

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Rezar, A., 2013. Primerjava metod optimizacije semaforjev na odprti cestni mreži. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Žura, M.): 65 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Rezar, A., 2013. Primerjava metod optimizacije semaforjev na odprti cestni mreži. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Žura, M.): 65 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
PROMETNA SMER

Kandidat:

ANŽE REZAR

**PRIMERJAVA METOD OPTIMIZACIJE SEMAFORJEV
NA ODPRTI CESTNI MREŽI**

Diplomska naloga št.: 3323/PS

**COMPARISON OF OPTIMIZATION METHODS FOR
TRAFFIC SEMAPHORE CROSSROAD ON OPEN ROAD
NETWORK**

Graduation thesis No.: 3323/PS

Mentor:

izr. prof. dr. Marijan Žura

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Član komisije:

prof. dr. Darko Beg

Ljubljana, 02. 07. 2013

ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Anže Rezar izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Primerjava metod optimizacije semaforjev na odprti cestni mreži«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 12.06.2013

Anže Rezar

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	656.1(043.2)
Avtor:	Anže Rezar
Mentor:	izr. prof. dr. Marijan ŽURA, univ.dipl.inž.grad.
Naslov:	Primerjava metod optimizacije semaforjev na odprti cestni mreži
Tip dokumenta:	diplomska naloga
Obseg in oprema:	65 str., 19 pregl., 7 graf., 35 sl., 4 en.
Ključne besede:	zeleni val, cikel, časovna kvantizacija, optimizacija, semafor, cestna mreža

Izvleček

V diplomskem delu predstavljam program ARosem za določanje območja zelenega vala in ga primerjam z računanjem z linearnim programiranjem z Excelom ter s programom Synchro. Podrobneje sem opisal način delovanja programa ter predstavil navodila programa.

Za primerjavo med programi sem izbral dve cesti, in sicer glavno cesto skozi mesto Šentjur, to je Ulica Dušana Kvedra, ki je manj kompleksna, saj so na njej le tri semaforizirana križišča, ter najbolj obremenjeno cesto skozi mesto Celje, to je Mariborska cesta, ki se nadaljuje v Aškerčevo ulico. Na njej se nahaja 14 semaforiziranih križišč na razdalji 3130 m, zato sem jih zaradi kompleksnosti in potreb programa ARosem razdelil na tri odseke, ki sem jih nato združil. Te dve cesti sem optimiziral s programom ARosem, nato pa dobljene podatke primerjal z rezultati, ki sem jih dobil z linearnim programiranjem z Excelom in s programom Synchro za isti sistem semaforiziranih križišč.

Pri primerjavi rezultatov sem ugotovil, da je program ARosem primeren za reševanje manjših sistemov semaforiziranih križišč, pri reševanju večjih sistemov pa bi moral program še nadgraditi, da bi upošteval tudi zamude vozil.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 656.1(043.2)
Author: Anže Rezar
Supervisor: Prof. Marijan ŽURA, Ph.D.
Title: Comparison of optimization methods for traffic semaphore crossroad on open road network
Document type: Graduation Thesis
Scope and tools: 65 p., 19 tab., 7 ch., 35 fig., 4 eq.
Keywords: green wave, cycle, time quantization, optimization, semaphore, road network

Abstract

In this dissertation I'm introducing a program ARosem, with which a optimal range of a green wave can be determined. I'm comparing it with a calculation of linear programming with an Excel and with a program Synchro. I also describe in detail how the program operates.

For the comparison between programs I choose two road systems; the main street through the town Šentjur, named Ulica Dušana Kvedra, which is quite simple road system, because it only has three crossroads with semaphores, and the most burdened road through the city Celje, named Mariborska ulica, that continues in Aškerčeva ulica. This road system has 14 crossroads with semaphores in the distance of 3130 meters. Because of its complexity and the needs of the program I have split the problem on three parts that I joint at an end. I optimized these two road systems with the program ARosem and compared results for the same system with results, given by linear programming with Excel and program Synchro.

With the comparison of the results I have determined, that the program ARosem is more appropriate for resolving smaller systems of crossroads with semaphores, since resolving larger road systems would require additional program upgrade, like adding vehicle acceleration and deceleration times into the equation.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju dr. Marijan Žuri, univ.dipl.inž.gradb., za strokovno vodenje pri pripravi in pisanju diplomske naloge ter za prijaznost, ko je bilo potrebno prisluhniti.

Zahvala gre tudi moji družini, ki me je ves čas študija podpirala in mi stala ob stani.

Posebna zahvala pa gre Nataši, ki me je proti koncu študija spodbujala, da sem le-tega zaključil.

KAZALO VSEBINE

ERRATA	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
2 SVETLOBNE SIGNALNE NAPRAVE.....	2
2.1 Splošno o svetlobni signalizaciji	2
2.2 Kriteriji za postavitev svetlobno signalnih naprav.....	2
2.2.1 Kriterij prometne varnosti.....	3
2.2.2 Kriterij potekanja prometa	3
2.2.3 Kriterij prometnega vodenja	3
2.2.4 Kriterij prometnih obremenitev.....	4
2.2.4.1 Motorni promet.....	4
2.2.4.2 Peš promet	4
2.2.5 Večplastni kriterij.....	4
2.3 Komponente sistema svetlobno signalnih naprav	4
2.4 Vrste krmiljenja prometa v SSN	5
2.4.1 Samostojno križišče	5
2.4.1.1 Časovno togo krmiljenje	5
2.4.1.2 Delno prometno odvisno krmiljenje.....	5
2.4.1.3 Polno prometno odvisno krmiljenje.....	5
2.4.2 Linijsko krmiljenje	6
2.4.2.1 Simultano (istočasno) krmiljenje.....	7
2.4.2.2 Alternativno (izmenično) krmiljenje.....	7
2.4.2.3 Stalno (togo) progresivno krmiljenje	7
2.4.2.4 Fleksibilno (prožno) progresivno krmiljenje	8
2.4.3 Mrežno krmiljenje.....	8
3 PROGRAM ARosem.....	9
3.1 Namen programa ARosem.....	9
3.2 Delovanje programa ARosem.....	10
3.3 Analiza	12

4	NAVODILA ZA UPORABO PROGRAMA ARosem	13
4.1	Glavno okno	13
4.2	Dodajanje in brisanje križišč - Add (dodaj) in delete (izbriši)	14
4.3	Premikanje med križišči - Move up (premakni navzgor) in move down (premakni navzdol)	14
4.4	Ime križišča - name	15
4.5	Dolžina križišča - Width	15
4.6	Razdalja med križišči - Lenght	16
4.7	Zamik cikla - Offset.....	16
4.8	Hitrost vozil v obravnavanem področju - Speed limit	16
4.9	Določitev parametrov cikla - Cycle.....	17
4.10	Grafični prikaz rešitve	18
4.11	Urejanje razmerja v grafičnem prikazu rešitve - Zoom	19
4.12	Urejen pogled grafičnega prikaza rešitve.....	19
4.13	Določitev natančnosti računanja - Step.....	20
4.14	Računanje - Optimize	20
4.15	Izvoz rešitve v .cvs datoteko - Export	21
5	UPORABA PROGRAMA ARosem V PRAKSI.....	23
5.1	Cesta skozi mesto Šentjur	23
5.2	Mariborska cesta v Celju.....	26
5.2.1	I. odsek.....	26
5.2.2	II. odsek	29
5.2.3	III. odsek	32
5.2.4	Analiza celotnega odseka	35
6	PRIMERJAVA MED RAZLIČNIMI METODAMI VODENJA ZELENEGA VALA PRI ODPRTI CESTNI ARTERIJI.....	38
6.1	Prvi primer: Glavna cesta skozi mesto Šentjur	38
6.1.1	Rešitev s programom ARosem	38
6.1.2	Rešitev s programom Excel	42
6.1.3	Rešitev s programom Synchro	45
6.1.4	Primerjava rezultatov na primeru glavne ceste skozi mesto Šentjur	46
6.2	Drugi primer: Mariborska cesta v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9).....	47
6.2.1	Rešitev s programom ARosem	47
6.2.2	Rešitev z linearnim programiranjem v Excelu	51
6.2.3	Rešitev sistema s programom Synchro.....	54

6.2.4	Primerjava rezultatov na drugem primeru: Odsek Mariborska cesta križišče 6, 7, 8 in 9..	56
	
6.3	Tretji primer: Celoten odsek Mariborske ceste in Aškerčeve ulice v Celju.....	57
6.3.1	Rešitev sistema s programom ARosem.....	57
6.3.2	Rešitev sistema s programom Synchro.....	60
6.3.3	Primerjava rezultatov na tretjem primeru: Mariborska cesta in Aškerčeva ulica.....	62
6.4	Primerjava rezultatov.....	62
7	PREDNOSTI IN POMANJKLJIVOSTI PROGRAMA ARosem.....	63
7.1	Prednosti programa ARosem.....	63
7.2	Pomanjkljivosti programa ARosem.....	63
8	SKLEPNE UGOTOVITVE.....	64
	VIRI.....	65

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vsi dobljeni rezultati prostora rešitve za sistem treh semaforjev s ciklom 15 sekund in natančnostjo računanja 3 sekunde	11
Preglednica 2: Izračunani podatki s programom ARosem za cesto skozi mesto Šentjur	25
Preglednica 3: Dobljeni rezultati s programom ARosem za I. odsek Mariborske ceste	28
Preglednica 4: Dobljeni rezultati s programom ARosem za II. odsek Mariborske ceste	31
Preglednica 5: Dobljeni rezultati s programom ARosem za III. odsek Mariborske ceste	34
Preglednica 6: Dobljeni rezultati s programom ARosem za celoten odsek Mariborske ceste in Aškerčeve ulice	36
Preglednica 7: Izračunani podatki s programom ARosem za cesto skozi mesto Šentjur	39
Preglednica 8: S Synchron dobljena preglednica za podatke izračunane s programom ARosem za cesto skozi mesto Šentjur	41
Preglednica 9: Izračunani podatki po linearni metodi za cesto skozi mesto Šentjur	42
Preglednica 10: S Synchron dobljena preglednica za podatke izračunane po linearni metodi za cesto skozi mesto Šentjur	44
Preglednica 11: S Synchron optimizirana preglednica za cesto skozi mesto Šentjur	46
Preglednica 12: Izračunani podatki s programom ARosem za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)	48
Preglednica 13: S Synchron dobljena preglednica za podatke izračunane s programom ARosem za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)	50
Preglednica 14: Izračunani podatki po linearni metodi za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)	51
Preglednica 15: S Synchron dobljena preglednica za podatke izračunane po linearni metodi za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)	53
Preglednica 16: S Synchron optimizirana preglednica za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)	55
Preglednica 17: Izračunani podatki s programom ARosem za celoten odsek Mariborske ceste in Aškerčeve ulice v Celju	57
Preglednica 18: S Synchron dobljena preglednica za podatke izračunane s programom ARosem za celoten odsek Mariborske ceste in Aškerčeve ulice v Celju	58
Preglednica 19: S Synchron optimizirana preglednica za celoten odsek Mariborske ceste in Aškerčeve ulice v Celju	60

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Graf vodenja zelenega vala optimiziran s programom ARosem skozi celotno Mariborsko cesto in Aškerčevo ulico v Celju.	37
Grafikon 2: Graf vodenja zelenega vala optimiziran s programom ARosem za cesto skozi mesto Šentjur	40
Grafikon 3: Graf vodenja zelenega vala optimiziran po linearni metodi za cesto skozi mesto Šentjur	43
Grafikon 4: Graf vodenja zelenega vala optimiziran s Synchrom za cesto skozi mesto Šentjur.....	45
Grafikon 5: Graf vodenja zelenega vala optimiziran s programom ARosem za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)	49
Grafikon 6: Graf vodenja zelenega vala optimiziran po linearni metodi za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9).....	52
Grafikon 7: Graf vodenja zelenega vala optimiziran s Synchrom za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9).....	54

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz glavnega okna v programu ARosem.....	13
Slika 2: Prikaz ukaza dodaj in odstrani križišče.....	14
Slika 3: Prikaz ukaza premakni na prejšnje in naslednje križišče.....	14
Slika 4: Prikaz okenca, kjer vpišemo ime križišča.....	15
Slika 5: Prikaz okenca, kjer vpišemo dolžino križišča.....	15
Slika 6: Prikaz okenca, kjer vpišemo razdaljo med križiščema.....	16
Slika 7: Prikaz okenca, kjer lahko vpišemo zamik posameznega križišča.....	16
Slika 8: Prikaz okenca, kjer vpišemo hitrost vozil med križiščema.....	17
Slika 9: Prikaz območja, kjer vpišemo podatke o ciklu za posamezno križišče.....	18
Slika 10: Prikaz območja, kjer nam izriše dobljeno rešitev.....	18
Slika 11: Prikaz območja, kjer urejamo razmerja v grafičnem prikazu.....	19
Slika 12: Prikaz urejenega pogleda grafične rešitve.....	19
Slika 13: Prikaz okenca, kjer določamo natančnost računanja.....	20
Slika 14: Prikaz ukaza, ki nam optimizira rešitev.....	20
Slika 15: Prikaz ukaza, ki nam ponujeno rešitev izpiše v .cvs datoteki.....	21
Slika 16: Oblika izpisane datoteke, ki nam jo uredi program ARosem.....	21
Slika 17: Zračni posnetek z vrisanimi semaforiziranimi križišči ceste skozi mesto Šentjur (Atlas okolja, 2013).....	24
Slika 18: Razdalje med križišči ceste skozi mesto Šentjur.....	25
Slika 19: Izris rešitve, ki nam jo je ponudil program ARosem za ceste skozi mesto Šentjur.....	26
Slika 20: Zračni posnetek z vrisanimi semaforiziranimi križišči Mariborske ceste v Celju (I. odsek) (Atlas okolja, 2013).....	27
Slika 21: Razdalje med križišči I. odseka Mariborske ceste.....	28
Slika 22: Izris rešitve, ki nam jo je ponudil program ARosem za I. odsek Mariborske ceste.....	29
Slika 23: Zračni posnetek z vrisanimi semaforiziranimi križišči Mariborske ceste v Celju (II. odsek) (Atlas okolja, 2013).....	30
Slika 24: Razdalje med križišči II. odseka Mariborske ceste.....	31
Slika 25: Izris rešitve, ki nam jo je ponudil program ARosem za II. odsek Mariborske ceste.....	32
Slika 26: Zračni posnetek z vrisanimi semaforiziranimi križišči Mariborske ceste v Celju (III. odsek) (Atlas okolja, 2013).....	33
Slika 27: Razdalje med križišči III. odseka Mariborske ceste.....	34
Slika 28: Izris rešitve, ki nam jo je ponudil program ARosem za III. odsek Mariborske ceste.....	35
Slika 29: Izris vodenja vozil iz Synchra, ko vstavimo rešitev iz programa ARosem za cesto skozi mesto Šentjur.....	41

Slika 30: Izris vodenja vozil iz Synchrona, ko vstavimo rešitev iz linearnega modela za cesto skozi mesto Šentjur	44
Slika 31: Izris vodenja vozil po optimizaciji iz Synchrona za cesto skozi mesto Šentjur	46
Slika 32: Izris vodenja vozil iz Synchrona, ko vstavimo rešitev iz programa ARosem za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)	50
Slika 33: Izris vodenja vozil iz Synchrona, ko vstavimo rešitev iz linearnega modela za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)	53
Slika 34: Izris vodenja vozil po optimizaciji iz Synchrona za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)	55
Slika 35: Izris vodenja vozil iz Synchrona, ko vstavimo rešitev iz programa ARosem za celotno Mariborsko cesto in Aškerčevo ulico v Celju	59

KRATICE

SSN Svetlobno signalne naprave

1 UVOD

Vodenje prometa po cestnih mrežah, ki se nivojsko križajo med seboj, je zmeraj predstavljalo problem, ki so ga skozi sodobno zgodovino reševali strokovnjaki na tem področju. Porast vozil v prometu je problematiko še povečeval, zato so s časom začeli uporabljati svetlobne signalne naprave, ki ob poznavanju njihovega pomena bistveno pripomorejo k učinkovitejšemu vodenju prometa. Ena takšnih najbolj razširjenih svetlobnih naprav v prometu je semafor, naprava, ki s svojim signalom (najpogosteje z zeleno, rdečo in oranžno lučjo) usmerja in vodi promet.

Na cestni arteriji, kjer imamo več prometno obremenjenih semaforiziranih križišč, je za učinkovito vodenje potrebno sinhronizirano vodenje semaforjev, da je propustnost vozil skozi arterijo čim večja, zamude vozil pa čim manjše. Ena izmed metod vodenja skozi arterijo je optimiziranje semaforjev v zeleni val. To je prometno neodvisno vodenje vozil, s katerim iščemo sinhronizacijo semaforjev tako, da je območje vozil, ki v nepretrgani liniji z določeno hitrostjo prevozijo križišče pri zeleni luči, v obe prometni smeri največje.

Za določanje čim večjega območja zelenega vala v obe smeri sem razvil program ARosem, ki ga v tej diplomski nalogi predstavljam in primerjam z drugimi programi. Program ARosem je zasnovan tako, da pregleda vse možne rešitve in nam ponudi najboljšo. To rešitev bom primerjal z rešitvami, pridobljenimi po linearni metodi optimiziranja sistema semaforiziranih križišč v Excelu in po optimizaciji sistema s programom Synchro.

Programe bom med seboj primerjal na dveh cestah. Ker prihajam iz okolice Šentjurja, sem si za prvo cesto izbral glavno cesto skozi mesto Šentjur, to je Ulica Dušana Kvedra. Ta cesta je primerna zaradi svoje dolžine in položajev križišč na njej, saj ni preveč kompleksna, v posledici česar bodo rešitve preproste za primerjavo. Kot drugo sem si izbral najbolj obremenjeno cesto v mestu Celje, to je Mariborska cesta, ki se nadaljuje v Aškerčevo ulico. Na tej cesti se nahaja 14 semaforiziranih križišč, kar pomeni, da bodo rešitve tega sistema kompleksnejše.

2 SVETLOBNE SIGNALNE NAPRAVE

2.1 Splošno o svetlobni signalizaciji

Ene najučinkovitejših naprav, ki pomagajo urejati promet v mestih, so poleg statične prometne signalizacije svetlobno signalne naprave (v nadaljevanju SSN). Uporabljamo jih za nemoteno, tekoče in bolj varno odvijanje prometa v križiščih in na nevarnih odsekih cest (Slovenska ITS Arhitektura, 2007).

Poznamo več vrst SSN:

- semaforji za motorna vozila, pešce in kolesarje,
- semaforji za tirna vozila (tramvaj, vlak) in
- opozorilne svetlobne naprave (utripalci) (Slovenska ITS Arhitektura, 2007).

SSN se na mestnih prometnih površinah in kritičnih točkah postavljajo z namenom, da se poveča propustnost križišč, izboljša prometna varnost, učinkoviteje vodi promet in opozarja na prometno nevarna mesta (Slovenska ITS Arhitektura, 2007).

2.2 Kriteriji za postavitve svetlobno signalnih naprav

SSN postavljamo predvsem zaradi povečanja prometne varnosti, bolj tekočega poteka prometa in vodenja prometa, njihova postavitve pa je opravičljiva tudi, če omogoča varno in hitro vključevanje interventnih vozil (vozil policije, gasilcev, reševalcev idr.) in vozil mestnega javnega prometa v sicer gost prometni tok. Seveda pa moramo, preden se odločimo za postavitev SSN, preveriti, ali se tekoče potekanje prometa ne bi moglo vzpostaviti s kakšnimi drugimi ukrepi, npr. z uvedbo sistema enosmernih ulic, s preusmeritvijo prometa, ki zavija na glavno cesto s stranske ulice, na sosednja, manj obremenjena križišča oziroma s stalno ali časovno omejitvijo zavijalnih voženj, kadar se zavijalce lahko usmeri po drugi poti (Kastelic in sod., 1991).

Potreba za postavitev SSN se presoja po naslednjih kriterijih:

- kriterij prometne varnosti,
- kriterij potekanja prometa,
- kriterij prometnega vodenja,
- kriterij prometnih obremenitev in
- večplastni kriterij.

2.2.1 Kriterij prometne varnosti

Kadar z analizo prometne varnosti in posameznih prometnih nesreč na dotičnem križišču ugotovimo, da se enake vrste nesreč ponavljajo in da bi se s postavitvijo SSN število teh nesreč zmanjšalo ali odpravilo, potem je postavitvev SSN smiselna in upravičena.

Kadar postavimo SSN iz prometno-varnostnih razlogov, mora naprava delovati ves dan, tudi v časih manjših prometnih obremenitev v križišču, razen če kriterij prometne varnosti, ki je narekoval postavitvev SSN, ne traja ves dan; v tem primeru lahko napravo v tem času izključimo, vendar pod pogojem, da v času izključitve v križišču ne nastopa nobena druga nevarnost (Kastelic in sod., 1991).

2.2.2 Kriterij potekanja prometa

Kadar z opazovanjem in meritvami potekanja prometnih tokov na dotičnem križišču ugotovimo, da se v konični uri redno pojavlja večja kolona levih zavijalcev oziroma če se čas čakanja vozil v križišču poveča na več kot 3 minute, s čimer promet na nesemaforiziranem križišču ne more več tekoče potekati, lahko s postavitvijo SSN in s primernim gradbenim preoblikovanjem križišča ali preureditvijo posameznih voznih pasov izboljšamo celotno prometno dogajanje (Kastelic in sod., 1991).

2.2.3 Kriterij prometnega vodenja

Potreba za postavitvev SSN lahko temelji tudi na kriteriju prometnega vodenja, in sicer:

- za vzpostavitev koordiniranega krmiljenja na daljšem cestnem odseku z več vmesnimi križišči ali na določenem delu cestne mreže v mestu,
- če so ovirana vozila mestnega javnega prometa pri prečkanju ceste in vključevanju v prometni tok ali zavijanju,
- če želimo pred vstopi na prometno že preobremenjeno cestno mrežo preprečiti vključevanje novo prihajajočim vozilom,
- če nastopa na cestah z več kot dvema voznima pasovoma smerno spreminjajoča se prometna obremenitev vozil tekom dneva (Kastelic in sod., 1991).

S postavitvijo SSN v tem primerih na kritičnih točkah oziroma odsekih vzpostavimo tekoč promet.

2.2.4 Kriterij prometnih obremenitev

2.2.4.1 Motorni promet

Na nesemaforiziranih križiščih, kjer se prometni tokovi na neprednostnih priključkih ne morejo odvijati tekoče, lahko postavitev SSN, skupaj z ustreznimi gradbenimi rešitvami, izboljša pretočnost križišča, pri čemer je nujnost izboljšave pogojena predvsem s pojavom večjih zastojev in povečanjem številu nesreč (Kastelic in sod., 1991).

