Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo

ROK VODOPIVEC

PRIMERJAVA PROGRAMSKE OPREME SYNCHRO IN VISTRO ZA ANALIZO USPEŠNOSTI SERVISIRANJA PROMETNIH ZAHTEV NA PRIMERU KRIŽIŠČ VZDOLŽ TRŽAŠKE CESTE V LJUBLJANI

MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM
DRUGE STOPNJE GRADBENIŠTVO

Ljubljana, 2017

Hrbtna stran: **VODOPIVEC ROK** 2017

UNIVERZA
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo

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

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE
STOPNJE GRADBENIŠTVO

Kandidat/-ka:

ROK VODOPIVEC

PRIMERJAVA PROGRAMSKE OPREME SYNCHRO IN VISTRO ZA ANALIZO USPEŠNOSTI SERVISIRANJA PROMETNIH ZAHTEV NA PRIMERU KRIŽIŠČ VZDOLŽ TRŽAŠKE CESTE V LJUBLJANI

COMPARISON OF SYNCHRO AND VISTRO SOFTWARE WHEN ANALYSING THE PERFORMANCE OF TRAFFIC DEMANDS IN THE CASE OF INTERSECTIONS ALONG TRŽAŠKA STREET IN LJUBLJANA

Mentor/-ica:
doc. dr. Tomaž Maher

Somentor/-ica:
asist. dr. Rok Marsetič

Član komisije:

Predsednik komisije:

2017

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 004.42:656.1(497.451.1)(043)

Avtor: Rok Vodopivec, dipl. inž. grad. (VS)

Mentor: doc. dr. Tomaž Maher, univ. dipl. inž. grad.

Somentor: asist. dr. Rok Marsetič, univ. dipl. inž. grad.

Naslov: Primerjava programske opreme Synchro in Vistro za analizo uspešnosti servisiranja prometnih zahtev na primeru križišč vzdolž Tržaške ceste v Ljubljani

Tip dokumenta: Magistrsko delo

Obseg in oprema: 102 str., 38 pregl., 25 sl., 24 graf., 27 en., 7 pril.

Ključne besede: metoda HCM, analitična programska orodja, Synchro 7, Vistro 5.0, časovne zamude, nivoji uslug, dolžine kolon, optimizacija prometne mreže

Izvleček:

Pomemben dejavnik pri načrtovanju nove prometne infrastrukture predstavljajo območja križišč, kjer se v primeru velikih prometnih obremenitev, zaradi prepletanja in prekinjanja prometnih tokov, pojavljajo zastoji. Pri projektiranju tovrstne infrastrukture je treba zadostiti različnim kriterijem, s čimer zagotovimo ustrezno funkcionalnost in prepustnost križišč. Kriterija prepustnosti in čakalnih časov določimo na podlagi analize kapacitivnosti obravnavanih križišč, ki jo lahko izvedemo s pomočjo različnih programskih orodij. V sklopu magistrske naloge smo z uporabo dveh globalno uveljavljenih analitičnih programov izvedli analizo kapacitivnosti štirih križišč vzdolž Tržaške ceste v Ljubljani, na podlagi pridobljenih mer učinkovitosti pa smo izdelali tudi primerjalno analizo, s katero smo ugotavljali učinkovitost in primernost uporabe izbranih programskih orodij. V teoretičnem delu magistrske naloge so podrobneje opisana različna programska orodja za izvedbo prometnih študij ter analitični metodi HCM 2000 in ICU 2003, ki predstavljata osnovo za določitev mer učinkovitosti pri uporabi analitičnih programskih orodij. Osrednji del magistrske naloge temelji na opisu izdelave prometnih modelov obravnavanega območja, ob tem pa smo podrobneje analizirali tudi podobnosti, razlike, pomanjkljivosti in omejitve obeh uporabljenih programskih orodij. Na podlagi prometnih modelov smo izvedli analizo kapacitivnosti, s katero smo pridobili podatke o povprečnih zamudah, doseženih nivojih uslug in dolžinah kolon, ki smo jih v nadaljevanju podrobneje analizirali ter na ta način ugotavljali primernost uporabe izbranih analitičnih programov. V zadnjem delu naloge smo analizirali tudi učinkovitost linijske koordinacije vzdolž Tržaške ceste, na podlagi katere smo optimizirali obstoječe krmilne programe semaforjev in tako brez dodatnih gradbenih ukrepov izboljšali obstoječe prometne razmere na obravnavanem območju.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 004.42:656.1(497.451.1)(043)
Author: Rok Vodopivec, B. Sc. Civil Engineering
Supervisor: Assist. Prof. Tomaž Maher, Ph. D.
Co-supervisor: Assist. Rok Marsetič, Ph.D.
Title: Comparison of Synchro and Vistro software when analysing the performance of traffic demands in the case of intersections along Tržaška Street in Ljubljana
Document type: Master Thesis
Scope and tools: 102 p., 38 tab., 25 fig., 24 graph., 27 eq., 7 ann.
Keywords: HCM method, analytical software tools, Synchro 7, Vistro 5.0, time delays, level of services, queue lenghts, network optimization

Abstract:

An important factor in planning new traffic infrastructure is the intersection, where heavy traffic often causes congestion due to the intertwining and interruption of traffic flow. When designing such areas there are numerous criteria that can be met to ensure proper functionality and permeability of such intersections. The criterion for permeability and waiting times can be determined on the basis of capacity analysis of the intersections in question, which can be carried out using various software tools. As part of the Masters' thesis we analysed the capacity of four road junctions along Tržaška Street in Ljubljana using two globally recognised analytical programs, and, on the basis of the obtained efficiency measures, we also produced a comparative analysis to determine the efficiency and suitability for using the selected software tools. The theoretical part of the Masters' thesis describes in greater detail the different software tools for carrying out traffic studies and the analytical methods HCM 2000 and ICU 2003, which represent the basis for determining efficiency measures when using analytical software tools. The main part of the Masters' thesis describes the production of traffic models of the area concerned, while we also analysed in greater detail the similarities, differences, deficiencies and limitations of both software programs used. The traffic models used represented the basis for applying the capacitance analysis, with which we obtained data on the average delays, the achieved level of services and the length of traffic jams, which we further analysed in detail and in this way, determined the suitability of using the chosen analytical software tools. The final section of the project is given to analysing the efficiency of line coordination along Tržaška Street, where we then optimised the existing traffic light control programs at junctions and thus, without any additional construction measures, succeeded in improving the existing traffic conditions in the given area.

ZAHVALA

Za vse koristne nasvete in strokovne usmeritve pri pisanju magistrske naloge se zahvaljujem mentorju doc. dr. Tomažu Maherju in somentorju asist. dr. Roku Marsetiču. Za pomoč pri pridobivanju podatkov in pripravi prometnih modelov se zahvaljujem tudi asist. dr. Ireni Strnad, viš. pred. mag. Robertu Rijavcu in mag. Simonu Detellbachu.

Za vso potrpežljivost in podporo v času študija gre zahvala tudi moji družini, prijateljem in sošolcem.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA **1**
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK ..... **II**
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT ..... **III**
ZAHVALA ..... **IV**
KAZALO VSEBINE ..... **V**
KAZALO PREGLEDNIC ..... **VIII**
KAZALO GRAFIKONOV ..... **X**
KAZALO SLIK ..... **XI**
KRATICE ..... **XII**

1 UVOD **1**
1.1 Namen, cilji in potek dela 2
2 TEORETIČNE OSNOVE **3**
2.1 Zakoni in pravilniki s področja projektiranja cest 3
2.2 Delitev orodij za analizo prometa 4
3 METODA HCM **6**
3.1 Metodologija HCM za analizo semaforiziranih križišč 6
3.1.1 Priprava prometnega modela 6
3.1.2 Združevanje prometnih pasov 8
3.1.3 Določevanje dejanskega prometnega toka 9
3.1.4 Določevanje nasičenega prometnega toka 10
3.1.5 Izračun kapacitete 11
3.1.6 Razmerje *v/c* 11
3.1.7 Kritično razmerje *v/c* 12
3.1.8 Določevanje zamud 13
3.1.9 Dolžina kolon 14
3.1.9.1 Matematične enačbe za izračun dolžine kolon v programu Vistro 5.0 15
3.1.9.2 Matematične enačbe za izračun dolžine kolon v programu Synchro 7 16
3.1.10 Določevanje nivojev uslug semaforiziranih križišč po metodi HCM 17
3.2 Metodologija HCM za analizo nesemaforiziranih križišč 18
3.2.1 Analiza kapacitivnosti križišča s stransko cesto 19

3.2.2 Ocena dolžine kolon 20

3.2.3 Zamude zaradi urejanja prometa 20

3.2.4 Določevanje nivojev uslug nesemaforiziranih križišč po metodi HCM 21

4 METODA ICU 22

4.1 Teoretične osnove metode ICU 22

4.2 Določevanje nivoja uslug po metodi ICU 23

4.3 Primerjava nivojev uslug po metodah ICU in HCM 24

5 OBRAVNAVANO OBMOČJE 25

5.1 Semaforizirano križišče Dolgi most 26

5.1.1 Geometrija križišča Dolgi most in podatki o omejitvah hitrosti 26

5.1.2 Krmilni program semaforjev na križišču Dolgi most 27

5.2 Nesemaforizirano križišče pri skladiščih 30

5.2.1 Geometrija križišča pri skladiščih in podatki o omejitvah hitrosti 30

5.2.2 Prometna ureditev nesemaforiziranega križišča pri skladiščih 31

5.3 Semaforiziran prehod za pešce Tržaška pri UBK 31

5.3.1 Geometrija semaforiziranega prehoda za pešce in podatki o omejitvah hitrosti 32

5.3.2 Krmilni program semaforjev na semaforiziranem prehodu za pešce 32

5.4 Semaforizirano križišče Tržaška - Tbilisijska 33

5.4.1 Geometrija križišča Tržaška - Tbilisijska in podatki o omejitvah hitrosti 33

5.4.2 Krmilni program semaforjev na križišču Tržaška - Tbilisijska 34

6 PROMETNE OBREMENITVE 37

6.1 Prikaz prometnih obremenitev 37

6.2 Prometne obremenitve na križišču Dolgi most 37

6.3 Prometne obremenitve na križišču Tržaška - Tbilisijska 38

6.4 Prometne obremenitve na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih 39

6.5 Prometne obremenitve na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška pri UBK 39

6.6 Prilagoditev prometnih obremenitev 40

6.7 Podatki o pešcih in kolesarjih 42

7 PROGRAMSKA ORODJA 43

7.1 Programsko orodje Synchro 43

7.2 Programsko orodje Vistro 44

7.3 Primerjava programskih orodij 45

8 PROMETNI MODELI ... 48
8.1 Zasnova prometne mreže ... 48
8.2 Podatki o značilnostih cestišča ... 48
8.3 Podatki o prometnih obremenitvah ... 50
8.4 Podatki o značilnostih signalnih naprav ... 51
8.5 Povzetek razlik pri pripravi prometnih modelov v programih Synchro 7 in Vistro 5.0 ... 53
9 ANALIZA MER UČINKOVITOSTI NA OBRAVNAVANEM OBMOČJU ... 55
9.1 Povprečne zamude in doseženi nivoji uslug ... 55
9.1.1 Povprečne zamude in nivoji uslug na križišču Dolgi most ... 56
9.1.2 Povprečne zamude in nivoji uslug na križišču Tržaška - Tbilisijska ... 59
9.1.3 Povprečne zamude in nivoji uslug na ostalih dveh križiščih ... 62
9.1.4 Povprečne zamude in nivoji uslug na celotnem obravnavanem območju ... 64
9.2 Dolžine kolon ... 66
9.2.1 Analiza dolžine kolon (50. percentila) ... 66
9.2.2 Analiza dolžne kolon (95. percentila) ... 68
9.3 Primerjava mer učinkovitost med programoma Synchro 7 in Sim Traffic ... 71
9.3.1 Primerjava povprečnih zamud med programoma Synchro 7 in Sim Traffic ... 71
9.3.2 Primerjava dolžine kolon med programoma Synchro 7 in Sim Traffic ... 74
9.4 Povzetek analize mer učinkovitosti med programoma Synchro 7 in Vistro 5.0 ... 76
10 OPTIMIZACIJA KRMILNIH PROGRAMOV SEMAFORJEV ... 78
10.1 Linijska koordinacija v programu Synchro 7 ... 78
10.2 Linijska koordinacija v programu Vistro 5.0 ... 79
10.3 Optimizacija krmilnih programov v programih Synchro 7 in Vistro 5.0 ... 81
10.3.1 Optimizacija krmilnih programov na križišču Dolgi most ... 82
10.3.2 Optimizacija krmilnih programov na križišču Tržaška - Tbilisijska ... 86
10.3.3 Optimizacija krmilnih programov na semaforiziranem PP Tržaška pri UBK ... 91
10.4 Optimizacija na nivoju celotnih križišč v programih Synchro 7 in Vistro 5.0 ... 93
11 ZAKLJUČKI IN UGOTOVITVE ... 98
VIRI ... 100

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Zahtevani nivoji uslug (Pravilnik o projektiranju cest, 2005) 3

Preglednica 2: Vhodni podatki pri uporabi metode HCM (HCM 2000, 16-3) 7

Preglednica 3: Stopnja progresije za prihod vozil v križišče (HCM 2000, 16-4) 7

Preglednica 4: Združevanje voznih pasov v skupine (HCM 2000, 16-7) 9

Preglednica 5: Nivoji uslug za semaforizirana križišča po metodi HCM (HCM 2000, 16-2) 17

Preglednica 6: Nivoji uslug za križišče s stransko cesto po metodi HCM (HCM 2000, 17-2) 21

Preglednica 7: Nivoji uslug po metodi ICU (Albeck, Husch, 2003) 23

Preglednica 8: Osnovni podatki o Tržaški cesti v Ljubljani 25

Preglednica 9: Širine voznih pasov in nakloni priključkov na krakih A in B (križišče Dolgi most) 26

Preglednica 10: Širine voznih pasov in nakloni priključkov na krakih C in D (križišče Dolgi most) 27

Preglednica 11: Širine voznih pasov in nakloni priključkov na krakih A, B in C (križišče pri skladiščih) 30

Preglednica 12: Širine voznih pasov in nakloni priključkov na krakih A in B (PP Tržaška pri UBK) 32

Preglednica 13: Širine voznih pasov in nakloni priključkov na krakih A in B (križišče Tržaška - Tbilisijska) 34

Preglednica 14: Širine voznih pasov in nakloni priključkov na krakih C in D (križišče Tržaška - Tbilisijska) 34

Preglednica 15: Faktor f_{el} za pretvorbo vozil na enoto EOV (Ur. l. RS, št. 4/2016) 37

Preglednica 16: Končne prometne obremenitve na obravnavanem območju 40

Preglednica 17: Prometne obremenitve pešcev in kolesarjev 42

Preglednica 18: Povprečne zamude pri analizi semaforiziranih križišč v mestu Chapel Hill (S. Johari, 2016) 46

Preglednica 19: Povzetek razlik pri pripravi prometnih modelov v programih Synchro 7 in Vistro 5.0 53

Preglednica 20: Primerjava povprečnih zamud in nivojev uslug na križišču Dolgi most 57

Preglednica 21: Primerjava povprečnih zamud in nivojev uslug na križišču Tržaška - Tbilisijska 60

Preglednica 22: Primerjava povprečnih zamud in nivojev uslug na PP Tržaška cesta pri UBK 62

Preglednica 23: Primerjava povprečnih zamud in nivojev uslug na križišču pri skladiščih 63

Preglednica 24: Skupne zamude in nivoji uslug na obravnavanih križiščih 64

Preglednica 25: Dolžine signalnih faz pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (Dolgi most) 82

Preglednica 26: Dolžine signalnih faz pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (Dolgi most) 83

Preglednica 27: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (Dolgi most) 84

Preglednica 28: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (Dolgi most) 85

Preglednica 29: Dolžine signalnih faz pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (Tržaška - Tbilisijska) 87

Preglednica 30: Dolžine signalnih faz pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (Tržaška - Tbilisijska) 88

Preglednica 31: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (Tržaška - Tbilisijska) 89

Preglednica 32: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (Tržaška - Tbilisijska) 89

Preglednica 33: Dolžine signalnih faz pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (PP Tržaška pri UBK) 91

Preglednica 34: Dolžine signalnih faz pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (PP Tržaška pri UBK) 92

Preglednica 35: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (PP Tržaška pri UBK) 92

Preglednica 36: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (PP Tržaška pri UBK) 93

Preglednica 37: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji na nivoju celotnih križišč (Synchro 7) ... 94

Preglednica 38: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji na nivoju celotnih križišč (Vistro 5.0) 94

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Primerjava povprečnih zamud na semaforiziranih križiščih v Ankari (Kazemi Afshar, 2015) 47

Grafikon 2: Primerjava povprečnih zamud na nivoju skupin voznih pasov (križišče Dolgi most) 56

Grafikon 3: Primerjava povprečnih zamud na nivoju celotnih krakov (križišče Dolgi most) 56

Grafikon 4: Primerjava povprečnih zamud za posamezne skupine voznih pasov (križišče Tržaška - Tbilisijska) 59

Grafikon 5: Primerjava povprečnih zamud na posameznih krakih (križišče Tržaška - Tbilisijska) 59

Grafikon 6: Primerjava povprečnih zamud na posameznih krakih (PP Tržaška pri UBK in križišče pri skladiščih) 62

Grafikon 7: Primerjava skupnih zamud na obravnavanih križiščih 64

Grafikon 8: Primerjava vrednosti 50. percentile dolžine kolon (križišče Dolgi most) 67

Grafikon 9: Primerjava vrednosti 50. percentile dolžine kolon (križišče Tržaška - Tbilisijska) 67

Grafikon 10: Primerjava vrednosti 50. percentile dolžine kolon (PP Tržaška pri UBK in križišče pri skladiščih) 67

Grafikon 11: Primerjava vrednosti 95. percentile dolžine kolon (križišče Dolgi most) 69

Grafikon 12: Primerjava vrednosti 95. percentile dolžine kolon (križišče Tržaška - Tbilisijska) 69

Grafikon 13: Primerjava vrednosti 50. percentile dolžine kolon (PP Tržaška pri UBK in križišče pri skladiščih) 70

Grafikon 14: Primerjava skupnih zamud med Synchro 7 in Sim Traffic na obravnavanih križiščih 72

Grafikon 15: Primerjava zamud med Synchro 7 in Sim Traffic (križišče Dolgi most) 72

Grafikon 16: Primerjava zamud med Synchro 7 in Sim Traffic (križišče Tržaška - Tbilisijska) 73

Grafikon 17: Primerjava zamud med Synchro 7 in Sim Traffic (PP Tržaška pri UBK in križišče pri skladiščih) 73

Grafikon 18: Primerjava kolon med Synchro 7 in Sim Traffic na križišču Dolgi most (95. percentila) 74

Grafikon 19: Primerjava kolon med Synchro 7 in Sim Traffic na križišču Tržaška - Tbilisijska (95. percentila) . 75

Grafikon 20: Primerjava povprečnih zamud pred in po optimizaciji na nivoju celotnih križišč (Synchro 7) 94

Grafikon 21: Primerjava povprečnih zamud pred in po optimizaciji na nivoju celotnih križišč (Vistro 5.0) 95

Grafikon 22: Primerjava optimiziranih povprečnih zamud na križišču Dolgi most 96

Grafikon 23: Primerjava optimiziranih povprečnih zamud na križišču Tržaška - Tbilisijska 96

Grafikon 24: Primerjava optimiziranih povprečnih zamud na semaforiziranem PP Tržaška pri UBK 96

KAZALO SLIK

Slika 1: Določitev 95. percentile dolžine kolone v križišču s stransko cesto (HCM 2000, 17-23) 20

Slika 2: Zamude v križišču s stransko cesto (HCM 2000, 17-24) 21

Slika 3: Obravnavano območje (google.maps, 2017) 25

Slika 4: Stanja med delovanjem semaforjev na križišču Dolgi most (JP LPT d.o.o., 2017) 28

Slika 5: Semaforizirano križišče Dolgi most med gradnjo SZ priključka (google.maps, 2017) 29

Slika 6: Nesemaforizirano križišče pri skladiščih (google.maps, 2017) 31

Slika 7: Krmilni program semaforjev na PP Tržaška pri UBK (JP LPT d.o.o., 2008) 32

Slika 8: Semaforiziran prehod za pešce Tržaška pri UBK (google.maps, 2017) 33

Slika 9: Stanja med delovanjem semaforjev na križišču Tržaška - Tbilisijska (JP LPT d.o.o., 2008) 35

Slika 10: Semaforizirano križišče Tržaška - Tbilisijska (google.maps, 2017) 36

Slika 11: Dolžine kolon pri analizi semaforiziranih križišč v mestu Chapel Hill (S. Johari, 2016) 46

Slika 12: Prometna modela križišča Dolgi most v programih Synchro 7 (levo) in Vistro 5.0 (desno) 49

Slika 13: Prometna modela križišča pri skladiščih v programih Synchro 7 (levo) in Vistro 5.0 (desno) 49

Slika 14: Prometna modela PP Tržaška pri UBK v programih Synchro 7 (levo) in Vistro 5.0 (desno) 50

Slika 15: Prometna modela križišča Tržaška - Tbilisijska v programih Synchro 7 (levo) in Vistro 5.0 (desno) ... 50

Slika 16: Krmilni program na križišču Dolgi most v programih Synchro 7 (zgoraj) in Vistro 5.0 (spodaj) 52

Slika 17: Krmilni program na križišču Tržaška - Tbilisijska v programih Synchro 7 (zgoraj) in Vistro 5.0 (spodaj) 52

Slika 18: Krmilni program na PP Tržaška pri UBK v programih Synchro 7 (zgoraj) in Vistro 5.0 (spodaj) 52

Slika 19: Časovno-prostorski diagram celotnega območja linijske koordinacije v programu Vistro 5.0 81

Slika 20: Krmilna programa pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (križišče Dolgi most) 82

Slika 21: Krmilna programa pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (križišče Dolgi most) 83

Slika 22: Krmilna programa pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (križišče Tržaška - Tbilisijska) 87

Slika 23: Krmilna programa pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (križišče Tržaška - Tbilisijska) 87

Slika 24: Krmilna programa pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (PP Tržaška pri UBK) 91

Slika 25: Krmilna programa pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (PP Tržaška pri UBK) 91

KRATICE

AC	avtocesta
CBD	Central Business District
DOF	digitalni ortofoto posnetek
EOV	ekvivalent osebnih vozil
FKU	faktor konične ure
HCM	Highway Capacity Manual
ICU	Intersection Capacity Utilization
PP	prehod za pešce
Ur. l. RS	Uradni list Republike Slovenije
ZCes-1	Zakon o cestah
ZMV	Zakon o motornih vozilih
ZPrCP	Zakon o pravilih cestnega prometa
ZVoz-1	Zakon o voznikih

1 UVOD

Pri uporabi cestno-prometne infrastrukture v urbanem mestnem okolju se vsakodnevno srečujemo z zastoji in zamudami v potovalnih časih, ki so posledica velikih prometnih obremenitev, načina vodenja prometnih tokov in drugih nepredvidenih dogodkov, kot so prometne nesreče, slabi vremenski pogoji in podobno. Pomemben dejavnik pri zagotavljanju ustreznih prometnih razmer predstavljajo območja križišč, kjer se zaradi potencialno konfliktnih točk med prometnimi tokovi in uporabe signalnih naprav, s katerimi prometne tokove prekinjamo, zastoji oziroma kolone pojavljajo najpogosteje. Načrtovanje križišč lahko temelji na zadostitvi različnih kriterijev, in sicer funkcionalnem kriteriju, prostorskem kriteriju, kriteriju prepustnosti, kriteriju čakalnih časov, prometno-varnostnem kriteriju in kriteriju družbeno-ekonomske upravičenosti (Maher, 2015). Način vodenja prometnih tokov, ustrezno število voznih pasov ter ostale geometrijske značilnosti obravnavanega križišča določimo na osnovi kriterija prepustnosti, ob upoštevanju mer učinkovitosti na koncu planske dobe. Kriterij prepustnosti je podobno kot kriterij čakalnih časov, ki predstavlja osnovo za določevanje ustreznih nivojev uslug, definiran na podlagi prometnih študij oziroma analiz, s katerimi zagotovimo, da obravnavana kriterija zadostita zakonsko določenim predpisom. Prometne analize lahko izvedemo z uporabo različnih programskih orodij, od tistih najpreprostejših skicirno-načrtnih, pa do zahtevnejših analitičnih in simulacijskih orodij.

V sklopu magistrske naloge smo z uporabo dveh uveljavljenih analitičnih programskih orodij, s katerima se kriterija prepustnosti in čakalnih časov določita na osnovi analitičnih metod HCM in ICU, izdelali prometne modele štirih zaporednih križišč vzdolž Tržaške ceste v Ljubljani, na podlagi katerih smo izvedli analizo kapacitivnosti obravnavanega območja in optimizacijo naprav za vodenje prometa.

1.1 Namen, cilji in potek dela

Osnovni namen magistrske naloge je izdelava prometnih modelov v izbranih analitičnih programskih orodjih ter izvedba primerjalnih analiz mer učinkovitosti in linijske koordinacije krmilnih programov semaforjev na obravnavanem območju oziroma križiščih.

V sklopu magistrske naloge smo obravnavali štiri zaporedna križišča vzdolž Tržaške ceste v Ljubljani, in sicer dve semaforizirani štirikraki križišči, semaforiziran prehod za pešce in nesemaforizirano križišče s stransko cesto. Prometne modele obravnavanih križišč smo na podlagi realnih geometrijskih podatkov in prometnih obremenitev izdelali v programih Trafficware Synchro 7 in PTV Visto 5.0, pri čemer smo prometne modele posameznih križišč povezali v cestno mrežo, znotraj katere smo v nadaljevanju pridobili mere učinkovitosti vseh obravnavanih križišč

Izdelava prometnih modelov v programih Synchro 7 in Vistro 5.0 je temeljila na treh glavnih skupinah vhodnih podatkov. Prva skupina podatkov se je nanašala na podatke o geometrijskih značilnostih cestišča, pri čemer smo upoštevali podatke o številu voznih pasov na posameznih priključkih, njihove širine in vzdolžne naklone. V sklopu druge skupine smo pridobili podatke o prometnih obremenitvah v času popoldanske prometne konice. Del podatkov o prometnih obremenitvah smo pridobili na podlagi predhodnega štetja prometa, drugi del pa na podlagi lastnega terenskega štetja, v sklopu katerega smo poleg podatkov o številu motornih vozil pridobili tudi podatke o številu pešcev in kolesarjev. V tretjem sklopu podatkov smo pridobili krmilne programe semaforjev v času popoldanske prometne konice ter podatke o prometni ureditvi nesemaforiziranih križišč (prometni znaki). Z uporabo pridobljenih vhodnih podatkov, smo na osnovi analitičnih metod HCM 2000 in ICU 2003, ki ju podpirata obe uporabljeni programski orodji, izdelali primerljive prometne modele. Prometni modeli so služili kot osnova za izvedbo analize kapacitivnosti obravnavanih križišč, s katero smo pridobili osnovne podatke za izdelavo primerjalne analize mer učinkovitosti (tj. povprečnih zamud, dolžin kolon in doseženih nivojev uslug). V zadnjem delu magistrske naloge smo na osnovi predhodno izdelanih prometnih modelov izvedli linijsko koordinacijo vzdolž treh zaporednih semaforiziranih križišč na Tržaški cesti, na podlagi katere smo ugotavljali, v kolikšni meri lahko optimiziramo obstoječe stanje na obravnavanem območju, brez spremembe geometrije križišč oziroma drugih gradbenih posegov.

Cilj magistrske naloge je, da na podlagi vseh izvedenih analiz in pridobljenih ugotovitev podamo objektivno oceno o primernosti uporabe izbranih analitičnih programskih orodji za izvedbo prometnih analiz v domačem okolju.

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Zakoni in pravilniki s področja projektiranja cest

Področja projektiranja, gradnje, upravljanja, vzdrževanja in uporabe cest ter ostale cestne infrastrukture so v Republiki Sloveniji urejena z zakonskimi akti, pravilniki, direktivami in tehničnimi specifikacijami. Trenutno veljavni zakonski akti na tem področju so:

- Zakon o cestah (ZCes-1; Ur. l. RS, št. 109/2010, 48/2012 in 36/2014), ki določa splošna pravila s področij gradnje, vzdrževanja in upravljanja s cestno infrastrukturo,
- Zakon o pravilih cestnega prometa (ZPrCP; Ur. l. RS, št. 82/2013), ki določa pravila obnašanja v cestnem prometu ter pooblastila in sankcije, ki jih izrekajo pristojni organi,
- Zakon o voznikih (ZVoz-1; Ur. l. RS, št. 85/2016), ki določa načrtovanje in izvajanje nalog za preventivo in varnost ter pravila in pogoje za udeležbo v cestnem prometu,
- Zakon o motornih vozilih (ZMV; Ur. l. RS, št. 106/2010, 23/2015 in 68/2016), ki določa pogoje za dajanje motornih vozil na trg ter pogoje za registracijo in udeležbo vozil v cestnem prometu.

Pri načrtovanju in projektiranju cest ter ostale cestne infrastrukture, je poleg zakonskih aktov treba upoštevati tudi ostale veljavne pravilnike in tehnične predpise.

Pravilnik o projektiranju cest (Ur. l. RS, št. 91/2005 in 26/2006) določa tehnične zahteve, ki jih je treba upoštevati pri pripravi projektne dokumentacije, namenjene za gradnjo, vzdrževanje in uporabo cestne infrastrukture. V 12. členu tega pravilnika (Prepustnost ceste) so določeni pogoji, ki jih je treba upoštevati pri izdelavi analize kapacitivnosti za posamezne ceste oziroma križišča. Pravilnik določa, da se ocena razmer na cesti določi analitično po metodi HCM, pri tem pa se kot kriterij uspešnosti servisiranja prometnih zahtev upošteva doseženi nivo uslug na koncu planskega obdobja. Zahtevani nivoji uslug, kot jih določa Pravilnik o projektiranju cest so podani v Preglednici 1:

Preglednica 1: Zahtevani nivoji uslug (Pravilnik o projektiranju cest, 2005)

Objekt	**Nova cesta ali rekonstrukcija obstoječe**	**Novo križišče ali rekonstrukcija obstoječega**
Funkcija ceste	Zahtevan nivo uslug	Zahtevan nivo uslug
Daljinska cesta	D	D
Povezovalna cesta	E	E
Zbirna cesta	E	E
Dostopna cesta	E	E

Pri projektiranju križišč in cestnih priključkov je treba upoštevati tudi Pravilnik o cestnih priključkih na javne ceste (Ur. l. RS, št. 86/2009), ki v 7. členu (Prometne obremenitve in prepustnost) določa pogoje za pridobitev prometnih obremenitev, zahtevane planske dobe ter pričakovane stopnje rasti, strukturo prometa glede na vrsto vozil, vrednosti faktorjev konične ure (*FKU*) ter druge dejavnike, ki vplivajo na prometne obremenitve ter posledično na analizo uspešnosti servisiranja prometnih zahtev.

2.2 Delitev orodij za analizo prometa

Za izdelavo prometnih analiz so na voljo različna programska orodja, ki se med seboj razlikujejo po načinu izvedbe analize, stopnji podrobnosti in zahtevnosti uporabe. Izbira primernega orodja je odvisna predvsem od vrste prometne analize, ki jo izvajamo (preprosta in hitra orodja za osnovne analize ter zahtevnejša orodja za izvedbo bolj kompleksnih in podrobnejših analiz). Delitev programskih orodij je narejena na podlagi metodologije ameriškega urada za promet, ki je izdana v dokumentu *Traffic Analysis Toolbox Volume II* (Jeannotte, K., Chandra, A., Alexiadis, V., Skabardonis, A, 2004).

1. **Skicirno-načrtna orodja** so najpreprostejša in najmanj zahtevna orodja za izvedbo prometnih analiz, hkrati pa tudi orodja z največjimi omejitvami pri analiziranju in predstavitvi rezultatov. Orodja so namenjena izdelavi prvih okvirnih analiz pri optimizaciji prometne mreže ter oceni stroškov, ki pri teh spremembah nastanejo. Skicirno-načrtna orodja so uporabna tudi pri vrednotenju in primerjavi različnih projektnih variant, brez natančne inženirske presoje.

2. **Modeli prometnega povpraševanja** so matematični modeli, ki napovedujejo prometne tokove oziroma potovanja na osnovi trenutnih ter za prihodnost predvidenih prometnih razmer. Pri napovedi prometnega povpraševanja upoštevajo različne parametre, kot so končni cilji (dnevnih) potovanj, potovalni časi, izbrana prevozna sredstva in poti. V tovrstne modele ne moremo vpeljati inteligentnih transportnih sistemov za vodenje prometa, posledično pa so mere učinkovitosti (predvidene hitrosti, zamude, čakalni časi) dokaj nenatančne.

3. **Analitično-deterministična orodja** so orodja, ki delujejo na osnovi analitične metode HCM in omogočajo izdelavo makroskopskih prometnih modelov ter izvedbo determinističnih in statično analitičnih postopkov za ugotavljanje uspešnosti servisiranja prometnih zahtev. Orodja omogočajo hitro pridobivanje rezultatov oziroma mer učinkovitosti posameznih križišč (dolžine kolon, zamude, nivoji uslug), hkrati pa so dokaj preprosta za uporabo, saj uporabnik potrebne vhodne podatke vnaša v smiselnem zaporedju. Največjo pomanjkljivost oziroma omejitev orodij, ki delujejo na osnovi metode HCM predstavlja predpostavka, da je delovanje posameznega križišča neodvisno od delovanja celotne prometne mreže.

4. **Orodja za optimizacijo signalnih naprav** so orodja, ki podobno kot analitična orodja delujejo na osnovi metode HCM, vendar pa so v prvi vrsti namenjena optimizaciji krmilnih programov semaforjev. Orodja omogočajo izvedbo analize kapacitivnosti posameznih križišč, optimizacijo dolžine semafornega cikla, posameznih signalnih faz in zamikov med križišči. Večina orodij omogoča analizo prometno neodvisnih ter tudi prometno odvisnih signalnih naprav.

5. **Makroskopski simulacijski modeli** obravnavajo prometni tok na osnovi determinističnih razmerij med gostoto, pretokom in hitrostjo. Za razliko od mikroskopskih simulacijskih modelov, ki obravnavajo vsako vozilo posebej, so vozila v makroskopskih simulacijskih modelih združena v enoten prometni tok na obravnavanem odseku. Z vidika uporabnika je največja prednost makroskopskih simulacijskih modelov njihova preprosta in hitra uporaba. V makroskopskih simulacijskih modelih je prometni tok obravnavan kot celota, zato pri tovrstnih modelih ne moremo določiti karakteristik posameznih voznikov, izbire prometnega sredstva, ter generacij in distribucij potovanj, kar posledično vpliva na točnost rezultatov.

6. **Mezoskopski simulacijski modeli** predstavljajo kombinacijo med makroskopskimi in mikroskopskimi simulacijskimi modeli. Prometni tok je, enako kot pri mikroskopskih simulacijskih modelih, določen s sledenjem vsakega posameznega vozila posebej, pri tem pa je upoštevano tudi obnašanje voznikov, izbira prometnega sredstva ter druge vplivne značilnost. Gibanje znotraj prometne mreže je opisano s povprečno hitrostjo na obravnavanih prometnih povezavah (enako kot pri makroskopskih simulacijskih modelih).

7. **Mikroskopski simulacijski modeli** so z vidika uporabnika najzahtevnejši, hkrati pa tudi najbolj natančni modeli za izvedbo prometnih analiz. Prometni tok je določen s sledenjem vsakega vozila v mreži posebej, pri tem pa so z uporabo matematičnih modelov zelo natančno določene značilnosti voznikov, generacije in distribucije potovanj, izbira prometnega sredstva in podobno. Gibanje po prometni mreži se za vsako vozilo zapiše v kratkih časovnih intervalih (0,1 s), znotraj katerih se določijo mere učinkovitosti (zamude, dolžine kolon, število ustavljanj, doseženi nivoji uslug).

V sklopu magistrske naloge smo obravnavali dve analitični programski orodji, ki delujeta na osnovi metode HCM in drugih podobnih analitičnih metod. Obe uporabljeni programski orodji poleg izvedbe analize kapacitivnosti omogočata tudi optimizacijo krmilnih naprav. V manjšem obsegu je bilo z namenom primerjave rezultatov obravnavano tudi eno mikroskopsko simulacijsko orodje (Sim Traffic). Metode, na katerih temeljijo analitični programi so natančno predstavljene v naslednjih poglavjih.

3 METODA HCM

Metoda HCM je analitična metoda, ki jo za izvedbo analize kapacitivnosti in izračun mer učinkovitosti uporablja večina analitičnih programskih orodij. Metoda je s strani ameriškega raziskovalnega odbora za promet (*ang. Transportation Research Board*) objavljena v dokumentu *Highway Capacity Manual*, pri njeni pripravi pa so sodelovali strokovnjaki iz različnih institucij po vsem svetu. Metoda HCM je bila prvič predstavljena leta 1950, od takrat pa je doživela vrsto izboljšav in ponovnih izdaj. V času obstoja je metoda HCM postala najpogosteje uporabljena analitična metoda za izvedbo analize kapacitivnosti in izračun mer učinkovitosti križišč. Leta 2005 je bilo s strokovno študijo z naslovom »Sprejemljivost metodologije za prometno dimenzioniranje semaforiziranih križišč po HCM 2000 v slovenskem urbanem okolju« (Sever in Dobovšek, 2005) dokazano, da je metoda HCM primerna za izvedbo analize kapacitivnosti (semaforiziranih) križišč na območju Republike Slovenije. Metoda HCM je sicer primerna za analiziranje vseh vrst križišč, v sklopu magistrske naloge pa smo analizirali tri semaforizirana in eno nesemaforizirano križišče.

3.1 Metodologija HCM za analizo semaforiziranih križišč

V urbanem okolju so semaforizirana križišča najpogosteje uporabljen način upravljanja oziroma prekinjanja prometnih tokov. Postavitev semaforjev v križišču je smiselna predvsem z vidika varnosti vseh udeležencev v prometu ter z vidika zmanjševanja zamud na posameznih krakih, na nivoju celotnega križišča ter pri vožnji vzdolž cestne arterije.

Osnovni načini krmiljenja prometnih tokov s pomočjo signalnih naprav so (Maher, 2007):

- prometno neodvisno krmiljenje, kjer je dolžina semafornega cikla in posameznih signalnih faz predhodno določena s krmilnim programom,
- delno prometno odvisno krmiljenje, kjer zeleni čas semaforjev na glavni cesti traja toliko časa, dokler detektor na stranski cesti ne zazna čakajočih vozil,
- prometno odvisno krmiljenje, kjer so vse signalne faze določene z detektorji, pri tem pa sta definirana le najdaljši in najkrajši čas trajanja posamezne faze.

3.1.1 Priprava prometnega modela

Podatke, ki jih je pri izračunu kapacitete po metodi HCM treba vnesti v prometni model lahko razdelimo v 3 glavne skupine, in sicer so to podatki o značilnostih cestišča, prometnih karakteristikah in značilnostih semaforjev. Natančnejši pregled vhodnih podatkov je prikazan v Preglednici 2:

Preglednica 2: Vhodni podatki pri uporabi metode HCM (HCM 2000, 16-3)

Kategorija podatkov	Parameter
Značilnosti cestišča	- področje oziroma lokacija križišča, *CBD* - število voznih pasov za vsako smer vožnje, *N* - povprečna širina voznega pasu, *W* [m] - vzdolžni naklon priključka, *G* [%] - ločeni pasovi za levo in desno zavijanje (žepi) - dolžina ločenih pasov za levo in desno zavijanje, *L* [m] - parkirna mesta na območju križišča
Prometne karakteristike	- količina prometnih tokov po posameznih priključkih, *V* [vozil/h] - osnovni nasičeni prometni tok, S_0 (običajno 1900 vozil/h/pas) - faktor konične ure, *FKU* - delež tovornih vozil, *HV* [%] - prometni tok pešcev na posameznem priključku, V_{ped} [p/h] - število vključevanj avtobusov iz avtobusnih postajališč, N_b [bus/h] - število parkiranj na območju križišča, N_m [parkiranj/h] - način prihoda vozil, *AT* - delež vozil, ki prispejo na zeleno luč, *P* - dovoljena hitrost na posameznih priključkih, S_a [km/h]
Značilnosti semaforjev	- dolžina semafornega cikla, *C* [s] - zeleni čas, *G* [s] - vmesni čas ("rumena" + "vse rdeče"), *Y* [s] - prometno odvisno in/ali neodvisno krmiljenje - gumb za pešce - minimalni zeleni čas za pešce, G_p [s] - krmilni program semaforjev - čas analiziranja, *T* [s]

Pomembno prometno karakteristiko na semaforiziranih križiščih predstavlja tudi stopnja progresije, ki določa način prihoda vozil v križišče. Načini prihoda vozil v križišče, ki jih določa metoda HCM, so podani v Preglednici 3:

Preglednica 3: Stopnja progresije za prihod vozil v križišče (HCM 2000, 16-4)

Način prihoda	Opis prometa	Čas prihoda	Progresija
1	gosta kolona z več kot 80 % prometa	začetek rdeče faze	zelo slaba
2	zmerno gosta kolona s 40 do 80 % prometa	sredina rdeče faze	neugodna
3	v glavni koloni ni več kot 40 % prometa	kadarkoli	zadostna
4	zmerno gosta kolona s 40 do 80 % prometa	med zeleno fazo	ugodna
5	gosta kolona z več kot 80 % prometa	začetek zelene faze	zelo ugodna
6	zelo gosta koordinirana kolona v več zaporednih križiščih	začetek zelene faze	idealna

Ključni faktor pri izvedbi analize kapacitivnosti semaforiziranih križišč je izbira primernega krmilnega programa semaforjev. Za optimalno pripravo krmilnega programa moramo določiti naslednje parametre (Maher, 2007):

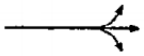
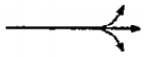
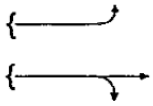
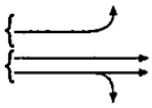
- cikel (C) - čas, ki preteče od posamezne kombinacije signalnih znakov do ponovnega začetka iste kombinacije,
- signalna faza - predstavlja čas trajanja prostega časa za posamezno skupino voznih pasov in se določi kot vsota zelenega in vmesnega časa;
- interval - predstavlja čas trajanja posameznih svetlobnih znakov,
- vmesni čas (Y) - predstavlja intervala »rumeno« in »vse rdeče«, ki se pojavita med fazami in omogočata varno izpraznitev križišča ter preprečujeta navzkrižno vožnjo,
- zeleni čas (G_i) - čas, ko je za posamezno fazo na voljo zelena luč,
- izgubljeni čas - čas, ko se križišče efektivno ne uporablja za nobeno skupino voznih pasov,
- efektivni zeleni čas (g_i) - predstavlja čas, ko lahko prometni tok posamezne skupine voznih pasov prečka križišče (določi se kot zeleni čas plus trajanje rumene luč minus izgubljeni čas),
- delež zelene luči - razmerje med efektivnim zelenim časom in dolžino semafornega cikla,
- efektivno rdeči čas (r_i) - predstavlja čas, ko posamezna skupina voznih pasov ne sme prečkati križišča (določi se kot dolžina cikla minus efektivni zeleni čas za posamezno fazo),
- konični čas - običajno 15 minutno obdobje največjih prometnih tokov,
- faktor konične ure (FKU) - razmerje med urnim pretokom in pretokom v koničnem času.

Značilnosti cestišča, prometne karakteristike in značilnosti semaforjev predstavljajo vhodne podatke za analizo kapacitivnosti po metodi HCM (1. faza analize). V nadaljnjih fazah določimo skupine voznih pasov ter količine dejanskih in nasičenih prometnih tokov za posamezne skupine, pri čemer uporabimo različne vplivne faktorje. Na osnovi teh podatkov se analitično izračunata kapaciteta posameznih skupin voznih pasov ter razmerje med obremenitvami križišča in kapaciteto, ki je temelj za določitev časovnih zamud, dolžin kolon in doseženih nivojev uslug za posamezne skupine voznih pasov ter za celotno križišče. Shematski prikaz postopkov za izdelavo analize kapacitivnosti semaforiziranega križišča po metodi HCM je podan v Prilogi A.1.

3.1.2 Združevanje prometnih pasov

Pri izvedbi analize kapacitivnosti križišč po metodi HCM se vozni pasovi na posameznih krakih združujejo v skupine voznih pasov. Za skupine voznih pasov se v nadaljevanju analize določijo mere učinkovitosti (dolžine kolon, zamude in nivoji uslug). V Preglednici 4 so prikazani tipični primeri združevanja voznih pasov v skupine voznih pasov:

Preglednica 4: Združevanje voznih pasov v skupine (HCM 2000, 16-7)

Št. voznih pasov	Smeri na posameznih voznih pasovih	Št. možnih skupin voznih pasov
1	Skupni vozni pas za L + N + D 	1 skupina 
2	Ločen vozni pas za L Skupni vozni pas za N + D	2 skupini 
3	Ločen vozni pas za L Vozni pas za N Skupni vozni pas za N + D	2 skupini  ali 3 skupine

3.1.3 Določevanje dejanskega prometnega toka

Obdobje analiziranja pri izvedbi analize kapacitivnosti po metodi HCM je običajno dolgo 15 minut. Prometne obremenitve za posamezne vozne pasove oziroma skupine voznih pasov, ki jih pridobimo s štetjem prometa, pa se običajno nanašajo na obdobje konične ure, zato je treba v tem primeru, s pomočjo faktorjev konične ure (*FKU*), izvesti prilagoditve, s katerimi se urni prometni tok preračuna na zahtevano obdobje analiziranja (15 minutni konični prometni tok). Prilagoditve se izvedejo na osnovi enačbe (1):

$$V_p = \frac{V}{FKU}, \tag{1}$$

kjer je:

V_p 15 minutni konični prometni tok (vozil/h),

V urni prometni tok (vozil/h),

FKU faktor konične ure.

Faktor konične ure je definiran kot razmerje med urnim in koničnim prometnim tokom. Pri analizi križišč je faktor konične ure določen na podlagi enačbe (2):

$$FKU = \frac{V}{4\,V_{15}}, \tag{2}$$

kjer je:

FKU faktor konične ure,

V konični urni prometni tok (vozil/h),

V_{15} maksimalna 15 minutna obremenitev znotraj urnega prometnega toka (vozil/15 min).

V primeru, da je obdobje analiziranja podaljšano na 1 uro, se prilagoditve s faktorji konične ure ne izvedejo. Obdobje analiziranja podaljšamo v primeru, ko količina dejanskega prometnega toka za posamezno skupino voznih pasov močno preseže kapaciteto (visoke stopnje nasičenosti).

3.1.4 Določevanje nasičenega prometnega toka

Nasičen prometni tok je osnovni parameter za izračun kapacitete semaforiziranih križišč in je definiran kot maksimalni urni prometni tok, ki lahko prečka križišče v določeni smeri, ob predpostavki, da je na tej smeri razmerje med efektivnim zelenim časom in celotno dolžino semafornega cikla g_i/C enako 1 (100 % zeleni čas) (Hamad in Abuhamda, 2015).

Nasičen prometni tok se določi na podlagi enačbe (3), osnovo za izračun pa predstavlja najmanjši časovni razmak med vozili v nasičenem toku:

$$s = \frac{3600}{h}, \tag{3}$$

kjer je:

- s nasičen prometni tok (vozil/h),
- h časovni razmak med vozili pri nasičenem prometnem toku (s).

V programskih orodjih, ki delujejo na osnovi metode HCM se nasičen prometni tok izračuna na podlagi osnovnega nasičenega toka in številnih vplivnih faktorjev s katerimi zajamemo vplive geometrije križišča, prometnih karakteristik in signalnih naprav. Izračun temelji na osnovi enačbe (4):

$$s = s_0 N f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT} f_{Lpb} f_{Rpb}, \tag{4}$$

kjer je:

- s nasičen prometni tok za celotno skupino voznih pasov (vozil/h),
- s_0 osnovni nasičen prometni tok za posamezni vozni pas - običajno 1900 vozil/h/pas,
- N število voznih pasov v posamezni skupini voznih pasov,
- f_w vplivni faktor širine voznega pasu,
- f_{HV} vplivni faktor za tovorna vozila,
- f_g vplivni faktor vzdolžnega naklona priključka,
- f_p vplivni faktor za parkiranje na območju križišča,
- f_{bb} vplivni faktor za ustavljanje avtobusov na območju križišča,
- f_a vplivni faktor tipa območja,
- f_{LU} vplivni faktor izkoriščenosti voznih pasov,
- f_{LT} vplivni faktor za levo zavijanje vozil v skupini voznih pasov,

f_{RT} vplivni faktor za desno zavijanje vozil v skupini voznih pasov,

f_{Lp} vplivni faktor pešcev za levo zavijanje,

f_{Rpb} vplivni faktor pešcev in kolesarjev za desno zavijanje.

Vrednosti in enačbe za izračun posameznih vplivnih faktorjev so podane v Prilogi A.2.

3.1.5 Izračun kapacitete

Kapaciteta posamezne skupine voznih pasov na semaforiziranem križišču je določena kot maksimalni urni pretok, ki lahko prečka križišče v določeni smeri, ob upoštevanju prevladujočih prometnih, cestnih in signalnih pogojev, pri čemer se upošteva dejanski efektivni zeleni čas g_i (HCM 2000, 2-2).

Koncept nasičenih prometnih tokov predstavlja temelj za izračun kapacitete semaforiziranega križišča, pri čemer je delež nasičenosti *v/s* določen kot razmerje med dejanskim prometnim tokom *v* in nasičenim prometnim tokom *s* za posamezno skupino voznih pasov. Izračun kapacitete za posamezno skupino voznih pasov na semaforiziranem križišču poteka na podlagi enačbe (5):

$$c_i = s_i \frac{g_i}{C}, \tag{5}$$

kjer je:

c_i kapaciteta za posamezno skupino voznih pasov (vozil/h),

s_i nasičen prometni tok posamezne skupine voznih pasov (vozil/h),

g_i efektivni čas zelene luči posamezne skupine voznih pasov (s),

C dolžina semafornega cikla (s).

3.1.6 Razmerje *v/c*

Razmerje med dejanskim prometnim tokom v_i in kapaciteto c_i predstavlja stopnjo nasičenosti na nivoju posameznih skupin voznih pasov. S stopnjo nasičenosti opišemo izkoriščenost kapacitete posameznih skupin voznih pasov (Mathew, 2014).

Normalne vrednosti razmerja *v/c* se gibljejo med 0 (prometni tok je enak 0) in 1 (prometni tok je enak kapaciteti). V primeru, da je razmerje *v/c* večje od 1, je kapaciteta posamezne skupine voznih pasov presežena. Stopnjo nasičenosti posamezne skupine voznih pasov izračunamo z enačbo (6):

$$X_i = \left(\frac{v}{c}\right)_i = \frac{v_i}{s_i\left(\frac{g_i}{C}\right)} = \frac{v_i C}{s_i g_i}, \tag{6}$$

kjer je:

X_i stopnja nasičenosti posamezne skupine voznih pasov,

v_i dejanski prometni tok posamezne skupine voznih pasov (vozil/h),

c_i kapaciteta za posamezno skupino voznih pasov (vozil/h),

s_i nasičen prometni tok posamezne skupine voznih pasov (vozil/h),

g_i efektivni čas zelene luči posamezne skupine voznih pasov (s),

C dolžina semafornega cikla (s).

3.1.7 Kritično razmerje *v/c*

Kritično razmerje *v/c* predstavlja razmerje med dejanskim prometnim tokom in kapaciteto za celotno obravnavano križišče in je označeno z X_c. Pri izračunu kritičnega razmerja *v/c* upoštevamo samo tiste skupine voznih pasov, ki imajo pri določeni signalni fazi največje razmerje med dejanskim in nasičenim prometnim tokom (razmerje *v/s*). Največjo težavo pri določevanju kritičnega razmerja predstavljajo situacije, ko prometni tok posamezne skupine voznih pasov prečka križišče v različnih signalnih fazah. V tem primeru je treba upoštevati naslednje predpostavke (Maher, 2007):

- ena izmed kritičnih skupin voznih pasov mora prečkati obravnavano križišče v času celotnega semafornega cikla, pri tem pa se izgubljeni čas izvzame,
- križišče lahko naenkrat prečka samo ena kritična skupina voznih pasov,
- pot z največjim razmerjem v/s je določena kot kritična pot.

Kritično razmerje *v/c* se določi na podlagi enačbe (7):

$$X_c = \sum \left(\frac{v}{s}\right)_{ci} \left(\frac{C}{C-L}\right), \tag{7}$$

kjer je:

Xc kritično razmerje *v/c* za celotno obravnavano križišče,

$\sum(v/s)_{ci}$ vsota razmerij med dejanskim in nasičenim prometnim tokom za vse kritične skupine voznih pasov,

C dolžina semafornega cikla (s),

L izgubljeni čas cikla, ki je definiran kot izgubljeni čas kritične skupine voznih pasov (s).

Količine dejanskega in nasičenega prometnega toka za posamezno skupino voznih pasov, izračunane kapacitete in določena razmerje *v/c* predstavljajo osnovo za določitev mer učinkovitosti posameznih skupin voznih pasov ter celotnega križišča.

3.1.8 Določevanje zamud

Programska orodja, ki delujejo na osnovi metode HCM omogočajo izračun zamud za posamezno skupino voznih pasov, posamezen priključek in celotno križišče. Zamuda predstavlja povprečni izgubljeni čas potovanja vseh vozil, ki v času izvajanja analize prispejo na obravnavano območje, pri določevanju pa se upošteva stanje popolne zaustavitve vozila v koloni ter stanje vožnje v koloni pri nizkih hitrostih. Povprečna zamuda za posamezno vozilo se določi na podlagi enačbe (8):

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3 \ , \tag{8}$$

kjer je:

- d povprečna zamuda na vozilo zaradi vodenja prometa (s/vozilo),
- d_1 konstantna zamuda pri konstantnem prihodu vozil (s/vozilo),
- d_2 zamuda zaradi neenakomernih prihodov vozil in prenasičenosti čakalnih vrst (s/vozilo),
- d_3 začetna zamuda vozil v koloni (s/vozilo),
- PF izravnalni faktor progresije pri konstantni zamudi, ki je odvisen od tega koliko vozil v določenem delu semafornega cikla prispe na priključek.

Izračuni posameznih sestavnih delov enačbe (8) so prikazani v enačbah (9), (10) in (11):

$$d_1 = \frac{0{,}5C\left(1-\frac{g_i}{C}\right)}{1-\left(min(1,X)\frac{g_i}{C}\right)} \ , \tag{9}$$

$$d_2 = 900T\left((X_i - 1) + \sqrt{(X_i - 1)^2 + \frac{8k_iX_i}{s_i\frac{g_i}{C}T}}\right), \tag{10}$$

$$d_3 = \frac{1800Q_{b_i}(1+u)t}{\left(s_i\frac{g_i}{C}\right)T} \ , \tag{11}$$

kjer je:

- C dolžina semafornega cikla (s),
- X_i stopnja nasičenosti posamezne skupine voznih pasov ($X_i = v/c$),
- g_i efektivni čas zelene luči posamezne skupine voznih pasov (s),
- g_i/C delež efektivne zelene luči posamezne skupine voznih pasov,
- T trajanje analize (h),
- t neefektivni čas trajanja analize T (h) (privzeto $t = 0$),
- k_i faktor, ki zajame način krmiljenja prometnega toka,
- Q_{bi} začetna kolona vozil na priključku ob začetku analitičnega obdobja T (voz),
- u parameter zamude (največkrat $u = 1{,}0$).

Izravnalni faktor progresije določa način prihoda vozil na posamezni priključek. V primeru, da večina vozil prispe na priključek v času zelene luči je progresija dobra, slaba progresija pa nastopi, ko večina vozil na priključek pripelje v času rdeče luči. Faktor progresije se določi na podlagi enačbe (12):

$$PF = \frac{(1-P)f_{PA}}{1-\left(\frac{g_i}{C}\right)}\,, \tag{12}$$

kjer je:

- PF faktor progresije pri konstantni zamudi,
- P delež vozil, ki na priključek prispejo ob zeleni luči,
- g_i/C delež efektivne zelene luči za posamezno skupino voznih pasov,
- f_{PA} nadomestni faktor za kolono, ki na priključek prispe ob zeleni luči.

Tabela z izračunanimi faktorji progresije je podana v Prilogi A.3.

3.1.9 Dolžina kolon

Število vozil v koloni je odvisno od progresije oziroma načina prihoda vozil v križišče ter od števila vozil, ki v času zelene luči ne uspejo prevoziti križišča. Za določitev dolžine kolone je treba izračunati najdaljšo možno dolžino kolone v času povprečnega semafornega cikla, ki predstavlja osnovo za določitev percentilnih vrednosti dolžine kolone (npr. 50. in 95. percentila dolžine kolone). Povprečna dolžina kolone se izračuna na osnovi enačbe (13):

$$Q = Q_1 + Q_2\,, \tag{13}$$

kjer je:

- Q najdaljša možna dolžina kolone v času povprečnega semafornega cikla. Dolžina kolone se meri neposredno od črte ustavljanja za posamezno skupino voznih pasov (vozil),
- Q_1 število vozil, ki v križišče prispejo v času rdeče luči oziroma v času zelene luči, dokler se kolona ne porazgubi (vozil),
- Q_2 prirastek k koloni kot posledica naključnih prihodov vozil in premajhnega deleža efektivne zelene luči za posamezno skupino voznih pasov (vozil).

