

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE GRADBENIŠTVO

Ljubljana, 2018

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:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK:	625.739:656.1(043.3)
Avtor:	Domen Logar, dipl. inž. gr. (UNI)
Mentor:	doc. dr. Tomaž Maher, univ. dipl. inž. gr.
Somentor:	asist. dr. Rok Marsetič, univ. dipl. inž. gr.
Naslov:	Predlog rekonstrukcije dvopasovnega krožišča s kapacitetno in prometno-varnostno analizo
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	80 str., 34 pregl., 52 sl., 4 graf.
Ključne besede:	rekonstrukcija, dvopasovno krožišče, turbo krožišče, kapaciteta, prometna varnost, analitični model, simulacija

Izvleček

Krožna križišča so križišča, kjer prednostna cesta poteka v zaključenem krogu, promet pa se odvija v nasprotni smeri gibanja urnih kazalcev. Razvila so se kot alternativa klasičnim križiščem in imajo številne prednosti. Od teh izstopa izboljšanje prometne varnosti, saj se število konfliktnih točk v primerjavi s klasičnim križiščem zmanjša za več kot polovico. Dvopasovna krožišča imajo dva krožna vozna pasova, ampak se kapaciteta s tem ne podvoji, ustvarijo pa se nove konfliktni točke in konfliktni odseki. Danes se dvopasovna krožišča izvajajo le izjemoma, ko ni možno izvesti turbo krožišča. Turbo krožišče je krožišče s spiralnim potekom krožnih vozniških pasov, ki so med seboj ločeni z delineatorjem.

V magistrskem delu je obravnavano dvopasovno krožišče na mengeški obvoznici ter predlog rekonstrukcije v turbo krožišče. Izvedena je analiza kapacitetnih parametrov obeh s programskim orodjem SIDRA INTERSECTION in analitično z uporabo Bovyjeve enačbe. Dodatno je izdelan simulacijski model za obe rešitvi in simulacije za merodajno jutranjo prometno koncu na koncu planske dobe leta 2038. Poleg kapacitetnih parametrov smo kot rezultat simulacije dobili tudi trajektorije vozil, ki smo jih uporabili kot vhodni podatek za modelsko analizo konfliktnih točk. Analiza prometne varnosti dvopasovnega in turbo krožišča pokaže, da je prometno varnejše turbo krožišče. Na podlagi kapacitetne analize, prometno varnostne analize in kriterijev upravičenosti, lahko zaključimo, da je turbo krožišče na tem mestu primernejša rešitev od klasičnega dvopasovnega krožišča.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION WITH ABSTRACT

UDC:	625.739:656.1(043.3)
Author:	Domen Logar, B. Sc.
Supervisor:	Assist. Prof. Tomaž Maher, Ph.D.
Supervisor:	Assist. Rok Marsetič, Ph.D.
Title:	Proposal for the reconstruction of a two-lane roundabout with capacity and traffic-safety analysis
Document type:	Master Thesis
Notes:	80 p., 34 tab., 52 fig., 4 graph.
Key words:	reconstruction, two lane roundabout, turbo roundabout, capacity, road safety, analytical model, simulation

Abstract

Roundabout is a type of circular intersection in which road traffic flows in an anti-clockwise direction. They were developed as an alternative to classic intersection and have many advantages. From those stands out improvement of road safety because number of possible collision points compared to classic intersection is reduced by more than half. The two-lane roundabout have two circular lanes, but with that capacity doesn't duplicate but new possible collision points and conflicts areas are created. Today, two-lane roundabout are performed only exceptionally when a turbo roundabout can't be performed. A turbo roundabout is a roundabout with spiral course of circular lanes separated by a raised lane separator.

In this master thesis is discussed two-lane roundabout on the bypass road of Mengeš and a proposal of reconstruction into turbo roundabout. An analysis of the capacity parameters were performed with SIDRA INTERSECTION and analytically using Bovy model. In addition, a simulation model was developed for both solutions and simulations for the relevant morning traffic peak at the end of the planning period in 2038. As a result of the simulation, we also received vehicle trajectories that were used as inputs for the model analysis of conflict points. The traffic safety analysis of the two-lane and turbo roundabout shows that turbo roundabout has less possible collision points. On the basis of capacity analysis, traffic safety analysis and eligibility criteria, we can conclude that the turbo roundabout at this site is a more suitable solution than a conventional two-lane roundabout.

ZAHVALA

Za vso podporo in vzpodbudo tekom študija gre zahvala mojim domačim, še posebej staršema Romani in Marijanu ter bratu Simonu, ki mi vedno stojijo ob strani.

Za pomoč pri nastajanju tega dela bi se rad zahvalil mentorju doc. dr. Tomažu Maherju in somentorju asist. dr. Roku Marsetiču.

Hvala podjetju PNZ d.o.o. za izvedeno štetje prometa in podatke o predvidenih prometnih obremenitvah.

Zahvalil bi se tudi vsem sodelavcem, ki so s svojimi strokovnimi nasveti, pomočjo in vzpodbudami pripomogli, da je to delo nastalo. Zahvala tudi vsem ostalim, s katerimi tvorimo uspešen, zabaven in zdrav kolektiv, v katerega se rad vračam.

Hvala prijatelju Aljažu, za pomoč pri nastanku fotografij iz zraka.

Nenazadnje hvala vsem sošolcem in prijateljem, za pomoč, nasvete in trenutke druženja ter spominov, ki smo jih ustvarili v študentskih letih.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM	II
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION WITH ABSTRACT.....	III
ZAHVALA	IV
KAZALO VSEBINE	V
1 UVOD	1
2 NAMEN IN CILJI NALOGE	2
3 OBSTOJEČE STANJE	3
3.1 Splošne značilnosti	3
3.2 Opis obstoječega stanja	4
3.2.1 Krožno križišče	4
3.2.2 Trase cest.....	9
3.2.3 Kakovost cestnega omrežja	10
3.3 Analiza prometnih nesreč.....	11
3.4 Prometne obremenitve.....	17
3.4.1 Podatki števcev prometa.....	17
3.4.2 Štetje prometa.....	19
4 IDEJNA ZASNOVA PREDLAGANE REŠITVE.....	23
4.1 Turbo krožno krožišče.....	23
4.1.1 Deljenje glede na tip.....	24
4.1.2 Prepustna sposobnost	25
4.1.3 Kriteriji za upravičenost izvedbe.....	25
4.2 Prometno-tehnična izhodišča	27
4.3 Zasnova turbo krožnega križišča.....	29
5 ANALIZA Z ANALITIČNIM MODELOM	32
5.1 Splošno	32
5.2 Sidra Intersection.....	33
5.2.1 Analiza primerjalnega omrežja za leto 2038	34
5.2.2 Analiza predlagane rešitve	40
5.3 Modificirana Bovyjeva enačba.....	46

5.3.1	Splošno	46
5.3.2	Analiza primerjalnega omrežja	50
5.3.3	Analiza predlagane rešitve	53
6	SIMULACIJSKI MODEL	56
6.1	PTV VISSIM.....	56
6.2	Kapacitetna analiza primerjalnega omrežja	59
6.3	Kapacitetna analiza predlagane rešitve v JK 2038	61
7	PROMETNO-VARNOSTNA ANALIZA	63
7.1	Splošno	63
7.2	Metodologija	64
7.3	Analiza primerjalnega omrežja	66
7.4	Analiza predlagane rešitve	68
7.5	Ugotovitve	70
8	PRIMERJAVA REZULTATOV IN UGOTOVITVE	71
8.1	Primerjava kapacitetnih parametrov	71
8.2	Primerjava glede na kriterije upravičenosti	74
8.2.1	Funkcionalni kriterij	74
8.2.2	Kriterij prepustnosti	74
8.2.3	Prostorski kriterij	75
8.2.4	Projektno-tehnični kriterij	75
8.2.5	Kriterij prometne varnosti	75
8.2.6	Ekonomski kriterij	76
8.3	Ugotovitve	76
9	ZAKLJUČEK	78
VIRI		80

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Elementi krožnega križišča	4
Preglednica 2: Elementi kraka A.....	5
Preglednica 3: Elementi kraka B	6
Preglednica 4: Elementi kraka C	7
Preglednica 5: Elementi kraka D.....	8
Preglednica 6: Podatki o prometnih nesrečah na obravnavanem območju od leta 2012 do leta 2017..	11
Preglednica 7: Število prometnih nesreč po letih.....	12
Preglednica 8: Tip prometne nesreče	13
Preglednica 9: Vzrok nastanka prometne nesreče.....	14
Preglednica 10: Klasifikacija poškodbe	15
Preglednica 11: Čas nastanka prometne nesreče.....	16
Preglednica 12: Tabelarni prikaz podatkov avtomatskega števca št. 115 na G2-104	18
Preglednica 13: Tabelarni prikaz podatkov avtomatskega števca št. 116 na G2-104	18
Preglednica 14: Tabelarni prikaz podatkov avtomatskega števca št. 259 na R1-225.....	18
Preglednica 15: Tabelarni prikaz podatkov avtomatskega števca št. 918 na G2-104	19
Preglednica 16: Elementi turbo krožišča.....	31
Preglednica 17: Meje vrednosti kriterijev za določitev nivoja uslug glede na zamude	32
Preglednica 18: Kapacitetni parametri primerjalnega omrežja v jutranji konici 2038	38
Preglednica 19: Kapacitetni parametri primerjalnega omrežja v popoldanski konici 2038.....	39
Preglednica 20: Kapacitetni parametri turbo krožnega križišča v jutranji konici 2038	43
Preglednica 21: Kapacitetni parametri turbo krožnega križišča v popoldanski konici 2038	44
Preglednica 22: Rezultati analize primerjalnega omrežja – nivo uslug, povprečne zamude in povprečna dolžina kolone	51
Preglednica 23: Rezultati analize predlagane rešitve - nivo uslug, povprečne zamude in povprečna dolžina kolone	54
Preglednica 24: Primerjalni kriteriji za vrednotenje uspešnosti	58
Preglednica 25: Rezultati kapacitetne analize z mikrosimulacijo za primerjalno omrežje v JK 2038..	60
Preglednica 26: Rezultati kapacitetne analize z mikrosimulacijo za predlagano rešitev v JK 2038.....	62
Preglednica 27: Parametri analize dvopasovnega krožišča	67
Preglednica 28: Število konfliktov v dvopasovnem krožišču	68
Preglednica 29: Vrednosti parametrov za turbo krožišče.....	69
Preglednica 30: Število konfliktov v turbo krožišču	70
Preglednica 31: Primerjava rezultatov izračunanih zamud in nivoja uslug za primerjalno omrežje v JK leta 2038	72
Preglednica 32: Primerjava rezultatov izračunanih zamud in nivoja uslug za primerjalno omrežje v PK leta 2038	72
Preglednica 33: Primerjava rezultatov izračunanih zamud in nivoja uslug za predlagano rešitev v JK leta 2038	73
Preglednica 34: Primerjava rezultatov izračunanih zamud in nivoja uslug za predlagano rešitev v PK leta 2038	73

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Število prometnih nesreč po letih	12
Grafikon 2: Tip prometne nesreče.....	13
Grafikon 3: Vzrok nastanka prometne nesreče	14
Grafikon 4: Klasifikacija poškodbe.....	15

KAZALO SLIK

Slika 1: Makrolokacija krožnega križišča (maps.google.com, 11.6.2018)	3
Slika 2: Mikrolokacija obravnavanega krožnega križišča (rkg.gov.si/GERK/WebView, 14.7.2018)..	4
Slika 3: Pogled na obstoječe krožišče (lastni arhiv)	5
Slika 4: Uvoz v krožišče iz smeri Kamnika (krak A) (lasten vir)	6
Slika 5: Uvoz v krožišče iz Mengeške obvoznice (krak B) (lasten arhiv)	7
Slika 6: Pogled na krožišče iz smeri Mengša (krak C) (lasten arhiv)	8
Slika 7: Pogled na uvoz v krožišče iz Mengeške obvoznice (krak D) (lasten arhiv)	9
Slika 8: karta števecv prometa (www.di.gov.si, 3.8.2018).....	17
Slika 9: Video štetje prometa (lastni arhiv).....	20
Slika 10: Prometne obremenitve v jutranji konici.....	21
Slika 11: Prometne obremenitve v popoldanski konici.....	21
Slika 12: Osnovni elementi turbo krožnega križišča (https://www.inteylingen.nl/resize/upload/18/1745/DJI_0029-SOCIALSHARING.jpg, 16.8.2018)...	24
Slika 13: Prometne obremenitve v JK (levo) in PK (desno) za leto 2033 (Prometna študija ter prometno in ekonomsko vrednotenje nove cestne povezave Želodnik-Mengeš-Vodice, PNZ d.o.o., 2007)	27
Slika 14: Prikaz prometnih obremenitev po zavijalcih lahkih in težkih vozil v JK, leto 2038	28
Slika 15: Prikaz prometnih obremenitev po zavijalcih lahkih in težkih vozil v PK, leto 2038.....	28
Slika 16: Izbira ustreznega tipa krožišča za jutranjo konico leta 2038	29
Slika 17: Izbira ustreznega tipa krožišča za popoldansko konico leta 2038	29
Slika 18: Izbran kolenasti tip turbo krožišča (povzeto po TSC 02.XXX:2015 KROŽNA KRIŽIŠČA S SPIRALNIM POTEKOM KROŽNEGA VOZIŠČA – TURBO KROŽNA KRIŽIŠČA).....	30
Slika 19: Uporabniški vmesnik SIDRA INTERSECTION 7 (primerjalno omrežje).....	33
Slika 20: Nivo uslug za posamezni pas v odvisnosti od zamud (HCM 6)	35
Slika 21: Povprečne zamude na vozilo [s]	35
Slika 22: Stopnja zasičenosti - razmerje med dejanskim prometnim tokom in kapaciteto (v/c).....	36
Slika 23: Dolžine kolon pri 95-odstotni percentili na posameznem voznem pasu.....	36
Slika 24: Število ustavljanj na posamezno vozilo	37
Slika 25: Povprečna vozna hitrost z vključenimi vsemi zamudami [km/h]	37
Slika 26: Nivo uslug v odvisnosti od zamud (HCM 6) za popoldansko konico	39
Slika 27: Nivo uslug za posamezni pas v odvisnosti od zamud (HCM 6)	40
Slika 28: Povprečne zamude na vozilo [s]	41
Slika 29: Stopnja zasičenosti - razmerje med dejanskim prometnim tokom in kapaciteto (v/c).....	41
Slika 30: Dolžine kolon pri 95-odstotni percentili na posameznem voznem pasu.....	42
Slika 31: Število ustavljanj na posamezno vozilo	42
Slika 32: Povprečna vozna hitrost z vključenimi vsemi zamudami [km/h]	43
Slika 33: Nivo uslug v odvisnosti od zamud (HCM 6) za popoldansko konico	45
Slika 34: Prikaz prometnih tokov za izračun kapacitete ter razdalje $K_S K_E$ (Perme, 2013: str. 5)	47
Slika 35: Definicija faktorja α (Perme, 2013: str.6)	47
Slika 36: Prikaz prometnih tokov v turbo krožnem križišču (Perme, 2013: str. 7).....	49