2.2.4.2 Peš promet

Zaradi ranljivosti pešcev kot najšibkejših udeležencev v prometu, je potrebno peš prometu posvečati posebno pozornost. Glede na število pešcev in gostoto motornega prometa se odločamo za različne načine varovanja pešpoti. Poleg nivojskih rešitev je za povečanje varnosti pešcev eden najprimernejših ukrepov prav postavitev SSN (Kastelic in sod., 1991).

2.2.5 Večplastni kriterij

Večplastni kriterij za postavitev SSN temelji na metodologiji prometne simulacije in upošteva vrednost zamud na nesemaforiziranem in semaforiziranem križišču, pri čemer se predpostavlja, da je postavitev SSN na določenem nesemaforiziranem križišču potrebna takrat, ko izračunana vrednost zamud na celotnem križišču preseže simulirano vrednost zamud na istem, semaforiziranem križišču (Kastelic in sod., 1991).

2.3 Komponente sistema svetlobno signalnih naprav

Sistem SSN sestavljajo naslednje komponente:

- semaforji za motorni promet, javni potniški promet, kolesarje in pešce; poznamo tridelne, dvodelne in enodelne semaforje (utripalci), semaforje kot puščice itd.
- merilniki prometnih in okoljskih parametrov:
- meritve trenja, detekcija poledice, vremenski podatki,
- zaznavanje oziroma štetje prometa (vozil, kolesarjev, pešcev),
- detekcija smeri prometnega toka,
- detekcija dolžine kolone vozil,
- detekcija, povezana s hitrostjo in pospeškom,
- detekcija izrednih dogodkov (stoječa vozila),
- avtomatsko prepoznavanje registrskih tablic,

- dodatne naprave: tipke za pešce in zvočni signal za slepe in slabovidne ljudi
- krmilni sistem, ki je odvisen od načina krmiljenja križišča: samostojno ali pa v coni z možnostjo ročnega upravljanja semaforiziranega križišča (Slovenska ITS Arhitektura, 2007).

2.4 Vrste krmiljenja prometa v SSN

Za mestne ceste in ulice obstajajo tri osnovne vrste krmiljenja prometa s SSN, in sicer:

- samostojno križišče,
- linijsko krmiljenje in
- mrežno krmiljenje (Kastelic in sod., 1991).

2.4.1 Samostojno križišče

Krmiljenje samostojnega križišča se pojavlja v sledečih oblikah:

- časovno togo krmiljenje,
- delno prometno odvisno krmiljenje in
- polno prometno odvisno krmiljenje.

2.4.1.1 Časovno togo krmiljenje

S časovno togim krmiljenjem določamo pretok vozil v določenih smereh periodično z vloženi togimi programi v krmilni napravi neodvisno od spreminjanja prometnih tokov v posameznih časovnih intervalih (Kastelic in sod., 1991).

2.4.1.2 Delno prometno odvisno krmiljenje

Pri delnem prometno odvisnem krmiljenju na potek signalnega programa vplivajo le posamični, v križišče vlivajoči se prometni tokovi, in sicer s posredovanjem detektorjev, tipk za pešce. Takšno krmiljenje je smiselno in ustrezno pri prehodih za pešce, kjer je promet pešcev redek do zmeren. Poleg tega se ta vrsta prometnega krmiljenja lahko vgradi tudi pri močnih prometnih tokovih v glavni smeri ter šibkem prečnem ali uvoznem prometu (Kastelic in sod., 1991).

2.4.1.3 Polno prometno odvisno krmiljenje

Za polno prometno odvisno krmiljenje gre v primeru, ko na potek signalnega programa vplivajo vsi, v križišče vlivajoči se prometni tokovi preko vgrajenih detektorjev (Kastelic in sod., 1991).

Delno ali polno prometno odvisno krmiljenje uporabljamo na posameznih križiščih, ki jih zaradi njihove lege ali drugih specifičnih pogojev ne moremo vključiti v koordinirano delovanje, imajo pa zelo različno močne prometne tokove iz različnih smeri (Kastelic in sod., 1991).

2.4.2 Linijsko krmiljenje

Za razliko od samostojnega križišča, kjer urejamo pretočnost prometa na posameznem kritičnem križišču, gre pri linijskem krmiljenju za koordinirano vodenje prometnih tokov na sosednjih, vzdolž linije razvrščenih križiščih. Pri linijski koordinaciji je najbolj običajen pojem t.i. zeleni val, ki omogoča, v kolikor je koordinacija pravilna in optimalna, da lahko večina vozil pri določeni hitrosti brez ustavljanja prevozi določeno število križišč. Koordinacija je še smiselna med križišči, ki med seboj niso oddaljena več kot 750 m (izjemoma ob posebno ugodnih pogojih ne več kot 1000 m); pri večji oddaljenosti se kolone vozil že toliko razpršijo, da koordinacija ni več učinkovita (Kastelic in sod., 1991).

Koordinacija služi predvsem za skrajšanje potovalnega časa v prednostnih, pa tudi v vseh ostalih smereh, posredno pa vpliva na udobno vožnjo, zmanjšanje emisij škodljivih plinov in prometnega hrupa (Kastelic in sod., 1991).

Da bi koordinacija prinesla optimalne rezultate in bila uspešna, je potrebno upoštevati naslednje dejavnike:

- število faz na posameznem križišču naj ne bo po nepotrebem veliko,
- koordinacija je uspešnejša na večpasovnih cestah, kjer je vsaj en pas namenjen prosti vožnji, s čimer je dana možnost prehitevanja, posledično pa se s tem zmanjša vpliv počasnih vozil na hitrost prostega toka vozil, ki je optimalna za dosego zelenega vala in
- predvidenje posebnih zavijalnih pasov za zavijalce, da le-ti ne ovirajo naravnost vozeči prometni tok; v kolikor razporeditev zavijalnih pasov ni možna, je potrebno preveriti možnost prepovedi zavijanja (Kastelic in sod., 1991).

Z linijskim krmiljenjem (zelenim valom) koordinirano urejamo promet s štirimi osnovnimi sistemi:

- simultanim (istočasnim) krmiljenjem,
- alternativnim (izmeničnim) krmiljenjem,
- stalnim (togim) progresivnim krmiljenjem in
- fleksibilnim (prožnim) progresivnim krmiljenjem.

2.4.2.1 Simultano (istočasno) krmiljenje

Pri simultanem (istočasnem) krmiljenju kažejo vsi signalni dajalci vzdolž glavne smeri istočasno isto fazo: zeleno, rumeno ali rdečo, pri čemer je v vseh koordiniranih križiščih začetek in konec posameznih faz istočasen (Kastelic in sod., 1991).

Ta sistem je uporaben le pri izredno majhnih in konstantnih razdaljah med križišči ter pri omejenem številu križišč, pri čemer morajo biti razdalje med posameznimi križišči enake ali pa so številčni mnogokratniki najmanjše razdalje med dvema sosednjima križiščema (Kastelic in sod., 1991).

2.4.2.2 Alternativno (izmenično) krmiljenje

Pri alternativnem (izmeničnem) krmiljenju kažejo signalni dajalci vzdolž glavne smeri istočasno zamenjane pojme: v prvem križišču zeleno, v naslednjem rdeče, v tretjem zeleno itd. (Kastelic in sod., 1991).

Za razliko od simultanega (istočasnega) krmiljenja nam alternativno (izmenično) krmiljenje omogoča krmiljenje tudi, kadar so razdalje med križišči večje, vendar pa morajo biti ali enake ali številčni mnogokratniki najmanjše razdalje med dvema sosednjima križiščema, da je omogočen zeleni val. Slaba lastnost tega sistema je nepopolna izkoriščenost prepustnosti v posameznih križiščih ter težko prilagajanje neenakim razdaljam med njimi, saj se ta sistem uporablja predvsem pri cestah, kjer so razdalje med križišči velike in v glavnem enake (Kastelic in sod., 1991).

2.4.2.3 Stalno (togo) progresivno krmiljenje

Pri stalnem (togem) progresivnem krmiljenju imajo vsa križišča, ki so vključena v koordinirano krmiljenje, enako dolg cikel. Zeleni intervali glavnih smeri posameznih križišč se vklaplajo eden za drugim tako, da doseže vozilo pri določeni in odrejeni hitrosti v naslednjem križišču vselej začetek nastopa zelenega signala (Kastelic in sod., 1991).

Za razliko od alternativnega (izmeničnega) krmiljenja, kjer izhaja hitrost obvezno iz razdalj med križišči, stalno (togo) progresivno krmiljenje omogoča, da določimo hitrost z ozirom na prometno-tehnične pogoje vozišča in strukturo prometnega toka ter tako dosežemo večjo prepustnost koordinirane smeri. Število vozil, ki jih prepušča zeleni val, je pri tem sistemu krmiljenja večji kot pri alternativnem (izmeničnem) in simultanem (istočasnem) sistemu. Prednost tega sistema krmiljenja je, da omogoča zeleni val pri neenakih razdaljah med križišči, vendar le za enosmerni promet ali za

promet, ki zjutraj prihaja, opoldne pa odhaja iz mesta. Slabost tega sistema je tudi, da ne dopušča prilagoditve spreminjajočim se prometnim pogojem v križiščih (Kastelic in sod., 1991).

2.4.2.4 Fleksibilno (prožno) progresivno krmiljenje

Pri fleksibilnem (prožnem) progresivnem krmiljenju so zeleni intervali posameznih smeri v križiščih tako dolgi, kot jih zahteva prometna gostota. V ta namen mora imeti ta sistem krmiljenja vgrajene naprave, ki registrirajo prihajajoča vozila in določajo dolžino ciklusa v odvisnosti od prometnega toka (Kastelic in sod., 1991).

Sistem fleksibilnega (prožnega) krmiljenja zagotavlja neprekinjeni prometni tok cele skupine vozil z najmanjšimi zamudami tako v glavni kot tudi v stranski smeri, za razliko od zgoraj opisanih sistemov krmiljenja pa veliko lažje in uspešneje obvladuje neenake razdalje med križišči (Kastelic in sod., 1991).

2.4.3 Mrežno krmiljenje

Mrežno krmiljenje se uporabi takrat, kadar se med seboj križa več mestnih arterij, kjer je potrebno SSN na križiščih voditi koordinirano. Mrežno koordiniranje je primerno za ožja mestna središča, kjer so izraziti zavijalni prometni tokovi in majhna medsebojna razdalja med sosednjimi križišči (Kastelic in sod., 1991).

Pri sistemu mrežnega krmiljenja je potrebno za uspešno in optimalno koordinacijo upoštevati tudi različne prometne udeležence:

- mestni potniški promet,
- cestno železnico,
- avtobusni promet,
- peš promet in
- intervencijske vožnje.

3 PROGRAM ARosem

3.1 Namen programa ARosem

Program ARosem je namenjen iskanju najboljše rešitve skupne širine zelenih pasov v obeh smereh. Pri iskanju najboljše rešitve program pregleda časovno kvantiziran prostor vseh možnih rešitev, pri čemer je časovna kvantizacija prostora enakomerna, diskretna razdelitev časovne komponente. Glavni razlog časovne kvantizacije je optimizacija iskanja rešitve.

Prostor rešitev predstavljajo vse kombinacije zamikov semaforjev, pri katerih vozila prevozijo semaforje brez ustavljanj. Velikost prostora rešitev je odvisna od večih faktorjev:

- števila semaforjev,
- največje časovne dolžine ciklov ter
- časovne kvantizacije (natančnosti računanja).

Preko prostora rešitev se premikamo s štetjem v

$$V = \left(\frac{\text{največje trajanje cikla}}{\text{časovna kvantizacija}} \right) \quad (1)$$

sistemu z

$$S = (\text{št. semaforjev} - 1) \quad (2)$$

mesti.

Velikost prostora rešitev je tako:

$$\text{prostor rešitev} = V^S \quad (3)$$

Za končen izračun časovno kvantizacijo nastavimo na 1 sekundo, za predogled sistema pa je priporočljivo povečati časovno kvantizacijo na 3 sekunde ali več. Sicer se natančnost iskanja najboljše rešitve s tem zmanjša in se lahko zgodi, da algoritem zgreši najboljšo možno rešitev, vendar ARosem s tem bistveno hitreje pride do predlagane rešitve.

3.2 Delovanje programa ARosem

Za lažji prikaz načina delovanja programa smo izbrali naslednje vrednosti parametrov programa:

- časovno kvantizacijo oziroma natančnost računanja smo nastavili na 3 sekunde,
- časovno dolžino cikla smo določili na 15 sekund,
- v sistemu pa imamo 3 semaforje.

Razdalja med vsemi križišči je 100 m, vsa križišča so široka 20 m, vsi cikli pa imajo enako razmerje med časom zelene in rdeče luči.

S tako izbranimi vrednostmi parametrov smo vse dobljene rezultate prikazali v preglednici 1 in z njeno pomočjo izbrali najboljši rezultat.

Prostor rešitve pri teh predpostavkah je:

$$\left(\frac{15}{3}\right)^{(3-1)} = 25 \quad (4)$$

Preglednica 1: Vsi dobljeni rezultati prostora rešitve za sistem treh semaforjev s ciklom 15 sekund in natančnostjo računanja 3 sekunde

Sistem:			Rezultat v desno:	Rezultat v levo:
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	2	0	0
0	0	3	0	0
0	0	4	0	0
0	1	0	0	0
0	1	1	0	0
0	1	2	0	0
0	1	3	0	0
0	1	4	0	0
0	2	0	3	3
0	2	1	0	0
0	2	2	0	0
0	2	3	0	0
0	2	4	3	3
0	3	0	6	6
0	3	1	3	3
0	3	2	0	0
0	3	3	0	0
0	3	4	3	3
0	4	0	3	3
0	4	1	3	3
0	4	2	0	0
0	4	3	0	0
0	4	4	0	0

Zgornja preglednica ponazori delovanje programa ARosem pri iskanju najboljšega območja zelenega vala pri sistemu treh semaforjev s ciklom 15 sekund in natančnostjo računanja 3 sekunde. Prvi trije stolpci preglednice predstavljajo tri semaforje in zamike cikla na posameznem semaforju. V naslednjih dveh stolpcih je prikazan rezultat v desno (v eno smer) in v levo (v nasprotno smer), ki nam pove, kolikšno je zaradi zamikov cikla na posameznih semaforjih območje zelenega vala.

3.3 Analiza

Iz dobljenih podatkov izhaja, da je rezultat, to je enako območje zelenega vala v obe smeri, največje pri sistemu 0, 3, 0; to rešitev nam kot najboljšo program tudi predlaga. Predlagana rešitev pomeni, da bi glede na to, da je natančnost računanja 3 sekunde, najboljšo rešitev dobili pri zamikih v prvem semaforju 0 sekund, pri drugem semaforju 9 sekund in pri tretjem 0 sekund. Zamiki pri programu so podani v negativni smeri.

Če v program vstavimo natančnost računanja na 1 sekundo dobimo 225 rešitev, pri čemer je najboljša rešitev pri sistemu 0,7,0, kar pomeni da je najboljši rezultat sistema pri zamikih v prvem semaforju 0 sekund, v drugem 7 sekund in v tretjem 0 sekund.

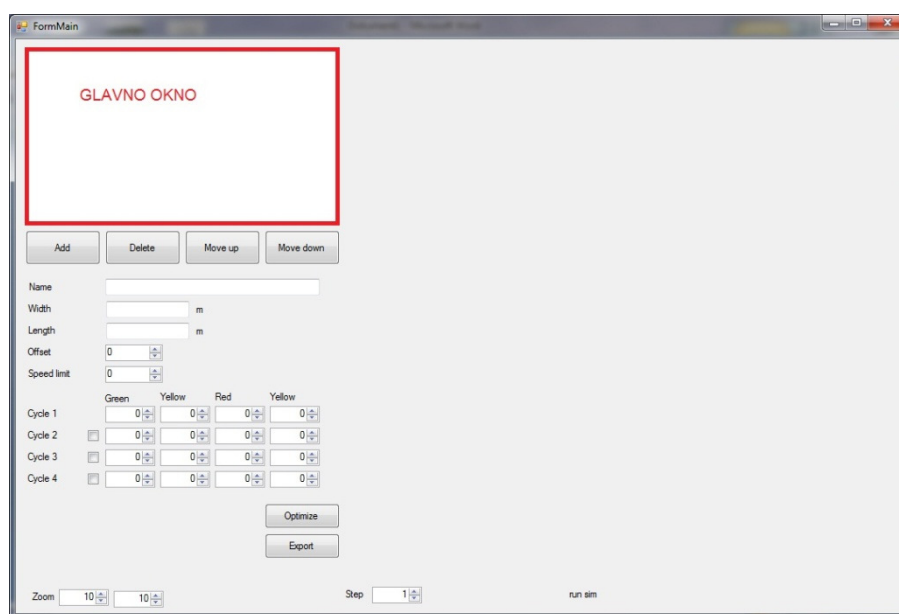
Pri kompleksnejših sistemih, ki predstavljajo realnejše rešitve, kot je npr. sistem 5 semaforjev pri dolžini cikla 100 sekund z natančnostjo računanja 1 sekundo, dobimo 10^8 rešitev, od katerih program predstavi najboljšo. Problem se pojavi pri večjem številu semaforjev, če želimo računati sistem z npr. 12 semaforji, saj je pri ciklu z dolžino 100 sekund in z natančnostjo računanja 1 sekundo prostor rešitev velikosti 100^{11} oz. 10^{22} rešitev, kar predstavlja problem tudi za najnovejše računalnike. Za takšne primere je v programu sicer dodana optimizacija, ki zavrže rezultat takoj, ko pride do rezultata 0, ker je takšen rezultat za nas brez pomena, vendar pa je kljub temu v takšnih sistemih še vedno toliko rešitev, da jih tudi najzmogljivejši računalnik računa po več ur. Zato je pri takšnih primerih priporočljivo upoštevati višjo časovno kvantizacijo.

4 NAVODILA ZA UPORABO PROGRAMA ARosem

Ker je program zasnovan za čim lažjo uporabo, je na začetku smiselno predstaviti njegove osnovne funkcije.

4.1 Glavno okno

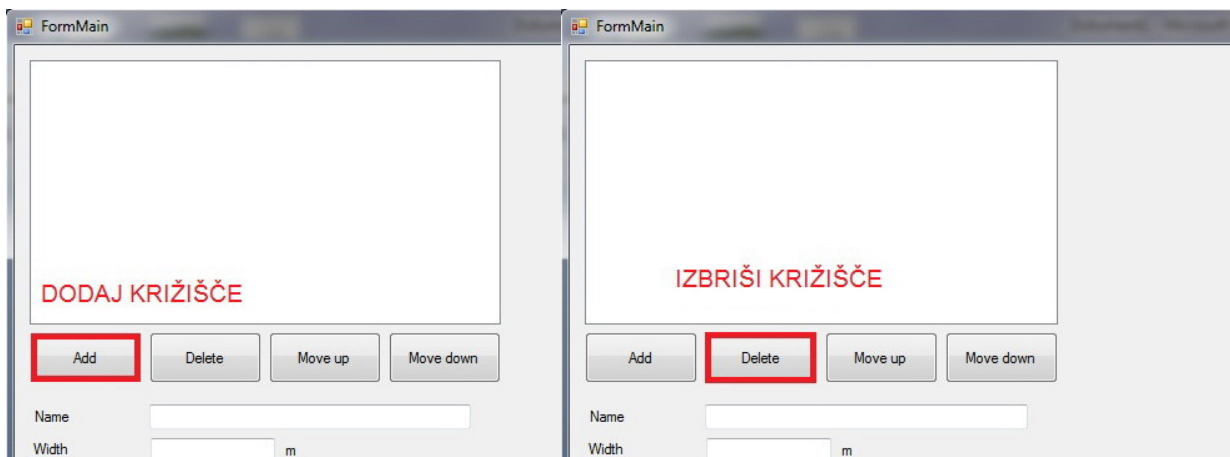
V glavnem oknu so prikazana križišča v zaporednem redu. Prikazanih je toliko križišč, kolikor jih je bilo vstavljenih in v takšnem zaporedju, kot so bila vstavljena.



Slika 1: Prikaz glavnega okna v programu ARosem

4.2 Dodajanje in brisanje križišč - Add (dodaj) in delete (izbriši)

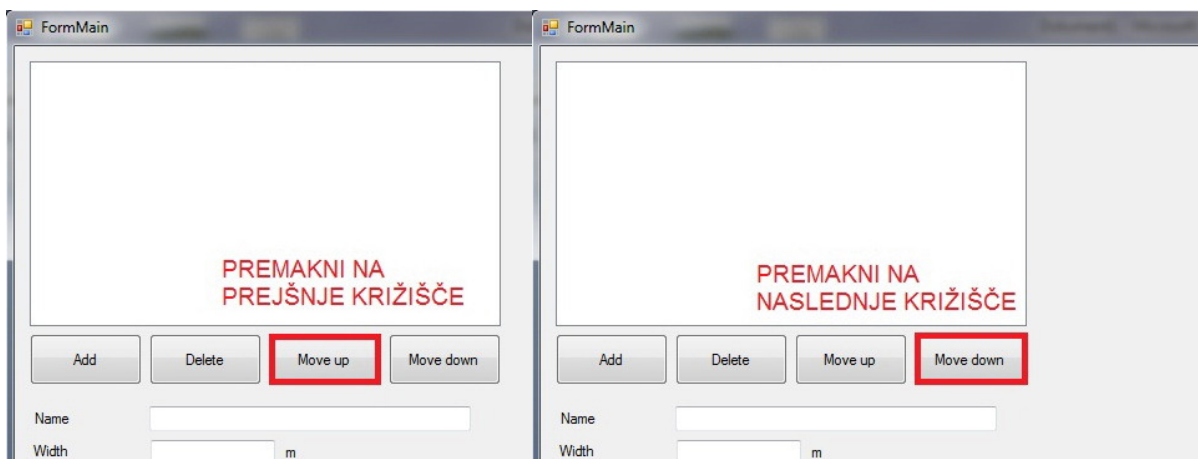
Ukaz add doda križišče, ki se nato prikaže v glavnem oknu, z ukazom delete pa se označeno križišče izbriše.