Na osnovi najdaljše možne kolone v času povprečnega semafornega cikla se na podlagi enačbe (14) izračunajo percentilne vrednosti dolžine kolone:

$$Q_{\%} = Q f_{B\%}\,, \tag{14}$$

kjer je:

$Q_{\%}$ percentilna vrednost dolžine kolone (vozil),

Q najdaljša možna dolžina kolone v času povprečnega semafornega cikla (vozil),

$f_{B\%}$ percentilni faktor dolžine kolone.

V sklopu analize uporabljenih analitičnih programskih orodij smo ugotovili, da matematične enačbe, na podlagi katerih programa Synchro 7 in Vistro 5.0 izračunata dolžine kolon, niso enake. Programsko orodje Vistro 5.0 za izračun dolžine kolon uporablja enačbe, ki so določene v analitični metodi HCM 2000, programsko orodje Synchro 7 pa dolžine kolon izračuna na podlagi matematičnih enačb, ki so predstavljene v priročniku programa Synchro 7. Matematične enačbe, na podlagi katerih obe uporabljeni programski orodji določata dolžine kolon, so predstavljene v nadaljevanju.

3.1.9.1 Matematične enačbe za izračun dolžine kolon v programu Vistro 5.0

Dolžine kolon v programu Vistro 5.0 se izračunajo na podlagi enačbe (13), ki je podrobneje razložena na prejšnji strani. Posamezni sestavni deli enačbe za izračun dolžine kolone v času povprečnega semafornega cikla Q pa se določijo na podlagi enačb (15), (16) in (17):

$$Q_1 = PF_2 \frac{\frac{vC}{3600}\left(1-\frac{g}{C}\right)}{1-\left(min(1,X)\frac{g}{C}\right)}, \tag{15}$$

$$PF_2 = \frac{\left(1-R_p\frac{g}{C}\right)\left(1-\frac{v}{s}\right)}{\left(1-\frac{g}{C}\right)\left(1-R_p\left(\frac{v}{s}\right)\right)}, \tag{16}$$

$$Q_2 = 0{,}25cT\left((X-1)+\frac{Q_b}{cT}+\sqrt{\left(X-1+\frac{Q_b}{cT}\right)^2+\frac{8k_bX}{cT}+\frac{16k_bQ_b}{(cT^2)}}\right), \tag{17}$$

kjer je;

Q_1 dolžina kolone pri enakomernem prihodu vozil v križišče (m),

Q_2 inkrementalni del dolžine kolone, povezan z naključnim prihodom vozil v križišče (m),

PF_2 drugi faktor progresije,

v dejanski prometni tok za posamezno skupino voznih pasov (voz/h),

s nasičen prometni tok za posamezno skupino voznih pasov (voz/h),

C dolžina semafornega cikla (s),

g/C delež efektivne zelene luči posamezne skupine voznih pasov,

X stopnja nasičenosti posamezne skupine voznih pasov ($X_i = v/c$),

R_p vplivni delež, določen na osnovi tabele načinov prihoda v križišče,

c kapaciteta posamezne skupine voznih pasov (voz/h),

T trajanje analize (h),

Q_b začetna kolona vozil na priključku ob začetku analitičnega obdobja T (voz),

k_b vplivni faktor načina krmiljenja prometnega toka.

Vplivni faktor načina krmiljenja prometnega toka k_b se izračuna na podlagi enačb (18) in (19):

$$k_b = 0{,}12l\left(\frac{sg}{3600}\right)^{0{,}7}, \quad \text{(prometno neodvisno krmiljenje)} \tag{18}$$

$$k_b = 0{,}10l\left(\frac{sg}{3600}\right)^{0{,}6}, \quad \text{(prometno odvisno krmiljenje)} \tag{19}$$

kjer je:

s nasičen prometni tok za posamezno skupino voznih pasov (voz/h),

g efektivno trajanje zelene luči (s),

l vplivni faktor filtriranja (največkrat l = 1,0).

3.1.9.2 Matematične enačbe za izračun dolžine kolon v programu Synchro 7

Dolžine kolon v programu Synchro 7 so izračunane na podlagi enačbe (20):

$$Q = \frac{v}{3600}(R-6)\left(1+\frac{1}{\frac{s}{v}-1}\right)\frac{L}{nf_{LU}}, \tag{20}$$

kjer je:

Q dolžina kolone (ft.),

v dejanski prometni tok za posamezno skupino voznih pasov (voz/h),

R čas trajanja rdeče luči na semaforju (s),

s nasičen prometni tok za posamezno skupino voznih pasov (voz/h),

L dolžina vozil z upoštevano razdaljo med vozili (ft.)

n število voznih pasov,

f_{LU} vplivni faktor izkoriščenosti voznih pasov.

V primeru, da je razmerje v/c za posamezno skupino voznih pasov večje od 1, se dolžine kolon v programu Synchro 7 izračunajo na podlagi enačbe (21):

$$Q' = \big(v(C-6) + (v - sg/C)\big)C/3600\,, \tag{21}$$

kjer je:

- Q' dolžina kolone v primeru nasičenih skupin voznih pasov (ft.),
- v dejanski prometni tok za posamezno skupino voznih pasov (voz/h),
- C dolžina semafornega cikla (s),
- s nasičen prometni tok za posamezno skupino voznih pasov (voz/h),
- g/C delež efektivne zelene luči posamezne skupine voznih pasov.

Pretvorba dolžine kolon v metrične enote poteka na osnovi enačbe (22):

$$Q_{(m)} = 3{,}2808 * Q_{(ft.)}\,, \tag{22}$$

V primeru določevanja 95. percentile dolžine kolone, se v enačbah (20) oz. (21) namesto dejanskega prometnega toka v uporabi modificiran dejanski prometni tok v_{95}, ki se določi na podlagi enačbe (23):

$$v_{95} = vFKU_x\left(1 + 1{,}64\frac{\sqrt{vc}}{vc}\right), \tag{23}$$

kjer je:

- v_{95} modificiran dejanski prometni tok posamezne skupine voznih pasov (voz/h),
- v dejanski prometni tok posamezne skupine vozni pasov (voz/h),
- FKU_x minimalni uporabljeni faktor konične ure,
- vc prometni tok posamezne skupine voznih pasov v času celotnega cikla (voz/cikel).

3.1.10 Določevanje nivojev uslug semaforiziranih križišč po metodi HCM

Nivo uslug celotnega križišča oziroma posameznega priključka se določi na osnovi zamud, ki nastanejo pri vodenju prometnih tokov skozi semaforizirana križišča. Na zamude v križišču vplivajo različni dejavniki, kot so način prihoda vozil v križišče (progresija), dolžina zelene signalne faze, dolžina semafornega cikla, dolžina kolone in razmerje med dejanskimi obremenitvami in kapaciteto posameznih priključkov (razmerje *v/c*). Nivoji uslug, kot jih določa metoda HCM, so podani v Preglednici 5:

Preglednica 5: Nivoji uslug za semaforizirana križišča po metodi HCM (HCM 2000, 16-2)

Nivo uslug	Povprečna zamude na vozilo [s/vozilo]
A	< 10
B	10 - 20
C	20 - 35
D	35 - 55
E	55 - 80
F	> 80

Nivo uslug A predstavlja optimalno stanje z odlično progresijo in zamudami manjšimi od 10 s/vozilo. Majhne zamude so posledica dejstva, da se večina vozil pred križiščem ne ustavi.

Nivo uslug B predstavlja stanje z dobro progresijo in kratkimi dolžinami semafornega cikla. Pred križiščem se ustavi večje število vozil kot pri nivoju uslug A, zamude pa trajajo med 10 in 20 s/vozilo.

Nivo uslug C predstavlja stanje slabše progresije in daljših semafornih ciklov. Tudi v tem primeru veliko vozil prevozi križišče brez zamud, na posameznih priključkih oziroma smereh vožnje pa se lahko pojavijo zamude med 20 in 35 s/vozilo.

Nivo uslug D predstavlja stanje slabe progresije, dolgih semafornih ciklov in visokih razmerij *v/c*. Število vozil, ki brez zamude prevozijo križišče, drastično upade, pred križiščem pa se začnejo pojavljati kolone. Povprečne zamude v križišču so med 35 in 55 s/vozilo.

Nivo uslug E predstavlja podobno stanje kot nivo uslug D, vendar pa se kolone pojavljajo pogosteje. Posledica pogostejših kolon so daljše zamude, ki v tem primeru znašajo med 55 in 80 s/vozilo. Pravilnik o projektiranju cest določa, da je pri projektiranju novega oziroma rekonstrukciji obstoječega križišča nivo uslug E minimalno še sprejemljiv nivo.

Nivo uslug F predstavlja neustrezno stanje v križišču. Tako stanje se pojavi v primeru, ko prometne obremenitve za posamezne smeri vožnje presežejo kapaciteto (razmerje *v/c* je večje od 1, pride do prenasičenosti). Presežena kapaciteta pa ni edini razlog za nivo uslug F, saj se le ta pojavi tudi v primeru izredno slabe progresije in dolgih semafornih ciklov, kar povzroči zamude daljše od 80 s/vozilo (v tem primeru je lahko razmerje *v/c* manjše od 1).

3.2 Metodologija HCM za analizo nesemaforiziranih križišč

Analitično-deterministična programska orodja omogočajo izvedbo analize kapacitivnosti različnih vrst nesemaforiziranih križišč (križišče enakovrednih cest, krožno križišče …), v sklopu magistrske naloge pa je bilo obravnavano samo nesemaforizirano križišče s stransko cesto. Analiza kapacitivnosti križišča s stransko cesto temelji na določevanju odnosov med vozniki na prednostni in stranski cesti, pri tem pa se upoštevata dva ključna dejavnika (Maher, 2007):

- distribucija možnih razmakov v prometnem toku prednostne ceste, ki je odvisna od količine in porazdelitve prometa, števila voznih pasov ter vrste kolone,
- velikost razmaka, ki voznikom na stranski cesti omogoča vključevanje v glavni prometni tok in/ali varno prečkanje križišča.

3.2.1 Analiza kapacitivnosti križišča s stransko cesto

Vhodni podatki za analizo križišča s stransko cesto so podobni tistim, ki jih uporabljamo za analizo semaforiziranega križišča, pri tem pa so izvzeti podatki o značilnostih semaforjev. V prometni model je treba vnesti podatke o značilnostih cestišča (geometrija križišča, širine in nakloni voznih pasov), podatke o prometnih karakteristikah (prometne obremenitve za posamezne smeri, delež tovornih vozil, podatke o številu pešcev) ter podatek o bližini semaforiziranih križišč.

V nadaljevanju analize križišča s stransko cesto je treba določiti prioritete prečkanja križišča in navzkrižni promet. Prioritete prečkanja lahko na štirikrakem križišču s prednostno cesto razdelimo v štiri range, in sicer (HCM 2000, 17-4):

- rang 1: vožnja vzdolž prednostne cesti in vožnja v desno iz prednostne ceste na stransko cesto,
- rang 2: vožnja v levo iz prednostne ceste na stransko cesto in vožnja v desno iz stranske ceste na prednostno cesto,
- rang 3: vožnja naravnost vzdolž stranske ceste (iz stranske na stransko cesto),
- rang 4: vožnja v levo iz stranske ceste na prednostno cesto.

Navzkrižni promet na nesemaforiziranih križiščih se izračuna na osnovi enačb, ki so podane v priročniku *Highway Capacity Manual*.(HCM 2000, 17-6).

Ključni del analize kapacitivnosti križišča s stransko cesto predstavlja določitev kritičnega razmaka in časa sledenja. Kritični razmak t_c se meri med sprednjima deloma dveh zaporednih vozil na prednostni cesti in je definiran kot minimalni časovni razmak, ki omogoča varno vključevanje vozil iz stranske na prednostno cesto. Časovni razmak med vozili, ki se iz stranske ceste vključujejo na prednostno, imenujemo čas sledenja t_f.

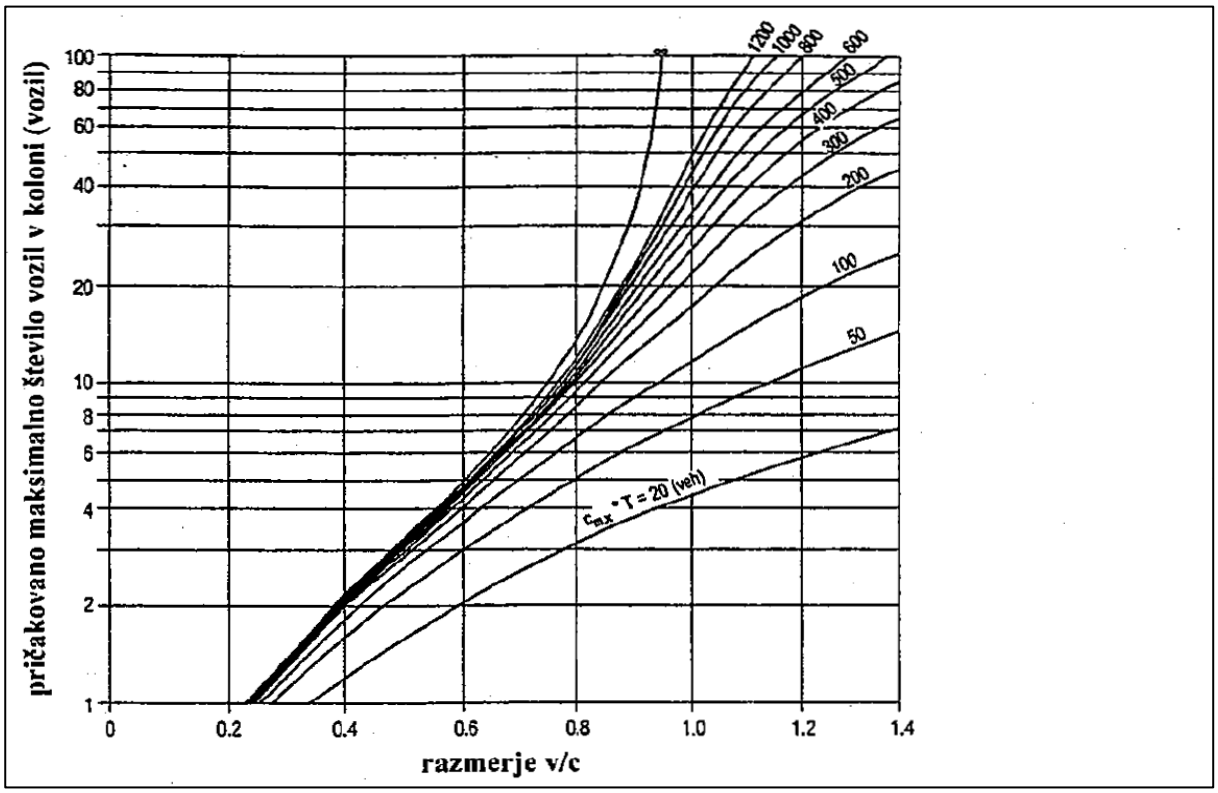
Prioritete prečkanja križišča, navzkrižni promet, kritični razmak in čas sledenja predstavljajo osnovo za izračun kapacitete. V prvi fazi se na podlagi enačb izračuna potencialna kapaciteta, z upoštevanjem različnih vplivnih dejavnikov pa določimo dejansko kapaciteto posameznih skupin voznih pasov ter celotnega križišča. Vplivni dejavniki, s katerimi določimo dejansko kapaciteto, so (Maher, 2007):

- vpliv oviranja prometnega toka zaradi vozil in pešcev,
- souporaba enega voznega pasu za različne smeri vožnje,
- bližina semaforiziranega križišča,
- dvofazni razmak,
- razširitev priključka na stranski cesti.

Shematski prikaz postopkov za izdelavo analize kapacitivnosti križišča s stransko cesto po metodi HCM je podan v Prilogi B.1. Izračunana kapaciteta je osnova za določitev mer učinkovitosti obravnavanega križišča (zamude, dolžina kolon in nivoji uslug), ki so natančneje razložene v nadaljevanju poglavja.

3.2.2 Ocena dolžine kolon

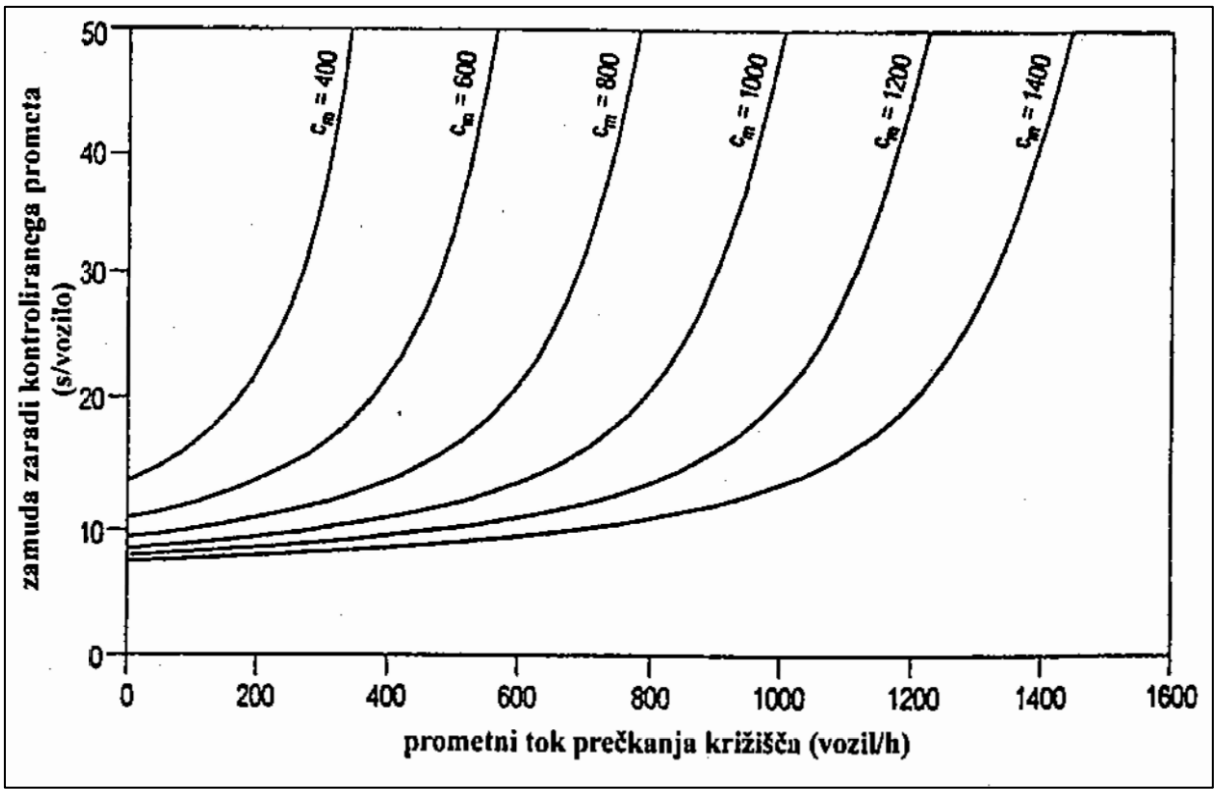
Dolžino kolone, ki je odvisna od kapacitete in pričakovanega prometa v križišču, lahko izračunamo analitično oziroma jo ocenimo na osnovi grafa. Slika 1 prikazuje graf, ki predstavlja podlago za oceno 95. percentile dolžine kolone za posamezno skupino voznih pasov, ob upoštevanju 15-minutnega koničnega prometnega toka.



Slika 1: Določitev 95. percentile dolžine kolone v križišču s stransko cesto (HCM 2000, 17-23)

3.2.3 Zamude zaradi urejanja prometa

Zamude zaradi urejanja prometa so posledica vodenja prometnih tokov skozi križišče. Pri določevanju zamud se upošteva čas, ki ga vozila izgubijo pri počasni vožnji ter popolni zaustavitvi v koloni. Zamude zaradi urejanja prometna v križišču s stransko cesto se lahko ocenijo na podlagi grafa, ki je prikazan na Sliki 2, pri tem pa potrebujemo podatke o količini dejanskega prometnega toka in kapaciteti za posamezno skupino voznih pasov.



Slika 2: Zamude v križišču s stransko cesto (HCM 2000, 17-24)

3.2.4 Določevanje nivojev uslug nesemaforiziranih križišč po metodi HCM

Nivo uslug križišča s stransko cesto se določi na osnovi zamud, ki nastanejo pri vodenju prometnih tokov skozi križišče, vendar pa se vrednosti za določevanje razlikujejo od tistih na semaforiziranih križiščih (na nesemaforiziranih križiščih se pojavijo manjše zamude, zato je lestvica prilagojena). Nivoji uslug, kot jih določa metoda HCM, so podani v Preglednici 6:

Preglednica 6: Nivoji uslug za križišče s stransko cesto po metodi HCM (HCM 2000, 17-2)

Nivo uslug	Povprečna zamuda na vozilo [s/vozilo]
A	< 10
B	10 - 15
C	15 - 25
D	25 - 35
E	35 - 50
F	> 50

Nivo uslug F se pojavi, ko so časovni razmaki med vozili na prednostni cesti tako majhni, da vozilom na stranski cesti ne omogočajo varnega vključevanja oziroma prečkanja križišča.

4 METODA ICU

Metoda ICU (*ang. Intersection Capacity Utilization*) je preprosta, a kljub temu zelo učinkovita metoda za izvedbo analize kapacitivnosti semaforiziranih križišč. Zaradi majhnega števila vhodnih podatkov, hitre izvedbe analize ter prikaza rezultatov, se metoda uporablja v večini analitičnih programskih orodij. Metoda ICU, na osnovi nivoja uslug, določa koliko dodatnih obremenitev lahko obravnavano križišče prenese (do zapolnitve kapacitete), oziroma za koliko je kapaciteta križišča že presežena. Metoda deluje neodvisno od krmilnega programa semaforjev, kar preprečuje, da bi izbira krmilnega programa vplivala na rezultate analize kapacitivnosti (v izračunu je treba podati samo minimalno trajanje zelene luči). Na osnovi metode ICU ne moremo določiti trajanja zamud, lahko pa ocenimo pogostost pojavljanja kolon na obravnavanem križišču.

4.1 Teoretične osnove metode ICU

Metoda ICU temelji na določitvi referenčnega časa za posamezno skupino voznih pasov. Referenčni čas predstavlja čas, ki ga vozila, ob predpostavki dosežene 100 % kapacitete, potrebujejo za vožnjo skozi križišče. Referenčni čas za posamezno skupino voznih pasov se določi na podlagi enačbe (24):

$$t_{ref} = \left(\frac{v}{s}\right)_i C_{ref} \,, \tag{24}$$

kjer je:

- t_{ref} referenčni čas za posamezno skupino voznih pasov (s),
- v_i dejanski prometni tok posamezne skupine voznih pasov (vozil/h),
- s_i nasičen prometni tok posamezne skupine voznih pasov (vozil/h),
- C_{ref} referenčna dolžina cikla (v izračunu se uporabi referenčna vrednost 120 s).

Referenčni čas mora biti daljši od minimalnega časa trajanja zelene luči za posamezno skupino voznih pasov. Na osnovi referenčnega in izgubljenega časa se na podlagi enačbe (25) izračuna dejanski referenčni čas:

$$t_{ref,dej} = \max\left(t_{ref}, t_{min}\right) + t_L \,, \tag{25}$$

kjer je:

- $t_{ref,dej}$ dejanski referenčni čas za posamezno skupino voznih pasov (s),
- t_{ref} referenčni čas za posamezno skupino voznih pasov (s),
- t_{min} minimalni čas trajanja zelene luči za posamezno skupino voznih pasov (s),
- t_L izgubljeni čas posamezne skupine voznih pasov (s).

4.2 Določevanje nivoja uslug po metodi ICU

Nivo uslug po metodi ICU se določi na osnovi vsote dejanskih referenčnih časov kritičnih skupin voznih pasov v križišču, minimalnih časov trajanja zelene luči in referenčne dolžine cikla. Vrednost, ki je osnova za določitev nivoja uslug po metodi ICU se izračuna na podlagi enačbe (26):

$$ICU = \frac{\Sigma\left(max\left(t_{min}, \frac{v_i}{s_i}\right)C_{ref} + t_{Li}\right)}{C_{ref}}, \tag{26}$$

kjer je:

- ICU vrednost, ki je osnova za določitev nivoja uslug po metodi ICU,
- C_{ref} referenčna dolžina cikla (s),
- t_{min} minimalni čas trajanja zelene luči za kritične skupine voznih pasov (s),
- t_{Li} izgubljeni čas kritičnih skupin voznih pasov(s),
- v_i/s_i razmerje dejanskih in nasičenih prometnih tokov za kritične skupine voznih pasov.

Metoda ICU 2003 v izračunih upošteva urne prometne obremenitve brez prilagoditev s faktorji konične ure, medtem ko so starejše verzije metode ICU upoštevale 15-minutne konične prometne obremenitve z enotnim faktorjem konične ure FKU = 0,90 Vrednosti, ki so osnova za določitev nivoja uslug po metodi ICU so prikazane v Preglednici 7:

Preglednica 7: Nivoji uslug po metodi ICU (Albeck, Husch, 2003)

Nivo uslug	Stare vrednosti ICU (z FKU) [%]	Nove vrednosti ICU (brez FKU) [%]
A	< 60	< 55
B	60 - 70	55 - 64
C	70 - 80	64 - 73
D	80 - 90	73 - 82
E	90 - 100	82 - 91
F	100 - 110	91 - 100
G	110 - 120	100 - 109
H	> 120	> 109

Nivo uslug A predstavlja stanje brez kolon, saj vsa vozila prevozijo križišče v času prvega cikla. Za vodenje prometa skozi križišče so primerni semaforni cikli dolžine do 80 sekund, celotno križišče pa lahko prenese več kot 40 % dodatnih prometnih obremenitev.

Nivo uslug B predstavlja stanje, kjer večina vozil prevozi križišče v času prvega cikla, pri tem pa nastanejo zgolj kratke kolone. Za vodenje prometa skozi križišče so primerni semaforni cikli dolžine do 90 sekund, celotno križišče pa lahko prenese več kot 30 % dodatnih prometnih obremenitev.

Nivo uslug C predstavlja stanje, kjer večina vozil še vedno prevozi križišče v času prvega cikla, daljše kolone pa se ne pojavljajo. Za vodenje prometa skozi križišče so primerni semaforni cikli dolžine do 100 sekund, celotno križišče pa lahko prenese več kot 20 % dodatnih prometnih obremenitev.

Nivo uslug D predstavlja stanje, kjer v normalnih pogojih večina vozil prevozi križišče v času prvega cikla. Za vodenje prometa skozi križišče so primerni semaforni cikli dolžine do 110 sekund, celotno križišče pa lahko prenese več kot 10 % dodatnih prometnih obremenitev. V primeru prometnih nesreč oziroma zapor prometnih pasov se v križišču lahko pojavijo daljši zastoji.

Nivo uslug E predstavlja stanje, kjer večina vozil križišča ne prevozi v času prvega cikla. Za vodenje prometa skozi križišče so primerni semaforni cikli dolžine 120 sekund, celotno križišče pa lahko prenese do 10 % dodatnih prometnih obremenitev. Že manjši izredni dogodki ali neoptimalno nastavljen krmilni program semaforjev lahko v križišču povzročijo daljše kolone.

Nivo uslug F predstavlja stanje, kjer je kapaciteta križišča dosežena oziroma je le ta rahlo presežena. Za vodenje prometa skozi križišče so primerni semaforni cikli dolžine več kot 120 sekund. Pojavljajo se kolone, ki trajajo med 15 in 60 minut dnevno. Kakršnikoli izredni dogodki ali neoptimalno nastavljen krmilni program semaforjev v križišču povzročijo daljše kolone.

Nivo uslug G predstavlja stanje, kjer je kapaciteta križišča presežena za 10 do 20 %. Za vodenje prometa skozi križišče so primerni semaforni cikli dolžine več kot 120 sekund. Pogoste so daljše kolone, ki trajajo od 60 do 120 minut dnevno. V tem stanju je smiselno optimizirati krmilni program semaforjev.

Nivo uslug H predstavlja stanje, kjer je kapaciteta križišča presežena za več kot 20 %. Za vodenje prometa skozi križišče so primerni semaforni cikli dolžine več kot 120 s. Pogoste so daljše kolone, ki trajajo več kot 120 min dnevno. V tem stanju je smiselno optimizirati krmilni program semaforjev, voznikom pa se priporoča uporaba alternativnih poti.

4.3 Primerjava nivojev uslug po metodah ICU in HCM

Nivoje uslug, pridobljene po metodi ICU, ne smemo zamenjati z nivoji uslug po metodi HCM, saj so le-ti določeni na podlagi popolnoma drugačnih kriterijev. Kljub očitnim razlikam, pa lahko med obema metodama potegnemo kar nekaj vzporednic. Pri obeh metodah lahko uporabimo iste podatke o dejanskem in nasičenem prometnem toku, medsebojno pa so povezani tudi nivoji uslug. V primeru, da z metodo ICU ugotovimo nivo uslug E, lahko enak nivo uslug, z upoštevanjem primernega krmilnega programa semaforjev, določimo tudi po metodi HCM.

5 OBRAVNAVANO OBMOČJE

Z izbrano programsko opremo sta bili na primeru križišč vzdolž Tržaške ceste v Ljubljani izvedeni analiza kapacitivnosti, na podlagi katere smo pridobili mere učinkovitosti obravnavanih križišč, ter linijska koordinacija vzdolž treh zaporednih semaforiziranih križišč.

Tržaška cesta povezuje središče Ljubljane z jugozahodnimi predeli mesta (Lj-Vič, Dolgi most) in širšo okolico v predmestju (Brezovica, Vrhnika), v križišču Dolgi most pa se nanjo priključi tudi avtocestni priključek Lj-zahod (Vič). Zaradi lege je Tržaška cesta, predvsem v času jutranje in popoldanske konice, ena izmed najbolj obremenjenih mestnih vpadnic v Ljubljani. Osnovni podatki o Tržaški cesti so predstavljeni v Preglednici 8, območje obravnave pa je prikazano na Sliki 3:

Preglednica 8: Osnovni podatki o Tržaški cesti v Ljubljani

Osnovni podatki o Tržaški cesti v Ljubljani				
Kategorija	Funkcija	Dolžina	Od	Do
lokalna cesta (LC)	zbirna cesta (ZC)	8 km	križišče z Aškerčevo in Bleiweisovo cesto	Vrhniška cesta

Slika 3: Obravnavano območje (google.maps, 2017)

Analiza kapacitivnosti po metodi HCM je bila narejena na približno 750 m dolgem odseku Tržaške ceste od Dolgega mostu proti središču Ljubljane. V analizo so bila zajeta naslednja križišča:

- semaforizirano križišče Dolgi most (A),
- nesemaforizirano križišče pri skladiščih (B),
- semaforiziran prehod za pešce Tržaška pri UBK (C),
- semaforizirano križišče Tržaška - Tbilisijska (D).

5.1 Semaforizirano križišče Dolgi most

Križišče Dolgi most je štirikrako večfazno semaforizirano križišče, ki je pozicionirano na skrajnem JZ delu obravnavanega območja. Na območju križišča Dolgi most se na Tržaško cesto priključi avtocestni priključek Lj-zahod (Vič), konec leta 2016 pa je bila v križišče priključena tudi novozgrajena cesta, ki Tržaško cesto povezuje s stanovanjskimi predeli na območju Brda in Vrhovcev ter s tehnološkim parkom Ljubljana. V križišču Dolgi most se križajo naslednje ceste:

- Tržaška cesta iz smeri Lj-center (SV krak),
- AC priključek Lj-zahod (JV krak),
- Tržaška cesta iz smeri Dolgi most (JZ krak),
- Pot Rdečega križa (SZ krak).

5.1.1 Geometrija križišča Dolgi most in podatki o omejitvah hitrosti

- Krak A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center) - štirje vozni pasovi za razvrščanje pred križiščem, in sicer dva vozna pasova za leve zavijalce ter dva vozna pasova za vožnjo naravnost. Desni zavijalci na kraku A so kanalizirani.
- Krak B (AC priključek Lj-zahod) - dva vozna pasova za razvrščanje pred križiščem, in sicer en vozni pas za leve zavijalce ter en za vožnjo naravnost. Desni zavijalci na kraku B so kanalizirani.
- Krak C (Tržaška cesta iz smeri Dolgi most) - trije vozi pasovi za razvrščanje pred križiščem, in sicer en vozni pas za leve zavijalce ter dva vozna pasova za vožnjo naravnost, pri čemer je desni pas za vožnjo naravnost namenjen tudi desnim zavijalcem.
- Krak D (Pot Rdečega križa) - trije vozi pasovi za razvrščanje pred križiščem, in sicer en vozni pas za leve zavijalce ter dva vozna pasova za vožnjo naravnost, pri čemer je desni pas za vožnjo naravnost namenjen tudi desnim zavijalcem.

Širine voznih pasov in vzdolžni nakloni posameznih priključkov so podani v Preglednicah 9 in 10:

Preglednica 9: Širine voznih pasov in nakloni priključkov na krakih A in B (križišče Dolgi most)

Krak	**Tržaška cesta iz smeri Lj-center**				**AC priključek Lj-zahod**		
Pas/smer	Levo 1	Levo 2	Naravnost 1	Naravnost 2/desno	Levo	Naravnost	Desno
Širina pasu [m]	2,75	3,10	3,10	3,00	2,75	3,10	4,00
Naklon priključka [%]	+0,50				-1,40		

Preglednica 10: Širine voznih pasov in nakloni priključkov na krakih C in D (križišče Dolgi most)

Krak	**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**			**Pot Rdečega križa**		
Pas/smer	Levo	Naravnost 1	Naravnost 2/desno	Levo	Naravnost 1	Naravnost 2/desno
Širina pasu [m]	2,75	3,00	2,75	2,75	3,10	3,10
Naklon priključka [%]	-0,50			+3,00		

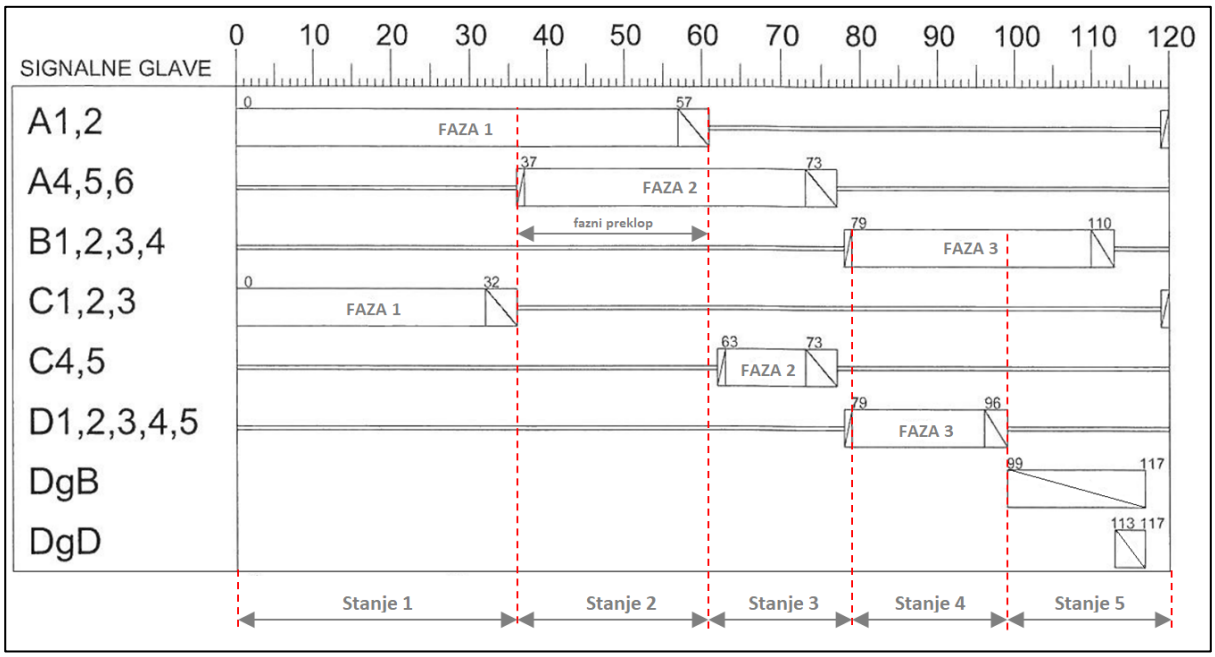
Omejitve hitrosti na krakih, ki se priključijo v križišče so različne. Vzdolž Tržaške ceste (kraka A in C) je omejitev hitrosti 60 km/h, na kraku B (AC priključek Lj-zahod) in kraku D (Pot rdečega križa) pa je omejitev hitrosti 50 km/h.

5.1.2 Krmilni program semaforjev na križišču Dolgi most

Križišče Dolgi most je trifazno semaforizirano križišče s faznim preklopom. Tri glavne signalne faze na obravnavanem križišču so:

- **faza 1** - zelene luči na semaforjih za vožnjo naravnost iz smeri kraka A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center) in zelene luči za vožnjo naravnost in desno iz smeri kraka C (Tržaška cesta iz smeri Dolgi most). Desni zavijalci na kraku A so kanalizirani, zato lahko križišče prevozijo tudi takrat, ko so na ostalih semaforjih tega kraka rdeče luči. V času delovanja faze 1 so zelene luči tudi na semaforjih za pešce in kolesarje, in sicer na prehodih, ki prečkajo avtocestni priključek Lj-zahod (krak B) in Pot Rdečega križa (krak D),
- **faza 2** - zelene luči na semaforjih za vožnjo v levo iz smeri kraka A (Tržaška iz smeri Lj-center) in za vožnjo v levo iz smeri kraka C (Tržaška iz smeri Dolgi most). Faza 2 je varovana faza za levo zavijanje, zato so v času te faze na vseh semaforjih za pešce in kolesarje rdeče luči,
- **faza 3** - zelene luči na semaforjih za vožnjo naravnost in levo iz smeri kraka B (AC priključek Lj-zahod) in zelene luči za vožnjo naravnost, levo in desno iz smeri kraka D (Pot Rdečega križa). Desni zavijalci na kraku B so kanalizirani, zato lahko križišče prevozijo tudi takrat, ko so na ostalih semaforjih tega kraka rdeče luči. V času faze 3 so zelene luči tudi na semaforjih za pešce in kolesarje, in sicer na prehodih, ki prečkajo Tržaško cesto iz smeri Lj-center (krak A) in Tržaško cesto iz smeri Dolgi most (krak C).

Kljub temu, da je križišče Dolgi most trifazno, lahko zaradi faznega preklopa in razlik v trajanju zelenih časov na nasprotnih krakih znotraj faze, opišemo več različnih stanj semaforjev, ki se pojavijo v času delovanja semafornega cikla. Posamezna stanja, ki se na križišču Dolgi most pojavijo v času delovanja popoldanskega krmilnega programa, so grafično predstavljena na Sliki 4:



Slika 4: Stanja med delovanjem semaforjev na križišču Dolgi most (JP LPT d.o.o., 2017)

Kot je razvidno iz Slike 4, je dolžina semafornega cikla v času delovanja popoldanskega krmilnega programa 120 sekund. Po preteku 120 sekund se semaforni cikel ponovi. V tem času se zvrstijo vse tri glavne faze, ki povzročijo pet različnih stanj v delovanju semaforjev, in sicer:

- **stanje 1** - v tem času na krakih A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center) in C (Tržaška cesta iz smeri Dolgi most) deluje faza 1, ki na obeh krakih omogoča vožnjo naravnost in desno, pri čemer so desni zavijalci na kraku A kanalizirani. Po 32 sekundah se zelene luči na semaforjih kraka C ugasnejo in po dodatnih 4 sekundah rumenih luči so na vseh signalnih glavah tega kraka rdeče luči. V času stanja 1 so zelene luči tudi na semaforjih za pešce in kolesarje, ki prečkajo kraka B (AC priključek Lj-zahod) in D (Pot Rdečega križa). Zelene luči na semaforjih za pešce in kolesarje se prižgejo 2 sekundi po začetku stanja 1 in trajajo 20 sekund (semaforji za pešce) oziroma 25 sekund (semaforji za kolesarje),
- **stanje 2** - je kombinacija faze 1 in faze 2. V času tega stanja so na kraku A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center) še vedno prižgane zelene luči za vožnjo naravnost, ob tem pa se na istem kraku prižgejo zelene luči tudi za leve zavijalce. Tako stanje traja 20 sekund (od 37. do 57. sekunde semafornega cikla) nato pa se zelene luči za vožnjo naravnost ugasnejo in po 4 sekundah rumene luči je stanje 2 zaključeno,
- **stanje 3** - v tem času na krakih A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center) in C (Tržaška cesta smer Dolgi most) deluje varovana faza za leve zavijalce. Tako stanje traja 10 sekund (od 63. do 73. sekunde) nato pa se na vseh signalnih glavah na krakih A in C prižgejo rumene (4 sekunde) in v nadaljevanju rdeče luči,

- **stanje 4** - v tem času na krakih B (avtocestni priključek Lj-zahod) in D (Pot Rdečega križa) deluje faza 3, ki na obeh krakih omogoča vožnjo naravnost, levo in desno, pri čemer so desni zavijalci na kraku B kanalizirani. V času stanja 4 levi zavijalci niso varovani, zato je pri zavijanju v levo treba upoštevati pravilo srečanja. Tako stanje traja 17 sekund (od 79. do 96. sekunde) nato pa se na vseh signalnih glavah na kraku D prižgejo rumene (3 sekunde) in v nadaljevanju rdeče luči. V času stanja 4 so zelene luči tudi na semaforjih za pešce in kolesarje, ki prečkajo kraka A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center) in C (Tržaška cesta iz smeri Dolgi most). Zelene luči za pešce in kolesarje se prižgejo ob začetku stanja 4 in trajajo 10 sekund (pešci) oziroma 12 sekund (kolesarji),
- **stanje 5** - v tem času so zelene luči samo na semaforjih na kraku B (AC priključek Lj-zahod). Levi zavijalci iz tega kraka so v času stanja 5 zavarovani pred nasproti vozečimi vozili, kljub temu pa morajo pri zavijanju v levo paziti na morebitne konfliktne situacije s pešci in kolesarji, ki prehod preko kraka C prečkajo povsem ob koncu zelene luči na semaforjih za pešce in kolesarje. Tako stanje traja 11 sekund (od 99. do 110. sekunde) nato pa tudi semaforji na kraku B preidejo na rumene (3 sekunde) in v nadaljevanju rdeče luči. Po končanju stanja 5 so na vseh signalnih glavah v križišču rdeče luči in cikel se ponovi.

Kot je razvidno iz opisa stanj, so prva tri stanja posledica različnih kombinacij zelenih luči na nasprotnih krakih A in C (vzdolž Tržaške ceste). Preden se prižgejo zelene luči na krakih B in D (smer prečno na Tržaško cesto) je nujno, da so na vseh signalnih glavah na krakih A in C rdeče luči, saj kombinacije zelenih luči med kraki, ki potekajo prečno eden na drugega, niso mogoče. Stanji 4 in 5 sta posledica različnega trajanja zelenih luči na krakih B in D. Celoten krmilni program semaforjev na križišču Dolgi most je podan v Prilogi C.1. Semaforizirano križišče Dolgi most je prikazano na Sliki 5:

Slika 5: Semaforizirano križišče Dolgi most med gradnjo SZ priključka (google.maps, 2017)

5.2 Nesemaforizirano križišče pri skladiščih

Nesemaforizirano trikrako križišče s stransko cesto je pozicionirano 300 m od križišča Dolgi most v smeri proti centru Ljubljane in omogoča dostop do manjše industrijske cone tik ob Tržaški cesti. Dostop do skladišč je omogočen s Tržaške ceste iz smeri Dolgi most proti centru (zavijanje v desno), iz nasprotne smeri pa zavijanje v levo ni dovoljeno. Podoben režim velja tudi na kraku stranske ceste (skladišča), kjer je omogočeno zavijanje v desno na Tržaško cesto v smeri proti centru Ljubljane, zavijanje v levo proti križišču Dolgi most pa ni dovoljeno. V obravnavanem križišču se križajo naslednje ceste:

- Tržaška cesta iz smeri Lj-center (SV krak),
- Dostopna cesta do skladišč (JV krak),
- Tržaška cesta iz smeri Dolgi most (JZ krak).

5.2.1 Geometrija križišča pri skladiščih in podatki o omejitvah hitrosti

- Krak A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center) - v smeri proti križišču Dolgi most sta na Tržaški cesti dva vozna pasova za vožnjo naravnost. Zavijanje v levo na stransko cesto s kraka A ni dovoljeno.
- Krak B (dostopna cesta do skladišč) - en vozni pas za vožnjo v desno, ki se na Tržaško cesto priključi preko vključevalnega pasu. Zavijanje v levo s kraka B ni dovoljeno.
- Krak C (Tržaška cesta iz smeri Dolgi most) - v smeri proti centru Ljubljane sta na Tržaški cesti dva vozna pasova za vožnjo naravnost ter samostojni vozni pas oziroma žep za desno zavijanje proti skladiščem.

Širine voznih pasov in vzdolžni nakloni posameznih priključkov so podani v Preglednici 11:

Preglednica 11: Širine voznih pasov in nakloni priključkov na krakih A, B in C (križišče pri skladiščih)

Krak	Tržaška iz smeri Lj-center		Priklj. skladišča	Tržaška iz smeri Dolgi most		
Pas/smer	Naravnost 1	Naravnost 2	Desno	Naravnost 1	Naravnost 2	Desno
Širina pasu [m]	3,00	3,00	3,25	3,00	3,00	3,25
Naklon priključka [%]	+0,50		+0,40	-0,50		

Omejitev hitrosti vzdolž Tržaške ceste (kraka A in C) je 60 km/h. Na kraku B (dostopna cesta do skladišč) omejitev hitrosti ni določena, vendar le ta, zaradi same lokacije in geometrije priključka, ne preseže 30 km/h.

5.2.2 Prometna ureditev nesemaforiziranega križišča pri skladiščih

Zavijanje v desno proti skladiščem je s Tržaške ceste urejeno s posebnim žepom za desne zavijalce, ki na območju križišča prečka stezo za kolesarje in pešce, zato je pri zavijanju v desno treba paziti na potencialne konfliktne situacije s kolesarji in pešci.

Zavijanje v desno iz stranske ceste je omogočeno preko vključevalnega pasu, ki zagotavlja varnejše in bolje tekoče vključevanje na Tržaško cesto. Na kraku stranske (neprednostne) ceste je promet urejen z naslednjimi prometnimi znaki:

- križišče/cestni priključek s prednostno cesto (oznaka 2101) - znak za izrecne odredbe,
- obvezna smer v desno (oznaka 2301-1) - znak za obveznost.

Nesemaforizirano križišče pri skladiščih je prikazano na Sliki 6:

Slika 6: Nesemaforizirano križišče pri skladiščih (google.maps, 2017)

5.3 Semaforiziran prehod za pešce Tržaška pri UBK

Semaforiziran prehod za pešce je pozicioniran med nesemaforiziranim križiščem pri skladiščih in semaforiziranim križiščem Tržaška - Tbilisijska. V neposredni bližini prehoda, ki prečka Tržaško cesto, so stanovanjski bloki, trgovine, poslovni prostori ter postaji mestnega avtobusa, zato je prehod za pešce precej obremenjen. V primeru, da na območju prehoda za pešce ni pešcev oziroma kolesarjev, v križišču skozi celotno dolžino semafornega cikla deluje faza za vožnjo vozil vzdolž Tržaške ceste, do menjave semafornih faz pa pride zgolj ob predhodni najavi oziroma pritisku na tipko. Na območju prehoda za pešce se na Tržaško cesto priključi dostopna cesta, ki stanovalcem bližnjih blokov omogoča neposredno vključevanje na Tržaško cesto v smeri Lj-center.

5.3.1 Geometrija semaforiziranega prehoda za pešce in podatki o omejitvah hitrosti

Na območju prehoda za pešce sta na krakih A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center) in B (Tržaška cesta iz smeri Dolgi most) po dva vozna pasova za vožnjo naravnost. Širine voznih pasov in vzdolžni nakloni posameznih priključkov so podani v Preglednici 12:

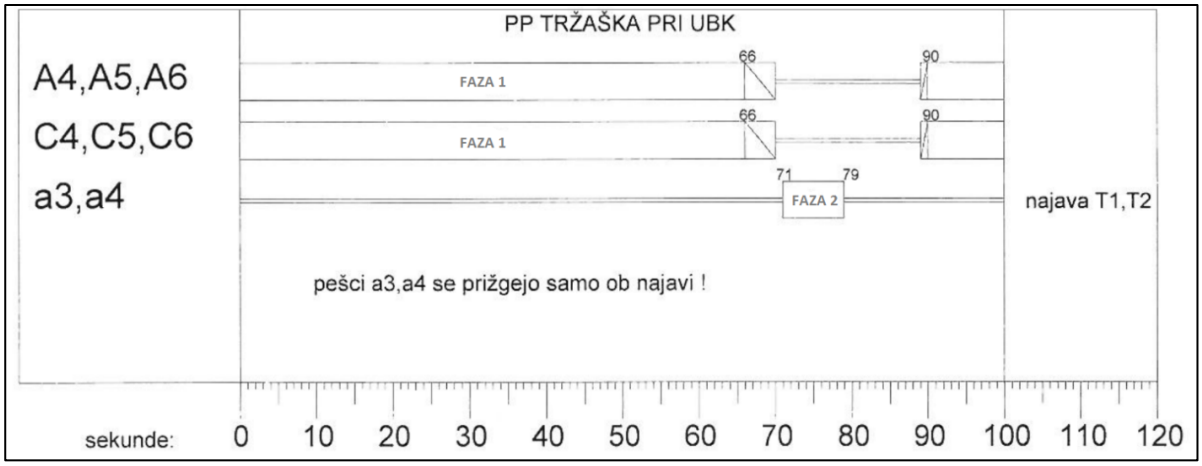
Preglednica 12: Širine voznih pasov in nakloni priključkov na krakih A in B (PP Tržaška pri UBK)

Krak	Tržaška iz smeri Lj-center		Tržaška iz smeri Dolgi most	
Pas/smer	Naravnost 1	Naravnost 2	Naravnost 1	Naravnost 2
Širina pasu [m]	3,00	3,00	3,00	3,00
Naklon priključka [%]	+0,50		-0,50	

Omejitev hitrosti vzdolž Tržaške ceste (kraka A in B) je 60 km/h.

5.3.2 Krmilni program semaforjev na semaforiziranem prehodu za pešce

Na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška pri UBK se v času semafornega cikla izmenjujeta dve semaforni fazi, pri čemer je ena namenjena samo pešcem. V primeru, da na območju prehoda ni pešcev oziroma le-ti ne pritisnejo tipke za najavo, do menjave faze ne pride in na semaforjih skozi celotno dolžino cikla, ki v času popoldanskega krmilnega programa traja 100 sekund, deluje faza 1, ki omogoča nemoteno vožnjo vzdolž Tržaške ceste. V primeru pritiska tipke za najavo pešcev se v 66. sekundi cikla na signalnih glavah za vožnjo naravnost po Tržaški cesti prižgejo rumene in v nadaljevanju rdeče luči, takoj za tem pa se zelene luči prižgejo na semaforjih za pešce (faza 2). Zeleni čas na semaforjih za pešce traja 8 sekund, naslednjih 11 sekund pa so na vseh signalnih glavah v križišču rdeče luči, kar omogoča varno izpraznitev prehoda za pešce. Krmilni program semaforjev na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška pri UBK je prikazan na Sliki 7:



Slika 7: Krmilni program semaforjev na PP Tržaška pri UBK (JP LPT d.o.o., 2008)

Semaforiziran prehod za pešce Tržaška pri UBK je prikazan na Sliki 8:

Slika 8: Semaforiziran prehod za pešce Tržaška pri UBK (google.maps, 2017)

5.4 Semaforizirano križišče Tržaška - Tbilisijska

Križišče Tržaška - Tbilisijska je štirikrako večfazno semaforizirano križišče, ki je pozicionirano na skrajnem SV delu obravnavanega območja. Križišče je v času jutranje in popoldanske prometne konice izredno obremenjeno, tako v smeri vzdolž Tržaške ceste kot tudi v smeri prečno na njo, saj je v neposredni okolici križišča večje nakupovalno središče, hkrati pa je križišče s preureditvijo križišča Dolgi most postalo glavna prometna povezava med Tržaško cesto in Fajfarjevo ulico. V obravnavanem križišču se križajo naslednje ceste:

- Tržaška cesta iz smeri Lj-center (SV krak),
- Tbilisijska ulica (JV krak),
- Tržaška cesta iz smeri Dolgi most (JZ krak),
- Fajfarjeva ulica (SZ krak).

5.4.1 Geometrija križišča Tržaška - Tbilisijska in podatki o omejitvah hitrosti

- Krak A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center) - trije vozi pasovi za razvrščanje pred križiščem, in sicer en vozni pas za leve zavijalce ter dva vozna pasova za vožnjo naravnost, pri čemer je desni pas za vožnjo naravnost namenjen tudi desnim zavijalcem.
- Krak B (Tbilisijska ulica) - trije vozi pasovi za razvrščanje pred križiščem, in sicer dva vozna pasova za leve zavijalce ter skupni vozni pas za vožnjo naravnost in desno.

- Krak C (Tržaška cesta iz smeri Dolgi most) - štirje vozni pasovi za razvrščanje pred križiščem, in sicer en vozni pas za leve zavijalce, dva vozna pasova za vožnjo naravnost ter en vozni pas za vožnjo v desno.
- Krak D (Fajfarjeva ulica) - dva vozna pasova za razvrščanje pred križiščem, in sicer en vozni pas za leve zavijalce ter skupni vozni pas za vožnjo naravnost in desno.

Omejitev hitrosti vzdolž Tržaške ceste (kraka A in C) je 60 km/h. Na kraku B (Tbilisijska ulica) in kraku D (Fajfarjeva ulica) pa je hitrost omejena na 50 km/h. Širine voznih pasov in vzdolžni nakloni posameznih priključkov so podani v Preglednicah 13 in 14:

Preglednica 13: Širine voznih pasov in nakloni priključkov na krakih A in B (križišče Tržaška - Tbilisijska)

Krak	**Tržaška cesta iz smeri Lj-center**			**Tbilisijska ulica**		
Pas/smer	Levo	Naravnost 1	Naravnost 2/desno	Levo 1	Levo 2	Naravnost /desno
Širina pasu [m]	3,00	3,10	2,75	2,75	2,75	3,00
Naklon priključka [%]	+0,50			+0,50		

Preglednica 14: Širine voznih pasov in nakloni priključkov na krakih C in D (križišče Tržaška - Tbilisijska)

Krak	**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**				**Fajfarjeva ulica**	
Pas/smer	Levo	Naravnost 1	Naravnost 2	Desno	Levo	Naravnost/desno
Širina pasu [m]	3,00	3,10	3,10	2,75	3,10	2,75
Naklon priključka [%]	-0,50				-0,50	

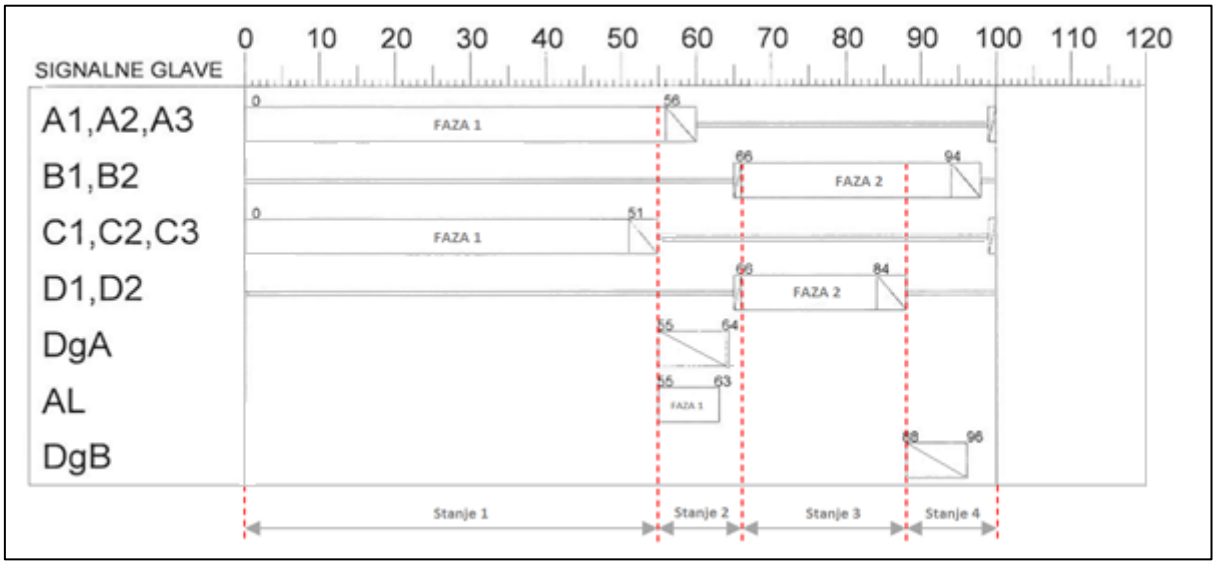
5.4.2 Krmilni program semaforjev na križišču Tržaška - Tbilisijska

Križišče Tržaška - Tbilisijska je dvofazno semaforizirano križišče s podaljšano fazo za leve zavijalce. Glavni signalni fazi na tem križišču sta:

- **faza 1** - zelene luči na signalnih glavah za vožnjo naravnost, levo in desno na kraku A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center) in zelene luči za vožnjo v vse tri smeri na kraku C (Tržaška cesta iz smeri Dolgi most). V času faze 1 so zelene luči tudi na semaforjih za pešce in kolesarje, in sicer na prehodih, ki prečkajo Tbilisijsko (krak B) in Fajfarjevo ulico (krak D),
- **faza 2** - zelene luči na signalnih glavah za vožnjo naravnost, levo in desno na kraku B (Tbilisijska ulica) in za vožnjo v vse tri smeri na kraku D (Fajfarjeva ulica). V času delovanja faze 2 so zelene luči tudi na semaforjih za pešce in kolesarje, in sicer na prehodih, ki prečkajo Tržaško cesto (kraka A in C).