Slika 37: Pripravljeno delovno okolje za vnos podatkov za analizo krožišča.....	51
Slika 38: Pripravljeno delovno okolje za vnos podatkov za analizo turbo krožišče	53
Slika 39: Programski vmesnik PTV VISSIM	56
Slika 40: Model sledenja vozil Wiedermann 1974 (PTV VISSIM 10 user manual, 2017)	57
Slika 41: Simulacijski model primerjalnega omrežja.....	59
Slika 42: Simulacijski model turbo krožišča	61
Slika 43: Konfliktne točke v klasičnem štirikrakem ter v krožnem štirikrakem križišču (TSC 03.341 : 2011 Krožna križišča, str. 10)	63
Slika 44: Konfliktna točka prepletanja in konfliktni odsek (TSC 03.341 : 2011 Krožna križišča, str. 10)	63
Slika 45: Konfliktne točke v standardnem turbo krožnem križišču (levo) in v izbranem kolenastem turbo krožnem križišču (desno).....	64
Slika 46: Postopek dela s programskim orodjem SSAM (https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/03050/06.cfm , 17.7.2018)	65
Slika 47: Tipi konfliktov in mejni kot med njimi, kot jih upošteva programsko orodje SSAM (program SSAM).....	66
Slika 48: Prikaz vseh konfliktov v dvopasovnem krožišču.....	66
Slika 49: Konflikti križanj in menjave pasov v dvopasovnem krožišču	67
Slika 50: Prikaz vseh konfliktov v turbo krožišču	68
Slika 51: Grafični prikaz konfliktov v turbo krožnem križišču.....	69
Slika 52: Število konfliktnih točk "menjava voznega pasu" in "križanje" v dvopasovnem krožišču (levo) in turbo krožišču (desno)	75

1 UVOD

Prometne povezave so že iz antičnih časov glavno gonilo napredka. Tako so že Rimljani vedeli, da je za uspešno vladanje ter razvoj in blaginjo naroda potrebno učinkovito infrastrukturno omrežje, po katerem je možen hiter prevoz blaga in v tistih časih še posebej pomemben hiter premih vojaških čet, ki so varovale cesarstva.

Tudi danes ni nič drugače. Dobra prometna infrastruktura je hrbtenica gospodarskega napredka in razvoja držav in regij. To je v Sloveniji še najbolj vidno v regijah, ki nimajo avtoceste, saj se v takšnih krajih odpira zelo malo podjetij, mladi pa se odseljujejo v kraje, kjer imajo boljše možnosti za življenje in uspeh. To povzroča vse večjo centralizacijo in vodi v nekakšen začaran krog.

Križanja prometnih tokov so problematična od vsega začetka, saj je na mestu križanja največja verjetnost prometnih nesreč, zastojev in s tem povezanih zamud. Na teh mestih je torej največ rezerv in možnosti optimizacije prometnih tokov. Ker so bila navadna nivojska križišča ob vse večjih prometnih obremenitvah vedno manj učinkovita oziroma so se pojavljale vse večje zamude voznikov in poviševalo število prometnih nesreč so inženirji začeli iskati alternativne rešitve. Tako so se s časom razvile druge oblike križanja prometnih tokov (izvennivojska križišča) in drugačne oblike vodenja prometa v križiščih (semaforizirana in krožna križišča).

Prva krožna križišča (v nadaljevanju krožišča) se tako pojavijo že v začetku 20. stoletja, razcvet modernih krožišč pa se zgodi v 60. letih v Veliki Britaniji. V Sloveniji prvo moderno krožišče dobimo leta 1990, in sicer v Velenju.

Naraščajoče prometne obremenitve so že v prvih enopasovnih krožiščih hitro presegle njihovo kapaciteto zato so inženirji kmalu začeli iskati dodatne rešitve za povečanje kapacitete krožišč. Dodajanje vozniških pasov v krožnem toku in uvedba dvo ali več pasovnih krožišč ni imelo za rezultat le povečanje kapacitete (v dvopasovnem krožišču le ta ni dvakrat višja) temveč tudi ustvarjanje novih konfliktnih točk. S tem pa se je ena od bistvenih prednosti krožišč (manjše število konfliktnih točk v primerjavi s klasičnimi križišči) počasi zmanjševala. Z dodajanjem števila pasov se poslabšuje prometna varnost v krožiščih. V iskanju rešitev za povečanje prometne varnosti pa so se začela razvijati prva turbo krožišča oziroma krožišča s spiralnim potekom krožnih pasov, pri čemer so le-ti fizično ločeni, s tem pa je preprečeno menjavanje pasov v samem krožišču. Tako se zmanjša število konfliktnih točk in eliminira konfliktne odseke.

2 NAMEN IN CILJI NALOGE

Namen naloge je določitev nove geometrije krožišča s pomočjo kapacitetnih analiz ob upoštevanju prometne varnosti z dejanskimi oziroma predvidenimi prometnimi obremenitvami za krožišče na mengeški obvoznici.

V magistrski nalogi bo najprej predstavljeno izbrano krožišče. V tretjem poglavju bodo opisani osnovni geometrijski in prometno-tehnični elementi. Nato bo izdelana analiza prometnih nesreč (iz javno dostopnih podatkov), ki so se zgodile na območju krožišča v času od končane gradnje in uporabe le tega. Na podlagi analize števnih podatkov iz štetja prometa bodo prikazane obstoječe prometne obremenitve ločene po tipih vozil in deležu zavijalcev po posameznih smereh. Izdelana bo tudi analiza obstoječih avtomatskih števecv prometa, ki so locirani v bližini na vseh državnih cestah, ki se križajo v krožišču (Podatki o prometu – Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo).

V nadaljevanju bodo predstavljene prometne obremenitve na koncu planske dobe leta 2038, ki jih bomo pridobili s korekcijo prometne napovedi iz prometne študije za obravnavano območje, ki jo je leta 2007 izdelalo podjetje PNZ svetovanje projektiranje d.o.o.. Na podlagi korigiranih prometnih podatkov ločenih po smereh vožnje in po tipih vozil bo izdelan predlog preureditve obstoječega krožišča z dvema krožnima voznima pasovoma v krožišče s spiralnim potekom, t.i. "turbo krožišče". Namen preureditve krožišča iz klasičnega v turbo krožišče je zmanjšanje števila konfliktnih točk in dvig prometne varnosti. Prikazan bo postopek izbire tipa turbo krožišča ter osnovni geometrijski podatki. Geometrijski elementi turbo krožišča bodo določeni glede na prometne potrebe prevladujočih prometnih tokov.

Predlog preureditve krožišča in primerjalno omrežje (obstoječe stanje oziroma obstoječa geometrija po dograditvi manjkajočega kraka) bosta analitično preverjena s programskim orodjem SIDRA INTERSECTION za potrebe izdelave kapacitetne analize in primerjave kapacitetnih parametrov obeh variant. Krožišče bo še dodatno analizirano z modificirano Bovyevovo enačbo, katere uporaba je za tovrstna dimenzioniranja zelo razširjena na Nizozemskem.

S pomočjo mikrosimulacijskega orodja PTV VISSIM bosta izdelana tudi simulacijska modela za potrebe izdelave mikrosimulacije. Na podlagi rezultatov simulacij bo izdelana primerjava prometnih tokov obstoječega stanja in predloga preureditve krožišča.

Mikrosimulacija nam omogoča, da lahko pridobimo podatke, ki so potrebni za napoved prometne varnosti s pomočjo simulacijskih modelov. Analiza prometne varnosti bo izvedena z modelsko metodo na podlagi izračunanih parametrov simulacijskega modela s pomočjo programskega orodja SSAM.

Cilj naloge je upravičiti rekonstrukcijo dvopasovnega krožišča v turbo krožišče oziroma krožno križišče s spiralnim potekom krožnih voznih pasov s stališča prometne varnosti in prepustnosti.

3 OBSTOJEČE STANJE

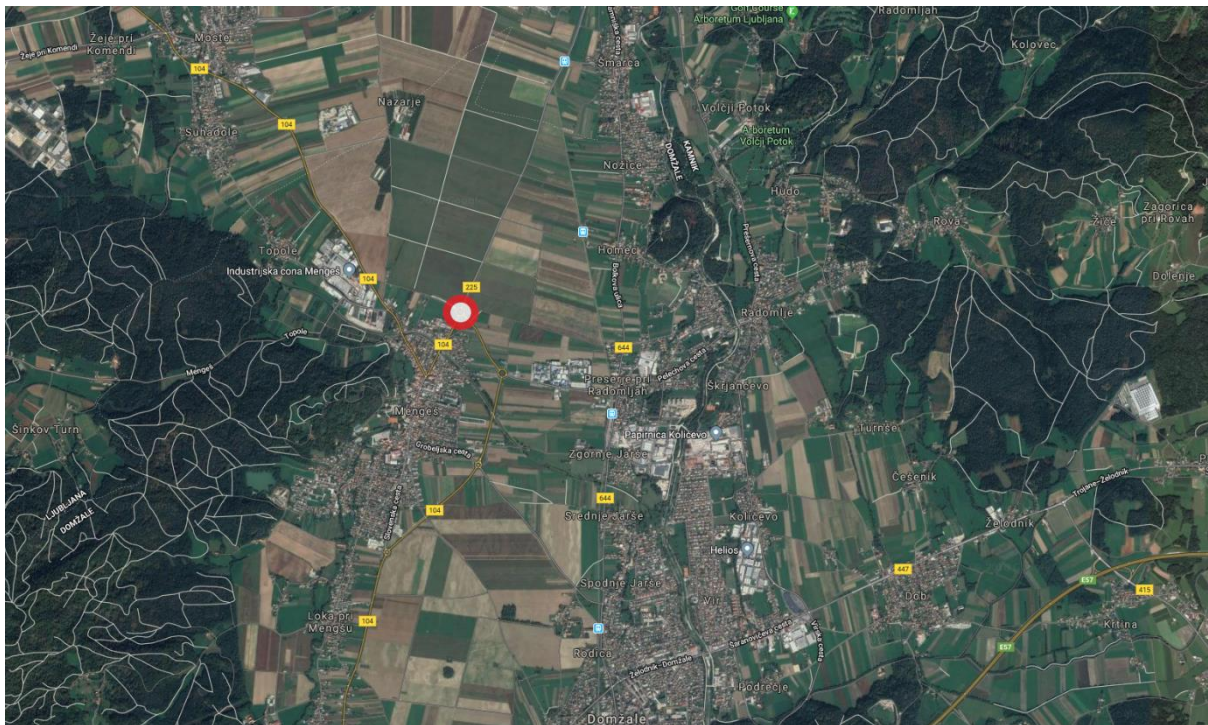
3.1 Splošne značilnosti

V tem poglavju bo predstavljeno in analizirano obstoječe stanje dvopasovnega krožišča, ki leži na t.i. Homškem polju. Obravnavano krožišče je bilo zgrajeno in predano prometu leta 2011. Je zadnje v nizu štirih do sedaj zgrajenih krožišč na mengeški obvoznici, ki je del povezovalne ceste Želodnik–Mengeš–Vodice. V času nastajanja magistrske naloge je obravnavano krožišče že izvedeno s štirimi priključnimi kraki. V promet so predani trije kraki, medtem ko se bo (po znanih podatkih) četrti krak predal v promet po izgradnji zadnjega dela mengeške obvoznice v zaključku tega leta oziroma v letu 2019. Ob upoštevanju navedenega smo v vseh izdelanih analizah predvideli, da je obstoječe stanje krožišče s štirimi priključnimi kraki.