Slika 2: Prikaz ukaza dodaj in odstrani križišče

4.3 Premikanje med križišči - Move up (premakni navzgor) in move down (premakni navzdol)

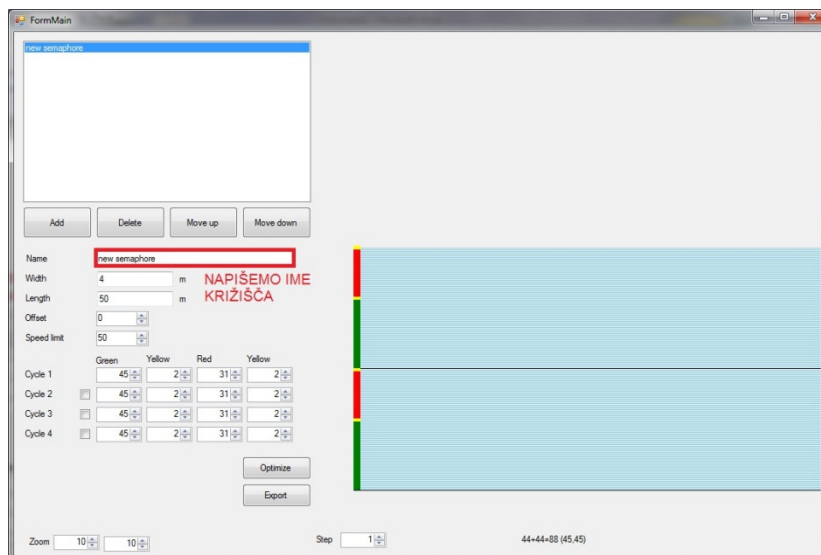
Z ukazom move up se v glavnem oknu premika med križišči navzgor (na prejšnje križišče), z ukazom move down pa se v glavnem oknu premika med križišči navzdol (na naslednje križišče).



Slika 3: Prikaz ukaza premakni na prejšnje in naslednje križišče

4.4 Ime križišča - name

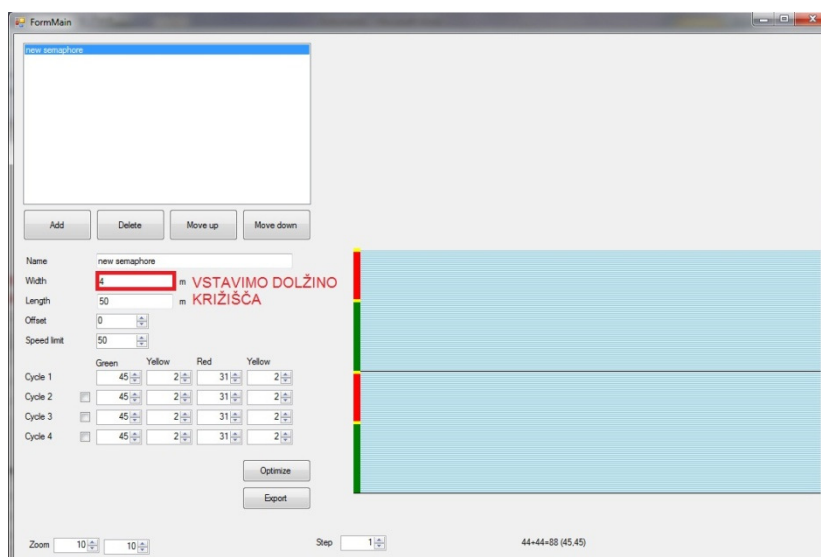
V okence name vpišemo ime oz. oznako križišča.



Slika 4: Prikaz okenca, kjer vpišemo ime križišča

4.5 Dolžina križišča - Width

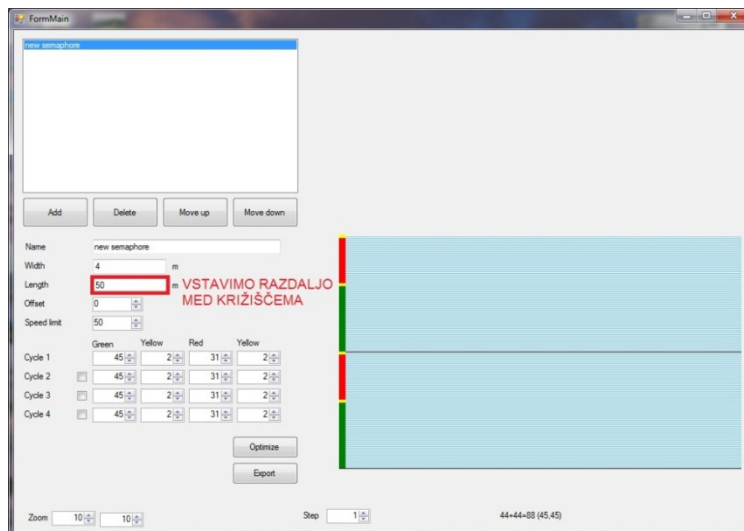
V okence width vpišemo dolžino križišča (v metrih).



Slika 5: Prikaz okenca, kjer vpišemo dolžino križišča

4.6 Razdalja med križišči - Lenght

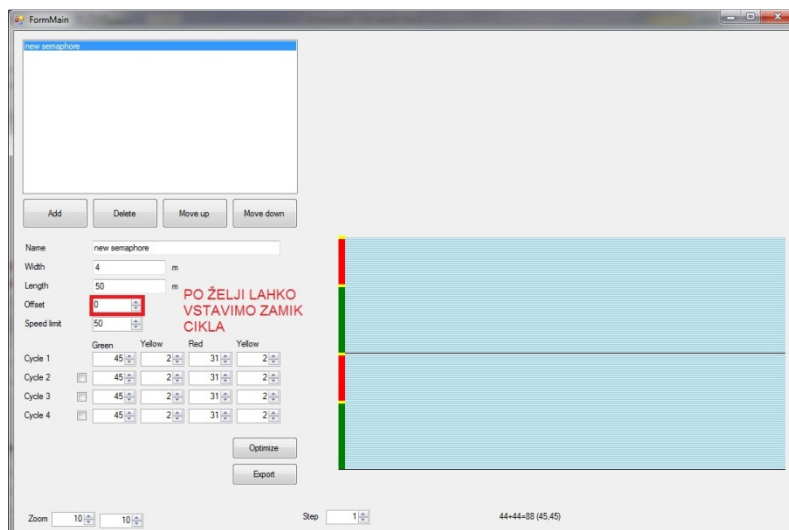
V okence lenght vstavimo razdaljo med obravnavanim križiščem in naslednjim križiščem (v metrih).



Slika 6: Prikaz okenca, kjer vpišemo razdaljo med križiščema

4.7 Zamik cikla - Offset

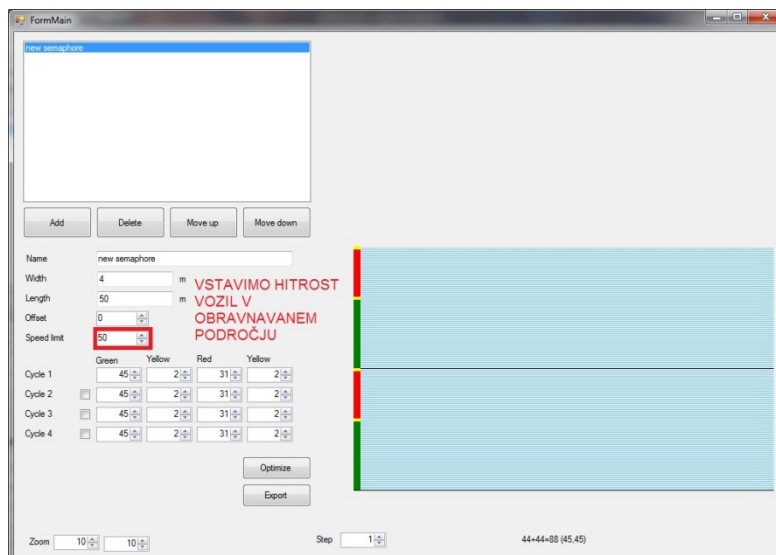
Po želji lahko v okencu offset zamikamo cikel v posameznem križišču, s čimer lahko popravljamo rezultat, v kolikor z njim nismo zadovoljni in s posameznimi kombinacijami zamikov poskušamo dobiti ustrežnejši rezultat. Če zamike urejamo pred optimizacijo, nam le ta zamike prepíše z novimi.



Slika 7: Prikaz okenca, kjer lahko vpišemo zamik posameznega križišča

4.8 Hitrost vozil v obravnavanem področju - Speed limit

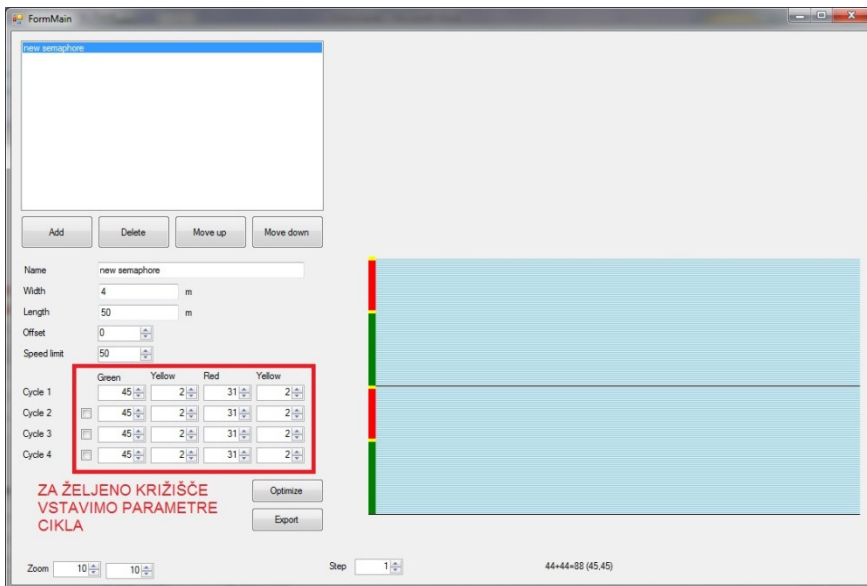
V okencu speed limit določimo hitrost vozil v obravnavanem križišču in hitrost vozil na razdalji med obravnavanim in naslednjim križiščem.



Slika 8: Prikaz okenca, kjer vpišemo hitrost vozil med križiščema

4.9 Določitev parametrov cikla - Cycle

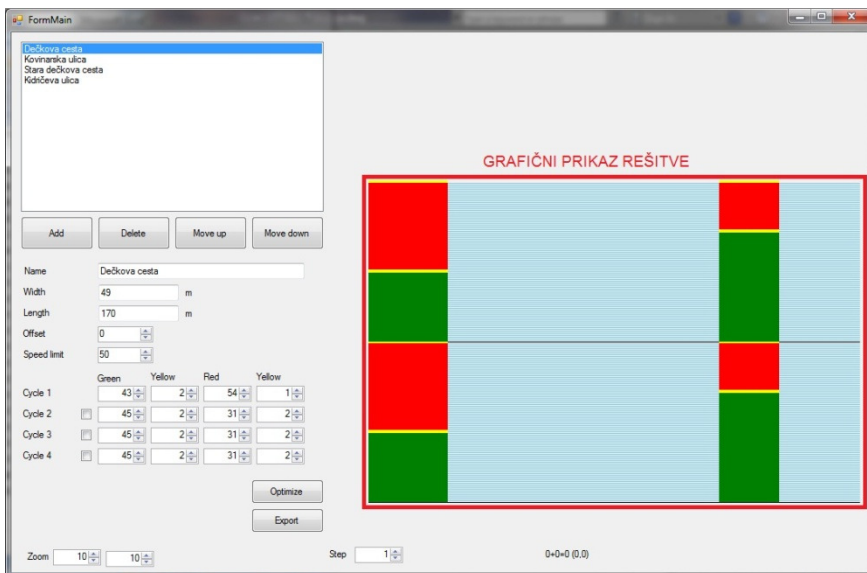
Pri določitvi parametrov ciklov - ukaz cycle - definiramo cikle obravnavanega križišča. Ker morajo biti dolžine ciklov v vseh semaforjih enake, se v večini primerov uporablja samo prva vrstica. Dovoljena je uporaba cikla, ki je večkratnik ostalih ciklov, kar urejamo v preostalih vrsticah, vendar jih je za upoštevanje pri optimizaciji potrebno predhodno označiti. V stolpec green vpisujemo čase zelene luči v zeleni smeri, v stolpec red pa vpisujemo čase rdeče luči v zeleni smeri. V stolpca yellow vpisujemo vmesne čase (čase rumene luči) med zeleno in rdečo lučjo (drugi stolpec) ter med rdečo in zeleno lučjo (četrti stoplec).



Slika 9: Prikaz območja, kjer vpišemo podatke o ciklu za posamezno križišče

4.10 Grafični prikaz rešitve

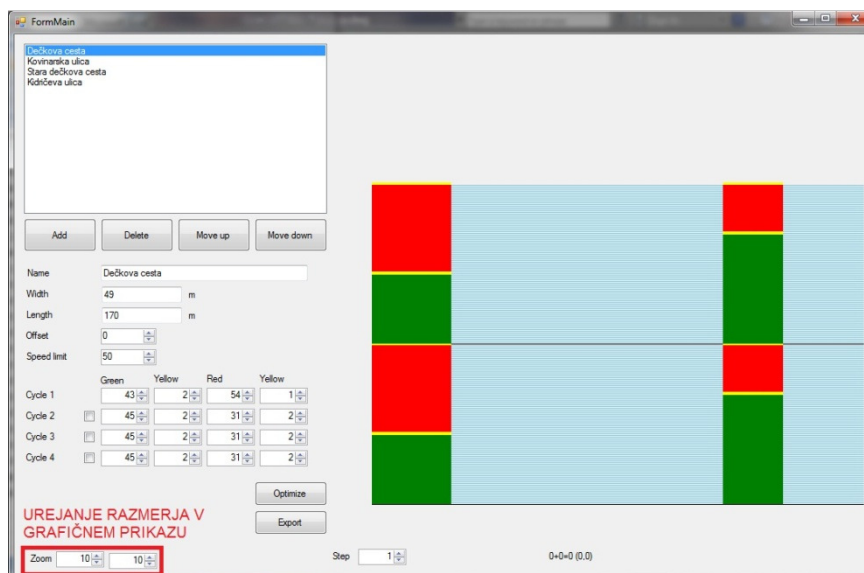
Po končani ureditvi ciklov in parametrov križišč, ob predpostavki, da so vsote ciklov enake, se v grafičnem oknu pojavi graf rešitve.



Slika 10: Prikaz območja, kjer nam izriše dobljeno rešitev

4.11 Urejanje razmerja v grafičnem prikazu rešitve - Zoom

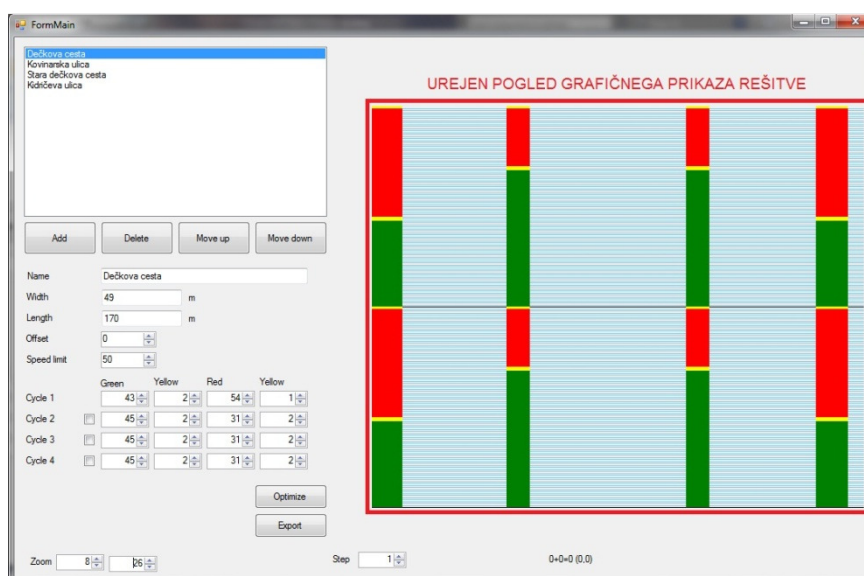
Ker slika v grafičnem prikazu ni v ustreznem merilu, le-to popravimo v ukazni vrstici zoom. V prvem oknu popravljamo velikost (razmerje) grafa v vertikalni smeri, v drugem oknu pa v horizontalni smeri.



Slika 11: Prikaz območja, kjer urejamo razmerja v grafičnem prikazu

4.12 Urejen pogled grafičnega prikaza rešitve

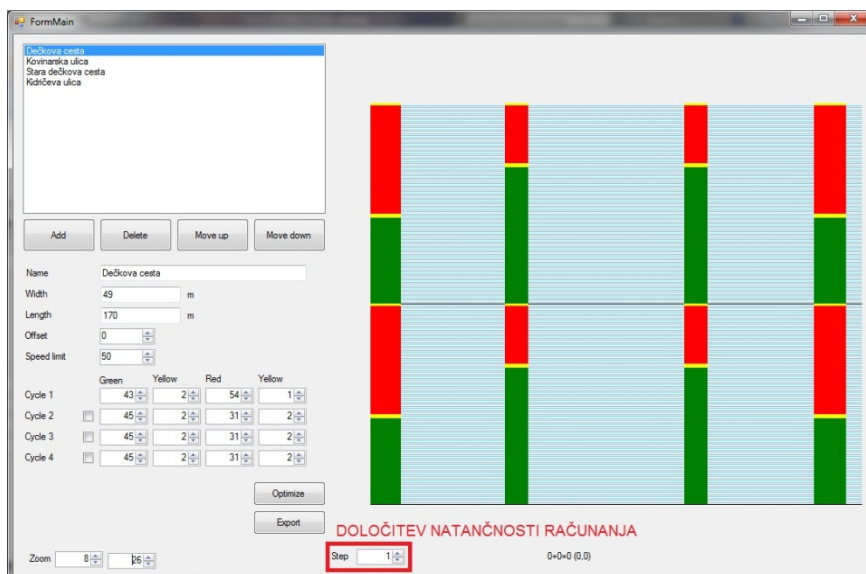
S popravilom velikosti (razmerja) grafa se v grafičnem prikazu prikaže urejeno razmerje.



Slika 12: Prikaz urejenega pogleda grafične rešitve

4.13 Določitev natančnosti računanja - Step

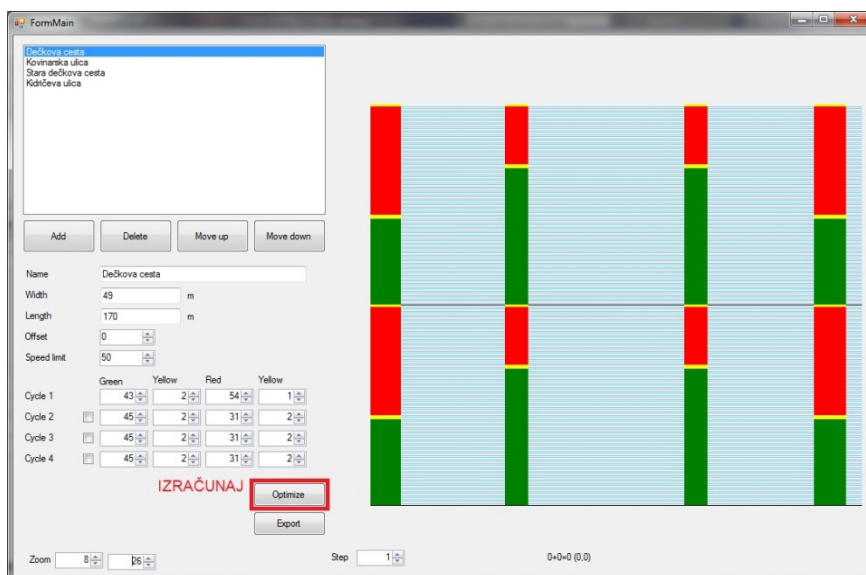
Zaradi kompleksnosti nekaterih problemov (več križišč z veliko vsoto ciklov) se lahko za predogled poveča natančnost računanja. Če je v okencu step prikazana št. 1, bo program računal na sekundo natančno, če nastavimo 2, bo računal na 2 sekundi natančno itn.



Slika 13: Prikaz okenca, kjer določamo natančnost računanja

4.14 Računanje - Optimize

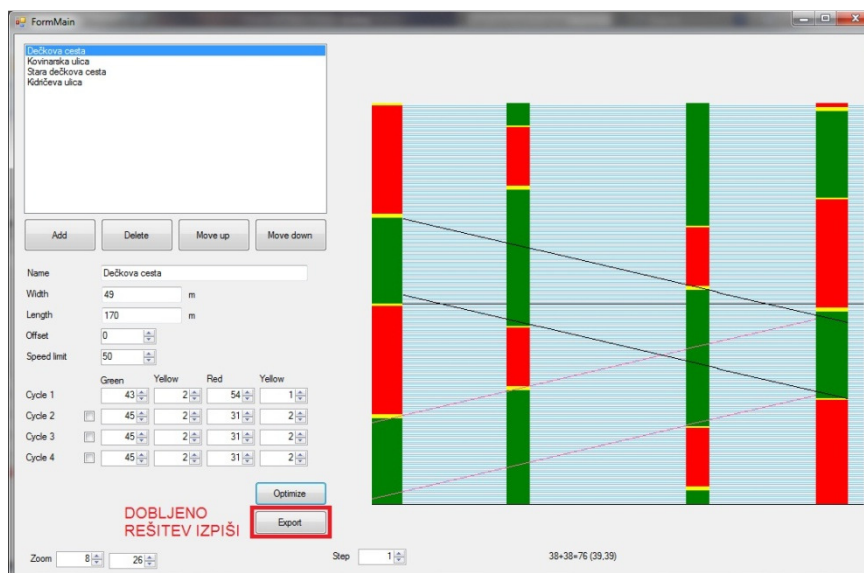
S klikom na okence optimize program sproži funkcijo računanja.



Slika 14: Prikaz ukaza, ki nam optimizira rešitev

4.15 Izvoz rešitve v .csv datoteko - Export

V grafičnem prikazu vidimo rešitev, ki jo z ukazom export izvozimo v .csv datoteko, podprto s programom MS Excel.



Slika 15: Prikaz ukaza, ki nam ponujeno rešitev izpiše v .csv datoteki

Pogled izpisa v datoteki .csv na spodnji sliki.

name	Dečkova cesta	Kovinarska ulica	Stara dečkova cesta	Kidričeva ulica
length	219	291	211	154
cycle	100	100	100	100
green0	43	68	68	43
yellow0a	2	2	2	2
red0	54	29	29	54
yellow0b	1	1	1	1
offset	0	11	61	47
speed	50	50	50	50
result	39	39		

Slika 16: Oblika izpisane datoteke, ki nam jo uredi program ARosem

Interpretacija parametrov izpisane datoteke:

- name: ime križišča oziroma ulice, ki seka obravnavano arterijo v posameznem križišču,
- length: razdalja med začetkom križišča in začetkom naslednjega križišča,
- cycle: dolžina cikla,
- green0: dolžina trajanja zelene luči v posameznem ciklu,
- Yellow0a: dolžina trajanja rumene luči med zeleno in rdečo lučjo,

-
- Red0: dolžina trajanja rdeče luči v posameznem ciklu,
 - Yellow0b: dolžina trajanja rumene luči med rdečo in zeleno lučjo,
 - offset: zamik cikla določenega semaforja,
 - speed: hitrost vozil med dvema križiščema in
 - result: območje velikosti zelenega vala.