Podobno kot na križišču Dolgi most, se tudi na tem križišču, zaradi podaljšane faze za leve zavijalce in razlik v času trajanja zelenih luči na nasprotnih krakih znotraj signalne faze, pojavijo različna stanja v času delovanja semafornega cikla.

Posamezna stanja, ki se na križišču Tržaška - Tbilisijska pojavijo v času delovanja popoldanskega krmilnega programa, so grafično predstavljena na Sliki 9:



Slika 9: Stanja med delovanjem semaforjev na križišču Tržaška - Tbilisijska (JP LPT d.o.o., 2008)

Kot je razvidno iz Slike 9, je dolžina semafornega cikla v času delovanja popoldanskega krmilnega programa 100 sekund. Po preteku 100 sekund se semaforni cikel ponovi. V tem času se zvrstita obe glavni fazi, ki povzročita štiri različna stanja v delovanju semaforjev, in sicer:

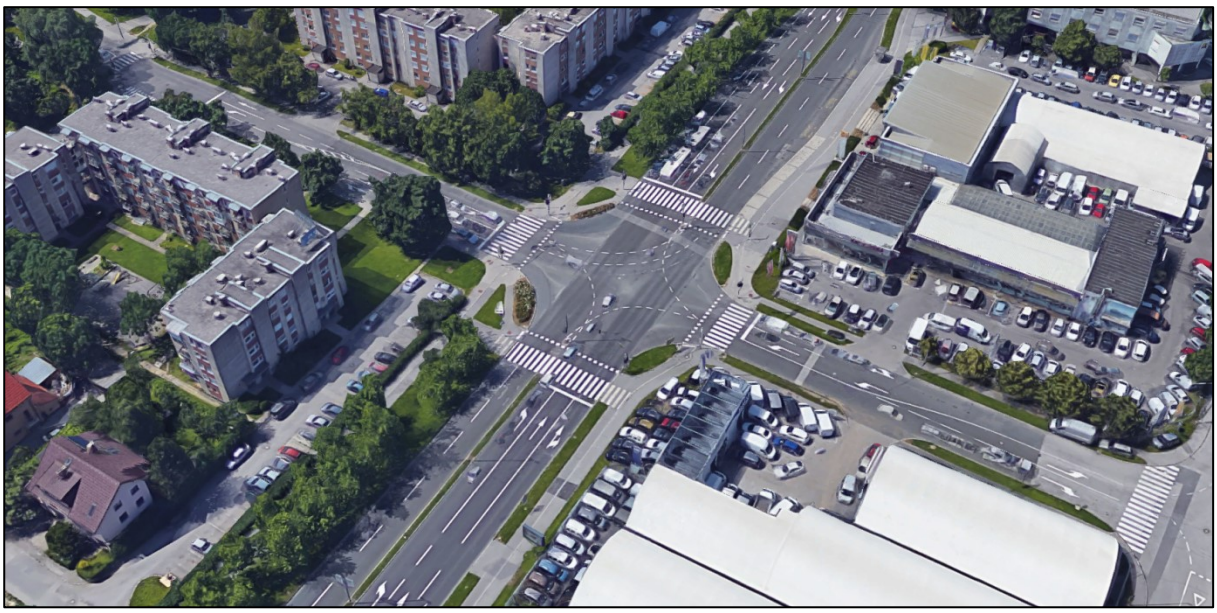
- **stanje 1** - v tem času na krakih A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center) in C (Tržaška cesta iz smer Dolgi most) deluje faza 1, ki na obeh krakih omogoča vožnjo naravnost, levo in desno. V tem času levi zavijalci niso varovani, zato je pri zavijanju v levo treba upoštevati pravilo srečanja. Po preteku 51 sekund se zelene luči na kraku C ugasnejo in po 4 sekundah rumenih luči so na vseh signalnih glavah tega kraka rdeče luči. V času stanja 1 so zelene luči tudi na semaforjih za pešce in kolesarje, ki prečkajo kraka B (Tbilisijska ulica) in D (Fajfarjeva ulica). Zelene luči na semaforjih za pešce in kolesarje se prižgejo 2 sekundi po začetku stanja 1 in trajajo 40 sekund,
- **stanje 2** - je podaljšana faza za leve zavijalce na kraku A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center). Sekundo po začetku stanja 2 se tudi na kraku A prižgejo rumene (4 sekunde) in v nadaljevanju rdeče luči za vožnjo naravnost in desno, zelena luč za vožnjo v levo iz smeri kraka A pa ostane prižgana še 8 sekund. V času podaljšane leve faze so levi zavijalci varovani. Po preteku 8 sekund so rdeče luči na vseh signalnih glavah v križišču,
- **stanje 3** - v tem času na krakih B (Tbilisijska ulica) in C (Fajfarjeva ulica) deluje faza 2, ki na obeh krakih omogoča vožnjo naravnost, levo in desno. V tem času levi zavijalci niso varovani, zato je pri zavijanju v levo treba upoštevati pravilo srečanja. Po 18 sekundah se zelene luči na kraku C ugasnejo in po 4 sekundah rumenih luči so na signalnih glavah tega kraka rdeče luči.

V času stanja 3 so zelene luči tudi na semaforjih za pešce in kolesarje, ki prečkajo kraka A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center) in C (Tržaška cesta iz smeri Dolgi most). Zelene luči na semaforjih za pešce in kolesarje se prižgejo 2 sekundi po začetku stanja 3 in trajajo 10 sekund,

- **stanje 4** - v tem času so zelene luči samo na kraku B (Tbilisijska ulica). Levi zavijalci iz tega kraka so v času stanja 4 zavarovani pred nasproti vozečimi vozili, kljub temu pa morajo pri zavijanju v levo paziti na morebitne konfliktne situacije s pešci in kolesarji, ki prehod preko kraka C (Tržaška cesta iz smeri Dolgi most) prečkajo povsem ob koncu zelene luči na semaforjih za pešce in kolesarje. Tako stanje traja 6 sekund (od 88. do 94. sekunde) nato pa tudi signalne glave na kraku B preidejo na rumene (4 sekunde) in v nadaljevanju rdeče luči. Po končanju stanja 4 so na vseh signalnih glavah v križišču rdeče luči in cikel se ponovi.

Celoten krmilni program semaforjev na križišču Tržaška - Tbilisijska je podan v Prilogi C.4.

Semaforizirano križišče Tržaška - Tbilisijska je prikazano na Sliki 10:



Slika 10: Semaforizirano križišče Tržaška - Tbilisijska (google.maps, 2017)

6 PROMETNE OBREMENITVE

Prometne obremenitve so ključni podatki, ki jih potrebujemo za izvedbo analize kapacitivnosti na osnovi izbranih analitičnih metod. Prometne obremenitve, ki so bile pridobljene in uporabljene v sklopu magistrske naloge, se nanašajo na popoldansko prometno konico. S štetjem prometa smo pridobili podatke o prometnih obremenitvah za vse kategorije motornih vozil ter podatke o številu pešcev in kolesarjev na obravnavanem območju.

6.1 Prikaz prometnih obremenitev

Enota za prikaz prometnih obremenitev je EOV oziroma ekvivalent osebnih vozil. Faktorji za prilagoditev različnih kategorij motornih vozil na ustrezno enoto so podani v Preglednici 15:

Preglednica 15: Faktor f_{el} za pretvorbo vozil na enoto EOV (Ur. l. RS, št. 4/2016)

i	Vozila	f_{el}
1	motorno kolo	0,5
2	osebni avtomobil	1,0
3	tovornjak, avtobus, traktor	2,0
4	zglobni avtobus, tovornjak nad 7 ton	3,0
5	tovornjak s prikolico, traktor s prikolico	4,0

6.2 Prometne obremenitve na križišču Dolgi most

Prometne obremenitve za križišče Dolgi most so bile pridobljene s strani podjetja PNZ svetovanje in projektiranje d.o.o., ki je podatke pridobilo v sklopu 16-urnega štetja prometa 15.12.2016. Iz analize podatkov je razvidno, da popoldanska prometna konica (PK) nastopi med 15:30 in 16:30.

Poleg skupnih prometnih obremenitev v času med 15:30 in 16:30 smo pridobili tudi 15-minutne obremenitve znotraj obravnavane ure, ki smo jih uporabili za izračun faktorjev konične ure.

Prometne obremenitve na križišču Dolgi most so prikazane v Prilogi D.1.

Štetje prometa na križišču Dolgi most je bilo opravljeno takoj po odprtju novega SZ priključka (Pot Rdečega križa). Med izdelavo magistrske naloge smo predvidevali, da se je v pol leta struktura obremenitev na križišču Dolgi most nekoliko spremenila, saj vozniki potrebujejo nekaj časa, da se na novo cesto privadijo in jo začnejo redno uporabljati.

Zato je bilo 30.5.2017 na posameznih krakih oziroma smereh opravljeno ponovno štetje prometa, na podlagi katerega smo ugotavljali:

- prometne obremenitve za vožnjo naravnost, levo in desno iz smeri novozgrajenega kraka D (Pot Rdečega križa),
- prometne obremenitve za vožnjo v desno iz smeri kraka A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center),
- prometne obremenitve za vožnjo naravnost iz smeri kraka B (AC priključek Lj-zahod),
- prometne obremenitve za vožnjo v levo iz smeri kraka C (Tržaška cesta iz smeri Dolgi most).

V nasprotju s predvidevanji smo ugotovili, da se prometne obremenitve v pol leta niso bistveno spremenile, zato smo v analizi uporabili podatke, ki so bili s strani podjetja PNZ svetovanje in projektiranje d.o.o. pridobljeni decembra 2016.

6.3 Prometne obremenitve na križišču Tržaška - Tbilisijska

Podatki o prometnih obremenitvah na križišču Tržaška - Tbilisijska so bili pridobljeni s pomočjo avtomatskih števcev prometa, ki so podatke o prometnih obremenitvah zajeli v okviru 24-urnega štetja prometa 24.1.2017. Prometne obremenitve, interpolirane na čas popoldanske prometne konice med 15:30 in 16:30, so prikazane v Prilogi D.2.

Problem štetja prometa s pomočjo avtomatskih števcev NUmetrics je, da le-ti štejejo promet na posameznem voznem pasu ne pa tudi vsake smeri posebej. V primeru, da je vozni pas namenjen vožnji naravnost in desno nam števec poda podatek o tem koliko vozil je s tega voznega pasu zapeljalo v križišče, ne pa tudi kolikšen je delež vozil, ki so zapeljala v desno oziroma naravnost. Poleg tega števci niso bili postavljeni na vseh krakih v križišču, zato podatki o prometnih obremenitvah kraka C manjkajo. Zaradi vseh teh pomanjkljivosti smo se odločili, da 13.6.2017 opravimo ponovno štetje prometa na celotnem križišču Tržaška - Tbilisijska. Štetje je bilo izvedeno v času popoldanske prometne konice, med 15:30 in 16:30, poleg skupnih prometnih obremenitev v tem času pa so bile zabeležene tudi 15-minutne obremenitve znotraj obravnavane ure. Prometne obremenitve, pridobljene s ponovnim štetjem prometa na križišču Tržaška - Tbilisijska, so prikazane v Prilogi D.3.

V nadaljnjih analizah so bili uporabljeni podatki o prometnih obremenitvah, ki so bili pridobljeni z lastnim štetjem prometa. Podatki o prometnih obremenitvah, pridobljeni s pomočjo avtomatskih števcev NUmetrics so služili kot kontrola.

6.4 Prometne obremenitve na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih

Prometne obremenitve na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih smo pridobili s štetjem prometa 8.6.2017 v času popoldanske prometne konice med 15:30 in 16:30. Štetje prometa je potekalo samo na dveh smereh, pri čemer smo ugotavljali:

- prometne obremenitve za vožnjo v desno s Tržaške ceste iz smeri Dolgi most proti dovozni cesti do skladišč, in
- prometne obremenitve za vožnjo v desno na Tržaško cesto iz neprednostne dovozne ceste pri skladiščih.

Podatke o prometnih obremenitvah za vožnjo naravnost iz smeri Dolgi most smo pridobili na podlagi vsote vozil, ki zapustijo križišče Dolgi most v smeri proti nesemaforiziranem križišču pri skladiščih, temu pa smo prišteli razliko med vozili, ki z vožnjo v desno proti skladiščem Tržaško cesto na tem križišču zapustijo oziroma se nanjo vključijo. Na podoben način smo ugotovili tudi prometne obremenitve za vožnjo naravnost iz smeri Lj-center, saj so prometne obremenitve na tem kraku enake vsoti vozil, ki zapustijo križišče Tržaška - Tbilisijska v smeri proti križišču Dolgi most. Podatki o prometnih obremenitvah na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih so podani v Prilogi D.4.

6.5 Prometne obremenitve na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška pri UBK

Prometne obremenitve na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška cesta pri UBK so pridobljene na podlagi prometnih obremenitev ostalih obravnavanih križišč, in sicer so:

- prometne obremenitve za vožnjo naravnost po Tržaški cesti iz smeri Lj-center enake številu vozil, ki zapustijo križišče Tržaška - Tbilisijska v smeri proti križišču Dolgi most,
- prometne obremenitve za vožnjo naravnost po Tržaški cesti iz smeri Dolgi most enake številu vozil, ki zapustijo nesemaforizirano križišče pri skladiščih v smeri proti centru Ljubljane.

Prometne obremenitve na dostopni cesti, ki se na Tržaško cesto priključi na območju prehoda za pešce, v analizi niso upoštevane, saj se s tega kraka dnevno vključi le nekaj vozil.

Prometne obremenitve obravnavanega prehoda za pešce so podane v Prilogi D.5.

6.6 Prilagoditev prometnih obremenitev

Podatki o prometnih obremenitvah na posameznih križiščih niso bili pridobljeni istočasno (v času popoldanske prometne konice istega dne), zato se prometne obremenitve med seboj ne ujemajo povsem. Na obravnavanem območju, med križiščema Dolgi most in Tržaška - Tbilisijska, razen uvoza v industrijsko cono pri skladiščih in dveh bencinskih servisov, ni drugih izvozov (npr. parkirišč, parkirnih hiš, nakupovalnih centrov, dovozov, dvorišč...), ki bi voznikom omogočali, da Tržaško cesto zapustijo med obema križiščema, in bi upravičili razliko med prometnimi obremenitvami znotraj obravnavanega območja. Zato smo pri prilagoditvi prometnih obremenitev upoštevali dve glavni predpostavki, in sicer:

- število vozil, ki prevozijo križišče Tržaška - Tbilisijska v smeri proti križišču Dolgi most (desni zavijalci iz Fajfarjeve ulice, levi zavijalci iz Tbilisijska ulice in vozniki, ki vozijo naravnost po Tržaški cesti iz smeri Lj-center) je enako številu vozil, ki v isti smeri prevozijo semaforiziran prehod za pešce Tržaška cesta pri UBK, nesemaforizirano križišče pri skladiščih in preko kraka A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center) prispejo na križišče Dolgi most,
- število vozil, ki prevozijo križišče Dolgi most v smeri proti centru Ljubljane (desni zavijalci iz AC priključka Lj-zahod, levi zavijalci iz Poti Rdečega križa in vozniki, ki vozijo naravnost po Tržaški cesti iz smeri Dolgi most) se od števila vozil, ki v isti smeri zapustijo nesemaforizirano križišče pri skladišči, razlikuje za razliko med vozili, ki na tem križišču Tržaško cesto zapustijo oziroma se nanjo vključijo. V nadaljevanju je število vozil, ki v smeri proti centru Ljubljane zapustijo nesemaforizirano križišče pri skladiščih, enako številu vozil, ki v isti smeri prevozijo semaforiziran prehod za pešce Tržaška cesta pri UBK in preko kraka C (Tržaška cesta iz smeri Dolgi most) prispejo na križišče Tržaška - Tbilisijska.

Na podlagi zgoraj opisanih predpostavk so bile izvedene smiselne prilagoditve prometnih obremenitev, ki so zagotovile ujemanje podatkov znotraj obravnavanega območja. Prilagojene končne prometne obremenitve, ki so bile uporabljene v analizi, so podane v Preglednici 16:

Preglednica 16: Končne prometne obremenitve na obravnavanem območju

SEMAFORIZIRANO KRIŽIŠČE DOLGI MOST									
Krak		**Tržaška cesta iz smeri Lj-center**				**AC priključek Lj-zahod**			
Čas	Smer	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj
15:30 - 15:45		268	120	47	435	64	27	162	253
15:45 - 16:00		268	141	48	457	67	28	187	282
16:00 - 16:15		257	138	42	437	40	39	191	270
16:15 - 16:30		251	155	57	463	57	51	190	298
Celotna PK [EOV]		1044	554	194	1792	228	145	730	1103

se nadaljuje …

… nadaljevanje Preglednice 16

SEMAFORIZIRANO KRIŽIŠČE DOLGI MOST									
Krak		**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**				**Pot Rdečega križa**			
Čas	Smer	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj
15:30 - 15:45		17	89	105	211	33	43	34	110
15:45 - 16:00		30	95	114	239	37	46	35	118
16:00 - 16:15		34	122	147	303	32	77	41	150
16:15 - 16:30		38	114	121	273	37	58	38	133
Celotna PK [EOV]		119	420	487	1026	139	224	148	511

NESEMAFORIZIRANO KRIŽIŠČE PRI SKLADIŠČIH						
Krak		**Trž. c. iz smeri Lj-cen.**	**Priklj. skladišča**	**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**		
Čas	Smer	Naravnost	Desno	Naravnost	Desno	Skupaj
15:30 - 15:45		435	11	275	9	284
15:45 - 16:00		457	16	308	11	319
16:00 - 16:15		437	18	337	8	345
16:15 - 16:30		463	15	332	9	341
Celotna PK [EOV]		1792	60	1252	37	1289

SEMAFORIZIRAN PREHOD ZA PEŠCE TRŽAŠKA PRI UBK			
Krak		**Tržaška cesta iz smeri Lj-center**	**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**
Čas	Smer	Naravnost	Naravnost
15:30 - 15:45		435	286
15:45 - 16:00		457	324
16:00 - 16:15		437	355
16:15 - 16:30		463	347
Celotna PK [EOV]		1792	1312

SEMAFORIZIRANO KRIŽIŠČE TRŽAŠKA - TBILISIJSKA									
Krak		**Tržaška cesta iz smeri Lj-center**				**Tbilisijska ulica**			
Čas	Smer	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj
15:30 - 15:45		47	201	17	265	165	6	23	194
15:45 - 16:00		52	216	19	287	168	9	27	204
16:00 - 16:15		58	211	22	291	151	8	31	190
16:15 - 16:30		49	221	27	297	160	6	26	192
Celotna PK [EOV]		206	849	85	1140	644	29	107	780
Krak		**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**				**Fajfarjeva ulica**			
Čas	Smer	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj
15:30 - 15:45		9	225	52	286	21	9	69	99
15:45 - 16:00		14	245	65	324	18	8	73	99
16:00 - 16:15		13	270	72	355	26	12	75	113
16:15 - 16:30		13	263	71	347	28	11	82	121
Celotna PK [EOV]		49	1003	260	1312	93	40	299	432

6.7 Podatki o pešcih in kolesarjih

Podatki o prometnih obremenitvah za pešce in kolesarje na obravnavanem območju so bili pridobljeni s štetjem prometa 15.6.2017, v času popoldanske prometne konice med 15:30 in 16:30. Podatki, ki so bili v nadaljevanju uporabljeni v analizi, so predstavljeni v Preglednici 17:

Preglednica 17: Prometne obremenitve pešcev in kolesarjev

SEMAFORIZIRANO KRIŽIŠČE DOLGI MOST		
Krak	**Tržaška cesta iz smeri Lj-center**	**AC priključek Lj-zahod**
Smer	Prečno na krak	Prečno na krak
Pešci [peš./h]	20	8
Kolesarji [kol./h]	32	32
Krak	**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**	**Pot Rdečega križa**
Smer	Prečno na krak	Prečno na krak
Pešci [peš./h]	4	4
Kolesarji [kol./h]	8	36
NESEMAFORIZIRANO KRIŽIŠČE PRI SKLADIŠČIH		
Krak	**Priključek skladišča**	
Smer	Prečno na krak	
Pešci [peš./h]	33	
Kolesarji [kol./h]	32	
SEMAFORIZIRAN PREHOD ZA PEŠCE TRŽAŠKA PRI UBK		
Krak	**Tržaška cesta**	
Smer	Prečno na krak	
Pešci [peš./h]	88	
Kolesarji [kol./h]	52	
SEMAFORIZIRANO KRIŽIŠČE TRŽAŠKA - TBILISIJSKA		
Krak	**Tržaška cesta iz smeri Lj-center**	**Tbilisijska ulica**
Smer	Prečno na krak	Prečno na krak
Pešci [peš./h]	14	56
Kolesarji [kol./h]	11	12
Krak	**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**	**Fajfarjeva ulica**
Smer	Prečno na krak	Prečno na krak
Pešci [peš./h]	51	24
Kolesarji [kol./h]	5	34

7 PROGRAMSKA ORODJA

Za izvedbo analize kapacitivnosti in linijske koordinacije na obravnavanih križiščih vzdolž Tržaške ceste v Ljubljani sta bili v sklopu magistrske naloge uporabljeni dve analitični programski orodji, in sicer Trafficware Synchro 7 in PTV Vistro 5.0. Osnovne lastnosti obeh uporabljenih programskih orodij so predstavljene v nadaljevanju.

7.1 Programsko orodje Synchro

Programski paket Synchro Plus, ameriškega proizvajalca Trafficware s sedežem v Houstonu v zvezni državi Texas, vsebuje naslednja programska orodja:

- analitično programsko orodje Synchro,
- mikrosimulacijsko programsko orodje Sim Traffic,
- programsko orodje 3D Viewer za izvedbo 3D simulacij,
- programsko orodje Sim Traffic CI, ki simulira delovanje semaforjev v realnem času.

Analitično in optimizacijsko programsko orodje Synchro je namenjeno modeliranju in analiziranju semaforiziranih, nesemaforiziranih in krožnih križišč po metodah HCM (*Highway Capacity Manual*) in ICU (*Intersection Capacity Utilization*). Glavne funkcije programa so (Albeck in Husch, 2006):

- izvedba analize kapacitivnosti na podlagi enačb, ki jih predpisujeta metodi HCM in ICU,
- hitra koordinacija in optimizacija semaforjev, ki omogoča prilagajanje dolžine semafornega cikla, posameznih signalnih faz in zamikov med križišči. Na podlagi prilagoditev lahko optimiziramo krmilne programe semaforjev ter posledično zmanjšamo zamude v križiščih,
- prometno odvisno krmiljenje prometnih tokov v realnem času, kjer se cikli semaforjev, dolžine posameznih signalnih faz in zamiki spreminjajo glede na trenutne prometne zahteve,
- prikaz informativnega časovno-prostorskega diagrama, ki omogoča neposredno spreminjanje dolžin posameznih faz in zamikov med križišči na diagramu.

Rezultati oziroma mere učinkovitosti analize kapacitivnosti, ki jih poda program Synchro so:

- dolžine kolon,
- povprečne časovne zamude,
- doseženi nivoji uslug.

V sklopu magistrske naloge je bila uporabljena programska verzija Synchro 7, ki omogoča izvedbo analize kapacitivnosti na podlagi analitičnih metod HCM 2000 in ICU 2003.

Z namenom primerjave pridobljenih mer učinkovitosti, smo v sklopu magistrske naloge uporabili tudi mikrosimulacijsko programsko orodje Sim Traffic. Mikrosimulacije v programu Sim Traffic so izvedene na prometnih modelih, ki jih predhodno izdelamo v analitičnem programu Synchro. Postopki izvedbe analize kapacitivnosti in pridobivanja mer učinkovitosti se med analitičnimi in mikrosimulacijskimi programskimi orodji bistveno razlikujejo. Osnovne lastnosti in razlike posameznih programskih orodij so podrobneje razložene v poglavju 2.2 (Delitev orodij za analizo prometa, str. 4). Mikrosimulacije lahko s pomočjo programa 3D Viewer prikažemo v 3D obliki, pri tem pa uporabimo 3D modele, ki jih ima program prednaložene v knjižnici (3D modeli stavb in ostale prometne infrastrukture).

Programski orodji Synchro in Sim Traffic sta del istega programskega paketa in ju je zato smiselno uporabljati vzajemno.

7.2 Programsko orodje Vistro

Analitično programsko orodje Vistro 5.0, nemškega proizvajalca programske opreme PTV Group, je podobno kot programsko orodje Synchro namenjeno modeliranju, analiziranju in optimiziranju semaforiziranih, nesemaforiziranih in krožnih križišč po metodah HCM (*Highway Capacity Manual*) in ICU (*Intersection Capacity Utilization*). Za razliko od programa Synchro 7, ki omogoča izvedbo analize kapacitivnosti po metodah HCM 2000 in ICU 2003, so v program Vistro vgrajene tudi druge analitične metode za izvedbo analize kapacitivnosti, in sicer:

- metoda HCM 2000,
- metoda HCM 2010,
- metoda HCM 6th Edition,
- metoda Circular 212,
- metoda ICU,
- metode Kimber.

Program PTV Vistro 5.0 omogoča izdelavo prometnega modela z naslednjimi omejitvami:

- velikost prometne mreže (do 400 con, 2500 križišč in 6000 povezav oziroma linkov),
- geometrija križišč (največ osemkraka križišča),
- semaforji (krmilni programi z do 4 ringi oziroma vrsticami in 8 mejami),
- scenariji (neomejeno število scenarijev).

Glavne funkcije analitičnega programskega orodja Vistro 5.0 so (PTV Vistro User Manual, 2017):

- izdelava analize kapacitivnost semaforiziranih in nesemaforiziranih križišč na podlagi izbrane analitične metode ter prikaz rezultatov oziroma mer učinkovitosti (zamude, dolžine kolon in nivoji uslug),
- optimizacija krmilnih programov na posameznih križiščih oziroma na vseh križiščih znotraj prometne mreže. Program omogoča prilagajanje dolžine semafornega cikla, spreminjanje dolžin posameznih signalnih faz in zamikov med križišči,
- planiranje prometnih tokov (generacije in distribucije potovanj),
- izdelava poljubnega števila scenarijev, kar omogoča enostaven pregled vseh izvedenih analiz na enem mestu,
- grafični prikaz rezultatov oziroma mer učinkovitosti na prometnem modelu,
- izdelava standardiziranega poročila, ki vsebuje vse potrebne podatke in rezultate, ki jih v sklopu analize pridobimo,
- grafični prikaz časovno-prostorskega diagrama, ki omogoča neposredno direktno spreminjanje dolžin posameznih semafornih faz in zamikov med križišči na diagramu,
- hiter izvoz prometnega modela v mikrosimulacijski program PTV Vissim, ki omogoča izdelavo bolj podrobnih prometnih analiz.

Za izdelavo celovitih prometnih analiz podjetje PTV Group priporoča souporabo naslednjih programov:

- analitično programsko orodje PTV Vistro,
- mikrosimulacijsko programsko orodje PTV Vissim,
- makroskopsko programsko orodje PTV Visum, ki je namenjen planiranju prometnih tokov (generiranje in distribuiranje potovanj).

Vsa tri programska orodja so med seboj kompatibilna in omogočajo enostavno izmenjavo datotek oziroma prometnih modelov. Analitično programsko orodje PTV Vistro ima vgrajeno funkcijo, ki omogoča predogled mikrosimulacije v programu PTV Vissim, kljub temu da sta programski orodji med seboj popolnoma ločeni in nista del istega programskega paketa.

7.3 Primerjava programskih orodij

V sklopu magistrske naloge smo pridobili dve tuji študiji, v sklopu katerih so bile na primerih semaforiziranih križišč izvedene primerjalne analize mer učinkovitosti v različnih programskih orodjih, med drugim tudi v programih Synchro in Vistro. Osnovne ugotovitve, ki smo jih pridobili v sklopu analize križišč na Tržaški cesti v Ljubljani, smo primerjali z ugotovitvami primerjalnih analiz, izvedenih na primeru križišč v turškem mestu Ankara in v mestu Chapel Hill v Severni Karolini (ZDA).

Povzetki rezultatov prometne analize, izvedene na primeru treh semaforiziranih križišč v mestu Chapel Hill (S. Johari, 2016) so prikazani v Preglednici 18 in na Sliki 11:

Preglednica 18: Povprečne zamude pri analizi semaforiziranih križišč v mestu Chapel Hill (S. Johari, 2016)

POVPREČNE ZAMUDE [s] - CHAPEL HILL					
Programsko orodje / Smer vožnje	**Field Data**	**Vissim**	**TransModeler**	**Synchro**	**Vistro**
križišče US 15-501 - Sage Rd.					
EB Levo	77,0	75,8	110,3	92,8	460,0
WB Levo	71,1	97,0	136,0	88,4	90,0
križišče US 15-501 - Service Rd.					
WB Levo	107,3	86,2	102,9	101,3	93,6
WB Naravnost	5,3	8,1	9,6	8,7	10,1
EB Levo	84,9	69,5	119,0	100,7	94,0
EB Naravnost	0,3	2,1	22,4	1,0	7,4
križišče US 15-501 - Lakeview Dr.					
WB Levo	56,9	78,4	145,9	104,5	93,0
EB Levo	54,0	64,9	89,5	64,6	90,3
WB Naravnost	4,7	12,1	31,6	12,2	14,7

Intersection / Movement		Field Data (ft.)	VISSIM (ft.)	TransModeler (ft.)	Synchro (ft.)	SimTraffic (ft.)	VISTRO (ft.)
US 15-501 @ Sage Rd. WB Left	Average	219	188*	84	122	136	111
	Max	375	729 *	238	-	323	-
US 15-501 @ Service Rd. EB Left	Average	116	36*	72	123	106	109
	Max	225	191*	163	-	206	-
US 15-501 SB @ Erwin Rd. WB Thru	Average	39	1	30	116	104	134
	Max	125	51	117	-	194	-
US 15-501 NB @ Europa Dr. EB Thru	Average	209	4	78	106	76	92
	Max	400	142	190	-	186	-

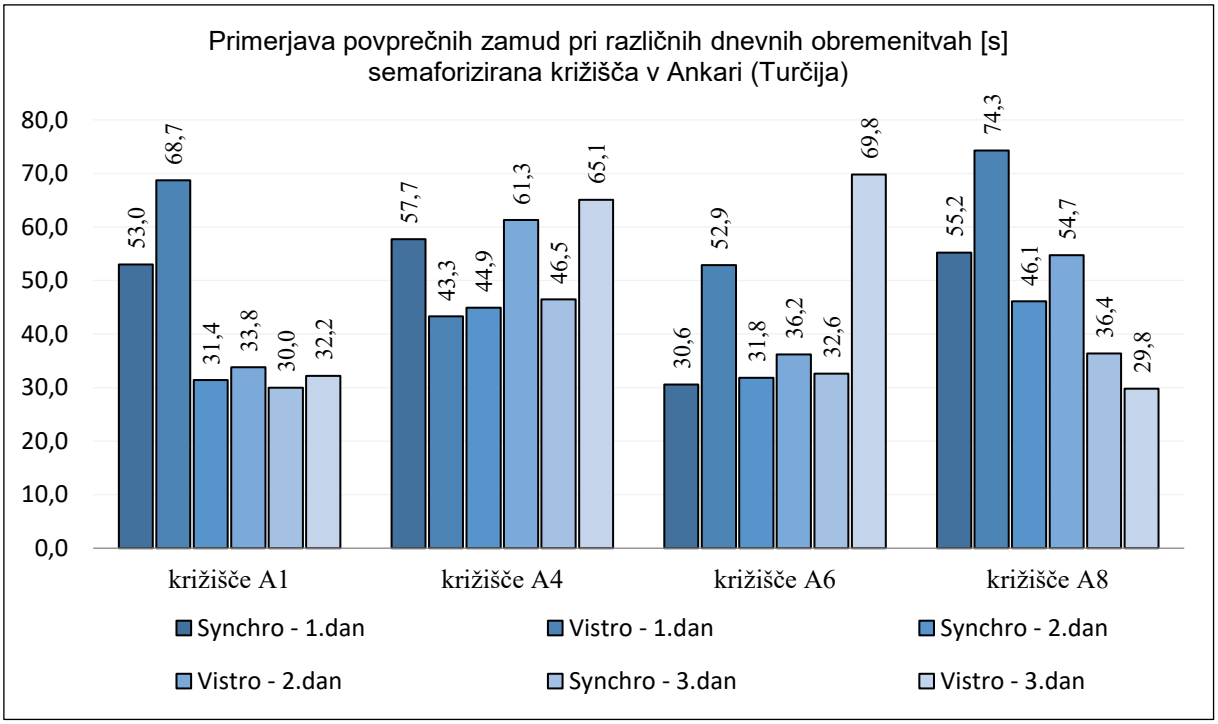
Slika 11: Dolžine kolon pri analizi semaforiziranih križišč v mestu Chapel Hill (S. Johari, 2016)

Na podlagi rezultatov, ki so bili pridobljeni v sklopu prometne analize semaforiziranih križišč v mestu Chapel Hill (S. Johari, 2016), lahko ugotovimo, da se pri analizi mer učinkovitosti v programskih orodjih Synchro in Vistro pojavijo odstopanja, ki so opazna predvsem v primeru analize voznih pasov za levo zavijanje ter v primeru večjih povprečnih zamud (večja nasičenost križišč).

V sklopu zgoraj opisane prometne študije je bilo ugotovljeno, da se na podlagi pridobljenih rezultatov oziroma mer učinkovitosti ne more določiti, katero programsko orodje je najučinkovitejše, za doseganje natančnih rezultatov pa je ključna predvsem ustrezna kalibracija vhodnih podatkov oziroma parametrov.

V ugotovitvah je izpostavljeno tudi dejstvo, da se v programu Vistro še vedno pojavljajo programske napake (ang. *bugs*), ugotovljeno pa je bilo tudi, da je programsko orodje Vistro, v fazi optimizacije signalnih naprav, precej bolj prilagodljivo kot ostala primerljiva orodja.

Odstopanja pri analizi mer učinkovitosti v programskih orodjih Synchro in Vistro lahko potrdimo tudi s prometno analizo na primeru semaforiziranih križišč v turškem mestu Ankara (Kazemi Afshar, 2015). Povzetek te študije je prikazan na Grafikonu 1:



Grafikon 1: Primerjava povprečnih zamud na semaforiziranih križiščih v Ankari (Kazemi Afshar, 2015)

Na podlagi rezultatov prometne analize štirih semaforiziranih križišč v mestu Ankara lahko ugotovimo, da se po izvedeni analizi kapacitivnosti v programskih orodjih Synchro in Vistro pojavijo večje razlike v povprečnih zamudah na nivoju celotnih križišč, pri čemer v nekaterih primerih odstopajo vrednosti v programu Synchro, v drugih primerih pa vrednosti v programu Vistro.

Ugotovitve, ki smo jih pridobili v sklopu tujih prometnih študij, smo v nadaljevanju preverili na primeru obravnavanih križišč na Tržaški cesti v Ljubljani, glavne podobnosti in razlike v ugotovitvah pa smo podrobneje predstavili v zaključku magistrske naloge.

8 PROMETNI MODELI

Na osnovi predhodno pridobljenih prometnih in geometrijskih podatkov, so bili v programskih orodjih Trafficware Synchro 7 in PTV Vistro 5.0 izdelani prometni modeli obravnavanih križišč. V nadaljevanju smo na podlagi prometnih modelov izvedli analizo kapacitivnosti po metodi HCM 2000, ki je vgrajena v obe uporabljeni programski orodji in omogoča izvedbo neposredne in verodostojne primerjave vseh pridobljenih mer učinkovitosti na obravnavanih križiščih.

V fazi priprave prometnih modelov smo ugotavljali podobnosti in razlike med obema uporabljenima programoma ter prednosti in pomanjkljivosti enega programa v odnosu do drugega. Postopek priprave prometnega modela je v obeh programskih orodjih enak, in zahteva izvedbo naslednjih korakov:

- zasnova prometne mreže,
- vnos podatkov o značilnostih cestišča,
- vnos podatkov o prometnih obremenitvah,
- vnos podatkov o značilnostih signalnih naprav (semaforizirana križišča) oziroma podatkov o prometni ureditvi na nesemaforiziranih križiščih.

Prometni modeli obravnavanih križišč, ki smo jih v sklopu magistrske naloge izdelali v programskih orodjih Synchro 7 in Vistro 5.0 so podrobneje predstavljeni v nadaljevanju.

8.1 Zasnova prometne mreže

Modeliranje prometne mreže v uporabljenih analitičnih programskih orodjih temelji na osnovi link-node metode. Linki oziroma povezave so linijski elementi, ki predstavljajo cestišče in jih med risanjem prometne mreže poljubno oblikujemo (z ukrivljanjem linkov opišemo dejanski potek trase). Na območju križanja dveh linkov se ustvari node oziroma točka, ki predstavlja križišče.

V fazi zasnove prometnega modela se določi samo osnovna geometrija prometne mreže (lokacija križišč in ustrezne povezave med njimi), podrobnejši geometrijski podatki, kot so izbira tipa križišča in določitev števila voznih pasov, pa se določijo v naslednjih fazah izdelave modela.

8.2 Podatki o značilnostih cestišča

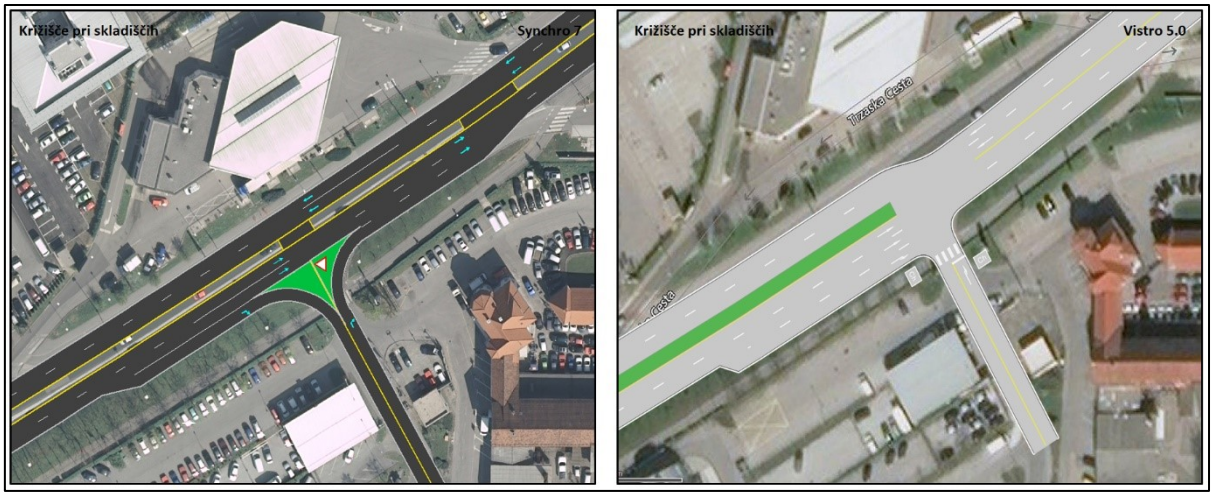
S podatki o značilnostih cestišča določimo natančno geometrijo prometnih modelov, na podlagi katerih smo v nadaljevanju izvedli analizo kapacitivnosti obravnavanih križišč.

Na podlagi vhodnih geometrijskih podatkov, ki se v obeh uporabljenih programskih orodjih vpisujejo v za to pripravljeno tabelo, se izračunajo vplivni faktorji, ki predstavljajo osnovo za določevanje nasičenih prometnih tokov posameznih skupin voznih pasov, posledično pa vplivajo tudi na mere učinkovitosti obravnavanih križišč. Vplivni faktorji, ki se določijo na podlagi geometrijskih podatkov, so natančneje predstavljeni v poglavju 3.1.4 (Določevanje nasičenega prometnega toka, str. 10).

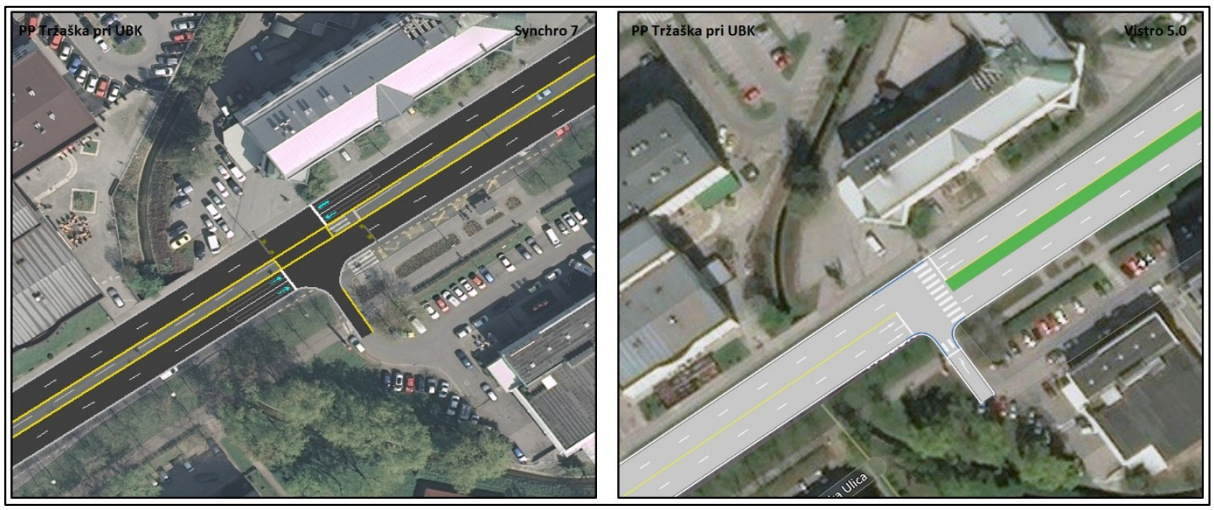
V uporabljenih programskih orodjih se geometrija prometnih modelov določi na podlagi podatkov o številu in širini voznih pasov, vzdolžnih naklonih in dovoljenih hitrostih na posameznih priključkih. Poleg osnovnih geometrijskih podatkov je treba določiti tudi število in dolžine razvrstilnih pasov oziroma žepov ter geometrijo posebnih kanaliziranih voznih pasov.

Prometni modeli posameznih obravnavanih križišč, ki smo jih v sklopu magistrske naloge izdelali v programskih orodjih Synchro 7 in Vistro 5.0, so prikazani na Slikah 12, 13, 14 in 15:

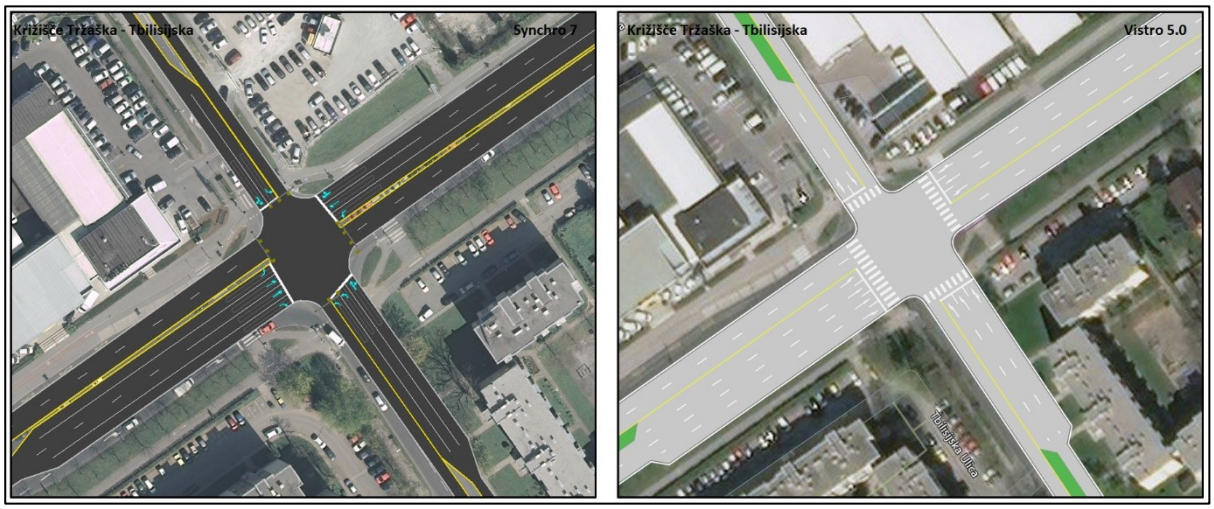
Slika 12: Prometna modela križišča Dolgi most v programih Synchro 7 (levo) in Vistro 5.0 (desno)



Slika 13: Prometna modela križišča pri skladiščih v programih Synchro 7 (levo) in Vistro 5.0 (desno)



Slika 14: Prometna modela PP Tržaška pri UBK v programih Synchro 7 (levo) in Vistro 5.0 (desno)



Slika 15: Prometna modela križišča Tržaška - Tbilisijska v programih Synchro 7 (levo) in Vistro 5.0 (desno)

Prometni modeli celotnega obravnavanega območja, izdelani v programih Synchro 7 in Vistro 5.0, so prikazani v Prilogi E. Razlike in pomanjkljivosti uporabljenih programskih orodij, ki smo jih podrobneje analizirali v fazi priprave prometnih modelov, pa so predstavljene v poglavju 8.5 (Povzetek razlik pri pripravi prometnih modelov v programih Synchro 7 in Vistro 5.0, str. 53).

8.3 Podatki o prometnih obremenitvah

Na podlagi podatkov o prometnih obremenitvah se določijo dejanski prometni tokovi v izbranem obdobju analiziranja ter nekateri vplivni faktorji za izračun nasičenih prometnih tokov (vplivni faktorji tovornih vozil, parkiranja vozil in ustavljanja avtobusov). Podatke o prometnih obremenitvah se v obeh uporabljenih programskih orodjih vnaša v posebno tabelo, in sicer za vsako smer vožnje posebej (levo, naravnost in desno), ne glede na predhodno določene skupine voznih pasov.

Vhodne prometne obremenitve so v obeh uporabljenih programskih orodjih preračunane na enoto EOV in se nanašajo na obdobje ene ure. Prometne obremenitve, ki smo jih uporabili v analizi, smo pridobili na podlagi štetja prometa, nanašajo pa se na obdobje popoldanske prometne konice med 15:30 in 16:30. Vhodne prometne obremenitve so prikazane v Preglednici 16 (Končne prometne obremenitve na obravnavanem območju, str. 40). Obdobje analiziranja je pri izvedbi analize kapacitivnosti po metodi HCM običajno dolgo 15 minut, zato je treba prometne obremenitve (urni prometni tok) prilagoditi na zahtevano obdobje (15-minutni konični prometni tok). Prilagoditve izvedemo tako, da urni prometni tok delimo s faktorji konične ure (*FKU*). Faktorji konične ure, s katerimi smo prilagodili uri prometni tok, so bili predhodno izračunani na podlagi enačbe (2) in so prikazani v Prilogi D.6.

Prilagojeni 15-minutni prometni tok predstavlja dejanski prometni tok, ki je osnova za izračun kapacitete po metodi HCM. V primeru, da je obdobje analiziranja podaljšano na eno uro, se prilagoditve s faktorji konične ure ne izvedejo (v tem primeru je dejanski prometni tok enak urnemu). Dejanski prometni tok lahko prilagodimo tudi s faktorjem rasti prometa. Pri projektiranju novih cest oziroma križišč moramo predvideti prometne obremenitve na koncu planskega obdobja (cca. 20 let), ob upoštevanju ustrezne letne rasti prometa. Ker smo v sklopu magistrske naloge analizirali obstoječe stanje obravnavanega območja, faktorjev rasti prometa, pri določevanju dejanskih prometnih tokov, nismo upoštevali.

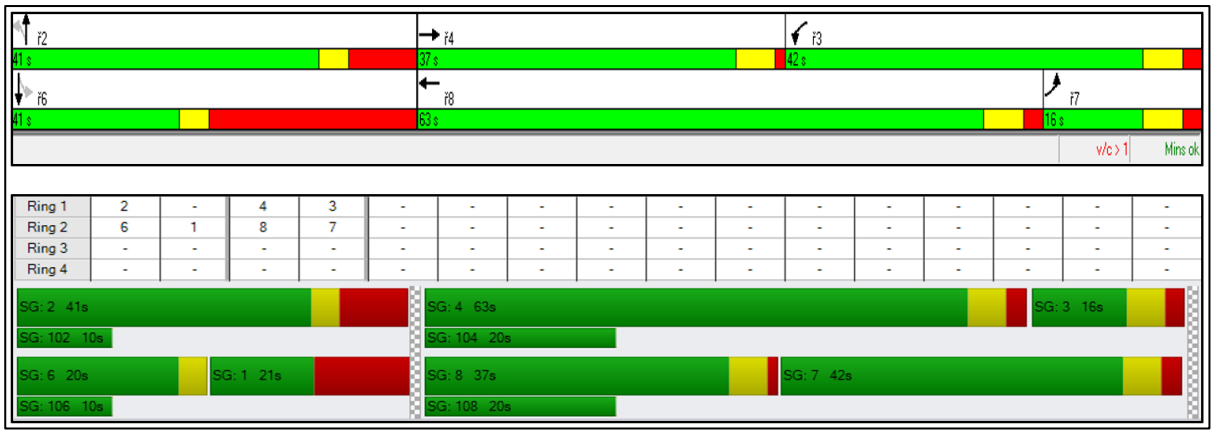
V tabeli prometnih obremenitev je smiselno določiti tudi število konfliktnih pešcev in kolesarjev. Podatke o številu konfliktnih pešcev in kolesarjev, ki so bili uporabljeni v analizi, smo pridobili v času štetja prometa, prikazani pa so v Preglednici 17 (Podatki o pešcih in kolesarjih, str.42). Na podlagi števila konfliktnih pešcev in kolesarjev se določita vplivna faktorja pešcev in kolesarjev za levo oziroma desno zavijanje, ki se upoštevata v izračunu nasičenih prometnih tokov.

8.4 Podatki o značilnostih signalnih naprav

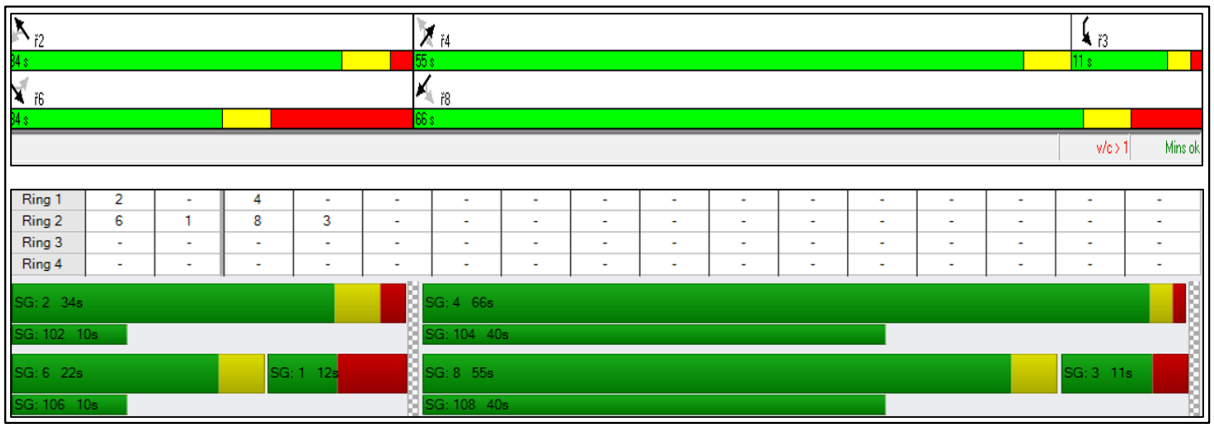
Na podlagi podatkov o značilnostih signalnih naprav definiramo način vodenja prometa skozi križišče. Na semaforiziranih križiščih določimo krmilni program in vse ostale parametre, ki so potrebni za optimalno delovanje semaforjev, na nesemaforiziranih križiščih pa vodenje prometnih tokov uredimo z ustreznimi prometnimi znaki oziroma signalizacijo.

V primeru semaforiziranih križišč je treba v obeh uporabljenih programskih orodjih določiti dolžino semafornega cikla in število signalnih faz na vsakem kraku obravnavanega križišča. V nadaljevanju se za vsako signalno fazo določi trajanje (efektivnih) zelenih časov ter dolžini intervalov »rumeno« in »vse rdeče«. V obeh uporabljenih programskih orodjih lahko definiramo tudi časovne zamike signalnih faz, s čimer zagotovimo optimalno vodenje prometa vzdolž obravnavane cestne arterije.

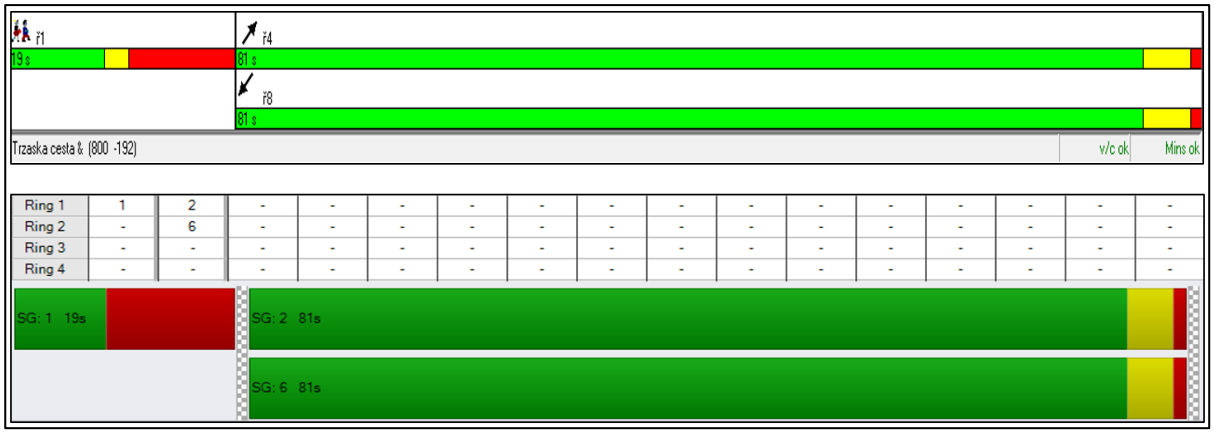
Dolžine signalnih faz, ki jih določimo v tabeli, se samodejno prenesejo tudi na grafični prikaz krmilnega programa. Povezava deluje tudi v obratni smeri, saj lahko dolžine signalnih faz spreminjamo neposredno na krmilnem programu. Krmilni programi vseh treh semaforiziranih križišč na obravnavanem območju, izdelani v programih Synchro 7 in Vistro 5.0, so prikazani na Slikah 16, 17 in 18:



Slika 16: Krmilni program na križišču Dolgi most v programih Synchro 7 (zgoraj) in Vistro 5.0 (spodaj)



Slika 17: Krmilni program na križišču Tržaška - Tbilisijska v programih Synchro 7 (zgoraj) in Vistro 5.0 (spodaj)



Slika 18: Krmilni program na PP Tržaška pri UBK v programih Synchro 7 (zgoraj) in Vistro 5.0 (spodaj)

Postopek izračuna mer učinkovitosti nesemaforiziranih križišč se razlikuje od postopka, ki je značilen za semaforizirana križišča, posledično pa se pri izračunu uporabljajo drugi vhodni podatki. Pri analizi nesemaforiziranih križišč je treba izbrati ustrezen tip križišča (nesemaforizirano križišče) ter način vodenja prometa skozi nesemaforizirano križišče, pri čemer lahko izbiramo med prostim vključevanjem vozil (*free*), načinom, kjer je promet urejen s prometnim znakom »Križišče s prednostno cesto« (*yield*) in načinom kjer je promet urejen s prometnim znakom »Ustavi« (*stop*). Na podlagi teh podatkov uporabljeni programski orodji določita kritični razmak med vozili in čas sledenja, ki sta osnovna parametra za izračun mer učinkovitosti na nesemaforiziranih križiščih.

