

UNIVERZITET U BEOGRADU  
SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Aleksandar D. Jovanović

**IZBOR SIGNALNIH PLANOVA ZA  
UPRAVLJANJE SAOBRAĆAJEM  
PRIMENOM OPTIMIZACIJE  
KOLONIJOM PČELA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2017

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Aleksandar D. Jovanović

**CHOICE OF SIGNAL TIMING FOR  
TRAFFIC CONTROL BY BEE COLONY  
OPTIMIZATION**

Doctoral dissertation

Belgrade, 2017

**Mentor:**

Akademik Dušan Teodorović, redovni profesor Saobraćajnog fakulteta  
Univerziteta u Beogradu

**Članovi komisije:**

Dr Nikola Čelar, docent Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Dr Milan Dražić, vanredni profesor Matematičkog fakulteta Univerziteta u  
Beogradu

**Datum odbrane:**

# IZBOR SIGNALNIH PLANOVA ZA UPRAVLJANJE SAOBRAĆAJEM PRIMENOM OPTIMIZACIJE KOLONIJOM PČELA

## Rezime

U okviru ove disertacije razmatrani su problemi upravljanja saobraćajnim tokovima na izolovanoj signalisanoj raskrsnici i u zoni raskrsnica u fiksnom režimu rada. Takođe je razmatran i višekriterijumski problem upravljanja izlovanom signalisanom raskrsnicom koji je podrazumevao istovremeno upravljanje tokovima vozila i pešačkim tokovima. Problemi razmatrani u ovoj disertaciji po svojoj prirodi spadaju u probleme kombinatorne optimizacije. U slučaju fiksnog režima rada raskrsnice saobraćajni tokovi se grupišu u određeni broj faza. Svakoj fazi se dodeljuje određeni interval vremena za opsluživanje. Sa porastom broja faza raste i kombinatorna složenost razmatranog problema.

U cilju rešavanja problema upravljanja saobraćajnim tokovima u disertaciji su razvijeni novi matematički modeli praćeni odgovarajućim softverskim rešenjima. Metode za rešavanje razmatranih problema baziraju se na metaheurističkoj metodi optimizacija kolonijom pčela (bee colony optimization (BCO)). Komercijalne softvere HCS Signals (za izolovanu raskrsnicu) i TRANSYT-7F (za zonsko upravljanje) koriste saobraćajni inženjeri širom sveta, koji opisane probleme rešavaju primenom genetskih algoritama (GA). U okviru ove disertacije je pokazano da su algoritmi zasnovani na BCO metodi konkurentni navedenim softverima. Rezultati dobijeni pomoću BCO algoritma su takođe poređeni sa rezultatima dobijenim primenom metode simuliranog kaljenja (SA). Pokazano je, na većem broju test primera preuzetih iz literature, hipotetičkih primera i realnim raskrsnicama, da modeli razvijeni u ovoj disertaciji nalaze rešenja boljih performansi u odnosu na navedene softvere i algoritme. Poređenje kvaliteta rešenja, dobijenih putem različitih metodama, je vršeno na osnovu vrednosti vremenskih gubitaka vozila i pešaka.

Prvi problem koji je razmatran u okviru disertacije je problem upravljanja izolovanom signalisanom raskrsnicu u fiksnom režimu rada. Razvijen je algoritam koji

vrši optimizaciju upravljačkih parametara (ciklusa i raspodele zelenih vremena na faze) bilo da su na raskrsnici nezasićeni ili prezasićeni tokovi. Kriterijumsku funkciju su predstavljali ukupni prosečni gubici svih vozila koji prođu raskrsnicom u određenom periodu analize. Model zasnovan na BCO algoritmu je testiran na brojnim hipotetičkim primerima u kojima vladaju različiti uslovi zasićenosti. Posebno, model je testiran i na realnoj raskrsnici preuzetoj iz ulične mreže Beograda. Pokazalo se da rešenja, koja predlaže model razvijen u disertaciji, daju manje vrednosti vremenskih gubitaka vozila u odnosu na rešenja koja generiše softver HCS Signals.

Tokom nekoliko proteklih decenija istraživači su, pri optimizaciji rada izolovane signalisane raskrsnice, pretežno vodili računa o vremenskim gubicima vozila. U najvećem broju razvijenih modela vremenski gubici pešaka su ignorisani. U uslovima nezasićenih saobraćajnih tokova moguće je poboljšati upravljačke algoritme uzimanjem u obzir i vremenskih gubitaka pešaka na raskrsnici. U disertaciji je razvijen višekriterijumski model optimizacije rada izolovane raskrsnice u okviru koga se traži kompromis između dve kriterijumske funkcije: vremenskih gubitaka vozila i vremenskih gubitaka pešaka. Problem je rešavan primenom interaktivne metode u okviru koje donosilac odluke ispoljava svoje preferencije u pogledu dozvoljenih vrednosti vremenskih gubitaka vozila i pešaka. Predloženi model je testiran na odgovarajućem numeričkom primeru i realnoj raskrsnici.

Problem optimizacije rada zone raskrsnica spada u najteže probleme upravljanja saobraćajnim tokovima. Istraživači su pristupali rešavanju ovog problema primenom optimizacionih tehnika i različitih heurističkih algoritama. U disertaciji je razvijen model za rešavanje ovog problema koji vrši optimizaciju upravljačkih parametara (ciklusa, raspodelu zelenih vremena i pomaka zelenih vremena) u fiksnom režimu rada. Model je zasnovan na BCO metodi. Kriterijumsku funkciju, koja se minimizirala, predstavljalo je ukupno vreme koje sva vozila provedu u zoni tokom određenog perioda analize. Razvijeni model je primenljiv samo u uslovima nezasićenih tokova. U uslovima prezasićenosti, koji nisu predmet izučavanja u ovoj disertaciji, primenjuju se druge operativne mere i taktike u cilju smanjenja zagušenja unutar zone. Predloženi model je testiran na poznatom primeru iz literature. Dobijena rešenja su upoređena sa rešenjima koje nalazi tehnika simuliranog kaljenja. Pokazano je da su rešenja koje predlaže BCO pristup boljih performansi u odnosu na ona koja nalazi simulirano kaljenje.

Ključne reči: Izolovana signalisana raskrsnica, Zona raskrsnica, Optimizacija kolonijom pčela (BCO), Višekriterijumska optimizacija, Pešački tokovi, HCS Signals, TRANSYT-7F, Simulirano kaljenje (SA).

Naučna oblast: Saobraćajno inženjerstvo

Uža naučna oblast: Operaciona istraživanja u saobraćaju

UDK broj:

# CHOICE OF SIGNAL TIMING FOR TRAFFIC CONTROL BY BEE COLONY OPTIMIZATION

## Abstract

This doctoral dissertation studies isolated signalized intersection traffic control problem. The dissertation also studies area-wide urban traffic control in the case of fixed time mode. Within the dissertation, we also discussed the multicriteria isolated signalized intersection traffic control problem, by taking into account driver and pedestrian delays. By their nature, all considered problems fall into area of difficult combinatorial optimization problems. In the case of fixed time control, traffic flows are served by being divided into a number of control phases, where at one time interval serves one phase and the next phase of the second interval, etc. As number of phases grows, complexity of combinatorial problems is more and more high.

In order to solve the problem of traffic flows control have been developed new mathematical models based on metaheuristic bee colony optimization (BCO). Commercial software HCS Signals (for isolated intersection) and TRANSYT-7F (for area control) using traffic engineers around the world. These software programs use Genetic Algorithm (GA) for solving the subject problems. In this thesis, it will be shown that the algorithm based on BCO method competitive to specified software and Simulated Annealing (SA) approach. Moreover, on a numerous of test examples, taken from the literary, hypothetical examples and real intersections, showed that the models developed in this thesis suggest better solutions compared to the above software and approaches.

The first problem that was discussed in this thesis is the problem of isolated signalized intersection control in the "fixed time" mode. The authors developed an algorithm that optimizes the control parameters (cycle time and the distribution of green time on the control phases) in case of undersaturated and oversaturated flows at the intersection. The criterion function includes the total average control delay of all vehicles that pass an intersection at the certain period. Model-based BCO algorithm has been tested on a number of hypothetical examples in which different saturation conditions. In particular, the model is tested on a real intersection taken from the Belgrade street

network. It has been shown that solutions stemmed from the model, give less value of criterion function compared to those that comes from the HCS Signals.

A review of literature shows that the researchers mainly focused on the total control delay of all vehicles that pass an intersection when optimize the isolated signalized intersection. The pedestrian delays are relatively neglected. In unsaturated traffic condition, we can improve the control algorithms taking into account the existence of a pedestrian in the intersection. Authors developed multicriteria optimization model for isolated intersection control taking into account a compromise between the two criteria functions: the vehicles control delay and the pedestrians control delay. The problem is solved by using interactive methods based on the BCO algorithm. Implementation of the proposed model was verified through a numerical example and real intersection.

The problem of area control optimization is one of the most difficult problems in field of traffic engineering. Numerous researchers have approached the solution of this problem from several aspects. In thesis was developed the model for solving this problem, which optimizes the control parameters (cycle time, the distribution of green time and offsets) in the "fixed time" mode using the BCO method. Criteria function is to minimize the total time that all vehicles carry in the area during a certain period. This model is applicable only in terms of undersaturated flows, because in oversaturated conditions engineers apply other measures and tactics in order to reduce congestion within the area. The set of numerical experiments is performed on well-known traffic benchmark network. The results obtained by the BCO approach are compared with the results found by simulated annealing (SA). It has been shown that the suggested BCO approach outperformed the SA.

Keywords: Isolated signalized intersection, Area-wide urban traffic control, Bee colony optimization (BCO), Multicriteria optimization, Pedestrian flows, HCS Signals, TRANSYT-7F, Simulated annealing (SA).

Scientific field: Traffic Engineering

Field of Academic Expertise: Operations research in transport and traffic engineering

UDK:



## **PREDGOVOR**

Inženjeri, iz bilo koje oblasti, imaju jedan uzvišen zadatak: da učine svet boljim mestom za život. U ovom neformalnom delu teksta, želim da poručim nekom budućem čitaocu (ako ga bude bilo) da je ovo najvažniji zadatak koji treba da ima pred sobom. Potpuno zadovoljenje inženjer može imati jedino kada je svojim radom dao nešto ljudima što će im koristiti. Kao posledica toga, uslediće sva potrebna priznanja i pohvale zajednice. Sa druge strane, inženjer koji ima jedino za cilj priznanja, pohvale i samo lični interes nije još dorastao svom zadatku.

Tokom doktorskih studija na Saobraćajnom fakultetu naučio sam nove matematičke metode iz oblasti veštačke inteligencije, koje su mi pomogle da se problemima upravljanja saobraćajnim tokovima bavim na jednom višem nivou. Najveću zahvalnost za to dugujem svom mentoru i profesoru Dušanu Teodoroviću. Iskreno se zahvaljujem svom mentoru, koji je prepoznao moju želju i posvetio mi svoje vreme.

Takođe, zahvalnost dugujem svom prijatelju i docentu Saobraćajnog fakulteta Milošu Nikoliću. Miloš je doprineo da objavljeni radovi, na kojima se temelji ova disertacija, budu razumljiviji i boljeg kvaliteta. Pored toga, zahvaljujem mu se i na pomoći prilikom pisanja programskih kodova.

Zahvalnost dugujem i ostalim članovima komisije, profesoru Nikoli Čelaru i profesoru Milanu Dražiću. Zahvaljujem im se na vremenu koje su izdvojili za čitanje ovog teksta i što su svojim komentarima i sugestijama doprineli njegovom sadržaju.

Na kraju, ali ne i najmanje bitnu, zahvalnost dugujem svojim roditeljima. Oni su verovali u mene i omogućili mi da se školujem. Želim da se zahvalim supruzi, ostaloj porodici i prijateljima, koji su imali razumevanja za moje angažovanje oko pisanje disertacije.

Ovu disertaciju posvećujem svojoj ćerki Sonji.

# SADRŽAJ

1. UVODNA RAZMATRANJA .....	13
2. PROBLEMI UPRAVLJANJA SAOBRAĆAJNIM TOKOVIMA .....	15
2.1. Upravljanje saobraćajnim tokovima u fiksnom režimu rada .....	16
2.1.1. Pojam i proračun zasićenog toka i kapaciteta saobraćajne trake .....	18
2.1.2. Stepen zasićenja saobraćajne trake .....	19
2.1.3. Vremenki gubici vozila kao mera efikasnosti rada raskrsnice .....	20
2.2. Pregled osnovne literature .....	26
3. METAHEURISTIČKI ALGORITAM OPTIMIZACIJA KOLONIJOM PČELA ....	29
3.1. Mehanizam poređenja rešenja kod veštačkih pčela .....	32
3.2. Mehanizam regrutovanja .....	34
3.3. Ostali aspekti BCO metaheuristike .....	35
4. UPRAVLJANJE RADOM IZOLOVANE SIGNALISANE RASKRSNICE .....	37
4.1. Matematička formulacija problema .....	37
4.1.1. Matematička formulacija u slučaju nezasićenih saobraćajnih tokova .....	39
4.1.2. Matematička formulacija u slučaju prezasićenih saobraćajnih tokova .....	40
4.2. Optimizacioni i heuristički pristupi rešavanju problema upravljanja radom izolovane signalisane raskrsnice .....	41
4.2.1. Rešavanje problema upravljanja saobraćajnim tokovima na izolovanoj signalisanoj raskrsnici primenom dinamičkog programiranja .....	42
4.2.2. Primena optimizacije kolonijom pčela .....	43
4.3. Numerički primeri .....	46
4.3.1. Test scenario 1 .....	48
4.3.2. Test scenario 2 .....	51
4.3.3. Test scenario 3 .....	54

4.3.4. Testiranje modela na primeru realne raskrsnice.....	57
5. VIŠEKRITERIJUMSKO UPRAVLJANJE RADOM IZOLOVANE SIGNALISANE RASKRSNICE .....	63
5.1. Odnos pešačkih tokova i tokova vozila na signalisanoj raskrsnici .....	64
5.2. Opis i matematička formulacija problema.....	66
5.3. Predloženo rešenje problema .....	69
5.4. Numerički primeri.....	72
5.4.1. Testiranje modela na realanom primeru.....	78
6. ZONSKO UPRAVLJANJE SAOBRAĆAJNIM TOKOVIMA.....	82
6.1. Pregled literature.....	83
6.2. Postavka problema.....	86
6.2.1. Saobraćajni model.....	86
6.2.2. Matematička formulacija problema .....	89
6.3. Predloženo rešenje problema bazirano na BCO algoritmu.....	93
6.3.1. Generisanje inicijalnog rešenja .....	94
6.3.2. Modifikacija rešenja.....	97
6.4. Numerički primer.....	102
6.4.1. Primena simuliranog kaljenja na problem zonskog upravljanja saobraćajnim tokovima.....	103
6.4.2. Određivanje BCO i SA parametara tokom optimizacije.....	106
6.4.3 Poređenje BCO i SA algoritma .....	107
6.4.4. Rezultati dobijeni pomoću softvera TRANSYT-7F .....	112
7. ZAKLJUČAK I PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA .....	114
LITERATURA .....	117

## PREGLED SLIKA

Slika 2.1. Konfliktne tačke na raskrsnici.....	15
Slika 2.2. Upravljanje raskrsnicom sa dve faze.....	17
Slika 2.3. Načini upravljanja levim skretanjima.....	18
Slika 2.4. Osnovni tipovi putanja na raskrsnici i komponente vremenskih gubitaka.....	21
Slika 3.1. Rešenja generisana od strane veštačkih pčela .....	32
Slika 3.2. Poređenje generisanih rešenja u košnici.....	33
Slika 3.3. Rekrutovanje neopredeljenih pčela .....	34
Slika 4.1. Mreža dinamičkog programiranja .....	42
Slika 4.2. Modifikacija rešenja u slučaju kada je $\Delta C > 0$ .....	45
Slika 4.3. Rešenje koje su generisali veštački agenti posle izvršene jedne od modifikacija .....	45
Slika 4.4. Broj faza i raspodela traka po fazama za test raskrsnicu.....	47
Slika 4.6. Test raskrsnica za scenario 2 .....	52
Slika 4.7. Test raskrsnica za scenario 3 .....	55
Slika 4.8. Test raskrsnica: Kneza Miloša - Bulevar K. A. - Takovska.....	57
Slika 4.9. Signalni plan sa planom tempiranja prema postojećem stanju .....	59
Slika 4.10. Signalni plan sa planom tempiranja dobijen BCO algoritmom .....	61
Slika 5.1. Raskrsnica: Tokovi vozila i pešački tokovi.....	65
Slika 5.3. Test raskrsnica.....	73
Slika 5.4. Mogući planovi faza na test raskrsnici - "The two-way crossing signal plan" .....	74
Slika 5.5. Mogući planovi faza na test raskrsnici - "The scramble crossing signal plan" .....	75
Slika 5.6. Test raskrsnica: Ustanička - Vojislava Ilića .....	78

Slika 5.7. Signalni plan i plan tempiranja u postojećem stanju.....	79
Slika 5.8. Signalni plan i plan tempiranja u novoprojektovanom stanju.....	80
Slika 6.1. Mreža raskrsnica i saobraćajni model .....	87
Slika 6.2. Periodična raspodela nailazaka vozila na prilazima raskrsnice.....	89
Slika 6.4. Modifikacija zelenog vremena u slučaju kada je $\Delta C > 0$ .....	99
Slika 6.5. Primer modifikacije pomaka zelenih vremena.....	101
Slika 6.6. Test mreža .....	102
Slika 6.7. Konvergencija BCO algoritma kada se inicijalno rešenje generiše na slučajan način .....	111
Slika 6.8. Konvergencija BCO algoritma kada se inicijalno rešenje generiše pomoću heuristike .....	112

## PREGLED TABELA

Tabela 2.1. Izbor modela vremenskih gubitaka u odnosu na promenljive .....	25
Tabela 4.1. Izgubljeno vreme tokom ciklusa.....	48
Tabela 4.2. Vrednosti zasićenih tokova za scenario 1 .....	49
Tabela 4.3. Komparacija primenjenih metoda na test scenariju 1 .....	51
Tabela 4.4. Zasićeni tokovi po trakama za test scenario 2 .....	52
Tabela 4.5. Komparacija primenjenih metoda na test scenariju 2: Period analize $b=1$ ..	53
Tabela 4.6. Komparacija primenjenih metoda na test scenariju 2: Period analize $b=2$ ...	54
Tabela 4.7. Zasićeni tokovi po trakama za test scenario 3 .....	55
Tabela 4.8. Komparacija primenjenih metoda na test scenariju 3: Period analize $b=2$ ..	56
Tabela 4.9. Protoci i zasićeni tokovi po trakama.....	58
Tabela 4.10. Vrednosti neopsluženih vozila po trakama posle prvog perioda analize...	60
Tabela 4.11. Vrednosti neopsluženih vozila po trakama posle drugog perioda analize.	60
Tabela 4.12. Vrednosti neopsluženih vozila po trakama posle prvog perioda analize...	61
Tabela 4.13. Vrednosti neopsluženih vozila po trakama posle drugog perioda analize.	62
Tabela 4.14. Uporedna analiza postojećeg stanja i optimizacije pomoću BCO metaheuristike.....	62
Tabela 5.1. Vrednosti zasićenih tokova.....	72
Tabela 5.2. Izgubljeno vreme tokom ciklusa.....	73
Tabela 5.3. Rešenja - The two-way crossing signal plan .....	76
Tabela 5.4. Rešenja - The scramble crossing signal plan.....	77
Tabela 5.5. Protoci vozila i pešaka i zasićeni tokovi po trakama.....	79
Tabela 5.6. Rezultati višekriterijumske optimizacije .....	81
Tabela 6.1. Vrednosti protoka i zasićenih tokova na test mreži .....	103

Tabela 6.2. PF vrednosti.....	104
Tabela 6.3. Analiza BCO i SA parametara.....	107
Tabela 6.4. BCO i SA testiranja – inicijalno rešenje dobijeno na slučajan način .....	108
Tabela 6.5. Najbolja rešenja dobijena BCO i SA algoritmom kada se inicijalno rešenje generiše na slučajan način .....	109
Tabela 6.6. BCO i SA testiranja – inicijalno rešenje dobijeno pomoću heuristike .....	110
Tabela 6.7. Najbolja rešenja dobijena BCO i SA algoritmom kada se inicijalno rešenje generiše pomoću heuristike .....	110

# 1. UVODNA RAZMATRANJA

Upravljanje saobraćajnim tokovima na uličnoj mreži predstavlja jedan od najznačajnijih zadataka gradskih vlasti. U gradovima širom sveta se primenjuju različite metode i taktike kako bi se na što efikasniji način (manja vremena putovanja, manja potrošnja goriva, itd...) upravljalo saobraćajnim sistemom.

Predmet istraživanja ove disertacije su problemi iznalaženja najpovoljnijih mogućih signalnih planova za upravljanje radom izolovane signalisne raskrsnice i zone signalisanih raskrsnica. Kriterijumsku funkciju predstavljaju vremenski gubici vozila. Takođe je razmatran i problem višekriterijumske optimizacije rada izolovane signalisane raskrsnice, gde su u obzir uzete dve kriterijumske funkcije: vremenski gubici vozila i vremenski gubici pešaka.

Cilj istraživanja je izvršiti optimizaciju upravljačkih parametara signalnih planova: ciklusa, raspodele zelenih vremena, i posebno pomaka zelenih vremena kod zonske koordinacije, na takav način da vreme koje vozila i pešaci provedu u sistemu bude najmanje moguće. Kako nije u svim slučajevima izvodljivo pronalaženje optimalnih rešenja, javlja se mogućnost primene heurističkih i metaheurističkih metoda. Osnovna metoda za rešavanje predmetnih problema je optimizacija kolonijom pčela (bee colony optimization (BCO)).

Pored BCO metaheuristike, kao metoda za iznalaženje optimalnih signalnih planova korišćeno je dinamičko programiranje. Za rešavanje višekriterijumske optimizacije primenjena je interaktivna metoda, koja se zasniva na jednoj vrsti „saradnje“ između računara i čoveka. Za iznalaženje inicijalnih signalnih planova kod zonskog upravljanja predložena je nova heuristička metoda.

Rešenja koja su generisana pomoću predloženih modela poređena su sa rešenjima koje nude komercijalni softveri HCS Signals, za izolovanu signalisanu raskrsnicu, i simuliranim kaljenjem za zonsku koordinaciju. U cilju razvoja algoritama za predložene modele korišćeni su programski jezici Java i C#. Sva testiranja su urađena pomoću „PC“ računara sa sledećim karakteristikama: 3.10 GHz „AMD Quad Core Processor“ i 4 GB RAM\_a pod „MS Windows OS“.



Disertacija se sastoji iz sedam poglavlja. Posle prvog poglavlja u kome su data uvodna razmatranja, u drugom poglavlju detaljnije su predstavljene osnovni pojmovi iz oblasti upravljanja saobraćajnim tokovima. Pored toga, dat je i pregled osnovne literature sa kratkim opisom pojedinih istraživanja.

Treće poglavlje je posvećeno metaheurističkoj metodi optimizacija kolonijom pčela (BCO). Predstavljene su osnovne ideje ove metode, posebno njene varijante sa poboljšanjima. Posle toga, dat je pregled literature gde se vide mogućnosti primene ove metode koja je zasnovana na grupnoj inteligenciji pčela. Na kraju, ukazano je na neke detalje oko određivanja vrednosti parametara optimizacije.

U četvrtom poglavlju predstavljen je problem upravljanja radom izolovane signalisane raskrsnice. Data je nova matematička metoda za rešavanje problema, koja u svojoj osnovi sadrži BCO algoritam. Metoda je testirana na više hipotetičkih primera, za različite vrednosti saobraćajnog opterećenja koje je potrebno opslužiti u okviru određenog perioda analize. Potom, model je testiran i na jednoj, sa upravljačkog aspekta, kompleksnoj raskrsnici u Beogradu: Kneza Miloša, Bulevara Kralja Aleksandra i Takovske.

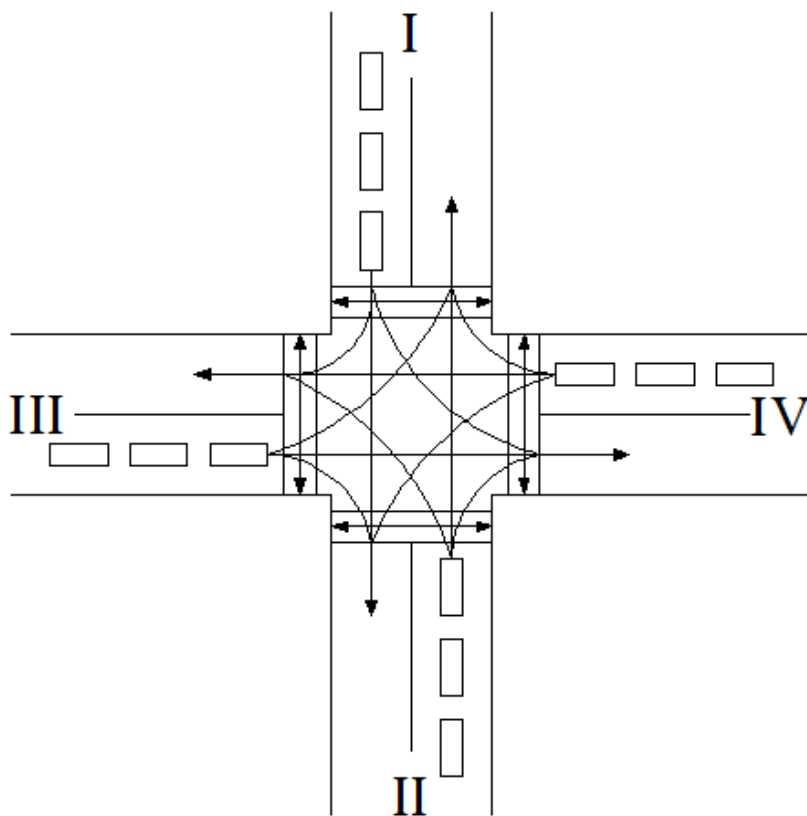
Peto poglavlje je posvećeno višekriterijumskom problemu upravljanja izolovane semaforisane raskrsnice. U okviru ovog problema u obzir se, pored vremenskih gubitaka vozila, uzimaju i vremenski gubici pešaka. Predložen je matematički model za rešavanje ovog problema. Algoritam za rešavanje zasnovan je na BCO metaheuristici koji nalazi kompromis između dve kriterijumske funkcije u međusobnom konfliktu. Problem višekriterijumske optimizacije rešavan je interaktivnom metodom. Model koji je testiran na hipotetičkom i realnom primeru pokazuje mogućnosti svoje praktične primene.

U šestom poglavlju razmatra se problem upravljanja saobraćajnim tokovima u zoni raskrsnica. Predložena je nova heuristika za generisanje inicijalnog rešenja. Potom je razvijena nova matematička formulacija za rešavanje razmatranog problema. Metoda za rešavanje problema se zasniva na BCO algoritmu, koji poboljšava inicijalno rešenje dobijeno heurističkim pristupom. Dobijena rešenja su testirana na poznatom primeru iz literature i poređena su sa rešenjima dobijenim simuliranim kaljenjem (SA).

Poslednje, sedmo poglavlje, posvećeno je zaključnim razmatranjima i pravcima budućih istraživanja.

## 2. PROBLEMI UPRAVLJANJA SAOBRAĆAJNIM TOKOVIMA

Raskrsnica predstavlja mesto na saobraćajnoj mreži gde se javljaju konflikti između saobraćajnih tokova, koji dolaze sa dva ili više različitih smerova. Smerovi, sa kojih vozila nailaze na raskrsnicu, nazivaju se prilazi raskrsnici. Tako, raskrsnica može imati tri, četiri, a u nekim slučajevima i više prilaza. Na slici 2.1. data je pravilna četvorokraka raskrsnica, gde su pomenuti prilazi raskrsnici označeni rimskim brojevima (od I do IV). Ukoliko vozila sa svakog prilaza imaju mogućnost da nastave svoje kretanje pravo, skrenu levo ili desno, onda takva raskrsnica funkcioniše pod punim režimom rada. U slučaju da su neka od skretanja zabranjena, sa bilo kog prilaza, raskrsnica je u takozvanom redukovanom režimu rada.



*Slika 2.1. Konfliktne tačke na raskrsnici*

U slučaju raskrsnice prikazane na slici 2.1 postoji 16 mogućih konfliktnih tačaka između vozila sa direktnim presecanjem tokova. Svako levo i desno skretanje ima svoje

ulivanje u glavni tok i izlivanje iz njega, tako da se javlja još 16 dodatnih konfliktnih tačaka. Na kraju, može se uočiti i 8 konfliktnih tačaka između vozila i pešaka.

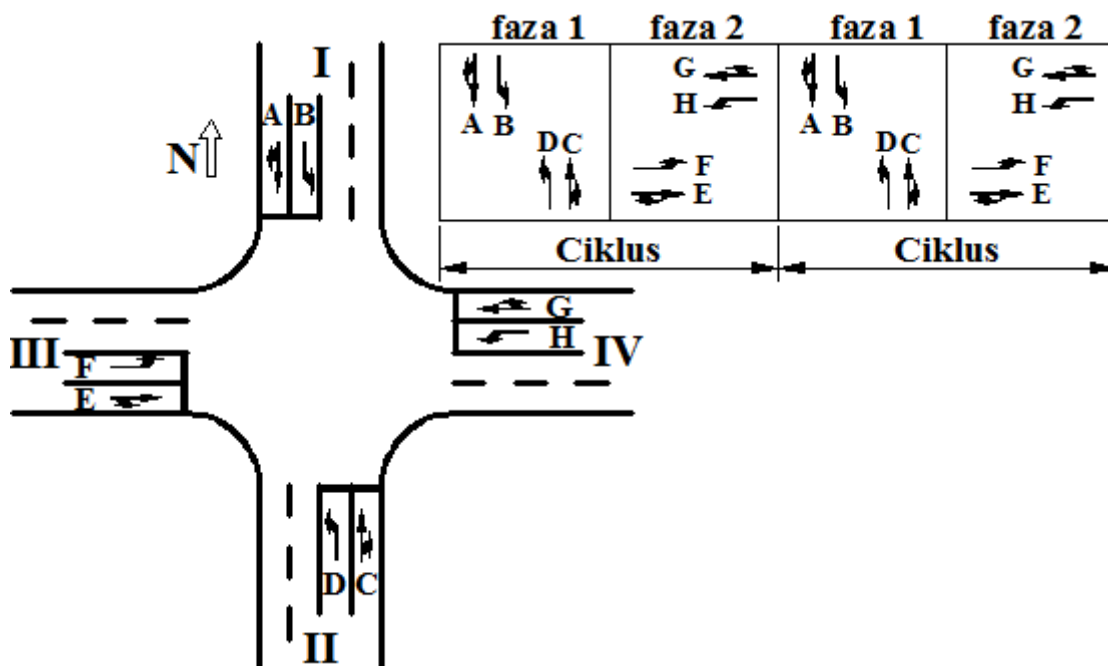
Iznalaženje načina za upravljanje pomenutim konfliktima u zoni raskrsnice je jedan od glavnih zadataka koji se postavlja pred saobraćajne inženjere. Cilj je razviti takvu taktiku upravljanja konfliktima na raskrsnici koja bi obezbedila efikasan i bezbedan način opsluživanja svih učesnika u saobraćaju (kako vozila tako i pešaka). Postoje dva generalna načina upravljanja saobraćajnim tokovima: upravljanje u fiksnom režimu rada i upravljanje u realnom vremenu. Posebno, može se govoriti i o problemima usaglašavanja rada svetlosnih signala na većem broju raskrsnica, koje može biti izvedeno na oba načina. Raskrsnice na kojima je projektovano upravljanje u realnom vremenu imaju, kao rezervnu varijantu, izveden i signalni plan u fiksnom režimu rada.

## **2.1. Upravljanje saobraćajnim tokovima u fiksnom režimu rada**

Svetlosni signali imaju zadatak da upravljaju saobraćajnim tokovima po principu „prikupi i opsluži”. U jednom periodu vremena na raskrsnicama se opslužuju vozila jedne grupe tokova (beskonfliktnih ili konfliktno kompatibilnih), dok se prikupljaju vozila druge grupe tokova. Pre detaljnijeg objašnjenja ovakvog načina upravljanja potrebno je definisati nekoliko osnovnih pojmova. Navedeni pojmovi se odnose na upravljanje radom izolovane raskrsnice: (Roess i ostali 2011):

1. *Faza*. Vremenski interval tokom kog se opslužuje tok ili odgovarajuća grupa beskonfliktnih ili konfliktno kompatibilnih tokova naziva se faza. Broj grupa, u koji su tokovi podeljeni, predstavlja broj faza pomoću kojih se upravlja raskrsnicom.
2. *Ciklus*. Predstavlja vreme koje protekne između dva uzastopna početka iste faze (slika 2.2.).

Na slici 2.2. je prikazana pravilna četvorokraka raskrsnica u punom režimu rada. Svaki prilaz raskrsnici ima po dve saobraćajne trake, koje su označene velikim abecednim slovima (A, B, C...). Pretpostavimo da se saobraćajnim tokovima na raskrsnici, prikazanoj na slici 2.2, upravlja pomoću dve faze. U fazi 1 opslužuju se tokovi sa I i III prilaza raskrsnici, dok se u fazi 2 opslužuju tokovi sa II i IV prilaza.



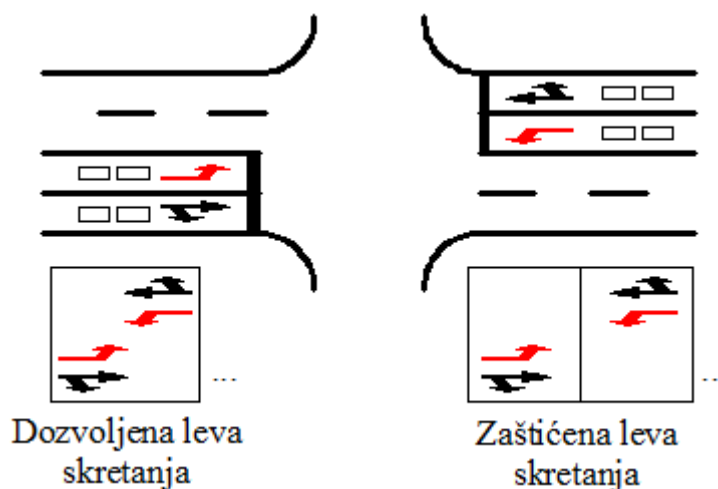
Slika 2.2. Upravljanje raskrsnicom sa dve faze

3. *Zaštitna vremena.* Tokom ciklusa uvek postoji nekoliko sekundi, kao deo faze, u svrhu izbegavanja nedozvoljenih konflikata između tokova.
4. *Dozvoljena leva skretanja.* Dozvoljena leva skretanja predstavljaju slučaj kada se tokovi u levom skretanju opslužuju zajedno sa suprotnim tokom pravo, tako da vozila pravo imaju prednost. Drugim rečima, tokovi levo („opposed flow”) i tokovi pravo („opposing flows”) se opslužuju u istoj fazi (slika 2.3.).
5. *Zaštićena leva skretanja.* Zaštićena leva skretanja podrazumevaju situaciju kada se tokovi u levom skretanju opslužuju bez konflikta sa suprotnim tokom pravo. Drugim rečima, tokovi levo („opposed flow”) i tokovi pravo („opposing flows”) se opslužuju u različitim fazama (slika 2.3.).
6. *Zaštićeno/dozvoljena leva skretanja i dozvoljeno/zaštićena leva skretanja.* Ovakav način upravljanja levim skretanjima podrazumeva kombinaciju prethodna dva načina. Leva skretanja su u jednom delu ciklusa zaštićena, a u drugom delu ciklusa dozvoljena.

Ne postoje tačno određene vrednosti za broj vozila u levom skretanju kada ih je obavezno izdvojiti u posebnu fazu, već se to ostavlja samom inženjeru na procenu. Postoje razne preporuke kada je u pitanju odluka o tome da li zaštititi leva skretanja.

Prema (Asante i ostali 1993) zaštita levih skretanja se vrši kada su ispunjena barem dva od sledećih kriterijuma:

- broj vozila u levom skretanju je veći od 320 voz/h,
- broj vozila u konfliktu sa levim skretanjima je veći od 1100 voz/h,
- brzina vozila u konfliktu sa levim skretanjima je veća od 45 km/h,
- postoji jedna ili više traka posebno namenjena za leva skretanja. Nije praktično izvoditi zaštićena leva skretanja iz zajedničkih traka (shared lines).



Slika 2.3. Načini upravljanja levim skretanjima

Ukoliko su desna skretanja u konfliktu sa većim brojem pešaka ostavlja se mogućnost i njihovog izdvajanja u posebnu fazu. Kao i kod levih skretanja, ne postoje tačne vrednosti tokova vozila za koja se desna skretanja odvajaju u posebnu fazu. Utvrđeno je da 1700 pešaka/h potpuno blokira desna skretanja, mada su ovako veliki pešački tokovi retki. U praksi nije čest slučaj da se desna skretanja izdvajaju u posebnu fazu. Nešto više reči o odnosu tokova vozila i pešačkih tokova na raskrsnici biće u 5. poglavlju ove disertacije.

### 2.1.1. Pojam i proračun zasićenog toka i kapaciteta saobraćajne trake

Idealan zasićeni tok predstavlja maksimalni broj vozila na čas, koji može da opsluži traka ili grupa traka, pod pretpostavkom da zeleno vreme, koje im je dodeljeno, traje čitav taj čas (HCM 2000). Uvodimo u razmatranje sledeće veličine:

$S_i$  - zasićeni tok  $i$ -te grupe traka,

$S_0$  - idealna vrednost zasićenog toka,

$N$  - broj traka u okviru grupe,

$f_i$  - redukcionni faktori za prilagođavanje konkretnim uslovima.

Vrednost zasićenog toka se računa kao (HCM 2000):

$$S_i = S_0 \cdot N \cdot \prod_i f_i \quad (2.1)$$

HCM (2000) nudi 11 različitih redukcionnih faktora  $f_i$  i obrasce za njihov proračun. Takođe, u HCM-u se detaljno analiziraju idealne vrednosti zasićenog toka  $S_0$ .

Praktično, zasićeni tok predstavlja kapacitet saobraćajne trake (ili grupe traka) u slučaju kada je na semaforu konstantan zeleni signalni pojam tokom jednog časa. Kapacitet  $i$ -te grupe traka (ili  $i$ -te saobraćane trake) računa se prema formuli (HCM 2000):

$$c_i = S_i \cdot \left( \frac{g_i}{C} \right) \quad (2.2)$$

gde su:

$c_i$  - kapacitet  $i$ -te grupe saobraćajnih traka (voz/h),

$g_i$  - zeleno vreme  $i$ -te saobraćajne trake ili grupe saobraćajnih traka (s),

$C$  - ciklus (s).

### 2.1.2. Step en zasićenja saobraćajne trake

Odnos saobraćajnog toka ( $q_i$ ) i kapaciteta, u  $i$ -toj traci ili  $i$ -toj grupi traka, predstavlja step en zasićenja ( $X_i$ ), koji se računa na sledeći način (HCM 2000):

$$X_i = \frac{q_i}{c_i} = \frac{q_i}{s_i \frac{g_i}{C}} = \frac{q_i/s_i}{g_i/C} \quad (2.3)$$

Ukoliko vrednosti  $X_i$ , na svim trakama ili grupi traka u okviru jedne raskrsnice, ne prelaze vrednost jedinice to znači da je postavljeno saobraćajno rešenje održivo. Drugim rečima, vladaju uslovi nezasićenih saobraćajnih tokova u kojima nema neopsluženih vozila na kraju ciklusa. Vozila postaju neopslužena kada moraju više od jednom da se zaustave kako bi prošla raskrsnicom. Slučaj, kada zbog velikog broja vozila nije moguće izbeći ovakvu situaciju na raskrsnici, se naziva stanje prezasićenih tokova. U slučaju stanja prezasićenih tokova vrednosti  $X_i$  prelaze jedinicu. U okviru ove disertacije biće analizirana i ova stanja.