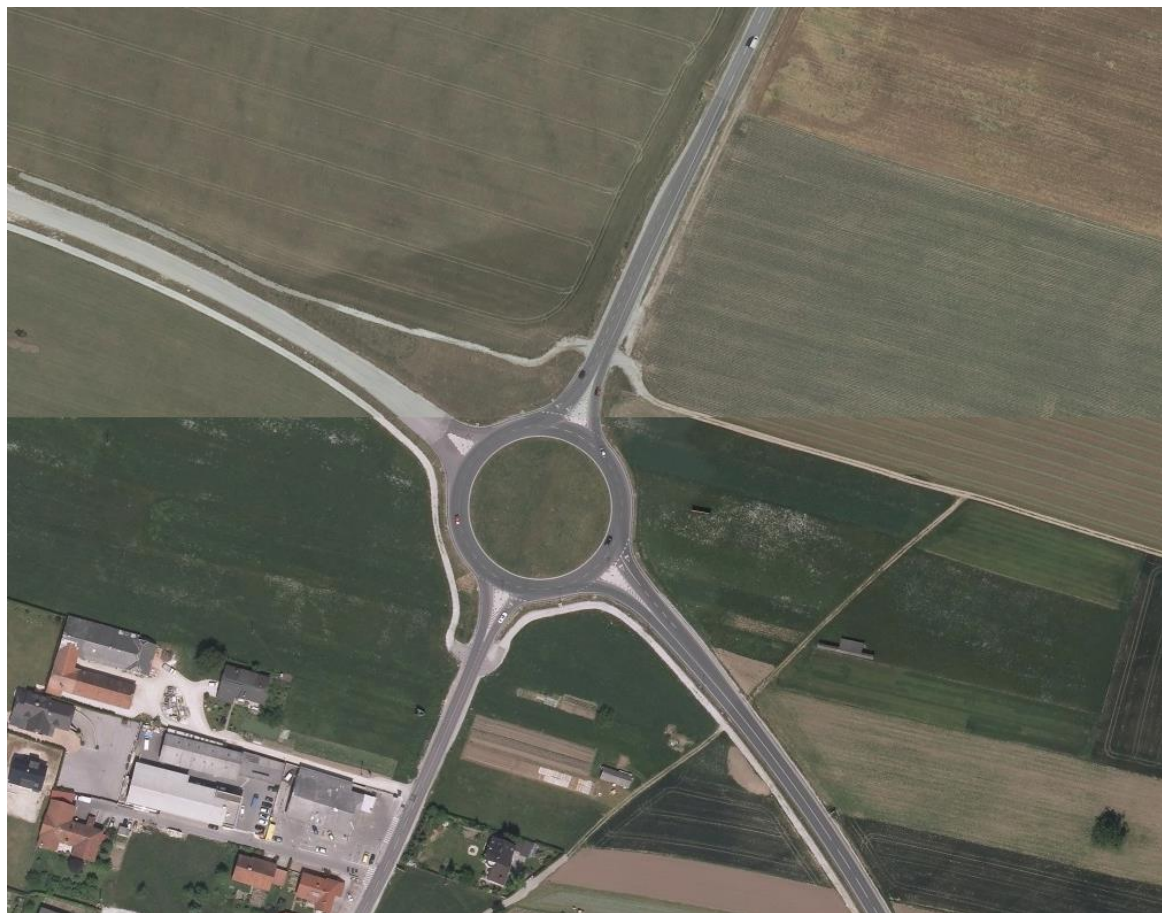
V območju krožišča se priključujejo naslednji kraki:

- severni krak Kamniške ceste-R1-225 Mengeš-Duplica (krak A),
- vzhodni krak obvoznice-G2-104 Mengeš (Kamniška cesta-Kolodvorska cesta) (krak B),
- južni krak Kamniške ceste-LC 253091 Kamniška cesta (krak C) in
- zahodni krak obvoznice-G2-104 Mengeš (Gorenjska cesta-Kamniška cest) (krak D).

Na spodnjih dveh slikah sta prikazani makrolokacija, ki prikazuje lego obravnavanega krožišča v širšem cestnem omrežju, ter mikrolokacija, iz katere je razvidno samo krožišče in priključni kraki (četrti (zahodni) priključni krak v gradnji).



Slika 1: Makrolokacija krožnega križišča (maps.google.com, 11.6.2018)



Slika 2: Mikrolokacija obravnavanega krožnega križišča (rkg.gov.si/GERK/WebViewer, 14.7.2018)

3.2 Opis obstoječega stanja

3.2.1 Krožno križišče

Krožišče zunanjega premera 80 m spada v kategorijo velikih krožnih križišč. Sestavljeno je iz dveh krožnih voznih pasov skupne širine 9,00 m, kot že omenjeno vključuje štiri priključne krake. Priključna smer obeh krakov obvoznice Mengeš ter severni priključni krak Kamniške ceste imata po dva uvozna pasova, medtem ko je na južnem kraku Kamniške ceste samo en uvozni pas. Osnovni elementi krožišča so prikazani v spodnji preglednici:

Preglednica 1: Elementi krožnega križišča

KROŽIŠČE KAMNIŠKA	VREDNOST ELEMENTA
Zunanji premer	$D = 80 \text{ m}$
Notranji polmer	$R = 31 \text{ m}$
Širina posameznega krožnega pasu	$\check{S} = 4,20 \text{ m}$
Širina robnega pasu	$\check{S} = 0,30 \text{ m}$
Prečni nagib krožnega voznega pasu	$Q_{\max} = 1,50 \%$



Slika 3: Pogled na obstoječe krožišče (lastni arhiv)

Osnovni elementi priključnih krakov krožišča so prikazani v spodnjih preglednicah, dodane so tudi fotografije uvozov.

Preglednica 2: Elementi kraka A

KRAK A	VREDNOST ELEMENTA
Širina dvopasovnega uvoza	$\text{Šu} = 8,35 \text{ m}$
Širina voznega pasu na izvozu	$\text{Ši} = 5,50 \text{ m}$
Velikost uvoznega radija	$\text{Ru} = 45 \text{ m}$
Velikost izvoznega radija	$\text{Ri} = 20 \text{ m}$

Na tem priključnem kraku je bil glede na predvidene prometne obremenitve urejen 100 m dolg dodatni uvozni pas v krožišče, 30 m pred uvozom v krožišče pa se nanj z leve in desne strani priključujeta dve poljski dostopni poti.



Slika 4: Uvoz v krožišče iz smeri Kamnika (krak A) (lasten vir)

Preglednica 3: Elementi kraka B

Krak B	VREDNOST ELEMENTA
Širina dvopasovnega uvoza	$\text{Š}_u = 8,43 \text{ m}$
Širina voznega pasu na izvozu	$\text{Š}_i = 6,00 \text{ m}$
Velikost uvoznega radija	$R_u = 45 \text{ m}$
Velikost izvoznega radija	$R_i = 40 \text{ m}$

Na priključnem kraku B se uvozni pas razširi na dva pasova 60 m pred uvozom v krožišče.



Slika 5: Uvoz v krožišče iz Mengeške obvoznice (krak B) (lasten arhiv)

Preglednica 4: Elementi kraka C

Krak C	VREDNOST ELEMENTA
Širina voznega pasu na uvozu	$\check{S}u = 6,00 \text{ m}$
Širina voznega pasu na izvozu	$\check{S}i = 5,58 \text{ m}$
Velikost uvoznega radija	$Ru = 15 \text{ m}$
Velikost izvoznega radija	$Ri = 20 \text{ m}$



Slika 6: Pogled na krožišče iz smeri Mengša (krak C) (lasten arhiv)

Ta krak 30 m pred uvozom v krožišče prečka poljska pot širine 3,00 m, ki je namenjena tudi kolesarskemu prometu.

Preglednica 5: Elementi kraka D

Krak D (pripravljeni elementi)	VREDNOST ELEMENTA
Širina dvopasovnega uvoza	$\text{Šu} = 8,59 \text{ m}$
Širina voznega pasu na izvozu	$\text{Ši} = 5,50 \text{ m}$
Velikost uvoznega radija	$\text{Ru} = 45 \text{ m}$
Velikost izvoznega radija	$\text{Ri} = 20 \text{ m}$

V okviru izgradnje prvega dela mengeške obvoznice je bil zgrajen ločilni otok na priključnem kraku D ter robovi nadaljevanja obvoznice z robniki in nosilna plast asfalta. Pogled na uvoz iz tega kraka je prikazan spodaj. Na uvozu je predvidena razširitev na dva pasova v dolžini 30 m.



Slika 7: Pogled na uvoz v krožišče iz Mengeške obvoznice (krak D) (lasten arhiv)

3.2.2 Trase cest

Trasa obvoznice prečka v tem delu krožišče v levi krivini polmera 700 m. Niveletni potek od krožišča na Kolodvorski cesti se dviguje z blagim nagibom 0,31 % proti krožišču s Kamniško cesto. Od tu naprej se bo proti krožišču z Gorenjsko cesto nadaljeval blag vzpon nivelete 0,15 %. Glede na potek nivelete v ravnem terenu, je mogoča uporaba velikih vertikalnih zaokrožitev v območju navezave na krožišče, kjer sta polmera konkavnih krivin 2000 m oz. 1250 m.

Kamniška cesta prečka krožišče v krivini polmera 5000 m. Niveletno se iz smeri Kamnika spušča z naklonom 0,42 %, zadnjih 60 m pred uvozom v krožišče pa z 2,00 %. Tudi od krožišča naprej proti Mengšu pada z naklonom 0,90 %. Na tej cesti sta konkavni vertikalni zaokrožitvi v radiju 550 m oz. 3000 m.

3.2.3 Kakovost cestnega omrežja

Zgornji ustroj cest, ki se priključujejo v krožišče, kot tudi samega krožišča je v dobrem stanju, saj ni opaznih poškodb, kar je glede na kratek čas odkar je bilo predano v uporabo prometu tudi pričakovano. Tudi širine cest, uvozov in izvozov ter samih krožnih vozniških pasov so zadostne, na kar kažejo robniki, ki so praktično nepoškodovani. V nasprotnem primeru bi bili poškodovani oz. delno porušeni, saj bi jih tovorna vozila prevažala kar s časom privede do poškodb.

3.3 Analiza prometnih nesreč

Analiza prometnih nesreč je narejena s podatki pridobljenimi na spletni strani Javne agencije za varnost prometa in spletni strani Policije. V to število so zajete samo prometne nesreče, ki so bile obravnavane s strani policije. Ker je krožišče tudi element umirjanja prometa, so hitrosti razmeroma nizke in posledično je večina prometnih nesreč lažjih oz. takšnih, v katerih nastane samo materialna škoda. Predvidevamo, da takšne prometne nesreče udeleženci najverjetneje rešujejo brez vednosti policije z izpolnitvijo evropskega poročila o prometni nesreči, s katerim prijavijo škodo zavarovalnici. Slabost le tega pa je ta, da število teh prometnih nesreč ni znano in ni zajeto v izvedeni analizi.

Glede na zgoraj navedeno smo poskušali zajeti tudi analizo teh nesreč, zato smo kontaktirali večje zavarovalnice v Sloveniji s prošnjo za podatke o datumu, času ter tipu nesreč na območju krožišča. Do zaključka magistrskega dela odgovora žal nismo dobili. Predvidevamo, da se podatki zaradi varovanja osebnih podatkov ne smejo posredovati.

Na območju obravnavanega krožišča se je v času od odprtja, torej od meseca oktobra 2011 pa do konca leta 2017, zgodilo 12 prometnih nesreč (PN).

Preglednica 6: Podatki o prometnih nesrečah na obravnavanem območju od leta 2012 do leta 2017

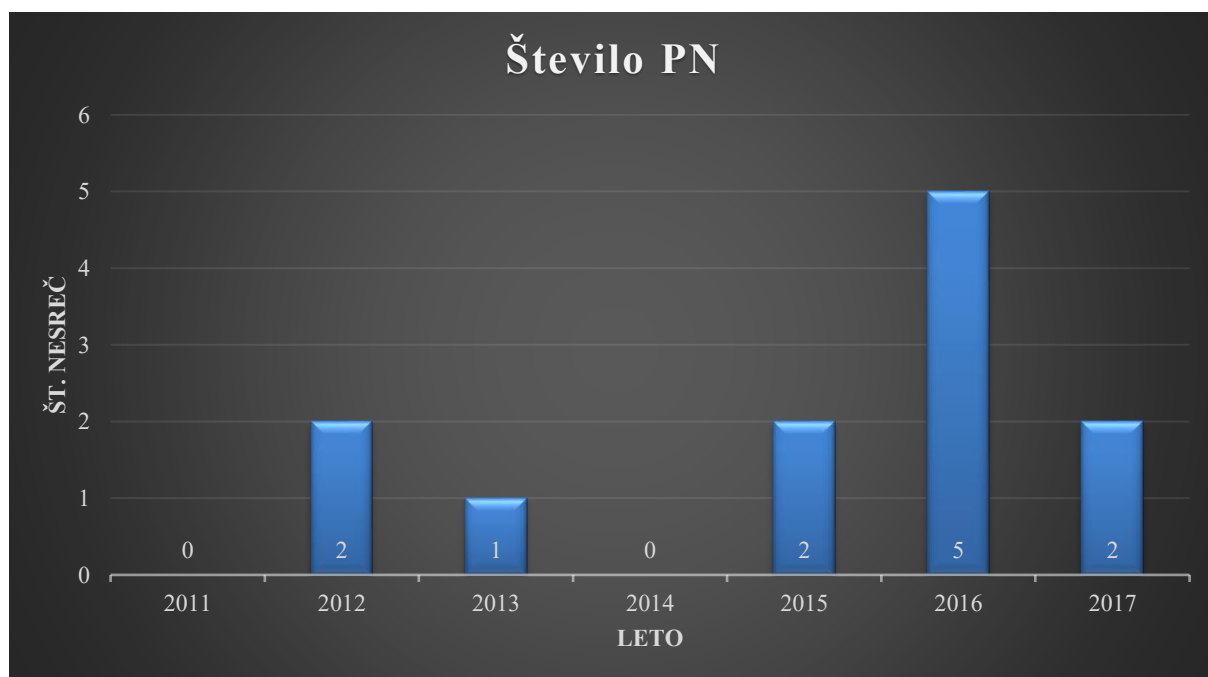
DATUM	URA	LOKACIJA	KRAJ	VZROK	TIP	VREME	PROMET	VOZIŠČE	KLAS.
17.02.2012	20-21	NASELJE	C	SV	OP	O	N	SU	B
28.07.2012	12-13	NASELJE	M	PD	BT	J	R	SU	L
30.11.2013	02-03	CESTA	M	HI	OS	J	N	SU	B
1.08.2015	13-14	NASELJE	M	HI	OS	J	R	SU	H
22.12.2015	10-11	NASELJE	M	OS	OS	J	N	SU	B
21.01.2016	19-20	NASELJE	C	VR	TV	J	N	SU	L
17.03.2016	18-19	CESTA	C	SV	ČT	J	N	SU	H
5.09.2016	21-22	NASELJE	C	VR	OS	J	R	SU	L
30.09.2016	17-18	CESTA	C	VR	NT	J	N	SU	L
3.12.2016	00-01	NASELJE	C	HI	PR	O	N	SU	L
17.07.2017	15-16	NASELJE	M	PV	OP	J	N	SU	B
12.11.2017	16-17	NASELJE	C	VR	NT	O	N	SU	B

Analiza statističnih podatkov PN je predstavljena v nadaljevanju.