8.5 Povzetek razlik pri pripravi prometnih modelov v programih Synchro 7 in Vistro 5.0

V fazi priprave prometnih modelov smo izvedli podrobno analizo podobnosti, razlik in pomanjkljivosti obeh uporabljenih programskih orodij, ugotovitve pa so predstavljene v Preglednici 19:

Preglednica 19: Povzetek razlik pri pripravi prometnih modelov v programih Synchro 7 in Vistro 5.0

Programsko orodje	**Trafficware Synchro 7**	**PTV Vistro 5.0**
parameter	sklop: zasnova prometnega modela	
splošni vtis o programskem vmesniku	nekoliko zastarela zasnova, kljub temu dovolj funkcionalno učinkovit	modernejša zasnova, dober pregled nad vsemi funkcijami
analiza prometnega povpraševanja (generacije in distribucije potovanj)	ne omogoča	omogoča
obravnavano območje	ročno vnašanje podlog obravnavanega območja v JPEG oziroma BMP formatu	pridobivanje podlog preko spletnega servisa za prostorske podatki oz. zemljevide (Bing Maps)
parameter	sklop: podatki o značilnostih cestišča	
podatki o dolžinah povezav med križišči in potovalnih časih	določi samodejno	niso prikazani
modeliranje kanaliziranih voznih pasov	kanalizirani vozni pasovi so prikazani na prometnem modelu	kanalizirani vozni pasovi na prometnem modelu niso prikazani (prikazana samo oznaka *CH*)
modeliranje priključka kanaliziranega obvoza križišča na prednostno cesto	direktno ali preko vključevalnega pasu	samo direktno
modeliranje posebnih rumenih pasov namenjenih javnemu prometu	ne omogoča	ne omogoča
prehodi za pešce	niso prikazani	grafično prikazani

… se nadaljuje

… nadaljevanje Preglednice 19

parameter	sklop: podatki o značilnostih cestišča	
splošno o modeliranju prometnih modelov	omogoča natančno modeliranje prometnih modelov	zaradi nekaterih omejitev so prometni modeli v določenih primerih popačeni
faktorji za izračun nasičenih prometnih tokov	razlike v matematičnih modelih za izračun vplivnega faktorja levih zavijalcev v primeru podaljšane leve faze, ostali vplivni faktorji določeni na podlagi istih enačb	
pregled nad faktorji za izračun nasičenih prometnih tokov	faktorji so navedeni v različnih preglednicah, nekateri v tabelah sploh niso navedeni; slabši pregled	vsi faktorji so prikazani v enotni preglednici; dober pregled
parameter	sklop: podatki o prometnih obremenitvah	
podatki o pešcih in kolesarjih	upoštevajo se konfliktni pešci in kolesarji pri levem oziroma desnem zavijanju	upoštevajo se pešci, ki prečkajo obravnavan priključek ter konfliktni desni kolesarji
izračun dejanskih prometnih tokov	na podlagi urnih prometnih obremenitev, faktorjev konične ure in faktorjev rasti prometa	enako kot pri Synchro 7 + faktor osnovnih obremenitev, dodatni faktor za nezabeležene vplive in prometni tok v desno ob rdeči luči (*RTOR*)
parameter	sklop: podatki značilnostih semaforiziranih križišč	
časovni zamiki med križišči	določitev vodilnega križišča, podatki o časovnem zamiku, referenčni fazi in delu faze na katerega se zamik nanaša	samo podatki o časovnem zamiku in delu faze na katerega se zamik nanaša
optimizacija krmilnih programov	na celotnem območju ali za posamezno cono	za posamezno koordinacijsko skupino
signalne faze za pešce in kolesarje	v krmilnem programu niso prikazane	prikazane v krmilnem programu
preglednost tabel	podatki o značilnostih semaforjev pomešani z merami učinkovitosti križišča; slabša preglednost	podatki o značilnostih semaforjev in mere učinkovitosti v ločenih preglednicah; boljša preglednost
povezava podatkov v tabelah s krmilnim programom	direktna obojestranska povezava	povezava preko tabele v kateri določimo vrstni red signalnih faz in meje med fazami
modeliranje signalne faze, pri kateri so zeleni časi na nasprotnih krakih različni	s podaljšanjem intervala "vse rdeče"	z dodatno nekoordinirano fazo, ki ji določimo ustrezno dolžino zelenega časa
modeliranje podaljšane leve faze	z dodatno fazo, ki vpliva zgolj na leve zavijalce	z dodatno nekoordinirano fazo, s katero pa vplivamo tudi na druge smeri vožnje
modeliranje tipke za aktivacijo signalne faze za pešce	omogoča	ne omogoča
parameter	sklop: podatki značilnostih nesemaforiziranih križišč	
način vodenja prometa skozi križišče	prosto vključevanje vozil, prometni znak za križišče/priključek s prednostno cesto (*yield*) in prometni znak ustavi (*stop*)	prosto vključevanje vozil in prometni znak ustavi (*stop*)

9 ANALIZA MER UČINKOVITOSTI NA OBRAVNAVANEM OBMOČJU

Z analizo kapacitivnosti, ki smo jo izvedli na podlagi prometnih modelov, izdelanih v analitičnih programskih orodjih Synchro 7 in Vistro 5.0, smo pridobili mere učinkovitosti obravnavanih križišč. Obe uporabljeni analitični programski orodji podajata iste mere učinkovitosti posameznih križišč, in sicer povprečne zamude, nivoje uslug ter dolžine kolon. V sklopu magistrske naloge je bila izvedena primerjalna analiza mer učinkovitosti obeh programov, s katero smo ugotavljali podobnost oziroma primerljivost rezultatov, ob enem pa smo analizirali tudi razloge za pojav odstopanj. Mere učinkovitosti, ki smo jih v sklopu primerjalne analize podrobneje analizirali so:

- povprečne zamude za posamezne skupine voznih pasov in povprečne zamude na nivoju celotnih priključkov oziroma krakov,
- doseženi nivoji uslug na nivoju posameznih skupin voznih pasov in celotnih priključkov,
- povprečne zamude in nivoji uslug celotnih križišč (na podlagi analitične metode HCM 2000),
- nivoji uslug celotnih križišč (na podlagi analitične metode ICU 2003),
- dolžine kolon za posamezne skupine voznih pasov (različne percentilne vrednosti dolžin).

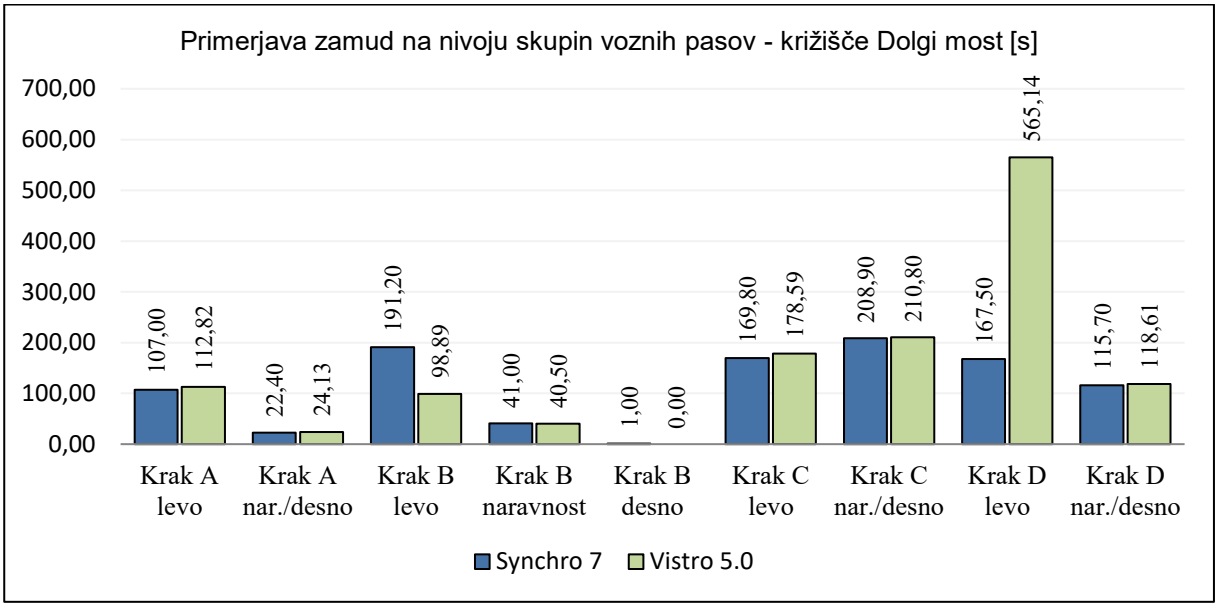
V sklopu magistrske naloge je bila izvedena tudi primerjava mer učinkovitosti med programoma Synchro 7 in Sim Traffic, na podlagi katere smo ugotavljali podobnost oziroma primerljivost rezultatov med analitičnim in mikrosimulacijskim programskim orodjem.

9.1 Povprečne zamude in doseženi nivoji uslug

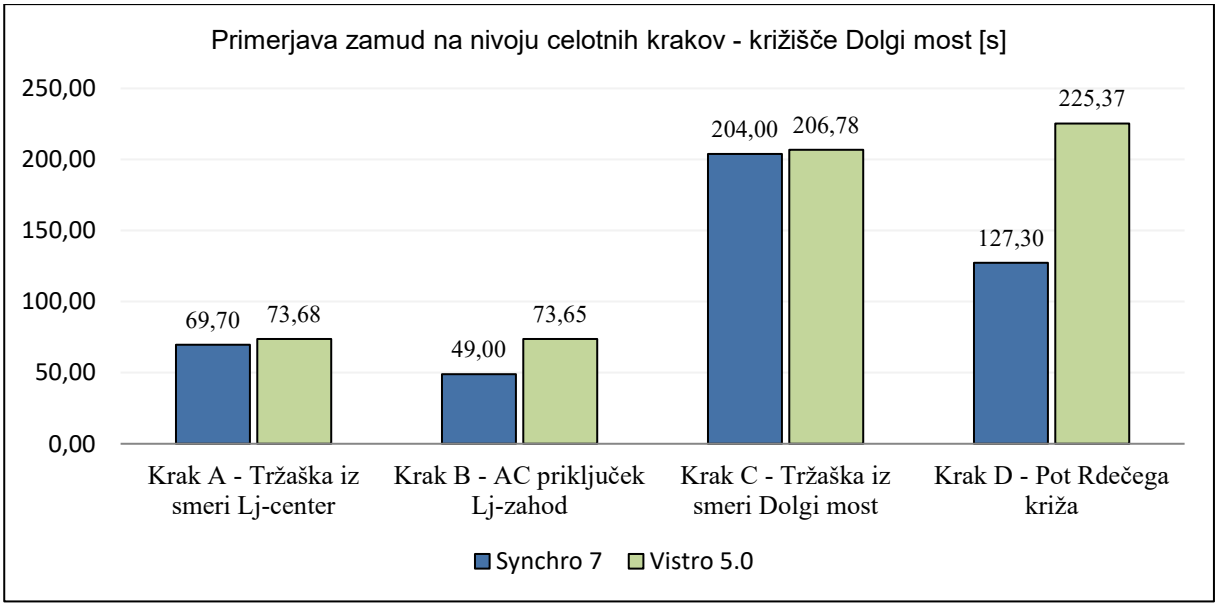
V programskih orodjih Synchro 7 in Vistro 5.0 so povprečne zamude določene na podlagi istih enačb, ki so podrobneje razložene v poglavju 3.1.8 (Določevanje zamud, str. 13). Izračunane povprečne zamude predstavljajo osnovo za določevanje nivojev uslug po metodi HCM 2000, pri čemer pa se postopka za določevanje nivojev uslug semaforiziranih in nesemaforiziranih križišč razlikujeta. Preglednica z razredi za določevanje nivojev uslug semaforiziranih križišč je prikazana v poglavju 3.1.10 (Določevanje nivojev uslug semaforiziranih križišč po metodi HCM, str. 17), preglednica za določevanje nivojev uslug nesemaforiziranih križišč pa v poglavju 3.2.4 (Določevanje nivojev uslug nesemaforiziranih križišč po metodi HCM, str. 21). V obeh uporabljenih programskih orodjih se povprečne zamude in nivoji uslug definirajo na treh nivojih, in sicer na nivoju posameznih skupin voznih pasov, na nivoju celotnih priključkov ter na nivoju celotnega obravnavanega križišča. Skupine voznih pasov so sestavljene iz posameznih voznih pasov, pri čemer postopek združevanja temelji tako na geometriji obravnavanega križišča, kot tudi na porazdelitvi prometnih obremenitev. V splošnem se pri izdelavi prometnih modelov uporabi najmanjše možno število skupin voznih pasov, ki ustrezno opišejo delovanje križišča. Tipični primeri skupin voznih pasov so predstavljeni v poglavju 3.1.2 (Združevanje prometnih pasov, str. 8).

9.1.1 Povprečne zamude in nivoji uslug na križišču Dolgi most

Primerjava povprečnih zamud in doseženih nivojev uslug, pridobljenih na podlagi analize kapacitivnosti v programih Synchro 7 in Vistro 5.0, je v nadaljevanju predstavljena s pomočjo preglednic in grafikonov. Primerjava povprečnih zamud na križišču Dolgi most je grafično prikazana na Grafikonih 2 in 3:



Grafikon 2: Primerjava povprečnih zamud na nivoju skupin voznih pasov (križišče Dolgi most)



Grafikon 3: Primerjava povprečnih zamud na nivoju celotnih krakov (križišče Dolgi most)

Primerjava povprečnih zamud in doseženih nivojev uslug na nivoju posameznih skupin voznih pasov in celotnih krakov na križišču Dolgi most, je prikazana tudi v Preglednici 20:

Preglednica 20: Primerjava povprečnih zamud in nivojev uslug na križišču Dolgi most

SEMAFORIZIRANO KRIŽIŠČE DOLGI MOST							
Krak	**Tržaška cesta iz smeri Lj-center (krak A)**			**AC priključek Lj-zahod (krak B)**			
Skupina voznih pasov	Levo	Nar./desno	Celoten krak	Levo	Naravnost	Desno	Celoten krak
Zamuda Synchro 7 [s]	107,00	22,40	69,70	191,20	41,00	1,0	49,00
Zamuda Vistro 5.0 [s]	112,82	24,13	73,68	98,89	40,50	0,0	73,65
Relativna razlika [%]	5,4	7,7	5,7	93,3	1,2	/	50,3
Nivo uslug Synchro 7	F	C	E	F	D	A	D
Nivo uslug Vistro 5.0	F	C	E	F	D	/	E
Krak	**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most (krak C)**			**Pot Rdečega križa (krak D)**			
Skupina voznih pasov	Levo	Nar./desno	Celoten krak	Levo	Naravnost/desno		Celoten krak
Zamuda Synchro 7 [s]	169,80	208,90	204,00	167,50	114,70		127,30
Zamuda Vistro 5.0 [s]	178,59	210,80	206,78	565,14	118,61		225,37
Relativna razlika [%]	5,2	0,9	1,4	237,4	3,4		77,0
Nivo uslug Synchro 7	F	F	F	F	F		F
Nivo uslug Vistro 5.0	F	F	F	F	F		F

Na štirikrakem križišču Dolgi most smo vozne pasove združili v 9 skupin voznih pasov, pri čemer smo na krakih A, C in D določili po dve skupini voznih pasov, na kraku B pa tri. Primerjalno analizo povprečnih zamud in nivojev uslug na križišču Dolgi most smo razdelili na dva dela, in sicer smo v prvem delu izvedli analizo obeh krakov vzdolž Tržaške ceste (kraka A in C), v drugem delu pa analizo krakov, ki potekata prečno na Tržaško cesto (kraka B in D).

Na krakih vzdolž Tržaške ceste sta v krmilnem programu semaforjev določeni dve signalni fazi, in sicer signalna faza za vožnjo naravnost in desno ter varovana signalna faza za levo zavijanje. Na podlagi mer učinkovitosti, ki smo jih pridobili s programoma Synchro 7 in Vistro 5.0, smo ugotovili, da se v primeru ločene signalne faze za leve zavijalce, povprečne zamude na nivoju izbranih skupin voznih pasov, v obeh programskih orodjih zelo ujemajo (tako pri vožnji v levo, kot tudi pri vožnji naravnost in desno). Kot je razvidno iz Preglednice 20, se zamude na krakih A in C razlikujejo za največ 7,7 %, povprečno pa za okrog 5 %. Podobno kot pri posameznih skupinah voznih pasov, se povprečne zamude na krakih A in C ujemajo tudi na nivoju celotnih priključkov (Grafikon 3), kjer so ugotovljena odstopanja med uporabljenima programoma znotraj 6 %. Ujemanje povprečnih zamud posledično vpliva tudi na dosežene nivoje uslug, ki so na krakih vzdolž Tržaške ceste (kraka A in C), v obeh uporabljenih programskih orodjih, enaki. Odstopanja med programoma Synchro 7 in Visto 5.0 lahko v tem primeru pripišemo razlikam v zaokroževanju vhodnih podatkov in v izračunih vplivnih faktorjev v fazi priprave prometnih modelov. Kljub ujemanju povprečnih zamud pa lahko generalno ugotovimo, da so na krakih A in C, vrednosti povprečnih zamud v programu Vistro 5.0 nekoliko večje kot v programu Synchro 7.

Na krakih B (AC priključek Lj-zahod) in D (Pot Rdečega križa) je v krmilnem programu semaforjev določena ena signalna faza, v času katere je omogočena vožnja vozil v vse tri smeri. Kot je razvidno iz Grafikona 2, se lahko v tem primeru med programoma Synchro 7 in Vistro 5.0 pojavijo občutne razlike pri določevanju povprečnih zamud. Razlike v povprečnih zamudah so opazne predvsem pri skupinah voznih pasov za levo zavijanje, pri vožnji naravnost in desno pa so povprečne zamude tudi v tem primeru primerljive (na krakih B in D se v povprečju razlikujejo za 3 %). Posebnost analize križišča Dolgi most predstavlja določevanje povprečnih zamud pri zavijanju v desno na kraku B, kjer so desni zavijalci kanalizirani. V tem primeru program Vistro 5.0 desnih zavijalcev v analizi ne upošteva, posledično pa povprečne zamude niso določene, program Synchro 7 pa za to skupino voznih pasov določi zgolj minimalno zamudo in nivo uslug A. Zaradi razlik v postopku obravnave kanaliziranih desnih zavijalcev, primerjava med programoma v tem primeru ni smiselna. V primeru levih zavijalcev, so na obeh obravnavanih krakih opazne velike razlike v povprečnih zamudah, pri čemer so na kraku B, kjer je zeleni čas semaforjev daljši kot na kraku D, povprečne zamude v programu Synchro 7 za 93,3 % večje kot v programu Vistro 5.0, na kraku D pa je situacija ravno obratna, in sicer so zamude v programu Vistro 5.0 za 237,4 % večje kot v programu Synchro 7. V analizi je bilo ugotovljeno, da so tovrstna odstopanja posledica razlik pri določevanju vplivnega faktorja za leve zavijalce, ki ga obe uporabljeni programski orodji upoštevata v izračunu nasičenih prometnih tokov oziroma pri določevanju mer učinkovitosti. (nasičeni prometni tokovi se upoštevajo v izračunu kapacitete in razmerja *v/c,* ki predstavljata osnovo za določevanje povprečnih zamud).

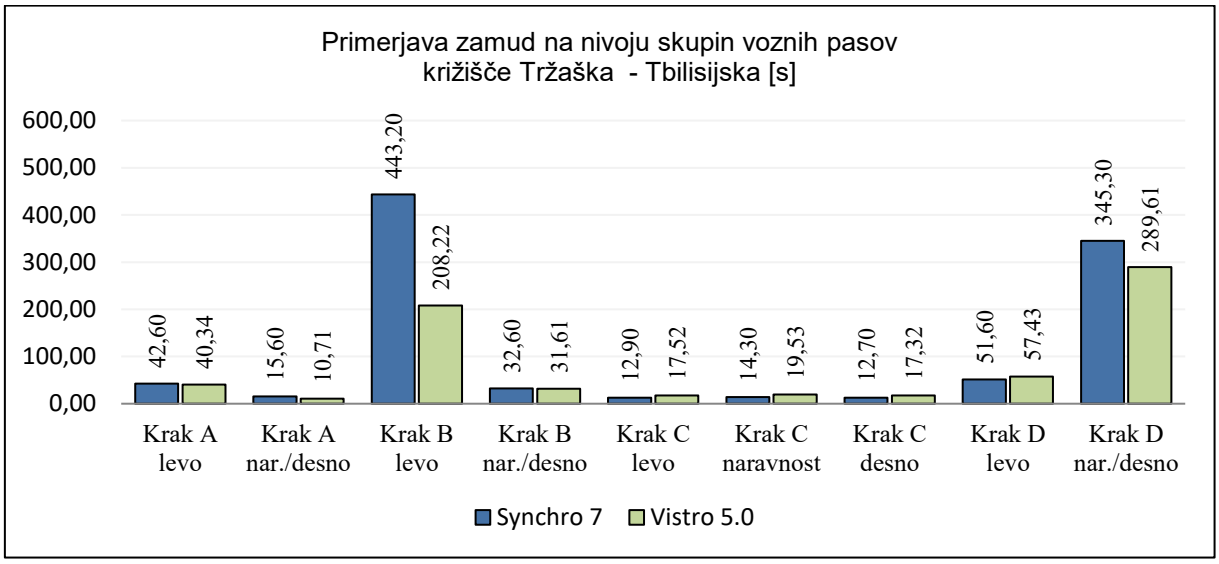
Vplivna faktorja za leve zavijalce se v programih Synchro 7 in Vistro 5.0 bistveno razlikujeta, tako je v programu Synchro 7 vplivni faktor F_{LT} na kraku D enak 0,579, v programu Vistro 5.0 pa je izračunani faktor na kraku D skoraj polovico manjši (F_{LT} = 0,320). Vrednost faktorja za leve zavijalce vpliva na izračun razmerja *v/c*, ki je v tem primeru, v programu Vistro 5.0 precej večje kot v Synchro 7, posledično pa so v tem programu večje tudi povprečne zamude. Odstopanja pri izračunu vplivnih faktorjev za leve zavijalce so posledica razlik v pripravi krmilnih programov v fazi izdelave prometnih modelov.

Razlike v povprečnih zamudah se pojavijo tudi na nivoju celotnih krakov B in D, kjer se le-te izračunajo na podlagi povprečnih zamud posameznih skupin voznih pasov in deleža vozil v posamezni skupini, v odvisnosti od celotnega števila vozil na obravnavanem kraku. Povprečne zamude na kraku D so v programu Vistro 5.0 za 77 % večje kot v programu Synchro 7, kar je posledica dejstva, da so na tem kraku povprečne zamude v programu Vistro 5.0 večje tudi na nivoju skupin voznih pasov. Na kraku B so povprečne zamude v skupini voznih pasov za levo zavijanje večje v programu Synchro 7, kljub temu pa so skupne povprečne zamude tega kraka za 50 % večje v programu Vistro 5.0. Takšno stanje je posledica že omenjenih razlik v postopku obravnave kanaliziranih desnih zavijalcev na kraku B.

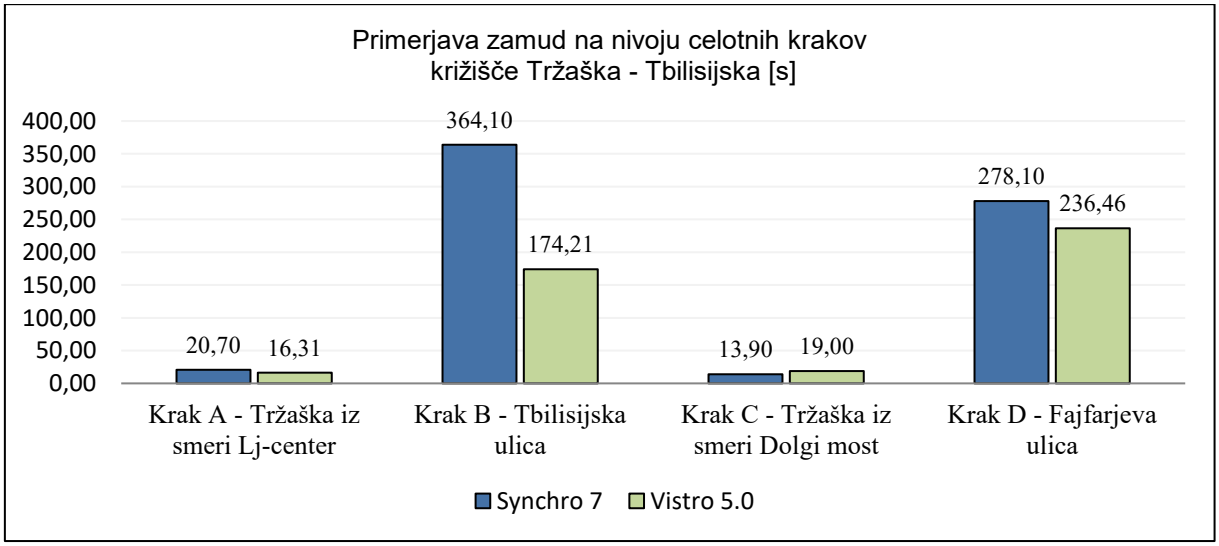
Program Synchro 7 pri izračunu skupnih povprečnih zamud na kraku B upošteva tudi kanalizirane desne zavijalce, v programu Vistro 5.0 pa so kanalizirani zavijalci iz izračuna izvzeti, posledično pa so večje tudi skupne povprečne zamude na obravnavanem kraku. Kljub razlikam v povprečnih zamudah so doseženi nivoji uslug na krakih B in D, v obeh uporabljenih programih enaki, odstopanje se pojavi le v primeru nivoja uslug celotnega kraka B, kjer je v programu Synchro 7 dosežen nivo uslug D, v programu Vistro 5.0 pa nivo uslug E (v tem primeru so povprečne zamude na meji med razredoma D in E).

9.1.2 Povprečne zamude in nivoji uslug na križišču Tržaška - Tbilisijska

Primerjava povprečnih zamud na križišču Tržaška - Tbilisijska je prikazana na Grafikonih 4 in 5:



Grafikon 4: Primerjava povprečnih zamud za posamezne skupine voznih pasov (križišče Tržaška - Tbilisijska)



Grafikon 5: Primerjava povprečnih zamud na posameznih krakih (križišče Tržaška - Tbilisijska)

Primerjava povprečnih zamud in doseženih nivojev uslug na nivoju posameznih skupin voznih pasov in celotnih krakov na križišču Tržaška - Tbilisijska, je prikazana tudi v Preglednici 21:

Preglednica 21: Primerjava povprečnih zamud in nivojev uslug na križišču Tržaška - Tbilisijska

SEMAFORIZIRANO KRIŽIŠČE TRŽAŠKA - TBILISIJSKA							
Krak	**Tržaška cesta iz smeri Lj-center (krak A)**				**Tbilisijska ulica (krak B)**		
Skupina voznih pasov	Levo	Naravnost/desno		Celoten krak	Levo	Nar./desno	Celoten krak
Zamuda Synchro 7 [s]	42,60	15,60		20,70	443,20	32,60	364,10
Zamuda Vistro 5.0 [s]	40,34	10,71		16,31	208,22	31,61	174,21
Relativna razlika [%]	5,60	45,66		26,92	112,85	3,13	109,00
Nivo uslug Synchro 7	D	B		C	F	C	F
Nivo uslug Vistro 5.0	D	B		B	F	C	F
Krak	**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most (krak C)**				**Fajfarjeva ulica (krak D)**		
Skupina voznih pasov	Levo	Nar.	Desno	Celoten krak	Levo	Nar./desno	Celoten krak
Zamuda Synchro 7 [s]	12,90	14,30	12,70	13,90	51,60	345,30	278,10
Zamuda Vistro 5.0 [s]	17,52	19,53	17,32	19,00	57,54	289,61	236,46
Relativna razlika [%]	35,81	36,57	36,38	36,69	11,51	19,23	17,61
Nivo uslug Synchro 7	B	B	B	B	D	F	F
Nivo uslug Vistro 5.0	B	B	B	B	E	F	F

Tudi na štirikrakem križišču Tržaška - Tbilisijska smo vozne pasove združili v 9 skupin voznih pasov, pri čemer smo na krakih A, B in D določili po dve skupini voznih pasov, na kraku C pa tri skupine. Semaforizirano križišče Tržaška - Tbilisijska je dvofazno, brez varovanih signalnih faz za leve zavijalce, je pa na kraku A dodana podaljšana leva signalna faza, ki za nekaj sekund podaljša možnost zavijanja v levo iz Tržaške ceste na Tbilisijsko ulico.

Zaradi podaljšane leve faze je na kraku A zeleni čas daljši kot na nasprotnem kraku C, podobna situacija pa se pojavi tudi na prečni smeri, kjer je zeleni čas na kraku B daljši kot na nasprotnem kraku D, s čimer se levim zavijalcem na bolj obremenjenem kraku B omogoči varna izpraznitev križišča. V sklopu analize posameznih skupin voznih pasov za zavijanje v levo smo ugotovili, da so povprečne zamude na krakih z daljšim trajanjem zelenih časov (kraka A in B) večje v programu Synchro 7, na ostalih dveh krakih pa so povprečne zamude večje v programu Vistro 5.0. Taka odstopanja med programoma so bila pričakovana, saj je bilo enako stanje ugotovljeno tudi na križišču Dolgi most (kraka B in D). Kljub pričakovanim odstopanjem pa lahko na križišču Tržaška - Tbilisijska, med posameznimi skupinami voznih pasov za levo zavijanje ugotovimo pomembne razlike. Iz Preglednice 21 je razvidno, da se največje razlike med programoma pojavijo na kraku B, kjer je število levih zavijalcev največje, posledično pa so na tem kraku največje tudi zamude. Povprečne zamude v programu Synchro 7 so na kraku B za 113 % večje kot v programu Vistro 5.0, na ostalih treh krakih, kjer so zamude pri levem zavijanju manjše, pa odstopanja med programoma niso tako izrazita (med 6 in 36%).

Na podlagi te ugotovitve lahko sklepamo, da se večja odstopanja med uporabljenima programoma pojavijo v primeru nasičenih prometnih tokov, v primeru manjše nasičenosti pa se povprečne zamude med programom izenačujejo.

Ne glede na ugotovljene razlike v povprečnih zamudah, ki se pojavijo med obema uporabljenima programoma, pa so doseženi nivoji uslug pri skupinah voznih pasov za levo zavijanje zelo primerljivi. Odstopanje se pojavi zgolj na kraku D, kjer se povprečne zamude gibljejo na meji dveh razredov. V tem primeru je v programu Synchro 7 dosežen nivo uslug D, v programu Vistro 5.0 pa nivo uslug E, čeprav je razlika med povprečnimi zamudami zgolj nekaj sekund.

Pri analizi posameznih skupin voznih pasov za vožnjo naravnost in desno (tako v primeru kombiniranih pasov za vožnjo naravnost in desno, kot tudi v primeru ločenih pasov), so bile na obravnavanem križišču ugotovljene večje razlike v povprečnih zamudah kot na križišču Dolgi most (maksimalna razlika med programoma na križišču Tržaška - Tbilisijska znaša 46 %, v povprečju pa okrog 30 %).

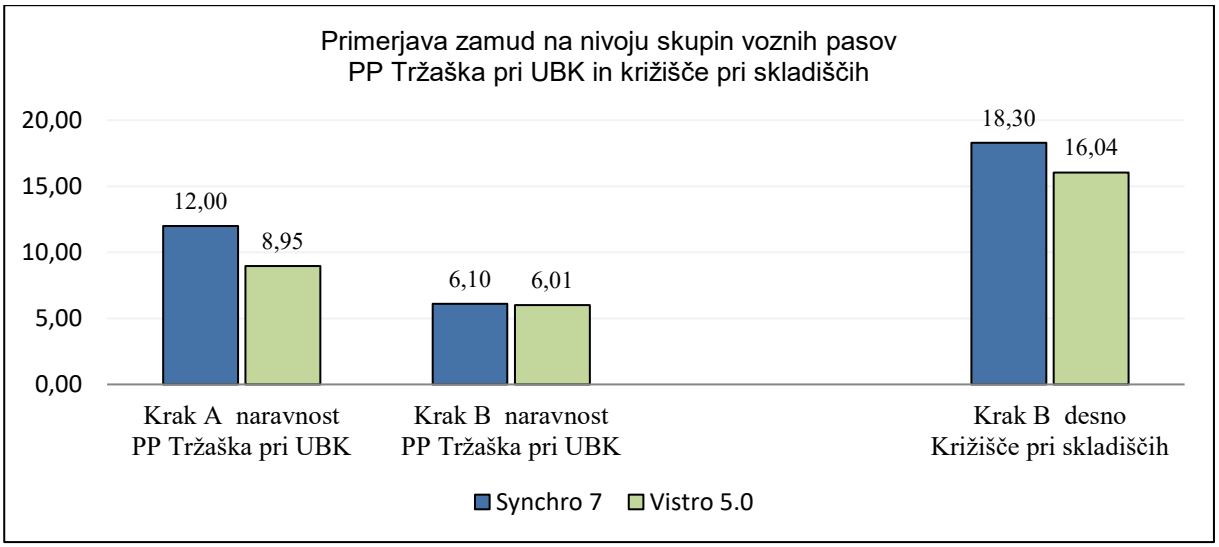
Na krakih A, B in C so za skupine voznih pasov za vožnjo naravnost in desno značilne kratke povprečne zamude, zato v teh primerih določevanje relativne razlike med programoma ni smiselno. Kljub velikim relativnim razlikam med programoma, so časovne razlike povsem primerljive, posledično pa so v skupinah voznih pasov za vožnjo naravnost in desno, v obeh uporabljenih programskih orodjih, doseženi enaki nivoji uslug. Podobna relativna razlika kot na krakih A, B in C se med programoma pojavi tudi v skupini za vožnjo naravnost in desno na kraku D, kjer pa so povprečne zamude v primerjavi z ostalimi kraki bistveno večje, posledično pa je večja tudi časovna razlika (časovna razlika med programoma Synchro 7 in Vistro 5.0 znaša več kot 55 sekund). Ne glede na občutno razliko pa so povprečne zamude v uporabljenih programskih orodjih tako velike, da je v obeh primerih dosežen nivo uslug F. Velika odstopanja v povprečnih zamudah na kraku D so posledica razlik pri določevanju vplivnega faktorja pešcev in kolesarjev za desno zavijanje, ki se upošteva v enačbi za izračun nasičenih prometnih tokov, posledično pa vpliva tudi na dosežene mere učinkovitosti.

Pri analizi povprečnih zamud na nivoju celotnih krakov križišča Tržaška - Tbilisijska (Grafikon 5) lahko ugotovimo, da se na krakih vzdolž Tržaške ceste (kraka A in C) pojavijo manj nasičeni prometni tokovi, na krakih B in D pa je nasičenost bistveno večja. Na krakih A in C je časovna razlika v povprečnih zamudah med programoma zgolj nekaj sekund (kljub velikim relativnim razlikam), na krakih B in D pa so razlike med programoma bolj izrazite (časovna razlika v povprečnih zamuda na kraku B znaša skoraj 190 sekund). Iz Preglednice 21 je razvidno, da so povprečne zamude na nivoju krakov A, B in D večje v programu Synchro 7 (največja relativna razlika je na kraku B, in znaša 109 %), na kraku C pa so povprečne zamude večje v programu Vistro 5.0 (relativna razlika znaša 36,7 %).

Na podlagi rezultatov s križišča Tržaška - Tbilisijska lahko na tem mestu zavrnemo ugotovitev, ki smo jo izpostavili pri analizi križišča Dolgi most, in sicer da so vrednosti povprečnih zamud v programu Vistro 5.0 večje kot v programu Synchro 7. Doseženi nivoji uslug na krakih obravnavanega križišča so kljub razlikam v povprečnih zamudah enaki, odstopanje pa se pojavi zgolj na kraku A, kjer se vrednosti povprečnih zamud gibljejo v okolici meje nivojev uslug B in C (zamude v programu Synchro 7 zgolj minimalno presežejo mejo nivoja uslug C, v programu Vistro 5.0 pa je dosežen nivo uslug B).

9.1.3 Povprečne zamude in nivoji uslug na ostalih dveh križiščih

Grafična primerjava povprečnih zamud na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška pri UBK in na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih je prikazana na Grafikonu 6:



Grafikon 6: Primerjava povprečnih zamud na posameznih krakih (PP Tržaška pri UBK in križišče pri skladiščih)

Primerjava povprečnih zamud in doseženih nivojev uslug na nivoju posameznih skupin voznih pasov in celotnih krakov, je prikazana tudi v Preglednici 22 (Semaforiziran PP Tržaška pri UBK) oziroma v Preglednici 23 (nesemaforizirano križišče pri skladiščih):

Preglednica 22: Primerjava povprečnih zamud in nivojev uslug na PP Tržaška cesta pri UBK

SEMAFORIZIRAN PREHOD ZA PEŠCE TRŽAŠKA CESTA PRI UBK				
Krak	**Tržaška cesta iz smeri Lj-center (krak A)**		**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most (krak B)**	
Skupina voznih pasov	Naravnost	Celoten krak	Naravnost	Celoten krak
Zamuda Synchro 7 [s]	12,00	12,00	6,10	6,10
Zamuda Vistro 5.0 [s]	8,95	8,95	6,01	6,01
Relativna razlika [%]	34,08	34,08	1,44	1,44
Nivo uslug Synchro 7	B	B	A	A
Nivo uslug Vistro 5.0	A	A	A	A

Preglednica 23: Primerjava povprečnih zamud in nivojev uslug na križišču pri skladiščih

NESEMAFORIZIRANO KRIŽIŠČE PRI SKLADIŠČIH		
Krak	**Priključek skladišča (krak B)**	
Skupina voznih pasov	Desno	Celoten krak
Zamuda Synchro 7 [s]	18,30	18,30
Zamuda Vistro 5.0 [s]	16,04	16,04
Relativna razlika [%]	14,09	14,09
Nivo uslug Synchro 7	C	C
Nivo uslug Vistro 5.0	C	C

Na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška cesta pri UBK smo vozne pasove združili v dve skupini voznih pasov (po ena skupina voznih pasov na krakih A in B). Ker je na obeh krakih omogočena zgolj vožnja naravnost, so ugotovljene povprečne zamude in nivoji uslug posameznih skupin voznih pasov enaki meram učinkovitosti celotnih krakov. Na semaforiziranem prehodu za pešce so bile na obeh krakih ugotovljene manjše povprečne zamude. Relativna razlika med programoma Synchro 7 in Vistro 5.0 je na kraku A dokaj velika, in znaša približno 34 %, vendar pa to predstavlja zgolj 3 sekunde časovne razlike v zamudi. Na kraku B so ugotovljene povprečne zamude v obeh programih praktično identične (relativna razlika zgolj 1,45 %). Kljub manjšim časovnim razlikam v zamudah sta na kraku A dosežena različna nivoja uslug, saj se povprečne zamude v obeh programih gibljejo na meji nivojev uslug A in B. Na kraku B sta v obeh programih dosežena nivoja uslug A.

Križišče pri skladiščih je na obravnavanem območju edino nesemaforizirano, zato se povprečne zamude in nivoji uslug tega križišča določijo na drugačen način kot v primeru semaforiziranih križišč. Postopek določitve mer učinkovitosti na nesemaforiziranih križiščih je natančneje predstavljen v poglavju 3.2 (Metodologija HCM za analizo nesemaforiziranih križišč, str. 18). Na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih smo primerjalno analizo opravili zgolj za eno skupino voznih pasov, in sicer za vožnjo v desno iz smeri priključka pri skladiščih (krak B). Ker je na kraku B dovoljena zgolj vožnja v desno, so ugotovljene povprečne zamude in nivoji uslug enaki tudi na nivoju celotnega obravnavanega kraka. Prometni tokovi vzdolž Tržaške ceste (kraka A in C) na območju križišča pri skladiščih niso ovirani oziroma prekinjeni, zato se v tem primeru zamude in kolone niti ne pojavijo. Ugotovljene zamude na kraku B so v obeh programskih orodjih primerljive (relativna razlika je 14 %, kar predstavlja približno 2 sekundi časovne razlike), posledično pa sta enaka tudi dosežena nivoja uslug.

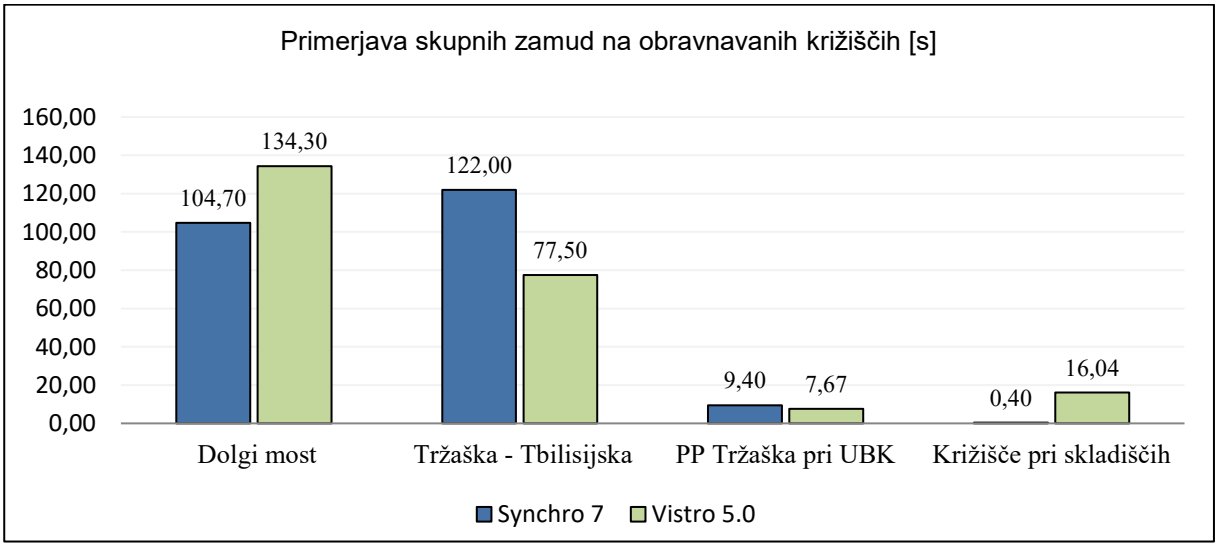
Na podlagi analize povprečnih zamud na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška pri UBK in nesemaforiziranem križišču pri skladiščih ne moremo ugotoviti večjih razlik med obema uporabljenima programoma, kljub temu pa je iz Grafikona 6 razvidno, da so povprečne zamude na obeh obravnavanih križiščih, v programu Synchro 7 nekoliko večje kot v programu Vistro 5.0.

9.1.4 Povprečne zamude in nivoji uslug na celotnem obravnavanem območju

Skupna zamuda posameznega obravnavanega križišča se v obeh uporabljenih programih določi na podlagi povprečnih zamud na posameznih krakih križišča in deleža vozil na vsakem izmed obravnavanih krakov, v odvisnosti od skupnega števila vozil, ki prevozijo obravnavano križišče. Skupne zamude in doseženi nivoju uslug na obravnavanih križiščih, so prikazani v Preglednici 24 in na Grafikonu 7:

Preglednica 24: Skupne zamude in nivoji uslug na obravnavanih križiščih

Skupne zamude in nivoji uslug na obravnavanih križiščih				
Križišče	Dolgi most	Tržaška - Tbilisijska	PP Tržaška pri UBK	Križišče pri skladiščih
Zamuda Synchro 7 [s]	104,70	122,00	9,40	0,40
Zamuda Vistro 5.0 [s]	134,30	77,50	7,67	16,04
Relativna razlika [%]	28,27	57,42	22,56	ni primerljivo
Nivo uslug Synchro 7 (HCM 2000)	F	F	A	/
Nivo uslug Vistro 5.0 (HCM 2000)	F	E	A	C
ICU 2003 Synchro 7	1,19	1,12	0,70	0,66
ICU 2003 Vistro 5.0	0,987	0,927	0,577	/
Nivo uslug Synchro 7 (ICU 2003)	H	H	C	C
Nivo uslug Vistro 5.0 (ICU 2003)	F	F	B	/



Grafikon 7: Primerjava skupnih zamud na obravnavanih križiščih

Na križišču Dolgi most, kjer so povprečne zamude na vseh štiri krakih večje v programu Vistro 5.0, so v istem programu pričakovano večje tudi skupne zamude na nivoju celotnega križišča (razlika med programoma znaša približno 28 %). Obratna situacija se pojavi na križišču Tržaška - Tbilisijska, kjer so povprečne zamude na posameznih krakih večje v programu Synchro 7.

V tem primeru so v programu Synchro 7 večje tudi skupne zamude križišča, in sicer za slabih 60 %. Manjša relativna razlika med programoma se pojavi pri analizi skupnih zamud semaforiziranega prehoda za pešce Tržaška pri UBK, vendar so v tem primeru povprečne zamude mnogo manjše kot na ostalih dveh semaforiziranih križiščih (približno 10-krat manjše). Medsebojna primerjava skupnih zamud na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih ni smiselna, saj se v tem primeru skupna zamuda v programu Synchro 7 določi na podlagi povprečnih zamud na vseh krakih v križišču, skupna zamuda v programu Vistro 5.0 pa se določi zgolj na osnovi povprečne zamude kritičnega kraka (v obravnavanem primeru kritični krak predstavlja dovozna pot do skladišč, kjer so zamude največje).

Skupni doseženi nivoji uslug obravnavanih križišč, so podobno kot v primeru posameznih krakov, v obeh uporabljenih programskih orodjih primerljivi. Doseženi nivoji uslug na križišču Dolgi most in na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška pri UBK so v obeh programih popolnoma enaki, na križišču Tržaška - Tbilisijska pa se dosežena nivoja uslug razlikujeta za eno razred (na podlagi skupnih zamud v programu Synchro 7 je dosežen nivo uslug F, v programu Vistro 5.0 pa je dosežen nivo uslug E, čeprav so tudi v tem primeru zamude na meji nivoja uslug F). Na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih nivo uslug v programu Synchro 7 ni določen, zato primerjava ni mogoča.

Poleg nivojev uslug, določenih na podlagi analitične metode HCM, programa Synchro 7 in Visto 5.0 omogočata tudi določitev nivojev uslug križišč po metodi ICU (Preglednica 24). Doseženi nivoji uslug na podlagi analitične metode ICU temeljijo na določitvi deleža dosežene kapacitete celotnega križišča (v primeru, da je delež večji od 1,0 je kapaciteta križišča presežena), postopek določitve pa je natančneje predstavljen v poglavju 4.2 (Določevanje nivoja uslug po metodi ICU, str. 23). Doseženi nivoji uslug po metodi ICU se med programoma Synchro 7 in Vistro 5.0 nekoliko razlikujejo, in sicer za en razred na prehodu za pešce Tržaška pri UBK ter za dva razreda na križiščih Dolgi most in Tržaška - Tbilisijska. Večje razlike v doseženih nivojih uslug so posledica dodatnih razredov v lestvici (lestvica za določevanje nivojev uslug po metodi HCM ima 6 razredov, po metodi ICU pa 8 razredov), posledično pa imajo posamezni razredi metode ICU manjši razpon. Razlike v doseženih nivojih uslug zato niso kritične in kljub vsemu omogočajo dovolj dobro medsebojno primerjavo.

Na podlagi analize obravnavanih križišč lahko ugotovimo, da so doseženi nivoji uslug po metodi ICU, v programu Vistro 5.0 nekoliko boljši kot v programu Synchro 7. Za semaforizirani križišči Dolgi most in Tržaška - Tbilisijska, ki sta na obravnavanem območju najbolj obremenjeni, je na podlagi rezultatov analize kapacitivnosti ugotovljeno, da je kapaciteta obeh križišč v programu Synchro 7 že presežena, v programu Vistro 5.0 pa se vrednosti gibljejo tik pod mejo kapacitete. Primerjavo doseženih nivojev uslug na podlagi metode ICU lahko sicer izvedemo samo na semaforiziranih križiščih, saj program Vistro 5.0 uporabo metode ICU na nesemaforiziranih križiščih ne omogoča.

9.2 Dolžine kolon

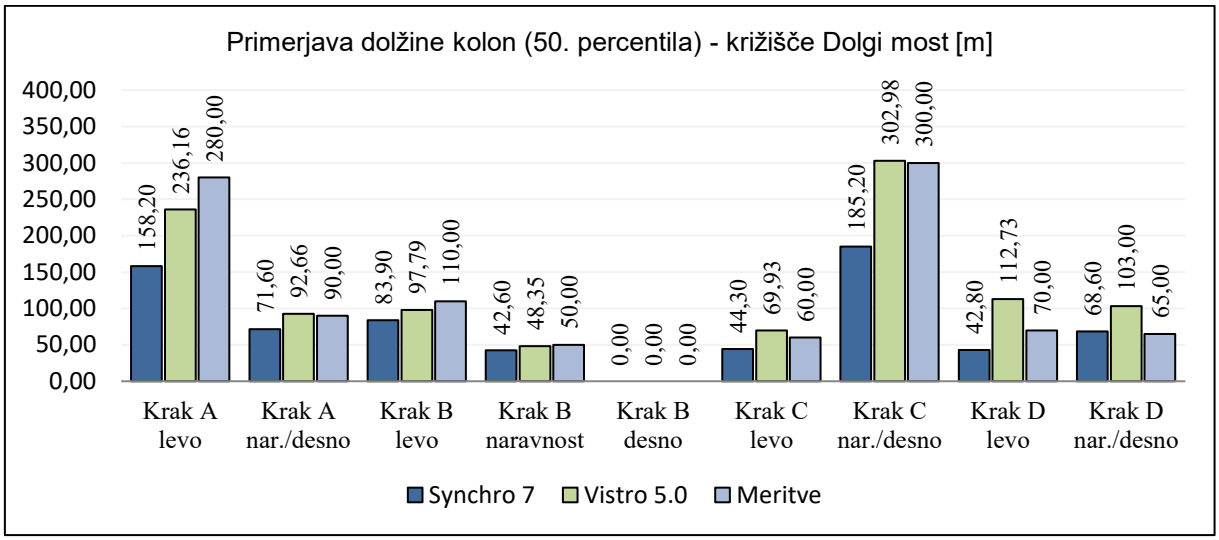
Poleg povprečnih zamud in nivojev uslug smo v sklopu magistrske naloge analizirali tudi dolžine kolon, pri čemer smo primerjali dolžine kolon 50. in 95. percentile, ki jih v sklopu rezultatov mer učinkovitosti prikažeta obe uporabljeni programski orodji. Za potrebe analize dolžine kolon, smo v času štetja prometa izmerili dejanske dolžine kolon, ki se v času popoldanske konice pojavijo na območju obravnavanih križišč. Meritve smo v nadaljevanju primerjali z rezultati, ki smo jih pridobili s programoma Synchro 7 in Vistro 5.0 ter poskušali ugotoviti, katero programsko orodje se izmerjenim (realnim) dolžinam kolon bolj približa. Za razliko od povprečnih zamud, ki se v obeh programih določajo na podlagi istih enačb, se matematični modeli za izračun dolžine kolon v programih Synchro 7 in Vistro 5.0 razlikujejo. Dolžine kolon v programu Vistro 5.0 se izračunajo na podlagi enačb, ki jih določa analitična metoda HCM 2000, v programu Synchro 7 pa se dolžine kolon določijo na podlagi enačb, ki so predstavljene v priročniku tega programa. Matematične enačbe, na podlagi katerih obe uporabljeni programski orodji določata dolžine kolon, so predstavljene v poglavju 3.1.9 (Dolžina kolon, str. 14).

9.2.1 Analiza dolžine kolon (50. percentila)

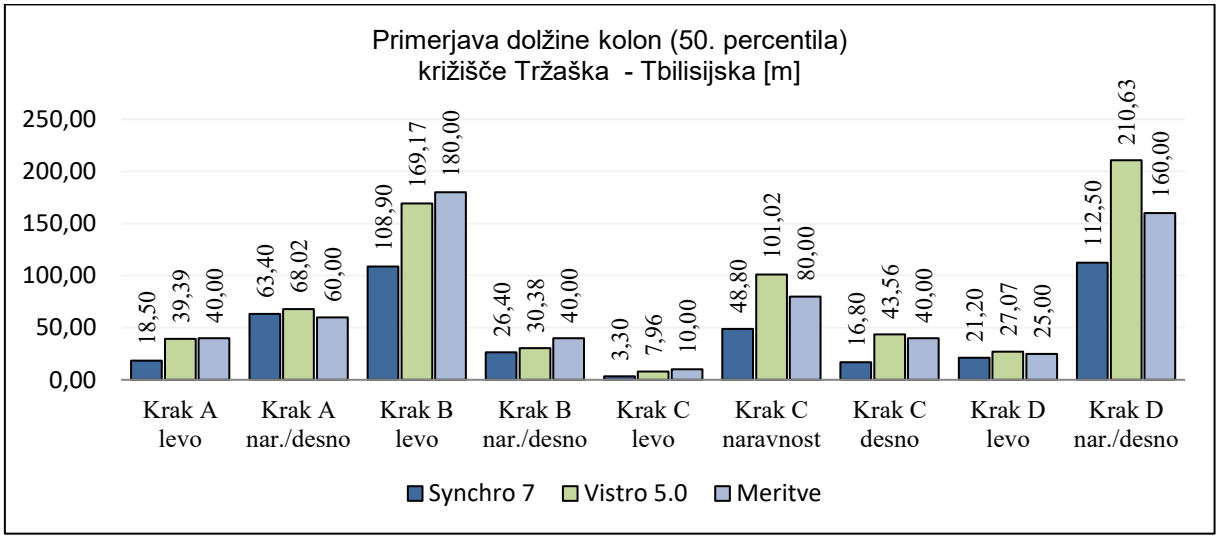
Programa Synchro 7 in Vistro 5.0 omogočata določitev različnih percentilnih vrednosti dolžine kolon, in sicer vrednosti 50. in 95. percentile. Vrednost 50. percentile dolžine kolone je definirana kot vrednost, od katere je 50 % izmerjenih kolon krajših oziroma enako dolgih, 50 % izmerjenih kolon pa je daljših. Na podlagi vrednosti 50. percentile lahko analiziramo povprečne dolžine kolon na obravnavanem območju, čeprav matematično gledano povprečne vrednosti niso nujno enake vrednosti 50. percentile.

Zaradi različnih matematičnih enačb in pričakovanih odstopanj pri določevanju dolžine kolon, smo v primerjalno analizo med programoma vključili izmerjene dolžine kolon, ki so nam v nadaljevanju služile kot osnova za preverjanje točnosti dolžine kolon, določenih s programoma Synchro 7 in Vistro 5.0. Realne povprečne dolžine kolon smo na obravnavanem območju izmerili v času štetja prometa, njihove vrednosti pa so določene kot povprečje desetih kolon, izmerjenih v času desetih zaporednih semafornih ciklov. Dolžine kolon, izmerjene na tak način, ne predstavljajo dejanskih vrednosti 50. percentile, saj bi za določitev le-teh potrebovali večdnevno merjenje kolon, na podlagi katerega bi lahko določili natančnejše povprečne vrednosti. Kljub vsemu pa smo predpostavili, da izmerjene kolone predstavljajo dovolj dober približek povprečnim dolžinam kolon v času popoldanske konice, zato je primerjava z dolžinami kolon, ki jih v sklopu mer učinkovitosti določita obe uporabljeni programski orodji, smiselna.

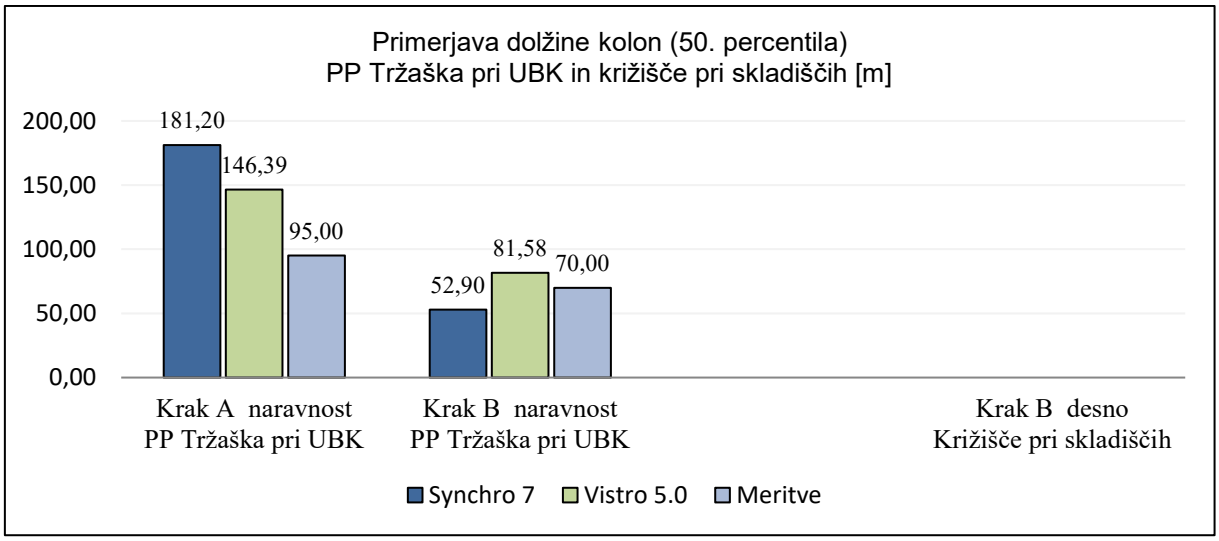
Primerjava vrednosti 50. percentile dolžine kolon, vključno z izmerjenimi povprečnimi dolžinami kolon, je prikazana na Grafikonih 8, 9 in 10, rezultati pa se nanašajo na posamezne skupine voznih pasov:



Grafikon 8: Primerjava vrednosti 50. percentile dolžine kolon (križišče Dolgi most)



Grafikon 9: Primerjava vrednosti 50. percentile dolžine kolon (križišče Tržaška - Tbilisijska)



Grafikon 10: Primerjava vrednosti 50. percentile dolžine kolon (PP Tržaška pri UBK in križišče pri skladiščih)

Na podlagi primerjalne analize mer učinkovitosti oziroma analize dolžine kolon na križiščih Dolgi most (Grafikon 8) in Tržaška - Tbilisijska (Grafikon 9), ki sta na obravnavanem območju najbolj obremenjeni, smo ugotovili, da se največje razlike med programoma pojavijo v primeru bolj obremenjenih oziroma nasičenih prometnih tokov, kjer so kolone najdaljše. V teh primerih se dolžine kolon, določene s programom Vistro 5.0, približajo realnim dolžinam, ki smo jih izmerili na obravnavanem območju, dolžine kolon v programu Synchro 7 pa so občutno prekratke. Razlike med uporabljenima programoma se pri analizi nenasičenih prometnih tokov zmanjšajo, vendar pa so tudi v tem primeru dolžine kolon v programu Vistro 5.0 bližje tistim, ki smo jih izmerili na terenu. Iz teh ugotovitev lahko sklepamo, da so povprečne dolžine kolon v programu Vistro 5.0 določene natančneje kot v programu Synchro 7.