### **2.1.3. Vremenski gubici vozila kao mera efikasnosti rada raskrsnice**

Procena efekata rada signalisane raskrsnice (ili grupe signalisanih raskrsnica), kao jednog složenog sistema, ne predstavlja jednostavan zadatak. Kriterijumi, koji se koriste pri ovoj proceni, mogu se podeliti u sledeće grupe (Batanović 1989):

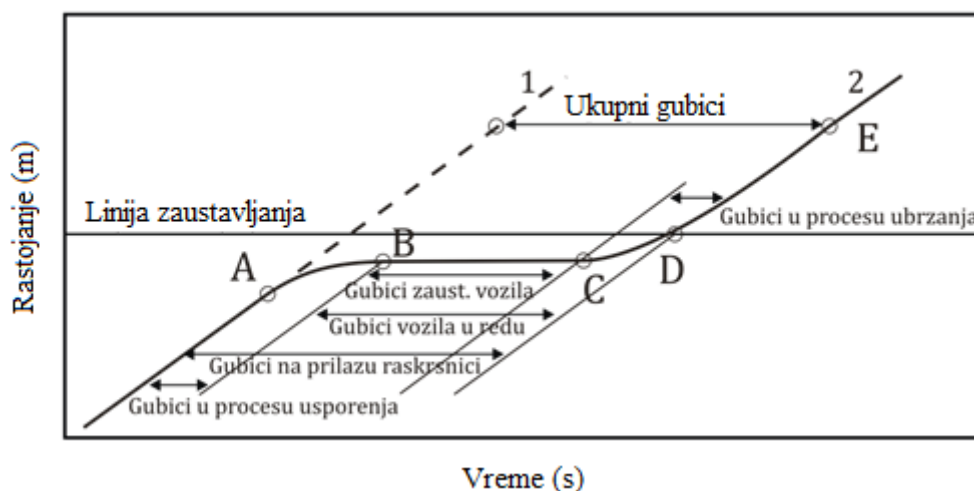
1. Kriterijumi koji obuhvataju: vremenske gubitke vozila, ukupan broj zaustavljanja, vreme putovanja svih vozila na mreži i slično. Ovo je primarna grupa kriterijuma, ostali su sekundarni.
2. Bezbednosni kriterijumi: broj konfliktnih tačaka, ukupan broj saobraćajnih nezgoda i slično.
3. Ekonomski kriterijumi: potrošnja goriva, troškovi eksploatacije i slično.
4. Ekološki kriterijumi: zagađenje vazduha, buka, vizuelno narušavanje prostora i slično.
5. Korisnički kriterijumi se odnose na stepen zadovoljstva svih korisnika, koji su u vezi sa sistemom upravljanja saobraćajem u gradovima. Korisnici se mogu podeliti u nekoliko grupa: putnici, vozači, pešaci, gradske vlasti i drugo.

U okviru ove disertacije jedini kriterijum, pri oceni predloženih izbora signalnih planova, biće prva kategorija predstavljenih kriterijuma koja se odnosi na vremenske gubitke vozila i ukupno vreme putovanja vozila na uličnoj mreži.

Vremenski gubici vozila na raskrsnicama nastaju kao posledica postojanja konfliktnih tokova iz različitih pravaca nailazaka vozila.

“Vremenski gubitak pojedinačnog vozila (multipliciran sa brojem osoba u vozilu), u zoni signalisane raskrsnice, definisan je razlikom vremena realizacije „idealne“ (trajektorije bez vremenskih gubitaka) i realno ostvarene trajektorije vozila u konkretnim uslovima” (Čelar 2013).

Na slici 2.4. dati su osnovni tipovi putanja na raskrsnici povezani sa vremenskim gubicima vozila.



Slika 2.4. Osnovni tipovi putanja na raskrsnici i komponente vremenskih gubitaka (Čelar 2013)

Pomoću citirane definicije i slike 2.4. mogu se objasniti neke od osnovnih komponenata vremenskih gubitaka (Čelar 2013):

1. Vremenski gubici koji nastaju kao posledica procesa ubrzanja / usporenja vozila (acceleration / deceleration delay). Ova komponenta gubitaka nastaje na segmentima trajektorije vozila, između tačaka A i B, odnosno C i D. Vrednost gubitaka definisana je razlikom vremena realizacije idealne trajektorije i trajektorije koja sadrži komponentu ubrzanja / usporenja.
2. Vremenski gubici na prilazu raskrsnici (approach delay). Ova komponenta predstavlja razliku vremena realizacije idealne putanje i putanje sa gubicima, od trenutaka nastanka gubitaka (tačka A) do prolaska linije zaustavljanja (tačka E).



3. Vremenski gubici zaustavljenog vozila (stopped delay). Ova komponenta predstavlja vremenski period u kome se vozilo nalazi u stanju mirovanja, odnosno predstavlja deo formiranog reda (tačke C i B).
4. Vremenski gubici vozila u redu (time in queue delay). Ova komponenta predstavlja period vremena od trenutka zaustavljanja vozila u redu (tačka B), do prolaska linije zaustavljanja (tačka D).
5. Ukupni gubici, upravljački gubici (total, control delay). Ovi gubici predstavljaju razliku vremena realizacije realne i idealne putanje (ostvaruju se trenutka odstupanja od idealne trajektorije (tačka A), do uslovnog , vremenski pomerenog, povratka na istu (tačka E)).

Pored prethodno navedenih, mogu se defisati još neki elementi vremenskih gubitaka vozila (Roess i ostali 2011):

1. Vremenski gubici u redu neopsluženih vozila. Ovi gubici podrazumevaju ukupne gubitke koje vozila imaju u neopsluženom redu sa kraja prethodnog ciklusa, u kom nisu uspela da prođu raskrnicu. Ove gubitke treba razikovati od gubitaka u redu po tome što gubici u redu podrazumevaju jedno zaustavljanje vozila, dok gubici u neopsluženom redu u obzir uzimaju više od jednog zaustavljanja vozila (slučaj kada je stepen zasićenja  $X > 1$ ).
2. Gubici u vremenu putovanja. Ovi gubici predstavljaju razliku između vremena za koje vozač očekuje da će proći semaforisanom raskrnicom i vremena za koje mu je signalni plan to omogućio. Zbog teškog određivanja željenog vremena vozača za prolaz raskrnicom ovaj koncept se retko primenjuje pri proračunima optimizacije rada svetlosnih signala, ali svakako predstavlja jedan od mogućih pristupa za istraživanje.

Kada je poznat ciklus i zeleno vreme  $i$ -te trake ili  $i$ -te grupe traka, vremenski gubici vozila se računaju na sledeći način (HCM 2000):

$$d_i = d_{1i}(PF) + d_{2i} + d_{3i} \quad (2.4)$$

gde su:

$d_i$  - prosečni vremenski gubici po vozilu  $i$ -te trake ili  $i$ -te grupe traka (s/voz),  
 $d_{1i}$  - uniformni vremenski gubici („uniform delay”) po vozilu  $i$ -te trake ili  $i$ -te grupe traka (s/voz),  
 $PF$  - faktor progresije (ima uticaja samo u sistemima koordinisanog rada svetlosnih siglala)  
 $d_{2i}$  - dodatni vremenski gubici („incremental delay”) po vozilu  $i$ -te trake ili  $i$ -te grupe traka (s/voz),  
 $d_{3i}$  - vremenski gubici usled postojanja inicijalnog reda, po vozilu,  $i$ -te trake ili  $i$ -te grupe traka (s/voz) (postoje samo u slučajevima kada je  $X_i > 1$ ).

Pod pretpostavkom da postoji stabilan saobraćajni tok sa ujednačenim nailascima, („uniform arrivals”), vremenski gubici  $d_1$  su izvedeni na osnovu Websterove formule za vremenske gubitke. Ovakav pristup podrazumeva da  $X$  nije veće od 1 (HCM 2000):

$$d_{1i} = \frac{0.5 \cdot C \cdot \left(1 - \frac{g_i}{C}\right)^2}{1 - \left[\min(1, X_i) \cdot \frac{g_i}{C}\right]} \quad (2.5)$$

Vremenski gubici označeni sa  $d_2$  predstavljaju gubitke usled neravnomernih nailazaka vozila, kao i usled poremećaja tokom ciklusa (na primer: slučajni gubici). Oni u obzir mogu uzeti i vremenske gubitke nastale u slučaju prezasićenih tokova ( $X > 1$ ), ali samo uz uslov da se opsluže sva vozila koja su ispostavila zahtev prema raskrsnici u okviru vremena analize  $T$ . Ovi vremenski gubici računaju se na sledeći način (HCM 2000):

$$d_{2i} = 900T \left[ (X_i - 1) + \sqrt{(X_i - 1)^2 + \frac{4 \cdot X_i}{c_i T}} \right] \quad (2.6)$$

Vreme analize se uobičajno uzima kao konstantno ( $T=15$  min,  $T=30$  min,  $T=1$  h, itd.) tokom različitih perioda analize  $b$ .

Ukoliko se javi slučaj da nakon perioda analize  $b$  u nekoj od  $i$ -tih traka i dalje postoje neopslužena vozila ( $X_i > 1$ ) to znači da će se u sledećem period analize ( $b+1$ ) u

toj traci javiti gubici ( $d_{3i}$ ) nastali usled postojanja inicijalnog reda neopsluženih vozila ( $Q_{bi}$ ). Ovi gubici će pre svega zavisiti od veličine inicijalnog reda neopsluženih vozila, trajanje perioda anize ( $T$ ) i odnosa protoka i kapaciteta  $i$ -te trake ( $X_i$ ).

Kada postoji inicijalni red u nekoj od  $i$ -tih traka mogu se javiti tri slučaja. Slučaj 1 podrazumeva da se posle perioda analize  $b$  inicijalni red u potpunosti opslužio ( $Q_{bi+1} = 0$ ). Slučaj 2 podrazumeva da će u narednom period analize ( $b+1$ ) i dalje postojati neopsluženi red vozila, ali će on biti manji (ili jednak) od inicijalnog redu u period analize  $b$  ( $Q_{bi+1} \leq Q_{bi}$ ). Slučaj 3 podrazumeva da u narednom period analize ( $b+1$ ) postoji neopsluženi red vozila veći od inicijalnog redu u periodu analize  $b$  ( $Q_{bi+1} > Q_{bi}$ ).

Inicijalni red neopsluženih vozila u period analize ( $b+1$ ) se računa na sledeći način (HCM 2000):

$$Q_{b+1i} = \max[0, Q_{bi} + c_i \cdot T \cdot (X_i - 1)] \quad (2.7)$$

Gubici nastali usled postojanja inicijalnog reda,  $d_{3i}$ , se računaju na sledeći način (HCM 2000):

$$d_{3i} = \frac{1800 \cdot Q_{bi} \cdot (1 + u_i) \cdot t_i}{c_i \cdot T} \quad (2.8)$$

gde su:

$t_i$  - vreme trajanja prezasićenosti (neopsluženih zahteva) u okviru vremena  $T$  u  $i$ -toj traci ili u  $i$ -toj grupi traka,

$u_i$  - parametar vremenskih gubitaka u  $i$ -toj traci ili u  $i$ -toj grupi traka.

$$t_i = \min \left\{ T, \frac{Q_{bi}}{c_i \cdot [1 - \min(1, X_i)]} \right\} \quad (2.9)$$

$$\text{if } t_i < T \text{ then } u_i = 0; \text{ else } u_i = 1 - \frac{c_i \cdot T \cdot [1 - \min(1, X_i)]}{Q_{bi}} \quad (2.10)$$

Ujednačeni vremenski gubici („uniform delay”), u slučaju postojanja inicijalnog reda neopsluženih vozila u  $i$ -toj traci ili  $i$ -toj grupi traka,  $d_{li}^*$ , se računaju na sledeći način:

$$d_{li}^* = d_{si} \cdot \frac{t_i}{T} + d_{ui} \cdot \frac{(T - t_i)}{T} \quad (2.11)$$

gde su:

$d_{si}$  - zasićeni gubici ( $d_i$  za  $X = 1$ ),

$d_{ui}$  - nezasićeni gubici ( $d_i$  za konkretno  $X < 1$ ).

$$d_{si} = 0.5 \cdot C \cdot \left(1 - \frac{g_i}{C}\right) \quad (2.12)$$

$$d_{ui} = d_{li} \quad (2.13)$$

Slučaj 1 se deli na dva perioda u kojima se ujednačeni vremenski gubici („uniform delay”), računaju na različite načine. Prvi period ( $d_{si}$ ) podrazumeva onaj deo vremena  $T$  u kome vladaju uslovi zasićenog toka ( $X_i = 1$ ). Drugim rečima, u toku ovog perioda vozila na prilazu raskrsnici iz  $i$ -te trake ne uspeavaju u toku jednog ciklusa da budu opslužena. U drugom periodu ( $d_{ui}$ ) praktično vladaju uslovi nezasićenog toka ( $X_i < 1$ ) i ujednačeni vremenski gubici („uniform delay”) se računaju na “standardan način” kao što je opisano formulom (2.5).

Prilikom donošenja odluke da li je u  $i$ -toj traci na snazi slučaj 2 ili slučaj 3 potrebno je prvo proračunati vrednost za  $t_i$  prema formuli (2.9). U narednoj tabeli 2.1. je sistematizovan način računanja merodavnih veličina u slučaju postojanja inicijalnih redova u  $i$ -toj traci ili  $i$ -toj grupi traka.

Tabela 2.1. Izbor modela vremenskih gubitaka u odnosu na promenljive (HCM 2000)

Sličaj br.	$X_i$	$t_i$	$u_i$	$d_{li}^*$
1	$\leq 1$	Jed. 2.9	0	Jed. 2.11
2	$\leq 1$	$T$	Jed. 2.10	$d_{si}$
3	$> 1$	$T$	1	$d_{si}$

## 2.2. Pregled osnovne literature

Problem upravljanja radom izolovane raskrsnice spada u najznačajnije probleme u oblasti saobraćajnog inženjerstva. S obzirom na njegovu složenu strukturu i važnost, stalno privlači istraživače, koji svojim raznovrsnim pristupima neprekidno doprinose poboljšavanju mogućih rešenja. Webster (1958) je predložio jedan od prvih modela upravljanja radom izolovane raskrsnice. Websterov model vrši proračun ciklusa i raspodele zelenih vremena na izolovanoj signalisanoj raskrsnici. Tokom poslednjih nekoliko decenija, brojni istraživači bavili su se upravljanjem rada izolovane raskrsnice. Ukupni vremenski gubici vozila, ukupan broj zaustavljanja, ili neki od ekonomskih i ekoloških kriterijuma, predstavljaju najčešće kriterijumske funkcije koje su učestvovalе u optimizaciji.

Opis jednog od prvih softvera za upravljanje izolovanom signalisanom raskrsnicom moguće je naći u radovima Allsop (1971, 1976, 1981). Bang (1976) je autor jednog od pionirskih radova u kome se u obzir uzimaju, prilikom optimizacije rada izolovane raskrsnice, i vozila javnog prevoza i pešački tokovi.

Pappis i Mamdani (1977) su objavili rad u kome je problem upravljanja signalisanom raskrsnicom rešavan pomoću fazi logike. Ovo se smatra jednim od pionirskih istraživanja primene veštačke inteligencije u saobraćajnom inženjerstvu.

Definisanje empirijske formule za vremenske gubitke vozila, broj zaustavljanja i dužinu reda na prilazima raskrsnici, uzimajući u obzir kapacitet pojedinih traka, moguće je naći u radu Akcelika (1981). Primena binarnog programiranja na upravljanje radom izolovane raskrsnice predstavljena je u radu čiji su autori Improta i Cantarella (1984).

Saka i ostali (1986) su razvili simulacioni pristup kojim se pronalaze vrednosti upravljačkih promenljivih, kako za nezasićene tako i za prezasićene tokove.

Brilon i Wu (1990) su primenjivali lance Markova u cilju optimizacije rada izolovane signalisane raskrsnice, dok su Foy i ostali (1992) primenjivali genetske algoritme u cilju rešavanja istog problema.

Problemom optimizacije faza primenom dinamičkog programiranja bavili su se u svom istraživanju Sen i Head (1997). Kriterijumske funkcije pri rešavanju problema

upravljanja saobraćajnim tokovima su po svojoj prirodi nelinearne. Mogućnost formiranja linerne kriterijumske funkcije predložena je u radu čiji je autor Lin (2001).

Analiza primene više tipova fazi logičkog sistema za upravljanje radom izolovane raskrsnice predstavljena je u radu Jacques i ostali (2002). U ovom radu dati su i pravci budućeg razvoja fazi logičkih sistema u cilju poboljšavanja rada izolovane raskrsnice. Zasićenim tokovima i pronalaženju optimalne vrednosti ciklusa u tim uslovima bavio se u svom radu Lan (2004).

Murat i Gedizlioglu (2005) su primenili fazi logiku u cilju optimizacije rasporeda tokova po fazama. Murat (2006) je pokazao da se problem upravljanja signalisanom raskrsnicom može sa uspehom rešavati hibridnim algoritmom neuronskih mreža i fazi logike.

Hibridni model genetskih algoritama i fazi logike u cilju upravljanja tokovima na izolovanoj raskrsnici može se naći u radu Yang i ostali (2006). U radu Nair i Cai (2007) razvijen je jedinstven fazi logički model za upravljanje saobraćajnim tokovima prilikom posebnih situacija na raskrsnici, kao što su saobraćajne nezgode, radovi u zoni raskrsnice i slično.

Programski paket "VISSIM" je uspešno korišćen kod problema minimizacije redova vozila na prilazima raskrsnici (Wunderlich i ostali 2008). Kronborg i Davidsson (1993) su razvili model za upravljanje izolovanom raskrsnicom zasnovan na kombinaciji heurističkih i optimizacionih metoda.

Različitim aspektima problema upravljanja radom izolovane raskrsnice bavili su se i Bell 1990; Olszewski 199; Powell 1998; Trabia i ostali 1999; Dresner i Stone 2006 i Duisters 2013.

Problem upravljanja izolovanom raskrsnicom u slučaju prezasićenih tokova razmatrali su Han 1996; Park i ostali 1999; Chang i Lin 2000; Dion i ostali 2004 i Zhao i ostali 2011.

Upravljanje radom izolovane signalisane raskrsnice u realnom vremenu nije razmatrano u okviru ove disertacije. Ipak, potrebno je ukazati na sledeće radove koji se bave ovim načinom upravljanja (Bretegue i Jezeguel 1979; Lin i Vijayakumar 1988;

Rawlings 2000; Bingham 2001; Lo i ostali 2001; Dion i Hellinga 2002; Qiao i ostali 2002; Soh i ostali 2010; Zhang i Wang 2011; Diaz-Cabrera i ostali 2015).

Detaljan opis i funkcije različitih softvera koji rešavaju probleme upravljanja saobraćajnim tokovima moguće je naći u diplomskom radu Mladenović (2009).

### **3. METAHEURISTIČKI ALGORITAM OPTIMIZACIJA KOLONIJOM PČELA**

Optimizacija kolonijom pčela (BCO) je deo metaheurističkih algoritama baziranih na inteligenciji grupe. Inteligencija grupe (Beni 1988; Beni i Hackwood 1992; Beni i Wang 1993; Bonabeau i ostali 1997) je deo veštačke inteligencije koji je inspirisan ponašanjem socijalnih zajednica u prirodi. Ove zajednice (termiti, mravi, pčele, itd...) su deo decentralizovanih kolonija u kojima jedinke donose pojedinačne odluke u cilju opstanka cele populacije. Interesantno je pomenuti da i kod ljudi postoji slična osobina nazvana "wisdom of the crowd" (mudrost mase).

BCO je metoda zasnovana na principima grupne inteligencije pčela tokom procesa sakupljanja nektara. Pionirski radovi, koji su uspostavili osnove ove metode, delo su autora Lučić i Teodorović (2001, 2002, 2003a, 2003b). BCO je uspešno primenjena na mnoge praktične probleme iz inženjerske prakse (Teodorović i Dell'Orco 2005, 2008; Šelmić i ostali 2010; Davidović i ostali 2011, 2012; Teodorović i ostali 2012; Todorović i Petrović 2013; Nikolić i Teodorović 2015; Nikolić i ostali 2015). Nikolić i Teodorović (2013b) su primenili BCO u cilju optimizacije brojnih test funkcija. Oni su svoje rezultate poredili sa već poznatim rezultatima iz literature i pokazali da je BCO primenljiva i konkurentna u poređenu sa drugim metodama.

Pupularnost algoritama inspirisanih prirodom ogleda se pre svega u sposobnosti bioloških sistema da se brzo adaptiraju na svoju sredinu. Organizacija grupe i ponašanje u skladu sa tom organizacijom je jedna od glavih karakteristika socijalnih insekata u koje spadaju mravi, termiti, a između ostalih i pčele. Ovi insekti imaju potrebu da ostanu u grupi kako bi obezbedili izvor hrane, zaštitili se od napada, i uopšte kako bi povećali svoje šanse za preživljavanje. Osnovna ideja BCO algoritma je stvaranje sistema sa veštačkim agentima (kolonijom veštačkih pčela) koji će biti u mogućnosti da rešavaju probleme kombinatorne optimizacije (Teodorović 2003, 2008).

Veštačke pčele pretražuju prostor dopustivih rešenja (diskretan ili kontinualan) u cilju nalaženja optimuma zadate funkcije. Svaka pčela generiše jedno rešenje zadata problema. U cilju pronalaženja što boljih rešenja, pčele (veštački agenti) međusobno



sarađuju. Poučene znanjem iz prošlosti i razmenom informacija između sebe, veštačke pčele se okupljaju oko one okoline rešenja koja daje bolju vrednost zadate funkcije, a napuštaju one delove prostora dopustivih rešenja koji su se pokazali kao manje atraktivni. Postoje dve verzije algoritma, konstruktivna i verzija sa poboljšanjima: u prvoj verziji veštačke pčele grade rešenje korak po korak, dok u drugoj verziji algoritma one dobiju na početku neko prihvatljivo rešenje, koje kroz iteracije poboljšavaju.

BCO algoritam se sastoji od dve faze: leta unapred i leta unazad. U svakom letu unapred svaka pčela istražuje prostor dopustivih rešenja. Zavisno od varijante algoritma koja se primenjuje, pčela vrši određeni broj unapred zadatih modifikacija rešenja. Posle dobijanja novog, modifikovanog rešenja, pčela se vraća u košnicu gde počinje druga faza algoritma, let unazad. U okviru leta unazad sve pčele iz kolonije međusobno razmenjuju informacije o rešenjima koje su postigle. Drugim rečima, pčele objavljuju informacije o kvalitetu svog rešenja, tj. informacije o postignutoj vrednosti zadate kriterijumske funkcije. Tokom leta unazad svaka pčela odlučuje, sa određenom verovatnoćom, da li će napustiti svoje rešenje i postati neopredeljena ili će zadržati svoje rešenje i postati pčela koja regrutuje druge neopredeljene pčele. Pčele koje su zadržale svoja rešenja u prostoru za ples ubeđuju neopredeljene pčele da u sledećem letu unapred svoju pretragu započnu od rešenja koje su one generisale. Pčele koje imaju bolju vrednost funkcije cilja imaju i veću šansu da pretragu nastave od svog prethodnog rešenja. Svaka neopredeljena pčela se pridružuje nekoj od pčela regruta (one pčele koje su ostale lojalne svom rešenju) na slučajan način, pomoću pravila ruleta. Drugim rečima, što je bolje rešenje pčele regruta, to je veća šansa da će prikupiti više neopredeljenih pčela.

Obe faze algoritma pretrage, let unapred i let unazad, se ponavljaju kroz iteracije, sve dok se ne dostigne definisani kriterijum zaustavljanja. Kriterijum za završetak algoritma može da predstavlja broj unapred zadatih iteracija, broj iteracija posle kojih nema poboljšanja kriterijumske funkcije, zadato vreme rada računara, itd.

Kao što je već rečeno, BCO algoritam može biti konstruktivan (constructive) ili sa poboljšanjima (improving). Konstruktivni pristup algoritmu može se naći u sledećim radovima Lučić i Teodorović 2001, 2002, 2003a, 2003b; Teodorović 2003, 2008, 2009; Šelmić i ostali 2010; Davidović i ostali 2012). U okviru ovog pristupa rešenje se gradi korak po korak. Kod varijante sa poboljšanjima se generiše neko od mogućih rešenja,

obično pomoću heurističkih algoritama. Ovo rešenje se potom kroz iteracije poboljšava (Davidović i ostali 2011; Todorović i Petrović 2013; Nikolić i Teodorović 2013b).

U ovoj disertaciji biće primenjena varijanta BCO algoritma sa poboljšanjima. Parametri BCO algoritma koji se koriste prilikom procesa optimizacije su sledeći:

$B$  – broj pčela koje učestvuju u pretrazi prostora dopustivih rešenja,

$IT$  – broj iteracija,

$NP$  – broj letova unapred i unazad u okviru jedne iteracije,

$NC$  – broj modifikacija rešenja u okviru jednog leta unapred,

$S$  – najbolje pronađeno rešenje.

Pseudokod BCO algoritma, varijante sa poboljšanjima glasi (Nikolić 2015):

---

***BCO procedura (ulaz  $B$ ,  $IT$ ,  $NP$ ,  $NC$ , izlaz  $S$ )***

---

1. *Odrediti početno rešenje.*
  2. *Odrediti kvalitet početnog rešenja.*
  3.  *$S \leftarrow$  sačuvati početno rešenje kao najbolje.*
  4. ***for  $j = 1$  to  $IT$  do***
  5.     ***for  $i = 1$  to  $B$  do***
  6.         *pčela  $i \leftarrow$  pčeli dodeliti početno rešenje.*
  7.     ***for  $k = 1$  to  $NP$  do***
  8.         ***for  $r = 1$  to  $NC$  do***
  9.             ***for  $i = 1$  to  $B$  do***
  10.                 *Napraviti jednu modifikaciju rešenja pčele  $i$ .*
  11.                 *Odrediti rešenje pčele  $i$ .*
  12.                 ***if najbolje rešenje od svih pčela bolje od rešenja  $S$  then***
  13.                      *$S \leftarrow$  sačuvati najbolje rešenje pčela kao trenutno najbolje.*
  14.     *Normalizovati vrednosti rešenja svih pčela.*
  15.     ***for  $i = 1$  to  $B$  do***
  16.         *Odrediti da li je pčela  $i$  lojalna.*
  17.     ***for  $i = 1$  to  $B$  do***
  18.         ***if pčela  $i$  nije lojalna then***
  19.             *Odrediti jednu od lojalnih pčela koju će pčela  $i$  da prati.*
- 

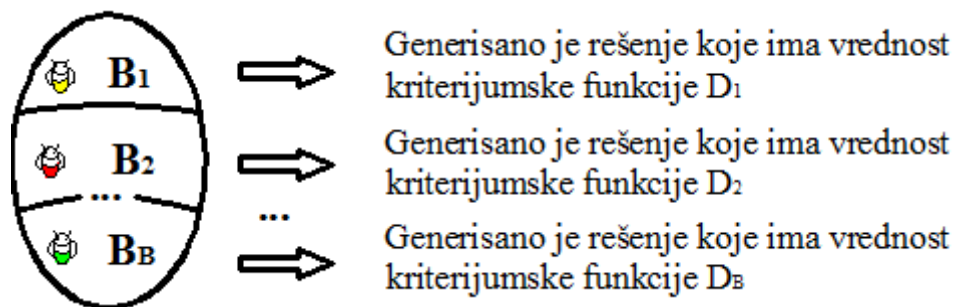
Na početku algoritma, u koracima 1 i 2 se određuje početno rešenje, koje se u koraku 3 čuva kao trenutno najbolje pronađeno. U koraku 4 se ulazi u petlju za iteracije. U koracima 5 i 6 se pčelama dodeljuje rešenje koje će se tokom iteracije modifikovati. Od koraka 8 do koraka 11 se realizuje let unapred. U okviru leta unapred svaka pčela treba

da napravi *NC* promena svog rešenja. Kada sve pčele naprave jednu modifikaciju rešenja vrši se provera da li je pronađeno bolje rešenje od do tada najboljeg poznatog (koraci 12 i 13). Od koraka 14 do 19 se realizuje let unazad (Nikolić 2015).

Pseudokod za konstruktivnu varijantu BCO algoritma, više detalja i primera njene primene na konkretne probleme iz prakse, moguće je naći u disertacijama (Šelmić 2011, Nikolić 2015).

### 3.1. Mehanizam poređenja rešenja kod veštačkih pčela

Posle modifikacije rešenja sve pčele se vraćaju u košnicu gde razmenjuju podatke o postignutim rešenjima (slika 3.1.).



Slika 3.1. Rešenja generisana od strane veštačkih pčela

Neka je sa  $D_b$  ( $b = 1, 2, \dots, B$ ) označena vrednost kriterijumske funkcije postignute od strane  $b$ -te pčele. Sa  $O_b$  je označena normalizovana vrednost kriterijumske funkcije  $D_b$ . U slučaju kada je potrebno minimizirati kriterijumsku funkciju, normalizacija se vrši prema sledećoj formuli:

$$O_b = \frac{D_{\max} - D_b}{D_{\max} - D_{\min}}, \quad O_b \in [0,1] \quad b=1,2,\dots, B \quad (3.1)$$

Ukoliko je potrebno maksimizirati kriterijumsku funkciju, normalizacija se vrši prema sledećoj formuli:

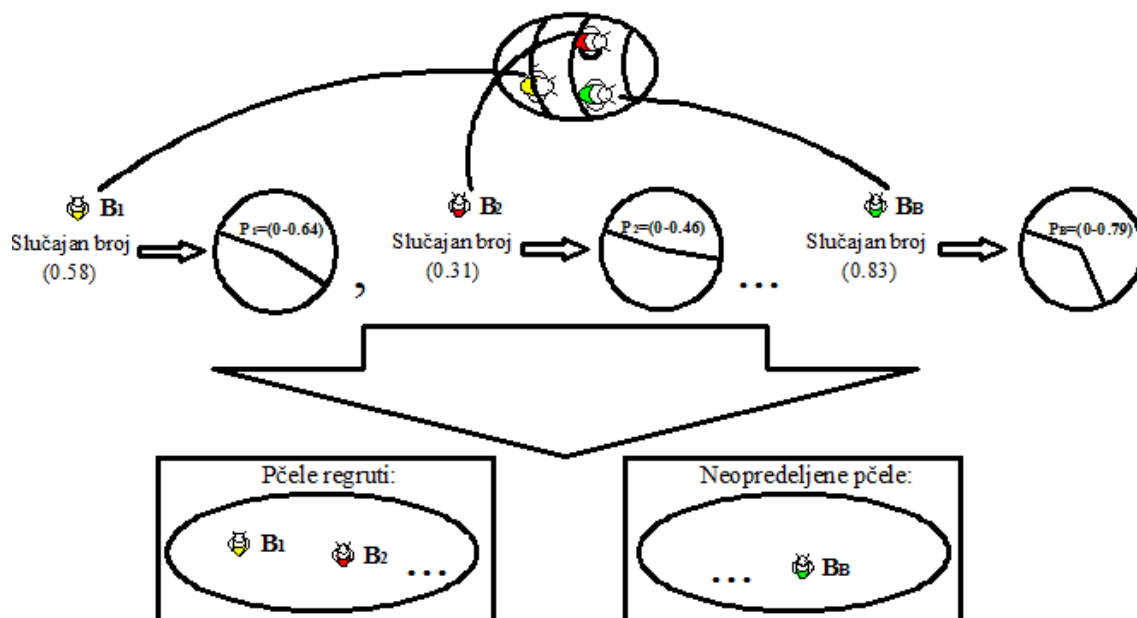
$$O_b = \frac{D_b - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}}, \quad O_b \in [0,1] \quad b=1,2,\dots, B \quad (3.2)$$

gde su:  $D_{min}$  i  $D_{max}$  minimalna i maksimalna vrednost kriterijumske funkcije, respektivno, generisana od strane svih pčela iz kolonije. Verovatnoća da će  $b$ -ta pčela (na početku sledećeg leta unapred) ostati lojalna svom rešenju računa se na sledeći način:

$$P_b = e^{-\left(\frac{O_{max} - O_b}{U}\right)}, \quad b=1,2,\dots, B \quad (3.3)$$

gde je:  $U$  brojač letova unapred u okviru jedne iteracije (uzima vrednosti 1, 2, ...,  $NP$ ) i  $O_{max}$  je maksimalna vrednost od svih  $O_b$  vrednosti (normalizovana vrednost najbolje kriterijumske funkcije koju su pronašle sve pčele zajedno).

Kako raste broj letova unapred raste i uticaj koji prethodno pronađena rešenja imaju na ponašanje veštačkih pčela. Ovo se postiže pomoću parametra  $U$  u imeniocu formule 3.3. Drugim rečima, na početku procesa pretrage veštačke pčele su "hrabrije" u istraživanju prostora dopustivih rešenja. Kako veštačke pčele naprave sve veći broj letova unapred, one su sklonije da zadržavaju već pronađena rešenja. Pri samom kraju procesa pretrage, pčele veću pažnju obraćaju na rešenja koja su već pronašla u prethodnim iteracijama.



Slika 3.2. Poređenje generisanih rešenja u košnici

Pomoću formule (3.3) i generatora slučajnih brojeva, svaka veštačka pčela odlučuje da li će ostati lojalna svom rešenju i nastaviti potragu u sledećem letu unapred

od onog rešenja koje je već pronašla, ili će napustiti svoje rešenje i postati neopredeljena (slika 3.2.).

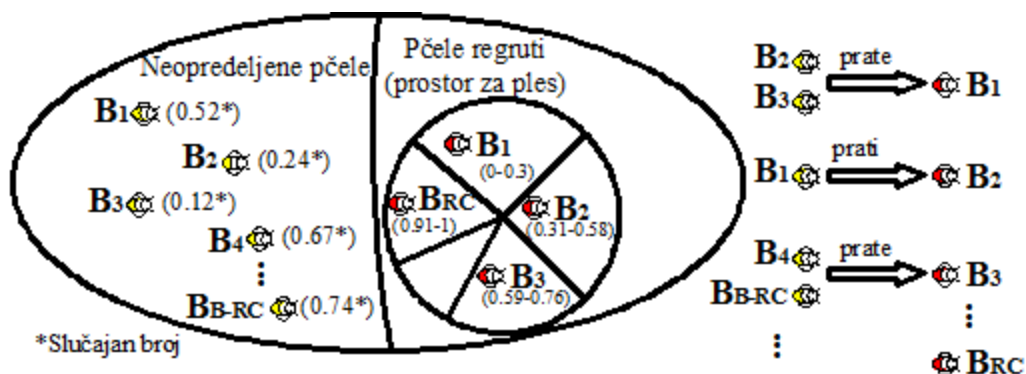
### 3.2. Mehanizam regrutovanja

U situaciji kada na početku sledećeg leta unapred veštačka pčela nema rešenje od kog bi krenula u pretragu (neopredeljena pčela), ona leti u prostor za ples i odlučuje se da prati neku od pčela koja je zadržala svoje rešenje (pčela regrut). U prostoru za igru pčele regruti “plešu” i na osnovu svojih rešenja “ubeđuju” druge neopredeljene pčele da krenu za njima. Verovatnoća da će bilo koja neopredeljena pčela poći za  $b$ -tom pčelom regrutom računa se na sledeći način:

$$P_b = \frac{O_b}{\sum_{k=1}^{RC} O_k}, \quad b=1,2,\dots, RC \quad (3.4)$$

gde su:  $O_k$  – noramalizovana vrednost kriterijumske funkcije  $k$ -tog rešenja i  $RC$  – broj pčela regruta.

Koristeći formulu (3.4) i generator slučajnih brojeva svaka neopredeljena pčela se pridružuje nekoj od pčela regruta. Rešenje koje je postigla pčela regrut se potom kopira na pčelu koja se odlučila da je prati. Od tog trenutka svaka pčela nastavlja pretragu prostora dopustivih rešenja samostalno. Drugim rečima, pčele polazeći od istog rešenja dalje vrše modifikaciju istog nezavisno jedna od druge.



Slika 3.3. Regrutovanje neopredeljenih pčela

Jedna iteracija je završena onog trenutka kada se završi unapred definisan broj  $NP$  letova unapred i letova unazad. Posle toga, ukoliko je pronađeno rešenje bolje od poznatog ono se postavlja kao najbolje globalno rešenje i prelazi se na sledeću iteraciju. BCO algoritam vrši pretragu prostora dopustivih rešenja iteraciju po iteraciju dok se ne dostigne neki od kriterijuma zaustavljanja.

### 3.3. Ostali aspekti BCO metaheuristike

Za razliku od konstruktivne varijante algoritma, gde na početku pretrage pčele nemaju inicijalna rešenja, kod varijante sa poboljšanjima to nije slučaj. Samim tim, nameće se pitanje određivanja inicijalnog rešenja. Inicijalno rešenje može da se generiše na slučajan način iz skupa dopustivih rešenja, ili se može odrediti pomoću nekog heurističkog pristupa. Heuristički pristup može biti poznat u literaturi, ili se može napraviti nova heuristika za problem koji se rešava. Koji će od ovih načina biti izabran zavisi od konkretnog problema, dimenzija tog problema, kao i od procene istraživača. Moguća je kombinacija nekih od opisanih načina.

Na početku svake od iteracija veštačkim pčelama se dodeljuju nova inicijalna rešenja. Ta rešenja mogu biti ista na početku svake iteracije, i takav pristup produžava vreme rada algoritma. Moguće je i na početku svake iteracije dodeljivati pčelama do tada najbolje poznata rešenja, ali ovakav pristup vodi bržoj konvergenciji i povećava se mogućnost da se optimizacija “zarobi“ u nekom od lokalnih optimuma.

Modifikaciju rešenja u okviru leta unapred moguće je realizovati na više načina. Jedan od pristupa je da sve pčele na isti način vrše modifikaciju, što je najčešći slučaj. Nov pristup predložen je u radu Nikolić i Teodorović (2013a) u okviru koga se uvodi pojam heterogenih pčela. Polazeći od svojih rešenja na početku leta unapred jedna grupa pčela vrši modifikaciju prema jednom modelu, dok druga grupa pčela vrši modifikaciju rešenja prema drugom modelu. Ovim se povećava šansa za pronalaženje “dobrih“ rešenja, iz razloga što se prostor dopustivih rešenja pretražuje na više načina. Treba napomenuti da pronalaženju “dobrih” rešenja mora da prethodi adekvatno osmišljen način modifikacije. Ovakav pristup se preporučuje kod problema gde je diskretan prostor dopustivih rešenja velikih dimenzija. Mana ovog pristupa je u povećanom vremenu rada

računara. Ponašanje heterogenih pčela u okviru leta unazad je isto kao i kod “običnih” pčela.

Preporuka je, da broj modifikacija rešenja u okviru jednog leta unapred (*NC*) uzima vrednost 1 ili 2. Sa više od dve modifikacije unutar jednog leta unapred postoji mogućnost previše spore konvergencije rešenja. Generalno, ideja modifikacije rešenja je da se vrše manje promene rešenja koja su se pokazala kao “dobra”, tragajući na taj način za još boljim. Ukoliko se vrši veći broj modifikacija rešenja unutar jednog leta unapred, rešenja koja su se pokazala kao dobra se previše menjaju.

Broj letova unapred (*NP*) i broj veštačkih pčela koje učestvuju u pretrazi (*B*) zavise od slučaja do slučaja i uglavnom su empirijskog karaktera. Dosadašnja iskustva pokazuju da je dobro da se prostor dopustivih rešenja na početku pretražuje sa manjim brojem pčela (10 do 15), a da se potom proba sa većim brojem pčela i istraže eventualna poboljšanja.

Broj letova unapred je parametar koji, takođe ima veze sa brzinom konvergencije rešenja, i preporuka je da se pčelama dodeli dovoljan broj pretraga kako bi istražile prostor dopustivih rešenja (15 do 20), kao i da se broj pretraga povećava i ispituju eventualna poboljšanja.

Broj iteracija (*IT*) često se dovodi u vezu sa kriterijumom zaustavljanja. U jednom slučaju se prestaje sa optimizacijom kada se dostigne unapred zadat broj iteracija, a u drugom kada posle određenog broja iteracije veštačke pčele nisu našle rešenje koje je bolje od do tada već poznatog. Treba napomenuti da je kriterijum zaustavljanja moguće vezati i za vreme. Drugim rečima, proces optimizacije prestaje kada se dostigne unapred zadato vreme rada računara.

Za probleme većih dimenzija broj pčela i broj letova unapred mogu uzimati i veće brojeve. Generalno, ne postoje tačno određene smernice određivanja vrednosti parametara pri optimizaciji, već istraživač mora pronaći kombinaciju koja odgovara datom problemu, a u skladu sa iskustvom koje ima u oblasti iz koje se rešava problem i u primeni BCO algoritma.

Više detalja oko analize parametra prilikom primene BCO algoritma moguće je naći u radu Jakšić i Davidović (2016).

## **4. UPRAVLJANJE RADOM IZOLOVANE SIGNALISANE RASKRSNICE**

Ovo poglavlje odnosi se na problem određivanja optimalne vrednosti ciklusa i raspodele zelenog vremena na faze izolovane signalisane raskrsnice. U okviru poglavlja predložena je matematička formulacija datog problema. Proračun optimalne vrednosti ciklusa i raspodele zelenih vremena bazira se na minimizaciji ukupnih prosečnih vremenskih gubitaka svih vozila, koja prolaze raskrsnicom, u toku određenog perioda analize. Razmatrana je izolovana signalisana raskrsnica u fiksnom režimu rada, kako u slučaju nezasićenih, tako i u slučaju prezasićenih saobraćajnih tokova.

Razvijen algoritam za rešavanje postavljenog problema, koji spada u grupu složenih problema kombinatorne optimizacije, zasnovan je na metaheurističkoj metodi optimizacija kolonijom pčela (BCO). Rezultati dobijeni ovom metodom pokazuju kompatibilnost sa drugim metodama koje su našle primenu u rešavanju ovog problema. Testiranja izvršena na brojnim primerima, pokazuju sposobnost razvijenog algoritma da generiše rešenja visokog kvaliteta uz razumno vreme rada računara.