Preglednica 7: Število prometnih nesreč po letih

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
ŠTEVILO PROMETNIH NESREČ	0	2	1	0	2	5	2
ODSTOTEK	0,0 %	16,7 %	8,3 %	0,0 %	16,7 %	41,7 %	16,7 %

Grafikon 1: Število prometnih nesreč po letih

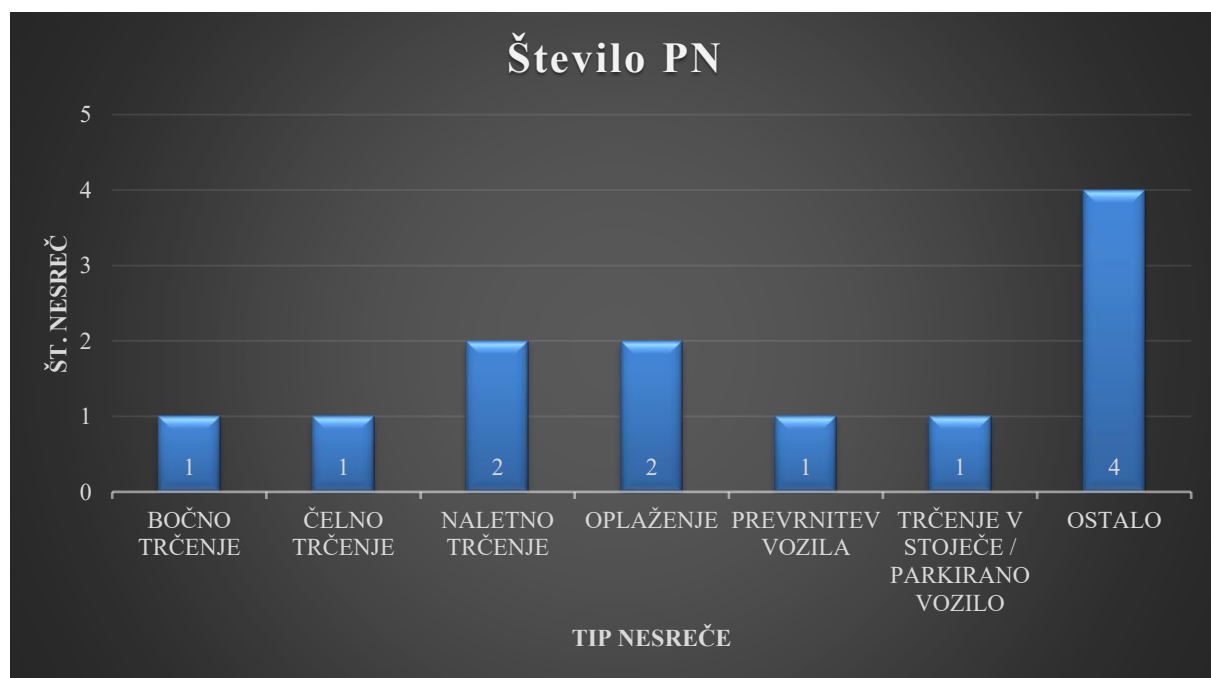


Kot je razvidno iz zgornje preglednice in grafikona se v letu 2011, ko je bilo krožišče v uporabi dobra dva meseca, ni zgodila nobena prometna nesreča, podobno se ponovi tudi leta 2014, ko ni bilo takšnih nesreč, kjer bi posredovala policija. Ena nesreča se je zgodila leta 2013, v letih 2012, 2015 in 2017 pa sta se zgodili po dve prometni nesreči. V številu prometnih nesreč najbolj izstopa leto 2016, ko se je število le-teh ustavilo pri 5, kar je 41,7 % vseh nesreč, ki so se zgodile na tem območju od odprtja krožišča.

Preglednica 8: Tip prometne nesreče

TIP NESREČE	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	SKUPAJ	
BOČNO TRČENJE	0	1	0	0	0	0	0	1	8,3 %
ČELNO TRČENJE	0	0	0	0	0	1	0	1	8,3 %
NALETNO TRČENJE	0	0	0	0	0	1	1	2	16,7 %
OPLAŽENJE	0	1	0	0	0	0	1	2	16,7 %
PREVRNITEV VOZILA	0	0	0	0	0	1	0	1	8,3 %
TRČENJE V STOJEČE / PARKIRANO VOZILO	0	0	0	0	0	1	0	1	8,3 %
OSTALO	0	0	1	0	2	1	0	4	33,3 %

Grafikon 2: Tip prometne nesreče

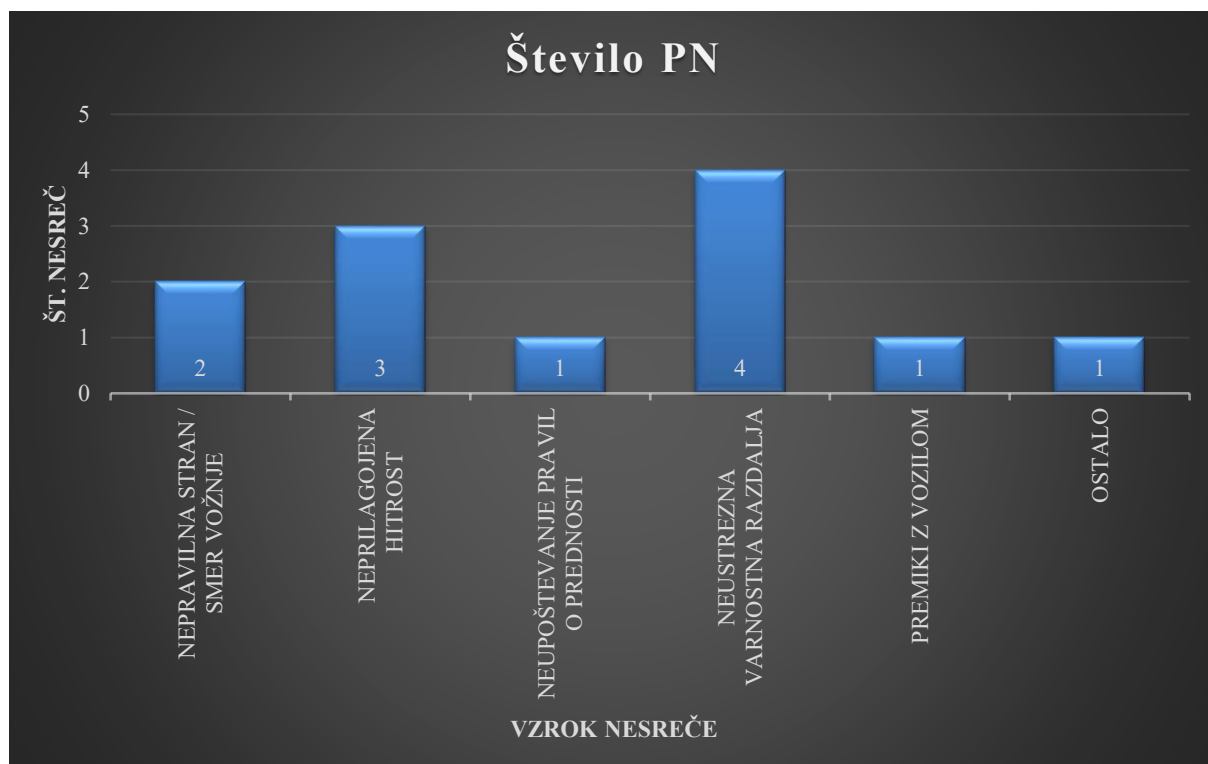


Vse obravnavane nesreče so po tipu značilne za krožišča. Še najmanj tipični sta prevrnitev vozila, do česar je verjetno prišlo zaradi prevelike hitrosti, in čelno trčenje, ki se je zgodilo ob tem, ko je voznika pri izvažanju iz krožišča zaneslo na nasprotni vozni pas, pri čemer velja poudariti, da je bil voznik vinjen. Pri kar tretjini nesreč je kot tip nesreče naveden "OSTALO".

Preglednica 9: Vzrok nastanka prometne nesreče

VZROK NESREČE	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	SKUPAJ	
NEPRAVILNA STRAN / SMER VOŽNJE	0	1	0	0	0	1	0	2	16,7 %
NEPRILAGOJENA HITROST	0	0	1	0	1	1	0	3	25,0 %
NEUPOŠTEVANJE PRAVIL O PREDNOSTI	0	1	0	0	0	0	0	1	8,3 %
NEUSTREZNA VARNOSTNA RAZDALJA	0	0	0	0	0	3	1	4	33,3 %
PREMIKI Z VOZILOM	0	0	0	0	0	0	1	1	8,3 %
OSTALO	0	0	0	0	1	0	0	1	8,3 %
SKUPAJ	0	2	1	0	2	5	2	12	100,0%

Grafikon 3: Vzrok nastanka prometne nesreče

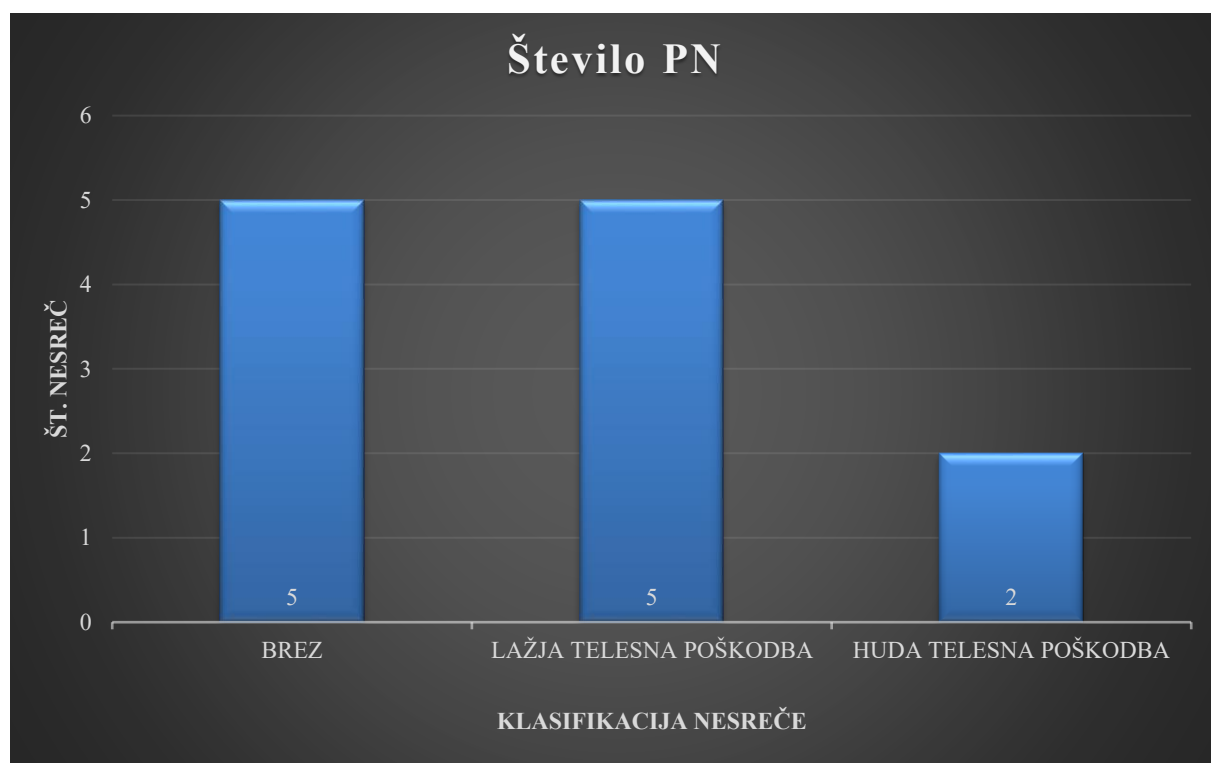


Vzrokov za nastanek PN je več, prevladujeta pa neustrezna varnostna razdalja in neprilagojena hitrost.

Preglednica 10: Klasifikacija poškodbe

KLASIFIKACIJA POŠKODBE	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	SKUPAJ	
BREZ	0	1	1	0	1	0	2	5	42 %
LAŽJA TELESNA POŠKODBA	0	1	0	0	0	4	0	5	42 %
HUDA TELESNA POŠKODBA	0	0	0	0	1	1	0	2	17 %
SKUPAJ	0	2	1	0	2	5	2	12	100 %

Grafikon 4: Klasifikacija poškodbe



Večji del prometnih nesreč, skupaj 10 nesreč se je končal brez oz. z lažjimi telesnimi poškodbami, kar je 84% vseh nesreč. V dveh nesrečah je prišlo do hujših telesnih poškodb. Ena od teh je že zgoraj omenjeno čelno trčenje, druga pa je bila posledica neprilagojene hitrosti voznika motornega vozila.

Preglednica 11: Čas nastanka prometne nesreče

URNI INTERVAL	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	SKUPAJ	%
00-02	0	0	0	0	0	1	0	1	8,3 %
02-04	0	1	0	0	0	0	0	1	8,3 %
04-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0 %
06-08	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0 %
08-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0 %
10-12	0	0	0	0	1	0	0	1	8,3 %
12-14	0	1	0	0	1	0	0	2	16,7 %
14-16	0	0	0	0	0	0	1	1	8,3 %
16-18	0	0	0	0	0	1	1	2	16,7 %
18-20	0	0	0	0	0	2	0	2	16,7 %
20-22	0	1	0	0	0	0	0	1	8,3 %
22-24	0	0	0	0	0	1	0	1	8,3 %
SKUPAJ	0	3	0	0	2	5	2	12	100,0 %

Iz zgornje preglednice je razvidno, da se je večina PN, skupaj devet, zgodila popoldne in ponoči. Zgodaj zjutraj in dopoldne pa so se zgodile samo tri nesreče. To bi lahko pripisali večji zbranosti voznikov zjutraj, ko so bolj spočiti kot popoldne, ko odhajajo iz službe, saj so prometne obremenitve zelo podobne, le da so smeri prometnih tokov obrnjene.

Iz statistične analize prometnih nesreč je razvidno, da so vzroki za nastanek prometnih nesreč dokaj tipični za krožišča, saj prevladuje neustrezna varnostna razdalja, neprilagojena hitrost, nepravilna smer vožnje ... Tudi tipi prometnih nesreč to potrjujejo, saj so naletna trčenja in oplazenja značilna za krožišča oz. križišča na splošno. Večina nesreč se je končala brez oziroma z lažjimi telesnimi poškodbami, nesreč s smrtnim izidom ni bilo. Pri analizi vremena, stanja vozišča in gostote prometa je bilo ugotovljeno, da se je večina nesreč zgodila v jasnem vremenu ob normalnem prometu, prav v vseh nesrečah je bilo vozišče suho. Ob upoštevanju zgoraj navedenih dejstev lahko zaključimo, da se večina prometnih nesreč zgodi zaradi človeškega dejavnika, ki pa bi ga lahko z drugačnim načinom urejanja prometa v krožišču zmanjšali oz. omejili.