Ugotovitve, ki smo jih pridobili na križiščih Dolgi most in Tržaška - Tbilisijska lahko potrdimo tudi na semaforiziranem prehoda za pešce Tržaška pri UBK (Grafikon 10), kjer se pri analizi dolžine kolon v smeri proti centru Ljubljane (krak B) pojavijo enaka razmerja, kot na obeh predhodno obravnavanih križiščih (dolžine kolon na kraku B v programu Vistro 5.0 sovpadajo z izmerjenimi, kolone v programu Synchro 7 pa so krajše). V smeri vožnje proti križišču Dolgi most (krak A) se na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška pri UBK pojavijo odstopanja, saj so na tem kraku dolžine kolon v programu Synchro 7 večje kot v programu Vistro 5.0. Z dodatno analizo smo ugotovili, da program Synchro 7 v tem primeru dolžine kolon določa na drugačen način kot običajno, zato direktna primerjava ni smiselna. Semaforiziran prehod za pešce Tržaška pri UBK je pozicioniran v bližini zelo obremenjenega oziroma nasičenega križišča Tržaška - Tbilisijska (razmerje *v/c* na tem križišču je približno 1,0), program Synchro 7 pa v takih primerih, pri določitvi dolžine kolon, upošteva tudi bližnje vplivno križišče (samo v smeri od vplivnega križišča proti obravnavanem). V tem primeru vrednosti 50. percentile dolžine kolon predstavljajo maksimalne pričakovane kolone, ki pa jih ne moremo primerjati s povprečnimi dolžinami, izračunanimi s programom Vistro 5.0 (običajno so maksimalne pričakovane dolžine kolon v obeh uporabljenih programih določene na podlagi 95. percentile).

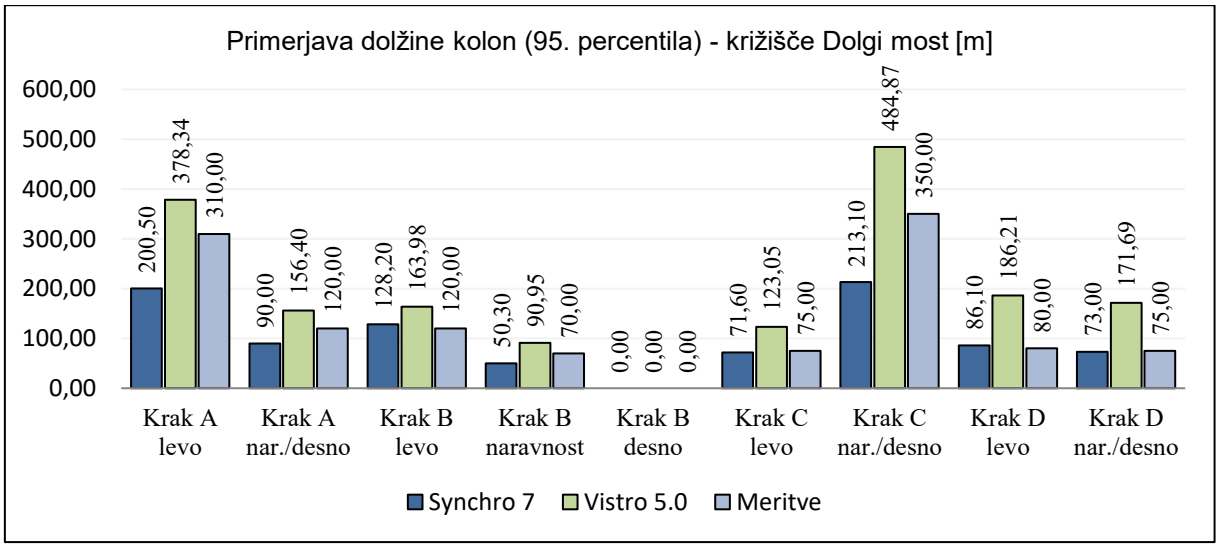
Vrednosti 50. percentile dolžine kolon, so v obeh programskih orodjih določene samo na semaforiziranih križiščih, zato analiza povprečnih kolon na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih ni mogoča.

9.2.2 Analiza dolžne kolon (95. percentila)

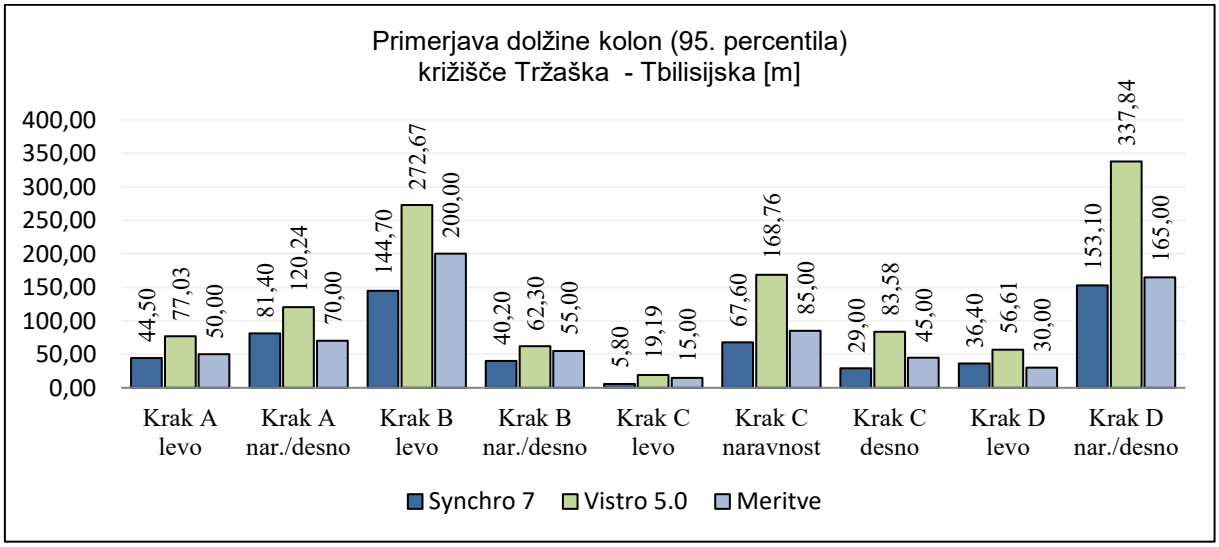
Vrednost 95. percentile dolžine kolon je definirana kot vrednost, od katere je 95 % izmerjenih kolon krajših oziroma enako dolgih, 5 % izmerjenih kolon pa je daljših. Na podlagi vrednosti 95. percentile lahko analiziramo maksimalne pričakovane dolžine kolon, ki predstavljajo osnovo za projektiranje novih oziroma rekonstrukcijo obstoječih križišč.

Dolžine kolon, določene v programih Synchro 7 in Vistro 5.0, smo tudi v tem primeru primerjali s kolonami, ki smo jih v času štetja prometa izmerili na obravnavanem območju. Maksimalne dolžine izmerjenih kolon smo ocenili na podlagi meritev desetih kolon v času desetih zaporednih semafornih ciklov, za natančnejšo določitev maksimalnih dolžin kolon pa bi tudi v tem primeru potrebovali meritve v daljšem časovnem obdobju (meritve dolžine kolone v obdobju nekaj dni), kar pa si v sklopu magistrske naloge nismo mogli privoščiti. Kljub vsemu smo predpostavili, da izmerjene kolone predstavljajo dovolj dober približek maksimalnim dolžinam kolon v času popoldanske konice, zato je primerjava z dolžinami kolon, ki jih v sklopu mer učinkovitosti določita obe uporabljeni programski orodji, smiselna

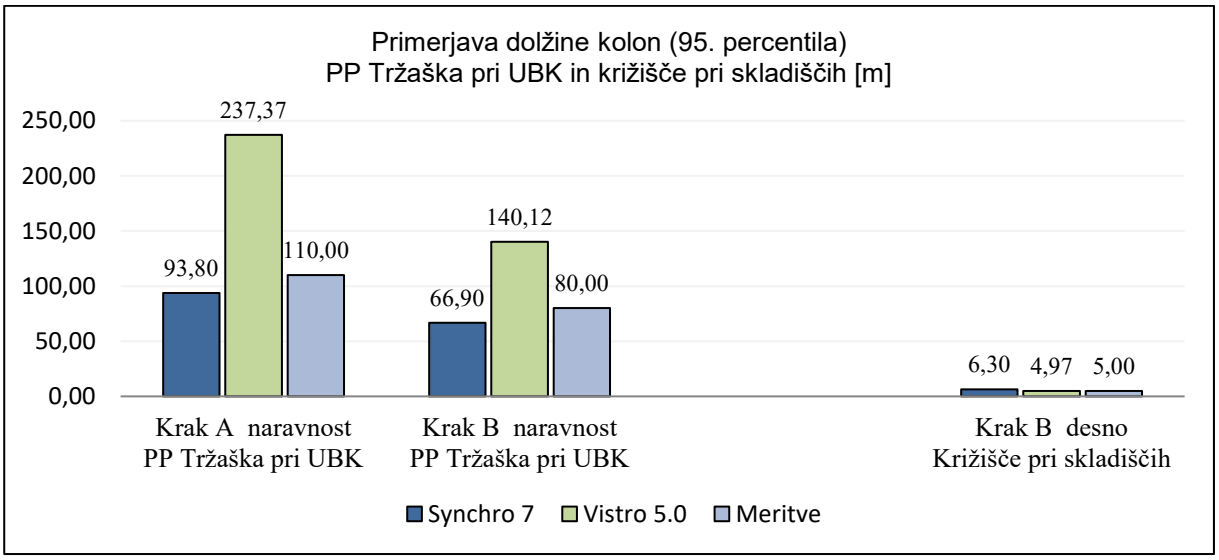
Primerjava vrednosti 95. percentile dolžine kolon, vključno z izmerjenimi dolžinami kolon, je prikazana na Grafikonih 11, 12 in 13, rezultati pa se nanašajo na posamezne skupine voznih pasov:



Grafikon 11: Primerjava vrednosti 95. percentile dolžine kolon (križišče Dolgi most)



Grafikon 12: Primerjava vrednosti 95. percentile dolžine kolon (križišče Tržaška - Tbilisijska)



Grafikon 13: Primerjava vrednosti 50. percentile dolžine kolon (PP Tržaška pri UBK in križišče pri skladiščih)

Na podlagi primerjalne analize 95. percentile dolžine kolon smo ugotovili, da se na semaforiziranih križiščih Dolgi most (Grafikon 11) in Tržaška - Tbilisijska (Grafikon 12) pojavlja isti vzorec, in sicer so v pri vseh obravnavanih skupinah voznih pasov vrednosti kolon v programu Vistro 5.0 večje kot tiste, ki smo jih na podlagi meritev izmerili na terenu, kolone v programu Synchro 7 pa komaj dosegajo vrednosti izmerjenih kolon oziroma so v večini primerov celo krajše.

S podatki o dolžinah kolon, ki smo jih pridobili v programu Vistro 5.0, nekoliko presežemo izmerjene dolžine kolon, zato lahko projektiranje križišč izvedemo brez dodatnih prilagoditev vhodnih podatkov, v primeru večjih odstopanj med izračunanimi in dejanskimi vrednostmi, pa bi bilo prilagoditve vhodnih podatkov, kljub vsemu, smiselno izvesti. Večje težave se lahko pojavijo pri projektiranju križišč na podlagi podatkov o maksimalnih dolžinah kolon, pridobljenih s programom Synchro 7, ki so glede na izmerjene kolone, prekratke. V tem primeru je nujna najmanj dodatna analiza rezultatov oziroma izvedba ustreznih prilagoditev vhodnih podatkov (kalibracija), v nasprotnem primeru bi bilo namreč projektiranje izvedeno na osnovi nemerodajnih podatkov, ki ne odražajo realnega stanja na terenu. Na podlagi analize mer učinkovitosti lahko ugotovimo, da se povprečne in maksimalno pričakovane dolžine kolon v programu Vistro 5.0 bolj približajo dejanskim meritvam dolžine kolon na obravnavanem območju, zato je z vidika določevanja dolžine kolon program Vistro 5.0 ocenjen kot primernejši.

Predhodne ugotovitve lahko potrdimo tudi na podlagi analize semaforiziranega prehoda za pešce Tržaška pri UBK (Grafikon 13), kje je na kraku B ugotovljen enak vzorec kot v primeru predhodno obravnavanih križišč. Dolžine kolon na kraku A v primerjalni analizi niso bile upoštevane, saj je v tem primeru maksimalna dolžina kolone določena na podlagi vrednosti 50. percentile. Iz analize so bile izvzete tudi maksimalne dolžine kolon na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih (Grafikon 13), ki so zaradi svoje dolžine (kolona v dolžini zgolj enega vozila), nemerodajne.

Med primerjavo vrednosti dolžine kolon smo posebno pozornost namenili analizi kraka B na križišču Dolgi most (AC priključek Lj-zahod). Kolone, ki jih na omenjenem kraku določita programski orodji Synchro 7 in Vistro 5.0 so posledica vodenja prometa na semaforiziranem križišču Dolgi most, dejansko pa na dolžino kolon, poleg krmilnega programa na omenjenem križišču, vpliva tudi bližina območja prepletanja prometnih tokov, česar pa zaradi omejitev v programih Synchro 7 in Vistro 5.0, pri pripravi prometnih modelov nismo mogli zajeti oziroma upoštevati. Na območju prepletanja, ki je od križišča Dolgi most oddaljeno zgolj 100 metrov, se križata dva prometna tokova, in sicer vozila, ki avtocesto zapustijo na izvozu Lj-zahod v smeri proti razcepu Kozarje ter vozila, ki z vožnjo proti križišču Dolgi most nadaljujejo po tem, ko avtocesto zapustijo na izvozu Lj-zahod v smeri proti Barju. Ker sta v času popoldanske prometne konice oba izvoza precej obremenjena, se na območju prepletanja obeh izvoznih ramp ustvarjajo dodatni zastoji, ki običajno segajo precej dlje, kot je bilo ugotovljeno s pomočjo analitičnih programskih orodij, ki tovrstnih vplivnih dejavnikov ne upoštevajo (kolone preko izvoznih ramp občasno segajo celo na območje avtoceste). Za določitev realne dolžine kolon na obravnavanem priključku (tako povprečnih kot tudi maksimalno pričakovanih) bi bilo smiselno izvesti prometno analizo s pomočjo mikrosimulacijskih programov, kjer bi vpliv območja prepletanja lahko zajeli.

9.3 Primerjava mer učinkovitost med programoma Synchro 7 in Sim Traffic

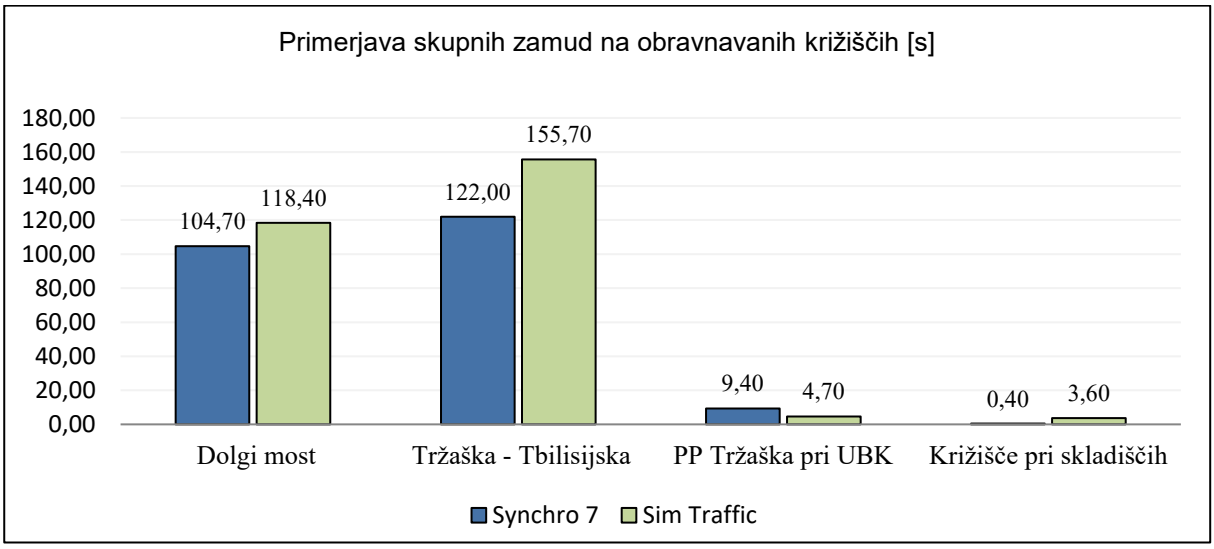
V sklopu magistrske naloge je bila izvedena tudi primerjava mer učinkovitosti v analitičnem in mikrosimulacijskem programskem orodju, s katero smo želeli ugotoviti, v kolikšni meri se mere učinkovitosti, pridobljene na podlagi analitične metode, ujemajo s tistimi, ki jih pridobimo na osnovi izdelane mikrosimulacije. Primerjalno analizo smo izvedli na podlagi mer učinkovitosti, pridobljenih s programoma Synchro 7 in Sim Traffic, ki sta del istega programskega paketa in omogočata enostavno prehajanje iz enega v drugo programsko okolje. Mikrosimulacija v programu Sim Traffic je bila izvedena na podlagi prometnega modela, izdelanega v programu Synchro 7 (enak model, kot je bil uporabljen pri primerjavi med programoma Synchro 7 in Vistro 5.0), mere učinkovitosti pa smo pridobili na podlagi treh 30-minutnih snemanj prometne mreže.

9.3.1 Primerjava povprečnih zamud med programoma Synchro 7 in Sim Traffic

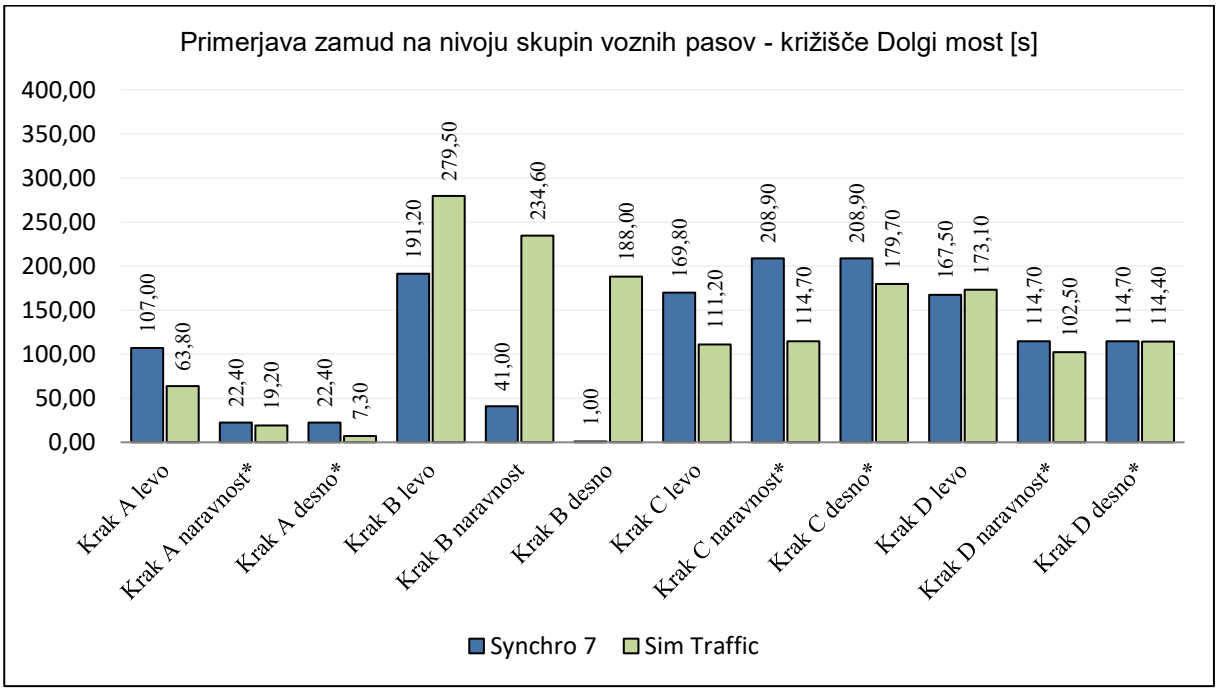
V fazi analize mer učinkovitosti smo ugotovili, da je primerjava povprečnih zamud med programoma Synchro 7 in Sim Traffic smiselna zgolj na nivoju celotnih obravnavanih križišč (skupne zamude na posameznih križiščih), ter pogojno na nivoju nekaterih skupin voznih pasov, kar je posledica dejstva, da so zamude na nivoju posameznih krakov, v izbranem analitičnem programskem orodju, določene na drugačen način kot v mikrosimulacijskem programskem orodju Sim Traffic.

Analitično programsko orodje Synchro 7 povprečne zamude določa za posamezne skupine voznih

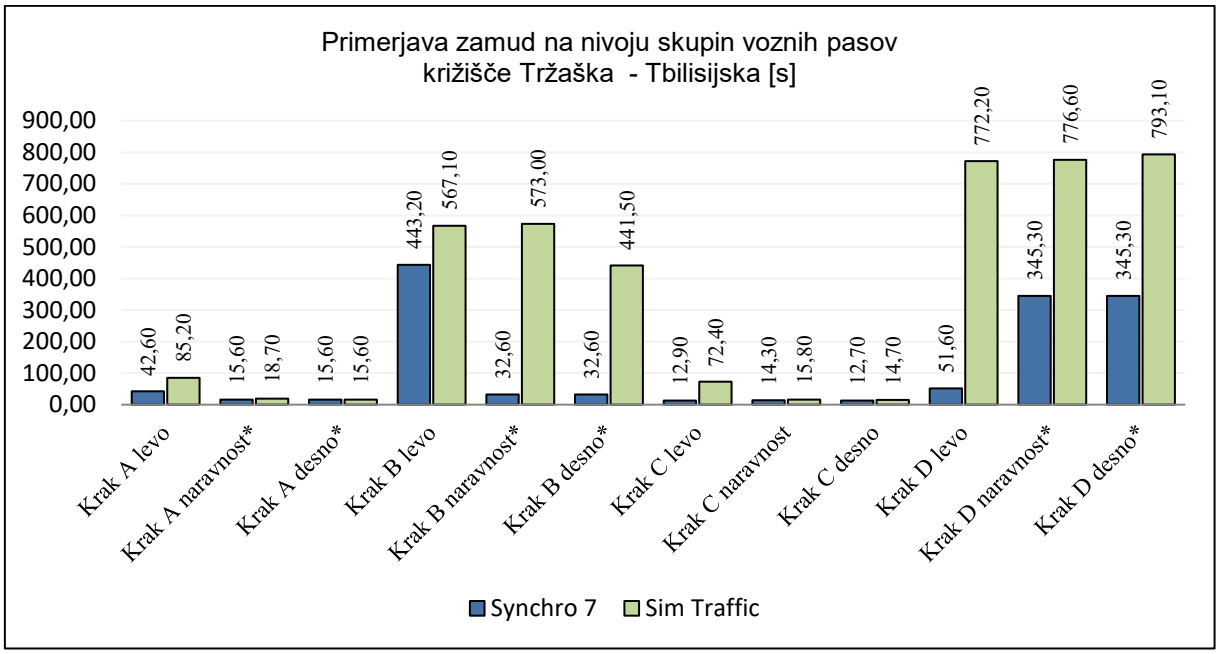
pasov, ki jih izberemo v sklopu priprave prometnega modela, program Sim Traffic pa povprečne zamude na posameznem kraku določa za vsako smer vožnje posebej. Primerjava povprečnih zamud na nivoju posameznih krakov je tako možna zgolj v primeru, da skupino voznih pasov sestavljajo prometni pasovi za vožnjo v eno smer (v primeru kombiniranih voznih pasov za vožnjo naravnost in desno primerjava ni mogoča). Primerjava skupnih zamud na nivoju obravnavanih križišč je prikazana na Grafikonu 14, na Grafikonih 15, 16 in 17 pa je prikazana primerjava na nivoju posameznih krakov, pri čemer so z zvezdico (*) označene skupine voznih pasov, kjer primerjava med programoma ni mogoča:



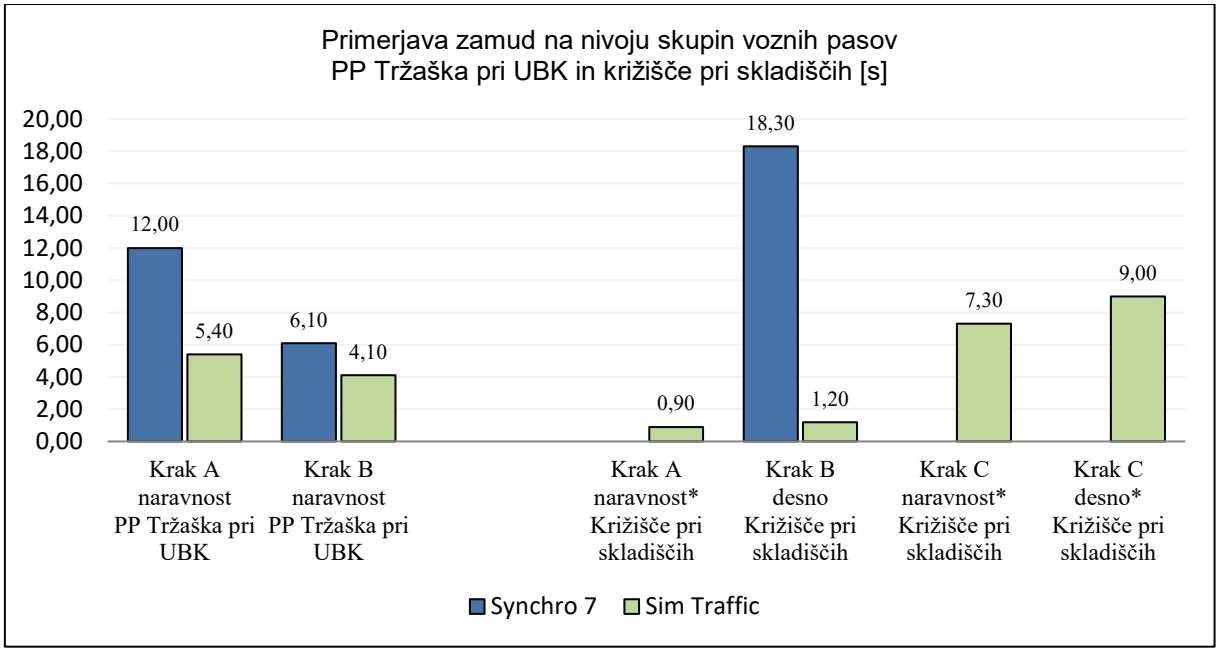
Grafikon 14: Primerjava skupnih zamud med Synchro 7 in Sim Traffic na obravnavanih križiščih



Grafikon 15: Primerjava zamud med Synchro 7 in Sim Traffic (križišče Dolgi most)



Grafikon 16: Primerjava zamud med Synchro 7 in Sim Traffic (križišče Tržaška - Tbilisijska)



Grafikon 17: Primerjava zamud med Synchro 7 in Sim Traffic (PP Tržaška pri UBK in križišče pri skladiščih)

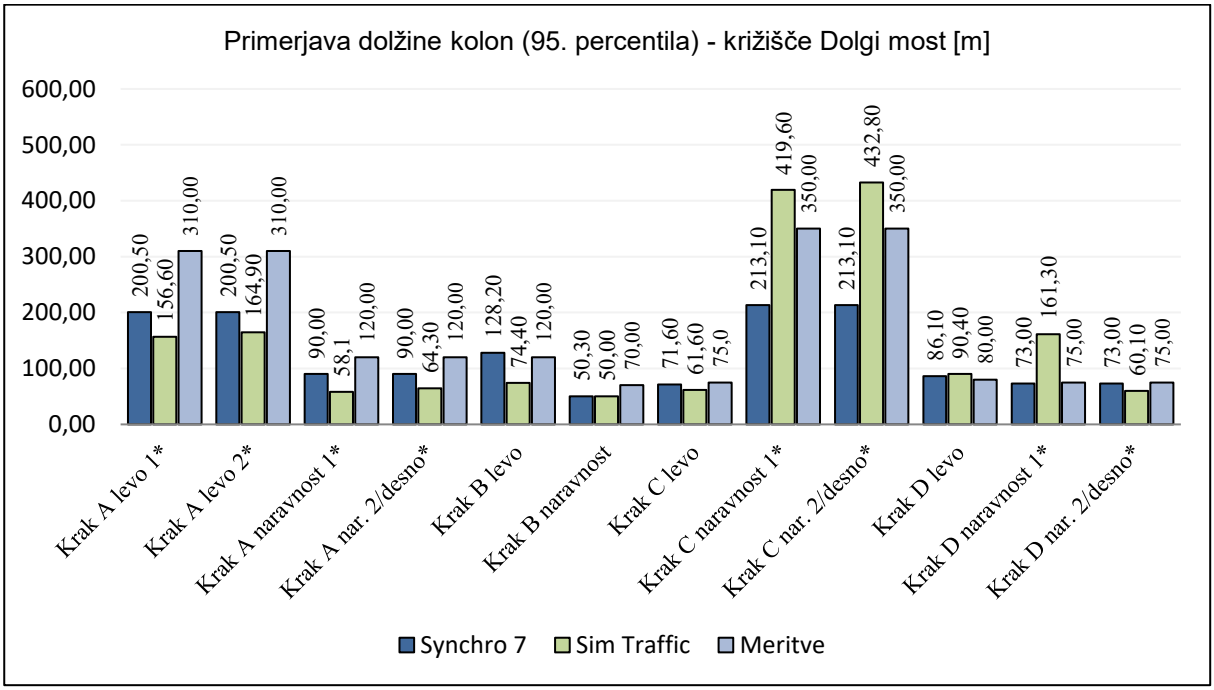
Na podlagi primerjalne analize povprečnih zamud v programih Synchro 7 in Sim Traffic smo ugotovili, da so na dveh najbolj nasičenih križiščih (križišči Dolgi most in Tržaška - Tbilisijska), povprečne zamude v mikrosimulacijskem programu Sim Traffic večje kot tiste, ki smo jih v programu Synchro 7 določili na podlagi analitične metode HCM (Grafikon 14). Na ostalih dveh križiščih odstopanja med programoma niso tako izrazita, pri čemer so na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška pri UBK, povprečne zamude v programu Synchro 7 celo večje kot tiste v programu Sim Traffic.

Rezultate na nivoju skupnih zamud lahko potrdimo tudi z analizo posameznih skupin voznih pasov. Na križiščih Dolgi most in Tržaška - Tbilisijska so povprečne zamude na nivoju skupin voznih pasov, ki jih v analizi lahko upoštevamo, v večini primerov večje v programskem orodju Sim Traffic, na obeh krakih semaforiziranega prehoda za pešce Tržaška pri UBK pa je razmerje med programoma ravno obratno. Na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih primerjava povprečnih zamud na nivoju skupin voznih pasov ni smiselna, saj so v programu Sim Traffic povprečne zamude določene na vseh treh krakih v križišču, v programu Synchro 7 pa samo na kraku B.

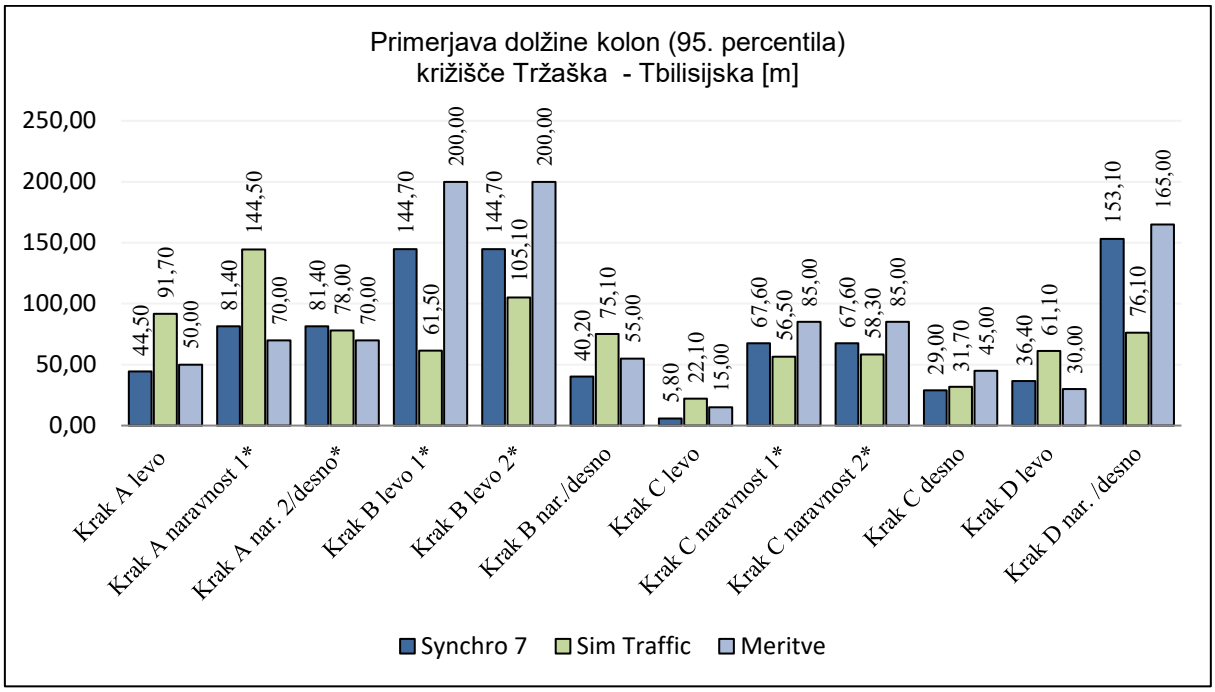
9.3.2 Primerjava dolžine kolon med programoma Synchro 7 in Sim Traffic

V sklopu primerjalne analize med analitičnim in mikrosimulacijskim programskim orodjem smo primerjali vrednosti 95. percentile dolžine kolon, s katerimi opišemo maksimalne pričakovane kolone na obravnavanem območju. V analizo smo z namenom učinkovitejše primerjave vključili tudi terenske meritve kolon. Primerjava vrednosti 50. percentile dolžine kolon je grafično prikazana v Prilogi F.4.

Rezultati primerjalne analize 95. percentile dolžine kolon med programoma Synchro 7 in Sim Traffic so prikazani na Grafikonih 18 in 19:



Grafikon 18: Primerjava kolon med Synchro 7 in Sim Traffic na križišču Dolgi most (95. percentila)



Grafikon 19: Primerjava kolon med Synchro 7 in Sim Traffic na križišču Tržaška - Tbilisijska (95. percentila)

Skupne dolžine kolon na nivoju celotnih obravnavanih križišč niso določene v nobenem izmed uporabljenih programskih orodij, zato je primerjava med programoma Synchro 7 in Sim Traffic smiselna zgolj na nivoju posameznih skupin voznih pasov, ki jih v analizi lahko upoštevamo. Podobno kot povprečne zamude, se tudi dolžine kolon v programih Synchro 7 in Sim Traffic določijo na drugačen način, in sicer so dolžine kolon v analitičnem programskem orodju Synchro 7 določene na nivoju posameznih skupin voznih pasov, v mikrosimulacijskem programskem orodju Sim Traffic pa za vsak vozni pas posebej. Primerjalna analiza dolžine kolon je tako smiselna zgolj na nivoju skupin voznih pasov, ki so sestavljene iz enega samega voznega pasu. Na obravnavanem območju je bila primerjava dolžine kolon med programoma Synchro 7 in Sim Traffic izvedena na podlagi zgolj štirih skupin voznih pasov na križišču Dolgi most in šestih skupin na križišču Tržaška - Tbilisijska (skupine voznih pasov, ki na Grafikonih 18 in 19 niso označene z zvezdico). Na ostalih dveh križiščih neposredna primerjava skupin voznih pasov ni mogoča, zato so grafikoni s primerjavo dolžine kolon na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška pri UBK (50. in 95 percentila) in na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih (95. percentila) prikazani v Prilogi F.4.

Na podlagi primerjalne analize v programih Synchro 7 in Sim Traffic nismo pridobili rezultatov, na podlagi katerih bi lahko ocenjevali učinkovitost določevanja kolon. Od desetih analiziranih skupin vozni pasov, so bile v šestih primerih kolone v programu Sim Traffic daljše od tistih v programu Synchro 7, v sklopu primerjave s terenskimi meritvami pa smo ugotovili, da dolžine kolon v programu Sim Traffic zgolj petkrat presežejo izmerjene dolžine (podobno kot v programu Synchro 7, kjer jih presežejo trikrat).

Na podlagi tega lahko ugotovimo, da tudi z uporabo mikrosimulacijskih programskih orodij, izmerjenih dolžin kolon ne dosežemo vedno, zato je pri pridobivanju podatkov za potrebe projektiranja smiselno razmisliti o kalibraciji prometnih modelov oziroma o prilagoditvi vhodnih podatkov. Glede na to, da so mere učinkovitosti križišč v analitičnih in mikrosimulacijskih programskih orodjih pridobljene na podlagi popolnoma različnih konceptov, so odstopanja med uporabljenima programoma pričakovana. Kljub temu pa na podlagi izvedene analize ne moremo ugotoviti katero programsko orodje poda bolj natančne rezultate, saj bi za to potrebovali podrobnejšo analizo, v sklopu katere bi primerjali različne analitične in mikrosimulacijske programe.

9.4 Povzetek analize mer učinkovitosti med programoma Synchro 7 in Vistro 5.0

V sklopu primerjalne analize mer učinkovitosti smo podrobneje analizirali povprečne zamude na nivoju posameznih skupin voznih pasov, posameznih priključkov in križišč, dosežene nivoje uslug na podlagi analitičnih metod HCM 2000 in ICU 2003 ter vrednosti 50. in 95. percentile dolžine kolon.

Mere učinkovitosti posameznih obravnavanih križišč smo pridobili na podlagi analize kapacitivnosti, ki smo jo izvedli na osnovi prometnih modelov, izdelanih v programih Synchro 7 in Vistro 5.0. Z analizo kapacitivnosti smo pridobili podatke o kapacitetah in razmerjih *v/c* za posamezne skupine voznih pasov, na podlagi teh parametrov pa so bile v nadaljevanju določene povprečne zamude in dolžine kolon. Preglednice z rezultati analize kapacitivnosti v programskih orodjih Synchro 7 in Vistro 5.0 so prikazane v Prilogah F.1 in F.2. Odstopanja v merah učinkovitosti med obema uporabljenima programoma, so v največji meri posledica razlik pri določanju nasičenih prometnih tokov. Primerjava nasičenih prometnih tokov na nivoju posameznih obravnavanih križišč je prikazana v Prilogi F.3.

Glavne ugotovitve v sklopu analize povprečnih zamud so:

- povprečne zamude se v obeh uporabljenih programskih orodjih določajo na nivoju posameznih skupin voznih pasov, posameznih priključkov in na nivoju križišč,
- v primeru ločenih signalnih faz za vožnjo v levo (varovana signalna faza) ter za vožnjo naravnost in desno, so povprečne zamude v obe uporabljenih programskih orodjih primerljive (tako pri zavijanju v levo, kot tudi v skupinah za vožnjo naravnost in desno),
- v primeru, da levi zavijalci niso varovani (ena signalna faza za vožnjo v vse tri smeri), se med uporabljenima programoma pojavijo večje razlike, ki so najbolj opazne pri levih zavijalcih. Odstopanja so posledica razlik v določevanju vplivnega faktorja za leve zavijalce, kar vpliva na razmerje *v/c*, posledično pa tudi na dosežene mere učinkovitosti. Razlike v povprečnih zamudah so izrazitejše v primeru nasičenih prometnih tokov, v primeru manjše nasičenosti pa se razlike med uporabljenima programoma zmanjšujejo,

- stanje povprečnih zamud na nivoju skupin voznih pasov se odraža tudi na nivoju celotnih krakov in križišč (v primeru, da so zamude na posameznih priključkih večje v programu Vistro 5.0, so posledično v tem programu večje tudi na nivoju celotnega križišča),
- na podlagi določenih povprečnih zamud ne moremo določiti katero uporabljeno programsko orodje je pri izračunu natančnejše, saj bi za to potrebovali terenske meritve dejanskih zamud, ki pa jih v sklopu magistrske naloge nismo pridobili.

Glavne ugotovitve v sklopu analize doseženih nivojev uslug so:

- nivoji uslug na podlagi metode HCM 2000 se določajo na osnovi povprečnih zamud, in sicer za posamezne skupine voznih pasov, posamezne priključke in celotna križišča. Nivoji uslug po metodi ICU 2003 se določijo zgolj na nivoju celotnih križišč (na osnovi kapacitete križišča),
- doseženi nivoji uslug po metodi HCM 2000 se med uporabljenima programoma razlikujejo za največ en razred. V večini primerov so doseženi nivoji uslug v obeh programskih orodjih enaki, razlike se pojavijo zgolj v primeru, da so povprečne zamude na meji dveh razredov,
- doseženi nivoji uslug po metodi ICU 2003 se razlikujejo za največ dva razreda, večje razlike pa so posledica večjega števila razredov ter posledično manjših razrednih razponov.

Glavne ugotovitve v sklopu analize dolžine kolon so:

- vrednosti 50. percentile dolžine kolon, s katerimi opišemo povprečne dolžine kolon, so v programu Vistro 5.0 bližje tistim, ki smo jih na obravnavanem območju izmerili v fazi terenskih meritev, kolone določene s programom Synchro 7 pa so prekratke. Povprečne dolžine kolon se v uporabljenih programskih orodjih določijo samo na semaforiziranih križiščih,
- vrednosti 95. percentile dolžine kolon, s katerimi opišemo maksimalne pričakovane dolžine kolon, predstavljajo merodajne vrednosti za projektiranje prometne infrastrukture. Maksimalne dolžine kolon, določene s programom Vistro 5.0, nekoliko presegajo vrednosti terenskih meritev, zato dodatna kalibracija vhodnih podatkov ni potrebna. V primeru večjih odstopanj pa bi bilo prilagoditve vhodnih podatkov, kljub vsemu, smiselno izvesti. Dolžine kolon v programu Synchro 7 terenskih meritev ne dosegajo (so krajše), zato so v tem primeru nujne prilagoditve vhodnih podatkov (kalibracija). Maksimalne dolžine kolon so v obeh uporabljenih programih določene tudi na nesemaforiziranih križiščih. Na podlagi primerjalne analize smo ugotovili, da je z vidika določevanja dolžine kolon, uporaba programa Vistro 5.0 bolj priporočljiva.

10 OPTIMIZACIJA KRMILNIH PROGRAMOV SEMAFORJEV

V zadnjem delu magistrske naloge je bila v obeh uporabljenih programskih orodjih izvedena optimizacija krmilnih programov semaforjev, s katero smo želeli, brez dodatnih gradbenih del in brez spreminjanja geometrije križišč, izboljšati mere učinkovitosti na obravnavanem območju. Optimizirane mere učinkovitosti smo med seboj primerjali, na podlagi tega pa smo skušali ugotoviti, katero programsko orodje je pri optimizaciji krmilnih programov učinkovitejše.

Programa Synchro 7 in Vistro 5.0 omogočata izvedbo optimizacije krmilnih programov semaforjev na dveh nivojih, in sicer optimizacijo posameznih semaforiziranih križišč ter linijsko koordinacijo zaporednih križiščih vzdolž cestne arterije. Na obeh nivojih lahko optimiziramo naslednje parametre:

- dolžino semafornega cikla,
- dolžino posameznih signalnih faz, pri čemer se lahko spreminja dolžina zelenega časa in dolžina intervalov »rumeno« in »vse rdeče«,
- vrstni red partnerskih signalnih faz, pri čemer dovolimo, da vodilna in sledilna signalna faza zamenjata vrstni red.

V primeru linijske koordinacije lahko na posameznih križiščih optimiziramo tudi zamike signalnih faz, s čimer dodatno izboljšamo stanje na obravnavanem območju.

V sklopu magistrske naloge smo na obravnavanem območju izvedli linijsko koordinacijo vzdolž treh zaporednih semaforiziranih križišč (nesemaforizirano križišče pri skladiščih je iz koordinacije izvzeto), pri čemer pa smo nekoliko prilagodili krmilne programe semaforjev. V času popoldanske prometne konice deluje na križišču Dolgi most krmilni program z dolžino semafornega cikla 120 sekund, v tem primeru pa koordinacija z drugimi semaforiziranimi križišči na Tržaški cesti, ki imajo v tem času dolžino semafornega cikla 100 sekund, ni mogoča. Ker je linijska koordinacija zgolj dveh semaforiziranih križišč nesmiselna, smo tudi na križišču Dolgi most uporabili krmilni program z dolžino cikla 100 sekund, ki na tem križišču deluje vsak dan med 10:00 in 14:00 ter med 17:00 in 20:00 (pred in po krmilnem programu v času popoldanske prometne konice). Krmilni program z dolžino semafornega cikla 100 sekund je predstavljen v prilogi C.2.

10.1 Linijska koordinacija v programu Synchro 7

Linijsko koordinacijo v programu Synchro 7 smo izvedli v dveh korakih, in sicer smo v prvem koraku optimizirali dolžine semafornega cikla in posameznih signalnih faz na obravnavanih križiščih, v drugem koraku pa časovne zamike med križišči in vrstni red partnerskih signalnih faz.

V prvem koraku je treba določiti dovoljene dolžine semafornih ciklov, ki jih program v optimizaciji lahko uporabi. V tej fazi smo izbrali semaforne cikle z dolžino med 50. in 120. sekundami, z intervalom 10 sekund, kar pomeni, da je program Synchro 7 optimizacijo krmilnih programov izvedel za 8 različnih dolžin semafornega cikla (50, 60, … , 110, 120 sekund), pri tem pa nismo dovolili možnosti polovičnih ciklov niti možnosti, da se semaforizirano križišče spremeni v nesemaforizirano. V fazi optimizacije dolžine semafornega cikla so bile optimizirane tudi dolžine posameznih signalnih faz. Glede na izbrano optimalno dolžino semafornega cikla in dolžine signalnih faz, program Synchro 7 v drugem koraku optimizacije določi tudi zamike med posameznimi križišči ter vrstni red partnerskih signalnih faz, če so le-te v krmilnem programu definirane.

Zamiki med križišči in vrstni red partnerskih signalnih faz so v programu Synchro 7 določeni tako, da so povprečne zamude na prometnih povezavah oziroma linkih med križišči čim manjše. Izbira optimalne dolžine semafornega cikla, ki je osnova za vse nadaljnje optimizacije, pa temelji na določitvi optimizacijskega indeksa, ki se izračuna na podlagi enačbe (27):

$$PI = \big((D * 1) + (S_t * 10)\big)/3600 \,, \tag{27}$$

kjer je:

PI optimizacijski indeks,

D skupne zamude (s),

S_t število zaustavitev vozil.

Optimizacijski indeks se izračuna za vsako dolžino semafornega cikla, ki smo jo določili v prvi fazi optimizacijskih nastavitev, optimalna dolžina semafornega cikla pa je tista, pri kateri je optimizacijski indeks najmanjši. Izračuni optimizacijskih indeksov pri linijski koordinaciji na obravnavanem območju so prikazani v Prilogi G.1. Na podlagi izračunanih optimizacijskih indeksov je bilo ugotovljeno, da so za linijsko koordinacijo semaforiziranih križišč na obravnavanem območju najbolj primerni semaforni cikli dolžine 120 sekund. Obstoječi in optimizirani krmilni programi semaforjev, s podaljšano dolžino cikla, optimiziranimi dolžinami signalnih faz ter zamiki med križišči, so v nadaljevanju prikazani za vsa obravnavana križišča.

10.2 Linijska koordinacija v programu Vistro 5.0

Z linijsko koordinacijo v programu Vistro 5.0 obravnavamo interakcije med semaforiziranimi križišči, postopek pa temelji na disperzijskem modelu, saj linijske koordinacije ni mogoče izvesti na podlagi analitičnega postopka po metode HCM.

Na podlagi disperzijskega modela se v odvisnosti od krmilnih programov semaforjev in relativnega položaja obravnavanih križišč (v času in prostoru), določijo zamude in število zaustavitev vozil. Linijska koordinacija v programu Vistro 5.0 je lahko izvedena na podlagi dveh optimizacijskih algoritmov, ki sta med seboj precej različna, zato izbira algoritma lahko vpliva na končni rezultat optimizacije. Optimizacijska algoritma, ki sta vgrajena v program Vistro 5.0 sta:

- genetični optimizacijski algoritem, in
- optimizacijski algoritem vzpenjanja (*ang. Hill Climbing Algorithm*).

V sklopu magistrske naloge je bila linijska koordinacija obravnavanih semaforiziranih križišč izvedena na osnovi optimizacijskega algoritma vzpenjanja.

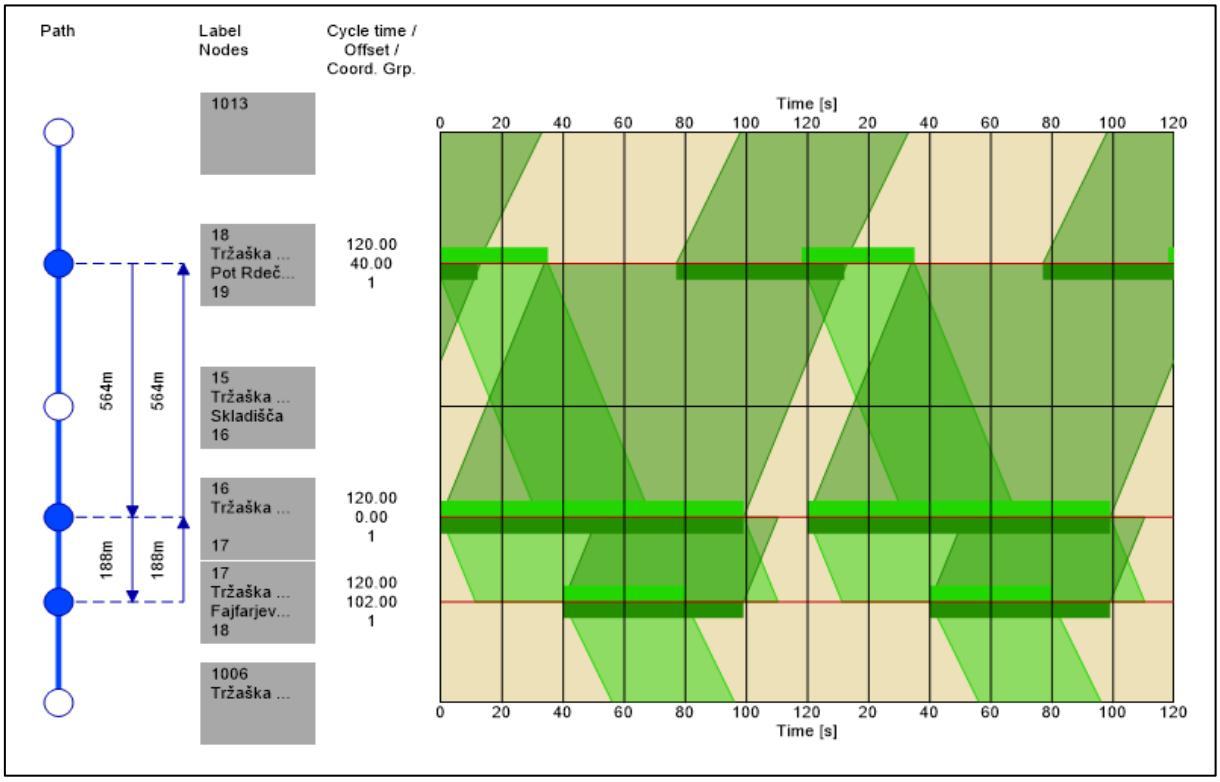
V programu Vistro 5.0 je treba, poleg izbire optimizacijskega algoritma, določiti tudi ciljno funkcijo, ki jo optimizacijski algoritem, v fazi linijske koordinacije, minimalizira. Ciljna funkcija je določena na podlagi zamud in števila zaustavitev, v optimizacijskih nastavitvah pa lahko uporabnik ročno nastavi uteži obeh parametrov, s čimer se določi njun vpliv na ciljno funkcijo. Osnovne optimizacijske nastavitve v programu Vistro 5.0 so enake tistim, ki smo jih uporabili pri linijski koordinaciji v programu Synchro 7. V linijski koordinaciji smo upoštevali tri zaporedna križišča vzdolž Tržaške ceste, pri tem pa smo dovolili optimizacijo dolžine semafornega cikla (tudi v programu Vistro 5.0 smo pri optimizaciji upoštevali spodnjo mejo dolžine cikla 50 sekund in zgornjo mejo 120 sekund, s korakom 10 sekund), optimizacijo dolžine posameznih signalnih faz ter zamikov med križišči, prav tako pa smo dovolili tudi spremembe v vrstnem redu partnerskih signalnih faz.

Med postopkom linijske koordinacije, program Vistro 5.0 prikaže vmesne rezultate v obliki grafa, na katerem je na abscisni osi navedeno število iteracij (čas), na ordinatni osi pa so prikazane vrednosti ciljnih funkcij. Na grafu so prikazane ciljne funkcije za vsako posamezno dolžino semafornega cikla, ki jo v optimizaciji uporabimo, njihove vrednosti pa, dokler ne postanejo konstantne, monotono padajo. Semaforni cikel, katerega ciljna funkcija doseže najmanjšo vrednost, je določen kot cikel z optimalno dolžino. Vrednosti ciljnih funkcij med linijsko koordinacijo na obravnavanem območju so prikazane v Prilogi G.2. Na podlagi linijske koordinacije v programu Vistro 5.0 je bilo ugotovljeno, da je minimalna vrednost ciljne funkcije dosežena pri dolžini semafornega cikla 120 sekund, ki je tako določena kot optimalna dolžina cikla na obravnavanem območju. Določena optimalna dolžina semafornih ciklov v programu Vistro 5.0 je enaka kot v programu Synchro 7.

Pred začetkom linijske koordinacije v programu Vistro 5.0 je treba na prometnem modelu označiti pot, vzdolž katere linijska koordinacija poteka. Program na osnovi določene poti izriše časovno-prostorski diagram, na katerem so označena vsa križišča, ki jih v koordinaciji upoštevamo, ter razdalje med njimi.

Na časovno-prostorskem diagramu so označene tudi dolžine semafornih ciklov, dolžine signalnih faz, ki vplivajo na linijsko koordinacijo, ter zamiki med križišči, ki jih lahko na diagramu ročno spreminjamo in tako zagotovimo optimalne razmere pri vožnji vzdolž arterije. Na izrisanem časovno-prostorskem diagramu so z zeleno barvo označeni časovni intervali, v času katerih lahko vozila prečkajo križišče ob zeleni luči. Na časovno-prostorskem diagramu obravnavanega območja so s svetlo zeleno barvo označeni časovni intervali v smeri vožnje proti centru Ljubljane, s temno zeleno barvo pa so označeni časovni intervali v smeri vožnje proti križišču Dolgi most. Nakloni časovnih intervalov so odvisni od dovoljene hitrosti, ki na obravnavanem območju znaša 60 km/h. Časovno-prostorski diagram celotnega obravnavanega območja v programu Vistro 5.0 predstavlja veliko prednost v primerjavi s programom Synchro 7, ki omogoča zgolj prikaz časovno-prostorskih diagramov posameznih križišč.