U cilju pronalaženja optimalnog signalnog plana za izolovanu signalisanu raskrsnicu potrebno je odgovoriti na sledeća pitanja: (a) Koliki je broj faza? (b) Koliki je ciklus? (c) Koji deo raspoloživog zelenog vremena dodeliti svakoj od faza? Problem izbora signalnog plana na izolovanoj signalisanoj raskrsnici formulisan je u ovoj disertaciji na sledeći način: Za unapred zadati broj faza potrebno je odrediti ciklus i raspodelu zelenih vremena tako da se minimiziraju ukupni prosečni vremenski gubici svih vozila, koja prolaze raskrsnicom, u toku određenog perioda analize.

### **4.1. Matematička formulacija problema**

Radi bolje preglednosti, na ovom mestu u disertaciji, biće ponovljene neke od veličina koje su već definisane u poglavlju 2.1. Za potrebe matematičke formulacije ovog problema uvode se sledeće veličine:

$F$  - skup faza;

$K$  - skup svih saobraćajnih traka;



$i$  - indeks saobraćajne trake,  $i=1,2,\dots |K|$ ;  
 $j$  - indeks faze,  $j=1,2,\dots |F|$ ;  
 $q_i$  - saobraćajni tok u  $i$ -toj saobraćajnoj traci (voz/h);  
 $s_i$  - zasićeni tok u  $i$ -toj saobraćajnoj traci (voz/h);  
 $X_i$  - stepen zasićenja  $i$ -te saobraćajne trake;  
 $c_i$  - kapacitet  $i$ -te saobraćajne trake (voz/h);  
 $T$  - trajanje perioda analize (h);  
 $b$  - indeks perioda analize;  
 $Q_{bi}$  - inicijalni red vozila u  $i$ -toj saobraćajnoj traci na startu  $b$ -tog perioda analize (voz);  
 $t_i$  - vreme trajanja prezasićenosti (neopsluženih zahteva) u okviru vremena  $T$  u  $i$ -toj traci ili u  $i$ -toj grupi traka;  
 $u_i$  - parametar vremenskih gubitaka u  $i$ -toj traci ili u  $i$ -toj grupi traka;  
 $C$  - ciklus (s);  
 $C_{min}$  - minimalna vrednost ciklusa (s);  
 $C_{max}$  - maksimalna vrednost ciklusa (s);  
 $L$  - izgubljeno vreme tokom ciklusa (s);  
 $g_i$  - zeleno vreme dodeljeno  $i$ -toj saobraćajnoj traci (s);  
 $g_j$  - zeleno vreme dodeljeno  $j$ -toj fazi (s);  
 $g_{min}$  - minimalna vrednost zelenog vremena (s);  
 $g_{max}$  - maksimalna vrednost zelenog vremena (s);  
 $\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ako } i - \text{ta saobr. traka pripada } j - \text{toj fazi,} \\ 0 & \text{u suprotnom;} \end{cases}$   
 $Y_j$  - maksimalna vrednost svih odnosa  $q_i$  i  $s_i$  koje pripadaju  $j$ -toj fazi;  
 $D$  - ukupni prosečni vremenski gubici svih vozila, koja prolaze raskrsnicom, u toku trajanja određenog perioda analize (s/voz);  
 $d_i$  - prosečni vremenski gubici po vozilu u  $i$ -toj saobraćajnoj traci (s/voz);  
 $d_{1i}$  - ujednačeni vremenski gubici („uniform delay”) po vozilu u  $i$ -toj saobraćajnoj traci (s/voz);  
 $d_{2i}$  - postepeni vremenski gubici („incremental delay”) po vozilu u  $i$ -toj saobraćajnoj traci (s/voz);  
 $d_{3i}$  - vremenski gubici usled postojanja inicijalnog reda, po vozilu, u  $i$ -toj saobraćajnoj traci (s/voz);

$d_{li}^*$  - ujednačeni vremenski gubici („uniform delay”), u slučaju postojanja inicijalnog reda neopsluženih vozila u  $i$ -toj saobraćajnoj traci (s/voz).

#### 4.1.1. Matematička formulacija u slučaju nezasićenih saobraćajnih tokova

Nezasićeni saobraćajni tokovi podrazumevaju da u svim  $i$ -tim saobraćajnim trakama, koje su deo raskrsnice, vrednosti stepena zasićenja ne prelaze jedinicu:

$$X_i \leq 1, \quad \forall i \in K \quad (4.1)$$

U cilju određivanja optimalnog signalnog plana kome odgovaraju minimalni ukupni vremenski gubici svih vozila koja prolaze raskrsnicom u toku posmatranog perioda analize, potrebno je prethodno odrediti vrednost veličine prosečnih vremenskih gubitaka po vozilu u  $i$ -toj saobraćajnoj traci. Kao što je već pokazano u poglavlju 2.1.3., vremenski gubici su jednaki (HCM 2000):

$$d_i = d_{1i} + d_{2i} \quad (4.2)$$

gde su:

$$d_{1i} = \frac{0.5 \cdot C \cdot \left(1 - \frac{g_i}{C}\right)^2}{1 - \left[\min(1, X_i) \cdot \frac{g_i}{C}\right]} \quad (4.3)$$

$$d_{2i} = 900T \left[ (X_i - 1) + \sqrt{(X_i - 1)^2 + \frac{4 \cdot X_i}{c_i T}} \right] \quad (4.4)$$

Matematička formulacija problema upravljanja radom izolovane signalisane raskrsnice u slučaju nezasićenih saobraćajnih tokova glasi:

*Minimizirati*

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{|K|} q_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^{|K|} q_i} \quad (4.5)$$

pri ograničenjima:

$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \quad (4.6)$$

$$g_{\min} \leq g_j \leq g_{\max}, \quad \forall j \in F \quad (4.7)$$

$$\sum_{j=1}^{|F|} g_j = C - L \quad (4.8)$$

Kriterijumska funkcija (4.5), koju je potrebno minimizirati, predstavlja ukupne prosečne vremenske gubitke svih vozila koja prolaze raskrsnicom u toku određenog perioda vremena. Ograničenje (4.6) definiše interval u kome se nalazi vrednost ciklusa. Ograničenje (4.7) definiše interval u kome se nalaze zelena vremena dodeljena fazama. Odnos ciklusa, zelenih vremena faza i izgubljenog vremena tokom ciklusa definisan je ograničenjem (4.8).

#### 4.1.2. Matematička formulacija u slučaju prezasićenih saobraćajnih tokova

Prezasićeni saobraćajni tokovi podrazumevaju da bar u jednoj  $i$ -toj saobraćajnoj traci, koja je deo raskrsnice, vrednosti stepena zasićenja prelazi jedinicu:

$$\exists X_i > 1, \quad \forall i \in K \quad (4.9)$$

U cilju iznalaženja optimalnog signalnog plana, kome odgovaraju minimalni vremenski gubici svih vozila koja prolaze raskrsnicom u toku određenog perioda vremena, potrebno je odrediti vrednost veličine prosečnih vremenskih gubitaka po vozilu u  $i$ -toj saobraćajnoj traci. Kao što je već pokazano u poglavlju 2.1.3., ovi vremenski gubici su jednaki (HCM 2000):

$$d_i = d_{1i}^* + d_{2i} + d_{3i} \quad (4.10)$$

gde su:

$$d_{1i}^* = d_{si} \cdot \frac{t_i}{T} + d_{ui} \cdot \frac{(T - t_i)}{T} \quad (4.11)$$

gde su:

$d_{si}$  - zasićeni gubici ( $d_i$  za  $X = 1$ ),

$d_{ui}$  - nezasićeni gubici ( $d_i$  za konkretno  $X < 1$ ).

$$d_{si} = 0.5 \cdot C \cdot \left(1 - \frac{g_i}{C}\right) \quad (4.12)$$

$$d_{ui} = d_{li} \quad (4.13)$$

$$d_{3i} = \frac{1800 \cdot Q_{bi} \cdot (1 + u_i) \cdot t_i}{c_i \cdot T} \quad (4.14)$$

Uz ovu razliku, matematička formulacija u slučaju prezasićenih tokova je identična kao i u slučaju nezasićenih tokova (jed. 4.5 - jed. 4.8).

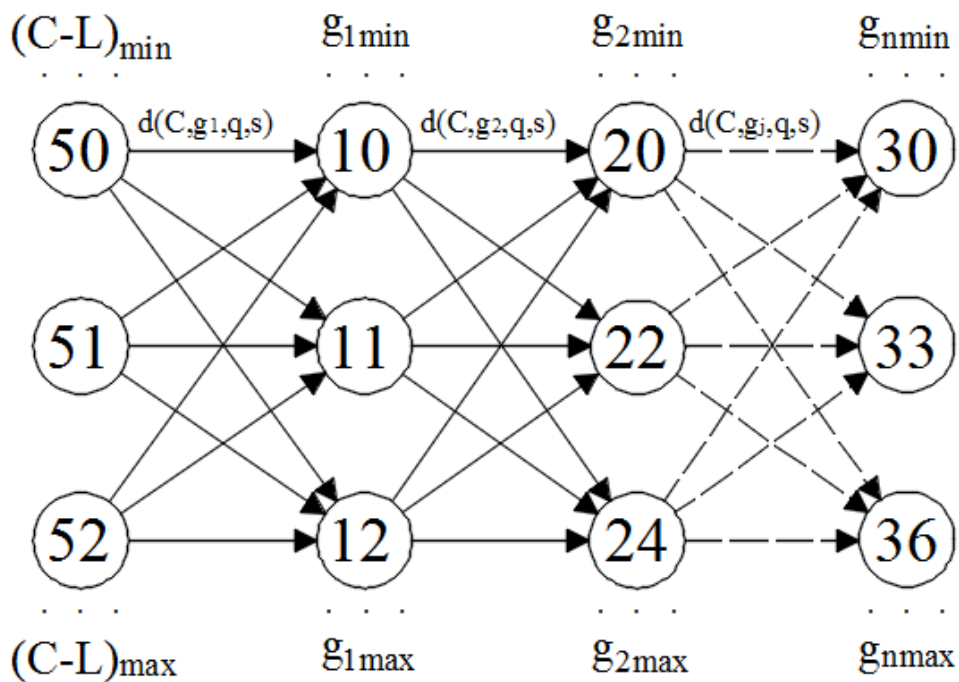
## **4.2. Optimizacioni i heuristički pristupi rešavanju problema upravljanja radom izolovane signalisane raskrsnice**

U okviru ovog dela disertacije biće predstavljene metode za rešavanje problema upravljanja saobraćajnim tokovima na izolovanoj signalisanoj raskrsnici. Problem upravljanja saobraćajnim tokovima na izolovanoj signalisanoj raskrsnici u ovoj disertaciji je prvo rešavan primenom tehnike dinamičkog programiranja. Dinamičko programiranje, koje spada u grupu optimizacionih tehnika, garantuje optimalna rešenja na osnovu definisane kriterijumske funkcije.

Sa porastom dimenzija razmatranog problema, tj. sa porastom broja faza, dinamičko programiranje ne omogućava iznalaženje optimalnog rešenja u okviru prihvatljivog vremena rada računara. Zbog nemogućnosti dinamičkog programiranja da efikasno rešava problem upravljanja saobraćajnim tokovima na izolovanoj signalisanoj raskrsnici pristupilo se razvoju algoritma zasnovanog na metaheurističkoj metodi optimizacija kolonijom pčela. Rešenja dobijena primenom dinamičkog programiranja i optimizacije kolonijom pčela poređeni su sa rešenjima koje generiše komercijalni softver HCS Signals.

#### 4.2.1. Rešavanje problema upravljanja saobraćajnim tokovima na izolovanoj signalisanoj raskrsnici primenom dinamičkog programiranja

U okviru dinamičkog programiranja, razmatrani problem se razlaže na više manjih, računarski jednostavnijih, podproblema. Dinamičko programiranje razlaže problem u veći broj etapa. U okviru svake etape postoji samo jedna promenljiva. Suština koncepta dinamičkog programiranja se najlakše prikazuje uz pomoć odgovarajuće mreže. Mreža koja se odnosi na problem upravljanja saobraćajnim tokovima na izolovanoj signalisanoj raskrsnici prikazana je na slici 4.1.



Slika 4.1. Mreža dinamičkog programiranja

Etape u mrežnom modelu prikazanom na slici 4.1 predstavljaju faze signalnog plana izolovane raskrsnice. Uvedimo u razmatranje sledeće veličine:

- $g_1$  - zeleno vreme dodeljeno prvoj fazi,
- $g_2$  - zeleno vreme dodeljeno prvoj i drugoj fazi i
- $g_n$  - zeleno vreme dodeljeno prvoj, drugoj, ... i  $n$ -toj fazi.

Vrednosti minimalnog i maksimalnog zelenog vremena koje može biti dodeljno bilo kojoj fazi signalnog plana su nam poznate. Samim tim, poznati su nam i intervali u kojima mogu da se nalaze vrednosti zelenih vremena koje treba dodeliti pojedinim fazama

signalnog plana. Moguće vrednosti veličina  $g_1, g_2, \dots, g_n$  su prikazane čvorovima u okviru pojedinih etapa. Mreži pripadaju samo one grane koje spajaju kompatibilne čvorove. Kompatibilni su oni čvorovi za koje je suma zelenih vremena jednaka vrednosti odgovarajućeg ciklusa umanjenog za vrednost izgubljenog vremena tokom tog ciklusa (L). Drugim rečima, kompatibilnost čvorova i postojanje grana koje ih povezuju uslovljeni su zadovoljavanjem ograničenja (4.6). Dužine pojedinih grana koje povezuju čvorove koji pripadaju susednim etapama predstavljaju vrednosti vremenskih gubitaka vozila koji su posledica izvršene alokacije zelenih vremena. Pronalaženje najkraćeg puta kroz ovako formiranu mrežu daje optimalno rešenje razmatranog problema.

Neefikasnost ovog algoritma, kod primene na većem broju faza, ogleda se u vremenu rada računara. Algoritam relativno brzo uspeva da pronađe najkraći put kroz mrežu, dok dosta vremena potroši na formiranje mreže dinamičkog programiranja. Na primer, u slučaju kada se algoritam primenjuje na problem upravljanja raskrslanicom u uslovima prezasićenih tokova sa pet faza, (poglavlja 4.3.2. i 4.3.3.) ni posle 8 sati rada računar nije uspeo da formira mrežu dinamičkog programiranja.

#### **4.2.2. Primena optimizacije kolonijom pčela**

Primenu metoda inteligencije grupe, pre svega veštačke kolonije mrava, na upavljanje saobraćajnim tokovima moguće je naći u radovima čiji su autori Yang i ostali 2009; Putha i Quadrioglio 2010; Renfrew i Yu 2009 i Renfrew i Yu 2012. Navedeni radovi pokazuju mogućnost primene metoda inspirisanih grupnom inteligencijom socijalnih insekata na probleme kojima se bavi ova disertacija.

U okviru ove disertacije predložen je BCO algoritam za rešavanje problema upravljanja izolovanom signalisanom raskrslanicom. Predložen BCO algoritam baziran je na konceptu poboljšanja („improvement concept”), koji je detaljnije objašnjen u 3. poglavlju disertacije. U prvom koraku generisan je inicijalni signalni plan. Posle toga, veštački agenti (pčele) pretražuju prostor dopustivih rešenja, tragajući za boljim rešenjem od već postojećeg. Prostor pretrage svakog veštačkog agenta nalazi se u relativnoj blizini rešenja koje mu je već poznato. Modifikacija rešenja je izvedena kroz *NP* letova unapred tokom svake iteracije. Pretpostavka je, da se na početku svake iteracije svi veštački agenti nalaze u košnici, koja predstavlja polaznu veštačku lokaciju.

## Generisanje inicijalnog rešenja

Određimo inicijalno rešenje tako što ćemo prvo definisati inicijalnu vrednost ciklusa. Inicijalnu vrednost ciklusa ćemo izabrati na slučajan način iz opsega dopustivih vrednosti koji je unapred određen. U sledećem koraku, od ove vrednosti potrebno je oduzeti izgubljeno vreme tokom ciklusa ( $L$ ), a preostalo vreme rasporediti na faze. Preostalo vreme raspoređićemo na faze proporcijalno prema vrednostima veličina  $Y_j$  koje su jednake:

$$Y_j = \max_i \alpha_{ij} \cdot \frac{q_i}{s_i}, \quad \forall j \in F \quad (4.15)$$

Na primer, ukoliko je potrebno raspodeliti 50 s na tri faze, za koje je ustanovljeno da imaju sledeće vrednosti  $Y_j$ : 0.4, 0.2 i 0.8, respektivno, prva faza bi dobila:  $\frac{0.4}{0.4+0.2+0.8} \cdot 50$  sekundi. Na taj način, faze bi dobile 14 s, 7 s i 29 s, respektivno.

Rešenje generisano na ovaj način predstavlja inicijalno rešenje na početku svake iteracije, koje će potom biti modifikovano.

## Modifikacija rešenja

Algoritam za modifikaciju inicijalnog rešenja sastoji se iz sledećih koraka:

---

### **Modifikacija inicijalnog rešenja**

---

1. *Generisati inicijalno rešenje. Sa  $C$  se označava vrednost ciklusa postignuta u inicijalnom rešenju.*
2. *Izabrati na slučajan način novu vrednost ciklusa  $C_n$  iz dopustivog intervala:  $C_{\min} \leq C_n \leq C_{\max}$ .*
3. *Proračunati:  $\Delta C = C_n - C$ .*

*Ako je  $\Delta C > 0$ , (nova vrednost ciklusa  $C_n$  je veća od inicijalne vrednosti  $C$ ) dodati dodatne  $\Delta C$  sekunde zelenog vremena fazama pomoću generatora slučajnih brojeva i formule (4.16).*

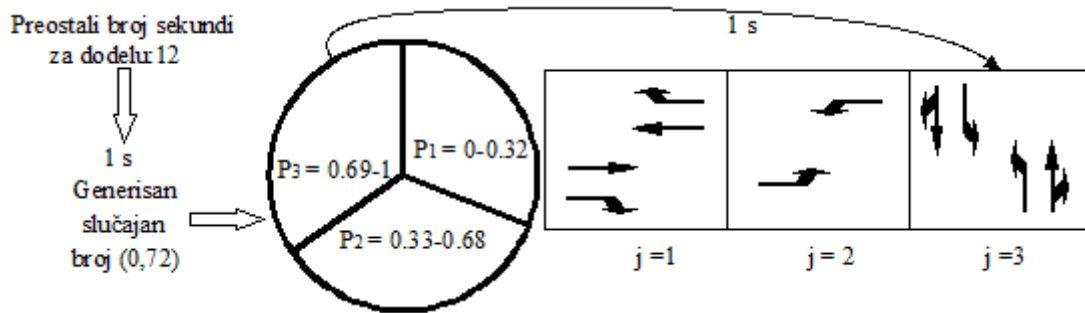
*Ako je  $\Delta C < 0$ , (nova vrednost ciklusa  $C_n$  je manja od inicijalne vrednosti  $C$ ) oduzeti  $\Delta C$  sekunde zelenog vremena fazama pomoću generatora slučajnih brojeva i formule (4.17).*

*Ako je  $\Delta C = 0$ , nema nikakve promene.*

---

Verovatnoća dodele  $\Delta C$  sekundi  $j$ -toj fazi ( $P_j$ ) jednaka je (Slika 4.2.):

$$P_j = \frac{Y_j}{\sum_{j=1}^{|F|} Y_j}, \quad j \in F \quad (4.16)$$

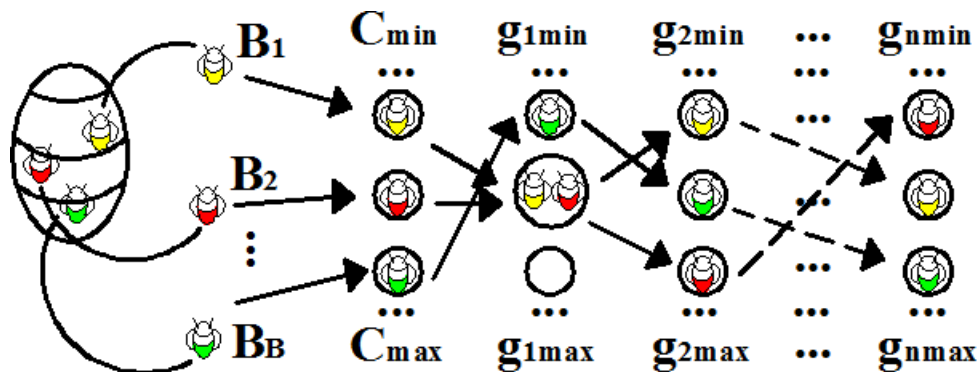


Slika 4.2. Modifikacija rešenja u slučaju kada je  $\Delta C > 0$

Verovatnoća oduzimanja  $\Delta C$  sekundi  $j$ -toj fazi ( $Q_j$ ) jednaka je:

$$Q_j = 1 - P_j, \quad j \in F \quad (4.17)$$

Rešenja generisana od strane veštačkih agenata (pčela) posle modifikacije predstavljena su na slici 4.3.



Slika 4.3. Rešenja koje su generisali veštački agenti posle izvršene jedne od modifikacija

Mehanizam poređenja generisanih rešenja i proces regrutovanja se vrše na isti način kao što je prikazano u trećem poglavlju disertacije.



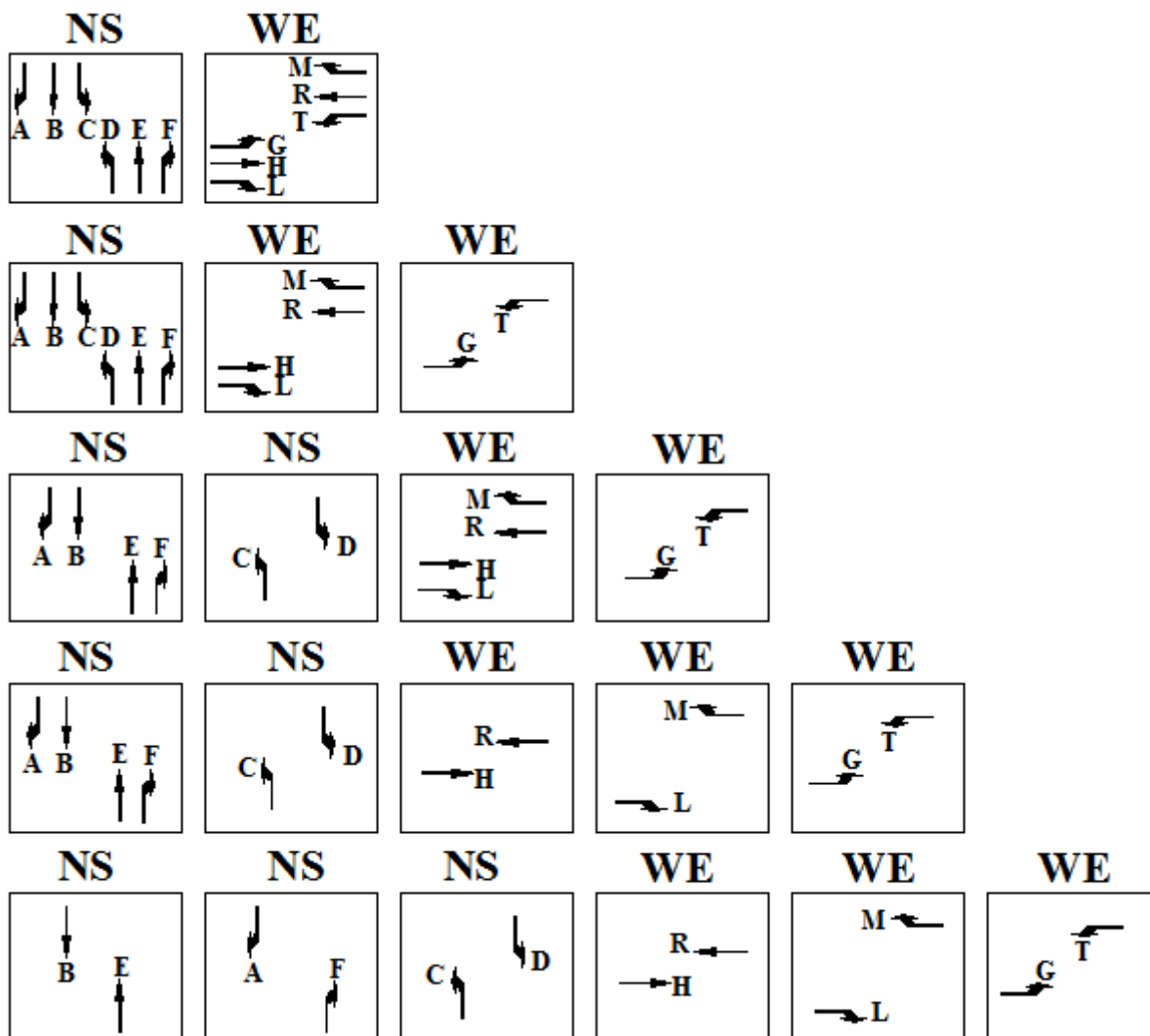
Krajnji rezultat modela upravljanja izolovanom signalisanom raskrslanicom predstavlja softver. Softver je programiran u programskom jeziku „Java”. Korisnik softvera neće morati unapred da zna da li su na raskrslanici nezasićeni ili prezasićeni saobraćajni tokovi. Na osnovu unetih ulaznih veličina (broj faza, raspored saobraćajnih traka po fazama, saobraćajni tokovi po trakama, zasićene vrednosti saobraćajnih tokova i izgubljeno vreme tokom ciklusa) softver vrši optimizaciju signalnog plana (vrednost ciklusa i raspodelu zelenog vremena po fazama).

Signalni plan može biti definisan tako da u nekim saobraćajnim trakama vladaju uslovi nezasićenosti, dok u drugim trakama vladaju uslovi prezasićenosti (što i jeste čest slučaj). Softver sam bira kriterijumsku funkciju čiju optimizaciju vrši. Drugim rečima, softver ima sposobnost da u jednoj traci vrši optimizaciju po jednoj kriterijumskoj funkciji, a u drugoj traci po drugoj kriterijumskoj funkciji, sve u zavisnosti od uslova zasićenosti koji vladaju. Naravno, zasićenost ili prezasićenost trake se menja od modifikacije do modifikacije rešenja koju vrše veštački agenti.

### **4.3. Numerički primeri**

U okviru razvijenog BCO algoritma postavljene su sledeće vrednosti parametara optimizacije:  $B = 15$ ,  $NP = 15$ ,  $NC = 1$ . Kriterijum zaustavljanja je definisan tako da se proces pretraživanja završi kada se posle određenog broja iteracija ( $IT$ ) ne postigne bolje rešenje od već poznatog. Ove vrednosti su zasnovane na stečenom iskustvu autora disertacije u primeni BCO algoritma.

U okviru ove disertacije nije izvršena optimizacija broja faza. Drugim rečima, donosilac odluke sam bira, kao ulazni podatak, sa koliko faza želi da upravlja raskrslanicom. Analizirani su slučajevi kada se raskrslanicom upravlja sa 2, 3, 4, 5, ili 6 faza. Ovakav način analize primenjen je u sva tri scenarija. Mogući broj faza, i raspodela tokova na faze, za sva ti scenarija optimizacije, prikazani su na slici 4.4.



Slika 4.4. Broj faza i raspodela traka po fazama za test raskrnicu

Predloženi BCO pristup je testiran u slučaju tri moguća scenarija. Prvi scenario podrazumeva jedan period analize i nezasićene tokove. Drugi scenario podrazumeva dva perioda analize, pri čemu su tokovi vozila veći u prvom periodu u odnosu na drugi period. Treći scenario podrazumeva dva perioda analize, pri čemu su tokovi vozila veći u drugom period u odnosu na prvi period.

Izgubljeno vreme tokom ciklusa  $L$  (u sekundama) zavisi od izabranog broja faza. U tabeli 4.1. prikazane su vrednosti gubitaka tokom ciklusa koje su usvojene kao ulazne veličine u procesu optimizacije.

Tabela 4.1. Izgubljeno vreme tokom ciklusa

Broj faza	Izgubljeno vreme tokom ciklusa $L$ (u sekundama)
2	10
3	12
4	14
5	16
6	18

Minimalna dozvoljena vrednost ciklusa  $C_{min}$  i maksimalana dozvoljena vrednost ciklusa  $C_{max}$  iznose 30 sekundi i 120 sekundi, respektivno. Minimalna vrednost zelenog vremena  $g_{min}$  i maksimalna vrednost zelenog vremena  $g_{max}$  iznose 7 sekundi i 80 sekundi, respektivno.

Rezultati dobijeni pomoću predloženog BCO pristupa upoređeni su sa optimalnim rezultatima (dobijenim pomoću dinamičkog programiranja), i sa rezultatima koje je predložio komercijalni softver „HCS-Signals”.

Komercijalni paket „HCS-Signals” je baziran na genetskim algoritmima (GA). Prilikom optimizacije korišćeni su sledeći GA parameteri:

- Verovatnoća ukrštanja (Crossover probability) - 30 %;
- Verovatnoća mutacije (Mutation probability) - 4 %;
- Prag zaustavljanja (Convergence threshold) - 0.01 %;
- Veličina populacije (Population size) - 10 i
- Maksimalni broj generacija (The maximum number of generations) - 10, 20 i 30.

#### 4.3.1. Test scenario 1

Zasićeni tokovi zavise od broja faza kojima se upravlja raskrslanicom. U tabeli 4.2. prikazane su vrednosti zasićenih tokova koje su korišćene pri optimizaciji. Saobraćajni tokovi (voz/h), za test raskrslanicu, su prikazani na slici 4.5. Period analize je  $T=1h$ .

Tabela 4.2. Vrednosti zasićenih tokova za scenario 1

Broj faza	Zasićeni tok saobraćajne trake (voz/h)											
	A	B	C	D	E	F	G	H	L	M	R	T
2	1500	1600	1348	1289	1600	1500	1348	1600	1500	1500	1600	1318
3	1500	1600	1348	1289	1600	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
4	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
5	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
6	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500

Zasićeni saobraćajni tokovi se mogu eksperimentalno utvrditi i pomoću sledeće formule: (HCM 2000)

$$s_i = \frac{3600}{h} \quad (4.18)$$

gde su:

$s_i$  - zasićeni saobraćajni tok  $i$ -te saobraćajne trake (voz/h/tr) i

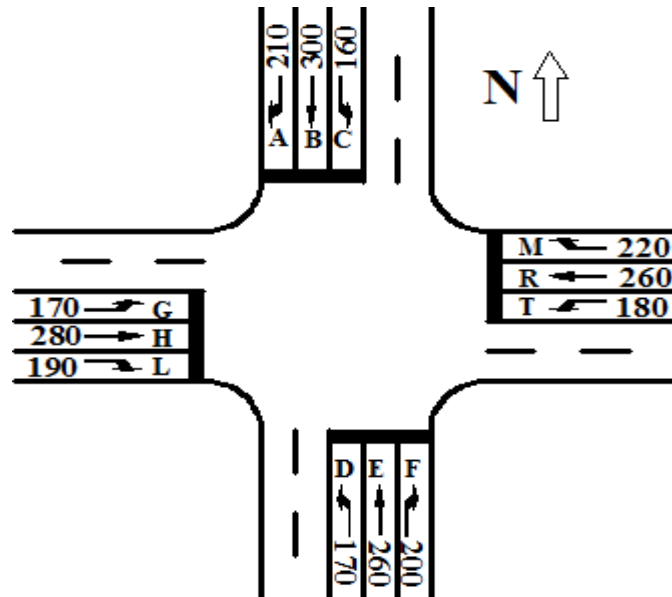
$h$  - prosečan interval sleđenja (headway).

Interval sleđenja je jednak vremenu koje protekne između trenutka kada vozilo prednjim točkovima pređe preko poprečnog preseka saobraćajne trake, do trenutka kada vozilo iza njega prednjim točkovima pređe preko istog poprečnog preseka saobraćajne trake.

HCM usvaja vrednost za  $h$  od 1.89 s, u slučaju kada je predviđeno 1900 voz/h/traci za idealnu (baznu) vrednost zasićenog saobraćajnog toka. Predložena vrednost za  $h$  se ne mora uvek uzimati kao konstantna. Istaživanje koje je sprovedeno u gradu Doha (Katar) pokazalo je ova vrednost na njihovoj uličnoj mreži iznosi 1.55 s, što daje idealnu vrednost zasićenog toka od 2323 voz/h/traci (Hamad i Abuhamda 2015).

Istraživanja na uličnoj mreži Beograda dala su idealne vrednosti zasićenog toka za trake pravo od 2169 voz/h/traci na raskrsnici “Ušće” i 2209 voz/h/traci na raskrsnici “Hajat” (Stanić i ostali 2011).

Zasićena vrednost toka pravo je veća ukoliko se on ne opslužuje zajedno sa levim skretanjima iz suprotnog smera. Za ovakve tokove usvojena je vrednost za  $h$  od 1.69 s, što daje idealnu vrednost zasićenog toka od 2120 voz/h/traci. Iz tog razloga u tabeli 4.2. se mogu naći i veće vrednosti od onih koje su preporučene u HCM 2000. Ovo važi i za sva dalja testiranja koja su izvršena u ovom poglavlju.



Slika 4.5. Test raskrsnica za scenario 1

Rezultati komparacije pomenutih metoda, za test scenario 1, dati su u tabeli 4.3. Prva kolona tabele 4.3. sadrži nazive primenjenih metoda optimizacije. Rezultati su predstavljeni na sledeći način:  $C, g_1, g_2, \dots, g_n$ . Na primer, rešenje 40, 12, 9, 7 predstavlja slučaj kada je vrednost ciklusa jednaka 40 sekundi. U ovom slučaju raskrsnicom se upravlja pomoću 3 faze. Zelena vremena faza su 12 sekundi, 9 sekundi i 7 sekundi, respektivno.

U slučaju upravljanja raskrsnicom sa 6 faza dinamičko programiranje nije uspelo da, u okviru razumnog vremena rada računara, postigne optimalno rešenje. Iz tog razloga, odgovarajuća ćelija u tabeli 4.3. je prazna.

Tabela 4.3. Komparacija primenjenih metoda na test scenariju 1

Broj faza		2	3	4	5	6
<i>DP</i>	Optimum funkcije cilja (s/voz)	10.85	19.15	30.83	54.20	-
	CPU vreme (s)	2	54	1985	29120	
	Optimalno rešenje	30,10,10	39,11,9,7	53,11,8,11,9	81,15,11,13,14,12	
<i>BCO</i>	Vrednost funkcije cilja (s/voz)	10.85	19.15	30.83	54.20	104.50
	CPU vreme (s)	2	2	32	43	51
	Kriterijum zaustavljanja (Iteracija)	1000	1000	5000	10000	10000
	Najbolje dobijeno rešenje	30,10,10	39,11,9,7	53,11,8,11,9	81,15,11,13,14,12	120,18,18,15,17,18,16
	Greška (%)	0	0	0	0	-
<i>HCS</i>	Vrednost funkcije cilja (s/voz)	10.85	19.15	31.06	57.53	114.03
	CPU vreme (s)	48	48	98	144	182
	Kriterijum zaustavljanja (Br. generacija)	10	10	20	30	30
	Najbolje dobijeno rešenje	30,10,10	39,11,9,7	51,10,8,11,8	82,14,12,15,13,12	110,17,15,13,17,16,14
	Greška (%)	0	0	0.74	5.77	-

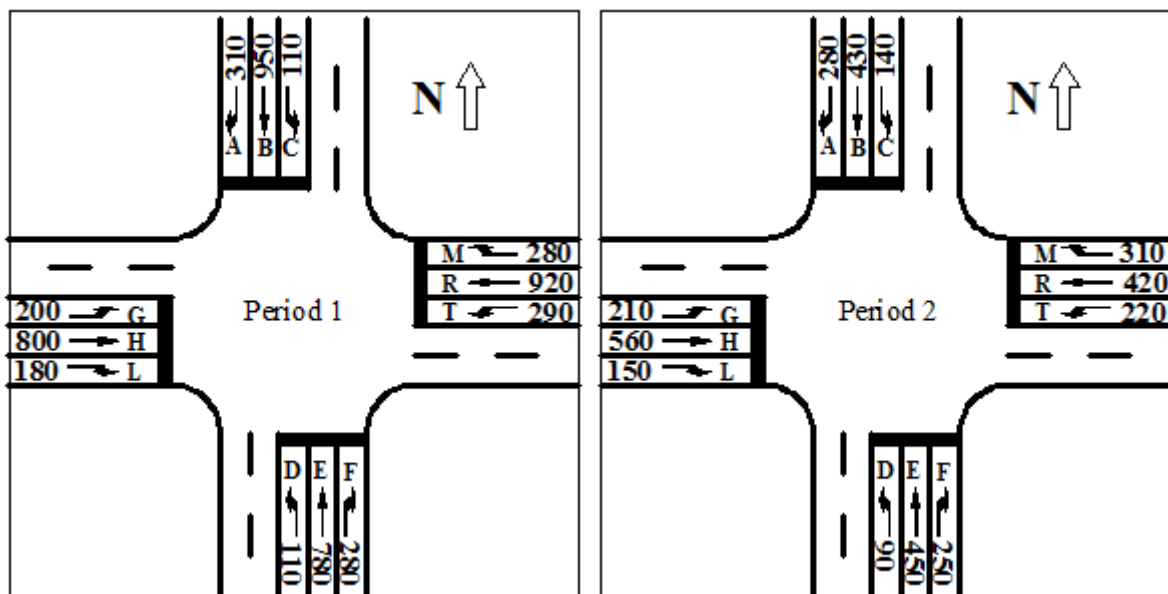
Prikazani numerički eksperiment pokazuje da je BCO pristup uspeo da postigne optimalna rešenja u slučaju kada se raskrslanicom upravlja sa 2, 3, 4, i 5 faza. BCO pristup se pokazao kao jednak ili bolji u odnosu na HCS-Signals u svim razmatranim slučajevima. Takođe, BCO pristup je postigao manje vreme rada računara u odnosu na ono koje je potrebno softveru HCS-Signals.

#### 4.3.2. Test scenario 2

Tabela 4.4. prikazuje vrednosti zasićenih tokova koje su korišćene u proračunu. Saobraćajni tokovi, za test raskrslanicu, su prikazani na slici 4.6. Ovaj scenario je napravljen tako da su saobraćajni tokovi u drugom periodu analize manji u odnosu na tokove u prvom periodu analize. Periodi analize su  $T=1h$ .

Tabela 4.4. Zasićeni tokovi po trakama za test scenario 2

Broj faza	Zasićeni tokovi za period analize b=1 (voz/h)											
	A	B	C	D	E	F	G	H	L	M	R	T
2	1500	1600	751	620	1600	1500	641	1600	1500	1500	1600	734
3	1500	1600	751	620	1600	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
4	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
5	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
6	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
Broj faza	Zasićeni tokovi za period analize b=2 (voz/h)											
	A	B	C	D	E	F	G	H	L	M	R	T
2	1500	1600	1089	1114	1600	1500	1127	1600	1500	1500	1600	963
3	1500	1600	1089	1114	1600	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
4	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
5	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
6	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500



Slika 4.6. Test raskrsnica za scenario 2

Rezultati komparacije predloženih metoda su sumirani u tabeli 4.5. za period analize  $b=1$ , dok su za period analize  $b=2$  rezultati sumirani u tabeli 4.6.

Kolona  $Q_b/Q_{b+1}$  u tabeli 4.5. predstavlja odnos inicijalnog reda vozila na početku perioda analize  $b=1$  i na početku perioda analize  $b+1$ . U suštini,  $Q_{b+1}$  je onaj broj vozila koji se javlja na kraju perioda analize  $b=1$ . Iz tog razloga, ona vrednost koja u tabeli 4.5. predstavlja  $Q_{b+1}$ , je ista ona koja u tabeli 4.6. predstavlja  $Q_b$ . Pretpostavlja se da na kraju nekog prethodnog perioda analize  $b-1$  nije bilo inicijalnih redova.

