, Editor: Zoran Stević, Publisher: SMEITS, Belgrade, ISBN: 978-86-81505-84-7,grupa M33

Milan Radivojević, Miša Stević, Marko Tanasković, PRIMENA LABVIEW PROGRAMSKOG PAKETA ZA KONTROLU I PRAĆENJE PROCESA RADA STANICE ZA PREKUGLAVANJE BGA ČIPOVA, INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY AND DATA RELATED RESEARCH, April 20, 2018, Belgrade, Serbia, 202-209, Publishing of Conference Proceedings of the International Scientific Conference on Information Technology and Data Related Research, ISBN: 978-86-7912-675-7, grupa M33

Milan Radivojević, Miša Stević, Zoran Stević, REALIZATION OF COMPUTER CONTROLED SYSTEM FOR THERMAL ANALYSIS OF MATERIAL, 50th International October Conference on Mining and Metallurgy, 30th Sepetmber – 3rd October 2018., Hotel "Jezero" Bor Lake, Serbia, Proceedings, 453-456, Editors: Ana Kostov, Milenko Ljubojev, Publisher: Mining and Metallurgy Institute Bor, ISBN: 978-86-7827-050-5, grupa M33

Milan Radivojević, Miša Stević, Marko Tanasković, APPLICATION OF THE LabVIEW PROGRAM PACKAGE FOR CONTROL AND MONITORING PROCESS OF REBALLING BGA CHIPS, 50th International October Conference on Mining and Metallurgy, 30th Sepetmber – 3rd October 2018., Hotel "Jezero" Bor Lake, Serbia, Proceedings, 457-460, Editors: Ana Kostov, Milenko Ljubojev, Publisher: Mining and Metallurgy Institute Bor, ISBN: 978-86-7827-050-5, grupa M33

Milan Radivojević, Miša Stević, Zoran Stević, ENERGY EFFICIENT, MODERN CROSSROADS, 6 th International Conference on Renewable Electrical Power Sources, October 11 and 12, 2018., Belgrade, Serbia, Proceedings, 193-199, Editor: Zoran Stević, Publisher: SMEITS, Belgrade, ISBN: 978-86-81505-87-8, grupa M33

Miletić, S., Mihajlović, D., Stanojević-Šimšić, Z., Radivojević, M., Conić, V., (2018). Analysis of the impact of interested parties on sustainable business aproach by AHP method. Ekologica, Vol 25, No 92, pp. 951-956. ISSN 0354-3285. Grupa M51.

S. Miletć, Z. Stanojević Šimšić, I. Jovanović, M. Radivojević, V. Conić, AHP analysis of organizational of organizational culture in textile companies in Serbia, Idustria Textila, (2019). (certificate of publication article is in attached). ISSN: 1222-5347 [SCI:IF = 0.504 (2018)] – M23

Milan Radivojević, Marko Tanasković, Zoran Stević, ADAPTIVNI ALGORITAM ZA ČETVOROKRAKU SVETLOSNO SIGNALISANU DVOFAZNU RASKRSNICU, BAKAR 44 (2019) 2 COPPER, Institut za rudarstvo i metalurgiju, Bor, issn: 0351-0212, udc: 669.3, 2019, str.37-67. grupa M52.

Milan Radivojević, Marko Tanasković, Zoran Stević, ODREĐIVANJE TRANSLATORNE BRZINE TELA UPOTREBOM VIDEO I TERMOVIZIJSKE KAMERE, BAKAR 45 (2020) 1 COPPER, Institut za rudarstvo i metalurgiju, Bor, issn: 0351-0212, udc: 669.3, 2020, str.58-65. grupa M52.

# MODERNA SVETLOSNO SIGNALISANA I INTELIGENTNA RASKRSNICA

ORIGINALITY REPORT

14%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

| | | |
|---|---|---|
| 1 | www.putevi-srbije.rs<br>Internet | 991 words — 2% |
| 2 | www.tehnikum.edu.rs<br>Internet | 603 words — 1% |
| 3 | eubd.edu.ba<br>Internet | 536 words — 1% |
| 4 | scindeks-clanci.ceon.rs<br>Internet | 526 words — 1% |
| 5 | fedorabg.bg.ac.rs<br>Internet | 412 words — 1% |
| 6 | www.vtmsts.edu.rs<br>Internet | 295 words — 1% |
| 7 | Milan Radivojević, Marko Tanasković, Zoran Stević. "The Adaptive Algorithm of a four Way Intersection regulated by Traffic Lights with four Phases within a Cycle", Expert Systems with Applications, 2020<br>Crossref | 217 words — < 1% |
| 8 | sr.scribd.com<br>Internet | 207 words — < 1% |
| 9 | id.scribd.com<br>Internet | 171 words — < 1% |
| 10 | portal.sinteza.singidunum.ac.rs | |