3.4 Prometne obremenitve

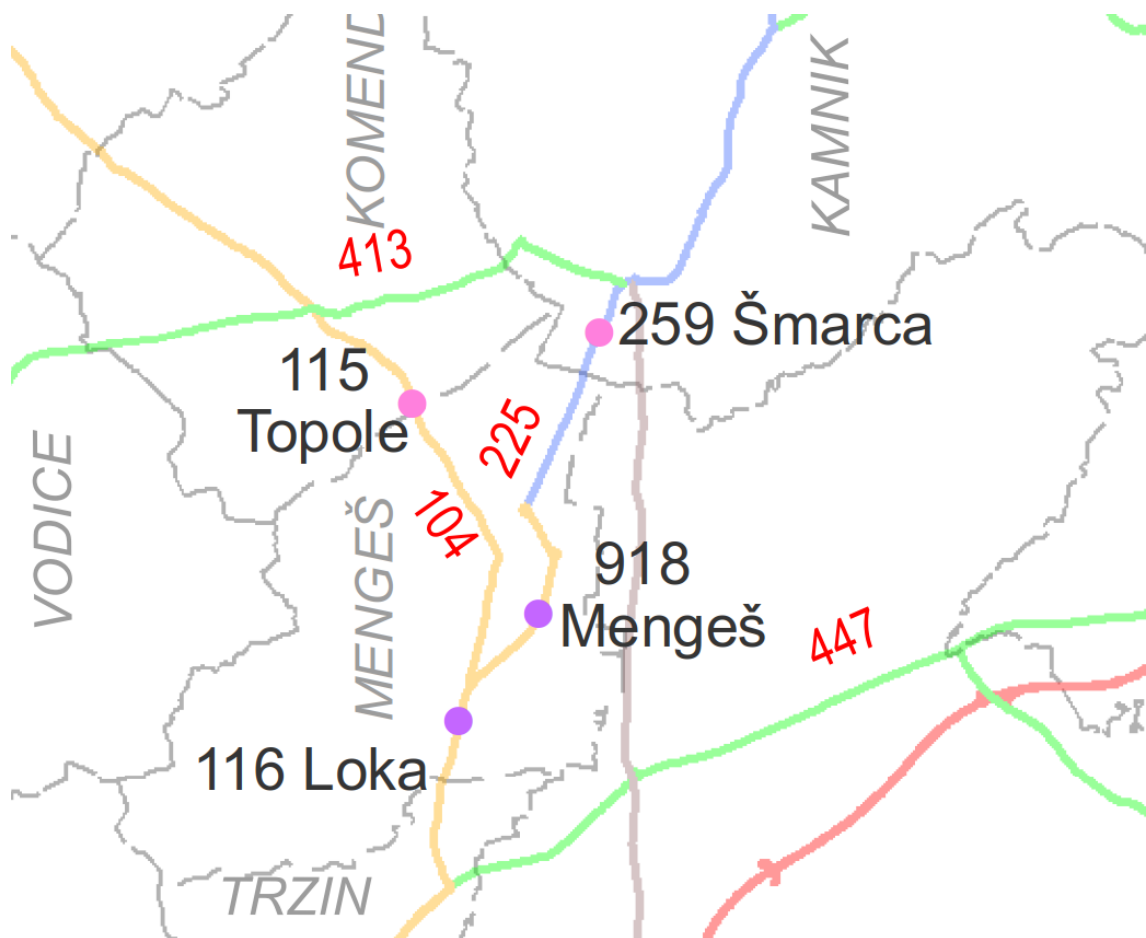
3.4.1 Podatki števecv prometa

Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo v skladu s predpisi izvaja štetje prometa na državnih cestah. Na podlagi podatkov, ki so pridobljeni iz avtomatskih števecv prometa ter tistih pridobljenih s posameznimi ročnimi štetji je izdelan izračun povprečnega letnega dnevnega prometa (PLDP), ki predstavlja število motornih vozil, ki v 24 urah peljejo preko števnega mesta na povprečni dan v letu.

V okolici obravnavanega krožišča so naslednji avtomatski števeci prometa:

- 115 Topole (Moste-Mengeš),
- 116 Loka (Loka-Trzin),
- 918 Mengeš (Mengeš (Kolodvorska cesta)-Loka) in
- 259 Šmarca (Mengeš-Duplica).

Lokacije so prikazane na spodnji sliki.



Slika 8: karta števecv prometa (www.di.gov.si, 3.8.2018)

Povprečna letna rast PLDP v obdobju od leta 2011 do leta 2017 znaša 3,09 %. Na tem števnem mestu so zajeta vsa vozila, ki bodo zapeljala v obravnavano krožišče ali iz krožišča preko kraka A.

Preglednica 15: Tabelarni prikaz podatkov avtomatskega števca št. 918 na G2-104

Leto	Cesta	Odsek	Števno mesto	Št. Mesto	PLDP	Rast prometa	Geometrijska rast
2012	G2-104	1139	918	Mengeš	7 218	/	/
2013	G2-104	1139	918	Mengeš	7 667	6,22 %	1,062
2014	G2-104	1139	918	Mengeš	8 034	4,79 %	1,048
2015	G2-104	1139	918	Mengeš	8 375	4,24 %	1,042
2016	G2-104	1139	918	Mengeš	9 069	8,29 %	1,083
2017	G2-104	1139	918	Mengeš	9 768	7,71 %	1,077
Povprečna rast:						6,25 %	1,062

To števno mesto se nahaja na obvoznici, zato podatkov za leto 2011 še ni. V obdobju od leta 2012 do leta 2017 pa znaša povprečna rast PLDP 6,25 %.

3.4.2 Štetje prometa

Za obravnavano krožišče je bilo izvedeno video štetje prometa s pomočjo dveh kamer, s katerima so bili zajeti vsi trije priključni kraki (ki so predani v promet). 16-urno snemanje prometa je potekalo v četrtek 24.05.2018, od 6:00 pa do 22:00 ure, s čimer sta bili zajeti tako jutranja kot popoldanska konica.

Iz analize števnih podatkov se je pokazalo, da jutranja konica nastopi med 7:00 in 8:00 uro, ko ljudje odhajajo na delo, pri čemer je izrazito prevladujoč prometni tok vozil iz smeri Kamnika na mengeško obvoznico. Podrobnejši rezultati so prikazani v nadaljevanju.

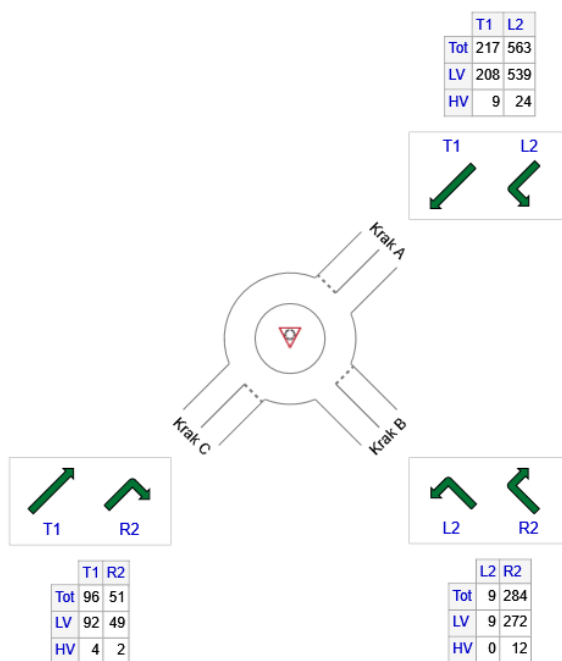
Popoldanska konica nastopi med 15:00 in 16:00 uro, ko se večina delovno aktivnih vrača domov. V tem času prevladuje tok vozil iz mengeške obvoznice proti Kamniku, torej iz kraka B na krak A. Ta vozila predstavljajo kar 45 % vseh vozil v popoldanski konici.



Slika 9: Video štetje prometa (lastni arhiv)

3.4.2.1 Jutranja konica

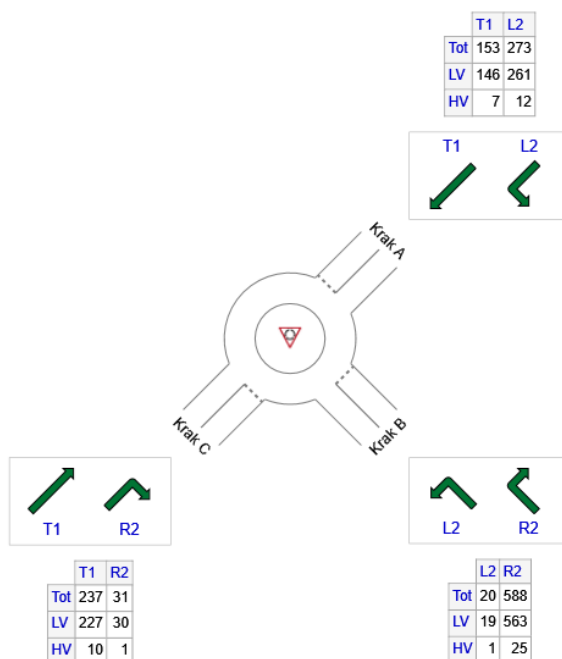
V jutranji konici (7:00-8:00) je bilo skupaj zabeleženih 1220 vozil. Iz smeri Kamnika na mengeško obvoznico zavija kar 46 % vsega prometa v jutranji konici. Ta tok so t.i. levi zavijalci in ti vsaj delno ovirajo vse ostale priključne krake. Velika večina, kar 92 % vseh vozil so osebni avtomobili in motorji, 4,5 % je tovornih vozil, ostalih 3,5 % pa so težka tovorna vozila.



Slika 10: Prometne obremenitve v jutranji konici

3.4.2.2 Popoldanska konica

V popoldanski konici (15:00-16:00) je bilo skupno število vozil v krožnem križišču 1302, kar je 82 vozil več kot v jutranji konici. Najmočnejši prometni tok predstavlja tisti iz mengeške obvoznice proti Kamniku, ker je od vseh vozil kar 588 takšnih. Tokrat je delež osebnih vozil in motorjev še večji in sicer 95,7 %, 2,9 % je tovornih vozil, 1,4 % pa je težkih tovornih vozil.



Slika 11: Prometne obremenitve v popoldanski konici

Ker bomo v izračunih potrebovali prometne obremenitve na koncu planske dobe leta 2038 smo morali izdelati korekcijo prometnih napovedi iz prometne študije za obravnavano območje, ki jo je leta 2007 izdelalo podjetje PNZ svetovanje projektiranje d.o.o.. Za korekcijo le teh pa smo upoštevali prometne podatke, ki smo jih pridobili iz štetja prometa. Iz teh podatkov so razvidni cilji posameznih prometih obremenitev in ker gre za snemanje vozil tudi obnašanja voznikov. Ker se glede na regijo in lokacijo krožišča obnašanje le teh spreminja (tranzitni, izvirno ciljni promet ...) smo posebno pozornost namenili le temu. Pri opazovanju smo ugotovili, da:

- veliko voznikov uvaža iz desnega uvoznega pasu na notranji krožni vozni pas,
- nekateri pri uvažanju izsiljujejo voznike v krožečem toku in
- se velikokrat pojavi tudi izvažanje iz notranjega krožnega pasu.

Vse zgoraj navedene situacije predstavljajo situacije "skoraj nesreča" in posledično zmanjšujejo prometno varnost krožišča. Ker moramo pri izdelavi simulacije upoštevati osnovna cestno prometna pravila zgoraj navedenih "kršitev" ne bomo upoštevali. Bi pa v primeru, da le to upoštevamo, imeli za rezultat višji nivo uslug, saj bi se kapaciteta krožišča povišala.

4 IDEJNA ZASNOVA PREDLAGANE REŠITVE

4.1 Turbo krožno krožišče

(povzeto po TSC 02.XXX:2015 KROŽNA KRIŽIŠČA S SPIRALNIM POTEKOM KROŽNEGA VOZIŠČA – TURBO KROŽNA KRIŽIŠČA)

Turbo krožno križišče

je posebna vrsta večpasovnega krožnega križišča, pri katerem so nekateri smerni tokovi medsebojno ločeni oz. so vodeni po fizično ločenih vozniških pasovih. V turbo krožnem križišču so prometni tokovi vodeni ločeno že pred uvozom v krožno križišče, ločene pasove zasedajo ves čas vožnje skozi krožišče, ločeno pa so prometni tokovi vodeni tudi na izvozu iz krožišča.

Fizična ločenost vozniških pasov je prekinjena le na mestih predvidenega uvažanja na notranji krožni vozniški pas turbo krožišča. Fizično ločevanje se doseže z deniveliranimi elementi posebne oblike – delineatorji, ki ovirajo, ne pa tudi preprečujejo (vendar le v izjemnih primerih – intervencijska vozila) menjavo vozniških pasov v krožnem vozišču.

Ta tip krožišča torej ne dovoljuje spremembe vozniških pasov v krožnem vozišču – prepletanja.

Za razliko od standardnih krožišč (katerih izvedba je praviloma smiselna na lokacijah s približno enakovredno jakostjo prometnega toka na glavni in stranski prometni smeri) je izvedba turbo krožnih križišč smiselna tudi v križiščih s poudarjeno jakostjo prometnega toka na glavni prometni smeri.

Dvignjen robnik – delineator na krožnem vozišču turbo krožnega križišča

je betonski prefabriciran element, ki ovira, ne pa tudi preprečuje (vendar le v izjemnih primerih – intervencijska vozila) prometni manever menjave voznega pasu v krožnem vozišču turbo krožišča.

"Trnek"

je ureditev začetka delineatorja v krožnem vozišču turbo krožišča. Namenjen je odvrčanju voznikov osebnih vozil od vožnje po napalni trajektoriji. Voznikom tovornih vozil, ki so zaradi svoje velikosti prisiljeni zapeljati preko, pa to ne predstavlja problema.

V primeru, da se ne izvede, mora biti začetek delineatorja izveden kot prisekan element.