5 UPORABA PROGRAMA ARosem V PRAKSI

Program ARosem bom predstavil na dveh praktičnih primerih. Prvi primer je enostavnejši in zavzema glavno cesti skozi mesto Šentjur. Na tej cesti se nahajajo tri semaforizirana križišča, ki sem jih zajel v sistem programa. Drugi primer pa predstavlja kompleksnejši sistem na Mariborski cesti v Celju, kjer je 14 semaforiziranih križišč.

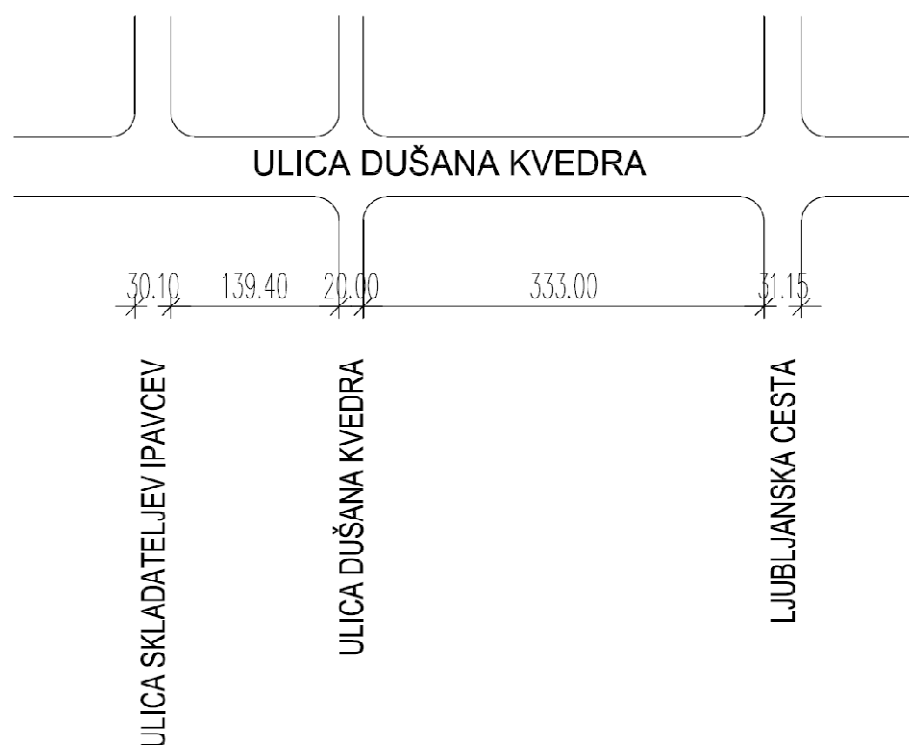
5.1 Cesta skozi mesto Šentjur

Na glavni cesti skozi Šentjur, Ulici Dušana Kvedra, se nahajajo 3 semaforizirana križišča. Prvo križišče je trokrako križišče in se križa z Ulico skladateljev Ipavcev, drugo križišče je štirikrako in se križa z Ulico Dušana Kvedra in dovozom h glasbeni šoli, tretje križišče pa je prav tako štirikrako in sovпада z Ljubljansko cesto, Cesto Leona Dobrotinška in Cesto Kozjanskega odreda.



Slika 17: Zračni posnetek z vrisanimi semaforiziranimi križišči ceste skozi mesto Šentjur (Atlas okolja, 2013)

Na glavni cesti skozi mesto Šentjur želimo čim bolj optimizirati zeleni val v obeh smereh vožnje. Za vsa križišča smo privzeli cikel 100 sekund, razmerje med zeleno in rdečo lučjo pa je razdeljeno na dva dela. Ker imata prvo in drugo križišče majhno stransko obremenitev, sem izbral razmerje 75/25, medtem ko je tretje križišče pretežno obremenjeno iz vseh štirih strani, zato sem se pri slednjem odločil za razmerje 50/50. Dolžine križišč in razdalje med križišči so podane na sliki 18, ki prikazuje shemo križišč.



Slika 18: Razdalje med križišči ceste skozi mesto Šentjur

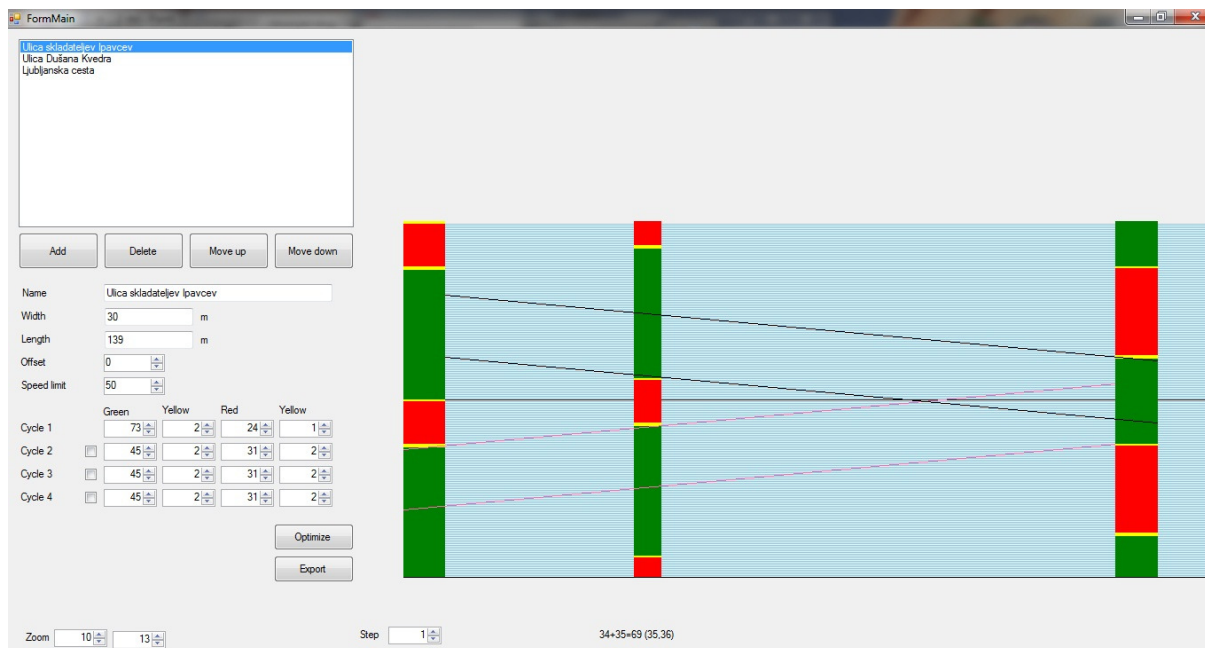
Ko vse te podatke vnesemo v program ARosem, nam izračuna sledeče podatke.

Preglednica 2: Izračunani podatki s programom ARosem za cesto skozi mesto Šentjur

Name	Ulica skladateljjev Ipavcevič	Ulica Dušana Kvedra	Ljubljanska cesta
Length	169	353	81
Cycle	100	100	100
Green0	73	73	48
Yellow0a	2	2	2
Red0	24	24	49
Yellow0b	1	1	1
Offset	0	88	25
Speed	50	50	50

Result	35	36
--------	----	----

Iz zgornjih podatkov je razvidno, da je pri dani postavitvi križišč, ciklu 100 sekund in hitrosti vozil 50 km/h najboljši možni rezultat območja zelenega vala 35 sekund v eni in 36 sekund v drugi smeri. To se zgodi, ko je zamik cikla drugega križišča 88 sekund in zamik cikla tretjega križišča 25 sekund v negativni smeri. Grafično je to prikazano na spodnji sliki.



Slika 19: Izris rešitve, ki nam jo je ponudil program ARosem za ceste skozi mesto Šentjur

Program je tako izračunal največjo možno časovno obdobje, ki je enako v obe smeri in ki omogoča vozilom pri hitrosti 50 km/h nemoteno vožnjo skozi sistem semaforjev brez ustavljanj. Ker je natančnost računanja 1 sekunda, smo dobili rezultata 35 in 36 sekund.

5.2 Mariborska cesta v Celju

Mariborska cesta skupaj z Aškerčevo ulico tvori največjo cestno arterijo skozi mesto Celje. Na tej arteriji se nahaja kar 14 semaforiziranih križišč. Ker pa je uporabnost zelenega vala na razdalji do 1000 m, saj se kolona pri večji razdalji zaradi počasnejših vozil preveč raztegne, je smiselno to cesto razdeliti na 3 odseke in za vsak odsek posebej izračunati najboljšo rešitev, nato pa posamezne odseke med seboj smiselno združiti.

5.2.1 I. odsek

V prvem odseku so zajeta štiri semaforizirana križišča:

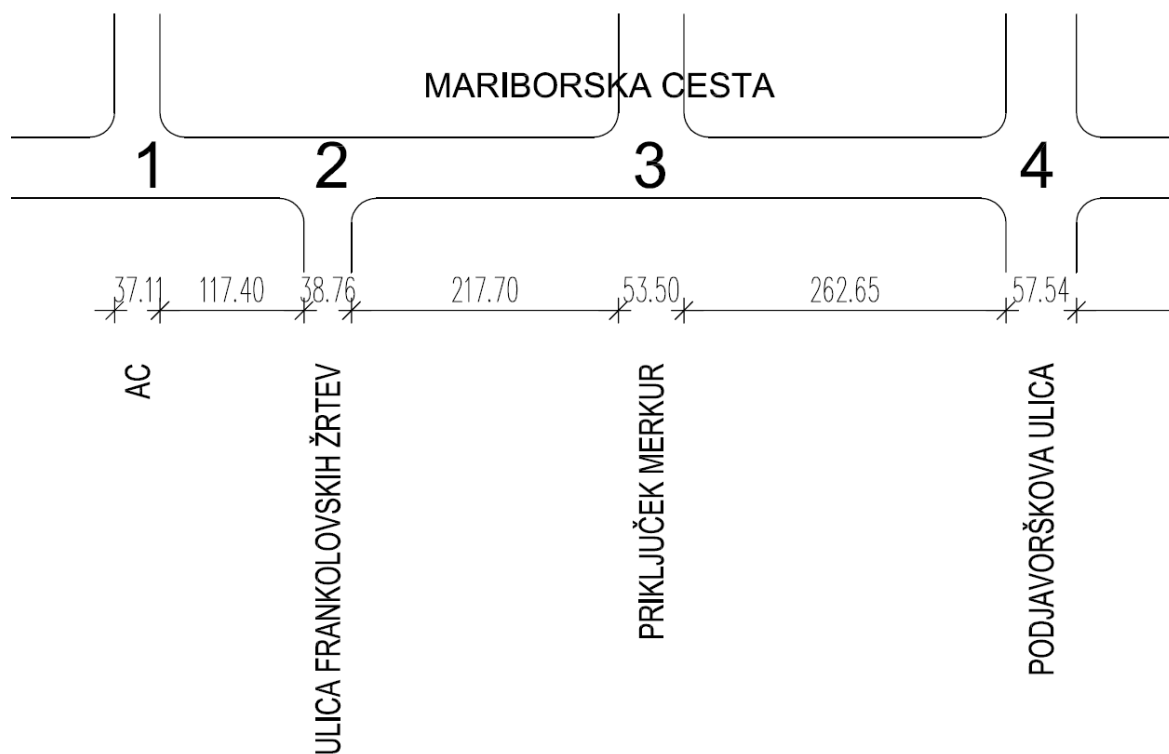
- prvo semaforizirano križišče je trokrako s priključkom na avtocesto,
- drugo križišče je prav tako trokrako in seka Ulico Frankolovskih žrtev,
- tretje križišče je tudi trokrako s priključkom do trgovine Merkur,
- četrto križišče pa je štirikrako, kjer Mariborsko cesto sekata Podjavorškova ulica in Cesta v Trnovlje.



Slika 20: Zračni posnetek z vrisanimi semaforiziranimi križišči Mariborske ceste v Celju (I. odsek) (Atlas okolja, 2013)

Za boljšo optimizacijo smo na celotni arteriji za vsa križišča prevzeli maksimalen cikel, to je 120 sekund. Po obremenitvi se ta štiri križišča razdelijo v tri skupine, s čimer določimo razmerje med zeleno in rdečo lučjo. Tako dobimo na prvem križišču razmerje med zeleno in rdečo lučjo 60/40, drugo in tretje križišče pa spadata v drugo skupino, kjer je razmerje med zeleno in rdečo lučjo 70/30. Četrto križišče se nahaja v tretji skupini, kjer je razmerje med zeleno in rdečo lučjo 50/50.

Dolžine križišč in razdalje med križišči na tem odseku so podane na sliki 21.



Slika 21: Razdalje med križišči I. odseka Mariborske ceste

Po vnosu vseh podatkov v program ARosem, dobimo kot rezultat za ta odsek preglednico 3.

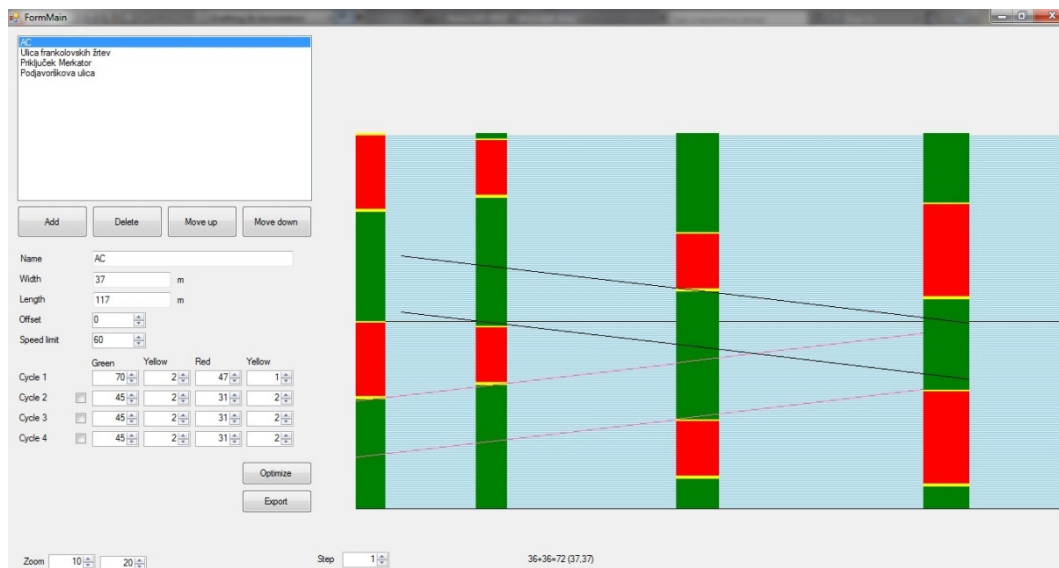
Preglednica 3: Dobljeni rezultati s programom ARosem za I. odsek Mariborske ceste

Name	AC	Ulica frankolovskih žrtev	Priključek Merkur	Podjavorškova ulica
Length	154	257	317	289
Cycle	120	120	120	120
Green0	70	82	82	58
Yellow0a	2	2	2	2
Red0	47	35	35	59
Yellow0b	1	1	1	1
Offset	0	3	63	44
Speed	60	60	60	60

Result	37	37
--------	----	----

Program nam kot najboljšo možno rešitev tega odseka pri ciklu, trajajočem 120 sekund in hitrosti vozil 60 km/h, s prej omenjenim razmerjem med zeleno in rdečo lučjo za ta odsek (na prvem križišču je razmerje med zeleno in rdečo lučjo 60/40, na drugem in tretjem križišču 70/30 in na četrtem 50/50.),

pona zeleni val dolžine 37 sekund v obeh smereh. Za pridobitev takšnega rezultata moramo drugo križišče zamakniti za 3 sekunde, tretje za 63 sekund in četrto za 44 sekund v negativno smer. Grafični prikaz je prikazan na sliki 22.



Slika 22: Izris rešitve, ki nam jo je ponudil program ARosem za I. odsek Mariborske ceste

5.2.2 II. odsek

V drugem odseku se nahaja nadaljnjih 5 semaforiziranih križišč:

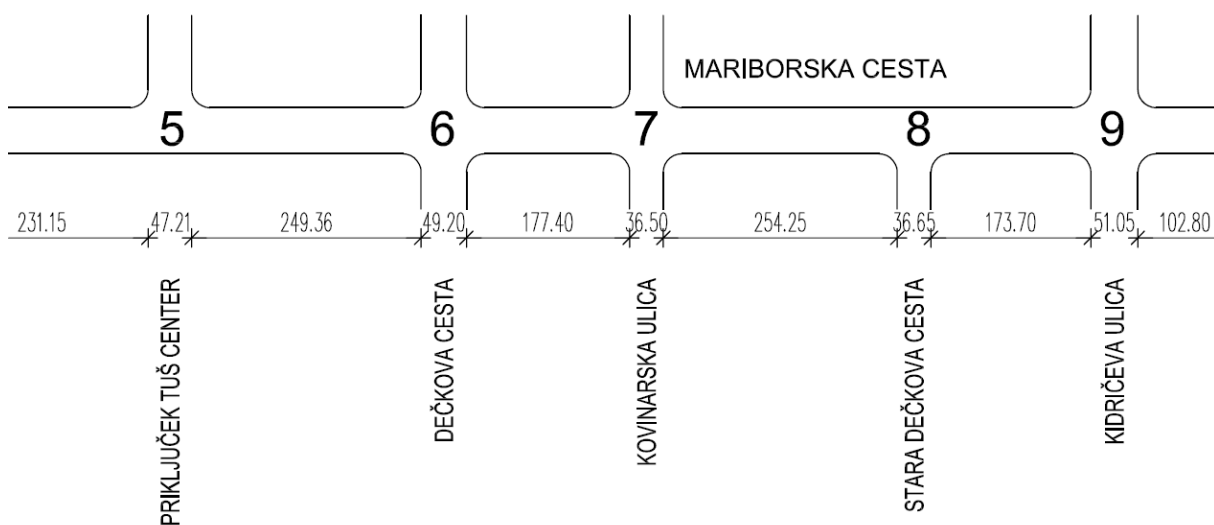
- peto semaforizirano križišče je trokrako s priključkom k Tuš centru,
- šesto križišče je štirikrako, kjer se združujeta Dečkova cesta in Bežigrajska cesta,
- sedmo križišče je štirikrako križišče, ki seka Kovinarsko ulico,
- osmo križišče je trokrako križišče, kjer se konča Stara Dečkova cesta,
- deveto križišče pa je štirikrako, ki seka Kidričevo ulico.



Slika 23: Zračni posnetek z vrisanimi semaforiziranimi križišči Mariborske ceste v Celju (II. odsek) (Atlas okolja, 2013)

Cikel za ta odsek smo definirali že pri prejšnjem odseku in znaša 120 sekund. Po obremenitvi se teh pet križišč razdeli v dve skupini, s čimer se določi razmerje med zeleno in rdečo lučjo. Peto, sedmo in osmo križišče spadajo v skupino, kjer je razmerje med zeleno in rdečo lučjo 70/30, šesto in deveto križišče pa spadata v skupino z razmerjem 45/55.

Dolžine križišč in razdalje med križišči na drugem odseku so podane na sliki 24.



Slika 24: Razdalje med križišči II. odseka Mariborske ceste

Po vnosu podatkov za drugi odsek obravnavane cestne arterije v program AROsem dobimo preglednico 4.

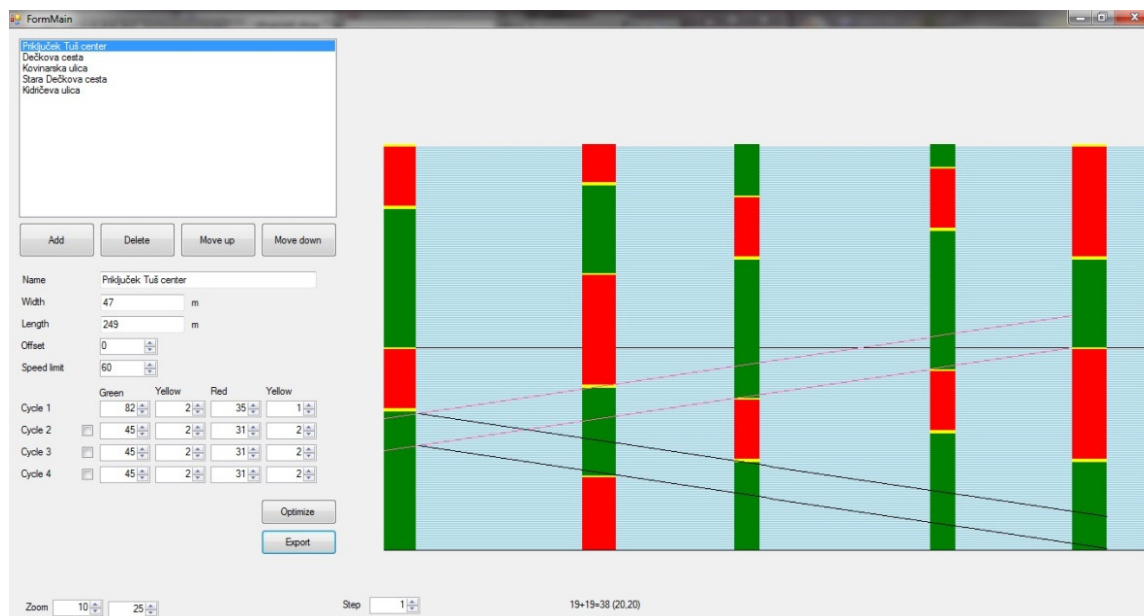
Preglednica 4: Dobljeni rezultati s programom AROsem za II. odsek Mariborske ceste

Name	Priključek Tuš center	Dečkova cesta	Kovinarska ulica	Stara Dečkova cesta	Kidričeva ulica
Length	296	226	291	211	154
Cycle	120	120	120	120	120
Green0	82	52	82	82	52
Yellow0a	2	2	2	2	2
Red0	35	65	35	35	65
Yellow0b	1	1	1	1	1
Offset	0	76	30	13	0
Speed	60	60	60	60	60

Result	20	20
--------	----	----

Program nam kot najboljšo možno rešitev tega odseka pri ciklu, trajajočem 120 sekund in hitrosti vozil 60 km/h, s prej omenjenim razmerjem med zeleno in rdečo lučjo za ta odsek (na petem, sedmem in osmem križišču je razmerje med zeleno in rdečo lučjo 70/30, na šestem in devetem križišču pa 45/55), poda zeleni val dolžine 20 sekund v obeh smereh. Za pridobitev takšnega rezultata moramo cikel drugega križišča zamakniti za 76 sekund, tretjega za 30 sekund in četrtega za 13 sekund v negativno

smer. Cikel petega križišča ostane v prvotnem zamiku 0 sekund. Grafični prikaz je prikazan na sliki 25.