| | | |
|---|---|---|
| | Internet | 168 words — < 1 % |
| 11 | www.cekos.rs<br>Internet | 165 words — < 1% |
| 12 | www.mup.gov.rs<br>Internet | 157 words — < 1% |
| 13 | www.maturskiradovi.net<br>Internet | 145 words — < 1% |
| 14 | vtsnis.edu.rs<br>Internet | 120 words — < 1% |
| 15 | www.cris.uns.ac.rs<br>Internet | 102 words — < 1% |
| 16 | nardus.mpn.gov.rs<br>Internet | 98 words — < 1% |
| 17 | www.model5.rs<br>Internet | 92 words — < 1% |
| 18 | www.paragraf.rs<br>Internet | 72 words — < 1% |
| 19 | www.scribd.com<br>Internet | 69 words — < 1% |
| 20 | cigla.gradst.hr<br>Internet | 56 words — < 1% |
| 21 | valbl.com<br>Internet | 53 words — < 1% |
| 22 | www.authorstream.com<br>Internet | 52 words — < 1% |
| 23 | www.bioskola.edu.rs | |

| | | |
|---|---|---|
| | Internet | 44 words — < 1% |
| 24 | docslide.us<br>Internet | 43 words — < 1% |
| 25 | putprojekt.com<br>Internet | 41 words — < 1% |
| 26 | prevozkombi.com<br>Internet | 41 words — < 1% |
| 27 | ekonomskiinstitut.com<br>Internet | 40 words — < 1% |
| 28 | www.informatika.buzdo.com<br>Internet | 39 words — < 1% |
| 29 | zir.nsk.hr<br>Internet | 37 words — < 1% |
| 30 | www.overa.rs<br>Internet | 34 words — < 1% |
| 31 | www.diplomski-rad.com<br>Internet | 34 words — < 1% |
| 32 | www.uisk.ba<br>Internet | 32 words — < 1% |
| 33 | ltablice.com<br>Internet | 31 words — < 1% |
| 34 | www.accademiafilarmonica.it<br>Internet | 30 words — < 1% |
| 35 | pt.scribd.com<br>Internet | 30 words — < 1% |
| 36 | www.quality.unze.ba | |

| | | |
|---|---|---|
| | Internet | 29 words — < 1 % |
| 37 | demo.paragraf.rs<br>Internet | 28 words — < 1% |
| 38 | saobracajci.files.wordpress.com<br>Internet | 27 words — < 1% |
| 39 | sremskevesti.rs<br>Internet | 23 words — < 1% |
| 40 | Danilo Radivojevic, Stamenka Stankovic, Nikola Celar, Smiljan Vukanovic. "Adaptive traffic control systems for urban networks", Tehnika, 2017<br>Crossref | 23 words — < 1% |
| 41 | www.ftn.uns.ac.rs<br>Internet | 21 words — < 1% |
| 42 | putevi-srbije.rs<br>Internet | 21 words — < 1% |
| 43 | defendologija-banjaluka.com<br>Internet | 20 words — < 1% |
| 44 | www.fer.unizg.hr<br>Internet | 18 words — < 1% |
| 45 | ddl.rs<br>Internet | 17 words — < 1% |
| 46 | scindeks.ceon.rs<br>Internet | 17 words — < 1% |
| 47 | www.autoskola-mandic.hr<br>Internet | 15 words — < 1% |
| 48 | Milan Radivojević, Miša Stević, Marko Tanasković. "Primena labview programskog paketa za kontrolu i | 14 words — < 1% |

praćenje procesa rada stanice za prekuglavanje bga čipova", Proceedings of the International Scientific Conference - Sinteza 2018, 2018
Crossref

| | | |
|---|---|---|
| 49 | soros.org.ba<br>Internet | 13 words — < 1% |
| 50 | issuu.com<br>Internet | 13 words — < 1% |
| 51 | eprints.ugd.edu.mk<br>Internet | 12 words — < 1% |
| 52 | autoskolaprofesionalac.com<br>Internet | 11 words — < 1% |
| 53 | www.direkcijakikinda.rs<br>Internet | 10 words — < 1% |

EXCLUDE QUOTES ON
EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON
EXCLUDE MATCHES < 15 WORDS