Sredinski otok turbo krožnega križišča

je deniveliran otok krožne ali ovalne oblike izveden v središču turbo krožnega križišča, ki preprečuje vožnjo naravnost in omejuje krožno vozišče na notranji strani.

Ločilni otoki v turbo krožnem križišču

So denivelirani otoki med uvozom in izvozom iz turbo krožnega križišča, ki usmerjajo (kanalizirajo) motorna vozila v predvideno krivuljo vožnje s predvideno hitrostjo.

Vmesni (dodatni) ločilni otoki na uvozu/izvozu iz turbo krožnega križišča

so denivelirani ločilni otoki, ki se izvedejo med dvema uvoznima ali izvoznima voznima pasoma na uvozu oz. izvozu iz turbo krožnega križišča. Z njimi dvignemo prometno varnost pešcev in kolesarjev.

"Turbo blok"

je blok oz. skupek vseh konstrukcijskih polmerov turbo krožišča, ki jih je potrebno na določen način rotirati in na ta način dobiti vozne linije oz. linije voznih pasov.

Turbo blok vsebuje (razen vseh konstrukcijskih polmerov) tudi t.i. translacijsko os. To je os, po kateri se izvaja premikanje oz. rotiranje določenih polmerov.

"Puščice" v turbo krožnem križišču

so talne označbe namenjene posebej za turbo krožna križišča, ki se izvajajo pred uvozom v turbo krožišče.



Slika 12: Osnovni elementi turbo krožnega križišča (https://www.inteylingen.nl/resize/upload/18/1745/DJI_0029-SOCIALSHARING.jpg, 16.8.2018)

4.1.1 Deljenje glede na tip

Na izbiro tipa krožnega križišča s spiralnim potekom vpliva prevladujoča smer prometnega toka. Po tipu se spiralna krožna križišča delijo na:

- standardni tip,
- jajčasti tip,
- kolenasti tip,
- raztegnjeni kolenasti (trikraki) tip,
- podaljšani kolenasti tip,
- zvezdasti tip ter
- turbina (semaforizirana).

4.1.2 Prepustna sposobnost

V primerjavi s standardnimi dvopasovnimi krožnimi krožišči imajo turbo krožna križišča večjo prepustnost ker:

- imajo na glavni smeri dvopasovne uvoze, ki se nadaljujejo v dvopasovno krožno vozišče,
- se uporaba notranjega krožnega voznega pasu poveča, saj ni prepletanj, zato se vozniki pogosteje odločijo zanj in
- uvozni prometni tok uvaža v turbo krožno križišče z manj zadržkov, kar povečuje prepustno sposobnost uvozov.

Največja prepustna sposobnost standardnega dvopasovnega krožnega križišča z enopasovnimi uvozi/izvozi v konični uri je 1500 EO/h, takšnega z dvopasovnimi uvozi/izvozi znaša 1800 EO/h, pri standardnem turbo krožnem križišču pa je ocenjena na 2000 EO/h.

4.1.3 Kriteriji za upravičenost izvedbe

(povzeto po TSC 03.341:2011 KROŽNA KRIŽIŠČA)

Za upravičenost in smiselnost izvedbe oziroma rekonstrukcije krožnega križišča je potrebno izpolniti kriterije za izvedbo krožnega križišča. Nabor teh kriterijev predstavlja dobro strokovno podlago za sprejetje odločitve o izvedbi. Kriteriji so v nadaljevanju navedeni po vrstnem redu kakršnega je potrebno uporabiti pri obravnavanju konkretnih rešitev s krožnim križiščem.

Funkcionalni kriterij

S tem kriterijem se preveri funkcija, vloga in položaj obravnavanega križišča v cestni mreži obravnavanega območja. Gre za preveritev katera geometrija je ustrezna glede na pričakovano funkcijo, ki jo bo imel izbran tip krožnega križišča. Kriterij je kvalitativen in odgovori na vprašanje kakšna je primarna vloga križišča (povečanje pretočnosti, umirjanje prometa ...)

Kriterij prepustnosti

Ta kriterij preverja ustreznost rešitve s stališča kapacitetne zmogljivosti po koncu planske dobe. Odgovoriti je treba na vprašanje ali bo podana rešitev ustrezala pričakovanim prometnim tokovom po koncu planske dobe.

Projektno-tehnični kriterij

Opredelitev za izvedbo krožnega križišča je s stališča prometno-tehničnega kriterija primerna in priporočljiva predvsem pri križanjih:

- v obliki X, Y, A in K (oster kot sekanja),
- v obliki F in H (dve zaporedni T križišči na kratki medsebojni oddaljenosti),
- v primeru približno enake prometne obremenitve na glavni in stranski prometni smeri,
- v primeru majhnega števila levih zavijalcev,
- večjega števila krakov (pet ali več),
- kjer semaforizacija ni upravičena, je pa presežena kapaciteta nesemaforiziranega križišča.

Pri presoji tega kriterija gre za pridobitev odgovora na vprašanje: Kakšne so okoliščine na obravnavanem mestu?

Kriterij prometne varnosti

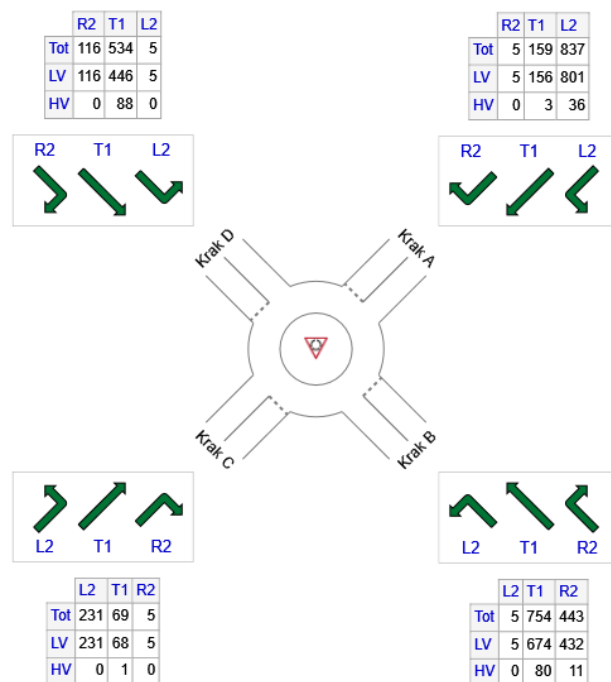
Ta kriterij se preveri neglede na to ali gre za rekonstrukcijo ali novogradnjo, saj sta si prepustnost in prometna varnost lahko premosorazmerni. Ta kriterij je še posebej pomemben pri opredelitvi za tip križišča (klasično ali krožno), saj glede na prevladujoči tip prometne nesreče odloči o smiselnosti oz. potrebnosti izvedbe krožnega križišča. Ta kriterij odgovori na vprašanje ali bo krožno križišče v obstoječih razmerah prometno varna rešitev za vse udeležence v prometu.

Ekonomski kriterij

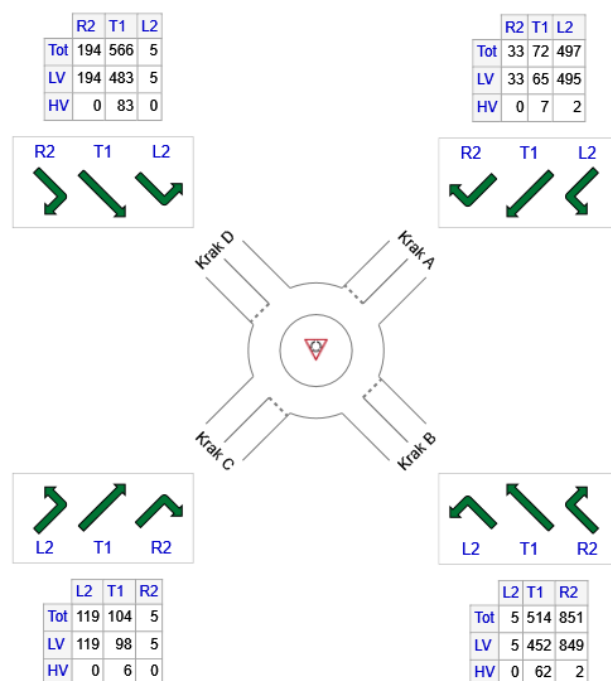
Ta kriterij predstavlja ekonomsko upravičenost predlagane rešitve. Pri presoji tega kriterija je smiselna primerjava z drugimi možnimi rešitvami oz. tipi križišč. Glavno vprašanje tega kriterija je kakšni bodo stroški izvedbe in obratovanja krožnega križišča v času obratovanja.

Pri analizi avtomatskih števecv se je pokazalo, da znašajo letne rasti med leti 2011 in 2017 od 0,91 do 6,25%. Ker je takšno rast nerealno pričakovati, smo v izračunu korekcije prometnih obremenitev iz leta 2033 na leto 2038 uporabili enotno rast prometa 1 % letno

Spodaj so shematsko prikazane prometne obremenitve za osebna vozila, tovorna vozila in seštevke. Prometni tokovi, ki so prikazani, so prometni tokovi na koncu 20-letne planske dobe leta 2038.



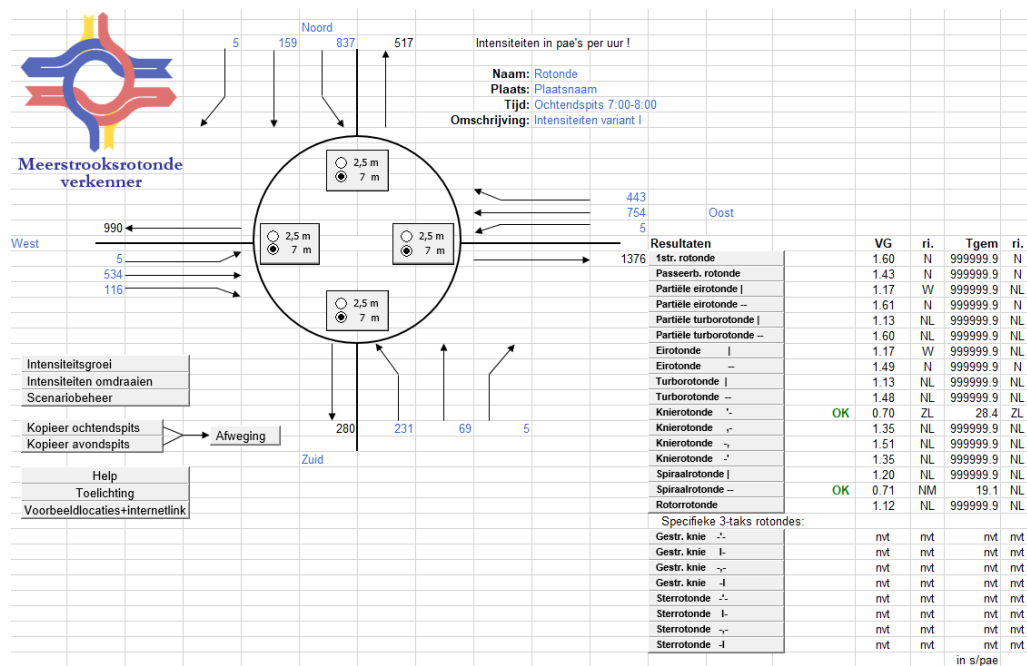
Slika 14: Prikaz prometnih obremenitev po zavijalcih lahkih in težkih vozil v JK, leto 2038



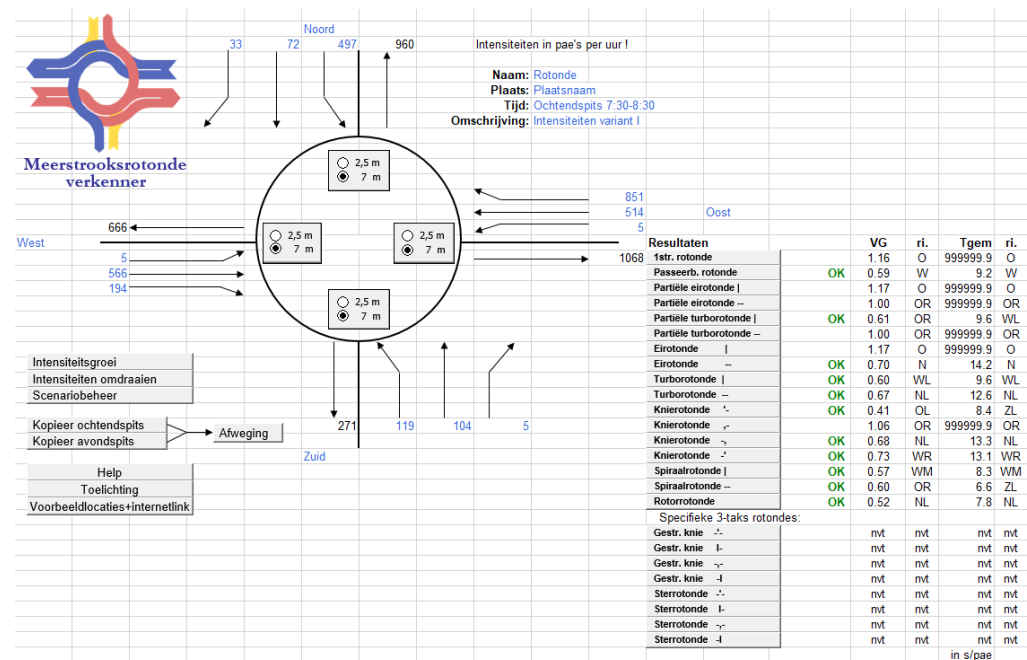
Slika 15: Prikaz prometnih obremenitev po zavijalcih lahkih in težkih vozil v PK, leto 2038

4.3 Zasnova turbo krožnega križišča

Obliko novega krožišča smo določili z orodjem Meerstrooksrotondeverkenner, ki so ga razvili na Nizozemskem. V to orodje je vključenih 17 štirikrakovih in 8 trikrakovih krožišč. Glede na prometne obremenitve, ki jih vnesemo po željenih smereh, orodje predlaga tip krožišča, ki je te obremenitve sposobno prevzeti. Na spodnjih slikah je prikazana izbira tipa krožišča s tem orodjem.