Tabela 4.5. Komparacija primenjenih metoda na test scenariju 2: Period analize  $b=1$

Broj faza		2	3	4	5	6
DP	Optimum funkcije cilja (s/voz)	264.86	379.50	344.99	-	-
	CPU vreme (s)	2	112	3218		
	Optimalno rešenje	120;55,55	120;51,42,1 5	120;42, 7,42,15		
	$Q_b / Q_{b+1}$	0 / 518	0 / 720	0 / 640		
BCO	Vrednost funkcije cilja (s/voz)	264.86	379.50	344.99	709.00	1272.48
	CPU vreme (s)	2	5	75	113	125
	Kriterijum zaustavljanja (Iteracija)	1000	1000	5000	10000	10000
	Najbolje dobijeno rešenje	120;55,55	120;51,42,1 5	120;42, 7,42,15	120;37,7,36, 12,12	120;31,12,7, 31,10,11
	$Q_b / Q_{b+1}$	0 / 518	0 / 720	0 / 640	0 / 1264	0 / 2016
	Greška (%)	0	0	0	-	-
HCS	Vrednost funkcije cilja (s/voz)	264.86	379.50	349.77	719.20	1289.60
	CPU vreme (s)	54	54	120	150	180
	Kriterijum zaustavljanja (Br. generacija)	10	10	20	30	30
	Najbolje dobijeno rešenje	120;55,55	120;51,42,1 5	117;41, 7,41,14	118;37,7,35, 12,11	119;33,12,7, 28,10,11
	$Q_b / Q_{b+1}$	0 / 518	0 / 720	0 / 650	0 / 1268	0 / 2028
	Greška (%)	0	0	1.37	-	-



Tabela 4.6. Komparacija primenjenih metoda na test scenariju 2: Period analize  $b=2$

Broj faza		2	3	4	5	6
DP	Optimum funkcije cilja (s/voz)	120.72	290.75	280.11	-	-
	CPU vreme (s)	2	98	3080		
	Optimalno rešenje	120;55,55	120;49,37,22	120;35,12,37,22		
	$Q_b / Q_{b+1}$	518 / 0	720 / 94	640 / 79		
BCO	Vrednost funkcije cilja (s/voz)	120.72	290.75	280.11	1235.08	2795.44
	CPU vreme (s)	2	5	70	103	125
	Kriterijum zaustavljanja (Iteracija)	1000	1000	5000	10000	10000
	Najbolje dobijeno rešenje	120;55,55	120;49,37,22	120;35,12,37,22	120;30,8,33,17,16	120;24,16,7,27,15,13
	$Q_b / Q_{b+1}$	518 / 0	720 / 94	640 / 79	1264 / 1025	2016 / 2448
	Greška (%)	0	0	0	-	-
HCS	Vrednost funkcije cilja (s/voz)	120.72	290.75	288.84	1270.60	2819.27
	CPU vreme (s)	56	56	130	160	190
	Kriterijum zaustavljanja (Br. generacija)	10	10	20	30	30
	Najbolje dobijeno rešenje	120;55,55	120;49,37,22	117;34,11,36,22	116;26,7,34,16,17	118;23,16,7,27,15,12
	$Q_b / Q_{b+1}$	518 / 0	720 / 94	650 / 89	1268 / 1050	2028 / 2470
	Greška (%)	0	0	3.12	-	-

Prikazani numerički eksperiment pokazuje da je BCO pristup uspeo da postigne optimalna rešenja u slučaju kada se raskrsnicom upravlja sa 2, 3 i 4 faze. BCO pristup se pokazao kao jednak ili bolji u odnosu na HCS-Signals u svim razmatranim slučajevima. Takođe, BCO pristup je postigao manje vreme rada računara u odnosu na ono koje je potrebno softveru HCS-Signals.

### 4.3.3. Test scenario 3

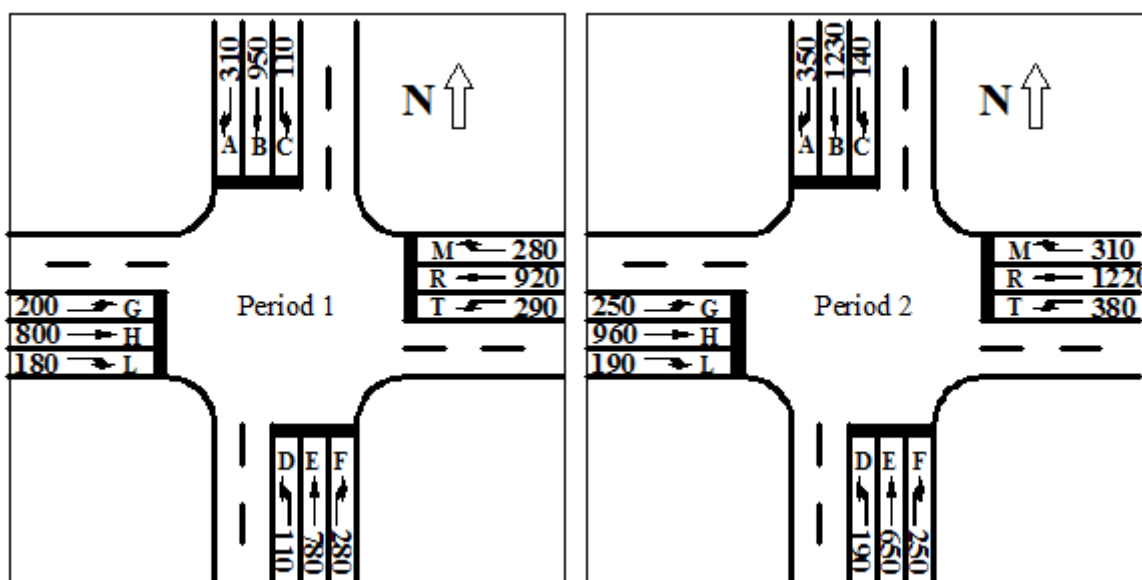
U tabeli 4.7. prikazane su vrednosti zasićenih tokova koje su korišćene u proračunu. Saobraćajni tokovi, za test raskrsnicu, su prikazani na slici 4.7. Ovaj scenario

je napravljen tako da su saobraćajni tokovi u drugom periodu analize veći u odnosu na tokove u prvom periodu analize. Periodi analize su  $T=1h$ . Rezultati komparacije predloženih metoda su sumirani u tabeli 4.8. za period analize  $b=2$ .

Ovaj scenario predstavlja najzahtevniji slučaj za upravljanje iz razloga što se u većem broju traka javljaju stanja prezasićenosti, kao i zbog činjenice da je računaru potrebno više vremena da obavi sve potrebne proračune.

Tabela 4.7. Zasićeni tokovi po trakama za test scenario 3

Broj faza	Zasićeni tokovi za period analize $b=2$ (voz/h)											
	A	B	C	D	E	F	G	H	L	M	R	T
2	1500	1600	870	451	1600	1500	456	1600	1500	1500	1600	613
3	1500	1600	870	451	1600	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
4	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
5	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
6	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500



Slika 4.7. Test raskrsnica za scenario 3

Tabela 4.8. Komparacija primenjenih metoda na test scenariju 3: Period analize  $b=2$

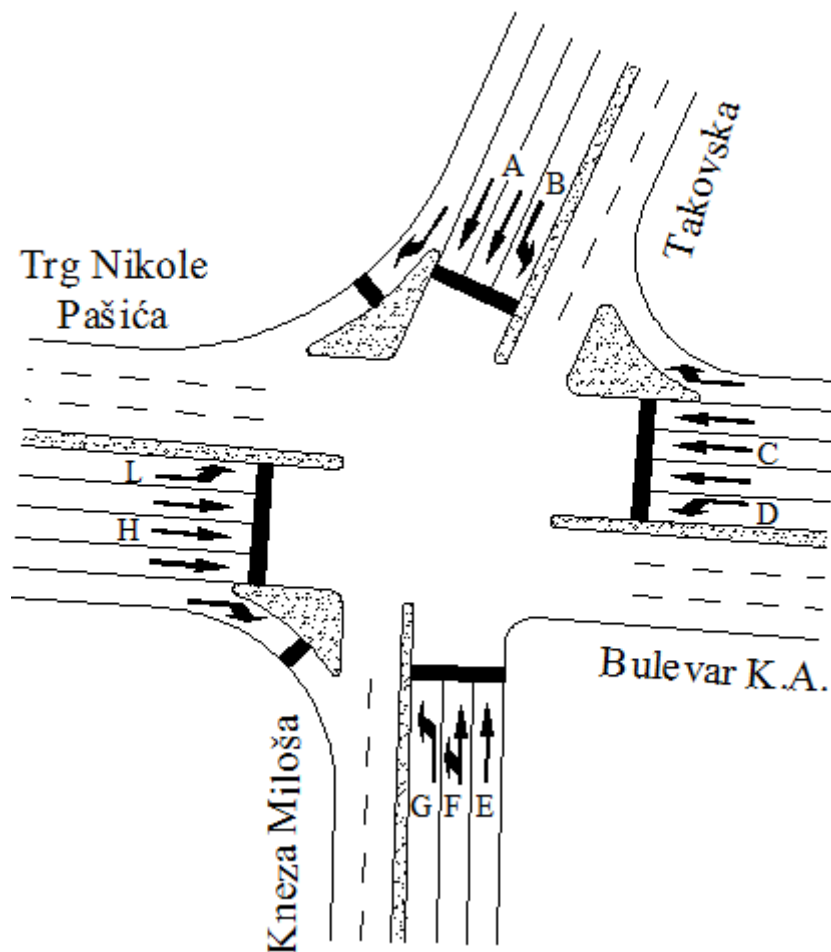
Broj faza		2	3	4	5	6
DP	Optimum funkcije cilja (s/voz)	1104.74	1477.23	1421.52	-	-
	CPU vreme (s)	2	189	3792		
	Optimalno rešenje	120;51,59	120;48,44, 16	120;39,8, 43,16		
	$Q_b / Q_{b+1}$	518 / 1749	720 / 2186	640 / 2163		
BCO	Vrednost funkcije cilja (s/voz)	1104.74	1477.23	1421.52	2602.97	4317.82
	CPU vreme (s)	2	15	153	194	201
	Kriterijum zaustavljanja (Iteracija)	1000	1000	5000	10000	10000
	Najbolje dobijeno rešenje	120;51,59	120;48,44, 16	120;39,8, 43,16	120;34,7, 38,11,14	120;29,12,7, 32,10,12
	$Q_b / Q_{b+1}$	518 / 1749	720 / 2186	640 / 2163	1264 / 3440	2016 / 4956
	Greška (%)	0	0	0	-	-
HCS	Vrednost funkcije cilja (s/voz)	1104.74	1477.23	1436.82	2632.06	4370.40
	CPU vreme (s)	60	60	140	170	200
	Kriterijum zaustavljanja (Br. generacija)	10	10	20	30	30
	Najbolje dobijeno rešenje	120;51,59	120;48,44, 16	119;39,8, 41,17	117;32,7, 37,12,13	117;27,12,7, 34,9,10
	$Q_b / Q_{b+1}$	518 / 1749	720 / 2186	650 / 2198	1268 / 3466	2028 / 4946
	Greška (%)	0	0	1.08	-	-

Kod testiranja u ovom scenariju period analize  $b=1$  se u potpunosti, sa svim ulaznim i izlaznim podacima, poklapa sa periodom analize  $b=1$  u test scenariju 2. Iz tog razloga su ulazni podaci i rezultati prikazani samo za period analize  $b=2$ .

Prikazani numerički eksperiment pokazuje da je BCO pristup uspeo da postigne optimalna rešenja u slučaju kada se raskrsnicom upravlja sa 2, 3 i 4 faze. BCO pristup se pokazao kao jednak ili bolji u odnosu na HCS-Signals u svim razmatranim slučajevima. Takođe, BCO pristup je postigao manje vreme rada računara u odnosu na ono koje je potrebno softveru HCS-Signals.

#### 4.3.4. Testiranje modela na primeru realne raskrsnice

Model, predložen u okviru ove disertacije, za upravljanje radom izolovane signalisane raskrsnice testiran je i na realnom primeru. Kao test primer uzeta je jedna opeterećena i sa upravljačkog aspekta kompleksna raskrsnica u Beogradu: Kneza Miloša - Bulevar Kralja Aleksandra - Takovska. Izgled raskrsnice, broj saobraćajnih traka i njihove oznake (velikim abecednim slovima) dati su na slici 4.8. Saobraćajne trake iste namene su označene jednom oznakom.



Slika 4.8. Test raskrsnica: Kneza Miloša - Bulevar K. A. – Takovska

Raskrsnica nema pun režim rada. Dozvoljena su kretanja u svim smerovima, osim desnog skretanja iz ulice Kneza Miloša ka Bulevaru Kralja Aleksandra.

Podaci o saobraćajnim tokovima dobijeni su sa “Katedre za planiranje i regulisanje saobraćaja”, Saobraćajnog fakulteta u Beogradu. Proračun zasićenih tokova

je urađen prema metodi HCM 2000 (poglavlje 2.1.1.) uzimajući sve merodavne redukcione faktore u obzir.

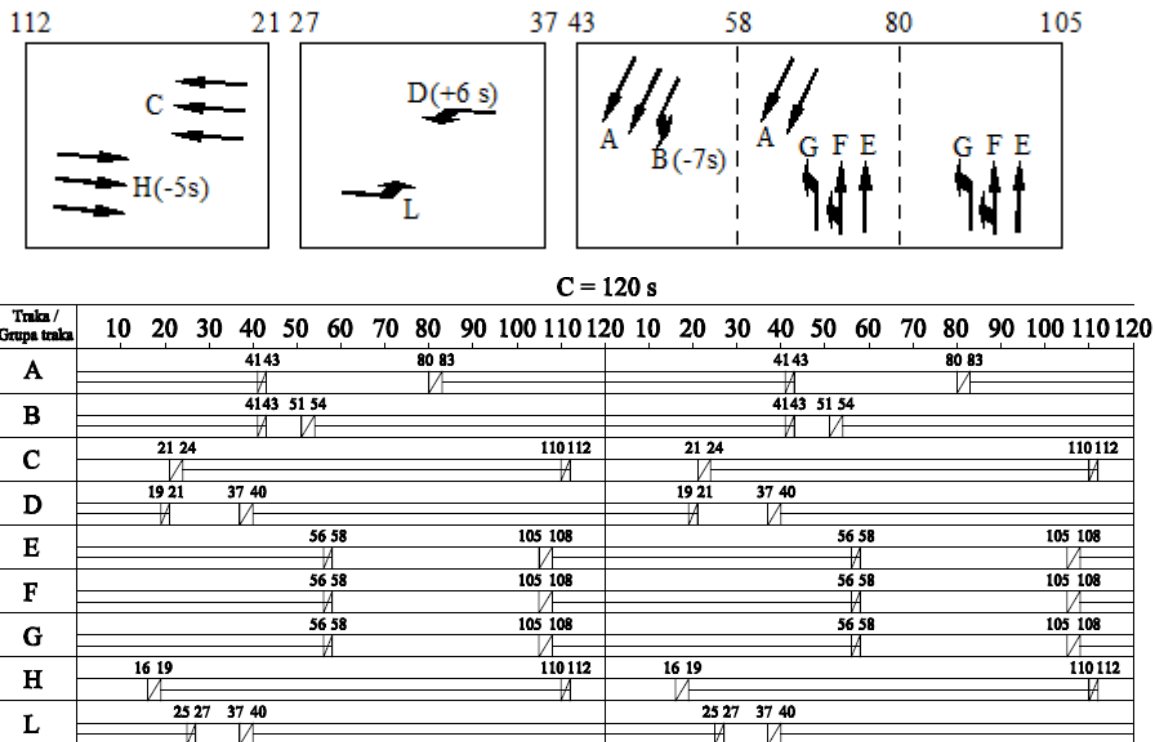
Testiranje je urađeno u dva perioda analize. Trajanje perioda analize je  $T = 1h$ . Prvi period analize ( $b=1$ ) je najopterećeniji period rada raskrsnice prema raspoloživim podacima. Pretpostavljeno je da pre tog perioda na raskrsnici nema neopsluženih vozila, odnosno da je  $Q_b = 0$  za sve trake na raskrsnici. Drugi period analize ( $b=2$ ) je prvi sledeći sat posle prvog perioda. Pretpostavka je da su ova dva perioda analize u istom režimu rada raskrsnice, u nekom od vršnih perioda stacionarnosti. Vrednosti protoka i zasićenih tokova po trakama, za oba perioda analize, dati su u tabeli 4.9.

Kriterijumska funkcija prilikom optimizacije rada razmatrane raskrsnice predstavlja ukupne prosečne vremenske gubitke svih vozila koja prolaze raskrsnicom u određenom periodu analize rada raskrsnice  $T$ .

*Tabela 4.9. Protoci i zasićeni tokovi po trakama*

Broj vozila i vrednosti zasićenih tokova za period analize $b=1$ (voz/h)									
Traka/Grupa traka	A	B	C	D	E	F	G	H	L
Broj vozila (voz/h)	996	124	1155	252	770	587	421	727	176
Zasićeni tok (voz/h)	3306	1350	5533	1350	1844	1183	922	5533	1350
Broj vozila i vrednosti zasićenih tokova za period analize $b=2$ (voz/h)									
Traka/Grupa traka	A	B	C	D	E	F	G	H	L
Broj vozila (voz/h)	934	140	1026	209	761	490	405	765	171
Zasićeni tok (voz/h)	3306	1350	5533	1350	1844	1183	922	5533	1350

Leva skretanja u traci sa oznakom  $D$  počinju 6 sekundi ranije u odnosu na fazu u kojoj se nalaze, tj. u 21 sekundi. Ovakav način upravljanja je primenjen kako se ne bi stvarali dodatni redovi vozila u ovoj traci. U skladu sa tim, potrebno je obezbediti ovim vozilima određeno zaštitno vreme, pa grupa traka sa oznakom  $H$  završava svoje zeleno vreme 5 s ranije u odnosu na fazu u kojoj se nalazi, tj. u 16 s. Kako bi leva skretanja u traci  $B$  dobila odgovarajuće zaštitno vreme njihovo zeleno vreme se završava 7 s pre početka zelenog vremena za trake  $E$  i  $F$ . Početak i kraj zelenog vremena svake od traka prikazan je signalnim planom sa planom tempiranja prema postojećem stanju na slici 4.9.



Slika 4.9. Signalni plan sa planom tempiranja prema postojećem stanju

Desna skretanja nisu uzeti u obzir prilikom optimizacije rada svetlosnih signala predmetne raskrsnice. Razlog tome je potreba stavljanja akcenta na optimizaciju rada tokova pravo i tokova u levim skretanjima. Desna skretanja su kanalisana i ne predstavljaju problem sa upravljačkog aspekta. Ona se “umeću” u signalni plan tamo gde je moguće, poštujući zaštitna vremena. Praktično, na razmatranoj raskrsnici trake za desna skretanja imaju najveća zelena vremena, a najmanje tokove u odnosu na ostale trake za pravo i levo.

Pešački tokovi, takođe, nisu bili deo procesa optimizacije i oni se kao i desna skretanja “umeću” u signalni plan po izvršenoj optimizaciji, poštujući zaštitna vremena za pešake. Uzimanje u obzir i vremenskih gubitaka pešaka u kriterijumskoj funkciji nije praktično iz razloga velikih vrednosti saobraćajnih tokova.

Prema postojećem stanju, prosečni vremenski gubici vozila za prvi period analize  $b=1$  iznose: 255.31 s/voz. Posle prvog perioda analize, javljaju se neopsluženi redovi, dati po traka u tabeli 4.10., koji predstavljaju ulazne podatke za drugi period analize. U tabeli 4.10. prikazane su i vrednosti stepena zasićenja ( $X$ ) i vrednosti kapaciteta ( $c$ ) po trakama.

*Tabela 4.10. Vrednosti neopsluženih vozila po trakama posle prvog perioda analize*

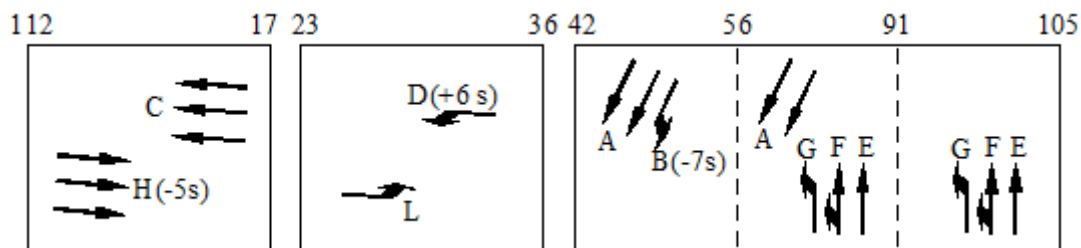
Traka	A	B	C	D	E	F	G	H	L
$X$	0.98	1.38	0.86	1.4	1.07	1.27	1.16	0.66	1.56
$c$ (voz/h)	1019	90	1337	180	722	463	361	1106	112
$Q_b$ (voz)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{b+1}$ (voz)	0	34	0	72	51	125	58	0	63

Prosečni vremenski gubici vozila za drugi period analize iznose: 557.41 s/voz. Razlog znatno većih gubitaka u odnosu na prvi period analize je taj što se sada u obzir uzimaju i gubici neopsluženih vozila iz prethodnog perioda. Posle drugog perioda analize, javljaju se neopsluženi redovi, dati po trakama u tabeli 4.11., koji predstavljaju ulazne podatke za neki naredni period analize  $b=3$ . U tabeli 4.11. prikazane su i vrednosti stepena zasićenja ( $X$ ) i vrednosti kapaciteta ( $c$ ) po trakama.

*Tabela 4.11. Vrednosti neopsluženih vozila po trakama posle drugog perioda analize*

Traka	A	B	C	D	E	F	G	H	L
$X$	0.91	1.56	0.77	1.16	1.05	1.06	1.12	0.69	1.52
$c$ (voz/h)	1019	90	1337	180	722	463	361	1106	112
$Q_b$ (voz)	0	34	0	72	51	125	58	0	63
$Q_{b+1}$ (voz)	0	84	0	101	87	153	101	0	121

U daljem tekstu prikazana je optimizacija rada predmetne raskrsnice primenom predloženog modela koji je podržan *BCO* algoritmom. Svi ulazni podaci i uslovi su isti kao kod analize u postojećem stanju. Po izvršenoj optimizaciji dobijen je signalni plan sa planom tempiranja prikazan na slici 4.10.



C = 120 s

Traka / Grupa traka	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
A				40 42					91 94							40 42						91 94			
B				40 42 49 51												40 42 49 51									
C		17 20									110 112		17 20										110 112		
D		15 17		36 39									15 17		36 39										
E					54 56					105 108							54 56						105 108		
F					54 56					105 108							54 56						105 108		
G					54 56					105 108							54 56						105 108		
H		12 15									110 112		12 15										110 112		
L		21 23		36 39									21 23		36 39										

Slika 4.10. Signalni plan sa planom tempiranja dobijen BCO algoritmom

Prosečni vremenski gubici vozila za prvi period iznose: 199.22 s/voz. Posle prvog perioda analize, javljaju se neopsluženi redovi, dati po trakama u tabeli 4.12., koji predstavljaju ulazne podatke za drugi period analize.

Tabela 4.12. Vrednosti neopsluženih vozila po trakama posle prvog perioda analize

Traka	A	B	C	D	E	F	G	H	L
$X$	0.74	1.57	1.00	1.18	1.02	1.22	1.12	0.79	1.20
$c$ (voz/h)	1350	79	1153	214	753	483	376	922	146
$Q_b$ (voz)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{b+1}$ (voz)	0	45	0	39	15	106	45	0	29

Prosečni vremenski gubici vozila za drugi period iznose: 390.27 s/voz. Posle prvog perioda analize, javljaju se neopsluženi redovi, dati po trakama u tabeli 4.13., koji predstavljaju ulazne podatke za neki naredni period analize  $b=3$ .



Tabela 4.13. Vrednosti neopsluženih vozila po trakama posle drugog perioda analize

Traka	A	B	C	D	E	F	G	H	L
$X$	0.74	1.78	0.89	0.98	1.01	1.02	1.08	0.83	1.17
$c$ (voz/h)	1350	79	1153	214	753	483	376	922	146
$Q_b$ (voz)	0	45	0	39	15	106	45	0	29
$Q_{b+1}$ (voz)	0	107	0	35	23	116	75	0	54

U tabeli 4.14. prikazana je uporedna analiza rezultata postojećeg stanja i stanja dobijenog pomoću modela optimizacije baziranog na BCO algoritmu.

Tabela 4.14. Uporedna analiza postojećeg stanja i optimizacije pomoću BCO metaheuristike

$T = 1$ h	Postojeće stanje		BCO optimizacija	
Kriterijum	Prosečni vremenski gubici (s/voz)	Broj neopsluženih vozila (voz)	Prosečni vremenski gubici (s/voz)	Broj neopsluženih vozila (voz)
Period $b=1$	255.31	403	199.22	249
Period $b=2$	557.41	647	390.27	410

Na osnovu svega iznetog pokazana je praktična primena algoritma za optimizaciju rada svetlosnih signala zasnovana na BCO algoritmu. U svim periodima analize, i prema prosečnim vremenskim gubicima vozila i prema broju neopsluženih vozila ovaj pristup pokazao je značajna poboljšanja u odnosu na postojeće stanje na raskrsnici.

## **5. VIŠEKRITERIJUMSKO UPRAVLJANJE RADOM IZOLOVANE SIGNALISANE RASKRSNICE**

U literaturi je veliki broj radova posvećen vremenskim gubicima vozila i optimizaciji drugih performansi koje se odnose na njih. Vremenskim gubicima pešaka i njihovom nivou usluge posvećena je znatno manja pažnja. U najvećem broju razvijenih modela vremenski gubici pešaka su zanemarivani pri optimizaciji rada svetlosnih signala na raskrsnicama. Ukoliko se u analizi zanemare vremenski gubici pešaka, može doći do veće konfliktnosti između njih i vozila, jer pešaci gube strpljenje pa često prelaze preko pešačkog prelaza i kada to nije dozvoljeno. Drugim rečima, smanjuje se bezbednost na raskrsnici. Dakle, potrebno je doneti upravljačke odluke koje će izaći u susret svim korisnicima na raskrsnici.

U ovom delu disertacije predstavljen je višekriterijumski model koji ima za zadatak da upravljačke odluke donosi uzimajući u obzir vremenske gubitke i vozila i pešaka. Smatra se da bi ovakav način upravljanja doprineo poboljšanju stanja bezbednosti saobraćaja svih učesnika u saobraćaju na raskrsnici.

Višekriterijumski pristup upravljanju radom izolovane signalisane raskrsnice ima značaj samo u slučajevima kada su na raskrsnici nezasićeni tokovi, tj. kada nije narušen kapacitet raskrsnice. U slučaju prezasićenih tokova, ovakav model bi imao manju primenu iz razloga što se tada teži smanjenju zagušenja, odnosno minimizaciji redova vozila na prilazima raskrsnici (naročito u centralnim gradskim zonama), i vremenski gubici pešaka se opravdano stavljaju u drugi plan.

Kako se radi o problemu složene kombinatorne optimizacije, predloženi model se bazira na metaheurističkoj tehnici optimizacija kolonijom pčela (BCO).

U poslednje dve decenije nekoliko studija se bavilo pronalaženjem kompromisa između vremenskih gubitaka vozila i vremenskih gubitaka pešaka. Ove studije se odnose na upravljanje kako izolovanom raskrsnicom, tako i zonom raskrsnica (Noland 1996; Bhattacharya i Virkler 2005; Ishaque i Noland 2005, 2007; Li i ostali 2010; Yang i Benekohal 2011; Stevanović i ostali 2015; Ma i ostali 2015).

Više detalja u vezi sa problemom pešačkih tokova u okviru sistema upravljanja saobraćajnim tokovima na raskrsnicama moguće je naći u doktorskoj disertaciji Alhajyaseen, 2010.

### **5.1. Odnos pešačkih tokova i tokova vozila na signalisanoj raskrsnici**

Pešački tokovi mogu imati značajan uticaj na signalisanu raskrsnicu u pogledu njenog kapaciteta i bezbednosti. Što su pešački prelazi duži ili što je njihov položaj dalji od raskrsnice, raste ciklus zbog povećavanja zaštitnih vremena između vozila i pešaka. Duži ciklus može izazvati veće vremenske gubitke i ugroziti nivo usluge na signalisanoj raskrsnici. Sa druge strane, pešački prelazi bi trebalo da budu dovoljno široki da prime zahteve pešaka koji dolaze sa obe strane. Ukoliko, zbog ograničenog prostora, pešaci izađu izvan pešačkog prelaza, to može izazvati pretnju po njihovu bezbednost.

Efektivna širina pešačkog prelaza kod signalisanih i kod nesignalisanih raskrsnica određuje se prema lokalnim standardima. Ukoliko lokalni standardi nisu dostupni, usvaja se vrednost od 3.66 m (12 ft) kao osnovna (HCM 2000).

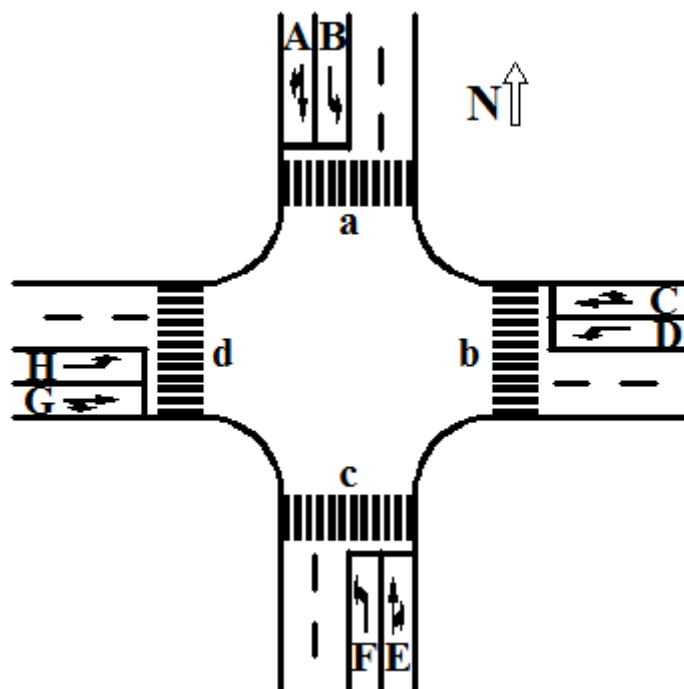
Postojeće strategije za upravljanje svetlosnim signalima uglavnom se fokusiraju samo na aspekte bezbednosti pešaka, dok se na vremenske gubitke pešaka ne obraća dovoljno pažnje. S druge strane, vremenski gubici pešaka mogu biti značajani u odnosu na vremenske gubitke vozila. U praksi, ovo je slučaj kada su na raskrsnicama veliki pešački zahtevi, što je tipično za većinu megapolisa širom sveta.

Zbog svega navedenog, detaljna analiza karakteristika pešačkih tokova na signalisanim raskrsnicama je jedan od osnova u procesu poboljšavanja strategija za upravljanje svetlosnim signalima.

Na slici 5.1. prikazan je osnovni tip raskrsnice sa tokovima vozila i pešačkim tokovima. Tokovi vozila su označeni velikim, a pešački tokovi malim slovima abecede. Na slici 5.2. prikazani su mogući signalni planovi za upravljanje ovom raskrsnicom.

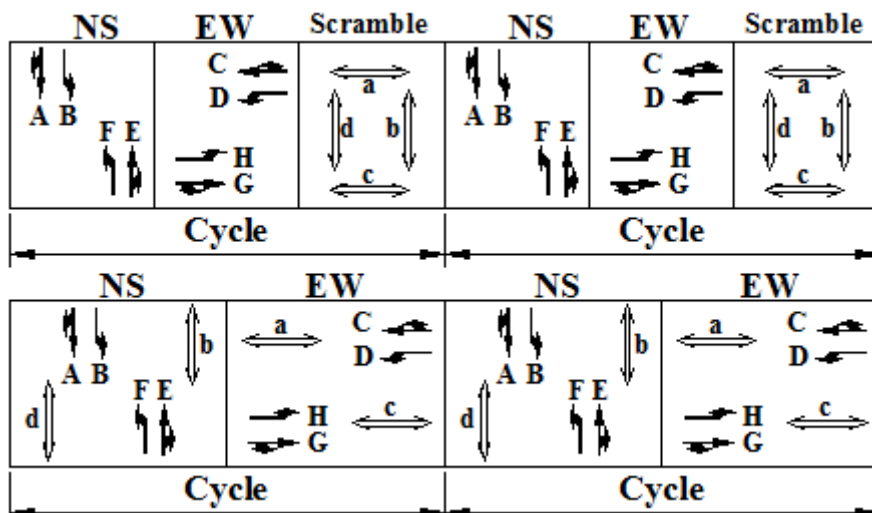
Pešački tokovi mogu biti opsluženi zajedno sa tokovima vozila („The two-way crossing signal plane”) ili im može biti dodeljena posebna faza („The scramble crossing signal plan”). Svaki od ovih pristupa ima svoje prednosti i nedostatke. „The scramble crossing signal plan” je prvi put primenjen na Menhetnu (Njujork) od strane saobraćajnog

inženjera Henrija Barnes, 60tih godina prošlog veka, pa se ovakav način upravljanja često naziva i “Barnes Dance” (Roess i ostali 2011). U praksi se ređe koristi nego uobičajni način koji podrazumeva opsluživanja pešačkih tokova zajedno sa tokovima vozila. Takođe, postoji mogućnost i denivelacije između vozila i pešaka ukoliko su pešački tokovi izrazito veliki. Ipak, postoje primeri primene ovakvog načina upravljanja u najvećim gradovima sveta, pa je on našao svoje mesto u ovoj disertaciji.



Slika 5.1. Raskrsnica: Tokovi vozila i pešački tokovi

„The two-way crossing signal plane” (Slika 5.2. dole), genealno gledano, smanjuje vremenske gubitke tokova vozila u odnosu na „The scramble crossing signal plan”, ali nije uvek preporučljiv kada se radi o raskrsnicama sa „jakim” tokovima vozila i pešačkim tokovima, naročito kod izraženih desnih skretanja. Međutim, ne postoje propisani kriterijumi koji određuju kada se primenjuje jedan a kada drugi način upavljanja. Takođe, ni HCM („Highway Capacity Manual”) se ne bavi uspostavljanjem ovih kriterijuma.



Slika 5.2. Signalni planovi raskrsnice

## 5.2. Opis i matematička formulacija problema

Problem izbora signalnog plana u fiksnom režimu rada može biti formulisan na sledeći način: Odrediti upravljačke parametre na raskrsnici (ciklus i raspodelu zelenog vremena po fazama) tako da oni budu rezultat kompromisa između vremenskih gubitaka vozila i vremenskih gubitaka pešaka. Drugim rečima, u ovom poglavlju je predstavljen model koji istovremeno vrši optimizaciju dve kriterijumske funkcije, u međusobnom konfliktu. Prva kriterijumska funkcija, koja se minimizira, predstavlja ukupne prosečne vremenske gubitke svih vozila tokom perioda analize. Druga kriterijumska funkcija, koja se takođe minimizira, predstavlja ukupne prosečne vremenske gubitke svih pešaka tokom istog perioda analize. Konfliktnost ove dve kriterijumske funkcije je logična, s obzirom na to da što je veći deo zelenog vremena dodeljen vozilima, to će pešaci duže da čekaju, i obrnuto.

Radi bolje preglednosti, na ovom mestu u disertaciji, biće ponovljene neke od veličina koje su već definisane u poglavlju 2.1. Neke od veličina biće označene, za potrebe ovog modela, na drugačiji način. Uvedeni su sledeći simboli:

$F$  - skup faza;

$K$  - skup svih saobraćajnih traka;

$P$  - skup pešačkih grupa na raskrsnici;

$i$  - indeks saobraćajne trake,  $i=1,2,\dots |K|$ ;

$j$  - indeks faze,  $j=1,2,\dots |F|$ ;  
 $p$  - indeks pešačke grupe,  $p=1,2,\dots |P|$ ;  
 $C$  - ciklus (s);  
 $C_{min}$  - minimalna vrednost ciklusa (s);  
 $C_{max}$  - maksimalna vrednost ciklusa (s);  
 $g_j$  - zeleno vreme  $j$ -te faze (s);  
 $g_i$  - zeleno vreme  $i$ -te trake (s);  
 $g_p$  - zeleno vreme  $p$ -te pešačke grupe (s);  
 $g_{jmin}$  - minimalno zeleno vreme  $j$ -te faze (s);  
 $g_{jmax}$  - maksimalno zeleno vreme  $j$ -te faze (s);  
 $L$  - izgubljeno vreme tokom ciklusa (s);  
 $T$  - trajanje perioda analize (h);  
 $q_i$  - saobraćajni tok u  $i$ -toj saobraćajnoj traci (voz/h);  
 $s_i$  - zasićeni tok u  $i$ -toj saobraćajnoj traci (voz/h);  
 $q_p$  - pešački tok  $p$ -te pešačke grupe (peš/h);  
 $X_i$  - stepen zasićenja  $i$ -te saobraćajne trake;  
 $c_i$  - kapacitet  $i$ -te saobraćajne trake (voz/h);  
 $d_i$  - prosečni vremenski gubici po vozilu u  $i$ -toj saobraćajnoj traci (s/voz);  
 $d_p$  - prosečni vremenski gubici po pešaku za  $p$ -tu pešačku grupu (s/peš);  
 $DV$  - ukupni prosečni vremenski gubici svih vozila tokom perioda analize (s/voz);  
 $DP$  - ukupni prosečni vremenski gubici svih pešaka tokom jednog časa (s/peš);

Kao što je već prikazano u prethodnim poglavljima, prosečni vremenski gubici po vozilu u  $i$ -toj saobraćajnoj traci računaju se na sledeći način (HCM 2000):

$$d_i = \frac{0.5 \cdot C \cdot \left(1 - \frac{g_i}{C}\right)^2}{1 - \left[\min\left(1, X_i\right) \cdot \frac{g_i}{C}\right]} + 900T \left[ (X_i - 1) + \sqrt{(X_i - 1)^2 + \frac{4 \cdot X_i}{c_i T}} \right] \quad (5.1)$$

Prosečni vremenski gubici po pešaku, za  $p$ -tu pešačku grupu, računaju se prema (HCM 2000). U slučaju „The scramble crossing signal plane” promenljiva  $g_p$  predstavlja vreme trajanja „scramble” faze:

$$d_p = \frac{0.5 \cdot (C - g_p)^2}{C} \quad (5.2)$$

Matematička formulacija postavljenog problema ima sledeći oblik:

*Minimizirati:*

$$DV = \frac{\sum_{i=1}^{|K|} q_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^{|K|} q_i} \quad (5.3)$$

*Minimizirati:*

$$DP = \frac{\sum_{p=1}^{|P|} q_p \cdot d_p}{\sum_{p=1}^{|P|} q_p} \quad (5.4)$$

*pri ograničenjima:*

$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \quad (5.5)$$

$$g_{j\min} \leq g_j \leq g_{j\max}, \quad \forall j \in F \quad (5.6)$$

$$\sum_{j=1}^{|F|} g_j = C - L \quad (5.7)$$

Prva kriterijumska funkcija (5.3) pokušava da minimizira ukupne prosečne vremenske gubitke svih vozila na raskrsnici u periodu analize. Druga kriterijumska funkcija (5.4) pokušava da minimizira ukupne prosečne vremenske gubitke svih pešaka na raskrsnici u toku jednog časa. Ograničenje (5.5) definiše interval u kome se može naći ciklus. Ograničenje (5.6) definiše interval u kome se nalaze zelena vremena dodeljena fazama. Odnos ciklusa, zelenih vremena koja su dodeljena fazama i izgubljenog vremena tokom ciklusa definisan je ograničenjem (5.7).

Minimalna vrednost zelenog vremena  $j$ -te faze ( $g_{j\min}$ ), u kojoj se javljaju pešački tokovi, je u funkciji vremena potrebnog za prelazak najdužeg pešačkog prelaza  $p$ -te

pešačke grupe, koja je dodeljen  $j$ -toj fazi. Takvih  $p$  pešačkih grupa može biti najviše  $n$ . U skladu sa tim važi da je (HCM 2000):

$$g_{j\min} = \max \left\{ t_s + \frac{L_1}{S_p} + \left( 2.7 \cdot \frac{N_{ped1}}{W_{E1}} \right), \dots, t_s + \frac{L_n}{S_p} + \left( 2.7 \cdot \frac{N_{pedn}}{W_{En}} \right) \right\} \quad (5.8)$$

gde su:

$g_{j\min}$  – minimalno trajanje  $j$ -te faze (s);

$t_s$  – vreme pokretanja pešaka (pedestrian start up time) (s);

$L$  – dužina pešačkog prelaza (m);

$S_p$  – prosečna brzina pešaka (m/s);

$W_E$  – širina pešačkog prelaza (m);

$N_{ped}$  – broj pešaka, tokom trajanja faze, koji pređu preko pešačkog prelaza.

### 5.3. Predloženo rešenje problema

Kako postoje dve funkcije cilja, koje su u konfliktu, potrebno je pronaći dobar kompromis između njih. Činjenica da zadaci višekriterijumske optimizacije, po pravilu, nemaju idealno rešenje upućuje na koncept “Pareto optimalnosti”. Pareto optimalnost predstavlja proširenje poznatog koncepta optimalnosti koji se koristi u klasičnoj jednokriterijumskoj optimizaciji. Ukoliko je  $i$  indeks kriterijumske funkcije kojih može da bude najviše  $r$ , “Pareto optimum” se definiše na sledeći način (Stanimirović 2015):

$$f_i(x) \geq f_i(x^*), \quad \forall i = 1, 2, \dots, r \quad (5.9)$$

pri čemu bar jedna od nejednakosti prelazi u strogu nejednakost “>”.

Drugim rečima,  $x^*$  je Pareto optimalno ako bi poboljšanje vrednosti bilo koje funkcije cilja prouzrokovalo pogoršanje vrednosti neke druge funkcije cilja, koja učestvuje u optimizaciji. Za “Pareto optimum” postoje sledeći sinonimi: efikasno, dominantno i nedominantno rešenje.