Slika 25: Izris rešitve, ki nam jo je ponudil program ARosem za II. odsek Mariborske ceste

5.2.3 III. odsek

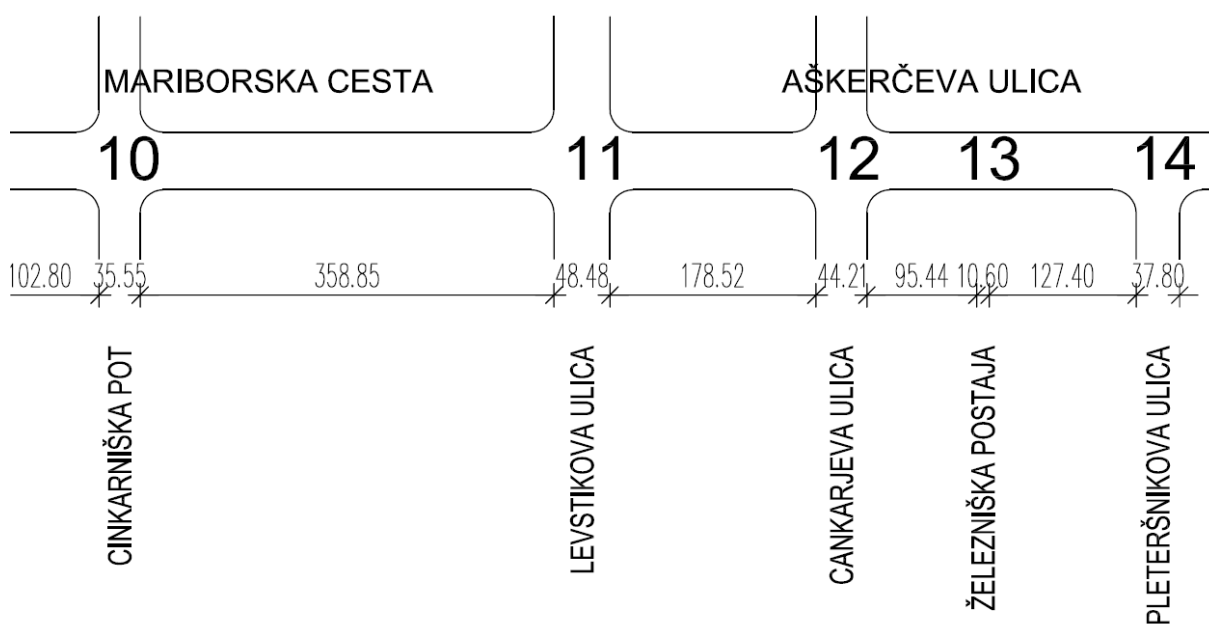
V tretjem odseku se nahaja zadnjih 5 semaforiziranih križišč obravnavane cestne arterije:

- deseto semaforizirano križišče je štirikrako križišče, ki seka cesto Cinkarniška pot,
- enajsto križišče je štirikrako, kjer se križa z Levstikovo ulico. V tem križišču cestna arterija Mariborska cesta zamenja ime v Aškerčevo ulico,
- dvanajsto križišče je štirikrako, v njem se združujeta Cankarjeva ulica in Teharska cesta,
- trinajsto semaforizirano križišče je križišče s prehodom za pešce,
- štirinajsto, zadnje križišče pa je trokrako, kjer se začne Pleteršnikova ulica.



Slika 26: Zračni posnetek z vrisanimi semaforiziranimi križišči Mariborske ceste v Celju (III. odsek) (Atlas okolja, 2013)

Tudi na tem odseku znaša cikel pri semaforjih 120 sekund. Po obremenitvi se teh pet križišč razdeli v tri skupine, s čimer lahko določimo razmerje med zeleno in rdečo lučjo. Deseto in štirinajsto križišče spadata v skupino, kjer je razmerje med zeleno in rdečo lučjo 70/30, enajsto in dvanajsto križišče pa spadata v skupino, kjer je razmerje med zeleno in rdečo lučjo 55/45. Posebnost je trinajsto križišče, kjer je v prečni smeri samo prehod za pešce, zato je lahko na njem največje razmerje, ki znaša 80/20. Dolžine križišč in razdalje med križišči na zadnjem odseku so podane na sliki 27.



Slika 27: Razdalje med križišči III. odseka Mariborske ceste

Po vnosu podatkov za zadnji odsek obravnavane cestne arterije v program ARosem dobimo preglednico 5.

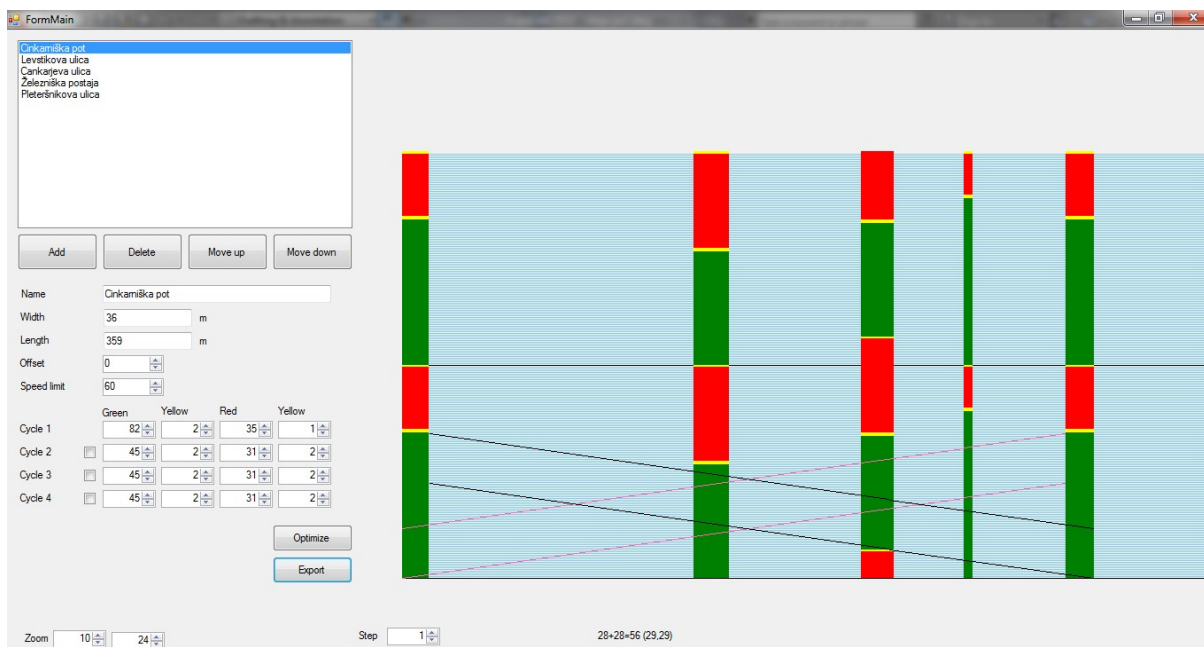
Preglednica 5: Dobljeni rezultati s programom ARosem za III. odsek Mariborske ceste

Name	Cinkarniška pot	Levstikova ulica	Cankarjeva ulica	Železniška postaja	Pleteršnikova ulica
Length	395	227	139	138	138
Cycle	120	120	120	120	120
Green0	82	64	64	94	82
Yellow0a	2	2	2	2	2
Red0	35	53	53	23	35
Yellow0b	1	1	1	1	1
Offset	0	0	104	0	0
Speed	60	60	60	60	60

Result	29	29
--------	----	----

Program nam kot najboljšo možno rešitev tega odseka pri ciklu, trajajočem 120 sekund in hitrosti vozil 60 km/h, s prej omenjenim razmerjem med zeleno in rdečo lučjo za ta odsek (na desetem in štirinajstem križišču je razmerje med zeleno in rdečo lučjo 70/30, na enajstem in dvanajstem 55/45, na trinajstem pa 80/20), poda zeleni val dolžine 29 sekund v obeh smereh. Za pridobitev takšnega

rezultata moramo zamik v vseh križiščih razen dvanajstem obdržati nespremenjen, v trinajstem križišču pa znaša zamik 104 sekunde v negativno smer. Grafični prikaz je prikazan na sliki 28.



Slika 28: Izris rešitve, ki nam jo je ponudil program ARosem za III. odsek Mariborske ceste

5.2.4 Analiza celotnega odseka

Z združitvijo rezultatov, do katerih smo prišli pri vseh treh odsekih, dobimo sistem semaforjev na arteriji, ki je precej dober. Ker program deluje po sistemu togega progresivnega krmiljenja, smo se omejili na linijo, ki predstavlja zeleni val. Ker je smiselno zeleni val voditi skozi linijo semaforjev na razdalji do 1000 m, nato pa ga je potrebno presekati, da se v ponovni val zajame tudi počasnejša vozila, dobimo sistem treh odsekov, ki jih združimo in predstavimo v novi preglednici 6. Zaradi velikosti preglednice ime križišča ponazorimo s številko križišča.

Preglednica 6: Dobljeni rezultati s programom ARosem za celoten odsek Mariborske ceste in Aškerčeve ulice

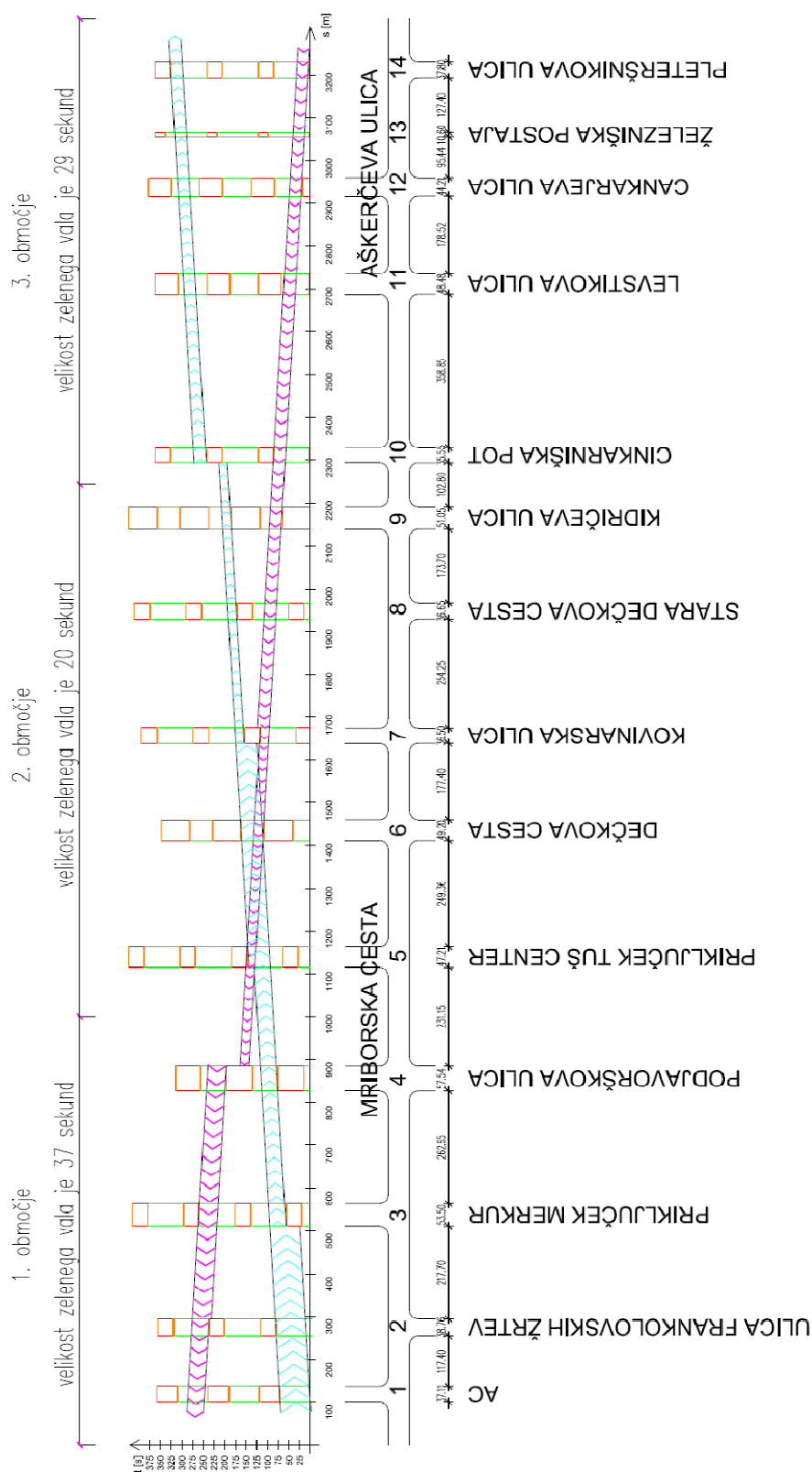
Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Length	154	257	317	289	296	226	291	211	154	395	227	139	138	138
Cycle	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Green0	70	82	82	58	82	52	82	82	52	82	64	64	94	82
Yellow0a	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Red0	47	35	35	59	35	65	35	35	65	35	53	53	23	35
Yellow0b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Offset	0	3	63	44	55	11	85	68	55	117	117	101	117	117
Speed	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

Result	37	37
--------	----	----

20	20
----	----

29	29
----	----

Zamiki, ki so v tabeli pod rubriko offset, nam podajo sistem, ki predstavlja zadovoljiv rezultat za vodenje prometa skozi obravnavano arterijo - Mariborsko cesto. Če celotno arterijo predstavimo v grafu, dobimo sledečo ponazoritev.



Grafikon 1: Graf vodenja zelenega vala optimiziran s programom ARosem skozi celotno Mariborsko cesto in Aškerčevo ulico v Celju.

6 PRIMERJAVA MED RAZLIČNIMI METODAMI VODENJA ZELENEGA VALA PRI ODPRTI CESTNI ARTERIJI

Pri primerjavi različnih metod vodenja zelenega vala pri odprti cestni arteriji bom uporabil tri različne metode:

- prva metoda: program ARosem
- druga metoda: linearno programiranje z Excelovo datoteko, s katero lahko izračunamo vodenje zelenega vala čez sistem 4 križišč,
- tretja metoda: program Synchron

Primerjavo vodenja zelenega vala delamo med programom ARosem in Synchronom, v sistemu treh in štirih semaforjev pa v primerjavo vključimo še izračun iz Excelove datoteke.

Primerjavo med različnimi metodami vodenja zelenega vala bom predstavil na treh primerih:

- prvi primer bo na cesti skozi Šentjur, kjer imamo tri semaforizirana križišča
- drugi primer bo odsek Mariborske ceste v Celju, kjer bomo zajeli križišča 6,7,8 in 9, to je od Dečkove ceste do Kidričeve ulice
- tretji primer bo celoten odsek Mariborske ceste in Aškerčeve ulice

Ker je program Synchron že ne mednarodni ravni uveljavljen program za reševanje sistemov semaforjev na arterijah, bom za lažjo primerjavo metod med seboj dobljene rezultate iz Excelove datoteke in iz programa ARosem vstavil v program Synchron ter z njim naredil izpise, ki jih bom za vsak primer med seboj primerjal in izpeljal analizo. Rezultate vseh treh metod bom predstavil še v grafični obliki.

6.1 Prvi primer: Glavna cesta skozi mesto Šentjur

6.1.1 Rešitev s programom ARosem

Ker je bilo vodenje semaforiziranega sistema za glavno cesto skozi mesto Šentjur s programom ARosem že izračunano v 5. poglavju Uporaba programa ARosem v praksi, za potrebe primerjave med različnimi metodami vodenja zelenega vala sedaj samo prevzamemo rezultate.

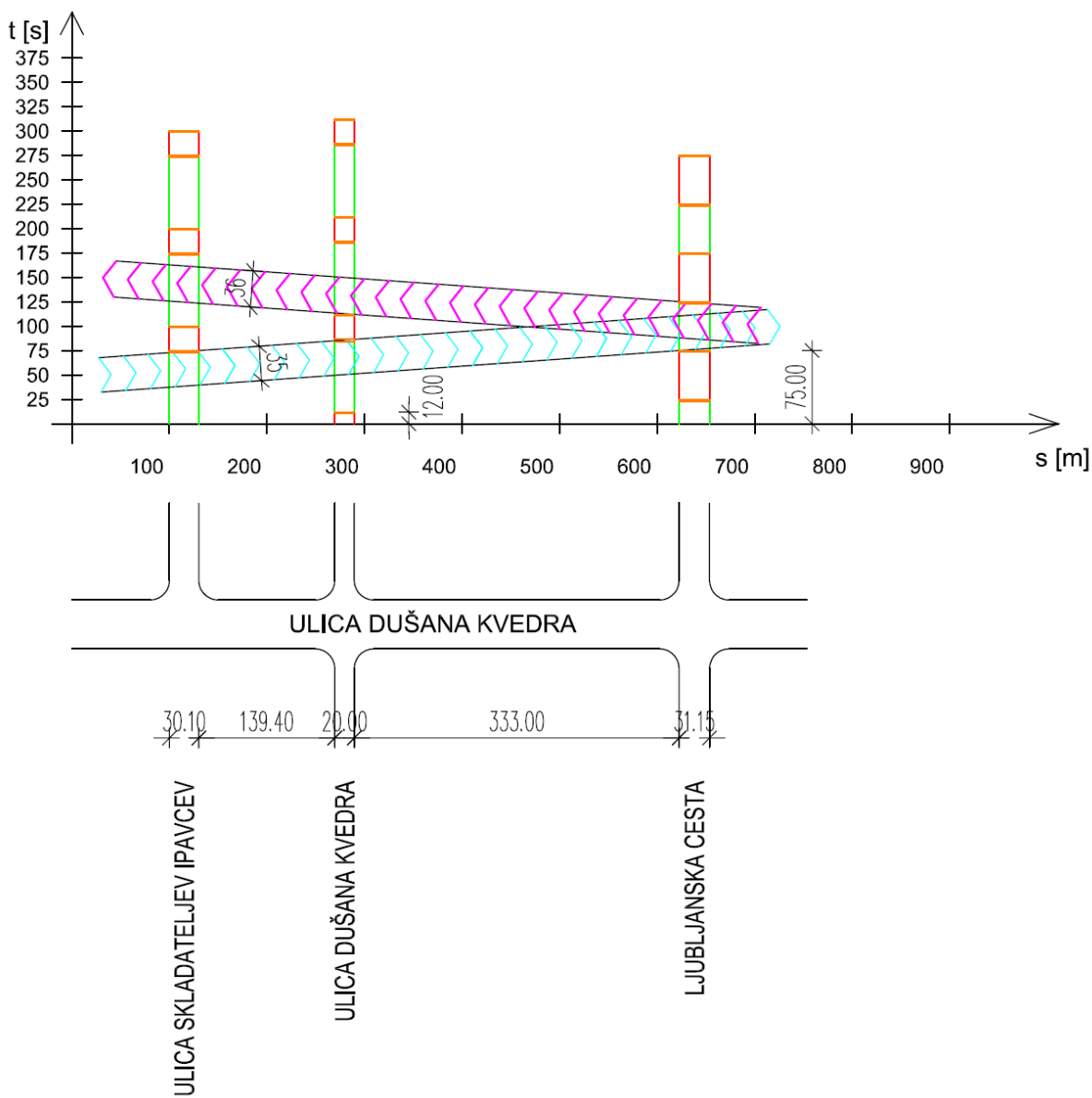
Preglednica 7: Izračunani podatki s programom ARosem za cesto skozi mesto Šentjur

Name	Ulica skladateljev Ipavcev	Ulica Dušana Kvedra	Ljubljanska cesta
Length	169	353	81
Cycle	100	100	100
Green0	73	73	48
Yellow0a	2	2	2
Red0	24	24	49
Yellow0b	1	1	1
Offset	0	88	25
Speed	50	50	50

Result	35	36
--------	----	----

Začetni parametri iz zgornje preglednice, vstavljeni v program ARosem, podajo območje zelenega vala 35 sekund v eno smer in 36 sekund v nasprotno smer.