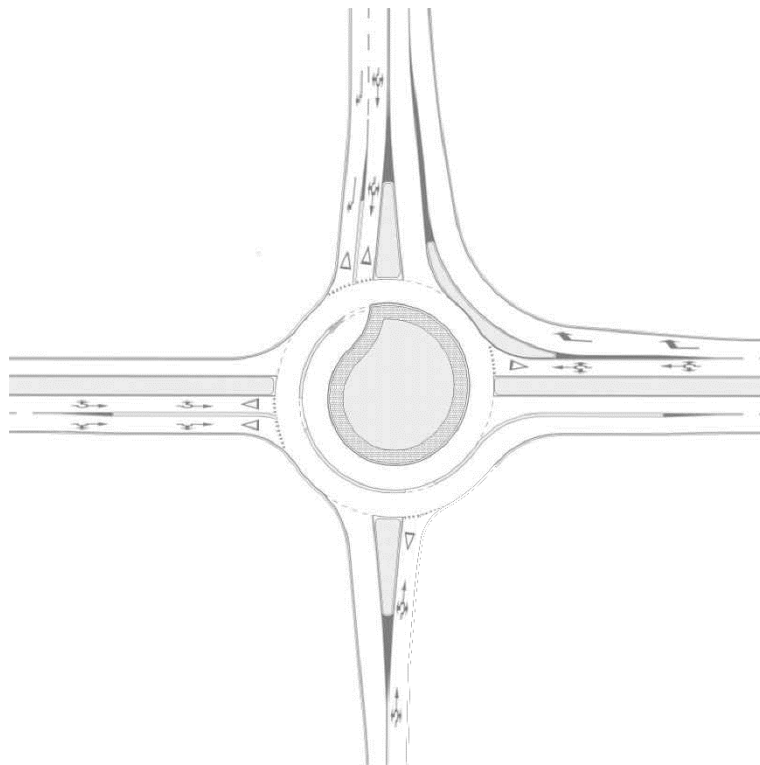
Slika 16: Izbira ustreznega tipa krožišča za jutranjo konico leta 2038



Slika 17: Izbira ustreznega tipa krožišča za popoldansko konico leta 2038

Kot lahko vidimo v obeh primerih ustrezata le kolenasti tip krožišča in tip "turbina".

Novo krožišče se nahaja na mestu obstoječega dvopasovnega krožišča. Krožišče je zaradi močnih prometnih tokov iz Kamnika na mengeško obvoznico proti Trzinu oz. Ljubljani oblikovano kot turbo krožno križišče kolenastega tipa, z dodatnim pasom za desne zavijalce, t.i. "by-passom" v smeri Kamnika (v nadaljevanju turbo krožišče)



Slika 18: Izbran kolenasti tip turbo krožišča (povzeto po TSC 02.XXX:2015 KROŽNA KRIŽIŠČA S SPIRALNIM POTEKOM KROŽNEGA VOZIŠČA – TURBO KROŽNA KRIŽIŠČA)

Zunanji premer krožišča je 80 m, širina enega krožnega voznega pasu skupaj z robnim pasom je 6 m z vmesnim delineatorjem med pasovoma. Zunanji premer ozelenjenega sredinskega otoka je 58 m, pri čemer je ta otok zaradi spiralne zasnove krožišča oblikovan kapljično. Krožišče ima 4 dvosmerne priključne krake:

- severni krak Kamniške ceste (krak A) – z dvopasovnim uvozom in enopasovnim izvozom ter izvozom "bypassa",
- vzhodni krak obvoznice (krak B) – z enopasovnim uvozom ter dodatnim pasom za desne zavijalce in dvopasovnim izvozom,
- južni krak Kamniške ceste (krak C) – z enopasovnim uvozom in enopasovnim izvozom,
- zahodni krak obvoznice (krak D) – z dvopasovnim uvozom in enopasovnim izvozom.

Uvozni izvozni radiji v in iz krožnega križišča so prilagojeni merodajnemu vozilu, ki ga predstavlja vlačilec s prikolico (minimalni uvozni oz. izvozni radij je 15 m). Zaradi nove zasnove krožišča je potrebna tudi rekonstrukcija kraka A in B, med katerima se uredi pas za desne zavijalce, prav tako je na kraku B potreben dodaten pas na izvozu dolžine 150 m.

Tehnični elementi zasnovanega turbo krožišča ustrezajo prevoznosti merodajnega vozila, to je vlačilec s prikolico (dolžine 16,50 m):

- vrsta ceste: glavna cesta
- funkcija ceste: povezovalna cesta
- teren: ravninski
- projektna hitrost: prevoznost

Uporabljeni in minimalni dopustni elementi krožišča so prikazani v spodnji tabeli.

Preglednica 16: Elementi turbo krožišča

TURBO KROŽIŠČE KAMNIŠKA	UPORABLJENI ELEMENTI
Zunanji premer	$D = 82-84 \text{ m}$
Notranji polmer	$R = 29 \text{ m}$
Širina posameznega krožnega pasu	$\check{S} = 5,50 \text{ m}$
Širina robnega pasu	$\check{S} = 0,50 \text{ m}$
Prečni nagib krožnega voznega pasu	$Q_{\max} = 1,50 \%$
Velikost uvoznega radija	15-20 m
Velikost izvoznega radija	25 m

5 ANALIZA Z ANALITIČNIM MODELOM

5.1 Splošno

(povzeto po TSC 02.XXX:2015 KROŽNA KRIŽIŠČA S SPIRALNIM POTEKOM KROŽNEGA VOZIŠČA – TURBO KROŽNA KRIŽIŠČA)

Poznamo dve vrsti analitičnih modelov, od katerih prva temelji na teoriji prometnega toka ob predpostavki, da je kapaciteta uvoza odvisna od jakosti krožečega prometnega toka in možnega konfliktnega toka. Druga pa temelji na teoriji časovnih praznin v prometnem toku. V tem primeru gre za opazovanje interakcije med dvema prometnima tokovima. Kapaciteta uvoza se v tem primeru določa na osnovi razpoložljivih časovnih vrzeli v krožečem prometnem toku in izkoriščenosti le-teh s strani uvoznega toka. Parametri, ki določajo to interakcijo, so minimalna praznina v krožečem toku ("headway"), kritična časovna praznina, ki jo voznik sprejme ("gap time") ter povprečen čas čakanja na uvozu.

Kvalitativno merilo, ki kaže uspešnost delovanja krožišča, se imenuje nivo uslug (LOS – level of service). Ta kriterij temelji na HCM metodologiji in je povsem uveljavljen v prometni inženirski praksi tudi v slovenskem prostoru. Za uspešnost je pomemben kriterij čakalnih časov, ki je izražen preko zamud. Slednje definirajo nivo uslug posameznih smeri. Mejna vrednost nivoja uslug je $NU = E$, ki predstavlja prekoračitev kriterija.

Preglednica 17: Mejne vrednosti kriterijev za določitev nivoja uslug glede na zamude

Nivo uslug	zamude (s/vozilo)
A	$d \leq 10$
B	$10 < d \leq 15$
C	$15 < d \leq 25$
D	$25 < d \leq 35$
E	$35 < d \leq 50$
F	$50 < d$

Nivo uslug A opisuje delovanje z malo zamude (manj kot 10 s/vozilo) v primerih odlične progresije in ko večina vozil krožišča prevozi brez čakanja in ustavljanja.

Nivo uslug B se pojavlja pri dobri progresiji s tem, da se ustavi večje število vozil kot pri nivoju uslug A, kar povzroča večje zamude (od 10 do 15 s/vozilo).

Nivo uslug C ima večje zamude (od 15 do 25 s/vozilo) zaradi slabše progresije. Na tem nivoju se za posamezne smeri vožnje lahko pojavijo težave z velikim številom zamud. Veliko vozil vseeno prečka krožišče brez zamude.

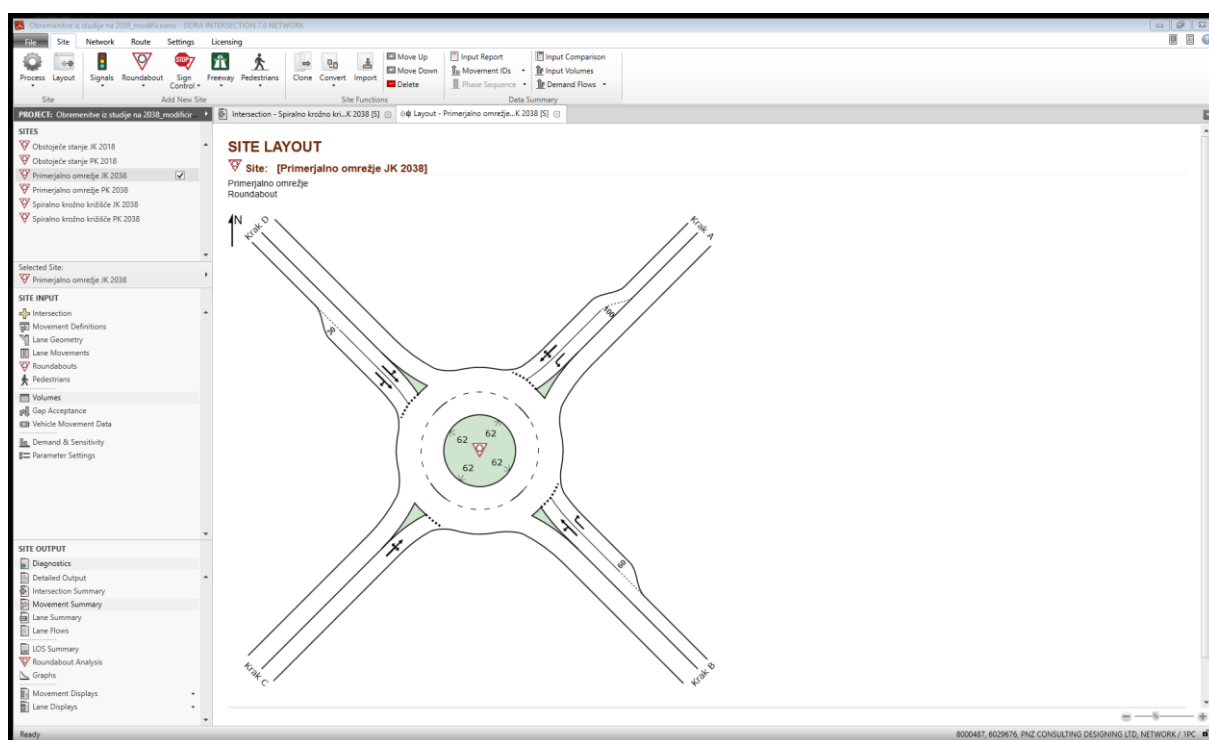
Nivo uslug D je že podvržen prometnim zastojem. Daljše zamude (od 25 do 35 s/vozilo) se pojavijo zaradi nezaželene progresije, dolgih časov ciklov in visokih razmerij v/c . Veliko vozil stoji, število vozil, ki prečka krožišče pa upada.

Nivo uslug E prikazuje stanje ob razmeroma visokih zamudah (od 35 do 50 s/vozilo), ki kažejo na slabo progresijo in visoka razmerja v/c. Zastoji na posameznih smereh so pogosti.

Nivo uslug F se pojavlja ob zelo velikih zamudah (nad 50 s/vozilo). Ta nivo ni zaželen za večino voznikov in se pojavlja ob prenasičenosti oziroma, ko prometni tokovi presegajo kapaciteto posamezne smeri vožnje. Pojavlja se tudi ob zelo visokih razmerjih stopnje nasičenosti (V/C ali razmerje med volumnom (V) in kapaciteto (C)) z mnogimi zastoji.

5.2 Sidra Intersection

Programski paket SIDRA INTERSECTION (Signalised & Unsignalised Intersection Design and Research Aid) je razvilo avstralsko podjetje Akcelik and Associates Pty Ltd. Prva različica je izšla leta 1984, aprila leta 2018 pa je izšla najnovejša različica SIDRA INTERSECTION 8. Sidra je napredno analitično programsko orodje, ki se uporablja za analizo semaforiziranih, nesemaforiziranih in krožnih križišč, prehodov za pešce, priključkov in cestnih omrežij. Osnovni računski model je zasnovan na metodologiji HCM, program pa uporablja analitični prometni model z metodo iteracijskega približevanja. Program omogoča izračun nivoja uslug, zamude, dolžine kolon, stopnjo nasičenja, stroške ... (povzeto po SIDRA INTERSECTION 7 user guide, 2017)



Slika 19: Uporabniški vmesnik SIDRA INTERSECTION 7 (primerjalno omrežje)

Za potrebe analize krožišča bo v tej nalogi uporabljena različica SIDRA INTERSECTION 7 in metodologija HCM 6, ki jo za prometne analize in dimenzioniranje zahtevnejših krožišč predpisuje

Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo. Vsi izračuni in pomembnejši parametri (nivo uslug, zamude vozil, zasičenost, zaježitvene dolžine vozil, število ustavljanj in hitrost) so prikazani grafično, kar omogoča enostavno razumevanje rezultatov analiz. Za izračun prepustnosti in dimenzioniranje priključkov, križišč ter krožišč so pomembni naslednji parametri prometnega toka:

- **FLows:** Prometni tok določen za posamezen časovni presek,
- **LOS (Level of Service):** Nivo uslug (NU) v odvisnosti od zamud,
- **QUEUES:** Število vozil v koloni in s tem zaježitvena dolžina, ki jo omenjena vozila povzročajo,
- **DELAY:** Povprečna zamuda na vozilo v posamezni smeri izražena v sekundah na vozilo in
- **DEGREE OF SATURATION:** Stopnja nasičenosti (V/C) ali razmerje med volumnom (V) in kapaciteto (C).