Autor ove disertacije je pristupio rešavanju postavljenog problema višekriterijumske optimizacije izolovane signalisane raskrsnice interaktivnom metodom



predloženom od strane Nakayama i Sawaragi (1984). Ova metoda je izuzetno pogodna za rešavanje postavljenog problema, jer daje veliki značaj analitičaru-donosiocu odluke.

Interaktivne metode za rešavanje zadataka višekriterijumske optimizacije podrazumevaju aktivno učešće donosioca odluke u procesu modeliranja problema, generisanja mogućih rešenja, njihove analize i konačnog usvajanja. Drugim rečima, ove metode podrazumevaju jednu vrstu saradnje između računara i čoveka pri donošenju neke odluke.

Cilj je pronaći zadovoljavajuće rešenje  $x$ , koje pripada skupu dopustivih rešenja  $X$ , tako da sledeća nejednačina bude zadovoljena:

$$f_i(x) \geq \bar{f}_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, r \quad (5.10)$$

gde je:  $\bar{f} = (\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_r)$  nivo aspiracije definisan od strane donosioca odluke.

U skladu sa ovim predlaže se kratak algoritam za rešavanje problema višekriterijumske optimizacije (Patel i Smith 1983; Teodorović i Krčmar Nožić 1989):

*Korak 1.* Definisati idealnu tačku  $f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_r^*)$  gde je  $f_i^*$  dovoljno veliko, na primer,  $f_i^* = \max \{f_i(x) | x \in X\}$ . Ova vrednost ostaje ista tokom celog procesa optimizacije. Nije potrebno uložiti previše truda oko određivanja idealne tačke,  $f_i^*$  bi samo trebalo da bude dovoljno veliko da pokrije ceo prostor dopustivih rešenja.

*Korak 2.* U  $k$ -toj iteraciji donosilac odluke određuje nivo aspiracije  $\bar{f}_i^k$  za svaku kriterijumsku funkciju  $f_i$ ,  $\forall i = 1, 2, \dots, r$ .  $\bar{f}_i^k$  je određeno tako da:  $\bar{f}_i^k < f_i^*$ .

*Korak 3.* Izračunati:

$$W_i^k = \frac{1}{(f_i^* - \bar{f}_i^k)}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, r \quad (5.11)$$

i rešiti novonastali optimizacioni zadatak:

$$\min_x \max_i W_i^k \cdot |f_i^* - f_i(x)| \quad (5.12)$$

gde su:  $x \in X$ ,  $x$  je celobrojna vrednost i  $1 \leq i \leq r$ .

Sa  $x^k$  je označeno rešenje novonastale kriterijumske funkcije (5.12).

*Korak 4.* Na osnovu vrednosti  $f_i(x^k)$ ,  $\forall i = 1, 2, \dots, r$ , donosilac odluke vrši klasifikaciju vrednosti kriterijumskih funkcija u tri grupe:

- klasa vrednosti kriterijumskih funkcija koje želi da poboljša,
- klasa vrednosti kriterijumskih funkcija gde dopušta pogoršanja,
- klasa vrednosti kriterijumskih funkcija koje želi da ostavi takve kakve jesu.

Ako donosilac odluke ne želi da poboljšava vrednosti niti jedne kriterijumske funkcije, proces optimizacije je završen. Drugim rečima, zadovoljan je rešenjem  $x^k$  koje je pronađeno. U suprotnom, donosilac odluke postavlja nove nivoe aspiracije za svaku od kriterijumskih funkcija, tako da ako je:

$\overline{f_i^{k+1}} > f_i(x^k)$  donosilac odluke želi da poboljša  $i$ -tu kriterijumsku funkciju,

$\overline{f_i^{k+1}} < f_i(x^k)$  donosilac odluke je spreman da pogorša  $i$ -tu kriterijumsku funkciju,

$\overline{f_i^{k+1}} = f_i(x^k)$  donosilac odluke prihvata  $i$ -tu kriterijumsku funkciju kakva jeste,

Postaviti brojač  $k$  na vrednost  $k+1$  i preći na 3. korak algoritma.

Za razliku od mnogih interaktivnih metoda, koje zahtevaju dosta napora od donosioca odluka i zato ih je teško primeniti, ovaj metod samo traži da donosilac odluke koristi već dobijene vrednosti kriterijumskih funkcija kako bi postavio svoje nivoe aspiracije, koji se potom koriste za formiranje težinskog faktora. Na ovaj način, novo rešenje se dobija minimizacijom ponderisanih vrednosti udaljenosti kriterijumskih funkcija od idealne tačke. Kako bi se izbeglo dodeljivanje nerealnih nivoa aspiracija, donosilac odluke bi trebalo da prouči mogućnosti i zamke koje nosi primena ove metode na konkretan problem (moguće je neke od njih uočiti tokom procesa optimizacije) u cilju dobijanja prihvatljivog konačnog rešenja (Teodorović i Krčmar-Nožić 1989).

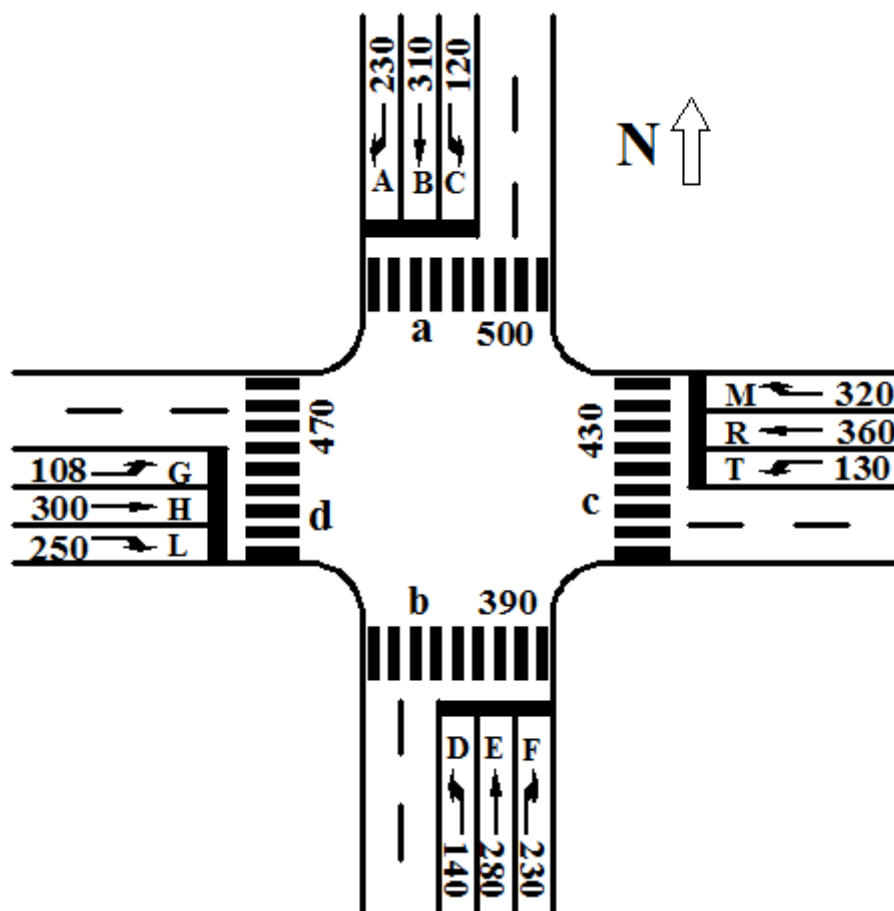
## 5.4. Numerički primeri

Predloženi BCO algoritam za rešavanje problema upravljanja individualnom raskrslanicom je poređen sa drugim pristupima poznatim u literaturi. Na osnovu stečenog iskustva u primeni BCO algoritma postavljeni su sledeći parametri optimizacije:  $B = 15$ ,  $NP = 15$ ,  $NC = 1$ . Kriterijum zaustavljanja algoritma predstavlja vreme rada računara. U slučaju upravljanja sa 2 i 3 faze vreme rada računara iznosilo je 10 s, kada se upravljalo sa 4 i 5 faza vreme rada računara bilo je 20 s, i na kraju upravljanje sa 6 i 7 faza se završavalo posle 30 s rada računara.

Algoritam za upravljanje radom izolovane signalisane raskrslanice je testiran na raskrslanici sa slike 5.3. Na slici su naznačeni protoci vozila po trakama i pešaka po pešačkim grupama. Analizirani su slučajevi kada se raskrslanicom upravlja sa 2, 3, 4, 5, 6 ili 7 faza. Zasićeni tokovi (voz/h) zavise od broja faza i izabranog signalnog plana ("two-way" ili "scramble"). Zasićeni tokovi su manji u slučaju primene "The two-way crossing signal plan", nego što je to slučaj kada je na snazi "The scramble crossing signal plan". Razlog tome je ukrštanje pešačkih tokova i tokova vozila, koji dodatno utiču na vrednosti zasićenih tokova. Tabela 5.1. prikazuje vrednosti zasićenih tokova koje su korišćene u proračunima.

Tabela 5.1. Vrednosti zasićenih tokova

Br. faza	Traka											
	A	B	C	D	E	F	G	H	L	M	R	T
Zasićeni tok u slučaju primene "The two-way crossing signal plane" (voz/h)												
2	1050	1600	1015	892	1600	1155	844	1600	1200	1050	1600	1031
3	1050	1600	1015	892	1600	1155	1500	2120	1200	1050	2120	1500
4	1050	2120	1500	1500	2120	1155	1500	2120	1200	1050	2120	1500
5	1050	2120	1500	1500	2120	1155	1500	2120	1500	1500	2120	1500
6	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
Zasićeni tok u slučaju primene "The scramble crossing signal plan" (voz/h)												
3	1500	1600	1318	1274	1600	1500	1205	1600	1500	1500	1600	1289
4	1500	1600	1318	1274	1600	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
5	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
6	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500
7	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500	1500	2120	1500



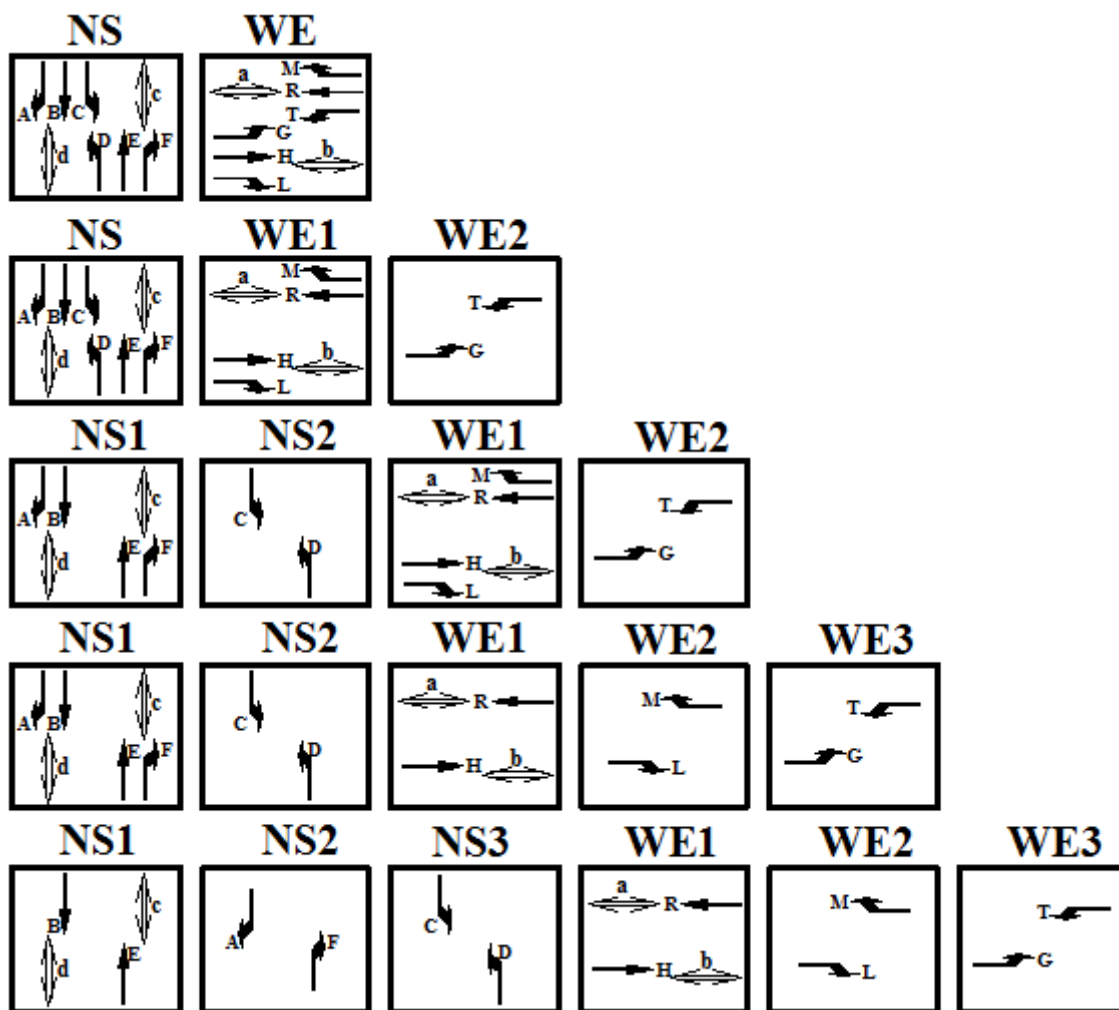
Slika 5.3. Test raskrsnica

Izgubljeno vreme tokom ciklusa  $L$  (u sekundama) zavise od broja faza. Tabela 5.2. prikazuje vrednosti ovih gubitaka koje su korišćene tokom proračuna.

Tabela 5.2. Izgubljeno vreme tokom ciklusa

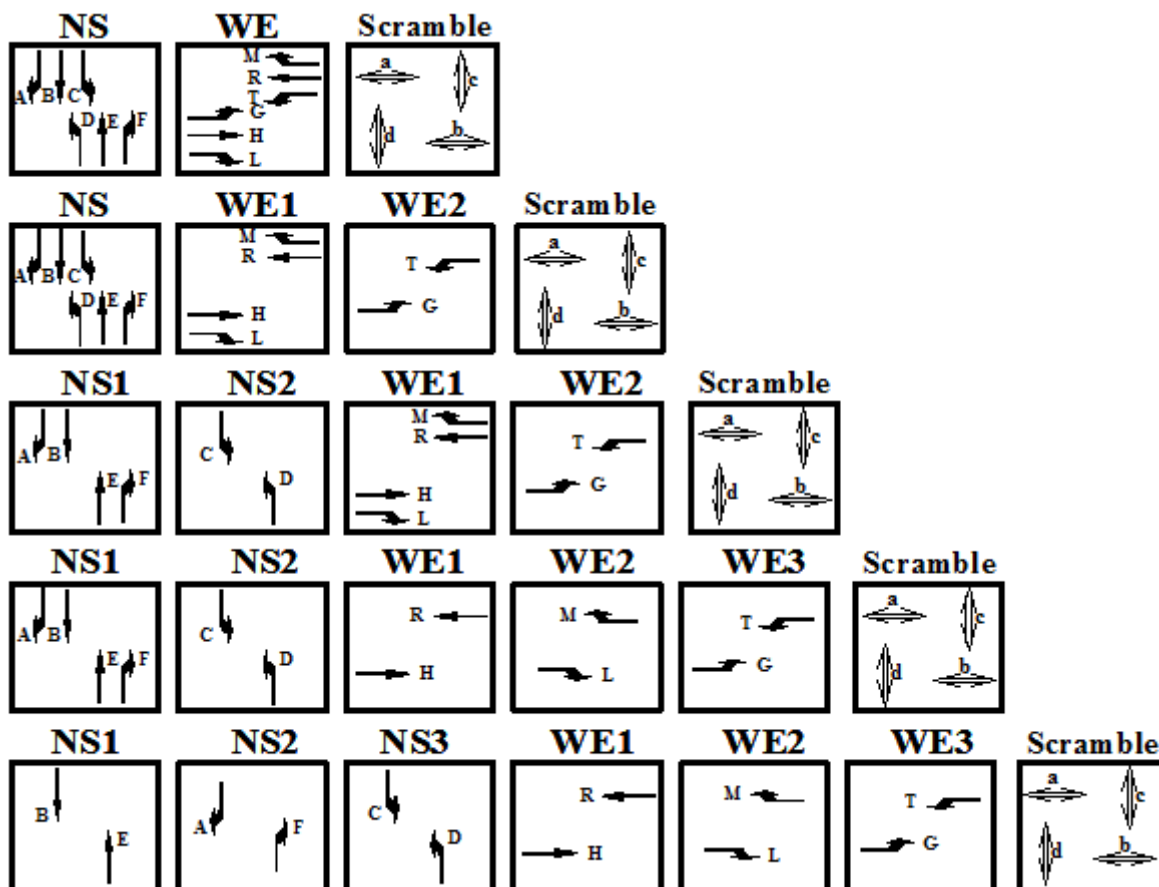
Broj faza	Izgubljeno vreme tokom ciklusa $L$ (u sekundama)	
	"two-way"	"scramble"
2	10	-
3	12	17
4	14	19
5	16	21
6	18	23
7	-	25

Donja granica dozvoljene vrednosti ciklusa  $C_{min}$  i gornja granica dozvoljene vrednosti ciklusa  $C_{max}$  iznose respektivno 30 sekundi i 120 sekundi, dok minimalna vrednost zelenog vremena  $g_{min}$  i maksimalan vrednost zelenog vremena  $g_{max}$  iznose respektivno 7 sekundi i 80 sekundi. Mogući planovi faza na test raskrsnici prikazani su na slici 5.4. ("two-way") i na slici 5.5. ("scramble").



Slika 5.4. Mogući planovi faza na test raskrsnici - "The two-way crossing signal plan"

Optimizacioni zadatak, u okviru koraka 3 predloženog interaktivnog algoritma, rešavan je primenom BCO metoda. Generisanje inicijalnog rešenja i modifikacija rešenja su vršene na isti način kao u slučaju jednokriterijumske optimizacije. Rezultati dobijeni primenom interaktivne metode prikazani su u Tabeli 5.3. ("two way") i Tabeli 5.4. ("scramble").



Slika 5.5. Mogući planovi faza na test raskrsnici - "The scramble crossing signal plan"

Idealana tačka  $f_i^*$  je dobijena tokom jednokriterijumske optimizacije funkcija (9) i (10). Kada se raskrsnicom upravlja sa 3 i više faza, a na snazi je "The two-way crossing signal plan" prve dve iteracije su u funkciji pronalaženja nove idealne tačke. Ovo je neophodno iz razloga što se javljaju dodatni gubici pešaka tokom faza u kojima oni nisu opsluženi, pa moraju za to vreme da čekaju. Idealna tačka, kada su u pitanju tokovi vozila se ne menja jer su oni opsluženi tokom svih faza (slika 5.4.).

U slučaju upravljanja raskrsnicom primenom "The scramble crossing signal plan", tokom svih faza, prve dve iteracije su, takođe, u funkciji pronalaženja nove idealne tačke. U ovom slučaju postoje faze tokom kojih se jednovremeno opslužuju ili vozila ili pešaci. Drugim rečima, potrebno je pronaći novu idealnu tačku  $f_i^*$  i za vozila i za pešake jer svi čekaju jedni druge tokom jednog ciklusa (slika 5.5.).

Rezultati (kolona rešenja) su predstavljeni na sledeći način:  $C;g_1,g_2, \dots,g_n$ . Na primer, rešenje 59;18,22,7 predstavlja slučaj kada je vrednost ciklusa jednaka 59 sekundi.

U ovom slučaju raskrslanicom se upravlja pomoću 3 faze. Zelena vremena faza su 18 sekundi, 22 sekundi i 7 sekundi, respektivno.

Tabela 5.3. Rešenja - The two-way crossing signal plan

Br. fa.	It.	Idealna tačka $f_i^* = \{DV, DP\}$	Nivo aspiracije $f_i^k = \{DV, DP\}$	Rešenje	Vred. kriter. funk.	Vred. DV (s/voz)	Vred. DP (s/peš)
2	1	{14.81, 6.67}	{100, 7}	40;15,15	0.33	18.32	6.67
	2	{14.81, 6.67}	{15, 100}	51;19,22	0.02	14.81	7.96
	3	{14.81, 6.67}	{16, 10}	49;18,21	0.35	14.82	7.73
	4	{14.81, 6.67}	{16, 8}	45;16,19	0.69	15.12	7.27
	5	{14.81, 6.67}	{17, 7.8}	42;15,17	0.75	15.69	6.91
3	1	{25.40, 6.67}	{150, 7}	43;12,12,7	10.84	145.37	10.24
	2	{25.40, 6.67}	{26, 100}	67;22,26,7	0.08	25.40	12.71
	3	{25.40, 10.24}	{27.5, 11.3}	61;19,23,7	1.85	26.40	12.06
	4	{25.40, 10.24}	{26.7, 11}	63;20,24,7	2.71	25.82	12.27
	5	{25.40, 10.24}	{27.4, 10.8}	59;18,22,7	3.09	27.36	11.84
4	1	{41.76, 6.67}	{200, 7}	52;12,7,12,7	24.36	343.45	14.58
	2	{41.76, 6.67}	{42, 100}	87;25,9,31,8	0.15	41.76	19.00
	3	{41.76, 14.58}	{43, 17}	79;22,8,28,7	1.58	42.47	17.48
	4	{41.76, 14.58}	{44, 15}	72;19,7,25,7	5.99	47.16	16.42
	5	{41.76, 14.58}	{43, 15}	74;20,7,26,7	6.67	44.48	16.61
5	1	{73.94, 6.67}	{250, 7}	61;12,7,12,7,7	38.58	444.36	18.98
	2	{73.94, 6.67}	{74, 100}	116;30,11,25,24,10	0.39	73.94	32.91
	3	{73.94, 18.98}	{75, 21}	108;28,10,23,22,9	6.72	74.96	30.66
	4	{73.94, 18.98}	{76, 20}	88;22,8,18,17,7	8.53	89.12	25.46
	5	{73.94, 18.98}	{75.5, 20}	96;24,9,20,19,8	9.68	80.51	27.69
6	1	{151.89, 6.67}	{500, 7}	70;12,7,7,12,7,7	52.02	616.59	23.41
	2	{151.89, 6.67}	{152, 100}	120;21,17,10,23,22,9	0.44	151.89	39.32
	3	{151.89, 23.41}	{158, 24.2}	97;16,13,8,18,17,7	12.94	212.46	32.34
	4	{151.89, 23.41}	{158, 26}	107;18,15,9,20,19,8	6.08	179.08	35.52
	5	{151.89, 23.41}	{160, 25}	101;17,14,8,19,18,7	12.68	192.48	33.44

U svim fazama u kojima se pešaci opslužuju zajedno sa vozilima, zeleno vreme za pešake se završava 5 sekundi ranije u odnosu na vozila (ili u odnosu na kraj faze). Ovim se obezbeđuje dovoljno zaštitno vreme za pešake od 7 s u slučaju kada oni gube zeleno vreme, a vozila dobijaju zeleno vreme. Obezbeđeno je i minimalno zeleno vreme za pešake u trajanju od 7 sekundi (tabela 5.3.).

Tabela 5.4. Rešenja - The scramble crossing signal plan

Br. fa.	It	Idealna tačka $f_i^* = \{DV, DP\}$	Nivo aspiracije $f_i^k = \{DV, DP\}$	Rešenje	Vred. kriter. funk.	Vred. DV (s/voz)	Vred. DP (s/peš)
3	1	{14.81, 0}	{100, 0.1}	111;7,7,80	43.29	3175.21	4.33
	2	{14.81, 0}	{15, 100}	67;20,23,7	43.95	23.16	26.86
	3	{23.16, 4.33}	{25, 5}	44;9,10,8	15.51	50.77	14.73
	4	{23.16, 4.33}	{24.5, 5}	43;9,10,7	16.02	44.23	15.07
	5	{23.16, 4.33}	{24.5, 5.5}	45;10,11,7	10.02	35.23	16.04
	6	{23.16, 4.33}	{24.7, 5.4}	44;9,11,7	10.50	38.88	15.56
4	1	{25.40, 0}	{150, 0.1}	120;7,7,7,80	66.67	3161.22	6.67
	2	{25.40, 0}	{25.5, 100}	78;21,22,9,7	80.73	33.47	32.31
	3	{33.47, 6.67}	{35, 9}	59;13,13,7,7	6.97	43.88	22.92
	4	{33.47, 6.67}	{36, 7.5}	54;10,11,7,7	16.63	75.57	20.45
	5	{33.47, 6.67}	{36, 8.5}	60;12,13,7,9	8.28	54.43	21.68
	6	{33.47, 6.67}	{36, 8}	61;12,13,7,10	11.02	59.50	21.31
5	1	{41.76, 0}	{500, 0.1}	120;7,7,7,7,71	100.04	2823.36	10.00
	2	{41.76, 0}	{42, 100}	93;20,11,24,10,7	22.51	47.16	39.76
	3	{47.16, 10.00}	{50, 12}	67;11,7,14,7,7	8.49	71.29	26.87
	4	{47.16, 10.00}	{50, 14}	70;12,7,16,7,7	4.59	59.54	28.35
	5	{47.16, 10.00}	{48.5, 14}	74;14,8,17,7,7	5.08	53.77	30.33
	6	{47.16, 10.00}	{49, 13.8}	72;13,7,17,7,7	5.09	56.53	29.34
6	1	{73.94, 0}	{1000, 0.1}	120;7,7,7,7,7,62	140.16	2823.36	14.02
	2	{73.94, 0}	{74, 100}	115;20,11,20,24,10,7	507.13	104.34	50.71
	3	{104.34, 14.02}	{110, 16}	89;14,7,14,17,7,7	12.00	170.60	37.78
	4	{104.34, 14.02}	{110, 15}	82;12,7,12,14,7,7	20.94	222.65	34.30
	5	{104.34, 14.02}	{108, 15.5}	91;14,8,14,18,7,7	16.73	163.45	38.77
	6	{104.34, 14.02}	{109, 15.5}	88;14,7,14,16,7,7	15.72	174.78	37.28
7	1	{151.89, 0}	{1500, 0.1}	120;7,7,7,7,7,53	187.04	2823.36	18.70
	2	{151.89, 0}	{152, 100}	120;16,17,9,18,20,8,7	1474.19	314.05	53.20
	3	{314.05, 18.70}	{325, 20}	95;12,11,7,13,13,7,7	16.96	495.05	40.76
	4	{314.05, 18.70}	{320, 20}	101;13,13,7,14,15,7,7	19.26	428.31	43.74
	5	{314.05, 18.70}	{320, 19.5}	96;12,11,7,13,14,7,7	28.19	479.85	41.26
	6	{314.05, 18.70}	{318, 19.5}	100;13,12,7,14,15,7,7	31.18	437.43	43.24

Na kraju "scramble" faze, kada pešaci gube zeleno vreme a vozila dobijaju zeleno vreme, obezbeđeno je zaštitno vreme za pešake u trajanju od 7 s. Preostalo zaštitno vreme se podjednako raspoređuje na zaštitna vremena između ostalih faza (tabela 5.4.).

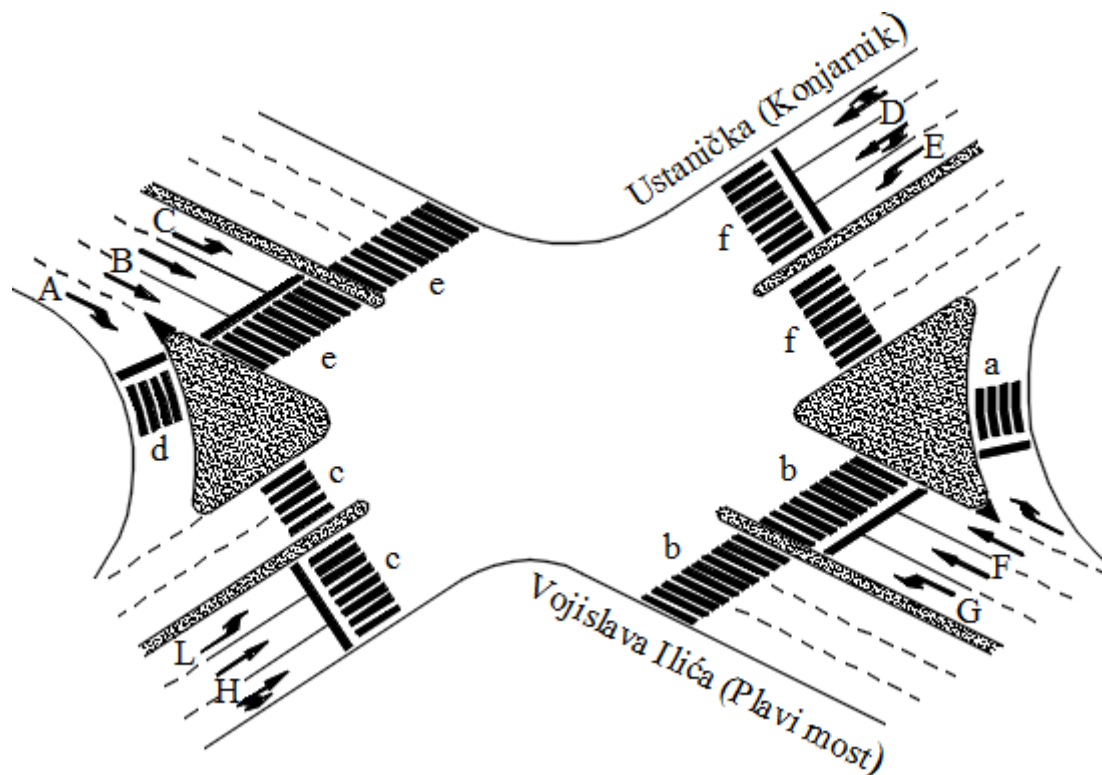
Logično se nameće pitanje o tome koji od ova dva signalna plana primeniti. Odgovor na ovo pitanje zavisi od vrednosti kriterijumskih funkcija dobijenih tokom



optimizacije, za određen broj faza. Na primer, kada se tokovima vozila upavlja sa dve faze, u ovom primeru se bolje pokazao "The two-way crossing signal plan", što se vidi iz tabela 5.3 i 5.4 (poredi se upravljanje sa dve faze "two-way" sa upravljanjem sa tri faze "scramble"). Međutim, treba imati u vidu da ovo poređenje zavisi od nivoa aspiracije donosoca odluke. Na kraju, jedan od ključnih faktora pri izboru vrste signalnog plana jesu vrednosti, kako tokova vozila tako i pešačkih tokova, koji se pojavljuju na raskrsnici. Za tokove usvojene u razmatranom primeru primenljiviji je "The two-way crossing signal plan".

#### 5.4.1. Testiranje modela na realnom primeru

Model za višekriterijumsko upravljanje radom izolovane signalisane raskrsnice testiran je i na realnom primeru. Kao test primer uzeta je raskrsnica u Beogradu: Ustanička - Vojislava Ilića. Izgled raskrsnice, broj saobraćajnih traka i njihove oznake (velikim abecednim slovima) dati su na slici 5.6. Na istoj slici, malim slovima abecede označeni su pešački tokovi. Raskrsnica je izvedena u punom režimu rada, koji podrazumeva da su dozvoljena sva skretanja sa svih prilaza.



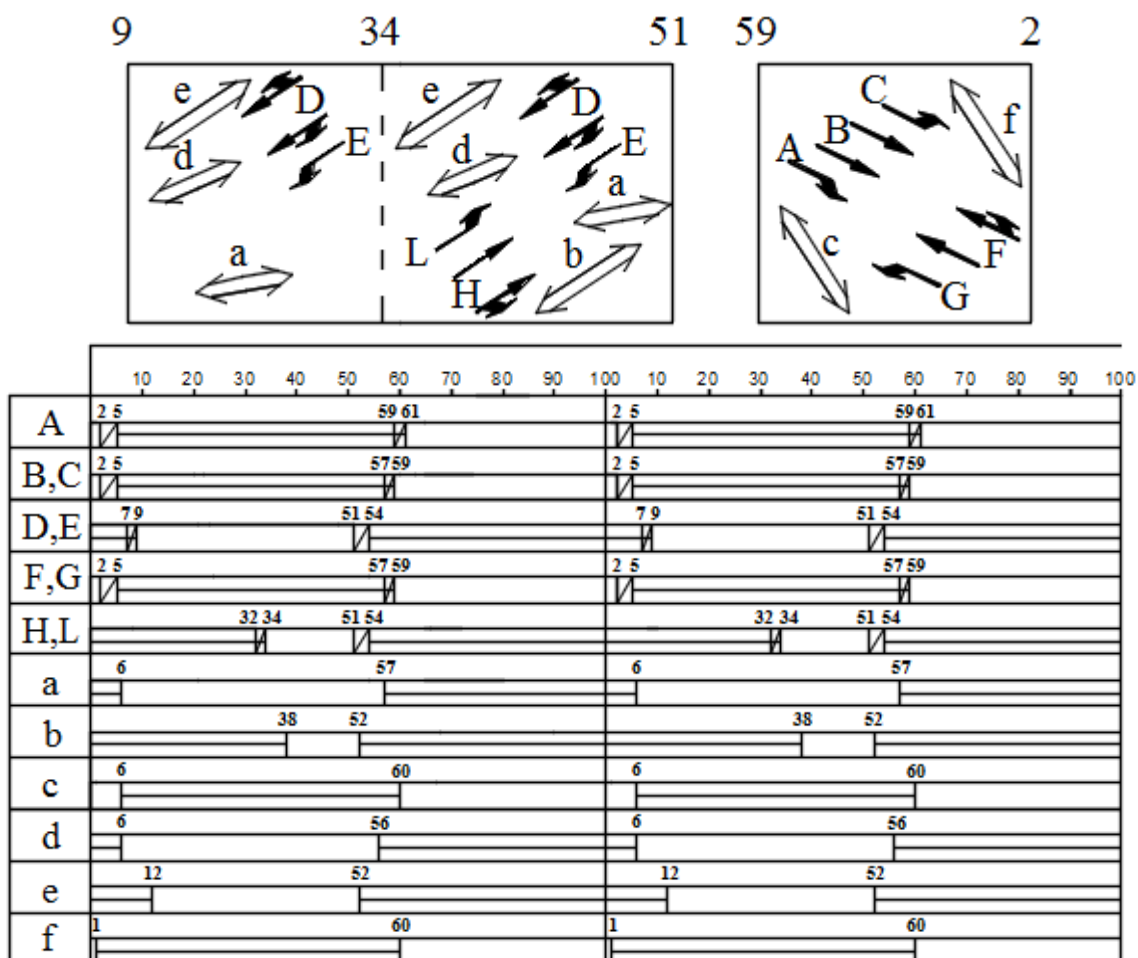
Slika 5.6. Test raskrsnica: Ustanička - Vojislava Ilića

Podaci o saobraćajnim tokovima, zasićenim tokovima i pešačkim tokovima dobijeni su sa “Katedre za planiranje i regulisanje saobraćaja”, Saobraćajnog fakulteta u Beogradu (tabela 5.5.). Saobraćajni tokovi, mereni u vanvršnom periodu, su nezasićenog karaktera.

Tabela 5.5. Protoci vozila i pešaka i zasićeni tokovi po trakama

Traka/Grupa traka	A	B	C	D	E	F	G	H	L
Broj vozila (voz/h)	36	966	117	383	560	1222	91	281	32
Zasićeni tok (voz/h)	1435	3282	310	3314	1302	3462	330	3330	330
Pešački tokovi (peš/h)									
a	b	c	d	e	f				
464	268	296	340	370	219				

Signalni plan i plan tempiranja u postojećem stanju dati su na slici 5.7. Desna skretanja u tokovima D i F imaju uslovno zeleno svetlo (strelicu za uslovno desno).

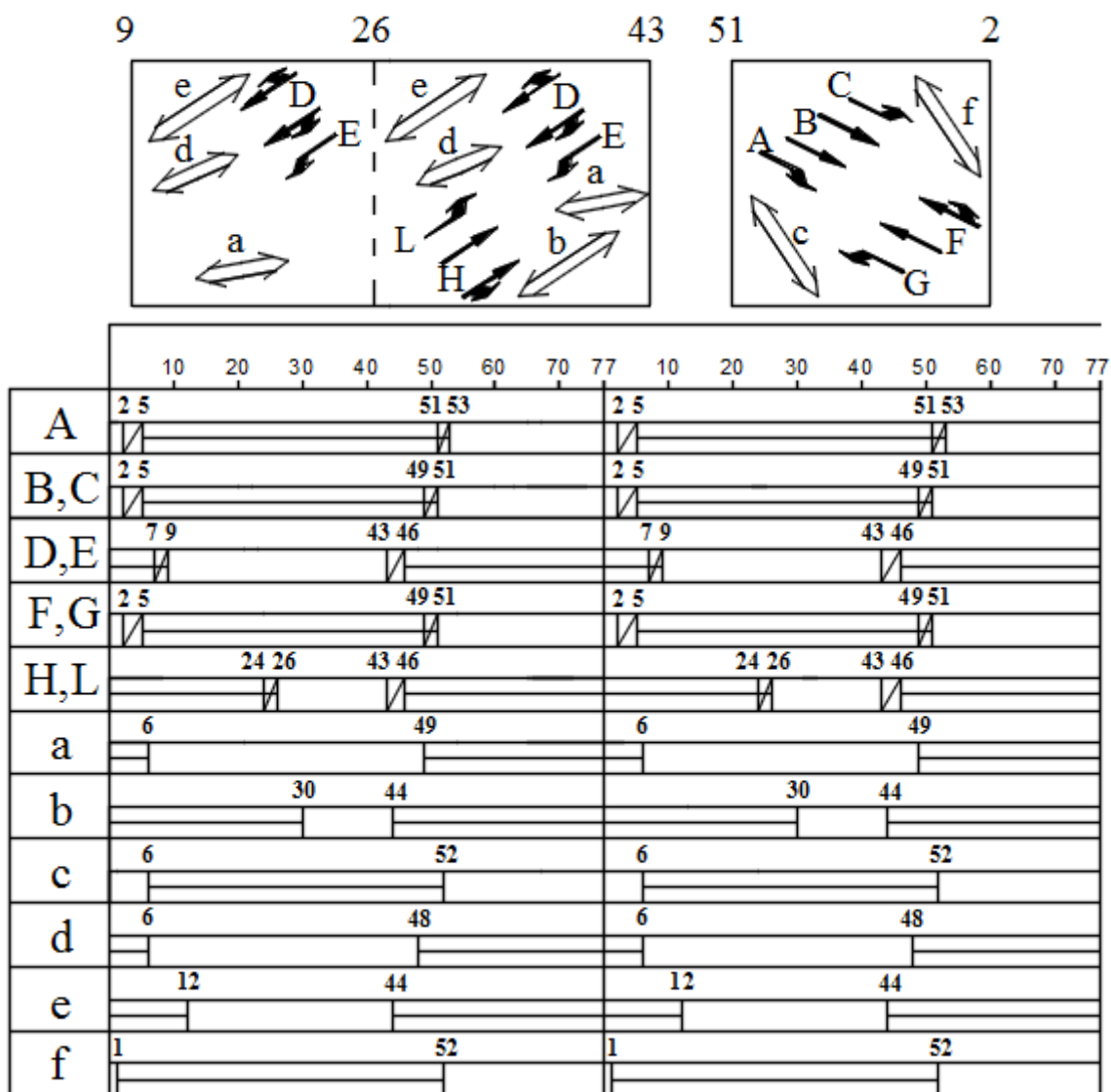


Slika 5.7. Signalni plan i plan tempiranja u postojećem stanju

U postojećem stanju prosečni vremenski gubici po vozilu iznose 69.05 s/voz, dok prosečni vremenski gubici po pešaku iznose 29.17 s/peš.

Prilikom projektovanja novog stanja zadržan je postojeći signalni plan. Nakon izvršene višekriterijumske optimizacije novo dobijeno rešenje je prikazano na slici 5.8. Na istoj slici dat je i plan tempiranja za novoprojektovno stanje.

Donja granica dozvoljene vrednosti ciklusa  $C_{min}$  i gornja granica dozvoljene vrednosti ciklusa  $C_{max}$  iznose respektivno 66 sekundi i 120 sekundi, dok minimalna vrednost zelenog vremena  $g_{jmin}$  i maksimalan vrednost zelenog vremena  $g_{jmax}$  iznose respektivno 17 sekundi i 80 sekundi. Ovakva vrednost minimalnog zelenog vremena faze obezbeđuje dovoljno vremena za zaštitu pešačkih tokova.



Slika 5.8. Signalni plan i plan tempiranja u novoprojektovanom stanju

Novoprojektovano stanje dobijeno je kroz iteracije koje su prikazane u tabeli 5.6. Rezultati (kolona rešenja) su predstavljeni na isti način kao u tabelama 5.3. i 5.4. Problem višekriterijumske optimizacije rešavan je interaktivnom metodom, koja je podržana BCO algoritmom. Idealna tačka dobijena je jednokriterijumskom optimizacijom.