Grafična ponazoritev dobljene rešitve:



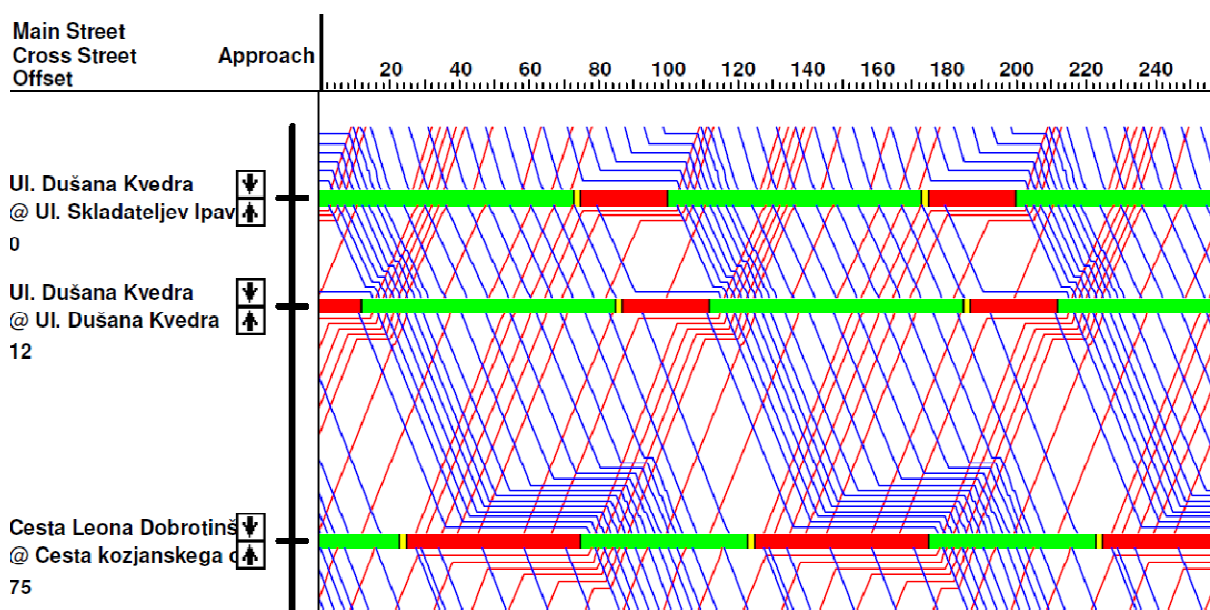
Grafikon 2: Graf vodenja zelenega vala optimiziran s programom ARosem za cesto skozi mesto Šentjur

Rešitev dobljena s programom ARosem, nam vstavljena v program Synchro poda rešitev 0,46 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 21,8, kar je razvidno iz spodnje preglednice:

Preglednica 8: S Synchrom dobljena preglednica za podatke izračunane s programom ARosem za cesto skozi mesto Šentjur

Network Totals

Number of Intersections	3
Control Delay / Veh (s/v)	14
Queue Delay / Veh (s/v)	0
Total Delay / Veh (s/v)	14
Total Delay (hr)	16
Stops / Veh	0.46
Stops (#)	1904
Average Speed (km/hr)	24
Total Travel Time (hr)	32
Distance Traveled (km)	758
Fuel Consumed (l)	160
Fuel Economy (km/l)	4.7
CO Emissions (kg)	2.98
NOx Emissions (kg)	0.58
VOC Emissions (kg)	0.69
Unserved Vehicles (#)	0
Vehicles in dilemma zone (#)	0
Performance Index	21.8



Slika 29: Izris vodenja vozil iz Synchra, ko vstavimo rešitev iz programa ARosem za cesto skozi mesto Šentjur

6.1.2 Rešitev s programom Excel

Vstavitev začetnih parametrov (dolžine med križišči, dolžina cikla in delež rdeče luči) v Excelov program nam poda sledečo preglednico:

Preglednica 9: Izračunani podatki po linearni metodi za cesto skozi mesto Šentjur

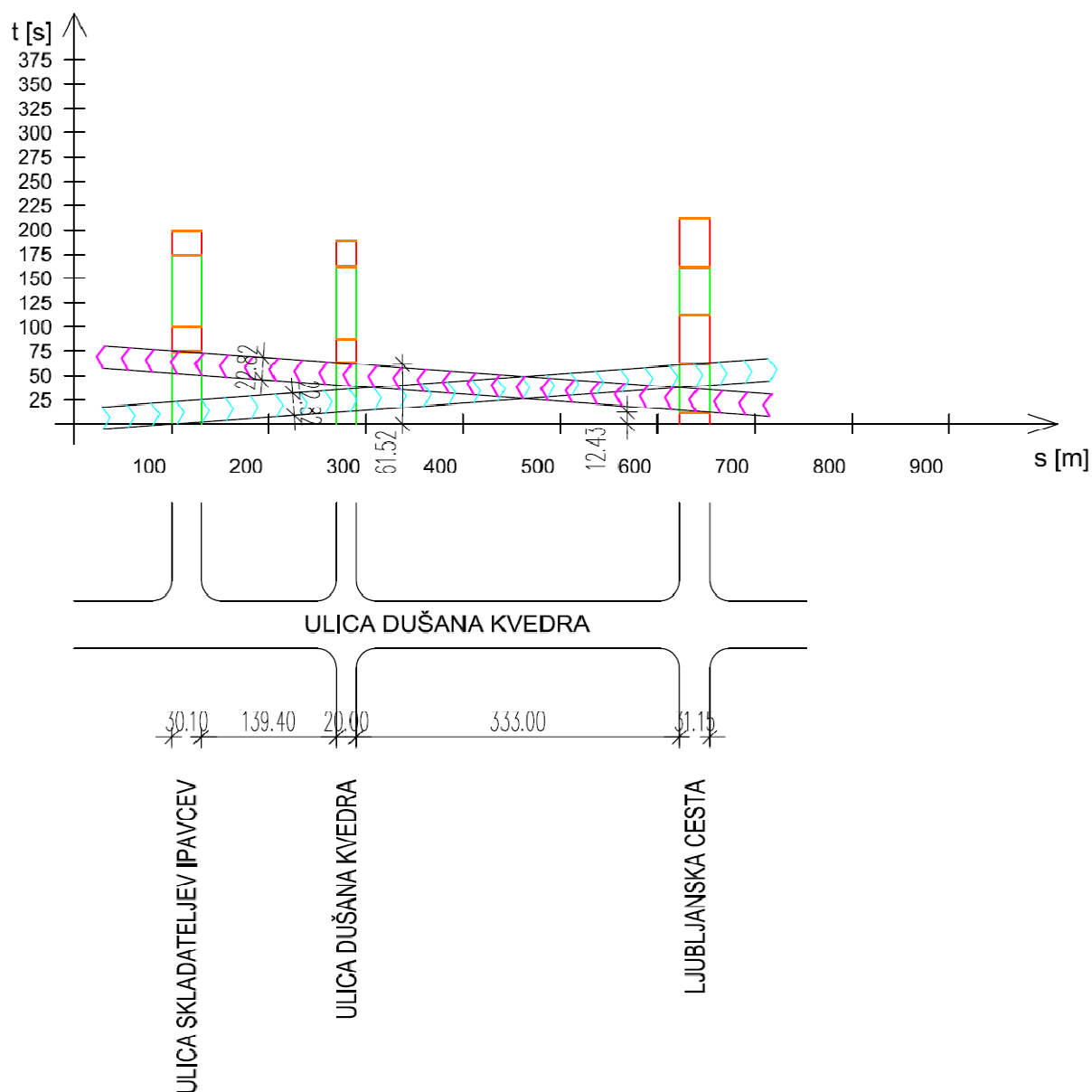
ciklus	100					
	l		t[s]	t[c]	r[s]	r[c]
1	0	0	0	0	25	0.25
2	170	170	12.24	0.1224	25	0.25
3	353	523	25.416	0.2541	50	0.5
	523		37.656			

w	wp	m
0	0	0
0.2448	0	0
0.2515	0.2515	0
0.2515	0.2515	0

	b	bp	
max	0.2484	0.2484	0.2484

Zgornja preglednica nam poda velikost območja zelenega vala 24,84 sekund.

Grafična ponazoritev dobljene rešitve:



Grafikon 3: Graf vodenja zelenega vala optimiziran po linearni metodi za cesto skozi mesto Šentjur

Medtem ko program ARosem upošteva širino križišča, metoda linearnega programiranja v Excelu tega parametra ne vsebuje, zato je bilo za potrebe ponazoritve rešitve in odčitavanja zamikov iz grafikona 3 podatke prilagoditi, s čimer se je območje zelenega vala zmanjšalo z 24,84 sekunde (rešitev, ki jo podal Excel) na 22,8 sekunde (rešitev iz grafikona 3 z upoštevanjem širine križišč).

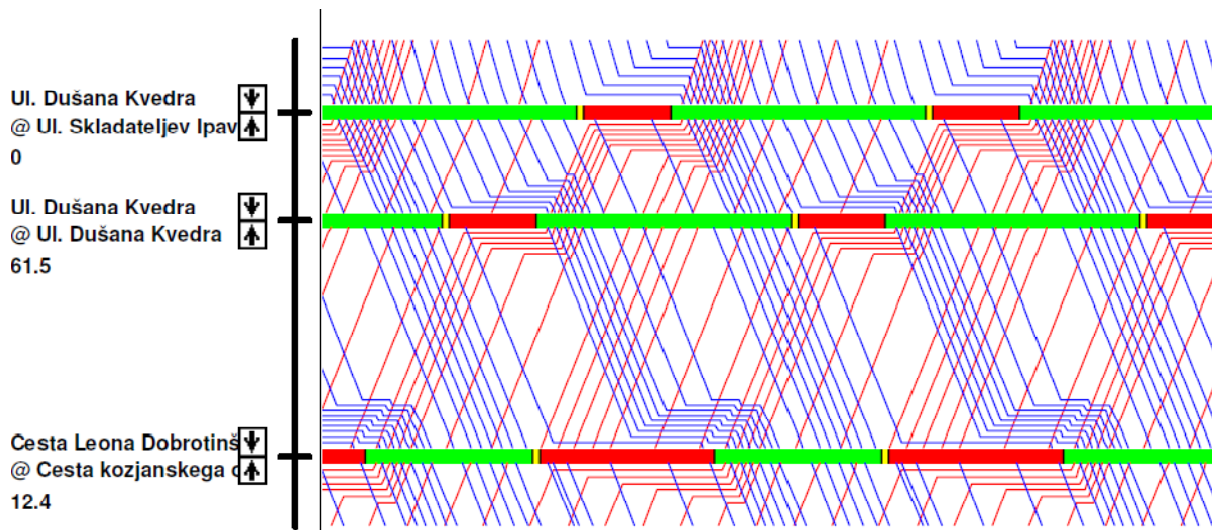
Vstavitev teh prilagojenih podatkov v Synchro nam poda sledečo preglednico:

Preglednica 10: S Synchrom dobljena preglednica za podatke izračunane po linearni metodi za cesto skozi mesto Šentjur

Network Totals

Number of Intersections	3
Control Delay / Veh (s/v)	15
Queue Delay / Veh (s/v)	0
Total Delay / Veh (s/v)	15
Total Delay (hr)	17
Stops / Veh	0.50
Stops (#)	2052
Average Speed (km/hr)	23
Total Travel Time (hr)	32
Distance Traveled (km)	758
Fuel Consumed (l)	165
Fuel Economy (km/l)	4.6
CO Emissions (kg)	3.08
NOx Emissions (kg)	0.59
VOC Emissions (kg)	0.71
Unserved Vehicles (#)	0
Vehicles in dilemma zone (#)	0
Performance Index	22.8

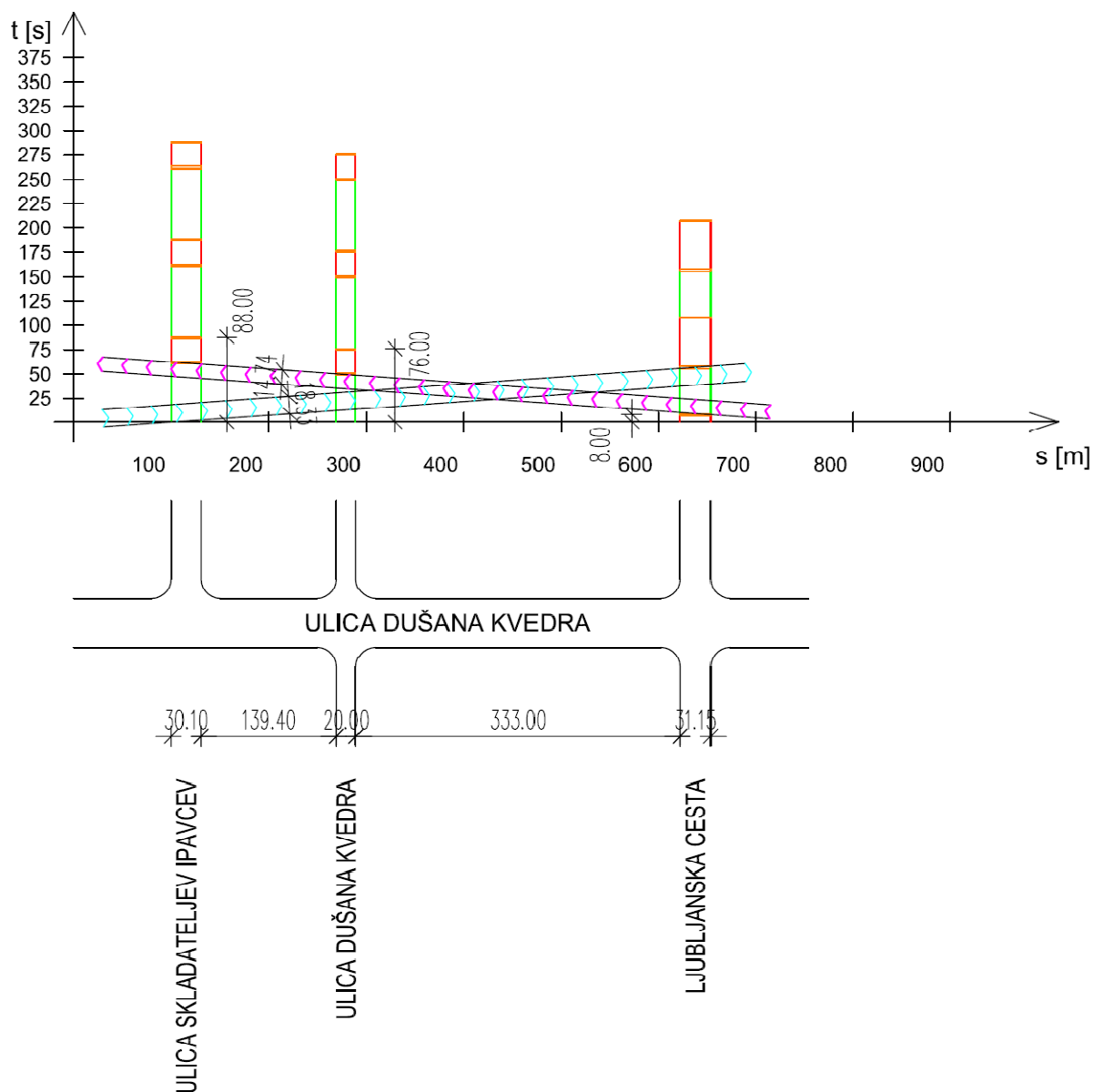
Rešitev dobljena z metodo linearnega programiranja v Excelu, nam vstavljena v program Synchro poda rešitev 0,50 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 22,8.



Slika 30: Izris vodenja vozil iz Synchra, ko vstavimo rešitev iz linearnega modela za cesto skozi mesto Šentjur

6.1.3 Rešitev s programom Synchro

Osnovni parametri sistema semaforiziranih križišč po glavni cesti skozi mesto Šentjur z vstavitvijo v program Synchro ob upoštevanju cikla sistema 100 sekund podajo rezultat 0,38 ustavljanj na vozilo in indeks uspešnosti 18,9 (razvidno iz preglednice 11), kar grafično ponazorimo s sledečim grafikonom:



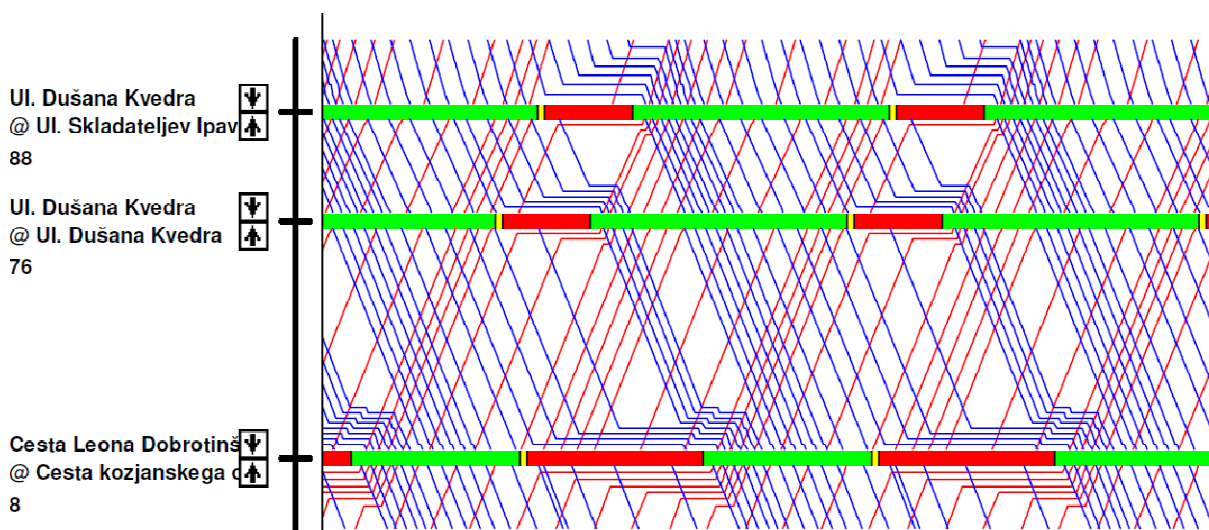
Grafikon 4: Graf vodenja zelenega vala optimiziran s Synchrom za cesto skozi mesto Šentjur

Medtem ko program ARosem in metoda linearnega programiranja v Excelu računata velikost območja zelenega vala, program Synchro v osnovi ne računa zelenega vala, ampak optimizira cel sistem tako, da se na rdečih lučeh čim manjše število ustavljanj na vozilo, kar je razvidno iz slike 31.

Preglednica 11: S Synchrom optimizirana preglednica za cesto skozi mesto Šentjur

Network Totals

Number of Intersections	3
Control Delay / Veh (s/v)	13
Queue Delay / Veh (s/v)	0
Total Delay / Veh (s/v)	13
Total Delay (hr)	15
Stops / Veh	0.38
Stops (#)	1588
Average Speed (km/hr)	26
Total Travel Time (hr)	30
Distance Traveled (km)	758
Fuel Consumed (l)	148
Fuel Economy (km/l)	5.1
CO Emissions (kg)	2.75
NOx Emissions (kg)	0.53
VOC Emissions (kg)	0.63
Unserviced Vehicles (#)	0
Vehicles in dilemma zone (#)	0
Performance Index	18.9



Slika 31: Izris vodenja vozil po optimizaciji iz Synchra za cesto skozi mesto Šentjur

6.1.4 Primerjava rezultatov na primeru glavne ceste skozi mesto Šentjur

Različne metode vodenja zelenega vala na primeru glavne ceste skozi mesto Šentjur, kjer imamo sistem treh semaforiziranih križišč vzdolž arterije, podajo tri različne rezultate:

- program ARosem poda rezultat 0,46 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 21,8,
- linearno programiranje v Excelu poda rezultat 0,50 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 22,8,
- program Synchro poda rezultat 0,38 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 18,9.

Če primerjamo med seboj rezultata programa ARosem in linearnega programiranja z Excelom, sta si rezultata med seboj podobna, vendar program ARosem ne začne zelenega vala na začetku nastopa cikla, Excelova datoteka pa ne upošteva razdalj križišč, oba programa pa iščeta sistem križišč s ciklom 100 sekund in hitrostjo 50 km/h, kjer je območje zelenega vala največje. Program Synchro pa za iskanje optimalne rešitve potrebuje še število vozil za vsako smer v vsakem križišču. Zato na podlagi tega sistema z vozili poda rešitev, kjer je čakalna doba vozil čim manjša.

Za potrebe primerjave med programi, sem v programu Synchro optimiziral samo zamike ciklov posameznih križišč, rezultate, dobljene pri optimiziranju s programom ARosem in linearnem programiranju z Excelom, pa sem samo vstavil v program Synchro. Kot pričakovano so tako dobljeni rezultati najboljši pri izračunu s samim programom Synchro, saj prikaže 0.38 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 18.9. Izračun s programom ARosem da rezultat 0.46 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 21.8, izračun z linearnim programiranjem z Excelom pa 0.50 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 22.8.

Kljub temu pa je območje zelenega vala največje pri optimizaciji s programom ARosem, saj znaša 35 sekund v eno in 36 sekund v nasprotno smer, medtem ko je pri izračunu z linearnim programiranjem z Excelom, upoštevajoč korekcije s širinami križišč, 22.82 sekund. Pri programu Synchro pa je območje zelenega vala razdeljeno glede na obremenitev križišč in znaša 14.74 sekund v eno in 18.33 sekund v nasprotno smer.

6.2 Drugi primer: Mariborska cesta v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)

Za prikaz primerjave med različnimi metodami vodenja zelenega vala, kadar so križišča cestne arterije zelo obremenjene, služi del Mariborske ceste v Celju, ki je najbolj obremenjen, to je od Dečkove ceste do Kidričeve ulice. Pri vseh treh metodah izberemo cikel 100 sekund in hitrost vozil 50 km/h.

6.2.1 Rešitev s programom ARosem

V program ARosem vstavimo začetne parametre za ta odsek ceste in dobimo naslednjo preglednico:

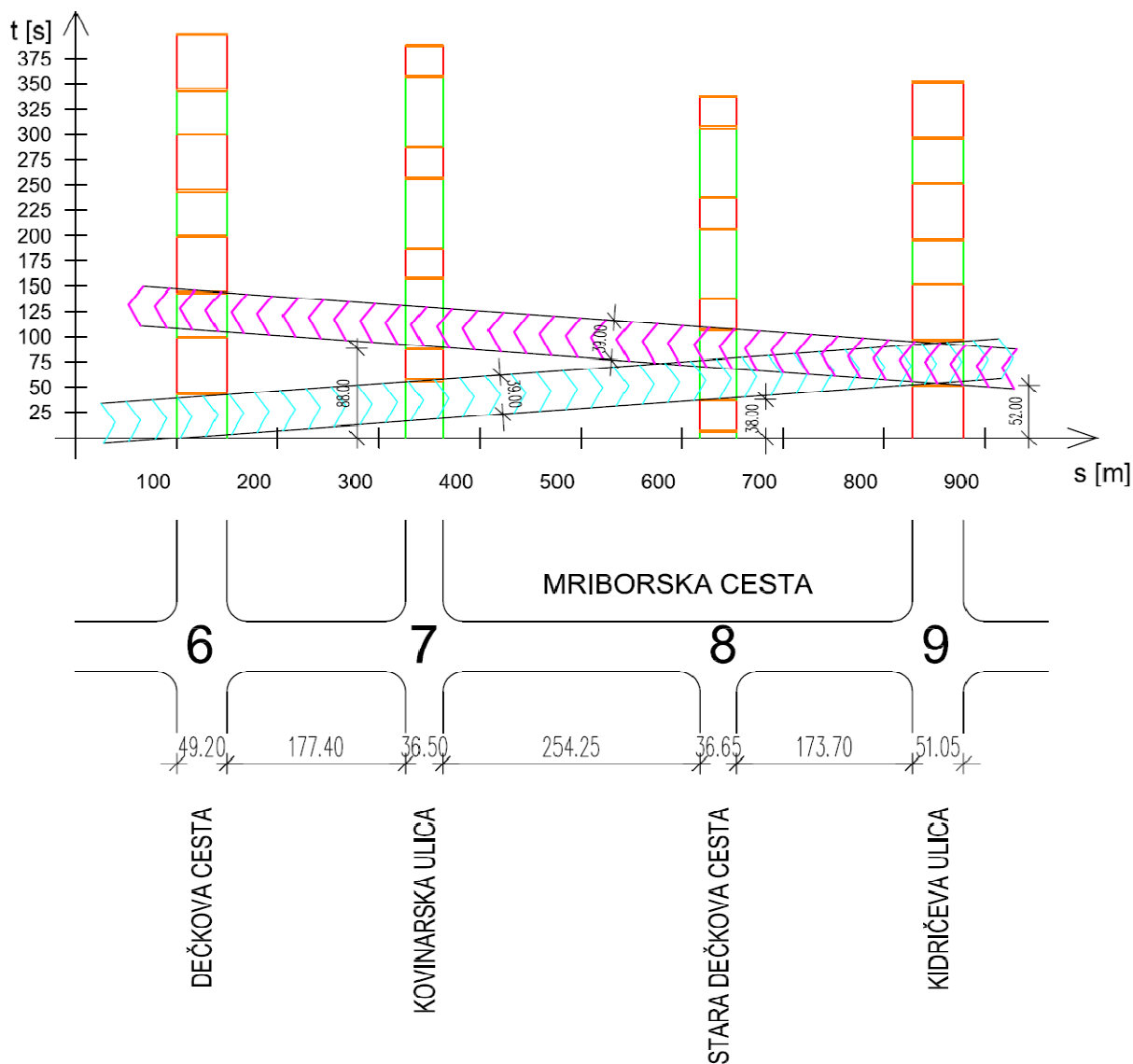
Preglednica 12: Izračunani podatki s programom ARosem za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)

Name	Dečkova cesta	Kovinarska ulica	Stara dečkova cesta	Kidričeva ulica
Length	226	290	211	154
Cycle	100	100	100	100
Green0	43	68	68	43
Yellow0a	2	2	2	2
Red0	54	29	29	54
Yellow0b	1	1	1	1
Offset	0	12	62	48
Speed	50	50	50	50

Result	39	39
--------	----	----

Začetni parametri iz zgornje preglednice, vstavljeni v program ARosem, podajo območje zelenega vala 39 sekund v obe smeri.