Časovno-prostorski diagram obravnavanega območja, po končani linijski koordinaciji v programu Vistro 5.0, je prikazan na Sliki 19:



Slika 19: Časovno-prostorski diagram celotnega območja linijske koordinacije v programu Vistro 5.0

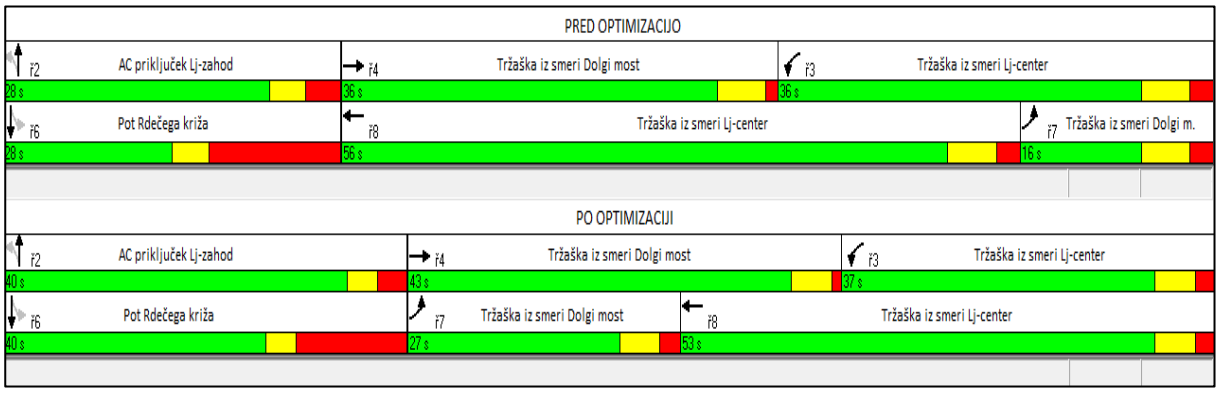
10.3 Optimizacija krmilnih programov v programih Synchro 7 in Vistro 5.0

V nadaljevanju so prikazani obstoječi in optimizirani krmilni programi križišč, ki smo jih upoštevali v linijski koordinaciji vzdolž Tržaške ceste, pri tem pa smo poleg samih krmilnih programov primerjali tudi mere učinkovitosti posameznih obravnavanih križišč, pridobljene pred in po linijski koordinaciji.

10.3.1 Optimizacija krmilnih programov na križišču Dolgi most

Na Slikah 20 in 21 so prikazani krmilni programi semaforjev na križišču Dolgi most, pred in po končani linijski koordinaciji v obeh uporabljenih programskih orodjih. Dolžina semafornega cikla pred optimizacijo znaša 100 sekund, po optimizaciji pa 120 sekund (v obeh programih).

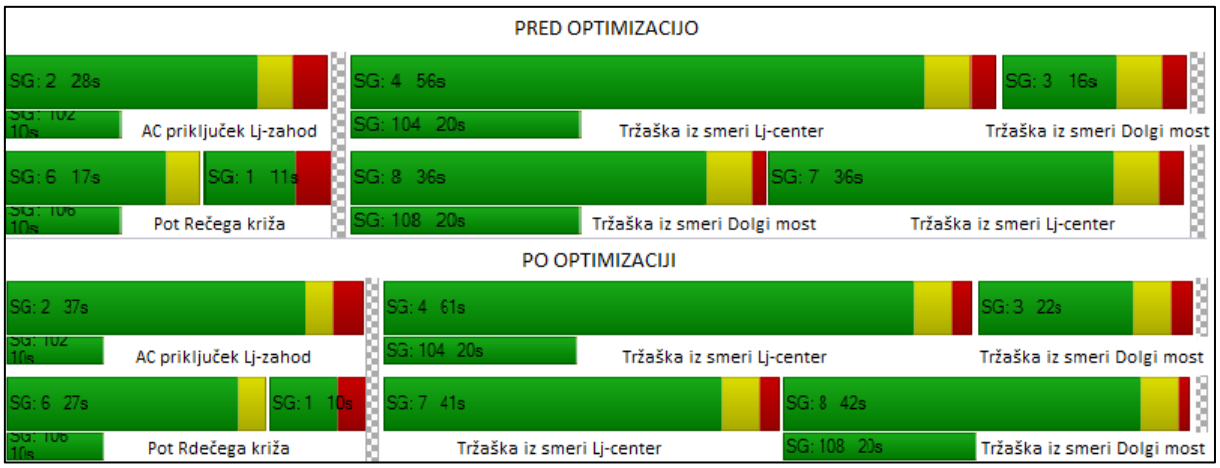
Dolžine obstoječih in optimiziranih signalnih faz v programih Synchro 7 in Vistro 5.0 so podrobneje prikazane tudi v Preglednicah 25 in 26:



Slika 20: Krmilna programa pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (križišče Dolgi most)

Preglednica 25: Dolžine signalnih faz pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (Dolgi most)

KRIŽIŠČE DOLGI MOST (SYNCHRO 7)			
Krak	**Tržaška iz smeri Lj-center**		**AC priključek Lj-zahod**
Smer (faza)	Levo (3)	Nar./desno (8)	Levo, naravnost in desno (2)
Trajanje zelene luči - pred optimizacijo [s]	30	50	22
Trajanje rumene luči - pred optimizacijo [s]	4	4	3
Trajanje rdeče luči - pred optimizacijo [s]	2	2	3
Trajanje zelene luči - po optimizaciji [s]	31	47	34
Trajanje rumene luči - po optimizaciji [s]	4	4	3
Trajanje rdeče luči - po optimizaciji [s]	2	2	3
Krak	**Tržaška iz smeri Dolgi most**		**Pot Rdečega križa**
Smer (faza)	Levo (7)	Nar. /desno (4)	Levo, naravnost in desno (6)
Trajanje zelene luči - pred optimizacijo [s]	10	31	14
Trajanje rumene luči - pred optimizacijo [s]	4	4	3
Trajanje rdeče luči - pred optimizacijo [s]	2	1	11
Trajanje zelene luči - po optimizaciji [s]	21	38	26
Trajanje rumene luči - po optimizaciji [s]	4	4	3
Trajanje rdeče luči - po optimizaciji [s]	2	1	11



Slika 21: Krmilna programa pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (križišče Dolgi most)

Preglednica 26: Dolžine signalnih faz pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (Dolgi most)

KRIŽIŠČE DOLGI MOST (VISTRO 5.0)			
Krak	**Tržaška iz smeri Lj-center**		**AC priključek Lj-zahod**
Smer (faza)	Levo (7)	Nar./desno (4)	Levo, naravnost in desno (2)
Trajanje zelene luči - pred optimizacijo [s]	30	50	22
Trajanje rumene luči - pred optimizacijo [s]	4	4	3
Trajanje rdeče luči - pred optimizacijo [s]	2	2	3
Trajanje zelene luči - po optimizaciji [s]	35	55	31
Trajanje rumene luči - po optimizaciji [s]	4	4	3
Trajanje rdeče luči - po optimizaciji [s]	2	2	3
Krak	**Tržaška iz smeri Dolgi most**		**Pot Rdečega križa**
Smer (faza)	Levo (3)	Nar. /desno (8)	Levo, naravnost in desno (6)
Trajanje zelene luči - pred optimizacijo [s]	10	31	14
Trajanje rumene luči - pred optimizacijo [s]	4	4	3
Trajanje rdeče luči - pred optimizacijo [s]	2	1	11
Trajanje zelene luči - po optimizaciji [s]	16	37	24
Trajanje rumene luči - po optimizaciji [s]	4	4	3
Trajanje rdeče luči - po optimizaciji [s]	2	1	10

Kot je razvidno iz Slike 20 in Preglednice 25, je program Synchro 7 pri optimizaciji signalnih faz na križišču Dolgi most spremenil zgolj dolžine zelenih luči, intervali »rumeno« in »vse rdeče« pa so ostali nespremenjeni. Med optimizacijo se je spremenilo tudi zaporedje vodilne in sledilne partnerske signalne faze, zato je vrstni red signalnih faz na krakih vzdolž Tržaške ceste po končani optimizaciji nekoliko drugačen. Pred optimizacijo je bila vzdolž Tržaške ceste (kraka A in C), na obeh obravnavanih krakih najprej omogočena vožnja naravnost (in desno), temu pa je sledil fazni preklop, ki je omogočal vožnjo naravnost in levo iz kraka A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center). V zadnjem delu partnerskih signalnih faz za vožnjo vzdolž Tržaške ceste je bila na obeh krakih omogočena varovana vožnja v levo.

Po končani optimizaciji krmilnega programa na križišču Dolgi most v programu Synchro 7, pa je v prvem delu omogočena vožnja v levo, naravnost in desno iz kraka C (Tržaška cesta iz smeri Dolgi most), v drugem delu je na obeh krakih omogočena vožnja naravnost (in desno), v zadnjem delu pa je vožnja naravnost in levo omogočena na kraku A (Tržaška cesta iz smeri Lj-center). Desni zavijalci na kraku A so tudi v tem primeru kanalizirani.

Pri optimizaciji signalnih faz v programu Vistro 5.0 (Slika 21 in Preglednica 26), se podobno kot v programu Synchro 7 spremeni trajanje zelenih luči, intervali »rumeno« in »vse rdeče« pa v večini primerov ostanejo nespremenjeni. Do sprememb intervalov »vse rdeče« pride zgolj v primeru, ko je trajanje rdeče luči, zaradi omejitev v pripravi krmilnih programov v programu Vistro 5.0, definirano z dodatno signalno fazo (faza 1). Med linijsko koordinacijo v programu Vistro 5.0 se spremeni tudi zaporedje dveh partnerskih signalnih faz, tako da je vrstni red signalnih faz na križišču Dolgi most, po končani optimizaciji, v obeh uporabljeni programskih orodjih popolnoma enak.

V linijski koordinaciji v programu Synchro 7 je križišče Dolgi most označeno kot vodilno, zato časovni zamik tega križišča ni določen (zamiki ostalih križišč se določijo glede na to križišče). V programu Vistro 5.0 se vodilno križišče ne definira, časovni zamiki med križišč pa se v tem primeru določijo glede na signalne faze, ki so v koordinaciji upoštevane. Na križišču Dolgi most sta v linijski koordinaciji upoštevani dve signalni fazi, in sicer fazi 4 in 8 za vožnjo naravnost vzdolž Tržaške ceste. V programu Vistro 5.0 zamik po končani linijski koordinaciji na križišču Dolgi most znaša 40 sekund, kar pomeni, da se signalni fazi 4 in 8 začneta 40 sekund kasneje, kot je določeno v krmilnem programu.

Na podlagi mer učinkovitosti obravnavanih križišč, ki smo jih pridobili z analizo kapacitivnosti, pred in po končani optimizaciji, smo izvedli primerjalno analizo povprečnih zamud, doseženih nivojev uslug in maksimalnih pričakovanih dolžin kolon (95. percentila). Rezultati primerjave mer učinkovitosti na križišču Dolgi most so za obe uporabljeni programski orodji prikazani v Preglednicah 27 in 28:

Preglednica 27: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (Dolgi most)

KRIŽIŠČE DOLGI MOST (SYNCHRO 7)							
Krak	**Tržaška iz smeri Lj-center (krak A)**			**AC priključek Lj-zahod (krak B)**			
Skupina voznih pasov	Levo	Nar./desno	Celoten krak	Levo	Nar.	Desno	Celoten krak
Zamude - pred optimizacijo [s]	108,9	23,4	71,1	278,2	40,0	1,0	67,7
Zamude - po optimizaciji [s]	175,9	26,6	110,0	160,0	37,8	1,0	41,7
Razlika [s]	+67,0	+3,2	+38,9	-118,2	-2,2	0,0	-26,0
Nivo uslug - pred optimizacijo	F	C	E	F	D	A	E
Nivo uslug - po optimizaciji	F	C	F	F	D	A	D

… se nadaljuje

… nadaljevanje Preglednice 27

KRIŽIŠČE DOLGI MOST (SYCHRO 7)							
Krak	**Tržaška iz smeri Lj-center (krak A)**			**AC priključek Lj-zahod (krak B)**			
Skupina voznih pasov	Levo	Nar./desno	Celoten krak	Levo	Nar.	Desno	Celoten krak
Dolžina kolon - pred optimizacijo [m]	170,3	106,6	/	117,9	45,5	0,0	/
Dolžina kolon - po optimizaciji [m]	219,2	62,6	/	124,7	48,4	0,0	/
Razlika [m]	+48,9	-44,0	/	+6,8	+2,9	0,0	/
Krak	**Tržaška iz smeri Dolgi most (krak C)**			**Pot Rdečega križa (krak D)**			
Skupina voznih pasov	Levo	Nar./desno	Celoten krak	Levo	Nar./desno		Celoten krak
Zamude - pred optimizacijo [s]	105,7	122,5	120,4	283,1	112,1		153,0
Zamude - po optimizaciji [s]	53,2	117,7	109,6	81,6	50,0		57,6
Razlika [s]	-52,5	-4,8	-10,8	-201,5	-63,1		-95,4
Nivo uslug - pred optimizacijo	F	F	F	F	F		F
Nivo uslug - po optimizaciji	D	F	F	F	D		E
Dolžina kolon - pred optimizacijo [m]	57,4	167,3	/	81,2	63,8		/
Dolžina kolon - po optimizaciji [m]	48,8	192,8	/	74,1	59,5		/
Razlika [m]	-8,6	+25,5	/	-7,1	-4,3		/

Preglednica 28: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (Dolgi most)

KRIŽIŠČE DOLGI MOST (VISTRO 5.0)							
Krak	**Tržaška iz smeri Lj-center (krak A)**			**AC priključek Lj-zahod (krak B)**			
Skupina voznih pasov	Levo	Nar./desno	Celoten krak	Levo	Nar.	Desno	Celoten krak
Zamude - pred optimizacijo [s]	105,82	18,39	67,23	84,80	39,45	/	65,20
Zamude - po optimizaciji [s]	126,38	25,79	81,98	155,52	40,50	/	105,81
Razlika [s]	+20,56	+7,40	+14,75	+70,72	+1,05	/	+40,61
Nivo uslug - pred optimizacijo	F	B	E	F	D	/	E
Nivo uslug - po optimizaciji	F	C	F	F	D	/	F
Dolžina kolon - pred optimizacijo [m]	336,07	128,80	/	140,37	83,18	/	/
Dolžina kolon - po optimizaciji [m]	392,99	161,14	/	197,23	90,95	/	/
Razlika [m]	+56,92	+32,34	/	+56,86	+7,77	/	/
Krak	**Tržaška iz smeri Dolgi most (krak C)**			**Pot Rdečega križa (krak D)**			
Skupina voznih pasov	Levo	Nar./desno	Celoten krak	Levo	Nar./desno		Celoten krak
Zamude - pred optimizacijo [s]	105,54	119,25	117,54	562,51	115,03		222,02
Zamude - po optimizaciji [s]	68,59	127,99	120,59	164,88	54,12		80,60
Razlika [s]	-36,95	+8,74	+3,05	-397,63	-60,91		-141,42
Nivo uslug - pred optimizacijo	F	F	F	F	F		F
Nivo uslug - po optimizaciji	E	F	F	F	D		F
Dolžina kolon - pred optimizacijo [m]	91,50	358,35	/	176,87	156,12		/
Dolžina kolon - po optimizaciji [m]	86,28	403,12	/	117,56	127,00		/
Razlika [m]	-5,22	+44,77	/	-59,31	-29,12		/

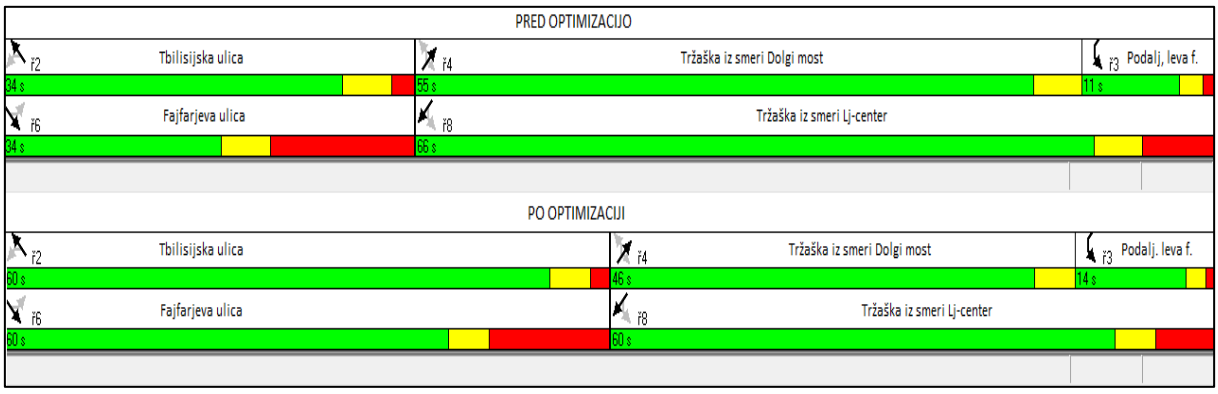
V sklopu primerjave rezultatov, pridobljenih pred in po končani optimizaciji v programu Synchro 7, lahko ugotovimo, da se po končani linijski koordinaciji povprečne zamude na nivoju krakov B, C in D zmanjšajo, na nivoju kraka A pa se povečajo, posledično pa se na kraku A za en razred poslabša tudi doseženi nivo uslug (dosežen je nivo uslug F, predtem E). Nivoji uslug na ostalih treh krakih se po končani linijski koordinaciji izboljšajo za en razred (kraka B in D) oziroma ostanejo enaki kot pred optimizacijo (krak C). Na kraku A se poleg povprečnih zamud povečajo tudi dolžine kolon pri zavijanju v levo, in sicer za 49 metrov oziroma devet dolžin avtomobilov, pri vožnji naravnost in desno pa so kolone, kljub večjim zamudam krajše, in sicer za 44 metrov oziroma osem dolžin avtomobilov. Dolžine kolon se kljub krajšim povprečnim zamudam povečajo tudi pri vožnji naravnost in levo na kraku B ter pri vožnji naravnost in desno na kraku C, kjer se kolone podaljšajo za štiri dolžine avtomobilov. Največje izboljšanje dolžine kolon je v programu Synchro 7 opazno na kraku D, kjer so po končani optimizaciji, kolone pri obeh skupinah voznih pasov krajše za dolžino enega avtomobila.

Na podlagi analize mer učinkovitosti v programu Vistro 5.0 lahko ugotovimo, da se povprečne časovne zamude na kraku D zmanjšajo, na ostalih treh krakih pa se povečajo. Po optimizaciji se dolžine kolon na kraku D pri vožnji v levo skrajšajo za 59 metrov oziroma za deset dolžin avtomobilov, pri vožnji naravnost in desno pa za pet dolžin avtomobilov. Doseženi nivo uslug na kraku D tudi po končani linijski koordinaciji ostane enak kot pred optimizacijo (nivo uslug F). Največje poslabšanje povprečnih časovnih zamud se v programu Vistro 5.0 pojavi na kraku B, najbolj opazno podaljšanje kolon pa pri vožnji v levo na krakih A in B, kjer se kolone podaljšajo za 57 metrov oziroma deset dolžin avtomobilov, ter pri vožnji naravnost in desno na kraku C, kjer se kolone podaljšajo za osem dolžin avtomobilov. Po končani optimizaciji se na krakih A in B za en razred poslabšata dosežena nivoja uslug, s tem pa so na vseh krakih doseženi nivoji uslug (F). Kljub dejstvu, da so nivoji uslug slabši kot pred optimizacijo, pa so zamude na posameznih krakih, po končani linijski koordinaciji, bolj enakomerno porazdeljene.

10.3.2 Optimizacija krmilnih programov na križišču Tržaška - Tbilisijska

Na Slikah 22 in 23 so prikazani krmilni programi semaforjev na križišču Tržaška - Tbilisijska, ki je na obravnavanem območju drugo večje štirikrako semaforizirano križišče. Dolžina semafornega cikla tudi na tem križišču pred optimizacijo znaša 100 sekund, po končani linijski koordinaciji pa je dolžina cikla v obeh uporabljenih programskih orodjih 120 sekund.

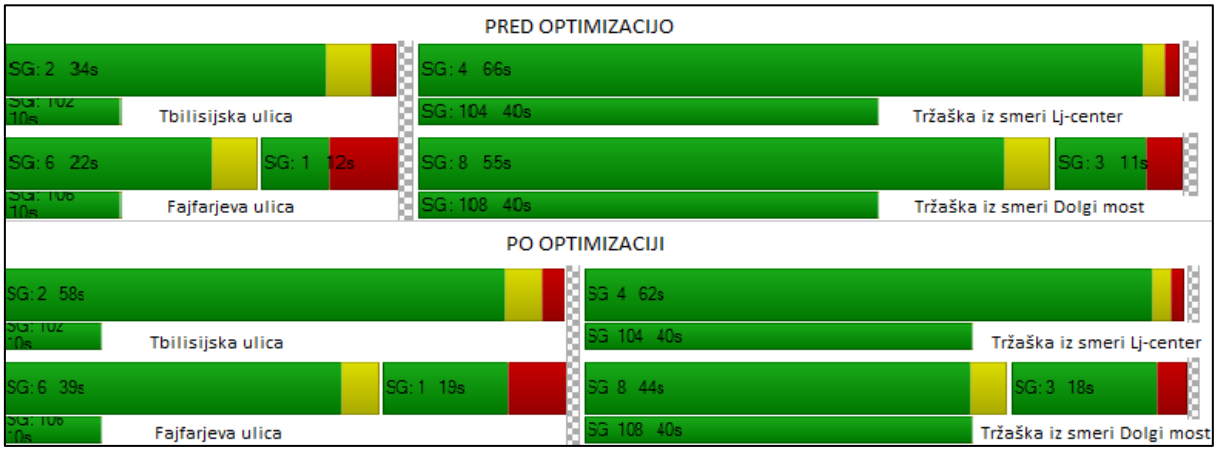
Dolžine obstoječih in optimiziranih signalnih faz, ki smo jih v obeh uporabljenih programskih orodjih pridobili po končani linijski koordinaciji, so podrobneje prikazane tudi v Preglednicah 29 in 30:



Slika 22: Krmilna programa pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (križišče Tržaška - Tbilisijska)

Preglednica 29: Dolžine signalnih faz pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (Tržaška - Tbilisijska)

KRIŽIŠČE TRŽAŠKA - TBILISIJSKA (SYNCHRO 7)			
Krak	**Tržaška iz smeri Lj-center**		**Tbilisijska ulica**
Smer (faza)	Podaljšana leva (3)	Levo, nar.in desno (8)	Levo, naravnost in desno (2)
Trajanje zelene luči - pred optimizacijo [s]	8	56	28
Trajanje rumene luči - pred optimizacijo [s]	2	4	4
Trajanje rdeče luči - pred optimizacijo [s]	1	6	2
Trajanje zelene luči - po optimizaciji [s]	11	50	54
Trajanje rumene luči - po optimizaciji [s]	2	4	4
Trajanje rdeče luči - po optimizaciji [s]	1	6	2
Krak	**Tržaška iz smeri Dolgi most**		**Fajfarjeva ulica**
Smer (faza)	Levo, naravnost in desno (4)		Levo, naravnost in desno (6)
Trajanje zelene luči - pred optimizacijo [s]	51		18
Trajanje rumene luči - pred optimizacijo [s]	4		4
Trajanje rdeče luči - pred optimizacijo [s]	11		12
Trajanje zelene luči - po optimizaciji [s]	42		44
Trajanje rumene luči - po optimizaciji [s]	4		4
Trajanje rdeče luči - po optimizaciji [s]	14		12



Slika 23: Krmilna programa pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (križišče Tržaška - Tbilisijska)

Preglednica 30: Dolžine signalnih faz pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (Tržaška - Tbilisijska)

KRIŽIŠČE TRŽAŠKA - TBILISIJSKA (VISTRO 5.0)			
Krak	**Tržaška iz smeri Lj-center**		**Tbilisijska ulica**
Smer (faza)	Podaljšana leva (/)	Levo, nar.in desno (4)	Levo, naravnost in desno (2)
Trajanje zelene luči - pred optimizacijo [s]	ni modelirana	63	28
Trajanje rumene luči - pred optimizacijo [s]	ni modelirana	2	4
Trajanje rdeče luči - pred optimizacijo [s]	ni modelirana	1	2
Trajanje zelene luči - po optimizaciji [s]	ni modelirana	59	52
Trajanje rumene luči - po optimizaciji [s]	ni modelirana	2	4
Trajanje rdeče luči - po optimizaciji [s]	ni modelirana	1	2
Krak	**Tržaška iz smeri Dolgi most**		**Fajfarjeva ulica**
Smer (faza)	Levo, naravnost in desno (8)		Levo, naravnost in desno (6)
Trajanje zelene luči - pred optimizacijo [s]	51		18
Trajanje rumene luči - pred optimizacijo [s]	4		4
Trajanje rdeče luči - pred optimizacijo [s]	11		12
Trajanje zelene luči - po optimizaciji [s]	40		35
Trajanje rumene luči - po optimizaciji [s]	4		4
Trajanje rdeče luči - po optimizaciji [s]	18		19

Med linijsko koordinacijo so se na križišču Tržaška - Tbilisijska, v obeh uporabljenih programskih orodjih, spremenile dolžine semafornega cikla in posameznih signalnih faz, vrstni red signalnih faz pa tudi po optimizaciji krmilnih programov ostane enak. Pri optimizaciji signalnih faz so se med linijsko koordinacijo v programu Synchro 7 spremenile dolžine zelenih časov posameznih signalnih faz, v programu Vistro 5.0 pa so se poleg zelenih časov spremenile tudi dolžine intervalov »vse rdeče«, in sicer na mestih, kjer so rdeče luči, zaradi omejitev v pripravi krmilnih programov v programu Vistro 5.0, definirane z dodatnimi signalnimi fazami (fazi 1 in 3).

Časovni zamik križišča Tržaška - Tbilisijska se v programu Synchro 7 določi glede na vodilno križišče Dolgi most, in sicer se signalni fazi 4 in 8 za vožnjo v vse tri smeri na križišču Tržaška - Tbilisijska začneta 14 sekund kasneje kot fazi 4 in 8 na križišču Dolgi most. Pred optimizacijo krmilnih programov je zamik med obravnavanima križiščema znašal 35 sekund. V programu Vistro 5.0 sta v linijski koordinaciji na križišču Tržaška - Tbilisijska upoštevani signalni fazi 4 in 8, ki se po določitvi časovnega zamika začneta 102 sekundi kasneje, kot je predvideno v optimiziranem krmilnem programu.

Na podlagi mer učinkovitosti, ki smo jih na križišču Tržaška - Tbilisijska pridobili pred in po končani linijski koordinaciji, smo izvedli primerjalno analizo povprečnih zamud, nivojev uslug in maksimalnih pričakovanih dolžin kolon (95. percentila). Rezultati primerjave mer učinkovitosti na obravnavanem križišču so za obe uporabljeni programski orodji prikazani v Preglednicah 31 in 32:

Preglednica 31: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (Tržaška - Tbilisijska)

KRIŽIŠČE TRŽAŠKA - TBILISIJSKA (SYNCHRO 7)							
Krak	**Tržaška iz smeri Lj-center (krak A)**				**Tbilisijska ulica (krak B)**		
Skupina voznih pasov	Levo	Nar./desno		Celoten krak	Levo	Nar./desno	Celoten krak
Zamude - pred optimizacijo [s]	42,6	15,6		20,7	443,2	32,6	364,1
Zamude - po optimizaciji [s]	136,9	33,3		52,8	87,3	21,7	74,7
Razlika [s]	+94,3	+17,7		+32,1	-355,9	-10,9	-289,4
Nivo uslug - pred optimizacijo	D	B		C	F	C	F
Nivo uslug - po optimizaciji	F	C		D	F	C	E
Dolžina kolon - pred optimizacijo [m]	44,5	81,4		/	144,7	40,2	/
Dolžina kolon - po optimizaciji [m]	101,0	132,7		/	132,6	34,9	/
Razlika [m]	+56,5	+51,3		/	-12,1	-5,3	/
Krak	**Tržaška iz smeri Dolgi most (krak C)**				**Fajfarjeva ulica (krak D)**		
Skupina voznih pasov	Levo	Nar.	Desno	Celoten krak	Levo	Nar./desno	Celoten krak
Zamude - pred optimizacijo [s]	8,1	7,9	7,5	7,8	51,6	345,3	278,1
Zamude - po optimizaciji [s]	41,8	35,0	25,7	33,4	29,2	52,9	47,5
Razlika [s]	+33,7	+27,1	+18,2	+25,6	-22,4	-292,4	-230,6
Nivo uslug - pred optimizacijo	A	A	A	A	D	F	F
Nivo uslug - po optimizaciji	D	D	C	C	C	D	D
Dolžina kolon - pred optimizacijo [m]	3,2	22,0	13,6	/	36,4	153,1	/
Dolžina kolon - po optimizaciji [m]	28,8	173,8	75,6	/	31,7	120,4	/
Razlika [m]	+25,6	+151,8	+62,0	/	-4,7	-32,7	/

Preglednica 32: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (Tržaška - Tbilisijska)

KRIŽIŠČE TRŽAŠKA - TBILISIJSKA (VISTRO 5.0)							
Krak	**Tržaška iz smeri Lj-center (krak A)**				**Tbilisijska ulica (krak B)**		
Skupina voznih pasov	Levo	Nar./desno		Celoten krak	Levo	Nar./desno	Celoten krak
Zamude - pred optimizacijo [s]	40,34	10,71		16,31	208,22	31,61	174,21
Zamude - po optimizaciji [s]	53,60	24,24		29,79	70,18	22,43	60,99
Razlika [s]	+13,26	+13,53		+13,48	-138,04	-9,18	-113,22
Nivo uslug - pred optimizacijo	D	B		B	F	C	F
Nivo uslug - po optimizaciji	D	C		C	E	C	E
Dolžina kolon - pred optimizacijo [m]	77,03	120,24		/	272,67	62,30	/
Dolžina kolon - po optimizaciji [m]	99,29	185,03		/	197,19	58,74	/
Razlika [m]	+22,26	+64,79		/	-75,48	-3,56	/
Krak	**Tržaška iz smeri Dolgi most (krak C)**				**Fajfarjeva ulica(krak D)**		
Skupina voznih pasov	Levo	Nar.	Desno	Celoten krak	Levo	Nar./desno	Celoten krak
Zamude - pred optimizacijo [s]	17,52	19,53	17,32	19,00	57,54	289,61	236,46
Zamude - po optimizaciji [s]	75,99	59,80	43,01	57,03	37,35	66,81	60,06
Razlika [s]	+58,47	+40,27	+25,69	+38,03	-20,19	-222,80	-176,40

… se nadaljuje

… nadaljevanje Preglednice 32

KRIŽIŠČE TRŽAŠKA - TBILISIJSKA (VISTRO 5.0)							
Krak	**Tržaška iz smeri Dolgi most (krak C)**				**Fajfarjeva ulica(krak D)**		
Skupina voznih pasov	Levo	Nar.	Desno	Celoten krak	Levo	Nar./desno	Celoten krak
Nivo uslug - pred optimizacijo	B	B	B	B	E	F	F
Nivo uslug - po optimizaciji	E	E	D	E	D	E	E
Dolžina kolon - pred optimizacijo [m]	19,19	168,76	83,58	/	56,61	337,84	/
Dolžina kolon - po optimizaciji [m]	36,29	315,13	130,08	/	53,53	201,28	/
Razlika [m]	+17,10	+146,37	+46,50	/	-3,08	-136,56	/

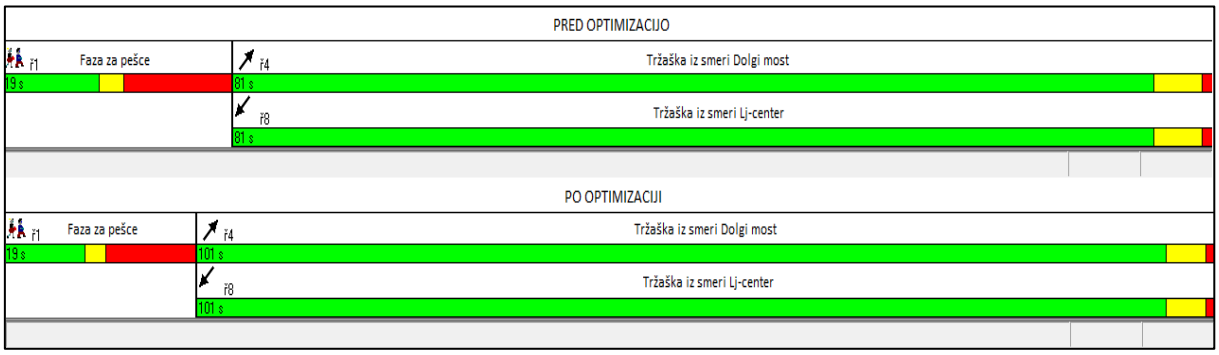
Tudi na križišču Tržaška - Tbilisijska se po končani linijski koordinaciji v obeh programskih orodjih mere učinkovitosti na nekaterih krakih izboljšajo, na drugih pa poslabšajo. V programskem orodju Synchro 7 se največje izboljšanje mer učinkovitosti pojavi na krakih B in D. Na kraku B se dolžine kolon pri zavijanju v levo zmanjšajo za 12 metrov (dolžina dveh avtomobilov) oziroma za eno dolžino avtomobila pri vožnji naravnost in desno. Podobno izboljšanje je opazno tudi na kraku D, kjer se kolone pri zavijanju v levo skrajšajo za dolžino enega avtomobila, pri vožnji naravnost in desno pa za dolžino šestih avtomobilov. Zaradi občutno manjših povprečnih zamud se na krakih B in D izboljšajo tudi nivoji uslug, in sicer za en razred na kraku B (nivo uslug E, predtem F) ter za dva razreda na kraku D (nivo uslug D, predtem F). Največje poslabšanje v programu Synchro 7 se pojavi na kraku C, kjer se dolžina kolone pri vožnji naravnost podaljša za 150 metrov, zaradi večjih povprečnih zamud pa se za dva razreda poslabša tudi doseženi nivo uslug (pred optimizacijo je dosežen nivo uslug A, po optimizaciji pa nivo uslug C). Poslabšanje mer učinkovitosti je opazno tudi na kraku A, kjer se kolone podaljšajo za približno deset dolžin avtomobilov, ob tem pa se za en razred poslabša tudi doseženi nivo uslug (po optimizaciji je dosežen nivo uslug D, pred optimizacijo pa nivo uslug C).

Tudi v programu Vistro 5.0 se po končani linijski koordinaciji mere učinkovitosti na krakih B in D občutno izboljšajo, na krakih A in C pa precej poslabšajo. Dolžine kolon na kraku B se pri vožnji v levo skrajšajo za trinajst dolžin avtomobilov, pri vožnji naravnost in desno pa za eno dolžino avtomobila. Občutno izboljšanje je opazno tudi na kraku D, kjer se dolžine kolon pri vožnji naravnost in desno skrajšajo za 136 metrov (24 dolžin avtomobilov), pri vožnji v levo pa za eno dolžino avtomobila. Po končani linijski koordinaciji se na krakih B in D za en razred izboljšata tudi dosežena nivoja uslug (na obeh krakih je dosežen je nivo uslug E, predtem F). Negativni vplivi linijske koordinacije v programu Vistro 5.0 so vidni na krakih A in C, kjer se dolžine kolon in povprečne časovne zamude precej povečajo, posledično pa se na kraku A za en razred poslabša doseženi nivo uslug (nivo uslug C, predtem B), na kraku C pa se nivo uslug poslabša celo za tri razrede (nivo uslug E, predtem B). Kljub poslabšanju na krakih A in C, so povprečne zamude, po končani optimizaciji, precej bolj enakomerno porazdeljene (med vsemi kraki na obravnavanem križišču), kar je tudi osnovni cilj linijske koordinacije.

10.3.3 Optimizacija krmilnih programov na semaforiziranem PP Tržaška pri UBK

Na Slikah 24 in 25 so prikazani krmilni programi semaforjev na semaforiziranem PP Tržaška pri UBK. Dolžina semafornega cikla tudi na tem križišču pred optimizacijo znaša 100 sekund, po končani linijski koordinaciji pa je dolžina cikla v obeh uporabljenih programskih orodjih 120 sekund.

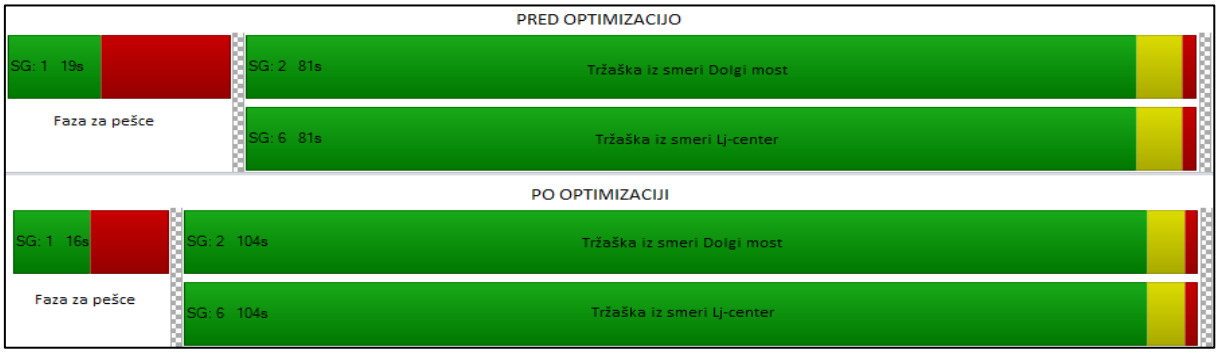
Dolžine obstoječih in optimiziranih signalnih faz, ki smo jih v obeh uporabljenih programskih orodjih pridobili po končani linijski koordinaciji, so podrobneje prikazane tudi v Preglednicah 33 in 34:



Slika 24: Krmilna programa pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (PP Tržaška pri UBK)

Preglednica 33: Dolžine signalnih faz pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (PP Tržaška pri UBK)

SEMAFORIZIRAN PREHOD ZA PEŠCE TRŽAŠKA PRI UBK (SYNCHRO 7)			
Krak	**Tržaška iz smeri Lj-center**	**Tržaška iz smeri Dolgi most**	**Faza za pešce**
Smer (faza)	Naravnost (8)	Naravnost (4)	(1)
Trajanje zelene luči - pred optimizacijo [s]	76	76	8
Trajanje rumene luči - pred optimizacijo [s]	4	4	0
Trajanje rdeče luči - pred optimizacijo [s]	1	1	11
Trajanje zelene luči - po optimizaciji [s]	96	96	8
Trajanje rumene luči - po optimizaciji [s]	4	4	0
Trajanje rdeče luči - po optimizaciji [s]	1	1	11



Slika 25: Krmilna programa pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (PP Tržaška pri UBK)

Preglednica 34: Dolžine signalnih faz pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (PP Tržaška pri UBK)

SEMAFORIZIRAN PREHOD ZA PEŠCE TRŽAŠKA PRI UBK (VISTRO 5.0)			
Krak	**Tržaška iz smeri Lj-center**	**Tržaška iz smeri Dolgi most**	**Faza za pešce**
Smer (faza)	Naravnost (6)	Naravnost (2)	(1)
Trajanje zelene luči - pred optimizacijo [s]	76	76	8
Trajanje rumene luči - pred optimizacijo [s]	4	4	0
Trajanje rdeče luči - pred optimizacijo [s]	1	1	11
Trajanje zelene luči - po optimizaciji [s]	99	99	8
Trajanje rumene luči - po optimizaciji [s]	4	4	0
Trajanje rdeče luči - po optimizaciji [s]	1	1	8

Po končani linijski koordinaciji v programu Synchro 7 se na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška pri UBK za 20 sekund podaljšata signalni fazi za vožnjo vozil vzdolž Tržaške ceste (fazi 2 in 6), faza za pešce pa ostane popolnoma enaka kot pred optimizacijo. Pri linijski koordinaciji v programu Vistro 5.0 se signalni fazi za vožnjo vozil vzdolž Tržaške ceste podaljšata za 23 sekund, ob enem pa se za 3 sekunde skrajša varovalni čas faze za pešce, ki pa je tudi po končani optimizaciji v skladu s predpisi.

Časovni zamik na prehodu za pešce v programu Synchro 7 je koordiniran tako, da je začetek signalne faze za pešce (faza 1) zamaknjen za 71 sekund glede na začetek signalnih faz 4 in 8 na vodilnem križišču Dolgi most. V programu Vistro 5.0 pa je na obravnavanem semaforiziranem prehodu za pešce, po končani linijski koordinaciji definiran ničelni časovni zamik, zato se signalni fazi za vožnjo vzdolž Tržaške ceste (fazi 2 in 6) začneta tako, kot je določeno v krmilnem programu.

Na podlagi mer učinkovitosti, ki smo jih na PP Tržaška pri UBK pridobili pred in po končani linijski koordinaciji, smo izvedli primerjalno analizo povprečnih časovnih zamud, nivojev uslug in maksimalnih pričakovanih dolžin kolon (95. percentila), rezultat analize pa so prikazani v Preglednicah 35 in 36:

Preglednica 35: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji v programu Synchro 7 (PP Tržaška pri UBK)

SEMAFORIZIRAN PREHOD ZA PEŠCE TRŽAŠKA PRI UBK (SYNCHRO 7)				
Krak	**Tržaška iz smeri Lj-center (krak A)**		**Tržaška iz smeri Dolgi most (krak B)**	
Skupina voznih pasov	Naravnost	Celoten krak	Naravnost	Celoten krak
Zamude - pred optimizacijo [s]	12,0	12,0	5,7	5,7
Zamude - po optimizaciji [s]	4,0	4,0	2,8	2,8
Razlika [s]	-8.0	-8,0	-2,9	-2,9
Nivo uslug - pred optimizacijo	B	B	A	A
Nivo uslug - po optimizaciji	A	A	A	A
Dolžina kolon - pred optimizacijo [m]	93,8	/	44,7	/
Dolžina kolon - po optimizaciji [m]	30,2	/	28,4	/
Razlika [m]	-63,6	/	-16,3	/

Preglednica 36: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji v programu Vistro 5.0 (PP Tržaška pri UBK)

SEMAFORIZIRAN PREHOD ZA PEŠCE TRŽAŠKA PRI UBK (VISTRO 5.0)				
Krak	**Tržaška iz smeri Lj-center (krak A)**		**Tržaška iz smeri Dolgi most (krak B)**	
Skupina voznih pasov	Naravnost	Celoten krak	Naravnost	Celoten krak
Zamude - pred optimizacijo [s]	8,95	8,95	6,01	6,01
Zamude - po optimizaciji [s]	5,82	5,82	3,96	3,96
Razlika [s]	-3,13	-3,13	-2,05	-2,05
Nivo uslug - pred optimizacijo	A	A	A	A
Nivo uslug - po optimizaciji	A	A	A	A
Dolžina kolon - pred optimizacijo [m]	237,37	/	140,12	/
Dolžina kolon - po optimizaciji [m]	211,53	/	128,03	/
Razlika [m]	-25,84	/	-12,09	/

Mere učinkovitosti na prehodu za pešce Tržaška pri UBK se po končani linijski koordinaciji v programu Synchro 7 izboljšajo na obeh krakih v križišču. Po končani optimizaciji so zamude na krakih A in B zgolj minimalne (do 4 sekunde), posledično pa sta na obeh krakih dosežena nivoja uslug A. Na obeh krakih se precej zmanjšajo tudi dolžine kolon, ki se po optimizaciji gibljejo okrog 30 metrov.

Na obravnavanem križišču so bile povprečne časovne zamude v programu Vistro 5.0 tudi pred linijsko koordinacijo tako majhne, da sta bila na obeh krakih v križišču dosežena nivoja uslug A. Po končani optimizaciji so se povprečne zamude na obeh krakih zmanjšale za dobro tretjino, na obeh obravnavanih krakih pa so se zmanjšale tudi dolžine kolon, in sicer za dobrih 25 metrov na kraku A (dolžina štirih avtomobilov) in 12 metrov na kraku B (dva avtomobila).

10.4 Optimizacija na nivoju celotnih križišč v programih Synchro 7 in Vistro 5.0

V zaključni fazi primerjalne analize med programoma Synchro 7 in Vistro 5.0 smo izvedli primerjavo mer učinkovitosti na nivoju celotnih obravnavanih križišč, pred in po končani linijski koordinaciji. Na podlagi primerjave povprečnih časovnih zamud in doseženih nivojev uslug med obstoječim stanjem in stanjem po končani linijski koordinaciji, smo ugotavljali učinkovitost optimizacije krmilnih programov v obeh uporabljenih programskih orodjih. Poleg izboljšav posameznih mer učinkovitosti po optimizaciji, je pomemben dejavnik pri določanju učinkovitosti linijske koordinacije predstavljala tudi porazdeljenost povprečnih časovnih zamud na posameznih priključkih, obravnavanih semaforiziranih križišč, ki je pri uspešno izvedeni optimizaciji čimbolj enakomerna.

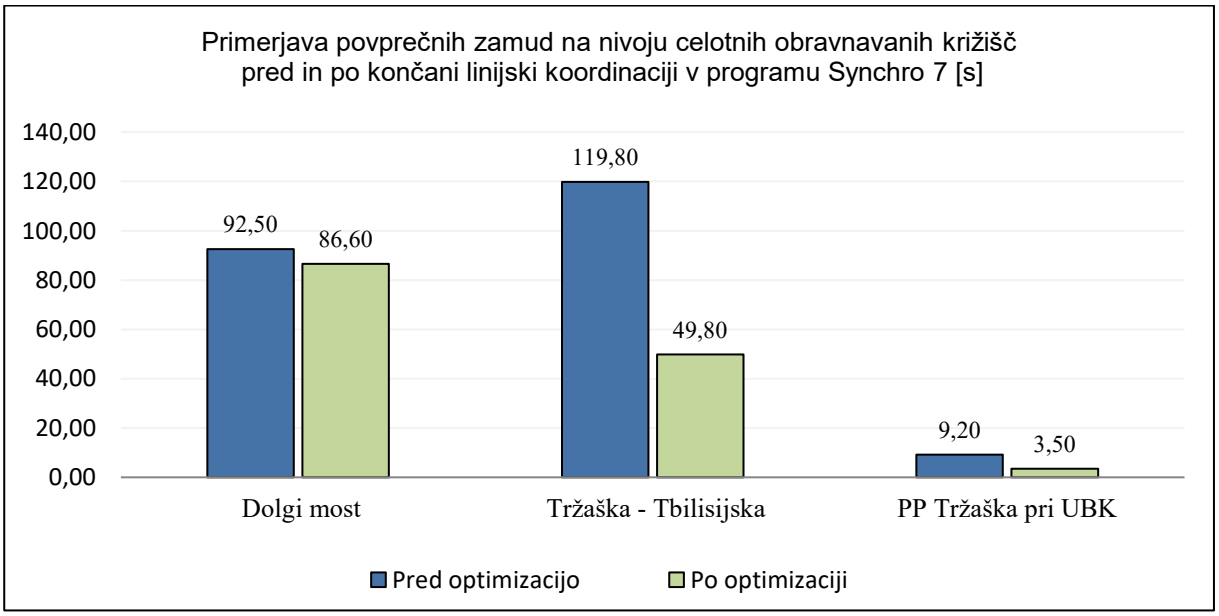
Rezultati primerjalne analize na nivoju celotnih obravnavanih križišč, pred in po končani linijski koordinaciji v programih Synchro 7 in Vistro 5.0, so predstavljeni v Preglednicah 37 in 38. Primerjava povprečnih zamud na nivoju celotnih križiščih pa je grafično prikazana tudi na Grafikonih 20 in 21:

Preglednica 37: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji na nivoju celotnih križišč (Synchro 7)

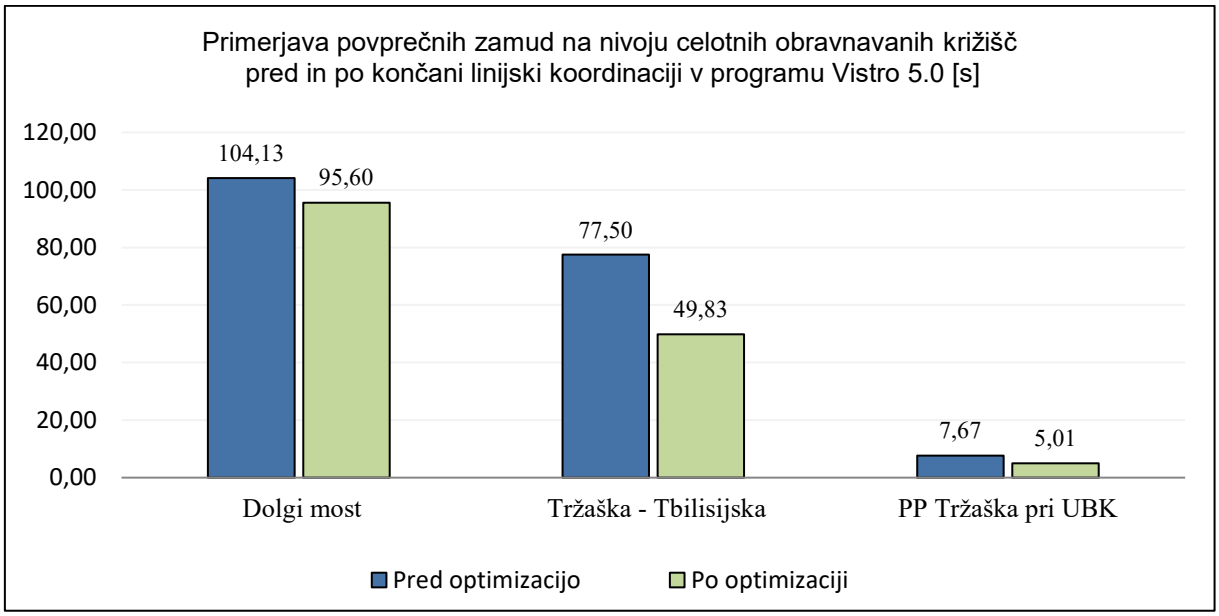
Primerjava mer učinkovitosti pred in po linijski koordinaciji v programu Synchro 7			
Križišče	Dolgi most	Tržaška - Tbilisijska	PP Tržaška pri UBK
Zamude - pred optimizacijo [s]	92,5	119,8	9,2
Zamude - po optimizaciji [s]	86,6	49,8	3,5
Relativna razlika [%]	-6,4	-58,4	-62,0
Nivo uslug - pred optimizacijo	F	F	A
Nivo uslug - po optimizaciji	F	D	A
ICU 2003 - pred optimizacijo	1,07	1,12	0,7
ICU 2003 - po optimizaciji	1,07	1,12	0,7
Nivo uslug ICU - pred optimizacijo	G	H	C
Nivo uslug ICU - po optimizaciji	G	H	C

Preglednica 38: Primerjava mer učinkovitosti pred in po optimizaciji na nivoju celotnih križišč (Vistro 5.0)

Primerjava mer učinkovitosti pred in po linijski koordinaciji v programu Vistro 5.0			
Križišče	Dolgi most	Tržaška - Tbilisijska	PP Tržaška pri UBK
Zamude - pred optimizacijo [s]	104,13	77,50	7,67
Zamude - po optimizaciji [s]	95,60	49,83	5,01
Relativna razlika [%]	-8,2	-35,7	-34,7
Nivo uslug - pred optimizacijo	F	E	A
Nivo uslug - po optimizaciji	F	D	A
ICU 2003 - pred optimizacijo	0,987	0,927	0,577
ICU 2003 - po optimizaciji	0,987	0,927	0,577
Nivo uslug ICU - pred optimizacijo	F	F	B
Nivo uslug ICU - po optimizaciji	F	F	B



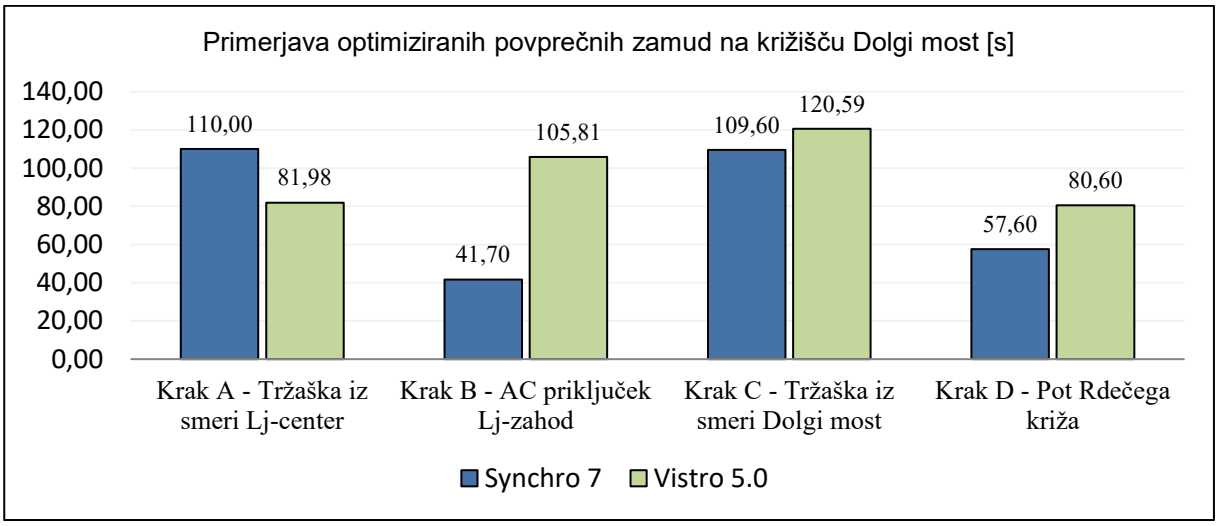
Grafikon 20: Primerjava povprečnih zamud pred in po optimizaciji na nivoju celotnih križišč (Synchro 7)



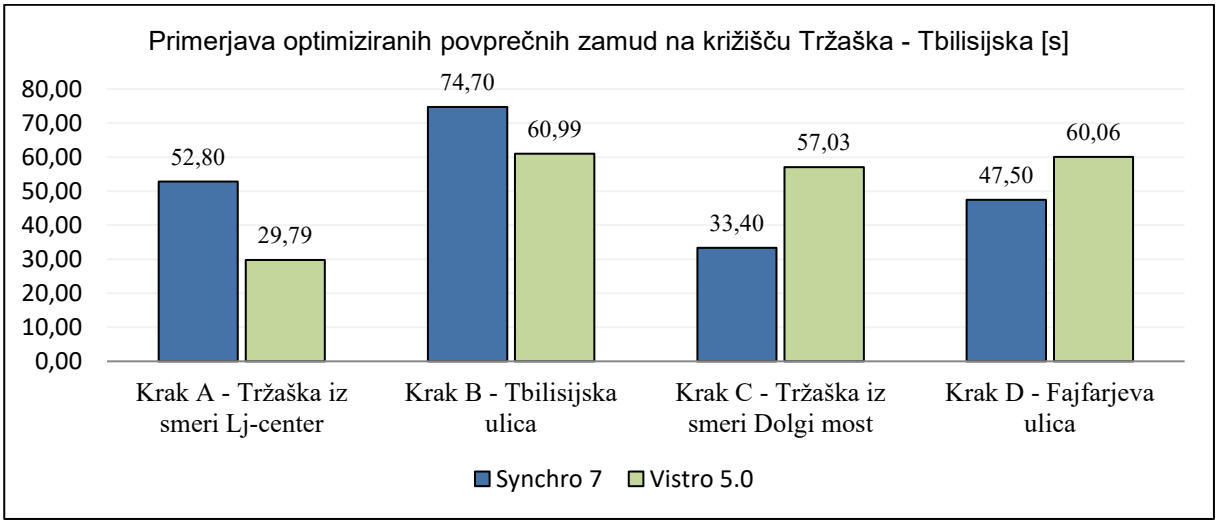
Grafikon 21: Primerjava povprečnih zamud pred in po optimizaciji na nivoju celotnih križišč (Vistro 5.0)

Na podlagi primerjalne analize pridobljenih mer učinkovitosti na nivoju celotnih obravnavanih križišč smo ugotovili, da so povprečne časovne zamude po končani linijski koordinaciji v obeh uporabljenih programskih orodjih povsem primerljive. Povprečne zamude na križišču Dolgi most se v programu Synchro 7, po optimizaciji zmanjšajo za 6,4 %, v programu Vistro 5.0 pa za 8,2 %, pri čemer je razlika v povprečnih zamudah med obema programoma slabih 10 sekund. Na križišču Tržaška - Tbilisijska so povprečne zamude po končani linijski koordinaciji, v obeh programskih orodjih, popolnoma enake in znašajo 49,8 sekund. Z vidika zmanjševanja povprečnih zamud je na tem križišču program Synchro 7 učinkovitejši, saj so bile v tem programu povprečne časovne zamude pred optimizacijo mnogo večje kot v programu Vistro 5.0. Zelo primerljive so tudi povprečne zamude na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška pri UBK, ki se po končani linijski koordinaciji, med programoma razlikujejo zgolj za sekundo in pol. Primerljivost povprečnih zamud na nivoju celotnih obravnavanih križišč vpliva tudi na dosežene nivoje uslug, določene po metodi HCM 2000, ki so po končani linijski koordinaciji, v obeh uporabljenih programskih orodjih, enaki. Kot je razvidno iz Preglednic 37 in 38, pa linijska koordinacija vzdolž cestne arterije ne vpliva na mere učinkovitosti po metodi ICU 2003, saj so doseženi nivoji uslug, določeni na podlagi te metode, tudi po končani optimizaciji popolnoma enaki kot pred njo.