*Tabela 5.6. Rezultati višekriterijumske optimizacije*

It.	Idealna tačka $f_i^* = \{DV, DP\}$	Nivo aspiracije $f_i^k = \{DV, DP\}$	Rešenje	Vred. kriter. funk.	DV (s/voz)	DP (s/peš)
1	{51.83, 16.26}	{500, 16.5}	79;17,30,17	1.52	648.34	16.26
2	{51.83, 16.26}	{52, 200}	109;17,34,43	0.07	51.83	27.31
3	{51.83, 16.26}	{55, 20}	83;17,20,31	2.89	57.51	22.85
4	{51.83, 16.26}	{55, 18}	79;17,18,29	5.92	60.64	22.09
5	{51.83, 16.26}	{57, 18}	77;17,17,28	5.78	62.86	21.71

Konačno rešenje dobijeno je u poslednjoj, petoj iteraciji. Dobijno rešenje predstavlja kompromis između dve kriterijumske funkcije: prosečnih vremenskih gubitaka vozila (*DV*) i prosečnih vremenskih gubitaka pešaka (*DP*).

Pored toga što dobijeno rešenje zadovoljava obe pomenute kriterijumske funkcije, ono je bolje u odnosu na ono u postojećem stanju. Prosečni vremenski gubici vozila su smanjeni za 6.19 s/voz, dok su prosečni vremenski gubici pešaka smanjeni za 7.46 s/peš.

Ukoliko bi se problem posmatrao jednokriterijumski prosečni vremenski gubici vozila bili bi smanjeni za 17.22 s/voz (iteracija 2.), dok bi prosečni vremenski gubici pešaka bili smanjeni za 12.91 s/peš (iteracija 1.).

Iz dobijenih rezultata može se izvesti zaključak da je interaktivna metoda, podržana BCO algoritmom, i na realnoj raskrsnici sa realnim podacima, pokazala mogućnosti svoje praktične primene.

## 6. ZONSKO UPRAVLJANJE SAOBRAĆAJNIM TOKOVIMA

Ulične mreže velikih gradova širom sveta su zagušene, što za posledicu ima niz negativnih efekata (zagađenje vazduha, veći nivo buke, povećanje vremena putovanja, povećani broj saobraćajnih nezgoda, itd...). Saobraćajni inženjeri, planeri i gradske vlasti primenjuju različite upravljačke strategije kako bi smanjili nivo saobraćajnih zagušenja. Prilikom odlučivanja o načinu upravljanja saobraćajnim tokovima neophodno je analizirati namenu saobraćajnih traka prema tokovima vozila, ispunjenost kriterijuma za semaforizaciju, moguće načine upravljanja semaforima, mogućnosti uvođenja nekog od sistema koordinacije i slično. U izvesnoj meri upravljačke akcije zavise i od izabranog kriterijuma optimizacije (vreme putovanja vozila na mreži, broj zaustavljanja, broj vozila u redu, potrošnja goriva, emisije CO<sub>2</sub>, itd...).

U pojedinim gradovima ublažavaju se saobraćajna zagušenja primenom različitih mera za upravljanje saobraćajnim zahtevima (naplata korišćenja urbanih deonica, posebne trake za vozila sa više putnika, "car sharing", "park and ride", informacije o popunjenosti garaža, itd.). Analiza mera za upravljanje saobraćajnim zahtevima nije predmet ove doktorske disertacije.

Smanjenje nivoa saobraćajnih zagušenja moguće je ostvariti i povećanjem kapaciteta ulične mreže. S druge strane, povećanje kapaciteta ulične mreže podrazumeva velika investiciona ulaganja, negativno utiče na okolinu i često je uslovljeno prostornim ograničenjima. Istovremeno, teorijski rezultati, među kojima je najpoznatiji Braess paradoks, pokazuju da proširenje kapaciteta saobraćajne mreže ne dovodi uvek do najboljeg rešenja (Braess 1968).

Kada su dve ili više raskrsnica dovoljno bliske jedna drugoj (od 800 do 1000 m) tokovi vozila na jednoj raskrsnici utiču na tokove vozila drugih raskrsnica (nailazak vozila nije slučajan). U cilju što boljeg zadovoljenja postavljenih kriterijuma optimizacije, nameće se koordinisan rad svetlosnih signala između ovakvih raskrsnica. Ukoliko su vrednosti tokova vozila izraženije na jednom pravcu (koridoru) saobraćajne mreže često se uvodi linijska koordinacija rada susednih raskrsnica. Zonska koordinacija

rada svetslosnih signala se koristi u slučajevima kada su vrednosti saobraćajnih tokova relativno ravnomerne po granama mreže.

U ovom poglavlju biće opisan nov matematički model za optimizaciju rada svetlosnih signala u okviru određene zone grada. Zonsko upravljanje radom svetlosnih signala, koje je razvijeno u disertaciji, bazira se na metaheurističkoj metodi optimizacija kolonijom pčela (BCO). Zadatak je pronaći vrednosti ciklusa, raspodele zelenih vremena po fazama na raskrsnicama mreže, kao i pomake zelenog vremena na granama, tako da vreme koje provedu svi korisnici na mreži bude najmanje moguće.

## 6.1. Pregled literature

Problem upravljanja radom zone signalisanih raskrsnica spada u grupu najsloženijih zadataka u oblasti upravljanja saobraćajnim tokovima. Brojni autori su se bavili problemima upravljanja izolovanom raskrsnicom, kao i upravljanja raskrsnicama koje su deo linijske koordinacije. Od vremena kada je Gazis (1964) dve izolovane raskrsnice sa prezasićenim tokovima povezo u jedan funkcionalan sistem, interesovanje saobraćajnih inženjera za problem upravljanja zonom raskrsnica je raslo (Little 1966; Yagoda i ostali 1973; Gartner i ostali 1975; Gartner 1976; Davison i Edvard 1983; Marcotte 1983; Sheffi i Powell 1983; Park i ostali 1984; Luk 1984; Robertson i Bretherton 1991; Boillot 1992; Yang 1995; Cree i ostali 1999; Diakaki i ostali 2002; Gartner i Stamatiadis 2002; Hu i ostali 2015).

U poslednjoj deceniji pojavili su se radovi koji probleme upravljanja saobraćajnim tokovima rešavaju primenom algoritama zasnovanih na “inteligenciji grupe” (*eng. Swarm Intelligence*) (Beni 1988; Beni i Wang 1989; Beni i Hackwood 1992; Bonabeau i ostali 1999).

U okviru intelegencije grupe izučavaju se “sistemi sastavljeni od napravljenih individua (robota, na primer), ili virtuelnih individua koje komuniciraju između sebe, saraduju, izmenjuju informacije i znanje i obavljaju određene zadatke u okruženju u kome “žive” (Teodorović i Šelmić 2012).

Chen i Lihong (2006) su razvili model za rešavanje problema upravljanja radom svetlosnih signala primenom optimizacije grupom čestica (PSO). Autori su postavili fazi logički kontrolor, na svakoj od raskrsnica mreže, čime su dobili početna rešenja.

Primenom PSO metaheuristike poboljšavali su tako dobijena rešenja. Simulacija rezultata pokazala je da ovaj pristup sa uspehom rešava zadati problem. Zong i ostali (2014) su se bavili problemima evakuacije na mreži semaforisanih raskrsnica. Problem su takođe rešavali primenom PSO metaheuristike. Dobijeni rezultati pokazali su da predloženi algoritam postiže kraće vreme evakuacije od svih do tada poznatih pristupa. Olivera i ostali (2015) su razvili PSO pristup za optimizaciju signalnih planova na raskrsnicama. Predložena metodologija značajno redukuje emisije štetnih gasova (23.3 % CO i 29.3 % NOx), kao i potrošnju goriva. Gökçe i ostali (2015) su razvili nov model zasnovan na kombinaciji PSO algoritma i softvera za mikrosimulaciju saobraćajnih tokova – VISSIM. Autori su pokazali da promene u signalnom planu mogu značajno da utiču na vremenske gubitke vozila na kružnim raskrsnicama. Caselli i ostali (2015) su takođe razvili PSO algoritam za upravljanje svetlosnim signalima na raskrsnicama. Predloženi model je testiran na poznatim primerima iz literature i pokazuje znatan potencijal. Hu i ostali (2016) su predložili hibridni model, zasnovan na PSO algoritmu, za upravljanje grupom signalisanih raskrsnica u realnom vremenu. Meng i ostali (2016) su razvili model kojim se smanjuju zagušenja i emisija štetnih gasova na transportnim mrežama. Razvijeni model je formulisan kao problem matematičkog programiranja i rešavan pomoću PSO algoritma.

Modeli za rad koordinisanih signala na mreži raskrsnica u uslovima prezasićenih tokova mogu se naći kod sledećih autora: (Singh i Tamura 1974; D'ans i Gazis 1976; Lim i ostali 1981; Li i Gan 1999; Yuan i ostali 2006; El-Tantawy i ostali 2013).

TRANSYT je jedan od najpoznatijih softvera za koordinisano upravljanje radom svetlosnih signala u fiksnom režimu rada. Originalna verzija softvera TRANSYT je predložena u istraživanju Robertsona (1968). Softver proračunava upravljačke parametere rada raskrsnica (ciklus, zelena vremena i pomake zelenih vremena) pomoću genetskih algoritama. Više autora je analiziralo i poboljšavalo modele predložene u softverskom paketu TRANSYT (Chiou 1999; Wong i ostali 2002; Ceylan i Bell 2004).

Zavisnost vremenskih gubitaka na grani mreže u funkciji pomaka zelenih vremena moguće je naći u radu čiji su autori Gartner i Little (1973). U istom radu, autori su se bavili optimizacijom rada svetlosnih signala na mreži, gde su se pomaci zelenih vremena dobijali pomoću tehnike “Generalized Combination method”. Problemom pronalaženja

optimalnih vrednosti pomaka zelenih vremena bavili su se i Improta i Sforza (1982). Njihov model podrazumeva “branch and backtrack” metodu koja predlaže vrednosti pomaka zelenih vremena bez njihove zavisnosti od vremenskih gubitaka vozila. Autori navode da bi predloženi pristup bio pogodan za upravljanje u realnom vremenu.

Yang i Yagar (1994) su se bavili problemom upravljanja zonom raskrsnica u slučaju prezasićenih tokova. U predloženom konceptu autori su uzeli u obzir i redove koje čine neopslužena vozila na kraju ciklusa. Takođe su formulisali “bilevel traffic signal problem”. U “lower level” delu predložen je model koji vrši predikciju reakcije vozača na različite vrednosti upravljačkih promenljivih. U “upper level” delu izvršena je optimizacija rada svetlosnih signala uzimajući u obzir rute kojima se vozila kreću kroz zonu raskrsnica.

Pronalaženjem najkraćih puteva kroz mrežu semaforisanih raskrsnica bavili su se Chen i Yang (2000).

Zbog stohastičke prirode nailaska vozila na prilaze raskrsnice, kriterijumske funkcije koje se postavljaju kod optimizacije rada svetlosnih signala (vremenski gubici, broj zaustavljanja...) su aproksimativne i nelinearne prirode. Predlog linearizacije problema upravljanja saobraćajnim tokovima na mreži može se naći u radu Wey (2000).

Primer decentralizovanog upravljanja svetlosnim signalima na mreži sa fiksim ciklusom može se naći u radu Le i ostali (2015). Autori su potom koristili simulaciju kako bi pokazali da je njihov pristup kompatibilan sa modelima razvijenim u literaturi.

Različitim aspektima problema upravljanja zonom raskrsnica u realnom vremenu bavili su se i Gartner i ostali 2001; Dotoli i ostali 2006 i Nieto i ostali 2012.

Problemi linijske koordinacije rada svetlosnih signala nisu obuhvaćeni ovom disertacijom. U najznačajnije radove iz ove oblasti spadaju radovi Hillier i Rothery 1967; Michalopoulos i ostali 1980; Cohen i Little 1982; Gartner i ostali 1991; Papageorgiou 1994; He i ostali 2014.

Model za zonsko upravljanje koji je razvijen u ovoj doktorskoj disertaciji je testiran na mreži koju čine devet signalisanih raskrsnica. Mreža je preuzeta iz rada čiji su autori Gartner i ostali (1974). Rezultati dobijeni razvijenim modelom su poređeni sa rezultatima dobijenim pomoću simuliranog kaljenja (SA). Pokazano je da je model, koji



u svojoj osnovi ima BCO metaheuristiku, daje bolja rešenja od SA algoritma. Prikazani su i rezultati dobijeni pomoću komercijalnog softvera TRANSYT 7F.

## 6.2. Postavka problema

Neka je transportna mreža predstavljena u vidu grafa  $G = (N, A)$ . Ovakva notacija podrazumeva da je sa  $N$  označen skup raskrsnica na mreži, dok je sa  $A$  označen skup grana mreže, koji povezuju raskrsnice. Sa  $(i, j)$  je označena grana koji povezuje raskrsnicu  $i \in N$  i raskrsnicu  $j \in N$ . Sve grane u okviru transportne mreže su orjentisane. Grane omogućavaju protok saobraćaja u jednom ili u oba smera između dve raskrsnice.

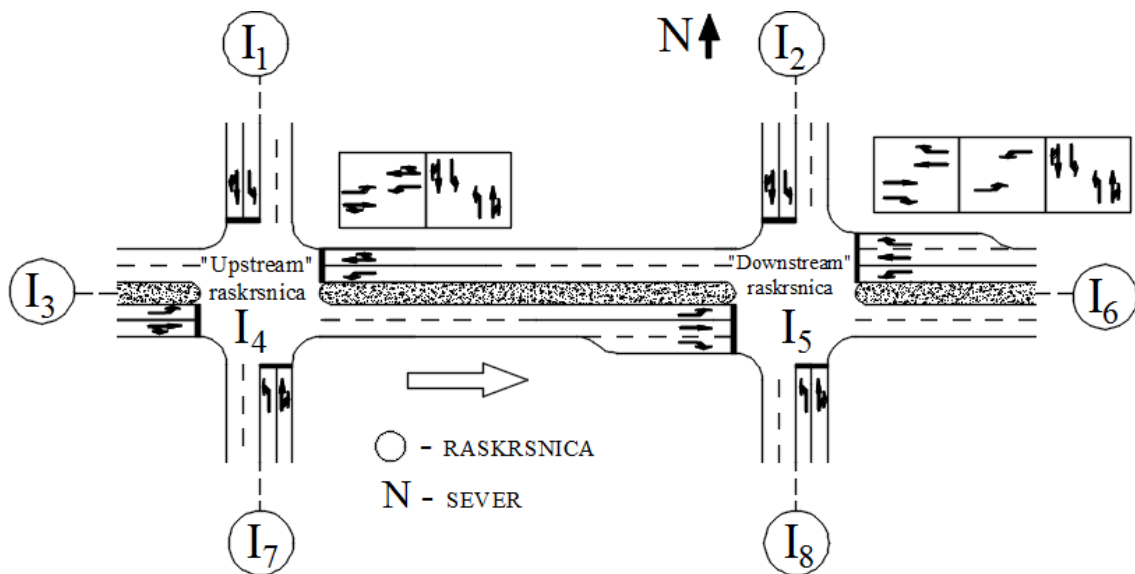
U okviru ove disertacije razmatrana je strategija upravljanja saobraćajnim tokovima u okviru fiksnog režima rada. U okviru zonskog upravljanja saobraćajnim tokovima ciklus je isti za sve raskrsnice na mreži. U cilju pronalaženja najboljeg mogućeg upravljanja grupom raskrsnica potrebno je odgovoriti na sledeća pitanja: (a) koja je najbolja vrednost ciklusa na mreži? (b) koja je najbolja raspodela zelenog vremena na faze svake od raskrsnica? (c) koje su najbolje vrednosti pomaka zelenog vremena na granama mreže?

Problem iznalaženja signalnog plana za zonu raskrsnica, koji je razmatran u okviru ove disertacije, može biti formulisan na sledeći način: Za definisani plan faza za svaku od raskrsnica unutar zone odrediti ciklus, raspodelu zelenog vremena za svaku raskrsnicu i vrednosti pomaka zelenog vremena na granama, na taj način da ukupno vreme putovanja svih vozila u zoni bude najmanje moguće tokom posmatranog intervala vremena.

### 6.2.1. Saobraćajni model

S obzirom da rešavamo problem upravljanja u fiksnom režimu rada, moguće je uvesti sledeće pretpostavke: saobraćajni tokovi na ulaznim granama mreže su poznati; poznati su istorijski podaci o raspodeli vozila po granama za tokove pravo, levo i desno.

Saobraćajni model je osmišljen tako da vozila popunjavaju granu po granu mreže. Broj vozila na prethodnoj ("downstream") raskrsnici zavisi od broja vozila na narednoj ("upstream") raskrsnici. Način na koji saobraćajni model funkcioniše ilustrovaćemo na sledećem primeru. Deo saobraćajne mreže je prikazan na slici 6.1.



Slika 6.1. Mreža raskrsnica i saobraćajni model

Analizirajmo saobraćajni tok na grani između raskrsnice I4 (“upstream”) i raskrsnice I5 (“downstream”). Ukupan broj vozila na grani 4-5 je jednak sumi svih vozila koja na granu 4-5 stižu sa “upstream” raskrsnice I4. Potrebno je izvršiti distribuciju vozila grane 4-5 na trake za levo, pravo i desno “downstream” raskrsnice I5. Raspodela ovih vozila se vrši proporcijalno prema dostupnim istorijskim podacima.

Razmotrimo sledeći scenario:

1. Broj vozila koja dolaze na granu 4-5 sa raskrsnice I4 jednak je 1000 voz/h.
2. Istorijski podaci o raspodeli vozila, na “downstream” trakama za levo, pravo i desno raskrsnice I5, su procentualno jednaki: 20%, 60%, i 20%, respektivno. Prema tome, broj vozila na trakama za levo, pravo i desno raskrsnice I5 nalazi se jednostavno na sledeći način:

Traka levo:  $0,2 \cdot 1000 = 200$  voz/h.

Traka pravo:  $0,6 \cdot 1000 = 600$  voz/h.

Traka desno:  $0,2 \cdot 1000 = 200$  voz/h.

Pretpostavimo da vozila imaju “ravnomernu raspodelu nailaska“ (eng. periodical arrival pattern) na prilazu  $j$ -toj raskrsnici, prikazanu na slici 6.2. Trenutak  $t_0$  na vremenskoj osi je uzet kao početni trenutak kada se javljaju vozila na grani  $(i, j)$ . Neka  $f$ -

ta faza upravlja  $j$ -tom raskrsnicom. Trajanje  $f$ -te faze (označeno sa  $g_f$ ) počinje u trenutku  $t_1$  i završava se u trenutku  $t_2$ . Tokom trajanja  $f$ -te faze,  $j$ -tom raskrsnicom prolaze vozila označena sa  $q_{ij}$ , koja se računaju kao:

$$q_{ij} = \sum_{k \in K} \alpha_{kij} \cdot q_k \quad (6.1)$$

gde su:

$$\alpha_{kij} = \begin{cases} 1 & \text{ako } k\text{-ta traka pripada linku } (i, j) \\ 0 & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

$q_k$  - protok vozila u  $k$ -toj traci (voz/h).

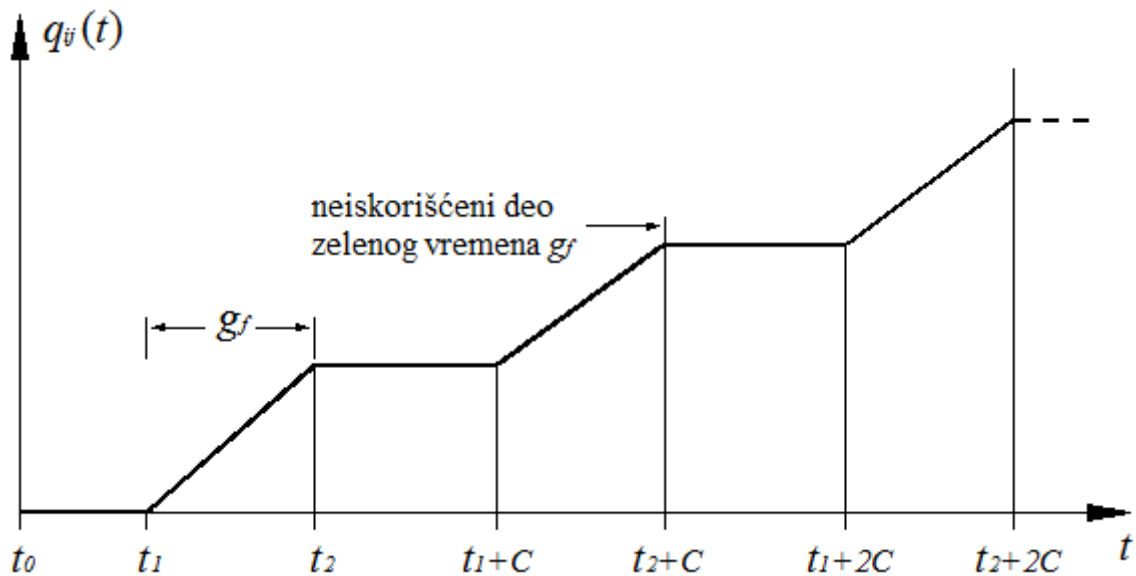
$f$ -ta faza se periodično ponavlja, a ciklus ( $C$ ) predstavlja period ponavljanja.

Na slici 6.2 prikazana je akumulacija vozila  $q_{ij}$  u vremenu  $t$ , koja su prošla raskrsnicom tokom trajanja  $f$ -te faze. Već je naznačeno da  $f$ -ta faza upravlja  $j$ -tom raskrsnicom. Razmotrimo sada tri slučaja koja se mogu desiti prilikom prolazaka  $q_{ij}$  vozila  $j$ -tom raskrsnicom tokom trajanja  $f$ -te faze:

*Slučaj 1:* Sva vozila, koja su se nakupila od trenutka  $t_0$  do trenutka  $t_1$ , prolaze raskrsnicom tako da poslednje vozilo prolazi baš u trenutku  $t_2$ , tj. na kraju trajanja vremena  $g_f$  (vidi sliku 2). U ovom slučaju kažemo da imamo zasićen saobraćajni tok.

*Slučaj 2:* Sva vozila, koja su se nakupila od trenutka  $t_2$  do trenutka  $t_1 + C$ , prolaze raskrsnicom tako da poslednje vozilo prolazi pre trenutka  $t_2 + C$ . (videti sliku 6.2.). U ovom slučaju javlja se deo vremena  $g_f$  koji je neiskorišćen (tokom njega vozila ne prolaze raskrsnicom) i tada kažemo da imamo nezasićen saobraćajni tok (videti sliku 6.2.).

*Slučaj 3:* Razmotrimo neki  $n$ -ti period ponavljanja u kome se vozila prikupljaju od trenutka  $t_2 + nC$  do trenutka  $t_1 + (n+1)C$ . Ukoliko sva nakupljena vozila nisu uspela da prođu raskrsnicom do trenutka  $t_2 + (n+1)C$  kažemo da imamo prezasićen saobraćajni tok.



Slika 6.2. Periodična raspodela nailazaka vozila na prilazima raskrsnice

Sa upravljačkog aspekta povoljniji su slučajevi 1 i 2, dok se slučaj 3 smatra nepovoljnim. Kada se na grani  $(i, j)$  javi slučaj 3, vozila koja nisu uspeła da prođu raskrsnicom, tokom trajanja  $f$ -te faze u  $n$ -tom periodu posmatranja, formiraju red i čekaju sledeći,  $n+1$  period da prođu raskrsnicom. Ovako formiran red remeti koordinaciju. U ovom slučaju postavljanje pomaka zelenog vremena na grani  $(i, j)$  više nema smisla, a kao posledica postojanja reda rastu i vremenski gubici vozila na prilazu  $j$ -toj raskrsnici  $d(C)_{ij}$ . Zbog svega iznetog, model predložen u ovom radu primenljiv je samo u slučajevima 1 i 2. Drugim rečima, model nije primenljiv kada na raskrsnicama vladaju prezasićeni tokovi.

### 6.2.2. Matematička formulacija problema

Sa  $K$  je označen skup svih traka na raskrsnici ( $k = 1, 2, \dots, K$ ). Vremenski gubici vozila  $d(C)_{ij}$ , na grani  $(i, j)$ , računaju se na sledeći način (HCM 2000):

$$d(C)_{ij} = \sum_{k \in K} \alpha_{kij} \cdot (d_{1k} \cdot (PF) + d_{2k}) \quad (6.2)$$

$$d_{1k} = \frac{0.5 \cdot C \cdot \left(1 - \frac{g_k}{C}\right)^2}{1 - \left[\min\left(1, X_k\right) \cdot \frac{g_k}{C}\right]} \quad (6.3)$$

$$d_{2k} = 900T \left[ (X_k - 1) + \sqrt{(X_k - 1)^2 + \frac{4 \cdot X_k}{c_k T}} \right] \quad (6.4)$$

gde su:

$X_k$  – stepen zasićenja  $k$ -te trake,

$c_k$  – kapacitet  $k$ -te trake (voz/h),

$g_k$  – zeleno vreme  $k$ -te trake (s),

$C$  – ciklus na mreži (s),

$$\alpha_{kij} = \begin{cases} 1 & \text{ako } k \text{ - ta traka pripada grani } (i, j) \\ 0 & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

$T$  – trajanje perioda analize [Hr],

$PF$  – faktor progresije.

U ovom poglavlju neke od oznaka biće ponovljene zbog bolje preglednosti, iako su iste korišćene u prethodnim poglavljima.

Faktor  $PF$  se odnosi na kvalitet progresije i u funkciji je onog dela vozila, od ukupnog broja vozila na grani  $(i, j)$ , koja prođu tokom zelenog svetla na  $j$ -toj raskrsnici, u okviru jednog ciklusa. Za potrebe ovog modela usvajaju se bazne vrednosti  $PF$  fakora, koje su preporučene u HCM (2000). Ove preporučene vrednosti su prikazane u numeričkom primeru (poglavlje 6.4., tabela 6.2.).

Razmotrimo za trenutak samo  $j$ -tu raskrsnicu. Kada vozila imaju periodičan raspored nailazaka, kao što je prikazano na slici 6.2., prosečni vremenski gubici u jedinici vremena, kao funkcija postavljenog pomaka zelenog vremena na grani,  $d_{ij}(\theta_{ij})$ , računaju se kao (Gartner i Little 1973):

$$d_{ij}(\theta_{ij}) = \begin{cases} \sum_{f \in F} \frac{r_f}{g_f} \cdot (t_{ij} - \theta_{ij}) \cdot \beta_{fij} & \text{ako je } t_{ij} - g_f \leq \theta_{ij} \leq t_{ij} \\ \theta_{ij} - t_{ij} & \text{ako je } t_{ij} \leq \theta_{ij} \leq \sum_{f \in F} (t_{ij} + r_f) \cdot \beta_{fij} \end{cases} \quad (6.5)$$

gde su:

$$\beta_{fij} = \begin{cases} 1 & \text{ako } f \text{ - ta faza upravlja } j \text{-tom raskrsnicom na grani } (i, j) \\ 0 & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

$r_f$  - crveno vreme  $f$ -te faze (s),

$\theta_{ij}$  - razlika između dve inicijalizacije zelenog vremena (razlika između vremena kada se na “upstream” raskrsnici ( $i$ ) upali zeleni signalni pojam i kada se na “downstream” raskrsnici ( $j$ ) upali zeleni signalni pojam) naziva se pomakom zelenog vremena (offset). (Roess i ostali 2011).

Neka je sa  $t_{ij}$  označeno vreme putovanja vozila duž grane ( $i,j$ ). Vreme putovanja  $t_{ij}$  se računa pomoću sledeće formule (Bureau of Public Roads):

$$t_{ij} = t_{ij}^0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{q_{ij}}{c_{ij}} \right)^\beta \right] \quad (6.6)$$

gde su:

$t_{ij}^0$  - vreme putovanja na grani ( $i,j$ ) u funkciji brzine slobodnog toka [s],  $t_{ij}^0 = l_{ij}/v_{ij}$ ;

$l_{ij}$  - dužina grane ( $i,j$ ) [m];

$v_{ij}$  - brzina slobodnog toka [m/s];

$q_{ij}$  - broj vozila na grani ( $i,j$ ), (videti formulu 6.1) [voz/h] ;

$c_{ij}$  - kapacitet grane ( $i,j$ ) [voz/h];

Empirijskim putem dobijene su vrednosti za parametre:  $\alpha = 0.15$  i  $\beta = 4$ .

Kriterijumska funkcija predstavlja ukupno vreme putovanja svih vozila u zoni raskrsnica ( $TTT$ ) i ima sledeći oblik:

$$TTT = \sum_{(i,j) \in A} TTT_{ij} = \sum_{(i,j) \in A} q_{ij} \cdot d_{ij} \quad (6.7)$$

kako je:

$$d_{ij} = d(C)_{ij} + d(\theta)_{ij} + t_{ij} \quad (6.8)$$

dobija se sledeći izraz:

$$TTT = \sum_{(i,j) \in A} q_{ij} \cdot (d(C)_{ij} + d(\theta)_{ij} + t_{ij}) \quad (6.9)$$

gde su:

$A$  - skup svih grana mreže,

$(i, j)$  - grana koja povezuje raskrslnicu  $i \in N$  sa raskrslnicom  $j \in N$ .

$d_{ij}$  - ukupni prosečni vremenski gubici vozila na grani  $(i, j)$  [s/voz],

$t_{ij}$  - vreme putovanja vozila na grani  $(i, j)$  [s],

$q_{ij}$  - broj vozila na grani  $(i, j)$ , (videti formulu 6.6) (voz/h).

Matematička formulacija problema upravljanja saobraćajnim tokovima na zoni raskrslnica ima sledeći oblik:

*Minimizirati*

$$TTT \quad (6.10)$$

*pri ograničenjima:*

$$\sum_{f \in F_i} g_f = C - L_i \quad \forall i \in N \quad (6.11)$$

$$\sum_{(i,j) \in L_{p1}} \theta_{ij} + \sum_{(i,j) \in L_{p2}} (C - \theta_{ij}) = n_p \cdot C \quad \forall p \in P \quad (6.12)$$

$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \quad (6.13)$$

$$g_{f \min} \leq g_f \leq g_{f \max} \quad \forall f \in F \quad (6.14)$$

$$0 \leq \theta_{ij} \leq C \quad \forall (i, j) \in A \quad (6.15)$$

$$n_p \text{ je celobrojno} \quad \forall p \in P \quad (6.16)$$

gde su:

$C_{\min}$  – minimalna vrednost promenljive  $C$ ,

$C_{\max}$  – maksimalna vrednost promenljive  $C$ ,

$g_{f \min}$  – minimalna vrednost promenljive  $g_{fi}$ ,

$g_{f \max}$  – maksimalna vrednost promenljive  $g_{fi}$ ,

$F = \{f\}$  – skup svih faza svih raskrslnica na mreži,

$f$  - indeks faze,  $f=1, 2, \dots |F|$ ,

$F_i$  – skup svih faza koje upravljaju  $i$ -tom raskrslnicom,

$L_i$  – izgubljeno vreme tokom ciklusa na  $i$ -toj raskrslnici,

$N$  – skup čvorova mreže,

$i$  – indeks čvora,  $i = 1, 2, \dots |N|$ ,

$P = \{p\}$  – skup petlji na mreži,

$p$  – indeks petlje,  $p = 1, 2, \dots |P|$ ,

$L_{p1}$  – skup grana  $p$ -te petlje koje su u usvojenom smeru,

$L_{p2}$  – skup grana  $p$ -te petlje koje nisu u usvojenom smeru,

$n_p$  – multiplikator ciklusa,

$A$  – skup svih grana mreže,

$(i, j)$  – grana koji povezuje raskrnicu  $i \in N$  sa raskrnicom  $j \in N$ .

Kriterijumska funkcija (6.10), koju je potrebno minimizirati, predstavlja ukupno vreme putovanja svih vozila na mreži raskrznica, koje su deo zonske koordinacije. Odnos između ciklusa, zelenih vremena na raskrnicama i izgubljenog vremena tokom ciklusa opisan je ograničenjem (6.11). Uslov potreban za proračun pomaka zelenog vremena na mreži definisan je ograničenjem (6.12). Ograničenje (6.13) definiše dozvoljeni interval u kome se mogu naći vrednosti ciklusa. Ograničenje (6.14) se odnosi na dozvoljeni interval u kome se mogu naći vrednosti zelenih vremena koja su dodeljena fazama pojedinih raskrznica. Ograničenje (6.15) daje dozvoljeni interval u kome se mogu naći vrednosti pomaka zelenog vremena na granama mreže. Vrednosti celobrojnog multiplikatora ciklusa, koji uzima različite vrednosti u odnosu na određene petlje mreže, definisane su ograničenjem (6.16).

Zadatak je odrediti dovoljno dobra rešenja (optimalne ili bliske optimalne vrednosti upravljačkih promenljivih (ciklus, raspodele zelenih vremena po fazama i pomaci zelenog vremena) tako da ukupno vreme putovanja svih vozila na mreži bude najmanje moguće. Pretpostavka je da je plan faza unapred zadat za svaku od raskrznica.

### **6.3. Predloženo rešenje problema bazirano na BCO algoritmu**

U ovom poglavlju biće izloženo predloženo rešenje zadanog problema bazirano na BCO algoritmu, i to njegovoj verziji sa poboljšanjima. Na početku procesa pretrage svi veštački agenti (pčele) se nalaze u košnici. Košnica predstavlja jednu veštačku lokaciju. U prvom koraku ćemo generisati inicijalno rešenje (inicijalni signalni plan). U sledećem koraku, veštačke pčele pretražuju prostor dopustivih rešenja trudeći se da



poboljšaju postavljeno inicijalno rešenje. Modifikacija rešenja se odvija kroz  $NP$  letova unapred u okviru jedne iteracije.

### 6.3.1. Generisanje inicijalnog rešenja

U cilju pronalazanja inicijalnog rešenja predlaže se sledeći heuristički Algoritam 1, osmišljen posebno za ovaj model:

---

**Algoritam 1. Heuristički algoritam za generisanje inicijalnog rešenja.**

---

1. *Odrediti vrednost ciklusa na mreži.*
  2. *Raspodeliti zeleno vreme na sve faze za svaku raskrsnicu.*
  3. *Proračunati pomake zelenog vremena (videti Algoritam 2).*
- 

U prvom koraku Algoritma 1 proračunata je vrednost ciklusa na “kritičnoj” raskrsnici pomoću poznate Websterove fomule. Posle toga, u koraku 2, dodeljene su vrednosti zelenih vremena svakoj od faza. Raspodela zelenih vremena na faze je izvršena pomoću Websterove metode (Webster 1958). Kritična raskrsnica je ona raskrsnica sa najvećom vrednošću sume odnosa protoka i zasićenog toka po trakama. Neka je raskrsnica  $j$  kritična raskrsnica. Tada važi:

$$\sum_{k \in K} \delta_{kj} \cdot \frac{q_k}{s_k} \geq \sum_{k \in K} \delta_{ki} \cdot \frac{q_k}{s_k} \quad \forall i \in N \quad (6.17)$$

gde je:

$$\delta_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{ako traka } k \text{ pripada } i\text{-toj raskrsnici,} \\ 0 & \text{u suprotnom;} \end{cases}$$

Pomaci zelenog vremena na granama mreže se računaju pomoću heurističkog Algoritma 2, osmišljenog za inicijalizaciju početnog rešenja:

---

**Algoritam 2. Postavljanje pomaka zelenih vremena na granama mreže**

---

4. *Izračunati indeks performanse  $PI$  za svaku granu mreže.*
  5. *Pretpostaviti da vrednost indeksa performanse  $PI_{ij}$  na svakoj grani  $(i,j)$  predstavlja dužinu grane. Naći maksimalno razapinjuće drvo tako definisane transportne mreže.*
  6. *Dodeliti odgovarajuće pomake zelenog vremena svim granama mreže koje pripadaju maksimalnom razapinjućem drvetu.*
  7. *Postaviti pomake zelenog svetla na ostalim granama mreže.*
-

Indeks performanse  $PI_{ij}$  grane  $(i,j)$  predstavlja proizvod protoka na grani  $q_{ij}$  i vremena putovanja duž grane  $t_{ij}$ :

$$PI_{ij} = q_{ij} \cdot t_{ij} \quad (6.18)$$

gde su:

$t_{ij}$  – vreme putovanja duž grane  $(i, j)$ , (videti formulu 6.6) [s],

$q_{ij}$  – broj vozila na grani  $(i, j)$ , (videti formulu 6.1) (voz/h).

Vreme putovanja  $t_{ij}$  predstavlja ujedno i idelan pomak zelenog vremena na grani  $(i,j)$ .

Pomoću slike 6.3. biće bliže objašnjeno postavljanje inicijalnog pomaka zelenog vremena na mreži. Neka je vrednost ciklusa usvojena tako da je  $C = 70s$ . U prvom koraku granama mreže dodeljujemo vrednosti indeksa performasne  $PI$ . Grana  $(2, 1)$  ima vrednost 4200, grana  $(1, 4)$  vrednost 3750, itd. U drugom koraku, pronalazimo maksimalno razapinjuće drvo. Maksimalno razapinjuće drvo generisaćemo primenom Kruskalovog algoritma. Sortirajmo dužine grana u opadajućem poretku od najveće prema najmanjoj vrednosti. Idelani pomaci zelenog vremena se dodeljuju granama maksimalnog razapinjućeg drveta. Idealni pomaci zelenog vremena na granama  $(2, 1)$ ,  $(4, 1)$  i  $(4, 3)$  iznose  $\theta_{21} = 30$  s,  $\theta_{41} = 25$  s i  $\theta_{43} = 30$  s.

U cilju dodeljivanja vrednosti pomaka zelenog vremena na ostalim granama mreže u proračun se uvode petlje na mreži. Drugim rečima, u obzir se uzimaju grane koje, kada se dodaju već formiranoj mreži, stvaraju petlje. Na primer, dodavanjem grane  $(1, 4)$  kreira se petlja  $(1, 4, 1)$ . Na isti način, dodavanjem grane  $(3, 4)$  kreirana je petlja  $(3, 4, 3)$  i dodavanjem grane  $(3, 2)$  kreirana je petlja  $(3, 2, 1, 4, 3)$ . Kod proračuna pomaka zelenog vremena razmatra se jedna po jedna grana, počevši od onih koje formiraju petlje sa najmanjim brojem grana. U razmatranom primeru, prikazanom na slici 6.3., petlja kojoj pripada grana  $(1, 4)$  ima dve grane, petlja kojoj pripada grana  $(3, 4)$  ima dve grane i petlja kojoj pripada grana  $(3, 2)$  ima četiri grane. Prvo je razmatrana petlja  $(1, 4, 1)$ . Ova petlja sadrži grane  $(1, 4)$  i  $(4, 1)$ . Prema tome,  $\theta_{14} + \theta_{41} = C$ , kako je  $\theta_{41} = 25$ , pomak zelenog vremena grane  $(1, 4)$  se računa na sledeći način:  $\theta_{14} = C - \theta_{41} = 70\text{ s} - 25\text{ s} = 45\text{ s}$ . Na isti

način, moguće je odrediti vrednost pomaka zelenog vremena grane (3, 4). U tom slučaju:  
 $\theta_{34} = C - \theta_{43} = 70 \text{ s} - 30 \text{ s} = 40 \text{ s}$ .

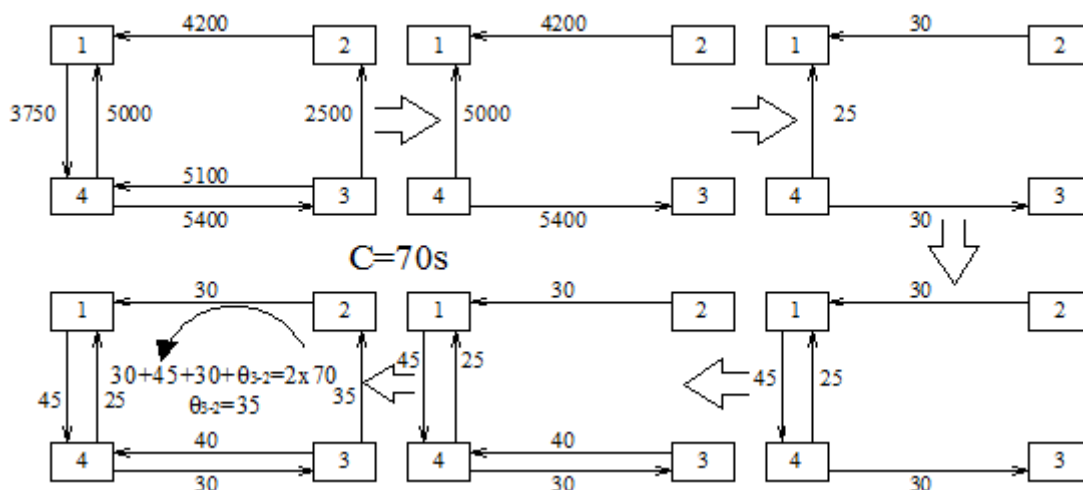
Proces je nešto komplikovaniji kada petlju čine više od dve grane. Na primer dodavanjem grane (3, 2) formira se petlja sa četiri grane: (3, 2), (2, 1), (1, 4) i (4, 3). Prvo je potrebno usvojiti smer petlje. Neka je izabran sledeći smer, suprotan od smera kazaljke na satu:  $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$ . Za grane petlje koje su u usvojenom smeru petlje, privremena vrednost pomaka zelenog vremena na grani ( $\theta_{ij}^{temp}$ ) je ista kao ona koja je već izračunata za tu granu ( $\theta_{ij}^{temp} = \theta_{ij}$ ). Za grane koje već imaju svoje pomake, ali čiji smerovi nisu u usvojenom smeru petlje, privremene vrednosti pomaka se računaju na sledeći način:  $\theta_{ij}^{temp} = C - \theta_{ij}$ , gde je  $C$  vrednost ciklusa, a  $\theta_{ij}$  originalna vrednost pomaka na grani ( $i, j$ ). U razmatranom primeru smerovi grana ((2, 1), (1, 4) i (4, 3)) su u usvojenom smeru petlje. U skladu sa tim, zadržavaju se originalne vrednosti pomaka na sve tri grane petlje:  $\theta_{21}^{temp} = \theta_{21} = 30$ ,  $\theta_{14}^{temp} = \theta_{14} = 45$  i  $\theta_{43}^{temp} = \theta_{43} = 30 \text{ s}$ . U sledećem koraku izračunaćemo zbir privremenih vrednosti pomaka zelenih vremena na granama petlje:  $Z = \theta_{21}^{temp} + \theta_{14}^{temp} + \theta_{43}^{temp}$ .