Grafična ponazoritev dobljene rešitve:



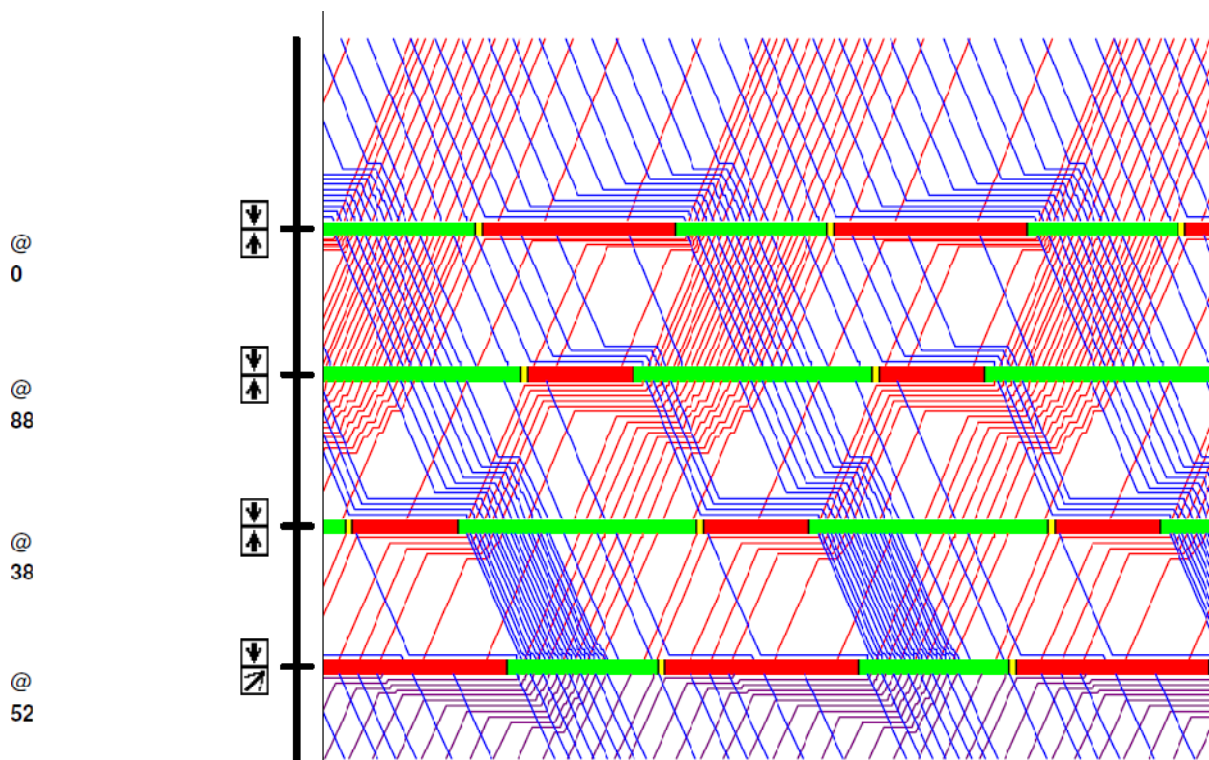
Grafikon 5: Graf vodenja zelenega vala optimiziran s programom ARosem za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)

Rezultati, pridobljeni s programom ARosem in vstavljeni v program Synchro podajo rezultate 0,55 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 76,1, kar je razvidno iz spodnje preglednice:

Preglednica 13: S Synchronom dobljena preglednica za podatke izračunane s programom ARosem za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)

Network Totals

Number of Intersections	4
Control Delay / Veh (s/v)	19
Queue Delay / Veh (s/v)	0
Total Delay / Veh (s/v)	19
Total Delay (hr)	59
Stops / Veh	0.55
Stops (#)	6185
Average Speed (km/hr)	21
Total Travel Time (hr)	103
Distance Traveled (km)	2189
Fuel Consumed (l)	510
Fuel Economy (km/l)	4.3
CO Emissions (kg)	9.48
NOx Emissions (kg)	1.83
VOC Emissions (kg)	2.19
Unserviced Vehicles (#)	0
Vehicles in dilemma zone (#)	0
Performance Index	76.1



Slika 32: Izris vodenja vozil iz Synchra, ko vstavimo rešitev iz programa ARosem za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)

6.2.2 Rešitev z linearnim programiranjem v Excelu

Vstavitev začetnih parametrov (dolžine med križišči, dolžina cikla in delež rdeče luči) v Excelov program nam poda sledečo preglednico:

Preglednica 14: Izračunani podatki po linearni metodi za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)

ciklus	100					
	1		t[s]	t[c]	r[s]	r[c]
1	0	0	0	0	55	0.55
2	226	226	16.272	0.1627	30	0.3
3	290	516	20.88	0.2088	30	0.3
4	211	727	15.192	0.1519	55	0.55
	727		52.344			

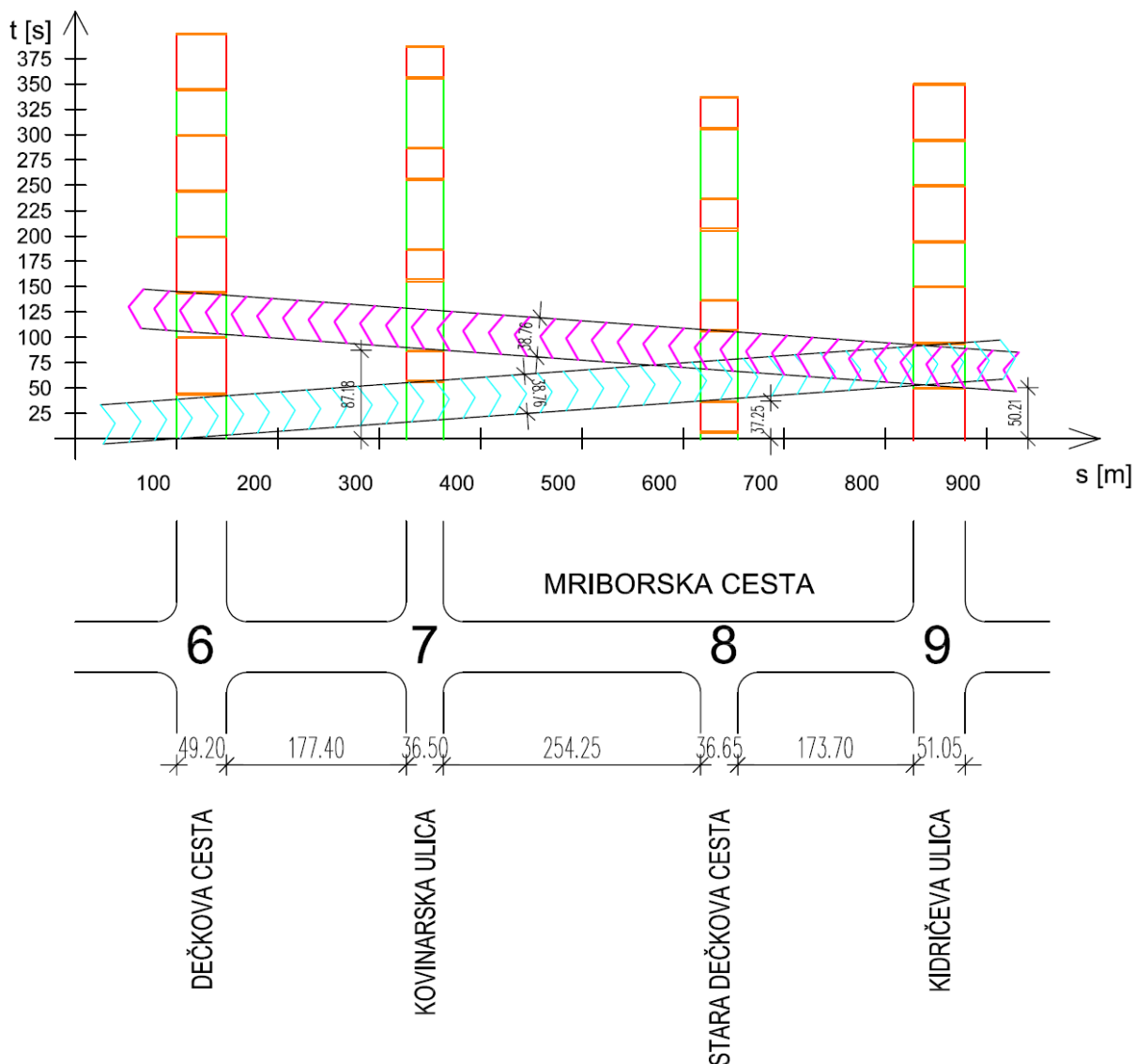
w	wp	m
0	0.00696	0
0.2912	0.2912	0
0	0	1
0.0126	0.0412	0

b	bp	
0.4088	0.4088	0.4088

max

Zgornja preglednica nam poda velikost območja zelenega vala 40,88 sekund.

Grafična ponazoritev rešitve:



Grafikon 6: Graf vodenja zelenega vala optimiziran po linearni metodi za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)

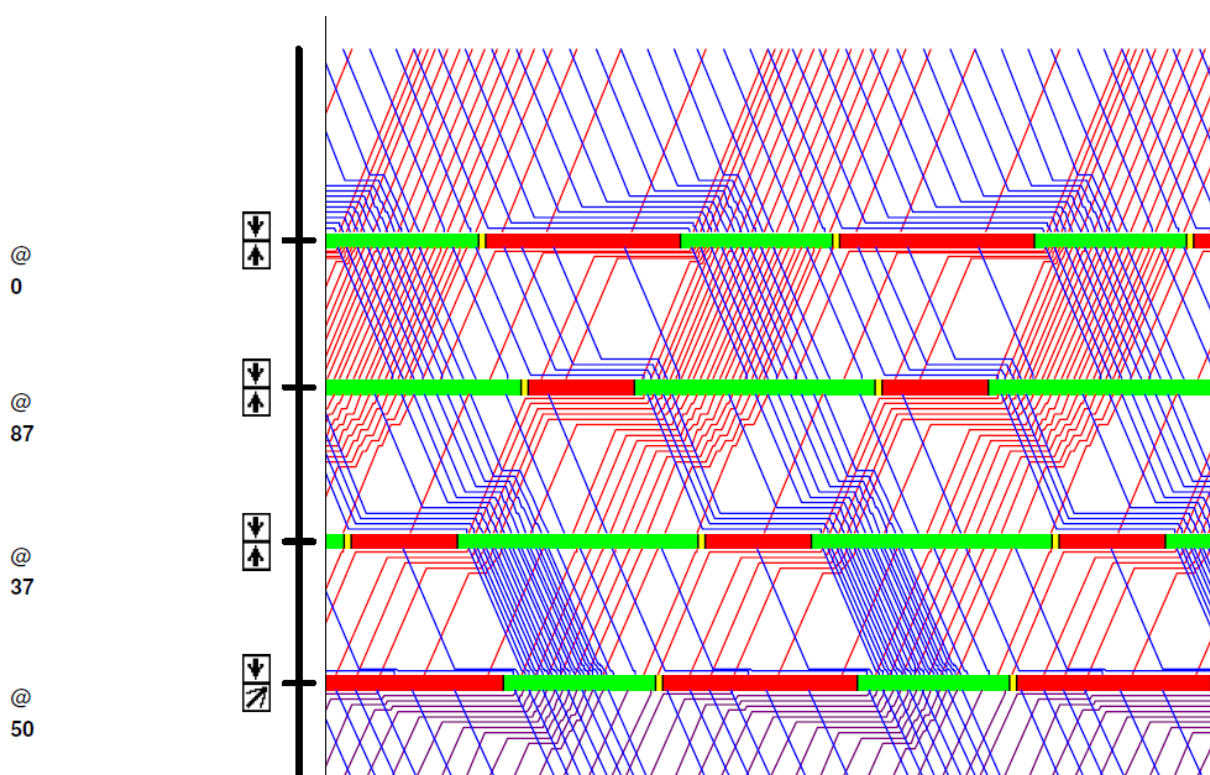
Medtem ko program ARosem upošteva širino križišča, metoda linearnega programiranja v Excelu tega parametra ne vsebuje, zato je bilo za potrebe ponazoritve rešitve in odčitavanja zamikov iz grafikona 6 podatke prilagoditi. Po prilagojenih podatkih je območje zelenega vala veliko 38,76 sekund, zamiki pa se rahlo razlikujejo od izračuna programa ARosem.

Prilagojeni podatki, vstavljeni v Synchro, podajo rezultate 0,55 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 75,9, kar je razvidno iz preglednice 15.

Preglednica 15: S Synchro dobljena preglednica za podatke izračunane po linearni metodi za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)

Network Totals

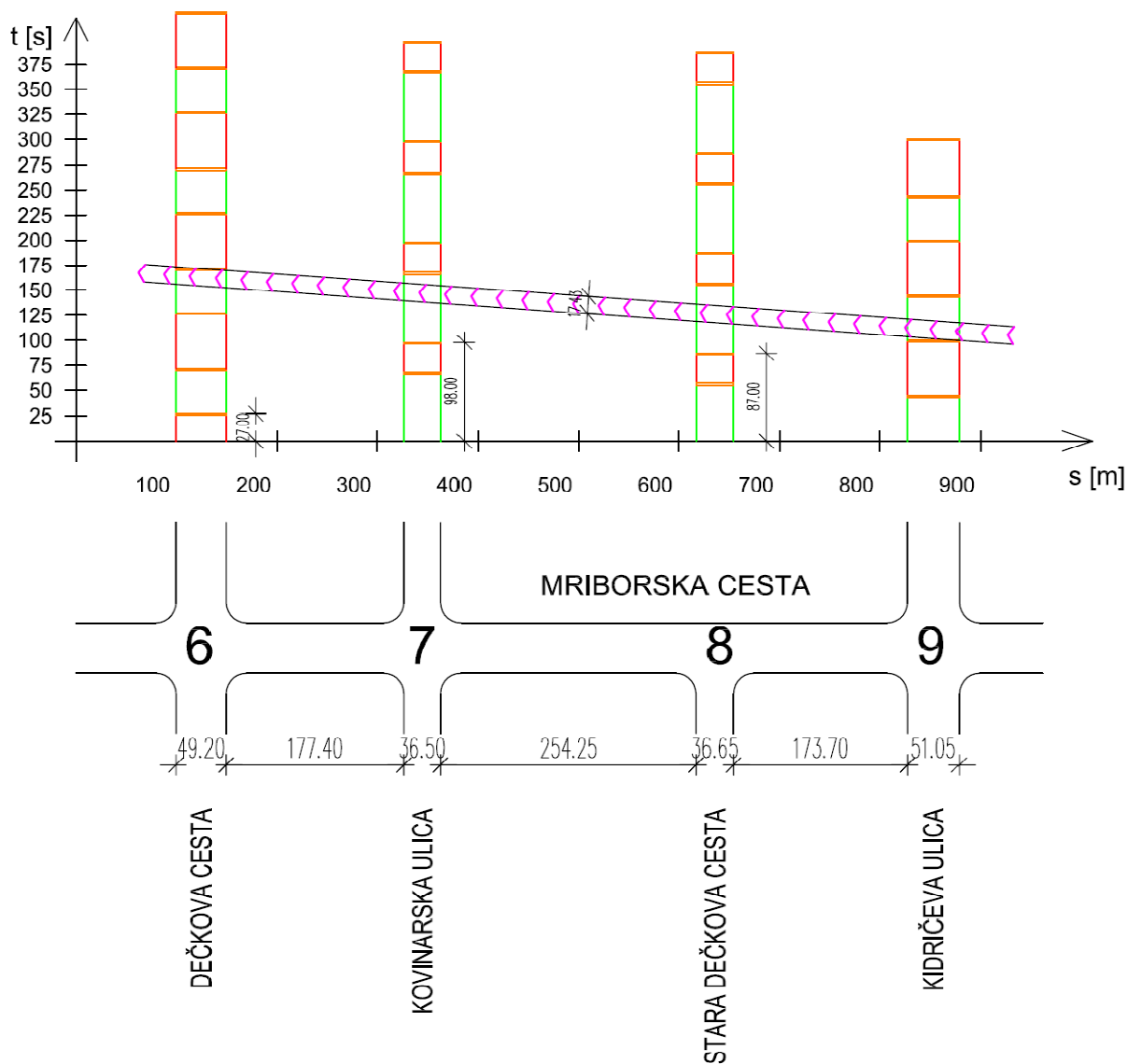
Number of Intersections	4
Control Delay / Veh (s/v)	19
Queue Delay / Veh (s/v)	0
Total Delay / Veh (s/v)	19
Total Delay (hr)	59
Stops / Veh	0.55
Stops (#)	6177
Average Speed (km/hr)	21
Total Travel Time (hr)	103
Distance Traveled (km)	2189
Fuel Consumed (l)	509
Fuel Economy (km/l)	4.3
CO Emissions (kg)	9.47
NOx Emissions (kg)	1.83
VOC Emissions (kg)	2.18
Unserved Vehicles (#)	0
Vehicles in dilemma zone (#)	0
Performance Index	75.9



Slika 33: Izris vodenja vozil iz Synchra, ko vstavimo rešitev iz linearnega modela za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)

6.2.3 Rešitev sistema s programom Synchro

Urejeno mrežo v programu Synchro optimiziramo tako, da ohranimo cikel v sistemu 100 sekund. Dobljeni podatki, vstavljeni v grafikon, prikažejo sledečo grafično ponazoritev:



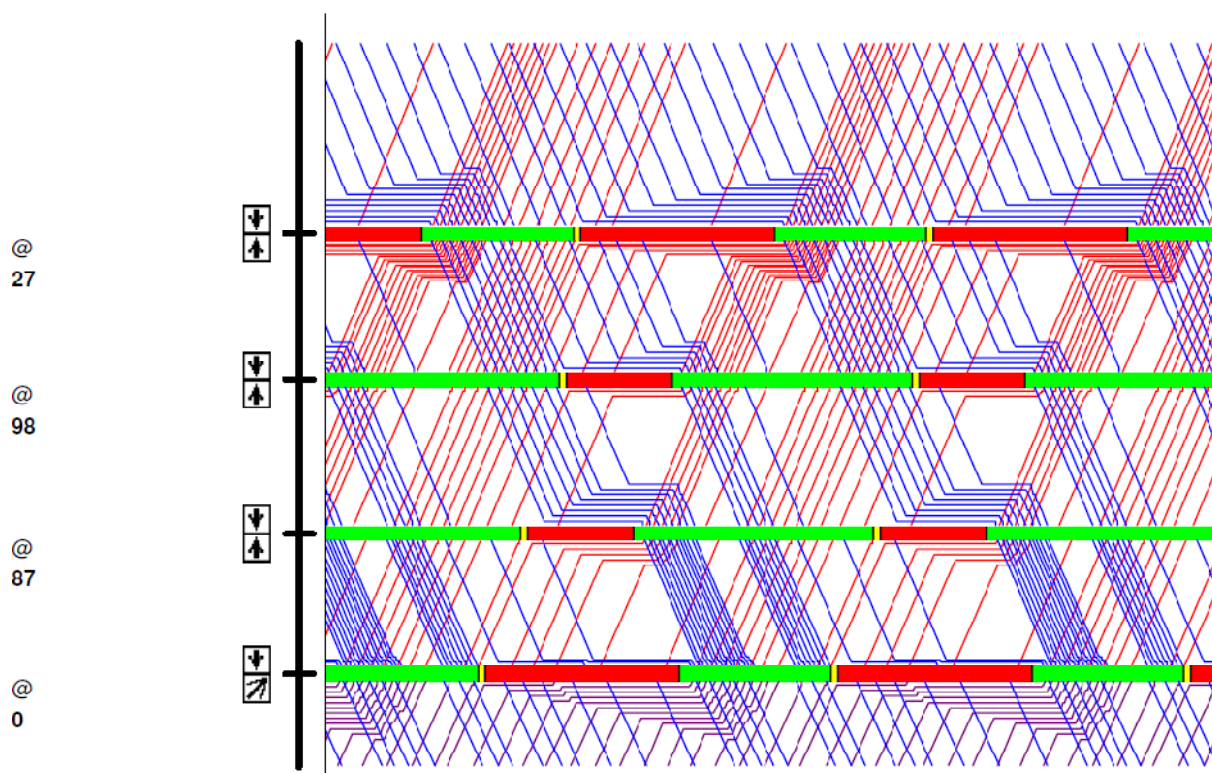
Grafikon 7: Graf vodenja zelenega vala optimiziran s Synchrom za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)

Iz grafikona je razvidno, da program Synchro ni računal zelenega vala, saj je zeleni val samo v nasprotni smeri in še ta velikosti 17.43 sekunde. Rezultati računanja po Synchru so 0,51 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 73,2, kar je razvidno iz preglednice 16.

Preglednica 16: S Synchrom optimizirana preglednica za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)

Network Totals

Number of Intersections	4
Control Delay / Veh (s/v)	18
Queue Delay / Veh (s/v)	0
Total Delay / Veh (s/v)	18
Total Delay (hr)	57
Stops / Veh	0.51
Stops (#)	5785
Average Speed (km/hr)	22
Total Travel Time (hr)	101
Distance Traveled (km)	2189
Fuel Consumed (l)	496
Fuel Economy (km/l)	4.4
CO Emissions (kg)	9.22
NOx Emissions (kg)	1.78
VOC Emissions (kg)	2.13
Unserved Vehicles (#)	0
Vehicles in dilemma zone (#)	0
Performance Index	73.2



Slika 34: Izris vodenja vozil po optimizaciji iz Synchra za Mariborsko cesto v Celju (križišče 6, 7, 8 in 9)

6.2.4 Primerjava rezultatov na drugem primeru: Odsek Mariborska cesta križišče 6, 7, 8 in 9

Različne metode vodenja zelenega vala na primeru Mariborske ceste, križišča 6, 7, 8, in 9, to je od Dečkove ceste do Kidričeve ulice v Celju, podajo tri rezultate, kateri so si precej podobni:

- program ARosem poda rezultat 0,55 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 76,1,
- linearno programiranje v Excelu poda rezultat 0,55 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 75,9,
- program Synchro poda rezultat 0,51 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 73,2.