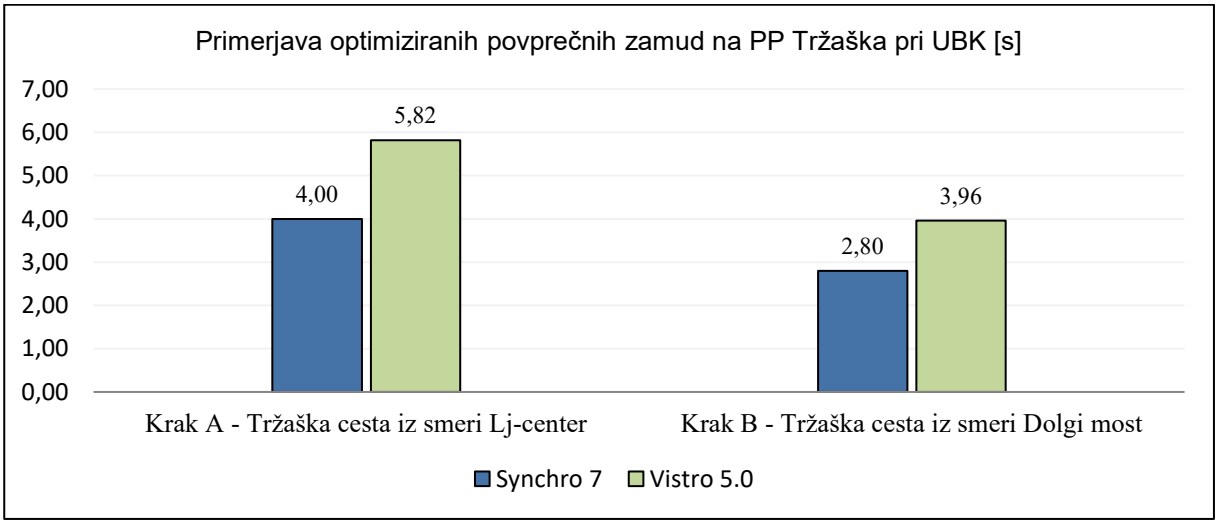
Ker so povprečne zamude v programih Synchro 7 in Vistro 5.0, na nivoju celotnih obravnavanih križišč zelo primerljive, smo z namenom ugotavljanja učinkovitosti optimizacije v obeh uporabljenih programskih orodjih, izvedli dodatno primerjavo povprečnih zamud po končani linijski koordinaciji, na podlagi katere smo preverjali enakomernost porazdelitve zamud na posameznih krakih v križiščih. Primerjava povprečnih zamud v programih Synchro 7 in Vistro 5.0, na nivoju posameznih krakov vseh treh obravnavanih semaforiziranih križišč, je prikazana na Grafikonih 22, 23, 24:



Grafikon 22: Primerjava optimiziranih povprečnih zamud na križišču Dolgi most



Grafikon 23: Primerjava optimiziranih povprečnih zamud na križišču Tržaška - Tbilisijska



Grafikon 24: Primerjava optimiziranih povprečnih zamud na semaforiziranem PP Tržaška pri UBK

Kot je razvidno iz Grafikonov 22, 23 in 24, so povprečne zamude v programu Vistro 5.0, po končani linijski koordinaciji vzdolž Tržaške ceste, med posameznimi kraki v križiščih porazdeljene bolj enakomerno kot v programu Synchro 7, kjer so med kraki na posameznih obravnavanih križiščih opazne večje razlike v povprečnih zamudah. Ker je enakomernost porazdelitve povprečnih zamud ključni parameter uspešne optimizacije, smo na podlagi ugotovitev prišli do zaključka, da je programsko orodje Vistro 5.0 tudi z vidika optimizacije krmilnih programov semaforjev v sklopu linijske koordinacije vzdolž cestne arterije, učinkovitejše, posledično pa je njegova uporaba bolj priporočljiva.

11 ZAKLJUČKI IN UGOTOVITVE

V sklopu magistrske naloge smo na podlagi različnih primerjalnih analiz, ugotavljali učinkovitost oziroma primernost uporabe izbranih analitičnih programskih orodij za izdelavo prometnih študij, ki predstavljajo osnovo pri projektiranju novih oziroma rekonstrukciji obstoječih križišč ter ostale cestne infrastrukture. V sklopu primerjalnih analiz smo obravnavali postopke priprave prometnih modelov, pridobljene mere učinkovitosti posameznih križišč in linijsko koordinacijo vzdolž cestne arterije, na podlagi katere smo izvedli optimizacijo signalnih naprav za vodenje prometa na obravnavanih križiščih vzdolž Tržaške ceste v Ljubljani.

V prvi fazi smo izvedli primerjalno analizo izdelave prometnih modelov v programskih orodjih Trafficware Synchro 7 in PTV Vistro 5.0, v sklopu katere smo ugotavljali podobnosti, razlike in največje pomanjkljivost obeh uporabljenih programov. Priprava prometnih modelov v obeh izbranih analitičnih programskih orodjih je dokaj preprosta, kljub temu pa je za izdelavo dobrih prometnih študij priporočljivo natančno poznavanje analitičnih metod, ki predstavljajo osnovo za izvedbo analize kapacitivnosti obravnavanih križišč, ter poznavanje splošnih lastnosti, prednosti in omejitev izbranih analitičnih programov, v primerjavi s programskimi orodji, ki mere učinkovitosti križišč določajo na drugačne načine (npr. mikrosimulacijski programi). Poleg ustreznega teoretičnega znanja, je v tej fazi ključna kvalitetna priprava prometnih in geometrijskih podatkov ter podatkov o značilnostih signalnih naprav za vodenje prometnih tokov, brez katerih analize kapacitivnosti ni mogoče izvesti.

Prometni modeli, izdelani v programih Synchro 7 in Vistro 5.0 so predstavljali podlago za izvedbo analize kapacitivnosti, na osnovi katere smo pridobili podatke o povprečnih zamudah, doseženih nivojih uslug in dolžinah kolon na posameznih obravnavanih križiščih. Mere učinkovitosti posameznih križišč so v veliki meri odvisne od izdelave prometnih modelov oziroma predvsem od načina priprave krmilnih programov semaforjev. V programskih orodjih Synchro 7 in Vistro 5.0 se največje razlike pri pripravi krmilnih programov pojavijo v primeru različnega trajanja zelenih luči na nasprotnih krakih znotraj ene signalne faze ter v primeru podaljšanih faz za levo zavijanje. Vplivi različnih postopkov priprave krmilnih programov so opazni predvsem pri analizi povprečnih zamud, ki se v obeh programskih orodjih določajo na podlagi istih enačb. V primeru, da so v krmilnih programih posamezne signalne faze definirane na enak način, so povprečne zamude v obeh programskih orodjih zelo primerljive, v nasprotnem primeru pa se med programoma lahko pojavijo občutne razlike. Ne glede na razlike v zamudah, pa so doseženi nivoji uslug posameznih križišč, ki se določijo na podlagi povprečnih zamud, v obeh programskih orodjih zelo primerljivi oziroma v večini primerov celo identični. Odstopanja se lahko pojavijo zgolj v primerih, ko so povprečne zamude na meji dveh razredov. V teh primerih doseženi nivoji uslug odstopajo za največ en razred.

Dolžine kolon, določene s programoma Synchro 7 in Vistro 5.0, smo v sklopu primerjalne analize primerjali z dolžinami kolon, ki smo jih izmerili na obravnavanem območju. Na podlagi te analize smo ugotovili, da so dolžine kolon, izračunane v programu Vistro 5.0, bližje realno izmerjenim kolonam, zato je s tega vidika uporaba programa Vistro 5.0 bolj priporočljiva.

V zadnjem delu magistrske naloge smo izvedli linijsko koordinacijo treh zaporednih semaforiziranih križišč vzdolž Tržaške ceste, v sklopu katere smo optimizirali obstoječe krmilne programe semaforjev in pridobili nove, izboljšane mere učinkovitosti križišč. Na podlagi primerjalne analize povprečnih zamud, pridobljenih po končani linijski koordinaciji, smo ugotovili, da so le-te, na nivoju celotnih obravnavanih križišč, v obeh programskih orodjih povsem primerljive. Učinkovitost optimizacije smo zato določili na podlagi dodatne primerjalne analize, s katero smo preverjali porazdeljenost povprečnih zamud na posameznih krakih v križiščih, po končani linijski koordinaciji. Na podlagi te analize je bilo ugotovljeno, da so povprečne zamude v programu Vistro 5.0, v primerjavi s programom Synchro 7, mnogo bolje enakomerno razporejene, zato je tudi z vidika optimizacije krmilnih programov semaforjev, uporaba programa Vistro 5.0 bolj priporočljiva.

Na podlagi ugotovitev, ki smo jih pridobili v fazi primerjalne analize med programoma Synchro 7 in Vistro 5.0 lahko potrdimo večino ugotovitev oziroma zaključkov, ki so bili izpostavljeni v dveh tujih prometnih študijah (Johari S., 2016 in Kazemi Afshar, 2015). V sklopu magistrske naloge smo ugotovili podobne razlike pri določevanju povprečnih zamud v uporabljenih analitičnih programskih orodjih, pri čemer so razlike, tako kot v tujih prometnih študijah, najbolj izrazite pri analizi skupin voznih pasov za leve zavijalce ter v primeru večje nasičenosti obravnavanih križišč. Do enakih zaključkov kot v tujih študijah smo prišli tudi v fazi optimizacije krmilnih programov semaforjev, kjer se je programsko orodje Vistro izkazalo kot bolj prilagodljivo oziroma bolj učinkovito.

Kljub dejstvu, da smo v sklopu magistrske naloge ugotovili, da je programsko orodje Vistro 5.0 bolj učinkovito kot orodje Synchro 7, pa je izbira programske opreme za izdelavo prometnih študij v končni fazi odvisna od vsakega posameznika, njegovih izkušenj in obsega analize, ki jo izvaja. Ne glede na izbrano programsko orodje, je izredno pomembno, da uporabnik premore dovolj strokovnega znanja, ki mu omogoča kritično presojo rezultatov. Vsaka nepravilnost v pripravi prometnih modelov lahko vpliva na končne mere učinkovitosti obravnavanih križišč, zato je za zagotavljanje verodostojnosti rezultatov ključno, da se prometna analiza izvede na podlagi kvalitetno pripravljenih podatkov, ter da jo ne glede na preprostost uporabe analitičnih programskih orodij izvede usposobljen uporabnik. Ključen dejavnik pri zagotavljanju verodostojnih prometnih študij pa je poleg strokovnosti uporabnika tudi ustrezna kalibracija vhodnih podatkov na osnovi realnih terenskih meritev, ki predstavlja predpogoj, da v izbranih programskih orodjih pridobimo mere učinkovitosti, ki opišejo dejansko stanje obravnavanih križišč.

VIRI

Albeck, J., Husch, D. 2003. Intersection Capacity Utilization, Evaluation Procedures for Intersections and Interchanges. Trafficware Corporation.
http://www.trafficware.com/uploads/2/2/2/5/22256874/intersection_capacity_utilization_2003.pdf
(Pridobljeno 23. 5. 2017.)

Albeck, J., Husch, D. 2006. Synchro Studio 7, Synchro plus Sim Traffic and 3D Viewer, Traffic Signal Software - User Guide. Trafficware Corporation.

Hamad, K., Abuhamda, H. 2015. Estimating Base Saturation Flow Rate for Selected Signalized Intersections in Doha, Qatar. Journal of Traffic and Logistics Engineering, Vol. 3, No. 2.
http://www.jtle.net/uploadfile/2015/0826/20150826021325831.pdf
(Pridobljeno 17. 6. 2017.)

Highway Capacity Manual. 2000. Washington, Transportation Research Board.
https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/highway_capacital_manual.pdf
(Pridobljeno 25. 4. 2017.)

Jeannotte, K., Chandra, A., Alexiadis, V., Skabardonis, A. 2004. Traffic Analysis Toolbox Volume II: Decision Support Methodology for Selecting Traffic Analysis Tools. Washington, Federal Highway Administration: str. 6 - 12.
https://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat_vol2/Vol2_Methodology.pdf
(Pridobljeno 24. 4. 2017.)

Johari S., A. 2016. Traffic Simulation Models! How do They Compare. ITE/IMSA Spring Conference.
http://www.azite.org/ITEIMSAspring/SpringConf2016/5C1%20-%20Application%20and%20Comparison%20of%20Traffic%20Modeling%20Software.pdf
(Pridobljeno 26. 9. 2017.)

Kazemi Afshar, A.A. 2015. Estimation of Traffic Impact at Signalized Intersections around the Proposed Health Campus in Etlik, Ankara. M. Sc. Thesis. Ankara, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Tehnical University.
http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12619269/index.pdf
(Pridobljeno 17. 8. 2017.)

Maher, T. 2015. Inteligentni transportni sistemi in storitve. Učno gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Maher, T. 2007. Teorija prometnega toka. Skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Mathew, T. V. 2014. Transportation Systems Engineering. IIT Bombay.
http://nptel.ac.in/courses/105101008/downloads/cete_37.pdf
(Pridobljeno 18. 6. 2017.)

Pravilnik o cestnih priključkih na javne ceste. Uradni list RS, št. 86/2009.
http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV9370
(Pridobljeno 10. 6. 2017.)

Pravilnik o projektiranju cest. Uradni list RS, št. 91/2005 in 26/2006.
http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV5811
(Pridobljeno 10. 6. 2017.)

Pravilnik o zaporah na cestah, priloga 3. Uradni list RS, št. 4/2016.
https://www.uradni-list.si/files/RS_-2016-004-00002-OB~P003-0000.PDF
(Pridobljeno 13. 9. 2017.)

PTV Vistro User Manual. 2017. Karlsruhe, PTV AG.

Sever, D., Dobovšek, M. 2005. Sprejemljivost metodologije za prometno dimenzioniranje semaforiziranih križišč po HCM 2000 v slovenskem urbanem okolju. Gradbeni vestnik, 11.

Zakon o cestah. Uradni list RS, št. 109/2010, 48/2012 in 36/2014.
https://www.uradni-list.si/1/content?id=101701
(Pridobljeno 10. 6. 2017.)

Zakon o motornih vozilih. Uradni list RS, št. 106/2010, 23/2015 in 68/2016.
http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO5791
(Pridobljeno 10. 6. 2017.)

Zakon o pravilih cestnega prometa. Uradni list RS, št. 82/2013.
https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/101702
(Pridobljeno 10. 6. 2017.)

Zakon o voznikih. Uradni list RS, št. 85/2016.
https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/101703
(Pridobljeno 10. 6. 2017.)

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: METODOLOGIJA HCM ZA SEMAFORIZIRANA KRIŽIŠČA A1
Priloga A.1: Shematski prikaz metode HCM za semaforizirana križišča A1
Priloga A.2: Faktorji za izračun nasičenega prometnega toka A2
Priloga A.3: Izravnalni faktorji progresije A2

PRILOGA B: METODOLOGIJA HCM ZA NESEMAFORIZIRANA KRIŽIŠČA A3
Priloga B.1: Shematski prikaz metode HCM za križišče s stransko cesto A3

PRILOGA C: KRMILNI PROGRAMI SEMAFORJEV A4
Priloga C.1: Krmilni program na križišču Dolgi most s ciklom 120 sekund A4
Priloga C.2: Krmilni program na križišču Dolgi most s ciklom 100 sekund A5
Priloga C.3: Oznake signalnih glav na križišču Dolgi most A6
Priloga C.4: Krmilni program na križišču Tržaška - Tbilisijska s ciklom 100 sekund A7
Priloga C.5: Oznake signalnih glav na križišču Tržaška - Tbilisijska A8

PRILOGA D: PODATKI O PROMETNIH OBREMENITVAH A9
Priloga D.1: Podatki o prometnih obremenitvah na križišču Dolgi most A9
Priloga D.2: Podatki o prometnih obremenitvah na križišču Tržaška - Tbilisijska A11
Priloga D.3: Podatki o prometnih obremenitvah na križišču Tržaška - Tbilisijska (lastno štetje) A11
Priloga D.4: Podatki o prometnih obremenitvah na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih A12
Priloga D.5: Podatki o prometnih obremenitvah na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška cesta pri UBK A12
Priloga D.6: Faktorji konične ure A13

PRILOGA E: PROMETNI MODELI A14
Priloga E.1: Prometni model celotne prometne mreže v programu Synchro 7 A14
Priloga E.2: Prikaz prometnih obremenitev na prometnem modelu v programu Synchro 7 A15
Priloga E.3: Prometni model celotne prometne mreže v programu Vistro 5.0 A16
Priloga E.4: Prikaz prometnih obremenitev in oštevilčenja signalnih faz v programu Vistro 5.0 A17

PRILOGA F: REZULTATI ANALIZE KAPACITIVNOSTI A18

Priloga F1: Rezultati analize kapacitivnosti v programu Synchro 7 A18

Priloga F.2: Rezultati analize kapacitivnosti v programu Vistro 5.0 A20

Priloga F.3 Primerjava nasičenih prometnih tokov A23

Priloga F.4: Primerjava dolžine kolon med programoma Synchro 7 in Sim Traffic A24

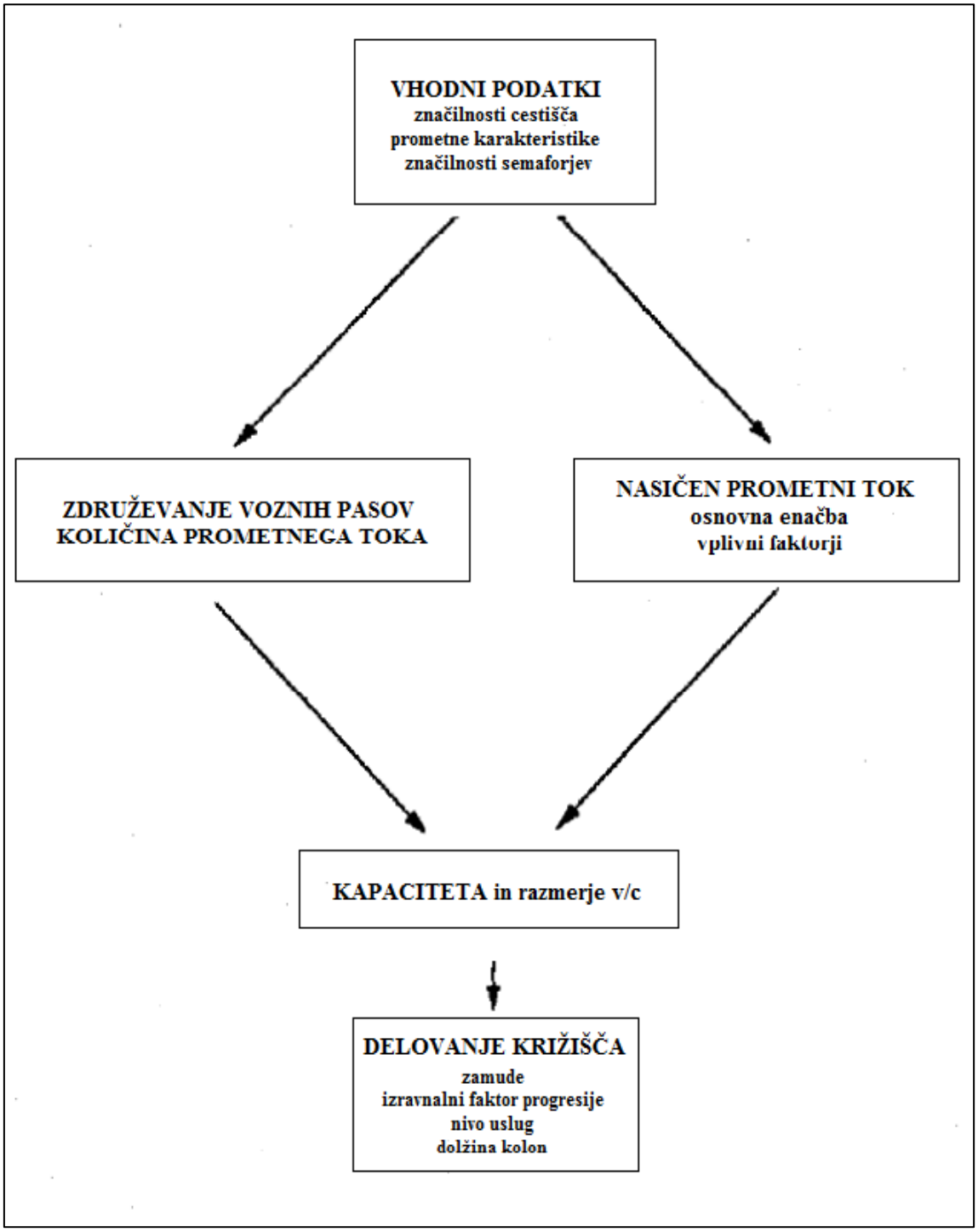
PRILOGA G: LINIJSKA KOORDINACIJA VZDOLŽ TRŽAŠKE CESTE A26

Priloga G.1: Linijska koordinacija v programu Synchro 7 A26

Priloga G.2: Linijska koordinacija v programu Vistro 5.0 A26

PRILOGA A: METODOLOGIJA HCM ZA SEMAFORIZIRANA KRIŽIŠČA

Priloga A.1: Shematski prikaz metode HCM za semaforizirana križišča (HCM 2000, 16-1)



Priloga A.2: Faktorji za izračun nasičenega prometnega toka (HCM 2000, 16-11)

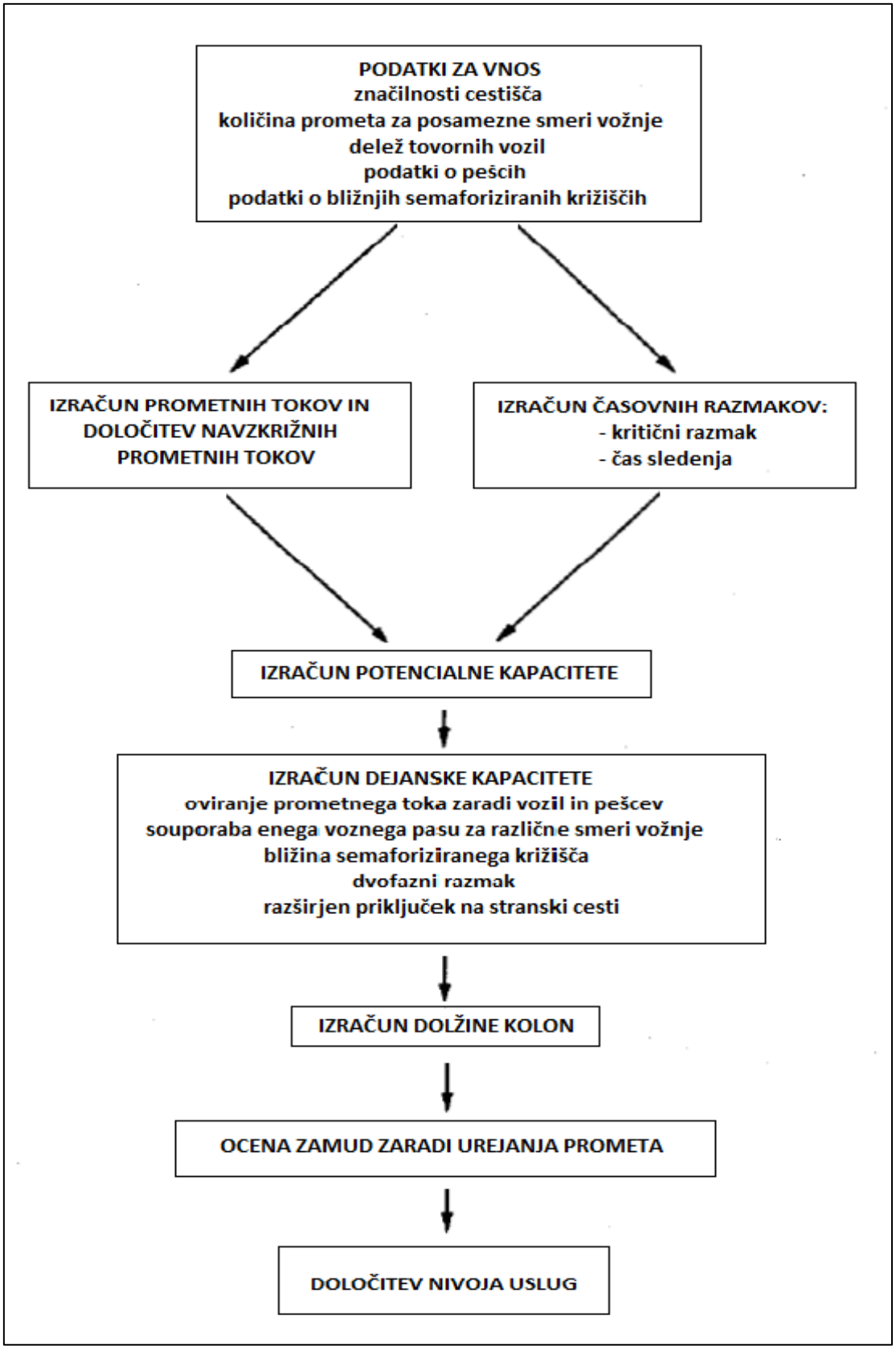
faktor	enačba	definicija spremenljivk	
širina voznega pasu	$f_w = 1 + \frac{(W-3.6)}{9}$	W – širina voznega pasu (m)	W ≥ 2.4 če je W > 4.8 se lahko analizira dva pasova
tovorna vozila	$f_{HV} = \frac{100}{100 + \%HV(E_T - 1)}$	%HV – % tovornih vozil skupine	E_T – 2.0
naklon	$f_g = 1 - \frac{\%G}{200}$	%G – naklon priključka v %	-6 ≤ %G ≤ +10
parkiranje	$f_p = \frac{N - 0.1 - \frac{18N_m}{3600}}{h}$	N – število voznih pasov v skupini N_m – število parkiranj/h	$0 \le N_m \le 180$ $f_p \ge 0.05$ $f_p \ge 1.00$ ko ni parkiranja
ustavljanje avtobusov	$f_{bb} = \frac{N - \frac{14.4N_{bb}}{3600}}{h}$	N – število voznih pasov v skupini N_{bb} – število ustavljanj avtobusov/h	$0 \le N_{bb} \le 250$ $f_{bb} \ge 0.05$
vrsta območja	f_a =0.90 za mestno središče f_a =1.00 ostala območja		
izkoriščenost voznih pasov	$f_{LU} = \frac{v_g}{v_{g1}N}$	v_g – neizravnan prometni tok za skupino voz. pasov v_{g1} – neizravnan prometni tok voznega pasu z največ prometa v skupini N – število voznih pasov v skupini	
levo zavijanje	Varovana faza: Ločen vozni pas: f_{LT} =0.95 Skupen vozni pas: $f_{LT} = \frac{1}{1.0 + 0.05P_{LT}}$	P_{LT} – delež levih zavijanj v skupini	
desno zavijanje	Ločen vozni pas: f_{RT} =0.85 Skupen vozni pas: f_{RT} =1.0-(0.15)P_{RT} En vozni pas: f_{RT} =1.0-(0.135)P_{RT}	P_{RT} – delež desnih zavijanj v skupini	$f_{RT} \ge 0.05$
ustavljanje zaradi pešcev in kolesarjev	Izravnava za leva zavijanja: f_{lb}=1.0-P_{LT}(1-A_{pbT}) izravnava za desna zavijanja: f_{rb}=1.0-P_{RT}(1-A_{pbT})(1-P_{RTA})	A_{pbT} – izravnava za dovoljeno fazo P_{LTA} – delež levih zavijanj varovane zelene faze in celotnimi levimi zavijanji P_{RTA} – delež desnih zavijanj varovane zelene faze in celotnimi desnimi zavijanji	

Priloga A.3: Izravnalni faktorji progresije (HCM 2000, 16-20)

delež zelene luči	NAČIN PRIHODA VOZIL					
	1	2	3	4	5	6
0.20	1.167	1.007	1.000	1.000	0.833	0.750
0.30	1.286	1.063	1.000	0.986	0.714	0.571
0.40	1.445	1.136	1.000	0.895	0.555	0.333
0.50	1.667	1.240	1.000	0.767	0.333	0.000
0.60	2.001	1.395	1.000	0.576	0.000	0.000
0.70	2.556	1.653	1.000	0.256	0.000	0.000
f_{PA}	1.00	0.93	1.00	1.15	1.00	1.00
R_p	0.333	0.667	1.000	1.333	1.667	2.000

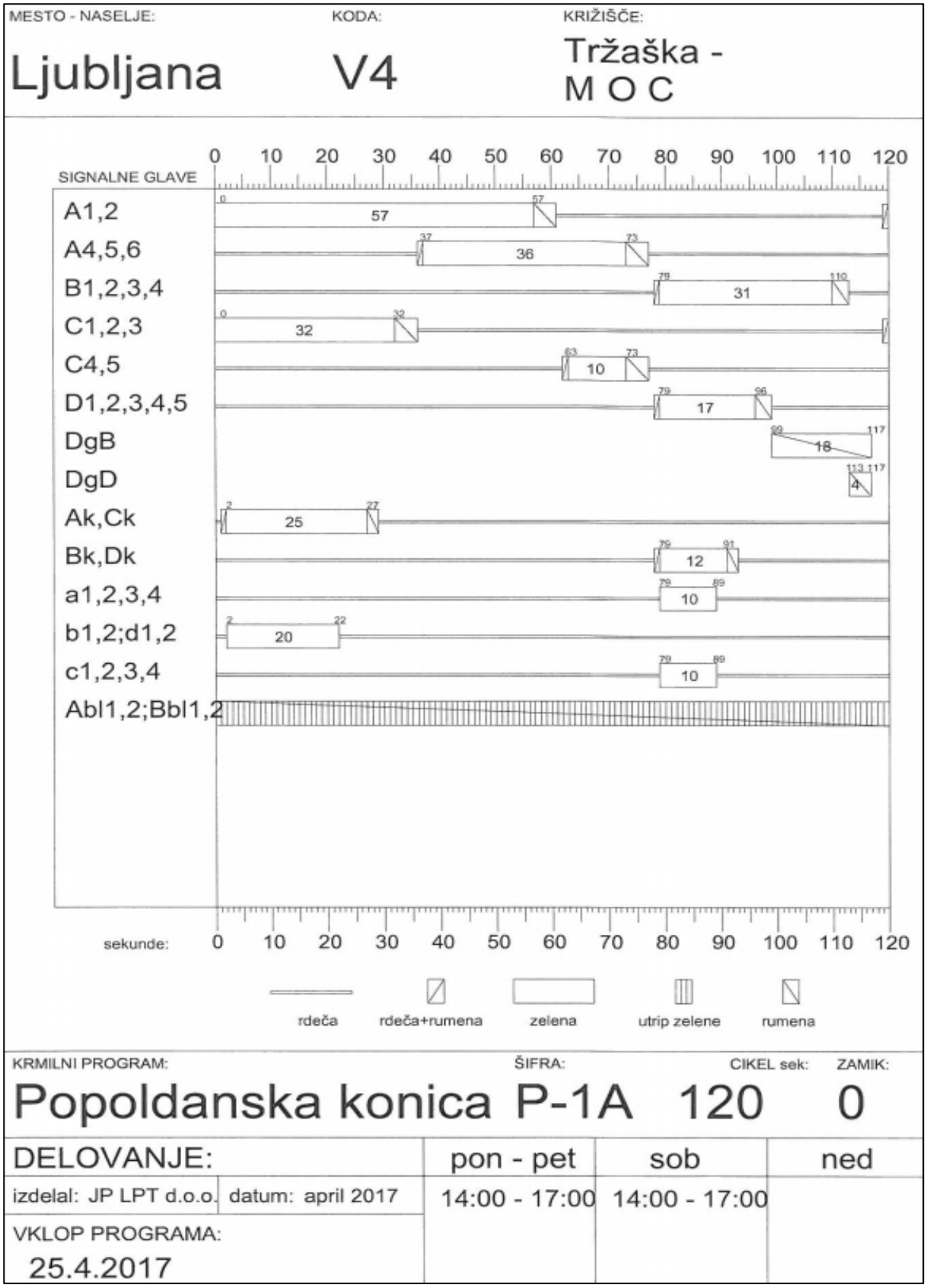
PRILOGA B: METODOLOGIJA HCM ZA NESEMAFORIZIRANA KRIŽIŠČA

Priloga B.1: Shematski prikaz metode HCM za križišče s stransko cesto (HCM 2000, 17-1)

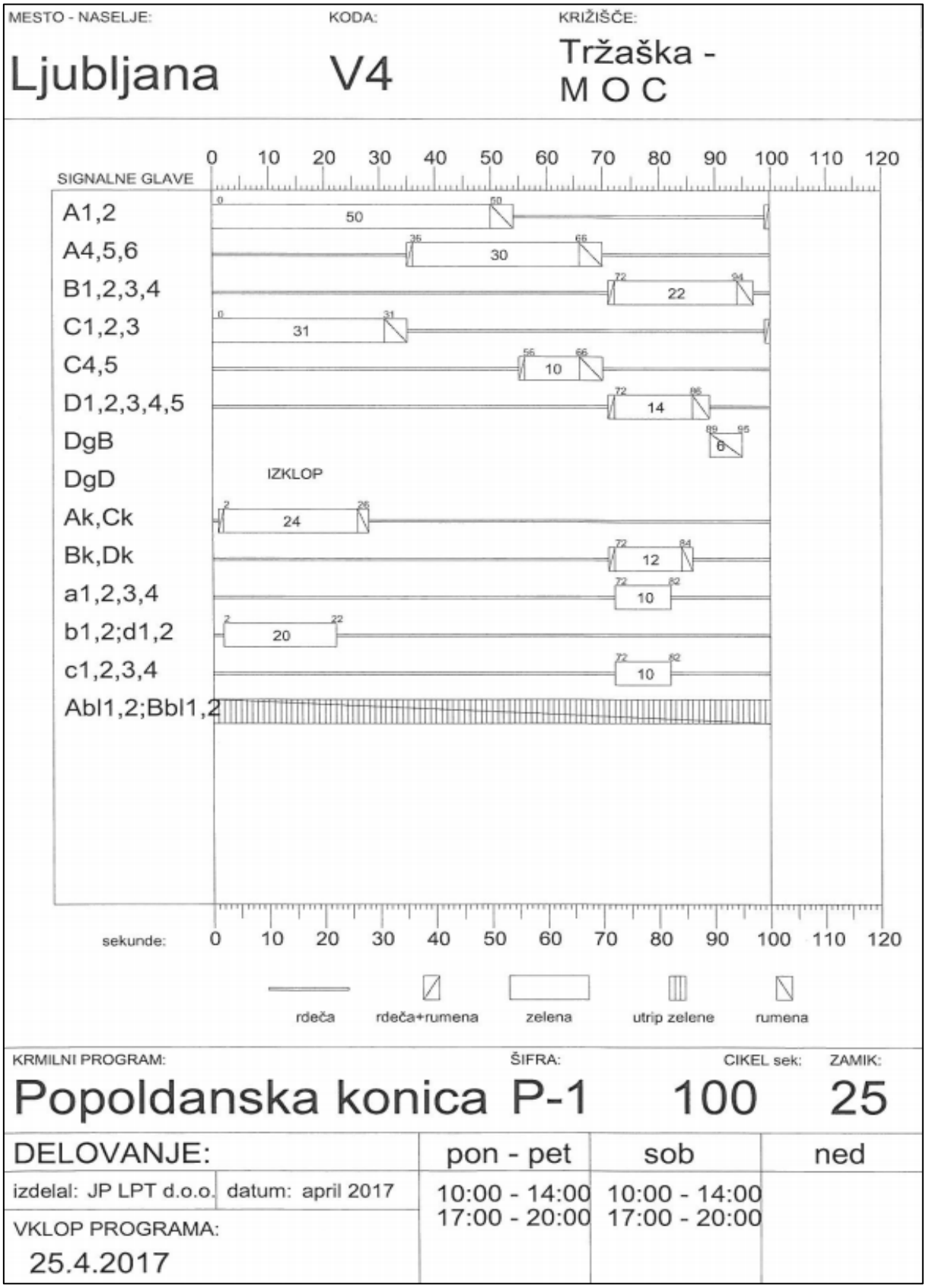


PRILOGA C: KRMILNI PROGRAMI SEMAFORJEV

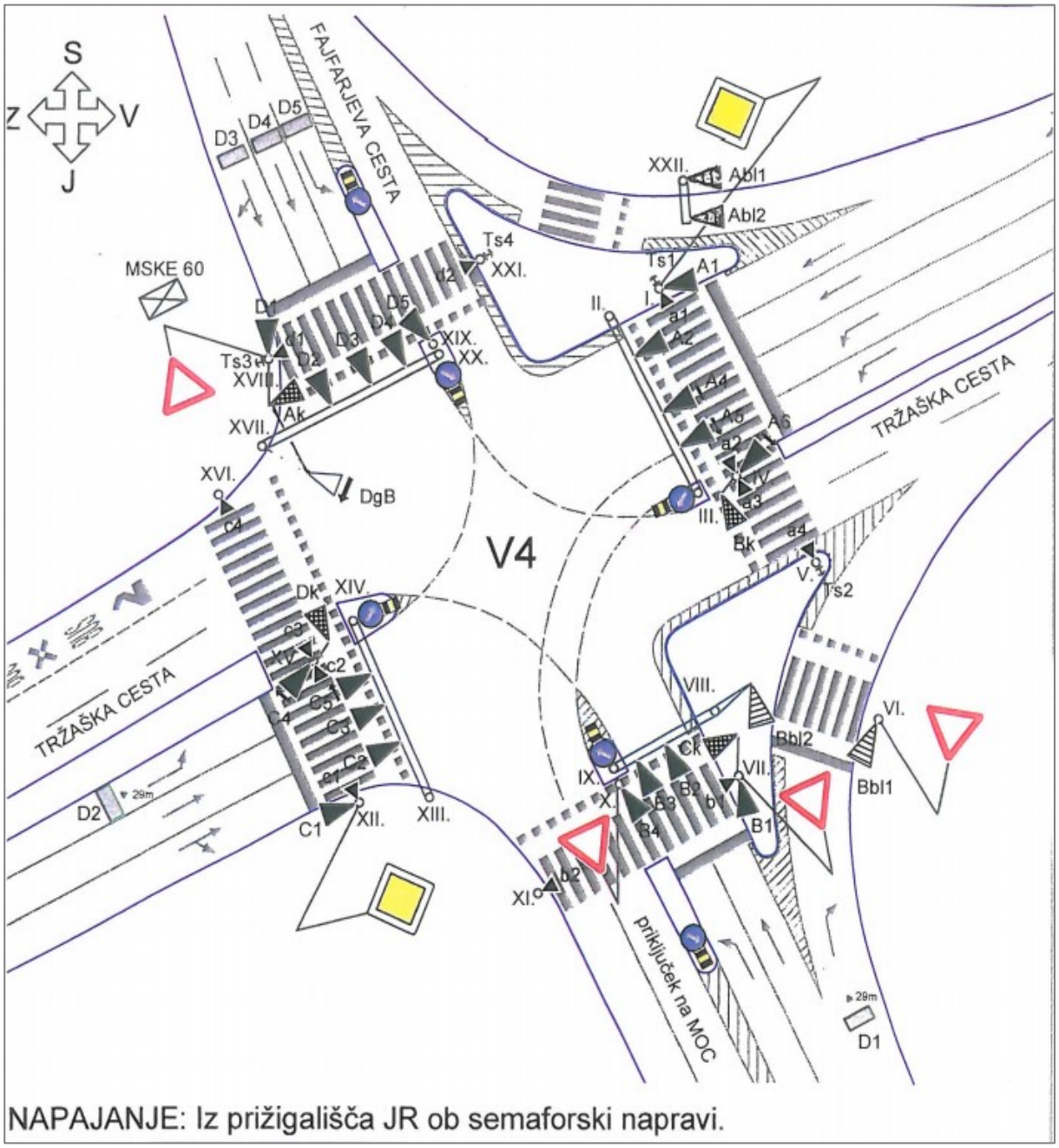
Priloga C.1: Krmilni program na križišču Dolgi most s ciklom 120 sekund (JP LPT d.o.o., 2017)



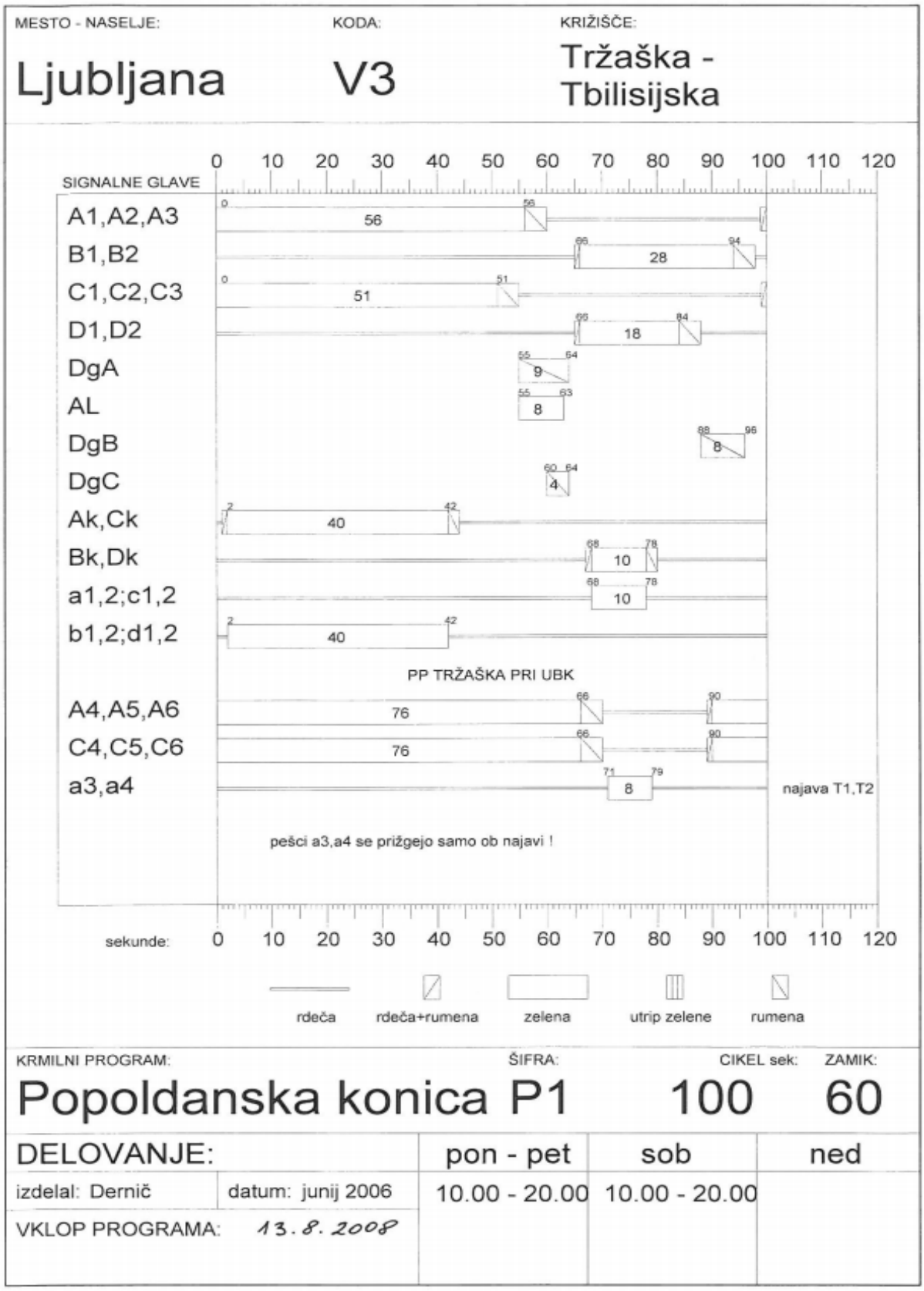
Priloga C.2: Krmilni program na križišču Dolgi most s ciklom 100 sekund (JP LPT d.o.o., 2017)



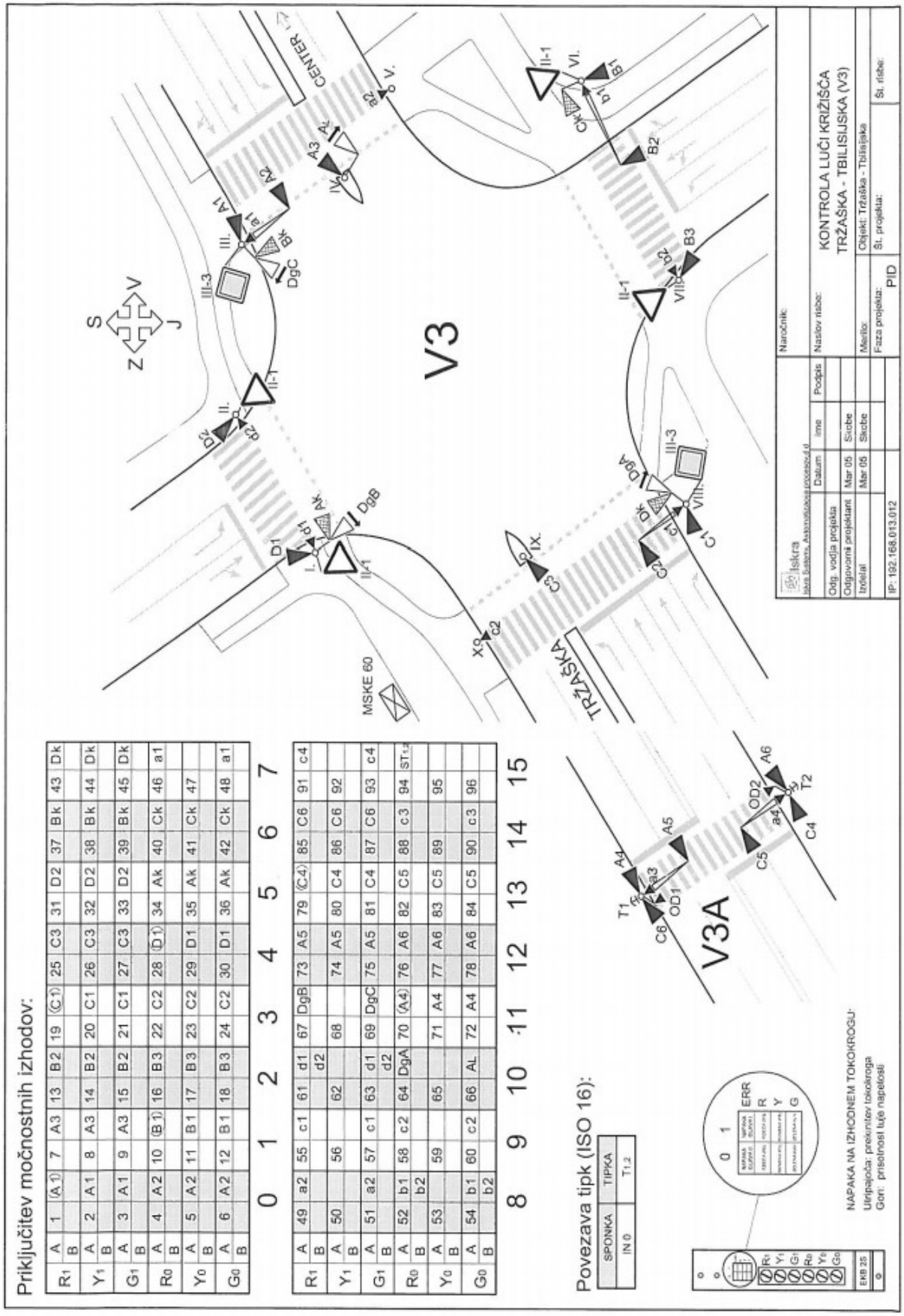
Priloga C.3: Oznake signalnih glav na križišču Dolgi most (JP LPT d.o.o., 2017)



Priloga C.4: Krmilni program na križišču Tržaška - Tbilisijska s ciklom 100 sekund (JP LPT d.o.o., 2008)



Priloga C.5: Oznake signalnih glav na križišču Tržaška - Tbilisijska (JP LPT d.o.o., 2008)



PRILOGA D: PODATKI O PROMETNIH OBREMENITVAH

Priloga D.1: Podatki o prometnih obremenitvah na križišču Dolgi most

Preglednica 1: Prometne obremenitve na križišču Dolgi most (kraka A in B)
(PNZ svetovanje in projektiranje d.o.o., 2016)

Krak		**Tržaška cesta iz smeri Lj-center**				**AC priključek Lj-zahod**			
Čas	Smer	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj
15:30 - 15:45		268	120	47	435	64	27	162	253
15:45 - 16:00		268	141	48	457	67	28	187	282
16:00 - 16:15		253	133	40	426	40	39	191	270
16:15 - 16:30		251	155	57	463	57	51	190	298
Celotna PK [EOV]		1040	549	192	1781	228	145	730	1103

Preglednica 2: Prometne obremenitve na križišču Dolgi most (kraka C in D)
(PNZ svetovanje in projektiranje d.o.o., 2016)

Krak		**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**				**Pot Rdečega križa**			
Čas	Smer	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj
15:30 - 15:45		17	89	105	211	33	43	34	110
15:45 - 16:00		30	95	114	239	37	46	35	118
16:00 - 16:15		34	122	147	303	32	77	41	150
16:15 - 16:30		38	114	121	273	37	58	38	133
Celotna PK [EOV]		119	420	487	1026	139	224	148	511

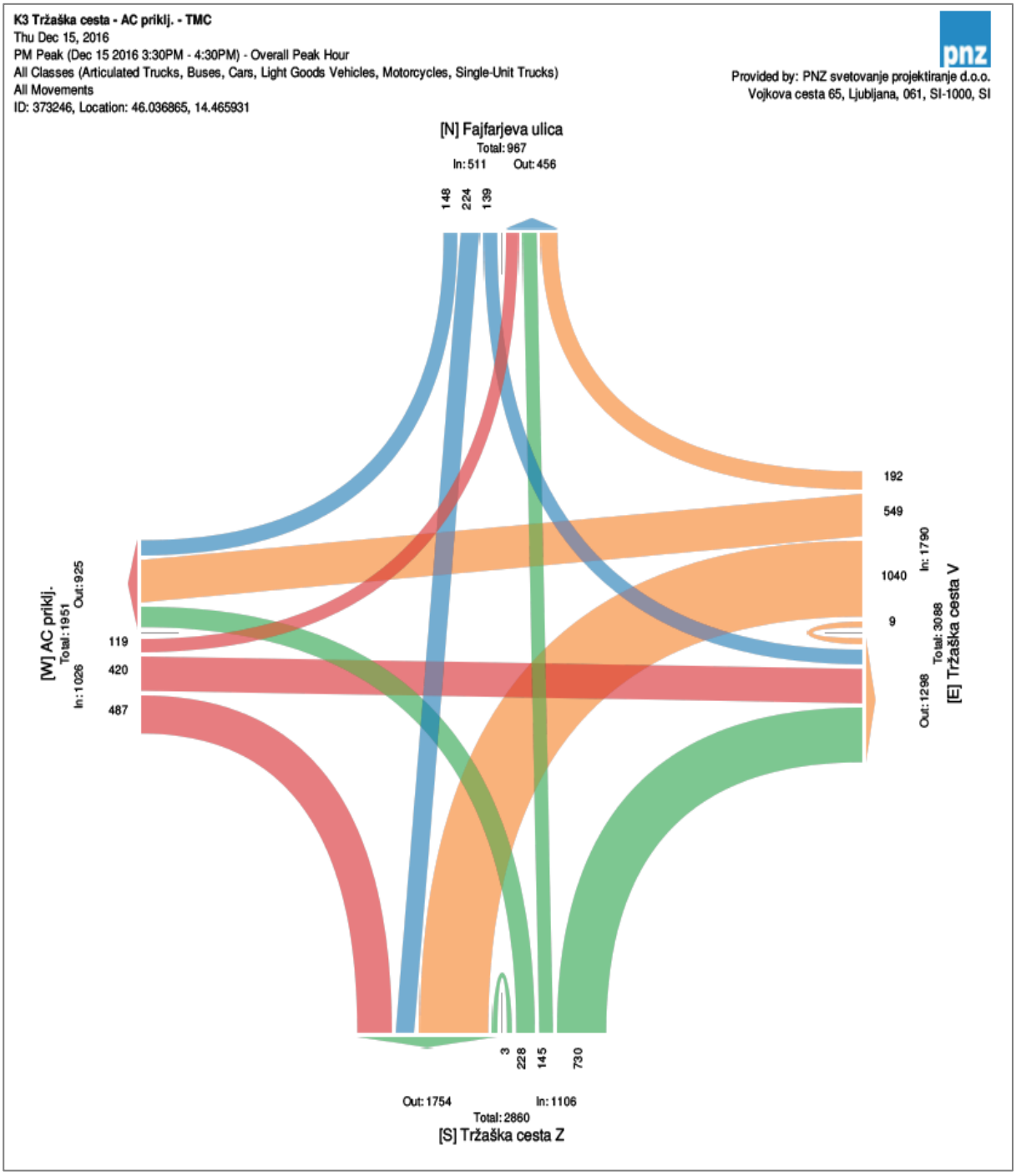
K3 Tržaška cesta - AC priklj. - TMC
Thu Dec 15, 2016
PM Peak (Dec 15 2016 3:30PM - 4:30PM) - Overall Peak Hour
All Classes (Articulated Trucks, Buses, Cars, Light Goods Vehicles, Motorcycles, Single-Unit Trucks)
All Movements
ID: 373246, Location: 46.036865, 14.465931

Provided by: PNZ svetovanje projektiranje d.o.o.
Vojkova cesta 65, Ljubljana, 061, SI-1000, SI

Leg	Fajfarjeva ulica						Tržaška cesta V						Tržaška cesta Z						AC priklj.						
Direction	Southbound						Westbound						Northbound						Eastbound						
Time	R	T	L	U	App	Ped*	R	T	L	U	App	Ped*	R	T	L	U	App	Ped*	R	T	L	U	App	Ped*	Int
2016-12-15 3:30PM	34	43	33	0	**110**	0	47	120	268	1	**436**	0	162	27	64	2	**255**	0	105	89	17	0	**211**	0	**1012**
3:45PM	35	46	37	0	**118**	0	48	141	268	1	**458**	0	187	28	67	0	**282**	0	114	95	30	0	**239**	0	**1097**
4:00PM	41	77	32	0	**150**	0	40	133	253	4	**430**	0	191	39	40	1	**271**	0	147	122	34	0	**303**	0	**1154**
4:15PM	38	58	37	0	**133**	0	57	155	251	3	**466**	0	190	51	57	0	**298**	0	121	114	38	0	**273**	0	**1170**
Total	148	224	139	0	**511**	0	192	549	1040	9	**1790**	0	730	145	228	3	**1106**	0	487	420	119	0	**1026**	0	**4433**
% Approach	29.0%	43.8%	27.2%	0%	**-**	-	10.7%	30.7%	58.1%	0.5%	**-**	-	66.0%	13.1%	20.6%	0.3%	**-**	-	47.5%	40.9%	11.6%	0%	**-**	-	-
% Total	3.3%	5.1%	3.1%	0%	**11.5%**	-	4.3%	12.4%	23.5%	0.2%	**40.4%**	-	16.5%	3.3%	5.1%	0.1%	**24.9%**	-	11.0%	9.5%	2.7%	0%	**23.1%**	-	-
PHF	0.902	0.727	0.939	-	**0.852**	-	0.842	0.885	0.970	0.563	**0.960**	-	0.955	0.711	0.851	0.375	**0.928**	-	0.828	0.861	0.783	-	**0.847**	-	0.947
Motorcycles	0	0	0	0	**0**	-	0	0	0	0	**0**	-	0	1	0	0	**1**	-	0	1	0	0	**1**	-	2
% Motorcycles	0%	0%	0%	0%	**0%**	-	0%	0%	0%	0%	**0%**	-	0%	0.7%	0%	0%	**0.1%**	-	0%	0.2%	0%	0%	**0.1%**	-	0%
Cars	145	205	134	0	**484**	-	187	502	1003	9	**1701**	-	671	134	199	3	**1007**	-	443	392	116	0	**951**	-	4143
% Cars	98.0%	91.5%	96.4%	0%	**94.7%**	-	97.4%	91.4%	96.4%	100%	**95.0%**	-	91.9%	92.4%	87.3%	100%	**91.0%**	-	91.0%	93.3%	97.5%	0%	**92.7%**	-	93.5%
Single-Unit Trucks	0	4	0	0	**4**	-	0	6	4	0	**10**	-	16	1	4	0	**21**	-	9	2	1	0	**12**	-	47
% Single-Unit Trucks	0%	1.8%	0%	0%	**0.8%**	-	0%	1.1%	0.4%	0%	**0.6%**	-	2.2%	0.7%	1.8%	0%	**1.9%**	-	1.8%	0.5%	0.8%	0%	**1.2%**	-	1.1%
Light Goods Vehicles	3	15	5	0	**23**	-	5	17	24	0	**46**	-	32	8	13	0	**53**	-	26	7	2	0	**35**	-	157
% Light Goods Vehicles	2.0%	6.7%	3.6%	0%	**4.5%**	-	2.6%	3.1%	2.3%	0%	**2.6%**	-	4.4%	5.5%	5.7%	0%	**4.8%**	-	5.3%	1.7%	1.7%	0%	**3.4%**	-	3.5%
Articulated Trucks	0	0	0	0	**0**	-	0	0	1	0	**1**	-	7	1	11	0	**19**	-	9	2	0	0	**11**	-	31
% Articulated Trucks	0%	0%	0%	0%	**0%**	-	0%	0%	0.1%	0%	**0.1%**	-	1.0%	0.7%	4.8%	0%	**1.7%**	-	1.8%	0.5%	0%	0%	**1.1%**	-	0.7%
Buses	0	0	0	0	**0**	-	0	24	8	0	**32**	-	4	0	1	0	**5**	-	0	16	0	0	**16**	-	53
% Buses	0%	0%	0%	0%	**0%**	-	0%	4.4%	0.8%	0%	**1.8%**	-	0.5%	0%	0.4%	0%	**0.5%**	-	0%	3.8%	0%	0%	**1.6%**	-	1.2%

*Pedestrians and Bicycles on Crosswalk. L: Left, R: Right, T: Thru, U: U-Turn.