Pomak na grani (3, 2) se računa na sledeći način:  $\theta_{32} = n_p \cdot C - Z$ , pri čemu se vrednost celobrojnog multiplikatora ciklusa petlje ( $n_p$ ) računa na sledeći način:

$$n_p = \left\lceil \frac{Z}{C} \right\rceil \quad (6.19)$$

U razmatranom primeru:  $n_p = \left\lceil \frac{105}{70} \right\rceil = 2$ , pa iz toga sledi da je vrednost pomaka na grani (3, 2):  $\theta_{32} = 2 \cdot 70 - 105 = 35 \text{ s}$ .

Posle ovog proračuna, poništavaju se sve privremene vrednosti pomaka na granama razmatrane petlje i vraćaju se originalne vrednosti.



Slika 6.3. Postavljanje inicijalnih vrednosti pomaka zelenih vremena na mreži

Rešenje generisano na opisan način predstavlja inicijalno rešenje na početku svake od iteracija. Ovakvo rešenje pčele modifikuju tokom svojih letova unapred, tragajući za boljim.

### 6.3.2. Modifikacija rešenja

U svakom letu unapred veštačke pčele naprave  $NC$  modifikacija svojih rešenja. Jedna iteracija je gotova kada se let unapred i let unazad izvedu  $NP$  puta. Predlaže se sledeći Algoritam 3 za modifikaciju rešenja:

---

#### **Algorithm 3. Modifikacija rešenja**

---

1. Modifikovati vrednost ciklusa na mreži.
  2. Odrediti vrednost zelenih vremena za svaku od faza na svim raskrscima mreže (videti Algoritam 4.).
  3. Modifikovati vrednost pomaka zelenog vremena (videti Algoritam 5.).
  4. Odrediti vrednost kriterijumske funkcije.
- 

#### **Modifikacija vrednosti ciklusa na mreži**

Neka je sa  $C$  označena trenutna vrednost ciklusa na mreži. Nova vrednost ciklusa ( $C_{new}$ ) se generiše na slučajan način iz sledećeg intervala:

$$\max \{C - k s, C_{\min}\} \leq C_{new} \leq \min \{C + k s, C_{\max}\} \quad (6.20)$$

Posle izvršene modifikacije rešenja na celoj mreži, interval definisan formulom 6.20 sprečava izlazak iz okoline rešenja koje je prethodno pronašao veštački agent (pčela). Bez parametra  $k$ , novo rešenje bilo bi značajno izmenjeno u odnosu na prethodno, čime bi se došlo u opasnost da se izgube “dobra” rešenja. Tokom brojnih testiranja, pokazalo se da rizik “zaglavljivanja” optimizacije u nekom od lokalnih optimuma nije značajan. Inicijalna vrednost koja se predlaže za  $k$  je 3 s. Na kraju poglavlja biće data analiza sa različitim vrednostima za parametar  $k$ .

### **Modifikacije zelenih vremena**

Za modifikaciju zelenih vremena predlaže se heuristički Algoritam 4 koji je predstavljen sledećim pseudokodom:

---

#### **Algoritam 4. Modifikacija zelenog vremena po fazama**

---

1. Izračunati  $Y_f$  za svaku fazu na svim raskrsnicama mreže.
  2. Izračunati  $\Delta C = C_{new} - C$
  3. **if**  $\Delta C > 0$  **then**
  4.     Dodati  $\Delta C$  sekunde zelenog vremena na faze koristeći generator slučajnih brojeva i formulu (6.22).
  5. **else if**  $\Delta C < 0$  **then**
  6.     Oduzeti  $\Delta C$  sekunde zelenog vremena fazama koristeći generator slučajnih brojeva i formulu (6.23).
  7. **else**
  8.     Ne menjati postojeće vrednosti faza.
- 

Vreme  $\Delta C$  se raspoređuje na faze proporcionalno vrednostima  $Y_f$ , koje se računaju na sledeći način:

$$Y_f = \max_k z_{kf} \cdot \frac{q_k}{s_k}, \quad f \in F \quad (6.21)$$

gde su:

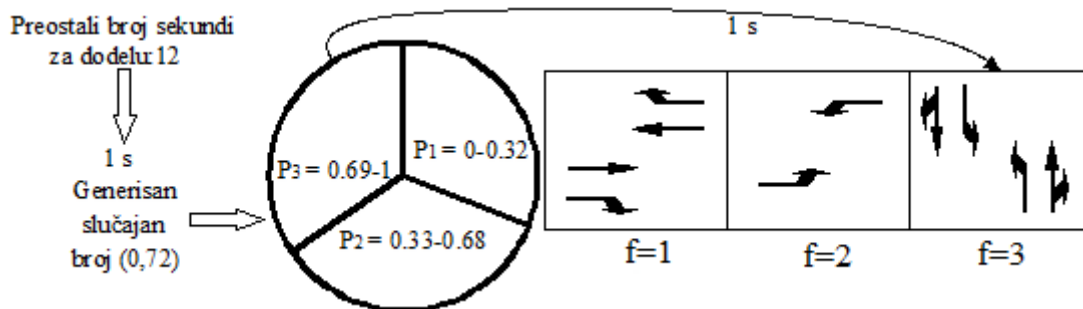
$$z_{kf} = \begin{cases} 1 & \text{ako traka } k \text{ pripada fazi } f \\ 0 & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

$q_k$  - protok vozila u  $k$ -toj traci (voz/h)

$s_k$  - zasićeni tok  $k$ -te trake (voz/h).

U slučaju kada je  $\Delta C > 0$ , vreme  $\Delta C$  se dodaje fazama. Distribucija vremena se vrši jednu po jednu sekundu. Verovatnoća da će jedna sekunda biti dodata fazi  $f$  jednaka je (slika 6.4.):

$$P_f = \frac{Y_f}{\sum_{f' \in F_i} Y_{f'}}, \quad \forall f \in F_i, i \in N \quad (6.22)$$



Slika 6.4. Modifikacija zelenog vremena u slučaju kada je  $\Delta C > 0$

U slučaju kada je  $\Delta C < 0$ , vreme  $\Delta C$  se oduzima fazama. Oduzimanje vremena se vrši jednu po jednu sekundu. Verovatnoća da će jedna sekunda biti oduzeta fazi  $f$  jednaka je:

$$Q_f = 1 - P_f, \quad \forall f \in F \quad (6.23)$$

gde se:  $P_f$  proračunava prema formuli (6.22).

### **Modifikacija pomaka zelenih vremena**

Modifikacija pomaka zelenog vremena se vrši tako što se u okviru petlji na slučajan način oduzimaju ili dodaju sekunde. Prilikom modifikacije vrednosti pomaka zelenog vremena potrebno je voditi računa da ni jedno ograničenje iz matematičke formulacije nije zanemareno. Heuristički Algoritam 5, za modifikaciju pomaka zelenog vremena, sastoji se iz sledećih koraka:

---

**Algoritam 5. Modifikacija pomaka zelenog vremena**

---

1. Odrediti skup petlji u okviru kojih je potrebno modifikovati vrednosti pomaka zelenog vremena na granama mreže ( $P^*, P^* \subseteq P$ ).
  2. Izračunati  $\Delta C$ ,  $\Delta C = C_{new} - C$ .
  3. **do**
  4. Iz skupa  $P^*$  uzeti jednu petlju sa najmanjim brojem grana. Neka je ta petlja označena sa  $p$ ,  $p \in P^*$ .
  5. Odrediti nove vrednosti pomaka zelenog vremena za svaku granu te petlje uzimajući u obzir staru vrednost pomaka zelenog vremena i vrednost  $\Delta C$ .
  6. Izbaciti petlju  $p$  iz skupa  $P^*$ ,  $P^* = P^* \setminus \{p\}$ .
  7. **while** skup  $P^*$  ne postane prazan skup.
- 

Broj elemenata skupa  $P^*$  se dobija na osnovu relacije (Improta i Sforza 1982):

$$|P^*| = |A| - |N| + 1 \quad (6.24)$$

U daljem tekstu predstavljeno je, kroz primer dat na slici 6.5., kako funkcioniše algoritam za modifikaciju pomaka zelenog vremena na mreži.

Neka su na početku modifikacije vrednosti pomaka zelenog vremena iste kao one sa slike 6.3., kod uspostavljanja inicijalnih vrednosti. Nova, slučajno generisana vrednost ciklusa je  $C_{new} = 75$  s. Stara vrednost ciklusa iznosila je  $C = 70$  s. U skladu sa tim važi da je:  $\Delta C = C_{new} - C = 75 - 70 = 5$  s. Skup  $P^*$  sadrži tri petlje: Prva petlja sadrži grane: (1, 4) i (4, 1); Druga petlja sadrži grane: (3, 4) i (4, 3); Treća petlja sadrži grane: (3, 2), (2, 1), (1, 4) i (4, 3).

Prve dve petlje se sastoje od po dve grane. Na slučajan način dodajemo  $\Delta C$  sekunde, i to sekundu po sekundu, postojećim vrednostima pomaka zelenog vremena na granama. Neka su posle ovog koraka dobijene sledeće vrednosti pomaka zelenog vremena na granama:  $\theta_{14} = 48$ ,  $\theta_{41} = 27$ ,  $\theta_{34} = 44$  i  $\theta_{43} = 31$  s.

U slučaju kada je broj grana u sastavu petlje veći od dva potrebno je, pre svega, usvojiti smer takve petlje. U sledećem koraku je potrebno proračunati zbir trenutnih vrednosti pomaka zelenog vremena unutar petlje ( $Z$ ), a potom odrediti vrednosti za  $n_p$  i  $Z^*$ . Veličina  $Z^*$  predstavlja zbir nepoznatih pomaka zelenog vremena petlje. Vrednosti

nepoznatih pomaka zelenog vremena unutar petlje određuju se na slučajan način uzimajući u obzir veličinu  $Z^*$  i ukupan broj nepoznatih pomaka zelenog vremena.

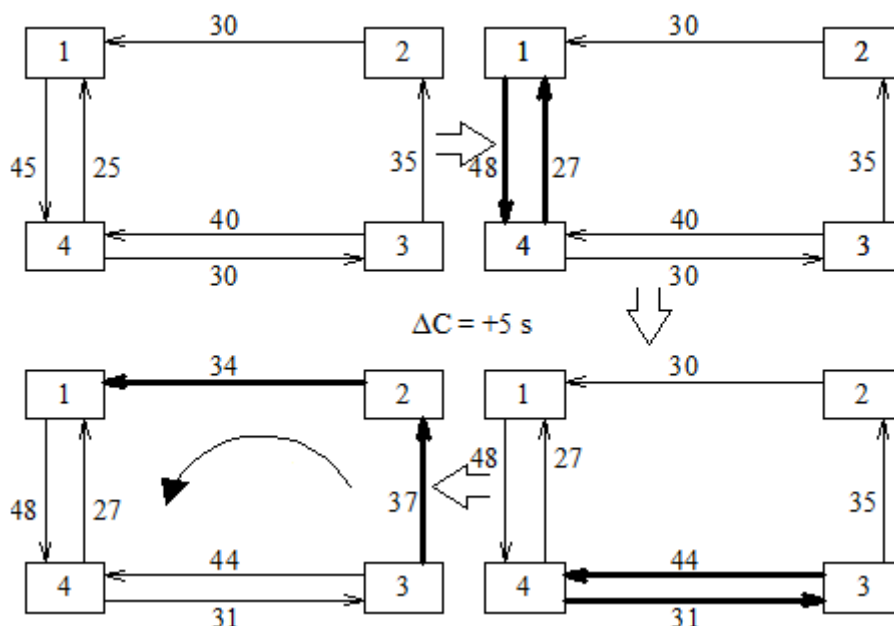
Na snovu iznetog, prikazano je kako se računaju nepoznati pomaci zelenog vremena na granama (2, 1) i (3, 2) u datom primeru. U prvom koraku usvajamo smer petlje. Neka petlja ima sledeći smer:  $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$ . Kao što se može primetiti, smerovi grana (1, 4) i (4, 3) su isti kao i usvojeni smer petlje. Zbog toga su privremene vrednosti pomaka zelenog vremena ovih grana jednake:  $\theta_{14}^{temp} = \theta_{14} = 48$  i  $\theta_{43}^{temp} = \theta_{43} = 27$  s. Zbir privremenih vrednosti je:  $Z = \theta_{14}^{temp} + \theta_{43}^{temp} = 79$  s

U sledećem koraku ćemo izračunati vrednost celobrojnog multiplikatora ciklusa:

$$n_p = \left\lceil \frac{Z}{C} \right\rceil = \left\lceil \frac{79}{75} \right\rceil = 2. \text{ Uzimajući u obzir da je: } Z^* = \theta_{32} + \theta_{21}, \text{ i da je: } Z^* = n_p \cdot C - Z,$$

sledi da je:  $Z^* = n_p \cdot C - Z = 2 \cdot 75 - 79 = 71$  s, odnosno sledi da je:  $\theta_{32} + \theta_{21} = 71$  s

U poslednjem koraku se na slučajan način dodeljuju vrednosti nepoznatim pomacima zelenih vremena  $\theta_{32}$  i  $\theta_{21}$ , uzimajući u obzir da je njihov zbir 71 s. Pored toga, potrebno je uzeti u obzir i to da njihove vrednosti ne smeju da budu manje ili veće od granica predviđenih matematičkom formulacijom, odnosno manji od nule a veći od ciklusa ( $C_{new}$ ). Neka je raspodela izvršena tako da nepoznati pomaci zelenog vremena uzimaju sledeće vrednosti:  $\theta_{32} = 37$  s i  $\theta_{21} = 34$  s.



Slika 6.5. Primer modifikacije pomaka zelenih vremena

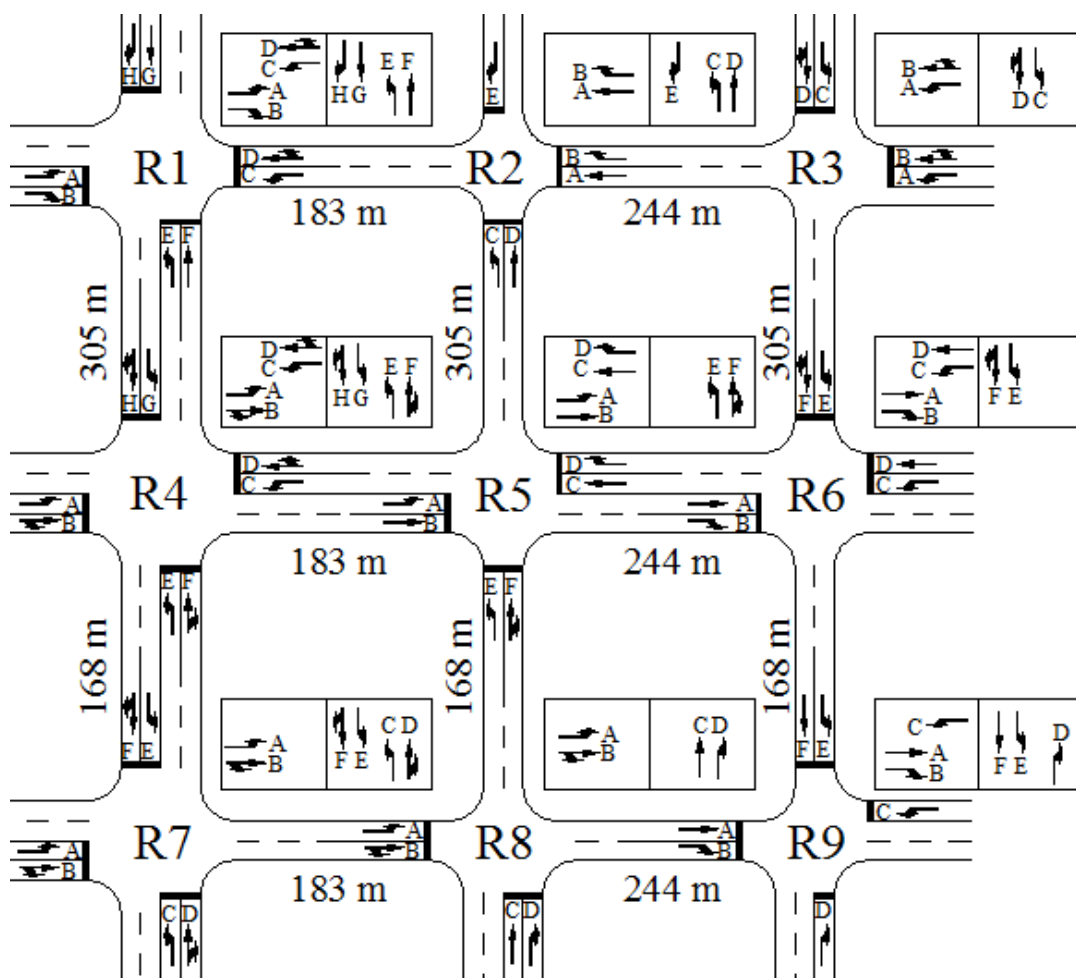


Inicijalizacija i modifikacija pomaka zelenog vremena na mreži semaforisanih raskrsnica je povezana sa poznatim II Kirhofovim zakonom iz oblasti elektrotehnike.

Mehanizam poredjenja rešenja i proces regrutovanja veštačkih pčela se vrše na isti način kao što je prikazano u 3. poglavlju disertacije.

### 6.4. Numerički primer

U svrhu testiranja predloženog modela za upravljanje zonom raskrsnica pomoću BCO algoritma iskorišćena je mreža po uzoru na onu datu u radu Gartner i ostalih (1974). Mreža, predstavljena na slici 6.6., sadrži 9 raskrsnica i 16 grana. Na slici 6.6 su prikazane saobraćajne trake i njihova raspodela po fazama. Ovi podaci su dati na početku procesa optimizacije kao ulazni.



Slika 6.6. Test mreža

Tabela 6.1. sadrži podatke o protocima vozila i zasićenim tokovima na svim trakama svake raskrsnice koja čini test mrežu. Trake su označene velikim slovima latinice: A, B, C... U prvoj koloni su date vrednosti saobraćajnih tokova [voz/h], dok se vrednosti u drugoj kolone odnose na zasićene tokove [voz/h].

Tabela 6.1. Vrednosti protoka i zasićenih tokova na test mreži

<b>Raskrsnica 1</b>																
$k$	A		B		C		D		E		F		G		H	
$q_k/s_k$	150	1120	203	1350	92	1160	410	1370	146	1125	225	1650	350	1470	280	1350
<b>Raskrsnica 2</b>																
$k$	A		B		C		D		E							
$q_k/s_k$	300	1650	130	1350	120	1350	426	1650	82	1350						
<b>Raskrsnica 3</b>																
$k$	A		B		C		D									
$q_k/s_k$	150	1350	407	1360	145	1350	370	1320								
<b>Raskrsnica 4</b>																
$k$	A		B		C		D		E		F		G		H	
$q_k/s_k$	108	1170	450	1340	145	1135	255	1370	110	1120	411	1330	145	1125	500	1360
<b>Raskrsnica 5</b>																
$k$	A		B		C		D		E		F					
$q_k/s_k$	75	1165	549	1650	270	1510	190	1330	130	1350	302	1385				
<b>Raskrsnica 6</b>																
$k$	A		B		C		D		E		F					
$q_k/s_k$	435	1475	135	1350	140	1140	415	1650	146	1350	200	1340				
<b>Raskrsnica 7</b>																
$K$	A		B		C		D		E		F					
$q_k/s_k$	168	1350	425	1310	112	1105	420	1335	150	1315	475	1335				
<b>Raskrsnica 8</b>																
$K$	A		B		C		D									
$q_k/s_k$	172	1350	372	1370	260	1650	200	1350								
<b>Raskrsnica 9</b>																
$K$	A		B		C		D		E		F					
$q_k/s_k$	400	1455	131	1350	117	1100	190	1350	130	1350	400	1650				

Prilikom optimizacije korišćene su sledeće vrednosti:

- Izgubljeno vreme tokom ciklusa ( $L_i$ ) na svim raskrsnicama su 10 s.
- Minimalna dozvoljena vrednost ciklusa  $C_{min}$  i maksimalna dozvoljena vrednost ciklusa  $C_{max}$  iznose 30 s i 120 s, respektivno.
- Minimalna dozvoljena vrednost zelenog vremena  $g_{fmin}$  i maksimalna dozvoljena vrednost zelenog vremena  $g_{fmax}$  iznose 8 s i 80 s, respektivno.
- Kapacitet saobraćajnih traka je 950 voz/h/traci.

- Brzina slobodnog toka je 18 m/s (65 km/h).
- Vrednosti faktora progresije  $PF$  su date u tabeli 6.2 (HCM 2000).

Tabela 6.2.  $PF$  vrednosti

$g_k/C$	0 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	0.5 - 0.6	0.6 - 0.8
$PF_k$	1	0.986	0.895	0.767	0.578	0.256

#### 6.4.1. Primena simuliranog kaljenja na problem zonskog upravljanja saobraćajnim tokovima

Tehnika “*simuliranog kaljenja*” (*simulated annealing*) je jedna od metoda koja se poslednjih nekoliko decenija intenzivno koristila za rešavanje složenih kombinatornih problema. *Kirkpatrick, Gellat i Vecchi* (1983) i nezavisno od njih *Cerny* (1985) su bili prvi koji su predložili tehniku simuliranog kaljenja za rešavanje problema kombinatorne optimizacije. Metaheuristika simulirano kaljenje je nastala na osnovu analogije sa određenim problemima statističke mehanike i istraživanjima Metropolis-a, A. Rosenbluth-a, M. Rosenbluth-a i Vecchi-ja (1953). Pod kaljenjem se podrazumeva smanjivanje temperature materijala do stanja kome odgovara najniža energija (Teodorović, 2016). “Na početku procesa kaljenja materijal se nalazi u stanju topljenja. Potom se vrši postepeno snižavanje temperature sve dok se ne postigne najniže energetske stanje. Tokom postepenog snižavanja temperature na pojedinim temperaturama postiže se tzv. *termalni ekvilibrijum*. U slučaju fizičkih sistema postoji težnja da se utvrdi takav raspored čestica kome odgovara najniže energetske stanje. Proces kaljenja podrazumeva prethodno definisanje temperatura na kojima će materijal da se nalazi izvesno vreme” (Teodorović, 2016).

Tehnika simuliranog kaljenja sastoji se u vršenju malih perturbacija na slučajan način (male promene položaja čestica). Drugim rečima, u cilju poboljšanja vrednosti funkcije cilja, vrše se promene okoline trenutnog rešenja. Ako je postignuto poboljšanje funkcije cilja, novo pronađeno rešenje se usvaja kao trenutno najbolje. Ovaj proces se ponavlja sve dok nije moguće poboljšati trenutno rešenje, čime se ono proglašava lokalnim optimumom. Lokalni optimum može biti daleko od globalnog optimuma, pa se proces optimizacije ovde ne završava. Da bi se izbegli lokalni optimumi, u traženju globalnog optimuma, algoritam sa određenom verovatnoćom dozvoljava rešenju sa

lošijom vrednošću funkcije cilja da postane novo trenutno najbolje rešenje. Verovatnoća da će rešenje  $j$  biti prihvaćeno kao trenutno najbolje, čak iako ima lošiju vrednost funkcije cilja od prethodnog rešenja (rešenje  $i$ ), jednako je  $\exp(-[f(j) - f(i)]/T)$ , gde su  $f(j)$  i  $f(i)$  vrednosti funkcije cilja za rešenja  $j$  i  $i$ , dok je  $T$  kontrolni parametar koji odgovara temperaturi u fizičkim procesima kaljenja metala.

Pseudokod za algoritam simuliranog kaljenja može biti dat u sledećem obliku (Eglese, 1990):

---

**Algoritam 6. Simulirano kaljenje (SA)**

---

1. Odabrati inicijalno stanje  $i \in S$
  2. Odabrati inicijalnu temperaturu  $T > 0$
  3. Postaviti brojač promene temperature  $t = 0$
  4. **repeate**
  5.     postaviti brojač ponavljanja  $n = 0$
  6.     **repeate**
  7.         Generisati stanje  $j$ , okolinu stanja  $i$
  8.         Proračunati  $\delta = f(j) - f(i)$
  9.         **if**  $\delta < 0$  **then**  $i = j$
  10.        **else if**  $\text{random}(0, 1) < \exp(-\delta/T)$  **then**  $i = j$
  11.         $n = n + 1$
  12.     **until**  $n = N(t)$
  13.      $t = t + 1$
  14.      $T = T(t)$
  15. **until** zadovoljen je kriterijum zaustavljanja
- 

U prvom koraku SA algoritma (Algoritam 6) potrebno je definisati inicijalno rešenje. U cilju rešavanja predmetnog problema, inicijalno rešenje se postavlja na isti način kao što je to predloženo u poglavlju 6.3.1. Stanje  $j$  (korak 7 Algoritma 7), se generiše na isti način na koji veštačke pčele modifikuju svoja rešenja (poglavlje 6.3.2.). Ovim se obezbeđuje fer poređenje dva algoritma. Pored toga, kriterijum zaustavljanja je isti kod oba algoritma i predstavlja vreme rada procesora.

Posle  $N(t)$  iteracija na istoj temperaturi  $T(t)$ , SA algoritam predviđa njenu promenu. Nova vrednost temperature se računa na sledeći način:

$$T(t) = \alpha \cdot T(t-1) \tag{6.25}$$

gde su:

$T(t)$  - nova vrednost temperature,

$\alpha$  - parametar,

$T(t-1)$  - prethodna vrednost temperature.

#### **6.4.2. Određivanje BCO i SA parametara tokom optimizacije**

U cilju određivanja parametara BCO i SA algoritma tokom optimizacije, urađena su testiranja koja su predstavljena u tabeli 6.3. U slučaju primene BCO algoritma u obzir su uzete četiri moguće vrednosti za broj veštačkih pčela (10, 20, 40 i 80) i četiri moguće vrednosti za broj letova unapred (5, 10, 15 i 20). Vrednost parametra  $NC = 1$ , što je najčešći slučaj koji se primenjuje u literaturi. Svaka od kombinacija ovih parametara je testirana tri puta. Izabrane su najbolje vrednosti funkcije cilja dobijene tokom testiranja i predstavljene u tabeli 6.3. Vreme rada procesora (kao kriterijum zaustavljanja) postavljeno je na 2 min za sva testiranja. Kao što je prikazano, najbolje rešenje je generisano u slučaju pretrage sa 10 veštačkih pčela tokom 5 letova unapred. Ove vrednosti BCO parametara biće korišćene tokom budućih numeričkih testiranja u ovom poglavlju.

Pored BCO parametara, testirani su i SA parametri optimizacije. U okviru ovog testa, uzete su različite vrednosti za inicijalnu temperaturu  $T$  (100, 250 i 400), parametar  $\alpha$  (0.98, 0.95 i 0.92) i broj ponavljanja na jednoj temperaturi  $n$  (10,000 i 40,000). Kao i kod BCO testova, vreme rada računara je postavljeno kao kriterijum zaustavljanja na 2 min. Za svaku kombinaciju parametara SA algoritam je puštan tri puta. Funkcije cilja najboljih rešenja su generisane i prikazane u tabeli 6.3. Posle analiziranja svih rešenja postignutih od strane SA algoritma zaključeno je da su sledeće vrednosti parametara najbolje:  $T = 100$ ,  $\alpha = 0.98$  i  $N(t) = 10\ 000$ . Ove vrednosti SA parametara biće korišćene tokom svih budućih numeričkih testiranja na predmetnom problemu optimizacije.

Tabela 6.3. Analiza BCO i SA parametara

BCO				
B/NP	5	10	15	20
10	<b>369 776</b>	372 424	374 418	373 800
20	370 349	371 867	374 291	375 161
40	371 565	370 694	373 429	373 932
80	372 341	373 824	375 940	376 718
SA				
$N(t) = 10\ 000$				
T/ $\alpha$	0.98	0.95	0.92	
100	<b>371 304</b>	372 233	372 637	
250	372 101	372 227	374 471	
400	371 556	371 546	372 318	
$N(t) = 40\ 000$				
T/ $\alpha$	0.98	0.95	0.92	
100	372 418	372 863	373 657	
250	373 124	371 421	372 674	
400	372 946	372 263	372 668	

### 6.4.3 Poređenje BCO i SA algoritma

U ovom poglavlju dato je poređenje rešenja dobijenih od strane BCO i SA algoritma primenjenih za rešavanje razmatranog problema. Za oba algoritma usvojeni su parametri na način kako je prikazano u prethodnom poglavlju. Korišćeno je vreme rada računara od 10 min kako kriterijum zaustavljanja. Urađene su dve vrste eksperimenta. U prvom eksperimentu BCO i SA algoritmu prosleđeno je inicijalno rešenje generisano na slučajnan način. U drugom eksperimentu, algoritmima je postavljeno inicijalno rešenje dobijeno heurističkom metodom, koja je detaljno prikazana u poglavlju 6.3.1.

Rezultati prvog eksperimenta dati su u tabeli 6.4. Za svaki od algoritama izvršeno je 10 testiranja. Najbolje rešenje dobijeno BCO algoritmom ima vrednost kriterijumske funkcije od 383163 s, dok najbolje SA rešenje je postiglo vrednost kriterijumske funkcije od 406199 s. Očigledno je da je BCO rešenje bolje od SA rešenja. Razlika iznosi 23036 s (6.01 %). U tabeli 6.5. data su rešenja dobijena BCO i SA algoritmom, u slučaju kada se kao inicijalno postavi rešenje generisano na slučajnan način. Primenjen je parametarski  $t$ -test, koji pokazuje da li postoji statistički značajna razlika između vrednosti kriterijumskih funkcija dobijenih od strane dva primenjena algoritma.

Tabela 6.4. BCO i SA testiranja – inicijalno rešenje dobijeno na slučajan način

Redni broj eksperimenta	BCO	SA
1	388858	406504
2	<b>383163</b>	408606
3	383586	407065
4	389320	408682
5	383322	406250
6	385208	406702
7	384664	<b>406199</b>
8	388508	407014
9	391387	409146
10	384207	407471
Najbolje rešenje	383163	406199
Srednja vrednost	386222.3	407363.9
Standardno odstupanje	2994.08	1077.79

Sa obzirom na malu veličinu uzorka, korišćena je sledeća  $t$  statistika:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)SD_1^2 + (n_2 - 1)SD_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}}} \quad (6.26)$$

gde su:

$\bar{X}_1$  - srednja vrednost prvog uzorka (BCO),

$SD_1$  - standardno odstupanje prvog uzorka,

$\bar{X}_2$  - srednja vrednost drugog uzorka (SA),

$SD_2$  - standardno odstupanje drugog uzorka,

$n_1$  - veličina prvog uzorka,

$n_2$  - veličina drugog uzorka.

Uzimajući odgovarajuće podatke o srednjoj vrednosti i standardnom odstupanju iz tabele 6.4., dobija se vrednost parametra:  $t = -21.0095$ . Testiranje se vrši sa rizikom od 5 % ( $t_{0.05} = 1.96$ ). Zato što je  $|t| = 21.0095 > t_{0.05} = 1.96$  može se zaključati da je u ovom slučaju BCO algoritam dao značajno bolja rešenja u odnosu na ona dobijena od strane SA algoritma.

Tabela 6.5. Najbolja rešenja dobijena BCO i SA algoritmom kada se inicijalno rešenje generiše na slučajan način

<b>Slučajno generisano inicijalno rešenje:</b> Vrednost funkcije cilja = 2 802 169 s; C = 75 s; CPU vreme: 10 min																	
Zelena vremena [s]																	
I <sub>1</sub>		I <sub>2</sub>		I <sub>3</sub>		I <sub>4</sub>		I <sub>5</sub>		I <sub>6</sub>		I <sub>7</sub>		I <sub>8</sub>		I <sub>9</sub>	
g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>
17	48	15	50	17	48	10	55	54	11	25	40	31	34	39	26	45	20
Pomaci zelenog vremena [s]																	
Grana																	
1-4	2-1	3-2	3-6	4-1	4-5	4-7	5-2	5-4	5-6	6-5	6-9	7-4	7-8	8-5	8-9		
70	42	63	59	5	38	57	0	37	71	4	28	18	15	41	65		
<b>BCO:</b> Vrednost funkcije cilja = 383 163 s; C = 47 s; CPU vreme: 10 min																	
Zelena vremena [s]																	
I <sub>1</sub>		I <sub>2</sub>		I <sub>3</sub>		I <sub>4</sub>		I <sub>5</sub>		I <sub>6</sub>		I <sub>7</sub>		I <sub>8</sub>		I <sub>9</sub>	
g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>
20	17	13	24	18	19	18	19	24	13	21	16	18	19	22	15	20	17
Pomaci zelenog vremena [s]																	
Grana																	
1-4	2-1	3-2	3-6	4-1	4-5	4-7	5-2	5-4	5-6	6-5	6-9	7-4	7-8	8-5	8-9		
33	10	31	15	14	1	20	3	46	34	13	9	27	10	18	14		
<b>SA:</b> Vrednost funkcije cilja = 406 199 s; C = 47 s; CPU vreme: 10 min																	
Zelena vremena [s]																	
I <sub>1</sub>		I <sub>2</sub>		I <sub>3</sub>		I <sub>4</sub>		I <sub>5</sub>		I <sub>6</sub>		I <sub>7</sub>		I <sub>8</sub>		I <sub>9</sub>	
g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>
19	18	13	24	19	18	18	19	24	13	20	17	18	19	22	15	19	18
Pomaci zelenog vremena [s]																	
Grana																	
1-4	2-1	3-2	3-6	4-1	4-5	4-7	5-2	5-4	5-6	6-5	6-9	7-4	7-8	8-5	8-9		
43	23	37	17	4	11	30	17	36	44	3	8	17	19	9	14		

U drugom eksperimentu inicijalno rešenje je dobijeno pomoću heuristike, na način kako je pokazano u poglavlju 6.3.1. Dobijena rešenja su prikazana u tabeli 6.6. Najbolje vrednosti funkcije cilja za BCO i SA algoritam su 368573 s i 369020 s, respektivno. U ovom slučaju, BCO algoritam je nešto bolji u odnosu na SA. Razlika je 447 s (0.12 %). Najbolja rešenja dobijena od strane oba algoritma su prikazana u tabeli 6.7.

U ovom eksperimentu  $t$  parametar ima sledeću vrednost:  $t = 0.2326$ . Testiranje se vrši sa rizikom od 5 % ( $t_{0.05} = 1.96$ ), i utvrđeno je da ne postoji statistički značajna razlika između dva uzorka ( $|t| = 0.2326 < t_{0.05} = 1.96$ ).



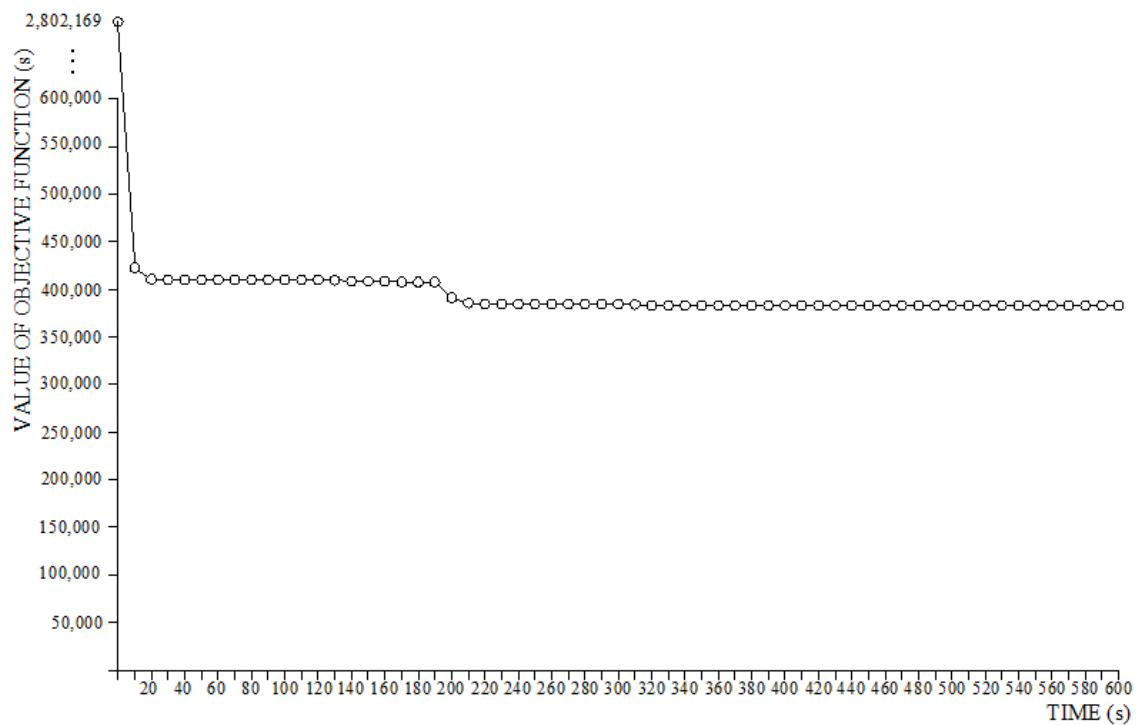
Tabela 6.6. BCO i SA testiranja – inicijalno rešenje dobijeno pomoću heuristike

Redni broj eksperimenta	BCO	SA
1	370951	369863
2	369926	371239
3	370524	369792
4	369891	372203
5	370343	370386
6	<b>368573</b>	369921
7	370228	370700
8	372673	<b>369020</b>
9	369831	370331
10	371542	369989
Najbolje rešenje	368573	369020
Srednja vrednost	370448.2	370344.4
Standardno odstupanje	1102.76	880.63

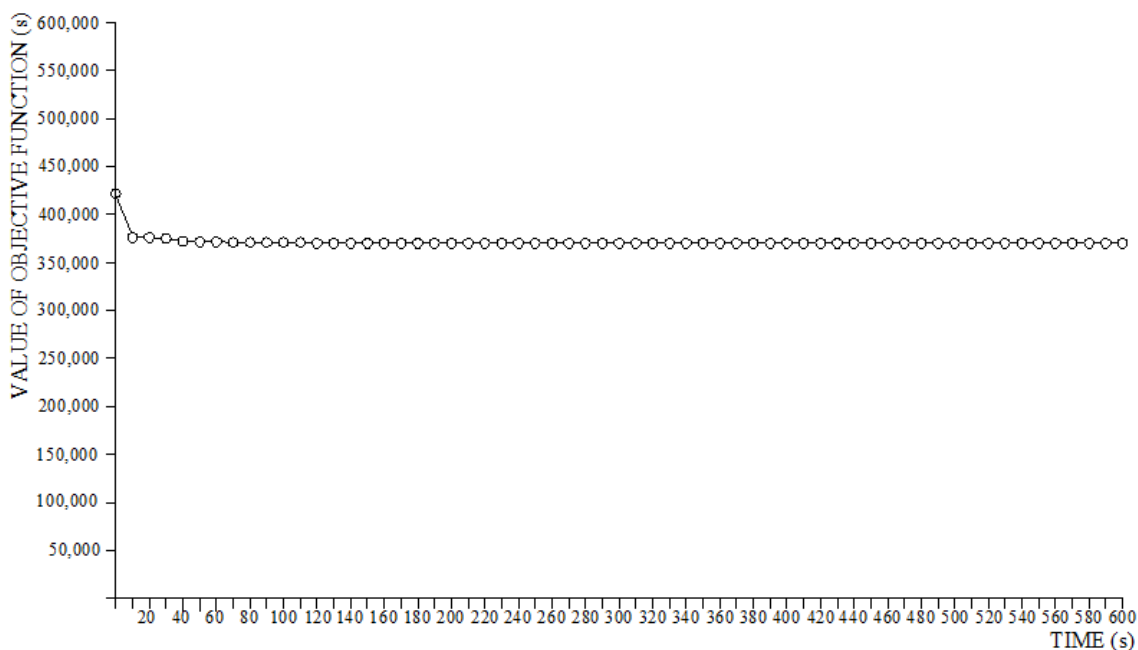
Tabela 6.7. Najbolja rešenja dobijena BCO i SA algoritmom kada se inicijalno rešenje generiše pomoću heuristike

<b>Inicijalno rešenje dobijeno predloženom heuristikom:</b> Vrednost funkcije cilja = 421 806 s; C = 69 s; CPU vreme: 10 min																	
Zelena vremena [s]																	
I <sub>1</sub>		I <sub>2</sub>		I <sub>3</sub>		I <sub>4</sub>		I <sub>5</sub>		I <sub>6</sub>		I <sub>7</sub>		I <sub>8</sub>		I <sub>9</sub>	
g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>
33	26	24	35	31	28	28	31	35	24	34	25	28	31	37	22	31	28
Pomaci zelenog vremena [s]																	
Grana																	
1-4	2-1	3-2	3-6	4-1	4-5	4-7	5-2	5-4	5-6	6-5	6-9	7-4	7-8	8-5	8-9		
17	25	20	17	52	10	9	17	59	14	55	9	60	10	60	14		
<b>BCO:</b> Vrednost funkcije cilja = 368 573 [s]; C = 52 [s]; CPU vreme: 10 min																	
Zelena vremena [s]																	
I <sub>1</sub>		I <sub>2</sub>		I <sub>3</sub>		I <sub>4</sub>		I <sub>5</sub>		I <sub>6</sub>		I <sub>7</sub>		I <sub>8</sub>		I <sub>9</sub>	
g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>
21	21	21	21	21	21	20	22	24	18	24	18	20	22	27	15	21	21
Pomaci zelenog vremena [s]																	
Grana																	
1-4	2-1	3-2	3-6	4-1	4-5	4-7	5-2	5-4	5-6	6-5	6-9	7-4	7-8	8-5	8-9		
17	10	18	17	35	10	9	15	42	14	38	4	43	0	1	19		
<b>SA:</b> Vrednost funkcije cilja = 369 020 s; C = 52 s; CPU vreme: 10 min																	
Zelena vremena [s]																	
I <sub>1</sub>		I <sub>2</sub>		I <sub>3</sub>		I <sub>4</sub>		I <sub>5</sub>		I <sub>6</sub>		I <sub>7</sub>		I <sub>8</sub>		I <sub>9</sub>	
g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>
22	20	15	27	21	21	20	22	24	18	27	15	20	22	27	15	21	21
Pomaci zelenog vremena [s]																	
Grana																	
1-4	2-1	3-2	3-6	4-1	4-5	4-7	5-2	5-4	5-6	6-5	6-9	7-4	7-8	8-5	8-9		
17	10	18	17	35	10	9	15	42	14	38	0	43	0	1	15		

Konvergencija BCO algoritma u slučaju kada se inicijalno rešenje generiše na slučajan način prikazana je na slici 6.7. Primećuje se da su poboljšanja inicijalnog rešenja najveća u prvom minutu optimizacije. Posle toga, poboljšanja koja algoritam daje su mala ili beznačajna. Konvergencija u slučaju kada se inicijalno rešenje generiše uz pomoć predložene heuristike prikazana je na slici 6.8. BCO značajno poboljšava rešenje tokom prvog minuta optimizacije. Posle toga, poboljšanja koja algoritam daje su vrlo mala.