Po pričakovanjih sta skoraj identična rezultata, dobljena s programom ARosem in linearnim programiranjem z Excelom. Podatki, dobljeni z linearnim programiranjem z Excelom, so bili prilagojeni tako, da so se upoštevale tudi razdalje križišč, program ARosem pa je kot najboljšo rešitev našel takšno, po kateri se zeleni val začne v začetku zelene luči iz vsake smeri, v posledici česar sta si rezultata zelo podobna. Območje velikosti zelenega vala je namreč z računanjem s programom ARosem 39 sekund, s pomočjo linearnega programiranja z Excelom pa 38,76 sekunde.

Program Synchro pa je na tem odseku Mariborske ceste sistem semaforiziranih križišč optimiziral tako, da zelenega vala sploh ni. Število ustavljanj na posamezno vozilo je sicer manjše kot pri izračunu s programom ARosem in linearnim programiranjem z Excelom, vendar v primerjavi s prejšnjima programoma, kjer je velikost zelenega vala podana in znaša cca. 39 sekund, Synchro ne poda zelenega vala, kar pa mi dejansko iščemo.

Kot že rečeno je število ustavljanj na posamezno vozilo pri izračunu s programom Synchro manjše kot pri drugih dveh programih in znaša 0.51; pri računu s pomočjo linearnega programiranja z Excelom namreč znaša 0.55, enak rezultat nam poda tudi optimiziranje s programom ARosem. Temu primerni so tudi indeksi učinkovitosti, ki je pri Synchru 73.2, pri linearnem programiranju z Excelom 75.9, pri računu s programom ARosem pa 76.1.

6.3 Tretji primer: Celoten odsek Mariborske ceste in Aškerčeve ulice v Celju

Za prikaz primerjave med različnimi metodami vodenja zelenega vala, kadar gre za kompleksnejši sistem, služi celotna glavna cestna povezava skozi mesto Celje, to je celotna Mariborska cesta, ki se nadaljuje v Aškerčevo ulico. Na tej arteriji se nahaja 14 semaforiziranih križišč, zato je bilo potrebno pri računanju s programom ARosem celoten odsek razdeliti na tri odseke. Zaradi kompleksnosti sistema pri takem sistemu semaforjev s pomočjo linearnega programiranja z Excelom ne moremo narediti, zato je smiselno primerjati le optimizacijo s programom ARosem in programom Synchro.

Celoten odsek računamo s ciklom 120 sekund in vozno hitrostjo 60 km/h.

6.3.1 Rešitev sistema s programom ARosem

Ker je bilo vodenje semaforiziranega sistema za celoten odsek Mariborske ceste z Aškerčevo ulico s programom ARosem že izračunano v 5. poglavju Uporaba programa ARosem v praksi, za potrebe primerjave med različnimi metodami vodenja zelenega vala sedaj samo prevzamemo rezultate.

Preglednica 17: Izračunani podatki s programom ARosem za celoten odsek Mariborske ceste in Aškerčeve ulice v Celju

name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
length	154	257	317	289	296	226	291	211	154	395	227	139	138	138
cycle	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
green0	70	82	82	58	82	52	82	82	52	82	64	64	94	82
yellow0a	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
red0	47	35	35	59	35	65	35	35	65	35	53	53	23	35
yellow0b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
offset	0	3	63	44	55	11	85	68	55	117	117	101	117	117
speed	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

result	37	37
--------	----	----

20	20
----	----

29	29
----	----

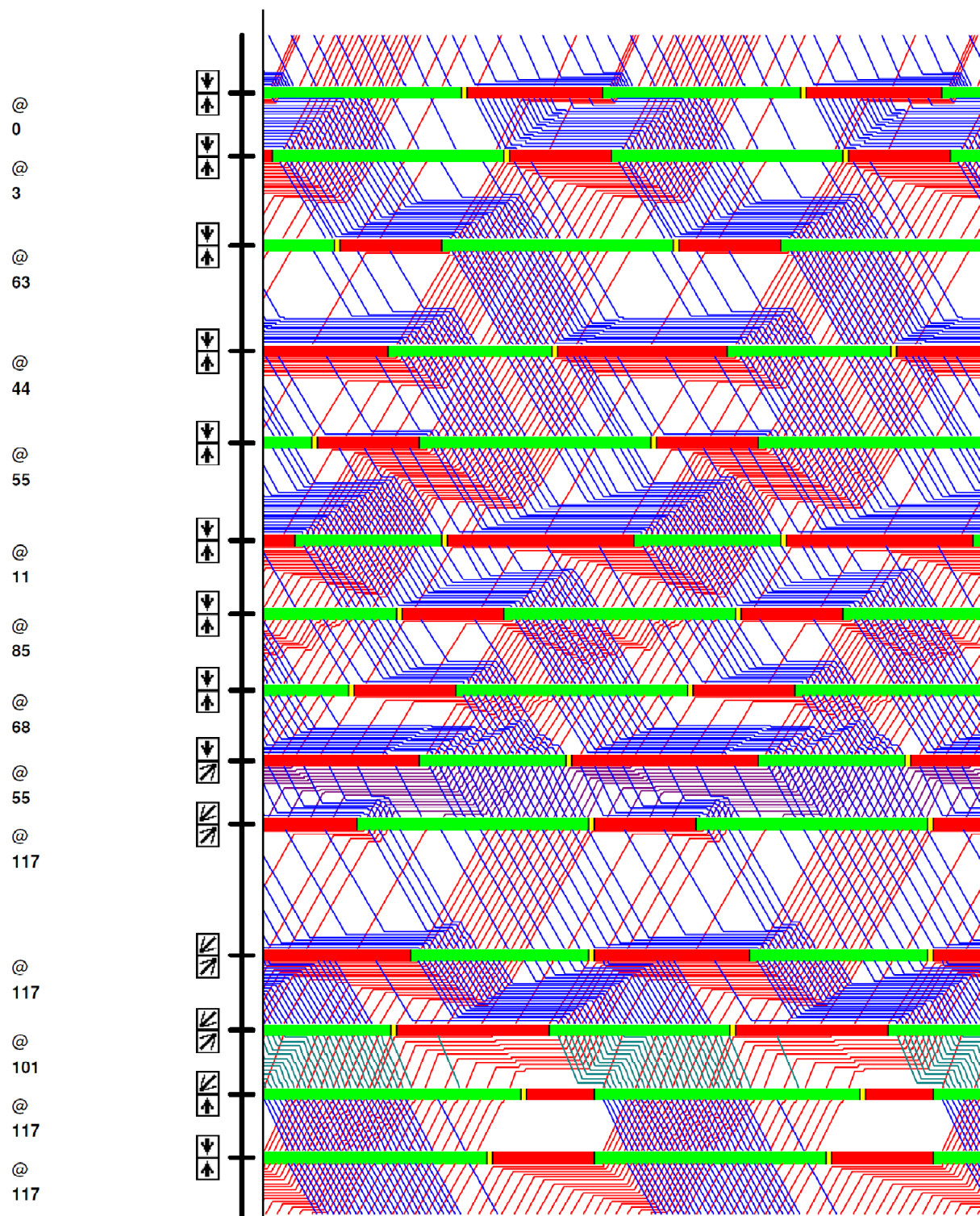
Začetni parametri iz zgornje preglednice, vstavljeni v program ARosem, podajo območje zelenega vala 37 sekund v obe smeri za prvo odsek (1., 2., 3. in 4. križišče), 20 sekund v obe smeri za drugi odsek (5., 6., 7., 8. in 9. križišče) ter 29 sekund v obe smeri za tretji odsek (10., 11., 12., 13. in 14. križišče). Seznam križišč se nahaja v prilogi A.

Dobljeni rezultati nam vstavljeni v program Synchro podajo sledeče rezultat 0,59 ustavljanj na vozilo ter indeks učinkovitosti 425,3, kar ponazorimo v naslednji preglednici.

Preglednica 18: S Synchrom dobljena preglednica za podatke izračunane s programom ARosem za celoten odsek Mariborske ceste in Aškerčeve ulice v Celju

Network Totals

Number of Intersections	14
Control Delay / Veh (s/v)	30
Queue Delay / Veh (s/v)	1
Total Delay / Veh (s/v)	31
Total Delay (hr)	358
Stops / Veh	0.59
Stops (#)	24368
Average Speed (km/hr)	17
Total Travel Time (hr)	509
Distance Traveled (km)	8895
Fuel Consumed (l)	2509
Fuel Economy (km/l)	3.5
CO Emissions (kg)	46.67
NOx Emissions (kg)	9.01
VOC Emissions (kg)	10.76
Unserved Vehicles (#)	167
Vehicles in dilemma zone (#)	1145
Performance Index	425.3



Slika 35: Izris vodenja vozil iz Synchra, ko vstavimo rešitev iz programa AROsem za celotno Mariborsko cesto in Aškerčevo ulico v Celju

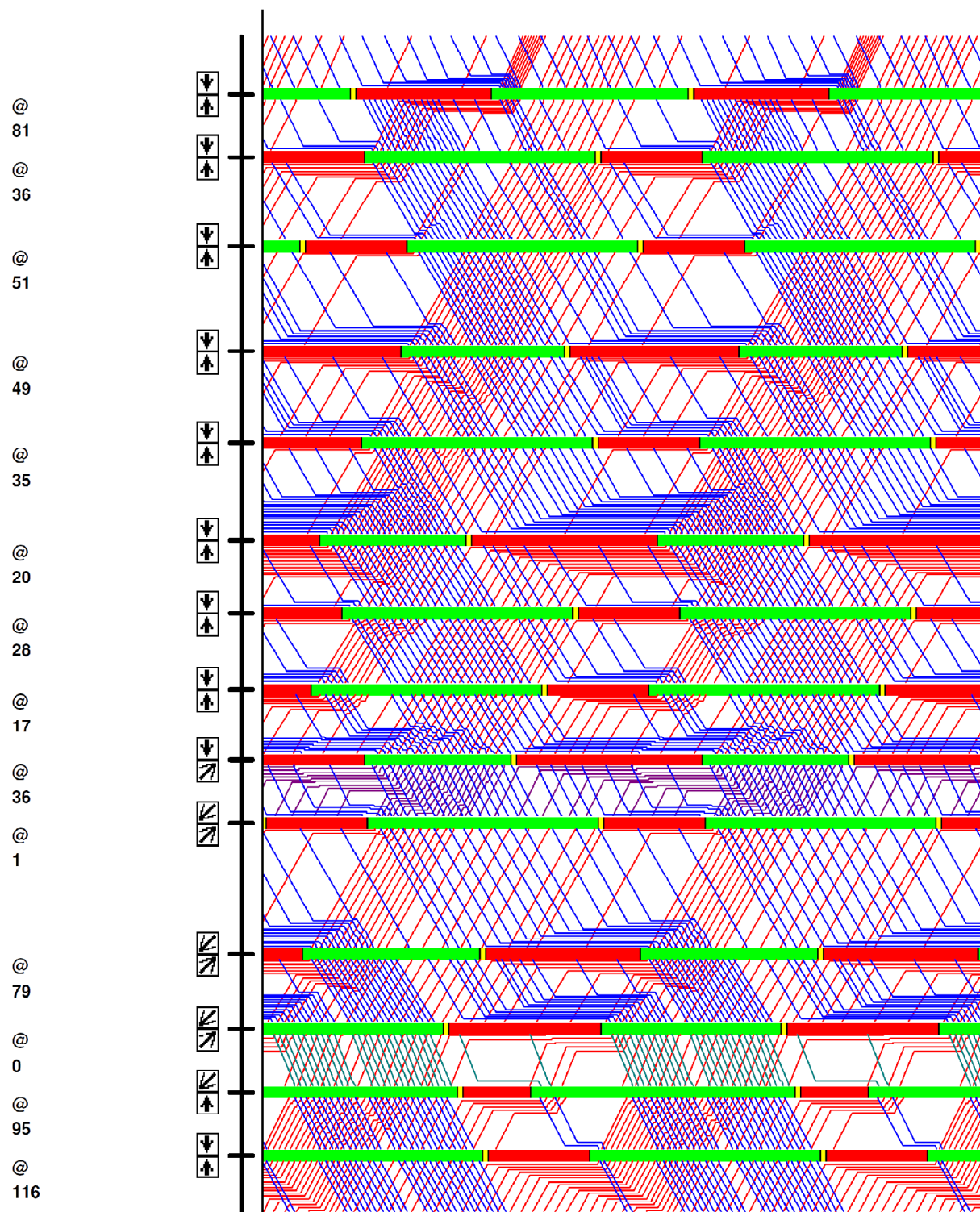
6.3.2 Rešitev sistema s programom Synchro

Z vstavitvijo začetnih parametrov celotnega sistema v program Synchro dobimo rezultat 0,43 ustavljanj na vozilo in indeks učinkovitosti 335,6, kar je razvidno iz spodnje tabele.

Preglednica 19: S Synchrom optimizirana preglednica za celoten odsek Mariborske ceste in Aškerčeve ulice v Celju

Network Totals

Number of Intersections	14
Control Delay / Veh (s/v)	25
Queue Delay / Veh (s/v)	0
Total Delay / Veh (s/v)	25
Total Delay (hr)	286
Stops / Veh	0.43
Stops (#)	17909
Average Speed (km/hr)	20
Total Travel Time (hr)	437
Distance Traveled (km)	8895
Fuel Consumed (l)	2102
Fuel Economy (km/l)	4.2
CO Emissions (kg)	39.10
NOx Emissions (kg)	7.55
VOC Emissions (kg)	9.02
Unserved Vehicles (#)	167
Vehicles in dilemma zone (#)	873
Performance Index	335.6



Slika 36: Izris vodenja vozil po optimizaciji iz Synchra za celotno Mariborsko cesto in Aškerčevo ulico v Celju

6.3.3 Primerjava rezultatov na tretjem primeru: Mariborska cesta in Aškerčeva ulica

Če primerjamo med seboj rezultata optimizacije sistema semaforiziranih križišč s programom ARosem in s programom Synchro, ugotovimo, da so razlike med rezultati očitne. Program Synchro namreč optimizira sistem na podlagi čim manj ustavljanj na vozilo, program ARosem pa na čim večji vrednosti območja zelenega vala. S programom ARosem se je celotna cestna arterija razdelila na tri odseke in se nato smiselno združila tako, da se je dobil dvakrat prekinjen zeleni val, to je območje, kjer se z rdečo lučjo vozila v celotnem zelenem valu ustavijo, s čimer se ponovno postavijo v celotno verigo, na kar se z zelenim valom ponovno spustijo čez štiri do pet križišč. Enako optimizacijo uporablja tudi program Synchro, vendar dodatno upošteva še vozila, ki že čakajo v križišču pri rdeči luči, s čimer skupino vozil pripelje do zelene luči na semaforju potem, ko so vozila, ki so čakala pri rdeči luči, križišče že prevozila. S tem ukrepom pa se v celoti bistveno zmanjša tudi število ustavljanj na vozilo.

Število ustavljanj na vozilo pri optimizaciji s programom ARosem je 0.59, pri optimizaciji s programom Synchro pa 0.43. Temu primeren je indeks uspešnosti pri optimizaciji s programom ARosem 425.3, pri optimizaciji s programom Synchro pa 335.6.

6.4 Primerjava rezultatov

Pri primerjavi rezultatov, ki so jih na različnih primerih podale izbrane tri metode vodenja zelenega vala, ugotovimo, da je princip računanja zelenega vala s programom ARosem in s pomočjo linearnega programiranja z Excelom sicer precej različen, saj s pomočjo Excela sistem računamo po postopku linearnega problema, s programom ARosem pa po principu "brute force", kar pomeni da preverimo vse rezultate in izberemo najboljšega. Kljub temu pa so si končni rezultati precej podobni in števila ustavljanj na vozilo slična.

Po pričakovanjih pa je reševanje teh sistemov daleč najoptimalnejše s program Synchro, kar je razumljivo, saj je to program, ki se razvija že vrsto let in je izdelan in razvijan prav za reševanje problemov vodenja vozil skozi prometno arterijo.

7 PREDNOSTI IN POMANJKLJIVOSTI PROGRAMA ARosem

7.1 Prednosti programa ARosem

Program ARosem je zasnovan na enostaven način. Po metodi 'brute force' izračunamo vse možne variante in izberemo najboljšo. Ker nimamo zapletenih matematičnih izpeljav, ki temeljijo na vnaprej postavljenih pogojih, je program hitro nadgradljiv, saj lahko v sam program hitro vpeljemo dodatne pogoje, ki nam podajo primernejši rezultat za iskano rešitev. Z malo več nadgradnje pa bi lahko v program vpeljali tudi optimizacijo na način čim manjšega števila ustavljanj na vozilo, po principu katere deluje mednarodno priznani program Synchro. To bi lahko naredili z navidezno simulacijo vozil v sistemu, kar bi pomenilo, da bi vsako vozilo v sistemu imelo svojo linijo, odvisno od hitrosti. S takšnim načinom reševanja ne bi več iskali največje vrednosti območja zelenega vala, ampak bi iskali rešitev, kjer bi se linije vozil čim manjkrat prekinile. Za še večjo optimizacijo bi lahko ustvarili še dodaten pogoj, da se linije pred rdečim območjem prekinejo in začnejo zgoščevati, v zelenem območju pa bi se linije nadaljevale in pričele redčiti.

Prav tako je program zelo preprost za uporabo, saj s samo sedemnajstimi ukazi uredimo celoten sistem križišč, ki je pripravljen za optimizacijo, s čimer program relativno hitro poda najboljši možen rezultat v sistemu. Ta rezultat je popolnoma zadovoljiv za manjše cestne arterije, kjer iščemo največje območje zelenega vala.

7.2 Pomanjkljivosti programa ARosem

Prav 'brute force' način iskanja rešitev pa je hkrati tudi največja pomanjkljivost programa. Zaradi ogromnega prostora rešitev je lahko namreč iskanje rešitev z manj zmogljivimi računalniki zelo dolgotrajno. Problem se tudi pojavi pri kompleksnejših sistemih, kjer se na cestni arteriji nahaja večje število semaforjev, saj lahko sistem v tem primeru tudi močnejši računalniki rešujejo po več ur.

8 SKLEPNE UGOTOVITVE

V diplomski nalogi sem predstavil svoj program ARosem, katerega sem v idejni obliki začel razvijati že v zadnjem letniku študija, ko smo pri predmetu Avtomatske naprave v prometu reševali problem vodenja vozil skozi cestno mrežo štirih semaforjev. V prvi fazi je program podal samo končni rezultat sistema, za diplomsko delo pa sem program nadgradil z grafičnim izrisom, ki nam prikaže hiter pregled rešitve, in z izpisom rešitve.

Pri primerjavi programa ARosem z linearnim programiranjem v Excelu in programom Synchro sem na manj kompleksnem sistemu, kot je glavna cesta skozi mesto Šentjur, ugotovil, da je podana rešitev uporabna, saj so dobljeni rezultati povsem primerljivi z rezultati ostalih programov in bi jo lahko uporabili v praksi za vodenje vozil s svetlobno signalnimi napravami skozi mesto Šentjur.

Pri primerjavi programa ARosem z linearnim programiranjem v Excelu in programom Synchro na sistemu obremenjenih križišč, kot je odsek Mariborske ceste s štirimi najbolj obremenjenimi križišči, sem ugotovil, da je podana rešitev programa ARosem še vedno uporabna, saj so tudi v primeru bistveno bolj obremenjenih križišč, kot so tista skozi mesto Šentjur, rezultati povsem primerljivi z rezultati ostalih programov, pod pogojem, da gre za sistem manjšega števila križišč. V kolikor imamo kompleksnejši sistem večjega števila križišč, kot je celoten odsek Mariborske ceste, ki se nadaljuje v Aškerčevo ulico in zajema 14 križišč, je za potrebe pridobivanja realnih in optimalnih rezultatov s programom ARosem potrebno celotno arterijo razdeliti na več manjših odsekov, v tem primeru na tri odseke. Z združitvijo rešitev, ki jih za vsak odsek poda program ARosem, poskušamo poiskati najoptimalnejšo rešitev območja zelenega vala, pri čemer pa je za združitve rešitev vseh odsekov možnih več kombinacij. Eno izmed njih smo primerjali tudi s programom Synchro, ki pa je isti sistem reševal na optimizaciji čim manjšega ustavljanja na vozilo in nam podal rešitev, ki je v pogledu števila ustavljanj za približno 20% boljša od tiste, ki jo poda program ARosem.

Pri primerjavi različnih programov na različno kompleksnih sistemih sem ugotovil, da je program ARosem uporaben na krajših odsekih, sej je rezultat povsem primerljiv z rezultati drugih dveh programov, ki sem jih primerjal v tej nalogi. Za daljše odseke pa je potrebno sistem razdeliti na več odsekov in nato rezultate posameznih odsekov združiti. Uporabnost daljših odsekov je tako odvisna od združenja rezultatov manjših odsekov.

Z nadaljevanjem razvijanja programa bi lahko precej hitro prišli do uporabnejšega programa, s katerim bi lahko optimizirali tudi daljše cestne arterije. Prav tako bi lahko v program vpeljali kakšno dodatno funkcijo, ki bi iskala rešitev še na drugačen način in ne samo največjega območja zelenega vala.

VIRI

Uporabljeni viri

Kastelic, T., Breška, Z., Čertanc, N., idr. 1991. Tehnični normativi za projektiranje in opremo mestnih prometnih površin. Nova izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FAGG - Prometnotehniški inštitut: str. XIV-1- XIV-2, XIV-4, XIV-7, XIV-10 - XIV-12, XIV-42 - XIV-46.

Uporabljeni internetni viri

Atlas okolja. 2013.

http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (Pridobljeno 09. 05. 2013.)

Slovenska ITS Arhitektura. 2007.

<http://www.pti.fgg.uni-lj.si/sitsa/?a=doc&id=1&docid=c349eef-9a5b-444f-8c35-260795b9d8f5>
(Pridobljeno 06. 02. 2013.)

Ostali viri

Kastelic, T., Štublar, J., Maher, T., idr. 1985. Optimalno upravljanje semafornih naprav vzdolž arterije. Ljubljana. Prometnotehniški inštitut VTOZD GG - FAGG: 88 str.

Žura M. 2003. Matematično programiranje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Prometna smer: 48 str.

Ostali internetni viri:

Huang, S. Synchro 7 Tutorial. 2011.

<http://www.youtube.com/watch?v=DIixUV1OWLE> (Pridobljeno 09. 02. 2013.)

Alex6STV. Video2.wmv. 2011.

<http://www.youtube.com/watch?v=RuImcrAzdXo> (Pridobljeno 09. 02. 2013.)

SEZNAM PRILOG

Priloga A: Graf vodenja zelenega vala optimiziran s programom ARosem skozi celotno Mariborsko cesto in Aškerčevo ulico v Celju