Slika 1: Prometne obremenitve po posameznih kategorijah motornih vozil (križišče Dolgi most)
(PNZ svetovanje in projektiranje d.o.o., 2016)



Slika 2: Grafični prikaz prometnih obremenitev na križišču Dolgi most (popoldanska konica)
(PNZ svetovanje in projektiranje d.o.o., 2016)

Priloga D.2: Podatki o prometnih obremenitvah na križišču Tržaška - Tbilisijska

Preglednica 1: Prometne obremenitve na križišču Tržaška - Tbilisijska (kraka A in B)
(avtomatski števci prometa NUmetrics, 2017)

Krak		**Tržaška cesta iz smeri Lj-center**				**Tbilisijska ulica**			
Čas	Pas	Levo	Nar.1	Nar. 2/desno	Skupaj	Levo 1	Levo 2	Nar./desno	Skupaj
Celotna PK [EOV]		183	581	321	1085	323	240	153	716

Preglednica 2: Prometne obremenitve na križišču Tržaška - Tbilisijska (kraka C in D)
(avtomatski števci prometa NUmetrics, 2017)

Krak		**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**				**Fajfarjeva ulica**		
Čas	Pas	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj	Levo	Naravnost/desno	Skupaj
Celotna PK [EOV]		ni podatka	ni podatka	ni podatka	ni podatka	89	263	352

Priloga D.3: Podatki o prometnih obremenitvah na križišču Tržaška - Tbilisijska (lastno štetje)

Preglednica 1: Nove prometne obremenitve na križišču Tržaška -Tbilisijska (kraka A in B)

Krak		**Tržaška cesta iz smeri Lj-center**				**Tbilisijska ulica**			
Čas	Smer	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj
15:30 - 15:45		47	197	17	261	161	6	23	190
15:45 - 16:00		52	212	19	283	164	9	27	200
16:00 - 16:15		58	219	22	299	158	8	31	197
16:15 - 16:30		49	217	27	293	156	6	26	188
Celotna PK [EOV]		206	845	85	1136	639	29	107	775

Preglednica 2: Nove prometne obremenitve na križišču Tržaška - Tbilisijska (kraka C in D)

Krak		**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**				**Fajfarjeva ulica**			
Čas	Smer	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj
15:30 - 15:45		9	229	54	292	21	9	68	98
15:45 - 16:00		12	242	63	317	18	8	72	98
16:00 - 16:15		10	262	69	341	26	12	82	120
16:15 - 16:30		10	258	67	335	28	11	80	119
Celotna PK [EOV]		41	991	253	1285	93	40	302	435

Priloga D.4: Podatki o prometnih obremenitvah na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih

Preglednica 1: Prometne obremenitve na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih

Krak		Tržaška c. iz smeri Lj-center	Priklj. skladišča	Tržaška cesta iz smeri Dolgi most		
Čas	Smer	Naravnost	Desno	Naravnost	Desno	Skupaj
15:30 - 15:45		426	11	275	9	284
15:45 - 16:00		448	16	308	11	319
16:00 - 16:15		459	18	337	8	345
16:15 - 16:30		453	15	332	9	341
Celotna PK [EOV]		1786	60	1252	37	1289

Priloga D.5: Podatki o prometnih obremenitvah na semaforiziranem PP Tržaška cesta pri UBK

Preglednica 1: Prometne obremenitve na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška cesta pri UBK

Krak		Tržaška cesta iz smeri Lj-center	Tržaška cesta iz smeri Dolgi most
Čas	Smer	Naravnost	Naravnost
15:30 - 15:45		426	286
15:45 - 16:00		448	324
16:00 - 16:15		459	355
16:15 - 16:30		453	347
Celotna PK [EOV]		1786	1312

Priloga D.6: Faktorji konične ure

Preglednica 1: Faktorji konične ure na semaforiziranem križišču Dolgi most

SEMAFORIZIRANO KRIŽIŠČE DOLGI MOST									
Krak		**Tržaška cesta iz smeri Lj-center**				**AC priključek Lj-zahod**			
FKU	Smer	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj
Faktor konične ure		0,97	0,89	0,85	0,97	0,85	0,71	0,96	0,93
Krak		**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**				**Pot Rdečega križa**			
FKU	Smer	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj
Faktor konične ure		0,78	0,86	0,83	0,85	0,94	0,73	0,90	0,85

Preglednica 2: Faktorji konične ure na nesemaforiziranem križišču pri skladiščih

NESEMAFORIZIRANO KRIŽIŠČE PRI SKLADIŠČIH						
Krak		**Tržaška c. iz smeri Lj-center**	**Priklj. skladišča**	**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**		
FKU	Smer	Naravnost	Desno	Naravnost	Desno	Skupaj
Faktor konične ure		0,97	0,83	0,93	0,84	0,93

Preglednica 3: Faktorji konične ure na semaforiziranem prehodu za pešce Tržaška pri UBK

SEMAFORIZIRAN PREHOD ZA PEŠCE TRŽAŠKA PRI UBK			
Krak		**Tržaška cesta iz smeri Lj-center**	**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**
FKU	Smer	Naravnost	Naravnost
Faktor konične ure		0,97	0,92

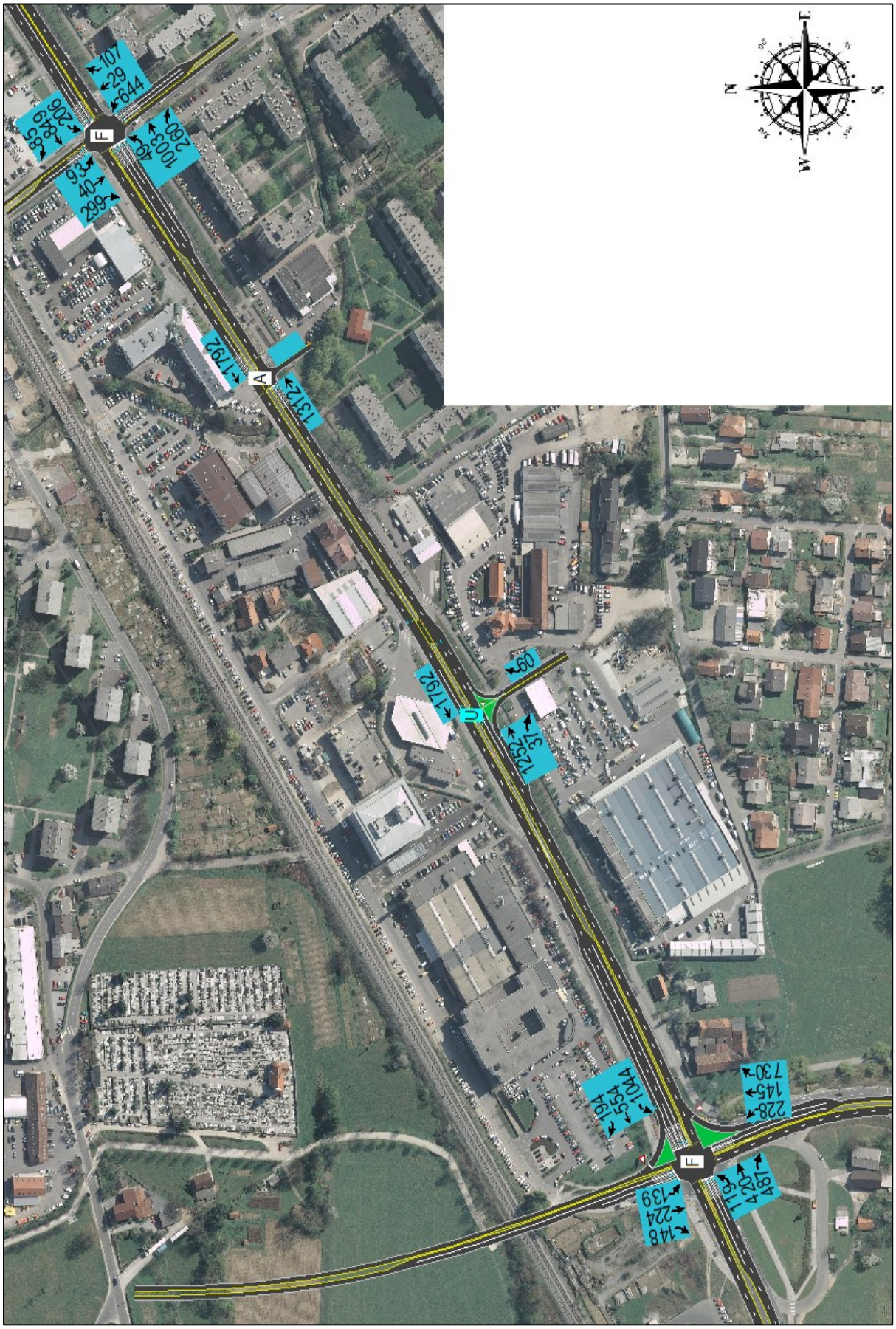
Preglednica 4: Faktorji konične ure na semaforiziranem križišču Tržaška - Tbilisijska

SEMAFORIZIRANO KRIŽIŠČE TRŽAŠKA - TBILISIJSKA									
Krak		**Tržaška cesta iz smeri Lj-center**				**Tbilisijska ulica**			
FKU	Smer	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj
Faktor konične ure		0,89	0,96	0,79	0,96	0,96	0,81	0,86	0,96
Krak		**Tržaška cesta iz smeri Dolgi most**				**Fajfarjeva ulica**			
FKU	Smer	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj	Levo	Naravnost	Desno	Skupaj
Faktor konične ure		0,88	0,93	0,90	0,92	0,83	0,83	0,91	0,89

PRILOGA E: PROMETNI MODELI

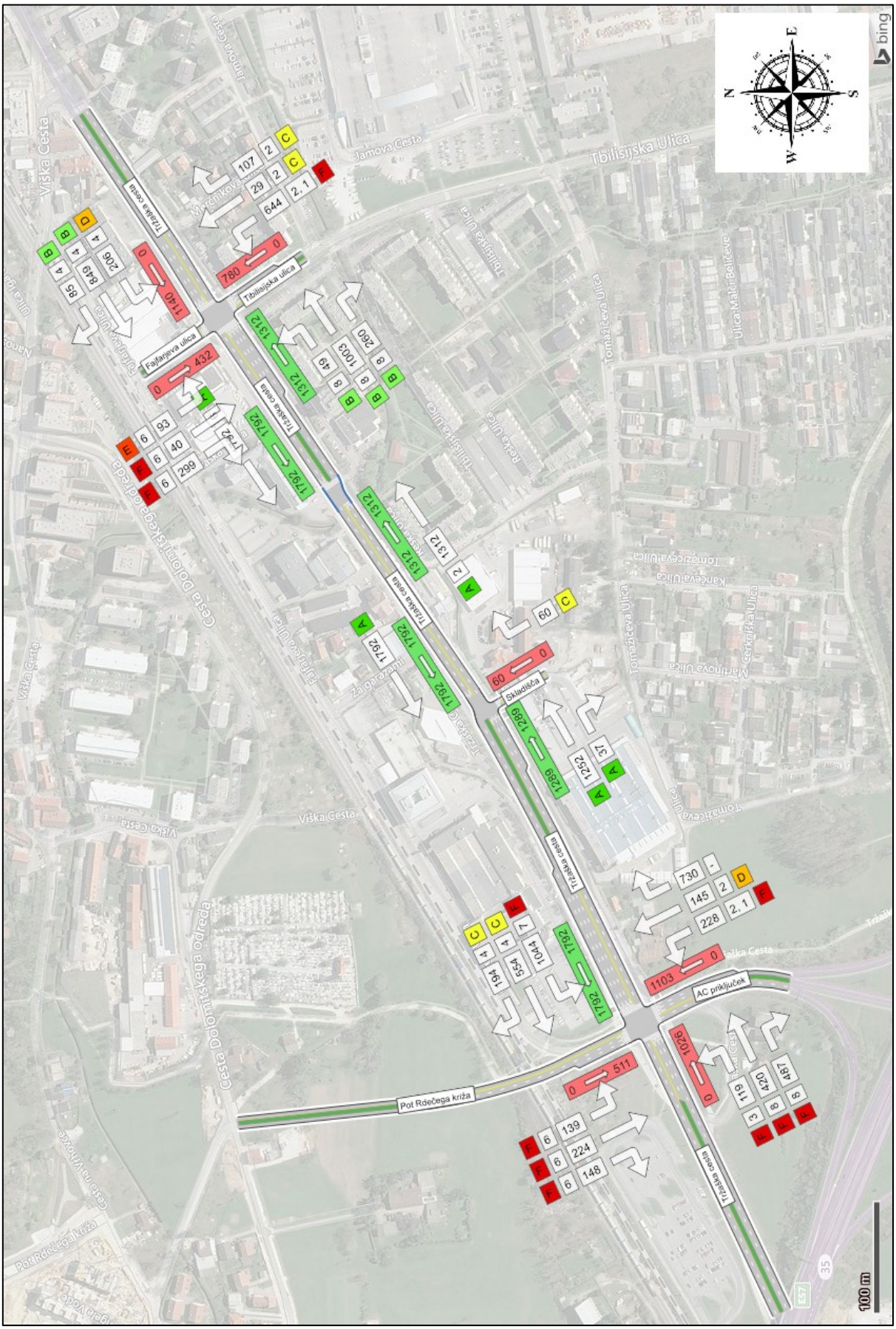
Priloga E.1: Prometni model celotne prometne mreže v programu Synchro 7

Priloga E.2: Prikaz prometnih obremenitev na prometnem modelu v programu Synchro 7



Priloga E.3: Prometni model celotne prometne mreže v programu Vistro 5.0

Priloga E.4: Prikaz prometnih obremenitev in oštevilčenja signalnih faz v programu Vistro 5.0



PRILOGA F: REZULTATI ANALIZE KAPACITIVNOSTI

Priloga F1: Rezultati analize kapacitivnosti v programu Synchro 7

Preglednica 1: Rezultati analize kapacitivnosti na križišču Dolgi most

TIMING SETTINGS	EBL	EBT	EBR	WBL	WBT	WBR	NBL	NBT	NBR	SBL	SBT	SBR
Lanes and Sharing (#RL)												
Traffic Volume (vph)	119	420	487	1044	554	194	228	145	730	139	224	148
Volume to Capacity Ratio	1.14	1.53dr	—	1.12	0.56	—	1.27	0.45	0.47	1.14	1.08	—
Control Delay (s)	169.8	208.9	—	107.0	22.4	—	191.2	41.0	1.0	167.5	114.7	—
Queue Delay (s)	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	—
Total Delay (s)	169.8	208.9	—	107.0	22.4	—	191.2	41.0	1.0	167.5	114.7	—
Level of Service	F	F	—	F	C	—	F	D	A	F	F	—
Approach Delay (s)	—	204.0	—	—	69.7	—	—	49.0	—	—	127.3	—
Approach LOS	—	F	—	—	E	—	—	D	—	—	F	—
Queue Length 50th (m)	~44.3	~185.2	—	~158.2	71.6	—	~83.9	42.6	0.0	~42.8	~68.6	—
Queue Length 95th (m)	#71.6	#213.1	—	#200.5	90.0	—	#128.2	50.3	0.0	#86.1	#73.0	—

NODE SETTINGS	
Node #	4
Actuated Cycle(s):	120.0
Natural Cycle(s):	150.0
Max v/c Ratio:	1.37
Intersection Delay (s):	104.7
Intersection LOS:	F
ICU:	1.19
ICU LOS:	H
Offset (s) :	79.0
Referenced to:	Begin of Green
Reference Phase:	2+6 - NBTL SBTL
Master Intersection:	☐
Yield Point:	Single

Preglednica 2: Rezultati analize kapacitivnosti na križišču Tržaška - Tbilisijska

TIMING SETTINGS	SEL	SET	SER	NWL	NWT	NWR	NEL	NET	NER	SWL	SWT	SWR
Lanes and Sharing (#RL)												
Traffic Volume (vph)	93	40	299	644	29	107	49	1003	260	206	849	85
Volume to Capacity Ratio	0.59	1.66	—	1.91	0.39	—	0.26	0.63	0.43	0.78	0.54	—
Control Delay (s)	51.6	345.3	—	443.2	32.6	—	12.9	14.3	12.7	42.6	15.3	—
Queue Delay (s)	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	—
Total Delay (s)	51.6	345.3	—	443.2	32.6	—	12.9	14.3	12.7	42.6	15.6	—
Level of Service	D	F	—	F	C	—	B	B	B	D	B	—
Approach Delay (s)	—	278.1	—	—	364.1	—	—	13.9	—	—	20.7	—
Approach LOS	—	F	—	—	F	—	—	B	—	—	C	—
Queue Length 50th (m)	21.2	~112.5	—	~108.9	26.4	—	3.3	48.8	16.8	18.5	63.4	—
Queue Length 95th (m)	36.4	#153.1	—	#144.7	40.2	—	m5.8	67.6	29.0	#44.5	81.4	—

NODE SETTINGS	
Node #	7
Actuated Cycle(s):	100.0
Natural Cycle(s):	105.0
Max v/c Ratio:	1.91
Intersection Delay (s):	122.0
Intersection LOS:	F
ICU:	1.12
ICU LOS:	H
Offset (s) :	0.0
Referenced to:	Begin of Green
Reference Phase:	2+6 - NWTL SETL
Master Intersection:	☑
Yield Point:	Single

Preglednica 3: Rezultati analize kapacitivnosti na PP Tržaška pri UBK

TIMING SETTINGS	NBL	NBR	NET	NER	SWL	SWT
Lanes and Sharing (#RL)						
Traffic Volume (vph)	0	0	1312	0	0	1792
Volume to Capacity Ratio	—	—	0.57	—	—	0.75
Control Delay (s)	—	—	6.1	—	—	11.7
Queue Delay (s)	—	—	0.0	—	—	0.2
Total Delay (s)	—	—	6.1	—	—	12.0
Level of Service	—	—	A	—	—	B
Approach Delay (s)	0.0	—	6.1	—	—	12.0
Approach LOS	A	—	A	—	—	B
Queue Length 50th (m)	—	—	52.9	—	—	181.2
Queue Length 95th (m)	—	—	66.9	—	—	m93.8

NODE SETTINGS	
Node #	12
Actuated Cycle 10th(s):	100.0
Natural Cycle(s):	60.0
Max v/c Ratio:	0.75
Intersection Delay (s):	9.4
Intersection LOS:	A
ICU:	0.70
ICU LOS:	C
Offset (s) :	5.0
Referenced to:	Begin of Green
Reference Phase:	1 - Ped
Master Intersection:	☐
Yield Point:	Single

Preglednica 4: Rezultati analize kapacitivnosti na križišču pri skladiščih

SIGNING SETTINGS	EBT	EBR	WBL	WBT	NBL	NBR
Lanes and Sharing (#RL)						
Traffic Volume (vph)	1252	37	0	1792	0	60
Critical Gap, tC (s)	—	—	—	—	—	6.9
Follow Up Time, tF (s)	—	—	—	—	—	3.3
Volume to Capacity Ratio	0.40	0.03	—	0.54	—	0.21
Control Delay (s)	0.0	0.0	—	0.0	—	18.3
Level of Service	A	A	—	A	—	C
Queue Length 95th (m)	0.0	0.0	—	0.0	—	6.3

NODE SETTINGS	
Node #	10
Zone:	
X East (m):	591.1
Y North (m):	-333.1
Z Elevation (m):	0.0
Description	Dovoz do skladisc
Control Type	Unsig
Max v/c Ratio:	0.54
Intersection Delay (s):	0.4
Intersection LOS:	—
ICU:	0.66
ICU LOS:	C

Slika 1: Prikaz povprečnih zamud na prometnem modelu obravnavanega območju v programu Synchro 7

Priloga F.2: Rezultati analize kapacitivnosti v programu Vistro 5.0

Preglednica 1: Rezultati analize kapacitivnosti na križišču Dolgi most

Capacity Analysis	Tržaška iz smeri Dolgi most		Tržaška iz smeri Lj-center		AC priključek Lj-zahod		Pot Rdečega križa	
Lane Group	L	C	L	C	L	C	L	C
Control Type	Prot	-	Prot	-	Perm/Prot	-	Perm	-
V, Volume [veh/h]	153	1075	1076	850	268	204	148	471
s, saturation flow rate [veh/h]	1598	2981	3181	3170	1046	1761	511	3072
c, Capacity [veh/h]	133	795	954	1506	274	455	72	435
g / C, Green / Cycle	0,08	0,27	0,30	0,48	0,26	0,26	0,14	0,14
X, volume / capacity	1,15	1,35	1,13	0,56	0,98	0,45	2,04	1,08
d1, Uniform Delay [s]	55,00	44,00	42,00	22,60	49,83	37,33	51,50	51,50
k, delay calibration	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
I, Upstream Filtering Factor	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
d2, Incremental Delay [s]	123,59	166,80	70,82	1,54	49,06	3,17	513,64	67,11
d3, Initial Queue Delay [s]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rp, platoon ratio	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
P, proportion arriving on green	0,08	0,27	0,30	0,48	0,13	0,26	0,14	0,14
PF, progression factor	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Lane Group Results								
X, volume / capacity	1,15	1,35	1,13	0,56	0,98	0,45	2,04	1,08
d, Delay for Lane Group [s/veh]	178,59	210,80	112,82	24,13	98,89	40,50	565,14	118,61
Lane Group LOS	F	F	F	C	F	D	F	F
Critical Lane Group	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☑	☐
50th-Percentile Queue Length [veh]	9,18	39,76	30,99	12,16	12,83	6,35	14,79	13,52
50th-Percentile Queue Length [m]	69,93	302,98	236,16	92,66	97,79	48,35	112,73	103,00
95th-Percentile Queue Length [veh]	16,15	63,63	49,65	20,53	21,52	11,94	24,44	22,53
95th-Percentile Queue Length [m]	123,05	484,87	378,34	156,40	163,98	90,95	186,21	171,69

Movement, Approach, & Intersection Results												
d_M, Delay for Movement [s/veh]	178,5	210,8	210,8	112,8	24,13	24,13	98,89	40,50	0,00	565,1	118,6	118,6
Movement LOS	F	F	F	F	C	C	F	D		F	F	F
Critical Movement	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☐
d_A, Approach Delay [s/veh]	206,78			73,68			73,65			225,37		
Approach LOS	F			E			E			F		
d_I, Intersection Delay [s/veh]	134,30											
Intersection LOS	F											
Intersection V/C	1,121											

Preglednica 2: Rezultati analize kapacitivnosti na križišču Tržaška - Tbilisijska

Capacity Analysis	Tržaška iz smeri Dolgi most			Tržaška iz smeri Lj-center		Tbilisijska ulica		Fajfarjeva ulica	
Lane Group	L	C	R	L	C	L	C	L	C
Control Type	Perm	-	-	Perm/Prot	-	Perm/Prot	-	Perm	-
V, Volume [veh/h]	56	1078	289	231	992	671	160	112	377
s, saturation flow rate [veh/h]	390	3339	1327	551	3234	1788	1503	929	1388
c, Capacity [veh/h]	199	1703	677	347	2037	501	421	167	250
g / C, Green / Cycle	0,51	0,51	0,51	0,63	0,63	0,28	0,28	0,18	0,18
X, volume / capacity	0,28	0,63	0,43	0,66	0,49	1,34	0,38	0,67	1,51
d1, Uniform Delay [s]	14,02	17,73	15,35	30,68	9,87	41,92	29,01	38,23	41,00
k, delay calibration	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
I, Upstream Filtering Factor	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
d2, Incremental Delay [s]	3,50	1,80	1,97	9,66	0,84	166,30	2,60	19,31	248,61
d3, Initial Queue Delay [s]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rp, platoon ratio	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
P, proportion arriving on green	0,51	0,51	0,51	0,14	0,63	0,12	0,28	0,18	0,18
PF, progression factor	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Lane Group Results									
X, volume / capacity	0,28	0,63	0,43	0,66	0,49	1,34	0,38	0,67	1,51
d, Delay for Lane Group [s/veh]	17,52	19,53	17,32	40,34	10,71	208,22	31,61	57,54	289,61
Lane Group LOS	B	B	B	D	B	F	C	E	F
Critical Lane Group	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑
50th-Percentile Queue Length [veh]	1,04	13,26	5,72	5,17	8,93	22,20	3,99	3,55	27,64
50th-Percentile Queue Length [m]	7,96	101,0	43,56	39,39	68,02	169,17	30,38	27,07	210,63
95th-Percentile Queue Length [veh]	2,52	22,15	10,97	10,11	15,78	35,78	8,18	7,43	44,34
95th-Percentile Queue Length [m]	19,19	168,7	83,58	77,03	120,24	272,67	62,30	56,61	337,84

Movement, Approach, & Intersection Results												
d_M, Delay for Movement [s/veh]	17,52	19,53	17,32	40,34	10,71	10,71	208,2	31,61	31,61	57,54	289,6	289,6
Movement LOS	B	B	B	D	B	B	F	C	C	E	F	F
Critical Movement	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑
d_A, Approach Delay [s/veh]	19,00			16,31			174,21			236,46		
Approach LOS	B			B			F			F		
d_I, Intersection Delay [s/veh]	77,50											
Intersection LOS	E											
Intersection V/C	0,922											

Preglednica 3: Rezultati analize kapacitivnosti na PP Tržaška pri UBK

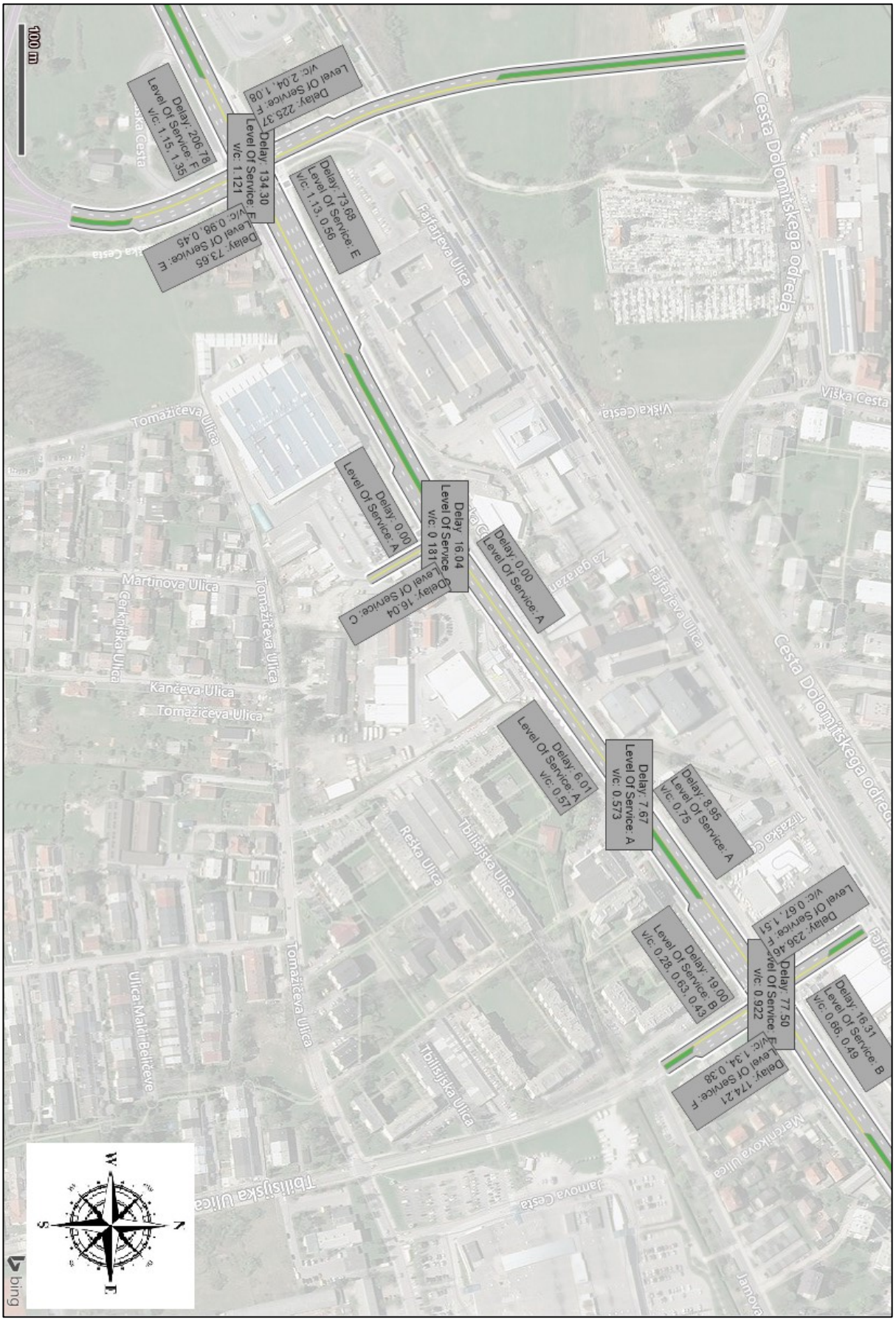
Capacity Analysis	Tržaška iz smeri Dolgi most	Tržaška iz smeri Lj-center	Dovozna pot
Lane Group	C	C	R
Control Type	-	-	-
V, Volume [veh/h]	1426	1847	0
s, saturation flow rate [veh/h]	3300	3224	1627
c, Capacity [veh/h]	2508	2450	130
g / C, Green / Cycle	0,76	0,76	0,08
X, volume / capacity	0,57	0,75	0,00
d1, Uniform Delay [s]	5,07	6,74	42,32
k, delay calibration	0,50	0,50	0,50
I, Upstream Filtering Factor	1,00	1,00	1,00
d2, Incremental Delay [s]	0,94	2,20	0,00
d3, Initial Queue Delay [s]	0,00	0,00	0,00
Rp, platoon ratio	1,00	1,00	1,00
P, proportion arriving on green	0,76	0,76	0,08
PF, progression factor	1,00	1,00	1,00
Lane Group Results			
X, volume / capacity	0,57	0,75	0,00
d, Delay for Lane Group [s/veh]	6,01	8,95	42,32
Lane Group LOS	A	A	D
Critical Lane Group	☐	☑	☐
50th-Percentile Queue Length [veh]	10,71	19,21	0,00
50th-Percentile Queue Length [m]	81,58	146,39	0,00
95th-Percentile Queue Length [veh]	18,39	31,15	0,00
95th-Percentile Queue Length [m]	140,12	237,37	0,00

Movement, Approach, & Intersection Results						
d_M, Delay for Movement [s/veh]	6,01	0,00	0,00	8,95	0,00	42,32
Movement LOS	A			A		D
Critical Movement	☐			☐		☑
d_A, Approach Delay [s/veh]	6,01		8,95		42,32	
Approach LOS	A		A		D	
d_I, Intersection Delay [s/veh]	7,67					
Intersection LOS	A					
Intersection V/C	0,573					

Preglednica 4: Rezultati analize kapacitivnosti na križišču pri skladiščih

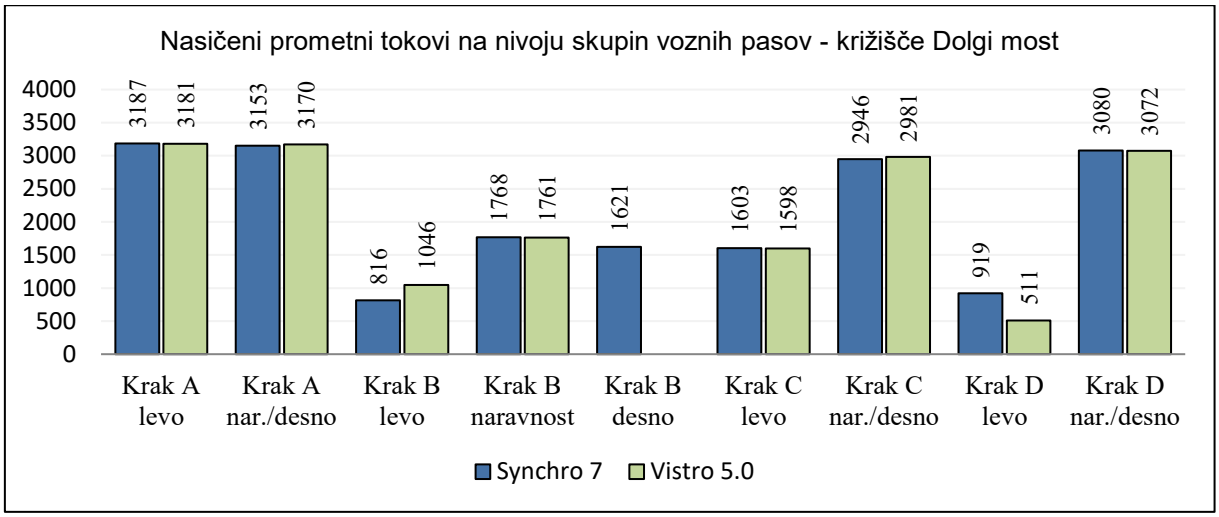
Capacity Analysis	Tržaška iz smeri Dolgi most		Tržaška iz smeri Lj-center		Skladišča	
Calculated Rank	1	1	0	1	0	2
v_c, Conflicting Flow Rate [veh/h]	0	0	0	0	0	673
v_c, Stage 1 [veh/h]	0	0	0	0	0	673
v_c, Stage 2 [veh/h]	0	0	0	0	0	0
t_c,Base, Base Critical Gap [s]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,90
t_c,Base, Stage 1 [s]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,90
t_c,Base, Stage 2 [s]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,90
t_c,HV, Adjustment Factor for HV	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	2,00
P_HV, Proportion of HV [%]	2,00	2,00	0,00	2,00	0,00	2,00
t_c,G, Adjustment Factor for Grade	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,10
G, Percent Grade [%]	-0,01	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
t_3,LT, Geometry Adjustment	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00
t_c,x, Calculated Critical Gap [s]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,94
t_c,x, Stage 1 [s]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,94
t_c,x, Stage 2 [s]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,94
Overwrite Calculated Critical Gap						☐
t_c,x,u, User-Defined Critical Gap [s]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
t_c,x,u, Stage 1 [s]	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
t_c,x,u, Stage 2 [s]	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
t_f,Base, Base Follow-Up Headway [s]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30
t_f,HV, Adjustment Factor for HV	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
t_f,x, Calculated Follow-Up Headway [s]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,32
Overwrite Calculated Follow-Up Headway?						☐
t_f,x, User-Defined Follow-Up Headway [s]	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
c_p,x, Potential Capacity [veh/h]	0	0	0	0	0	398

Movement, Approach, & Intersection Results						
V/C, Movement V/C Ratio	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,18
d_M, Delay for Movement [s/veh]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,04
d_Rank1, Delay to Rank 1 Vehicle [s/veh]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Movement LOS	A	A		A		C
Critical Movement	☐	☐		☐		☑
95th-Percentile Queue Length [veh]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65
95th-Percentile Queue Length [m]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,97
d_A, Approach Delay [s/veh]	0,00		0,00		16,04	
Approach LOS	A		A		C	
V/C_I, Worst Movement V/C Ratio	0,18					
d_I, Worst Movement Control Delay [s/veh]	16,04					
d_I, Intersection Delay [s/veh]	0,35					
Intersection LOS	C					

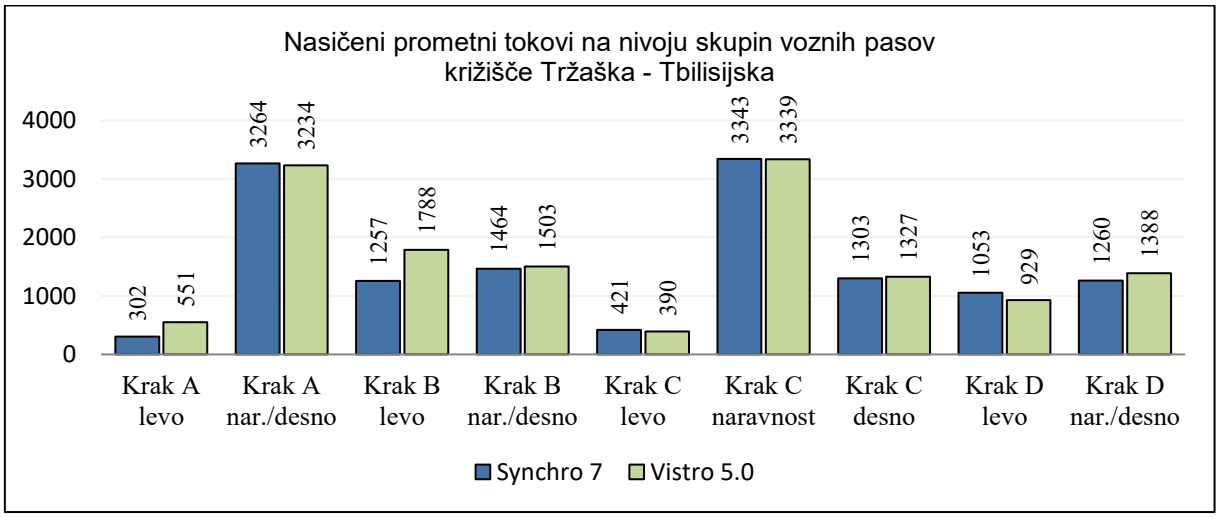


Slika 1: Prikaz mer učinkovitosti na prometnem modelu obravnavanega območju v programu Vistro 5.0

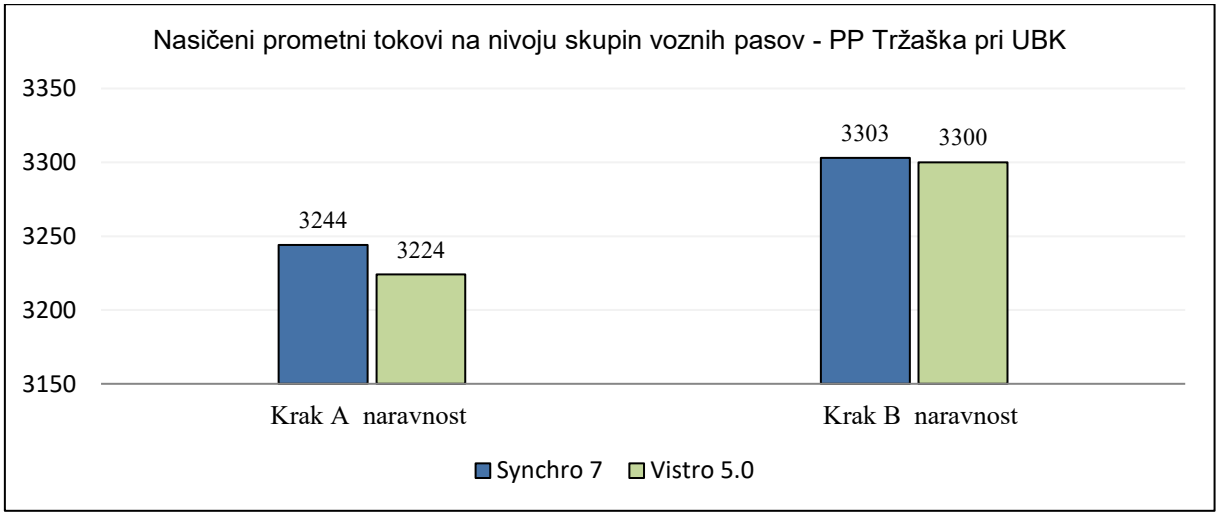
Priloga F.3: Primerjava nasičenih prometnih tokov



Grafikon 1: Primerjava nasičenih prometnih tokov na križišču Dolgi most

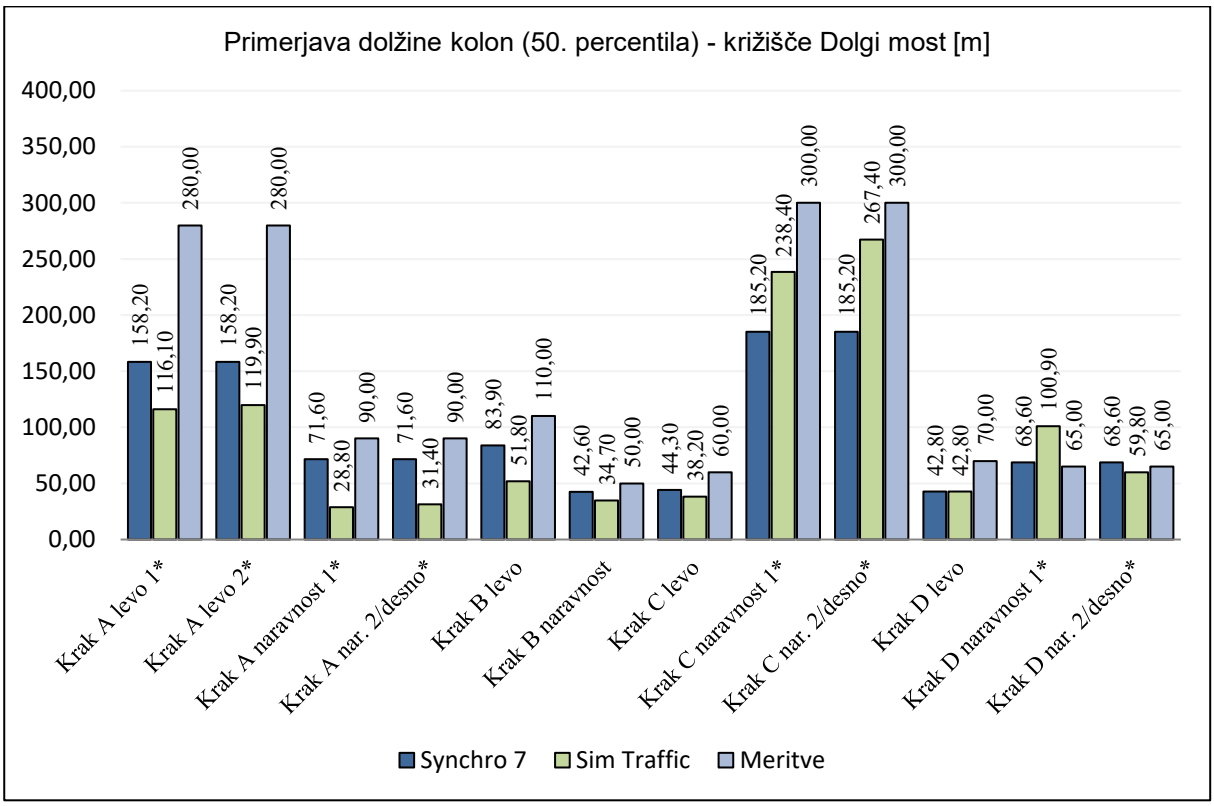


Grafikon 2: Primerjava nasičenih prometnih tokov na križišču Tržaška – Tbilisijska

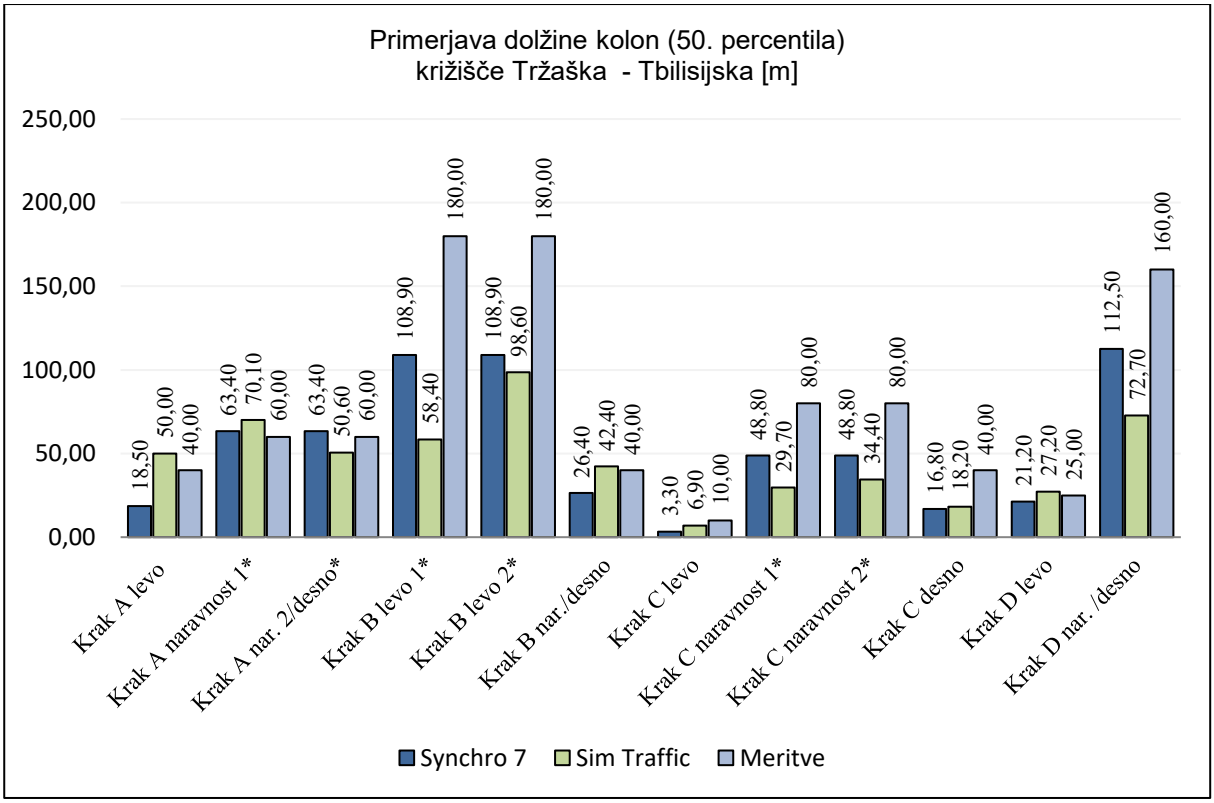


Grafikon 3: Primerjava nasičenih prometnih tokov na PP Tržaška pri UBK

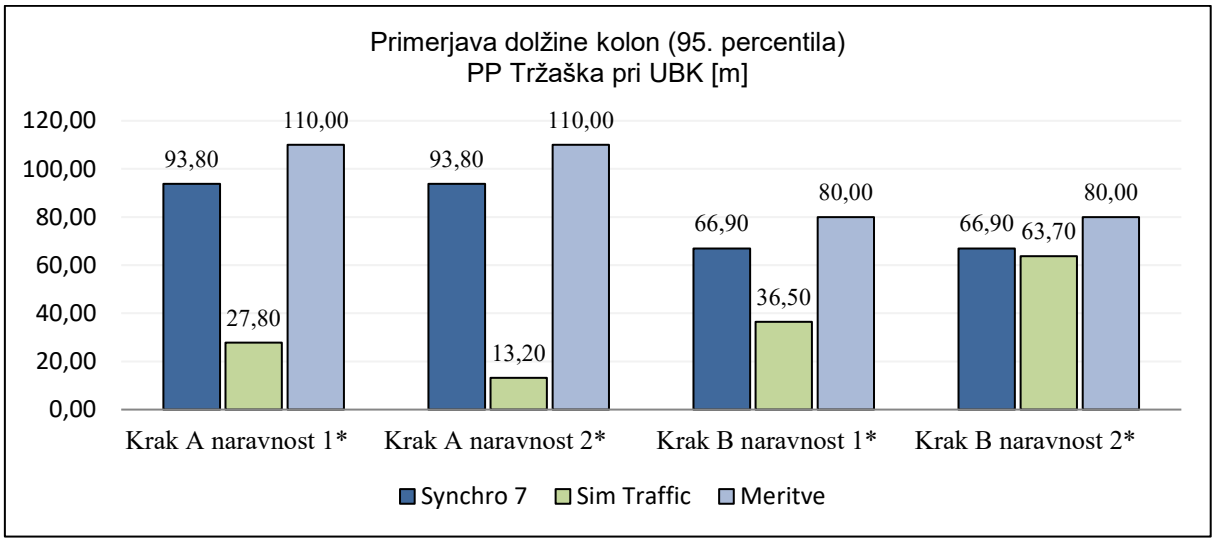
Priloga F.4: Primerjava dolžine kolon med programoma Synchro 7 in Sim Traffic



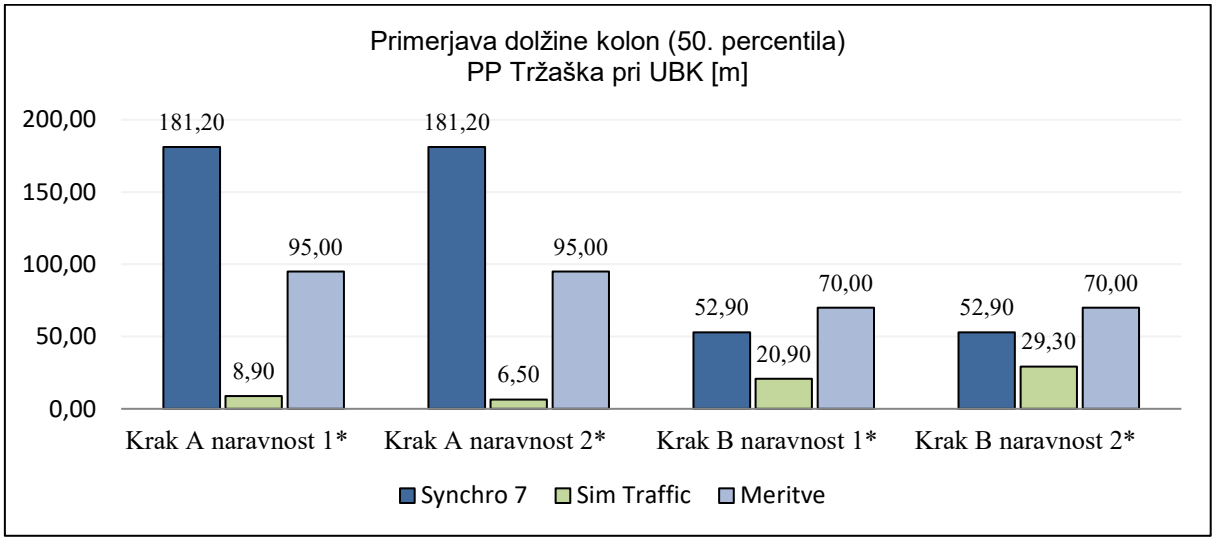
Grafikon 1: Primerjava dolžine kolon na križišču Dolgi most (50. percentila)



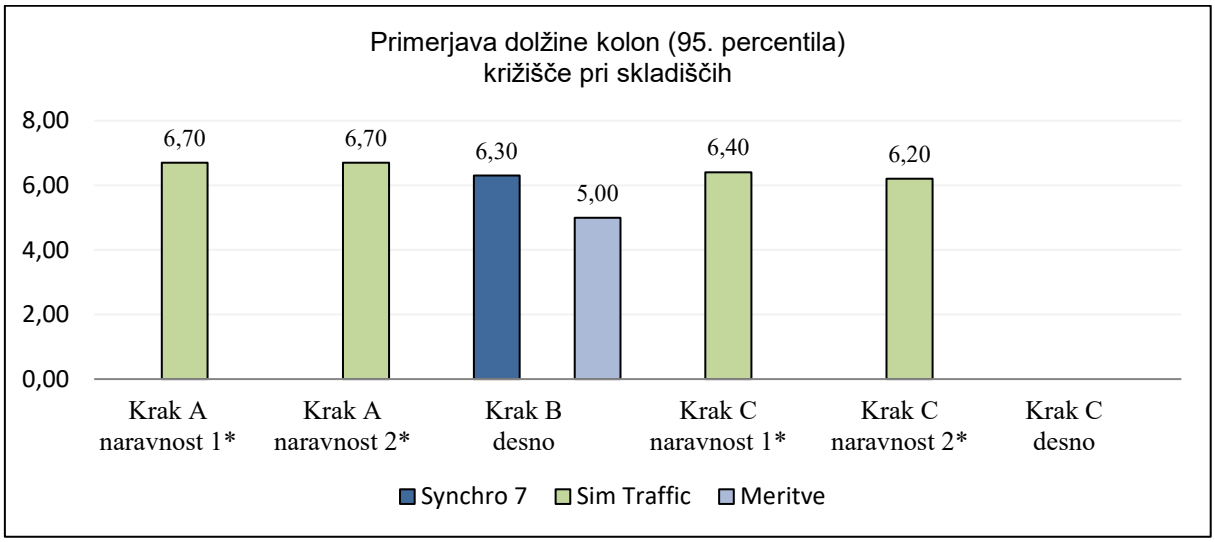
Grafikon 2: Primerjava dolžine kolon na križišču Tržaška - Tbilisijska (50. percentila)



Grafikon 3: Primerjava dolžine kolon na PP Tržaška pri UBK (95. percentila)



Grafikon 4: Primerjava dolžine kolon na PP Tržaška pri UBK (50. percentila)



Grafikon 5: Primerjava dolžine kolon na križišču pri skladiščih (95. percentila)

PRILOGA G: LINIJSKA KOORDINACIJA VZDOLŽ TRŽAŠKE CESTE

Priloga G.1: Linijska koordinacija v programu Synchro 7

Select Cycle Lengths

Cycle Length	Perform Index	Block Delay (hr)	Total Delay (hr)	Delay / Veh (s)	Total Stops	Stops / Veh	Fuel (l)	Unserved Vehicles	Dilemma Vehicles	% Dilem Vehicles
50	229	0	206	66	8390	0.75	1070	644	440	4%
60	200	0	177	57	8118	0.72	982	489	412	4%
70	199	0	177	57	7985	0.71	976	489	375	3%
80	596	0	574	185	7971	0.71	2077	1056	373	3%
90	309	0	291	94	6319	0.56	1240	995	327	3%
100	216	0	198	64	6571	0.59	990	681	269	2%
110	189	0	170	55	6818	0.61	919	509	239	2%
120	182	1	163	52	6593	0.59	894	454	258	2%

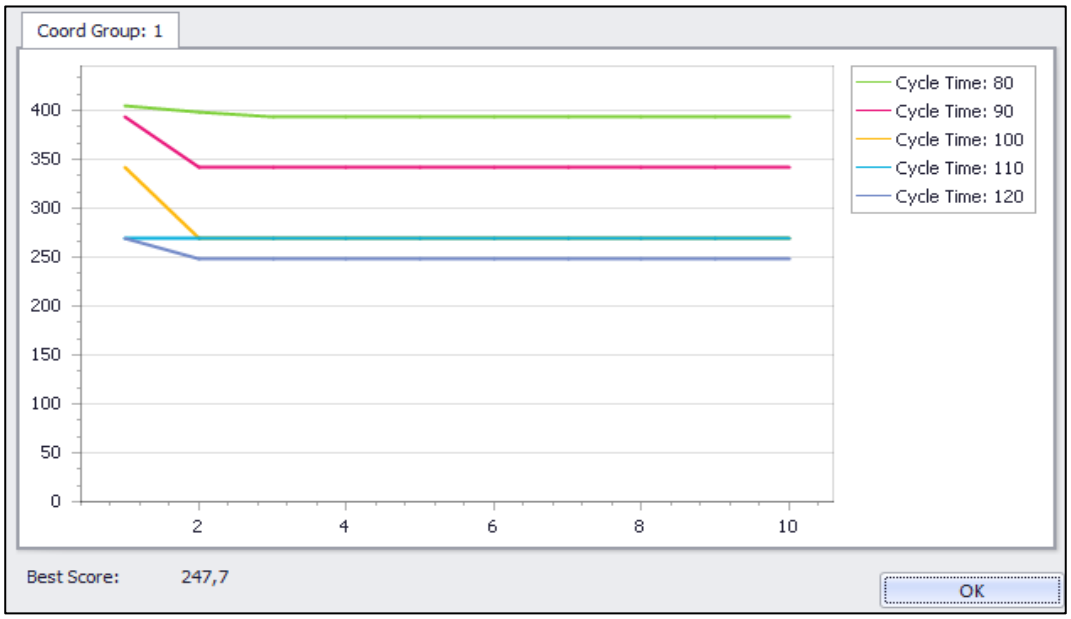
Zone: (all)

Cycle Length: 120
Number of intersections: 3
Uncoordinated: 0
Half Cycled: 0
Locked Other: 0

OK Cancel

Slika 1: Izračun optimizacijskih indeksov pri linijski koordinaciji v programu Synchro 7

Priloga G.2: Linijska koordinacija v programu Vistro 5.0



Slika 1: Vrednosti ciljnih funkcij pri linijski koordinaciji v programu Vistro 5.0