Slika 6.7. Konvergencija BCO algoritma kada se inicijalno rešenje generiše na slučajan način



*Slika 6.8. Konvergencija BCO algoritma kada se inicijalno rešenje generiše pomoću heuristike*

Najbolje dobijeno rešenje je iskorišćeno za još jedan dodatni test. Pokušano je poboljšanje najbolje dobijenog rešenja dozvoljavanjem većeg opsega iz kog se uzima nova vrednost ciklusa prilikom modifikacije rešenja (parametar  $k$  u formuli 6.20). Kao kriterijum zaustavljanja usvojeno je vreme rada računara od 3 min. Parametar  $k$  uzimao je sledeće vrednosti tokom testiranja: 5s, 10s, 15s i 20s. Konačno BCO rešenje (dobijeno kada je  $k = 3$  s) postavljeno je kao inicijalno rešenje u ovom testu. Posle velikog broja pokušaja utvrđeno je da BCO i SA algoritam nisu u stanju da dodatno poboljšaju inicijalno rešenje. Iz ovoga se može zaključiti da usvojena vrednost parametra  $k$  od 3 sekunde daje dovoljno veliki opseg ciklusa iz kog se generišu nova rešenja.

#### **6.4.4. Rezultati dobijeni pomoću softvera TRANSYT-7F**

Komercijalni softver, koji koriste inženjeri širom sveta za linijsku i zonsku koordinaciju saobraćajnih tokova, je TRANSYT-7F. U ovom poglavlju dati su rezultati koji ovaj softver generiše na test primeru.

TRANSYT-7F je baziran na genetskim algoritmima (GA). Pri optimizaciji korišćeni su sledeći GA parameteri: verovatnoća ukrštanja - 30 %, verovatnoća mutacije

- 1 %, “prag zaustavljanja” - 0.01 %, veličina populacije - 10, maksimalan broj generacija - 30.

U slučaju kada se softveru TRANSYT-7F kao inicijalno postavi rešenje generisano na slučajan način, vrednost kriterijumske funkcije koju postiže jednaka je 532800 sekundi (ili 148 h, pošto softver izlaze daje u satima). U slučaju kada se softveru TRANSYT-7F kao inicijalno postavi rešenje generisano heuristikom, vrednost kriterijumske funkcije koju postiže jednaka je 378000 sekundi (105 h). U poređenju sa BCO rezultatima (383 163 s sa slučajno generisanim rešenjem i 368 573 s sa heuristikom) TRANSYT-7F daje lošija rešenja, naročito kada se inicijalno rešenje generiše na slučajan način.

Bez obzira na dobijene rezultate softverom TRANSYT-7F, oni se ne mogu porediti sa rezultatima dobijenim pomoću BCO algoritma na fer način. Razlog za ovakav zaključak leži u činjenici da TRANSYT-7F vrši optimizaciju kriterijumske funkcije koja ima dugačiju formulaciju. Vrednosti vremenskih gubitaka  $d_{Ik}$ , koji su prikazani formulom 6.3, ovaj softver dobija pomoću simulacije. U skladu sa tim, nema potrebe ni za  $PF$  faktorom iz formule 6.2. Pored toga, optimizacija pomaka zelenog vremena se vrši na drugačiji način i saobraćajni model je različit u odnosu na onaj opisnan u poglavlju 6.2.1. Više o ovim detaljima moguće je naći u upustvu koje se dobija prilikom instalacije softvera TRANSYT-7F. Ipak, prema dobijenim rezultatima može se izvesti veoma oprezan zaključak da, u slučaju kada se inicijalno rešenje generiše na slučajan način, BCO daje rešenja boljih performansi u odnosu na TRANSYT-7F.

## 7. ZAKLJUČAK I PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA

Kako izgradnja novih i proširenje postojećih saobraćajnica nije uvek moguće rešenje za sve veća zagušenja u velikim gradovima sveta, jedna od mera u cilju ublažavanja posledica koje saobraćaj svakodnevno donosi sa sobom je i optimizacija postojećih načina upravljanja. Kao važan deo tog procesa je upravljanje radom svetlosnih signala na raskrsnicama. Loša koordinacija svetlosnih signala sa sobom nosi veće vreme putovanja vozila na mreži, veće zagađenje gradske sredine, kao i negativne ekonomske posledice.

U skladu sa potrebama i zahtevima koje današnja civilizacija postavlja saobraćajnom sistemu uočeni su i problemi koji su razmatrani u ovoj disertaciji. Prvi razmatrani problem se odnosi na upravljanje radom izolovane signalisane raskrsnice. Matematički model je isti kao i onaj koji koristi komercijalni softver HCS Signals. Primenjena metoda, zasnovana na BCO algoritmu, postigla je bolja rešenja razmatranog problema u odnosu na pomenuti softver, na test primeru koji je detaljno razrađen u disertaciji. Model je dao poboljšanja i na realnoj raskrsnici sa ulične mreže Beograda, za koju su karakteristični prezasićeni tokovi vozila.

Drugi razmatrani problem predstavlja upravljanje izolovanom signalisanom raskrsnicom, pri čemu su u obzir uzeti i pešački tokovi pored tokova vozila. Razvijena je interaktivna metoda za rešavanje problema višekriterijumske optimizacije, koja u svojoj osnovi ima BCO algoritam. Razmatran je test primer u slučaju kada se tokovi vozila i pešački tokovi opslužuju u okviru istih faza, kao i u slučaju kada se pešački tokovi opslužuju u posebnoj fazi. Ovaj primer pokazuje praktičnu primenu predloženog rešenja za ovakav vid upravljanja. Posebno, model je testiran i na realnoj raskrsnici: Ustanička - Vojislava Ilića, u Beogradu. Na ovoj raskrsnici predloženi model je dao poboljšanja u odnosu na postojeće stanje, koja se ogledaju u manjim vrednostima postavljenih kriterijumskih funkcija.

Poslednji, treći problem, koji je razmatran u okviru disertacije je zonsko upravljanje radom signalisanih raskrsnica. U cilju rešavanja ovog problema razvijena je originalna matematička formulacija. Kriterijumska funkcija uzima u obzir vremenske gubitke vozila usled postojanja pomaka zelenog vremena u okviru zonske koordinacije,

kao i vremenske gubitke uslovljene postojanjem raskrsnica. Pored svega, razvijena je nova heuristička metoda za postavljanje inicijalnog rešenja u zoni. Inicijalno rešenje se sastoji od ciklusa, raspodele zelenih vremena na faze svih raskrsnica unutar zone i vrednosti pomaka zelenog vremena na svim granama zone. Pretpostavlja se da je plan faza unapred dat za svaku raskrsnicu. Generisano inicijalno rešenje je potom popravljala kolonija veštačkih pčela, prema algoritmu posebno osmišljenom za ovaj problem. Na test primeru, poznatom u literaturi, pokazalo se da su rešenja, koja proizilaze iz predloženog BCO modela, bolja u odnosu na ona koja nudi algoritam simuliranog kaljenja (SA). SA je odranije poznata i dokazana metaheuristika na mnogim praktičnim problemima.

Rešavanjem opisanih problema ostavljen je i prostor za dalja istraživanja u okviru primene BCO metaheuristike na upravljanje radom svetlosnih signala. Pre svega, može se napraviti model višekriterijumske optimizacije koordinisanog rada svetlosnih signala, gde će se pored vremena koje sva vozila provedu u zoni u obzir uzeti i vremena koja svi pešaci provedu u zoni. Potom, moguće je razviti model koji će upravljati radom svetlosnih signala u slučaju prezasićenih saobraćajnih tokova. Kriterijumska funkcija u ovom slučaju bi mogla biti maksimizacija kapaciteta raskrsnica. Na jednom delu mreže bi moglo doći do zagušenja, dok na drugom delu to ne mora biti slučaj. Dakle, potrebno je razviti jedan opšti model pomoću kog bi bilo moguće upravljati tokovima na mreži i u jednom i u drugom slučaju.

Sledeća oblast gde bi se mogla primeniti BCO metaheuristika je dvosmerna linjska koordinacija svetlosnih signala. Ovi problemi, nose sa sobom određene specifičnosti koje bi mogle biti izazov za rešavanje.

Pored svega navedenog, prirodan korak u primeni metoda inteligencije grupe je upravljanje radom svetlosnih signala u realnom vremenu. Ovakav način upravljanja podrazumeva donošenje upravljačkih odluka u funkciji podataka dobijenih sa detektora postavljenih na uličnoj mreži. Moguće je razviti modele za upravljanje radom izolovane signalisane raskrsnice, linijske koordinacije i zonske koordinacije u okviru ovakvog načina upravljanja.

Posebno interesantno bi bilo razviti model koji bi uključivao predikciju ponašanja vozača u zoni raskrsnica. Ideja razvoja jednog ovakvog složenog modela bi bila u sledećem: Prvo, inicijalizovati početno rešenje upravljanja radom svake od raskrsnica u

okviru zone. Posle toga, osmisliti način predikcije ponašanja vozača kao odgovor na uspostavljene signalne planove. Ovim bi se predvidela nova saobraćajna slika u posmatranoj zoni. Sledeći korak bi bio postavljanje novih rešenja za vrednosti upravljačkih parametara. Potom je potrebno izvršiti sledeću predikciju i postavljanje novih signalnih planova. Na ovaj način bi se kroz iteracije upravljalo saobraćajnim tokovima. Svakako krajnji cilj bi predstavljalo dostizanje korisničkog ekviriblijuma, koji bi podrazumevao da vozači imaju jednako vreme putovanja kroz zonu raskrsnica bez obzira na izabranu rutu. Skup dopustivih ruta je potrebno unapred definisati na osnovu izvorno-ciljnih matrica putovanja.

## LITERATURA

- [1] Alhajyaseen, W., 2010. Modeling pedestrian flows at signalized crosswalks and its applications. Nagoya University, Japan, PhD theses.
- [2] Allsop, R.E., 1971. Delay-minimising settings for fixed-time traffic signals at a single road junction. *Journal of the Institute of Mathematics and its Applications*, 8, pp.164–185.
- [3] Allsop, R.E., 1976. SIGCAP: A computer program for assessing the traffic capacity of signal-controlled road junctions. *Traffic Engineering Control*, 17 (Analytic).
- [4] Allsop, R.B., 1981. Computer program SIGSET for calculating delay-minimising traffic signal timings description and manual for users. Transportation Research Board (Res Rpt. HS-032 699).
- [5] Akcelik, R., 1981. Traffic signals: capacity and timing analysis. Research Report 123, Australian Road Research Board, Melbourne, Australia.
- [6] Asante, S.A., Ardekani, S.A. and Williams, J.C., 1993. Selection criteria for left-turn phasing and indication sequence. *Transportation Research Record*, (1421).
- [7] Bang, K., 1976. Optimal control of isolated traffic signals (abridgment). Transportation Research Board, 597, pp.33-35.
- [8] Batanović, V., 1989. Multicriteria evaluation of an urban traffic control system - Belgrade case study. *Mathematical and Computer Modelling*, 12(10-11), pp.1411-1417.
- [9] Bhattacharya, P. and Virkler, M., 2005. Optimization for pedestrian and vehicular delay in a signal network. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1939), pp.115-122.
- [10] Bingham, E., 2001. Reinforcement learning in neurofuzzy traffic signal control. *European Journal of Operational Research*, 131(2), pp.232-241.



- [11] Bell, M.G.H., 1990. A probabilistic approach to the optimization of traffic signal settings in discrete time. 11th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Tokyo 1990, pp. 619-631.
- [12] Beni, G., 1988. The concept of cellular robotic system. In Intelligent Control, 1988. Proceedings., IEEE International Symposium on (pp. 57-62). IEEE.
- [13] Beni, G. and Hackwood, S., 1992. Stationary waves in cyclic swarms. In Intelligent Control, 1992., Proceedings of the 1992 IEEE International Symposium on (pp. 234-242). IEEE.
- [14] Beni, G. and Wang, J., 1993. Swarm intelligence in cellular robotic systems. In Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics? (pp. 703-712). Springer Berlin Heidelberg.
- [15] Boillot, F., 1992. Optimal signal control of urban traffic networks. In International Conference on Road Traffic Monitoring and Control (6th: 1992: London, England). 6th International Conference on Road Traffic Monitoring and Control.
- [16] Bonabeau, E., Dorigo, M. and Theraulaz, G., 1999. Swarm intelligence: from natural to artificial systems (No. 1). Oxford university press, New York.
- [17] Braess, D., 1968. Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. Mathematical Methods of Operations Research, 12(1), pp.258-268.
- [18] Bretegue, L.D. and Jezeguel, R., 1979. Adaptive control at an isolated intersection-a comparative study of some algorithms. Traffic Engineering Control, 20(7), pp.361-363.
- [19] Brilon, W. and Wu, N., 1990. Delays at fixed-time traffic signals under time-dependent traffic conditions. Traffic Engineering and Control, 31(12), pp.623-631.
- [20] Caselli, F., Bonfietti, A., Milano, M., 2015. Swarm-Based Controller for Traffic Lights Management. In Advances In Artificial Intelligence (Edited by Gavanelli, M; Lamma, E; Riguzzi, F), Lecture Notes in Artificial Intelligence Volume: 9336, pp.17-30.

- [21] Ceylan, H. and Bell, M.G., 2004. Traffic signal timing optimisation based on genetic algorithm approach, including drivers' routing. *Transportation Research Part B*, 38(4), pp.329-342.
- [22] Chang, T. H. and Lin, J. T., 2000. Optimal signal timing for an oversaturated intersection. *Transportation Research Part B*, 34(6), pp.471-491.
- [23] Chen, J., Lihong, X., 2006. Road-junction traffic signal timing optimization by an adaptive particle swarm algorithm. 2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. IEEE.
- [24] Chen, Y.L. and Yang, H.H., 2000. Shortest paths in traffic-light networks. *Transportation Research Part B*, 34(4), pp.241-253.
- [25] Cherny, V., 1985. Thermodynamic approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 45(1), pp.41-51.
- [26] Chiou, S.W., 1999. Optimization of Area Traffic Control for Equilibrium Network Flows. *Transportation Science*, 33(3), pp.279-289.
- [27] Cohen, S.L. and Little, J.D.C., 1982. MAXBAND program for arterial signal timing plans. *Public Roads*, 46(HS-033 800).
- [28] Cree, N.D., Maher, M.J. and Paechter, B., 1999. The continuous equilibrium optimal network design problem: a genetic approach. In *Transportation Networks: Recent Methodological Advances. Selected Proceedings of the 4th Euro Transportation Meeting*.
- [29] Čelar, N., 2013. Prilog analizi saobraćajnog procesa na signalisanoj raskrsnici. Univerzitet u Beogradu, Doktorska disertacija.
- [30] D'ans, G.C. and Gazis, D.C., 1976. Optimal control of oversaturated store-and-forward transportation networks. *Transportation Science*, 10(1), pp.1-19.
- [31] Davidović, T., et al., 2011. Bee colony optimization for the p-center problem. *Computers & Operations Research*, 38(10), pp.1367-1376.
- [32] Davidović, T., et al., 2012. Bee colony optimization for scheduling independent tasks to identical processors. *Journal of Heuristics*, 18(4), pp.549-569.

- [33] Davison, E.J. and Edvard, J., 1983. Decentralized control of traffic networks. *System, Man and Cybernetics*, 13(4), pp.476-487.
- [34] Diakaki, C., Papageorgiou, M. and Aboudolas, K., 2002. A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control. *Control Engineering Practice*, 10(2), pp.183-195.
- [35] Diaz-Cabrera, M., Cerri, P. and Medici, P., 2015. Robust real-time traffic light detection and distance estimation using a single camera. *Expert Systems with Applications*, 42(8), pp.3911-3923.
- [36] Dion, F. and Hellinga, B., 2002. A rule-based real-time traffic responsive signal control system with transit priority: application to an isolated intersection. *Transportation Research Part B*, 36(4), pp.325-343.
- [37] Dion, F., Rakha, H. and Kang, Y.S., 2004. Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections. *Transportation Research Part B*, 38(2), pp.99-122.
- [38] Dotoli, M., Fanti, M.P. and Meloni, C., 2006. A signal timing plan formulation for urban traffic control. *Control engineering practice*, 14(11), pp.1297-1311.
- [39] Dresner, K. and Stone, P., 2006. Traffic intersections of the future. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence (Vol. 21, No. 2, p. 1593)*. Menlo Park, CA; Cambridge, MA; London; AAAI Press; MIT Press; 1999.
- [40] Duisters, K.S., 2013. Formulating and testing an algorithm for fixed time control of traffic intersections. Internship report, Eindhoven University of Technology.
- [41] Eglese, R.W., 1990. Simulated Annealing: A tool for Operational Research. *European Journal of Operational Research*, 46(3), pp.271-281.
- [42] El-Tantawy, S., Abdulhai, B. and Abdelgawad, H., 2013. Multiagent reinforcement learning for integrated network of adaptive traffic signal controllers (MARLIN-ATSC): methodology and large-scale application on downtown Toronto. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(3), pp.1140-1150.

- [43] Foy, M.D., Benekohal, R.F. and Goldberg, D.E., 1992. Signal timing determination using genetic algorithms. *Transportation Research Record*, (1365), p.108.
- [44] García-Nieto, J., Alba, E. and Olivera, A.C., 2012. Swarm intelligence for traffic light scheduling: Application to real urban areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(2), pp.274-283.
- [45] Gartner, N.H. and Little, J.D., 1973. The generalized combination method for area traffic control. *Operations Research Center Massachusetts, Institute of Technology Cambridge*.
- [46] Gartner, N., Little, J.D. and Gabbay, H., 1974. Optimization of traffic signal settings in networks by mixed-integer linear programming (No.MIT-TR-91). *Operations Research Center Massachusetts, Institute of Technology Cambridge*.
- [47] Gartner, N.H., Little, J.D. and Gabbay, H., 1975. Optimization of traffic signal settings by mixed-integer linear programming: Part I: The network coordination problem. *Transportation Science*, 9(4), pp.321-343.
- [48] Gartner, N., 1976. Area traffic control and network equilibrium. In *Traffic Equilibrium Methods* (pp.274-297). Springer Berlin Heidelberg.
- [49] Gartner, N.H., et al., 1991. A multi-band approach to arterial traffic signal optimization. *Transportation Research Part B*, 25(1), pp.55-74.
- [50] Gartner, N.H., Pooran, F.J. and Andrews, C.M., 2001. Implementation of the OPAC adaptive control strategy in a traffic signal network. In *Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE* (pp. 195-200).
- [51] Gartner, N.H. and Stamatiadis, C., 2002. Arterial-based control of traffic flow in urban grid networks. *Mathematical and computer modelling*, 35(5), pp.657-671.
- [52] Gazis, D. C., 1964. Optimum control of a system of oversaturated intersections. *Operational Research*, 12(6), pp.815-831.
- [53] Gökçe, M. A., Öner, E., G. Işık, G., 2015. Traffic signal optimization with Particle Swarm Optimization for signalized roundabouts. *Simulation*, 91(5), pp.456-466.

- [54] Hamad, K. and Abuhamda, H., 2015. Estimating base saturation flow rate for selected signalized intersections in Doha, Qatar. *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, 3(2), pp.168-171.
- [55] Han, B., 1996. A new comprehensive sheared delay formula for traffic signal optimization. *Transportation Research Part A*, 30(2), pp.155-171.
- [56] He, Q., Head, K.L. and Ding, J., 2014. Multi-modal traffic signal control with priority, signal actuation and coordination. *Transportation Research Part C*, 46, pp.65-82.
- [57] Hillier, J. and Rothery, R., 1967. The synchronization of traffic signals for minimum delay. *Transportation Science*, 1(2), pp.81-94.
- [58] Hu, J., Park, B.B. and Lee, Y.J., 2015. Coordinated transit signal priority supporting transit progression under Connected Vehicle Technology. *Transportation Research Part C*, 55, pp.393-408.
- [59] Hu, W., Wang, H., Yan, L., Du, B., 2016. A swarm intelligent method for traffic light scheduling: application to real urban traffic networks. *Applied Intelligence*, 44(1), pp.208-231.
- [60] Improta, G. and Sforza, A., 1982. Optimal offsets for traffic signal systems in urban networks. *Transportation Research Part B*, 16(2), pp.143-161.
- [61] Improta, G., and Cantarella, G.E., 1984. Control system design for an individual signalized junction. *Transportation Research Part B*, 18(2), pp.147-167.
- [62] Ishaque, M. and Noland, R., 2005. Multimodal microsimulation of vehicle and pedestrian signal timings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1939), pp.107-114.
- [63] Ishaque, M.M. and Noland, R.B., 2007. Trade-offs between vehicular and pedestrian traffic using micro-simulation methods. *Transport Policy*, 14(2), pp.124-138.
- [64] Jacques, M.A.P., Niitymaki, J. and Pursula, M., 2002. Analyzing different fuzzy traffic signal controllers for isolated intersections. In *Transportation Research Board 81st Annual Meeting*.

- [65] Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P., 1983. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220, pp.671-680.
- [66] Kronborg, P. and Davidsson, F., 1993. MOVA and LOHVRA: traffic signal control for isolated intersections. *Transportation Research Board*, 34 (4), pp.195-200.
- [67] Kruger, T.J. and Davidović, T., 2016. Sensitivity analysis of the bee colony optimization algorithm. In *Proceedings of the 7<sup>th</sup> international conference on bioinspired optimization methods and their applications*, Bled, pp.65-77.
- [68] Lan, C., 2004. New optimal cycle length formulation for pretimed signals at isolated intersections. *Journal of Transportation Engineering*, 130(5), pp.637-647.
- [69] Le, T., et al., 2015. Decentralized signal control for urban road networks. *Transportation Research Part C*, 58, pp.431-450.
- [70] Li, M., Alhajyaseen, W.K. and Nakamura, H., 2010. A traffic signal optimization strategy considering both vehicular and pedestrian flows. In *Transportation Research Board 89th Annual Meeting (No. 10-2955)*.
- [71] Li, M.T. and Gan, A., 1999. Signal timing optimization for oversaturated networks using TRANSYT-7F. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1683), pp.118-126.
- [72] Lim, J.H., et al., 1981. Hierarchical optimal control of oversaturated urban traffic networks. *International Journal of Control*, 33(4), pp.727-737.
- [73] Lin, F. and Vijayakumar, S., 1988. Adaptive signal control at isolated Intersections. *Journal of Transportation Engineering*, 114(5), pp.555-573.
- [74] Lin, W.H., 2001. An enhanced 0-1 mixed integer LP formulation for the traffic signal problem. In *Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE* (pp. 189-194). IEEE.
- [75] Little, J.D.C., 1966. The synchronization of traffic signals by mixed-integer-linear-programming. *Operational Research*, 14(4), pp.568-594.

- [76] Lo, H.K., Chan, Y.C. and Chow, A.H., 2001. A new dynamic traffic control system: Performance of adaptive control strategies for over-saturated traffic. In *Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE* (pp.404-409).
- [77] Lučić, P. and Teodorović, D., 2001. Bee system: modeling combinatorial optimization transportation engineering problems by swarm intelligence. In *Preprints of the TRISTAN IV triennial symposium on transportation analysis* (pp. 441-445).
- [78] Lučić, P. and Teodorović, D., 2002. Transportation modeling: an artificial life approach. In *Tools with Artificial Intelligence, 2002. (ICTAI 2002). Proceedings 14th IEEE International Conference on* (pp. 216-223). IEEE.
- [79] Lučić, P. and Teodorović, D., 2003a. Computing with bees: attacking complex transportation engineering problems. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 12(03), pp.375-394.
- [80] Lučić, P. and Teodorović, D., 2003b. Vehicle routing problem with uncertain demand at nodes: the bee system and fuzzy logic approach. In *Fuzzy Sets based Heuristics for Optimization* (pp. 67-82). Springer Berlin Heidelberg.
- [81] Luk, J.Y.K., 1984. Two traffic-responsive area traffic control methods: SCAT and SCOOT. *Traffic Engineering Control*, 25(1), pp.14-22.
- [82] Ma, W., et al., 2015. Optimization of pedestrian phase patterns and signal timings for isolated intersection. *Transportation Research Part C*, 58, pp.502-514.
- [83] Manual, H.C., 2000. HCM 2000. Washington, DC: Transportation Research Board.
- [84] Marcotte, P., 1983. Network optimization with continuous control parameters. *Transportation Science*, 17(2), pp.181-197.
- [85] Meng, M., Shao, C., Wong, Y.D., Zhang, J., 2016. Multimodal traffic assignment with traffic emission effects. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Engineering Sustainability*. 169(3), ES3, pp.114–122.

- [86] Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H., Teller, E., 1953. Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of chemical physics*, 21(6), pp.1087-1092.
- [87] Michalopoulos, P.G., Stephanopoulos, G. and Pisharody, V.B., 1980. Modeling of traffic flow at signalized links. *Transportation Science*, 14(1), pp.9-41.
- [88] Mladenović, M., 2009. Upravljanje saobraćajem – sistemi zonske koordinacije i mogućnosti primene programa TRANSYT u proračunu rada svetlosnih signala i vrednovanju rešenja. Saobraćajni fakultet u Beogradu, diplomski rad.
- [89] Murat, S. and Gedizlioglu, E., 2005. A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions. *Transportation Research Part C*, 13(1), pp.19-36.
- [90] Murat, S., 2006. Comparison of fuzzy logic and artificial neural networks approaches in vehicle delay modeling. *Transportation Research Part C*, 14(5), pp.316-334.
- [91] Nair, B.M. and Cai, J., 2007. A fuzzy logic controller for isolated signalized intersection with traffic abnormality considered. In *2007 IEEE intelligent vehicles symposium* (pp. 1229-1233). IEEE.
- [92] Nakayama, H. and Sawaragi, Y., 1984. Satisficing trade-off method for multiobjective programming. In *Interactive decision analysis* (pp. 113-122). Springer Berlin Heidelberg.
- [93] Nikolić, M. and Teodorović, D., 2013a. Transit network design by Bee Colony Optimization. *Expert Systems with Applications*, 40(15), pp.5945-5955.
- [94] Nikolić, M. and Teodorović, D., 2013b. Empirical study of the Bee Colony Optimization (BCO) algorithm. *Expert Systems with Applications*, 40(11), pp.4609-4620.
- [95] Nikolić, M., 2015. Ublažavanje posledica poremećaja u odvijanju saobraćaja primenom metaheuristike Optimizacija Kolonijom Pčela. Univerzitet u Beogradu, Doktorska disertacija.



- [96] Nikolić, M. and Teodorović, D., 2015. Vehicle rerouting in the case of unexpectedly high demand in distribution systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, pp.535-545.
- [97] Nikolić, M., Teodorović, D. and Vukadinović, K., 2015. Disruption management in public transit: The bee colony optimization approach. *Transportation Planning and Technology*, 38(2), pp.162-180.
- [98] Noland, R., 1996. Pedestrian travel times and motor vehicle traffic signals. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1553), pp.28-33.
- [99] Olivera, A.C., Nieto, J.G., Alba, E., 2015. Reducing vehicle emissions and fuel consumption in the city by using particle swarm optimization. *Applied Intelligence*, 42(3), pp.389–405.
- [100] Olszewski, P.S., 1993. Overall delay, stopped delay, and stops at signalized intersections. *Journal of Transportation Engineering*, 119(6), pp.835–852.
- [101] Pappis, C.P. and Mamdani, E.H., 1977. A fuzzy logic controller for a traffic junction. *Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 7(10), pp.707-717.
- [102] Park, E.S., et al., 1984. Hierarchical optimal control of urban traffic networks. *International Journal of Control*, 40(4), pp.813-829.
- [103] Park, B., Messer, C. and Urbanik, T., 1999. Traffic signal optimization program for oversaturated conditions: genetic algorithm approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1683), pp.133-142.
- [104] Papageorgiou, M., 1994. An integrated control approach for traffic corridors. *Transportation Research C*, 3(1), pp.19-30.
- [105] Patel, N.R. and Smith, R. L., 1983. The asymptotic extreme value distribution of the sample minimum of a concave function under linear constraints. *Operations Research*, 31(4), pp.789-794.

- [106] Powell, J., 1998. Field measurement of signalized intersection delay for 1997 update of the highway capacity manual. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1646), pp.79-86.
- [107] Putha, R. and Quadrifoglio, L., 2010. Using ant colony optimization for solving traffic signal coordination in oversaturated networks. In *Transportation Research Board 89th Annual Meeting* (No. 10-2669).
- [108] Qiao, F., et al., 2002. Fuzzy logic based intersection delay estimation. *Mathematical and computer modelling*, 36(11), pp.1425-1434.
- [109] Rawlings, J.B., 2000. Tutorial overview of model predictive control. *IEEE Control Systems*, 20(3), pp.38-52.
- [110] Renfrew, D. and Yu, X.H., 2009. Traffic signal control with swarm intelligence. In *2009 Fifth International Conference on Natural Computation*(Vol. 3, pp. 79-83). IEEE.
- [111] Renfrew, D. and Yu, X.H., 2012. Traffic Signal Optimization Using Ant Colony Algorithm. In *The 2012 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (pp. 1-7). IEEE.
- [112] Robertson, D.I., 1969. TRANSYT method for area traffic control. *Traffic Engineering and Control*, 11(6), pp.276–281.
- [113] Robertson, D.I. and Bretherton, R.D., 1991. Optimizing networks of traffic signals in real-time: the SCOOT method. *Transportation on Vehicular Technology* 40(1), pp.11-15.
- [114] Roess, R.P., Prassas, E. and McShane, W.R., 2011. *Traffic engineering 4<sup>th</sup> edn.* Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.
- [115] Saka, A.A., Anandalingam, G. and Garber, N.J., 1986. Traffic signal timing at isolated intersections using simulation optimization. In *Proceedings of the 18th conference on Winter simulation* (pp.795-801).
- [116] Sen, S. and Head, L., 1997. Controlled optimization of phases at an intersection. *Transportation Science*, 31(1), pp.5-17.

- [117] Sheffi, Y. and Powell, W., 1983. Optimal Signal Settings Over Transportation Networks. *Journal of Transportation Engineering*, 109(6), pp.824-839.
- [118] Singh, M. G. and Tamura, H., 1974. Modeling and hierarchical optimization of oversaturated urban traffic networks. *International Journal of Control*, 20(6), pp.269-280.
- [119] Stanić, B., Tubić, V. and Čelar, N., 2011. Straight lane saturation flow and its rate in Serbian cities. *Transport*, 26(3), pp.329-334.
- [120] Stanimirović, I., 2015. Simbolička izračunavanja u višekriterijumskoj optimizaciji. Univerzitet u Nišu, Prirodno matematički fakultet.
- [121] Stevanović, A., et al., 2015. Multi-criteria optimization of traffic signals: Mobility, safety, and environment. *Transportation Research Part C*, 55, pp.46-68.
- [122] Soh, A.C., Rhung, L.G. and Sarkan, H.M., 2010. MATLAB simulation of fuzzy traffic controller for multilane isolated intersection. *International Journal on Computer Science and Engineering*, 2(4), pp.924-933.
- [123] Šelmić, M., Teodorović, D. and Vukadinović, K., 2010. Locating inspection facilities in traffic networks: An artificial intelligence approach. *Transportation Planning and Technology*, 33(6), pp.481–493.
- [124] Šelmić, M., 2010. Lociranje objekata na transportnim mrežama primenom metoda računarske inteligencije. Univerzitet u Beogradu, Doktorska disertacija.
- [125] Teodorović, D. and Krčmar-Nožić, E., 1989. Multicriteria model to determine flight frequencies on an airline network under competitive conditions. *Transportation Science*, 23(1), pp.14-25.
- [126] Teodorović, D., 2003. Transport modeling by multi-agent systems: A swarm intelligence approach. *Transportation Planning and Technology*, 26(4), pp.289-312.
- [127] Teodorović, D. and Dell’Orco, M., 2005. Bee colony optimization—a cooperative learning approach to complex transportation problems. In *Advanced OR and AI Methods in Transportation: Proceedings of 16th Mini–EURO Conference and*

- 10th Meeting of EWGT, Poznan: Publishing House of the Polish Operational and System Research (pp. 51-60).
- [128] Teodorović, D., 2008. Swarm intelligence systems for transportation engineering: Principles and applications. *Transportation Research Part C*, 16(6), pp.651-782.
- [129] Teodorović, D. and Dell'Orco, M., 2008. Mitigating traffic congestion: solving the ride-matching problem by bee colony optimization. *Transportation Planning and Technology*, 31(2), pp.135-152.
- [130] Teodorović, D., 2009. Bee colony optimization (BCO). In *Innovations in swarm intelligence* (pp. 39-60). Springer Berlin, Heidelberg.
- [131] Teodorović, D. i Šelmić, M., 2012. *Računarska inteligencija u saobraćaju*. Saobraćajni fakultet, Beograd.
- [132] Teodorović, D., Šelmić, M. and Mijatović-Teodorović, Lj., 2012. Combining case based reasoning with bee colony optimization for dose planning in well differentiated thyroid cancer treatment. *Expert Systems with Applications*, 40(6), pp.2147-2155.
- [133] Teodorović, D., 2016. *Transportne mreže*, 5 izdanje. Saobraćajni fakultet, Beograd.
- [134] Todorović, N. and Petrović, S., 2013. Bee colony optimization algorithm for nurse rostering. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 43(2), pp.467-473.
- [135] Trabia, M.B., Kaseko, M.S. and Ande, M., 1999. A two-stage fuzzy logic controller for traffic signals. *Transportation Research Part C*, 7(6), pp.353-367.
- [136] Webster, F.V., 1958. Traffic signal settings. Road Research Technical Paper, No. 39, Road Research Laboratory, Her Majesty Stationary Office, London, UK.
- [137] Wey, W.M., 2000. Model formulation and solution algorithm of traffic signal control in an urban network. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(4), pp.355-377.

- [138] Wong, S.C., et al., 2002. Group-based optimization of a time-dependent TRANSYT traffic model for area traffic control. *Transportation Research Part B*, 36(4), pp.291-312.
- [139] Wunderlich, R., et al., 2008. A novel signal-scheduling algorithm with quality-of-service provisioning for an isolated intersection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9(3), pp.536-547.
- [140] Yagoda, H.N., et al., 1973. Subdivision of Signal Systems into Control Areas. *Traffic Engineering*, 43(12), pp.42-45.
- [141] Yang, H., 1995. Traffic assignment and signal control in saturated road networks. *Transportation Research Part A*, 29(2), pp.125–139.
- [142] Yang, H. and Yagar, S., 1995. Traffic assignment and signal control in saturated road networks. *Transportation Research Part A*, 29(2), pp.125-139.
- [143] Yang, Z., et al., 2006. Multi-phase traffic signal control for isolated intersections based on genetic fuzzy logic. In 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation (Vol. 1, pp. 3391-3395).
- [144] Yang, X., Ma, Y., and Zeng, Y. 2009. Multi-objective cycle length optimization using ant colony optimization algorithm. In American Society of Civil Engineers, Logistics, pp.4108-4118.
- [145] Yang, Z. and Benekohal, R., 2011. Use of genetic algorithm for phase optimization at intersections with minimization of vehicle and pedestrian delays. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2264), pp.54-64.
- [146] Yuan, C., Yang, X. and Shen, F., 2006. Fixed cycle strategy in oversaturated network traffic control. In 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation (Vol. 2, pp. 8674-8678). IEEE.
- [147] Zhang, G. and Wang, Y., 2011. Optimizing minimum and maximum green time settings for traffic actuated control at isolated intersections. *Intelligent Transportation Systems*, 12(1), pp.164-173.

- [148] Zhao, L., et al., 2011. A fast signal timing algorithm for individual oversaturated intersections. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(1), pp.280-283.
- [149] Zong, X., Xiong, S., Fang, Z., 2014. A conflict-congestion model for pedestrian-vehicle mixed evacuation based on discrete particle swarm optimization algorithm. *Computers & Operations Research*, 44, pp.1-12.

## **BIOGRAFSKI PODACI O KANDIDATU**

Aleksandar Jovanović je rođen 05. 04. 1987. godine u Beogradu. Osnovnu školu “Vasa Čarapić“ i srednju E.T.Š. “Rade Končar“ završio je sa odličnim uspehom. Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, smer “Drumski i gradski saobraćaj i transport“, završio je 2010. godine sa prosečnom ocenom 8,00. Završni rad pod nazivom “Analiza uslova saobraćaja na putu Donji Milanovac - Kladovo i predlog poboljšanja“ ocenjen je ocenom 10.

Master studije na matičnom fakultetu na smeru “Saobraćajno inženjerstvo“, završio je 2011. godine sa prosečnom ocenom 8,53. Master rad pod nazivom “Uticaj tunela na kapacitet dvotračnih puteva“ ocenjen je ocenom 10. Na doktorskim studijama položio je sve Statutom fakulteta predviđene ispite sa prosečnom ocenom 10,00.

Od 2013. do 2015. godine bio je u radnom odnosu na Visokoj tehničkoj školi strukovnih studija Kragujevac, u zvanju saradnika u nastavi. Od oktobra 2016. godine zaposlen je u Visokoj inženjerskoj školi strukovnih studija Tehnikum Taurunum, u Zemunu, u zvanju asistenta u nastavi.

U dosadašnjem istraživačkom radu je u svojstvu autora ili koautora učestvovao u objavljivanju više od 15 naučnih radova objavljenih u časopisima, na domaćim ili inostranim konferencijama.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Александар Јовановић

Број индекса: ДС-11-001

**Изјављујем**

да је докторска дисертација под насловом

**Избор сигналних планова за управљање саобраћајем применом  
оптимизације колонијом пчела**

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

**Потпис аутора**

У Београду, 26.6.2017





## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Александар Јовановић

Број индекса: ДС-11-001

Студијски програм: Саобраћај

Наслов рада: Избор сигналних планова за управљање саобраћајем применом оптимизације колонијом пчела

Ментор: Проф. др Душан Теодоровић, дипл. инж. саоб.

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис аутора**

У Београду, 26. 6. 2017



## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

### Избор сигналних планова за управљање саобраћајем применом оптимизације колонијом пчела

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.  
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 26. 6. 2017



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.