Za uspešnost delovanja priključka oziroma križišča sta pomembna kriterij prometnih obremenitev (kapaciteta), ki je izražen preko stopnje nasičenosti V/C in kriterij čakalnih časov, ki je izražen preko zamud. Slednje definirajo nivo uslug posameznih smeri. Najnižja sprejemljiva vrednost nivoja uslug kot ga določa **12. člen Pravilnika o projektiranju cest (Ur.l. št. 91/2005)** (v nadaljevanju pravilnik) znaša:

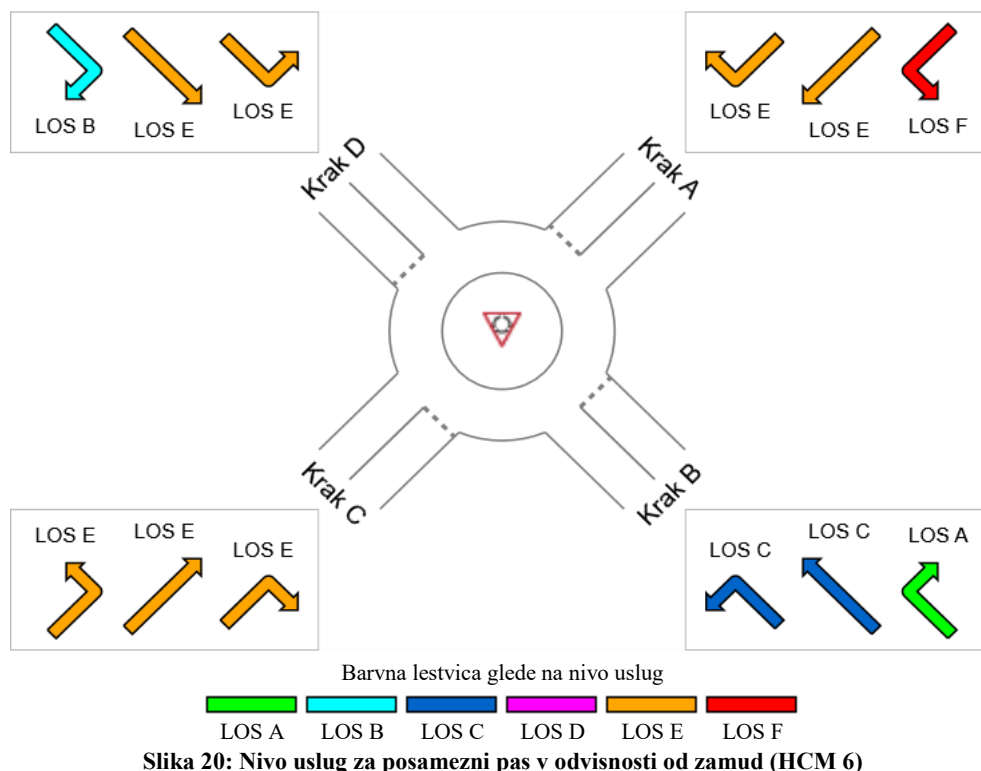
- **NU=E**, ki je predpisan za rekonstrukcije priključkov in križišč na povezovalnih (GC, RC), zbirnih (RC, LC) in dostopnih cestah (LC, LP).

5.2.1 Analiza primerjalnega omrežja za leto 2038

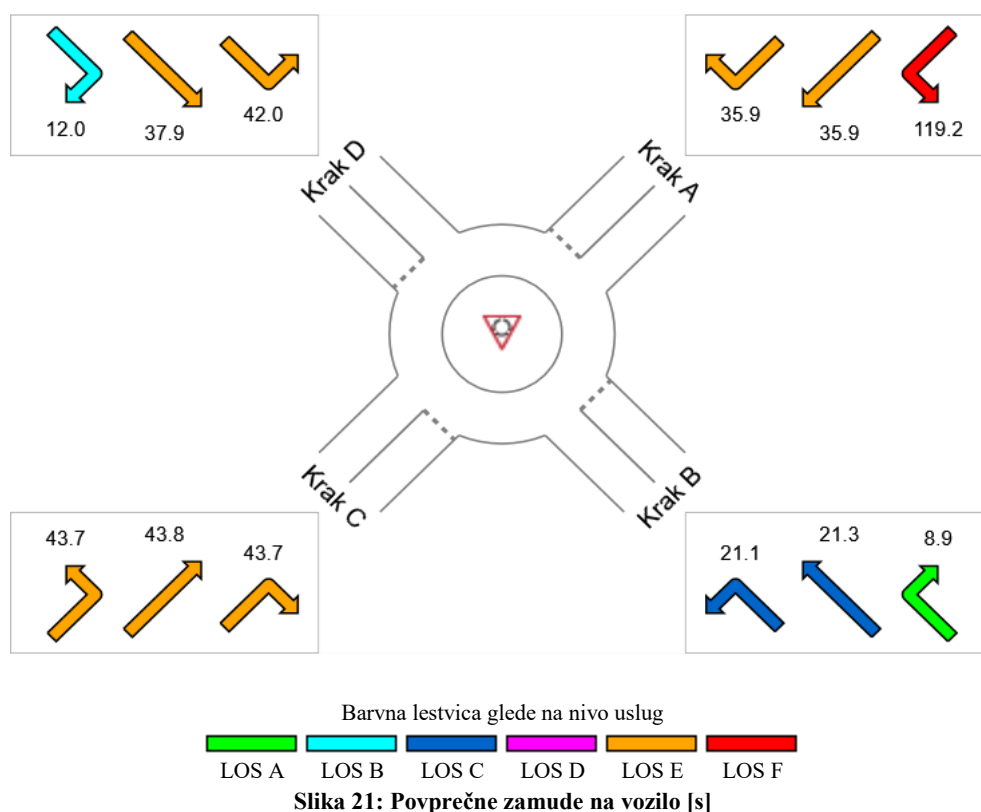
V tem poglavju bo predstavljena analiza primerjalnega omrežja s prometnimi obremenitvami, ki so predvidene za leto 2038. Primerjalno omrežje predstavlja obstoječe stanje po dograditvi četrtega priključnega kraka krožišča, torej štirikrako krožišče z dvema krožnima voznima pasovoma brez drugih sprememb geometrije. To stanje je prikazano na zgornji sliki med pripravo modela v programu SIDRA INTESECTION.

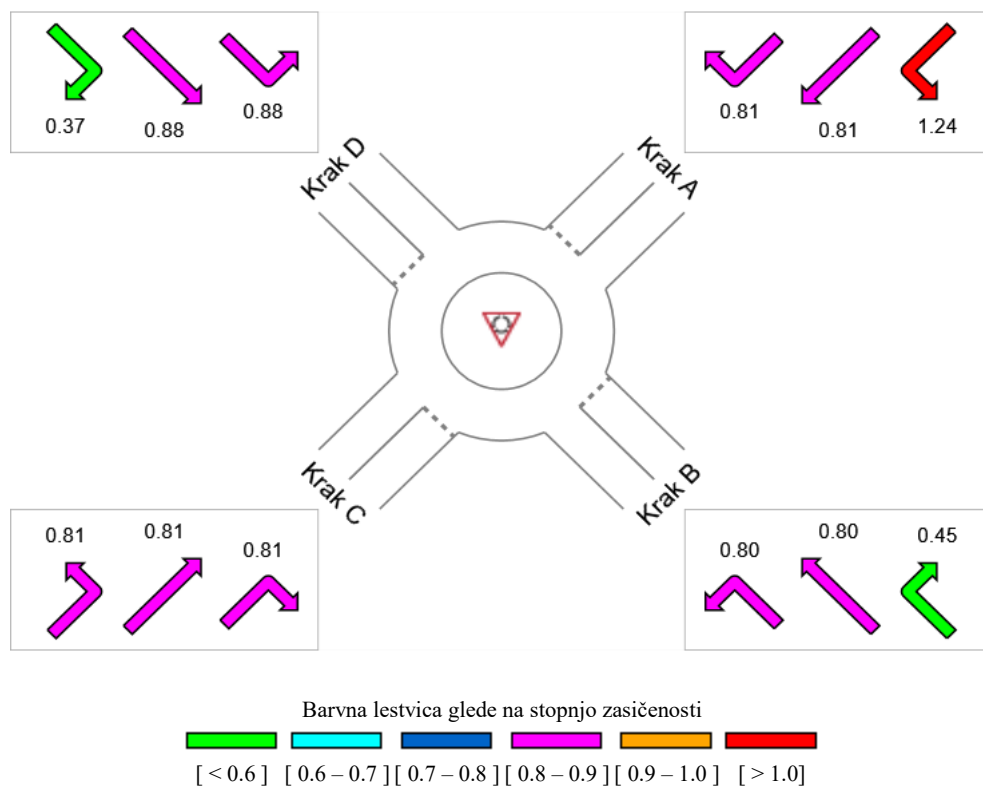
Izračun nam pokaže, da so povprečne zamude celotnega krožišča v jutranji konici 50,9 s, v popoldanski konici pa samo 6,4 s. V nadaljevanju bomo obravnavali samo jutranjo konico, ki predstavlja merodajno konico za odločitev o izbiri oblike krožišča na koncu planske dobe.

Zamude vozil se razlikujejo po krakih glede na število vozil in deleže zavijalcev. Na krakih B, C in D se gibljejo od 16,7 s do 43,7 s. Na kraku A pa se pojavljajo nesprejemljive zamude v višini do 105,6 s zaradi prevladujočega toka levih zavijalcev, ki se težko vključujejo v promet v krožišču zaradi vozil, ki vozijo v njem. Zamude vozil v višini 105,6 s po kriteriju HCM 6 predstavljajo nivo uslug $NU = F$. Posledično je podobno z dolžinami najdaljših kolon, ki so na krakih B, C in D dolge med 46 in 141 m, na uvozu iz smeri Kamnika pa kar 385 m.

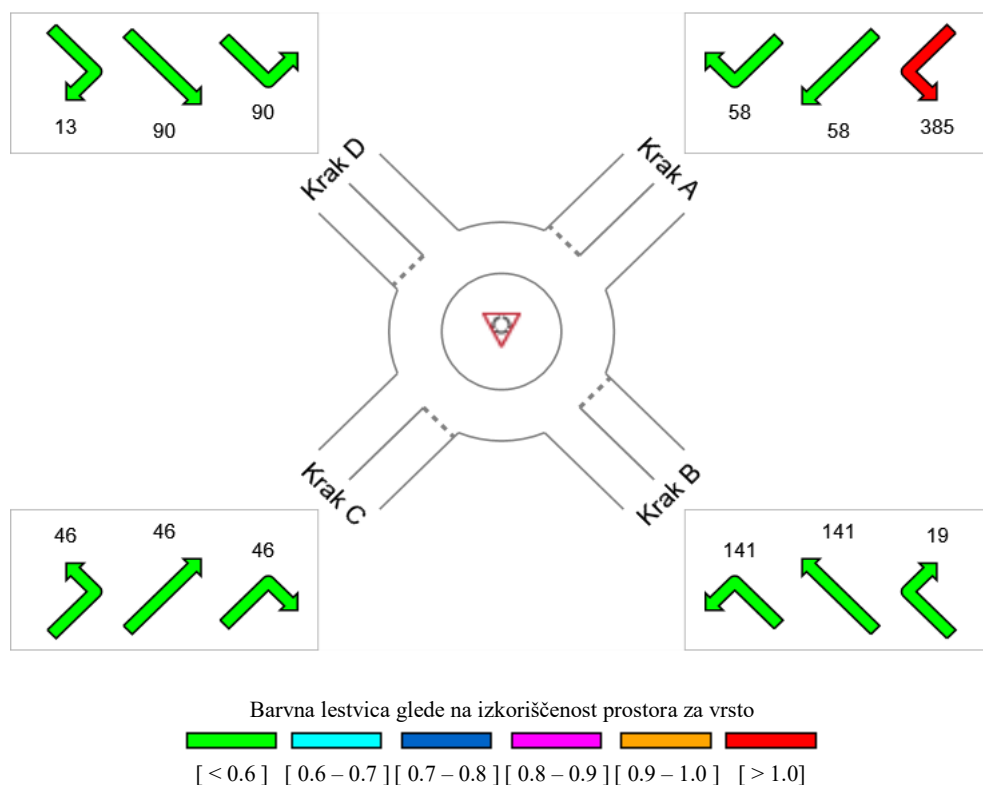


Kot lahko vidimo je nivo uslug glede na povprečne zamude na večini uvoznih pasov na še sprejemljivi ravni $NU = E$, levi uvozni pas na Kamniški cesti iz smeri Kamnika pa je obarvan rdeče, kar pomeni nivo uslug $NU = F$. Podobno je tudi za celotno krožišče, saj povprečne zamude znašajo 50,9 s, kar pomeni nivo uslug $NU = F$. Najboljše stanje po preteku planske dobe bi bilo še vedno na kraku B, kar je razumljivo, glede na to, da je mimo tega uvoza krožeči tok najšibkejši.

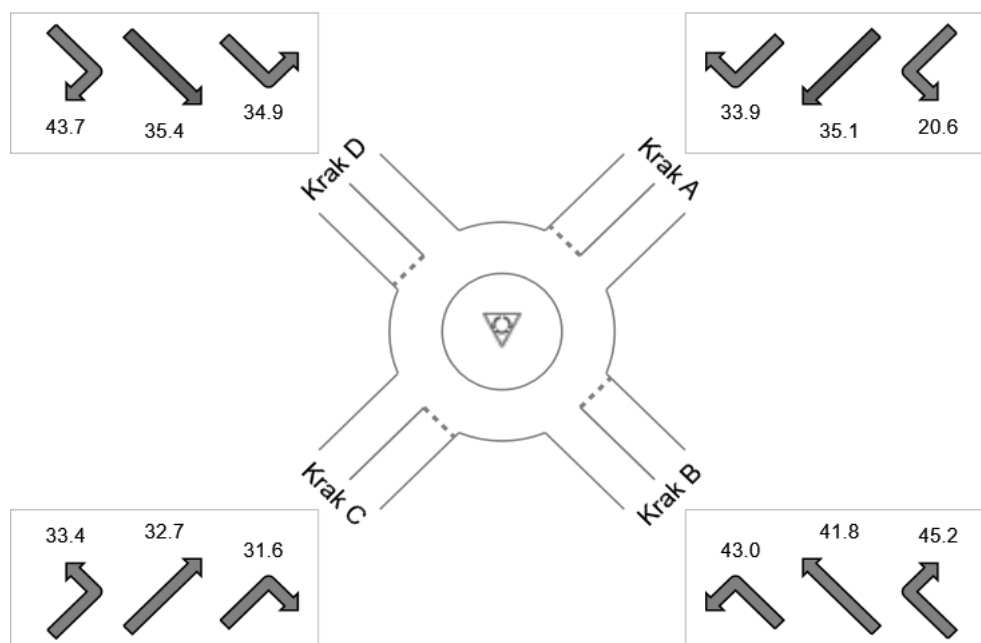
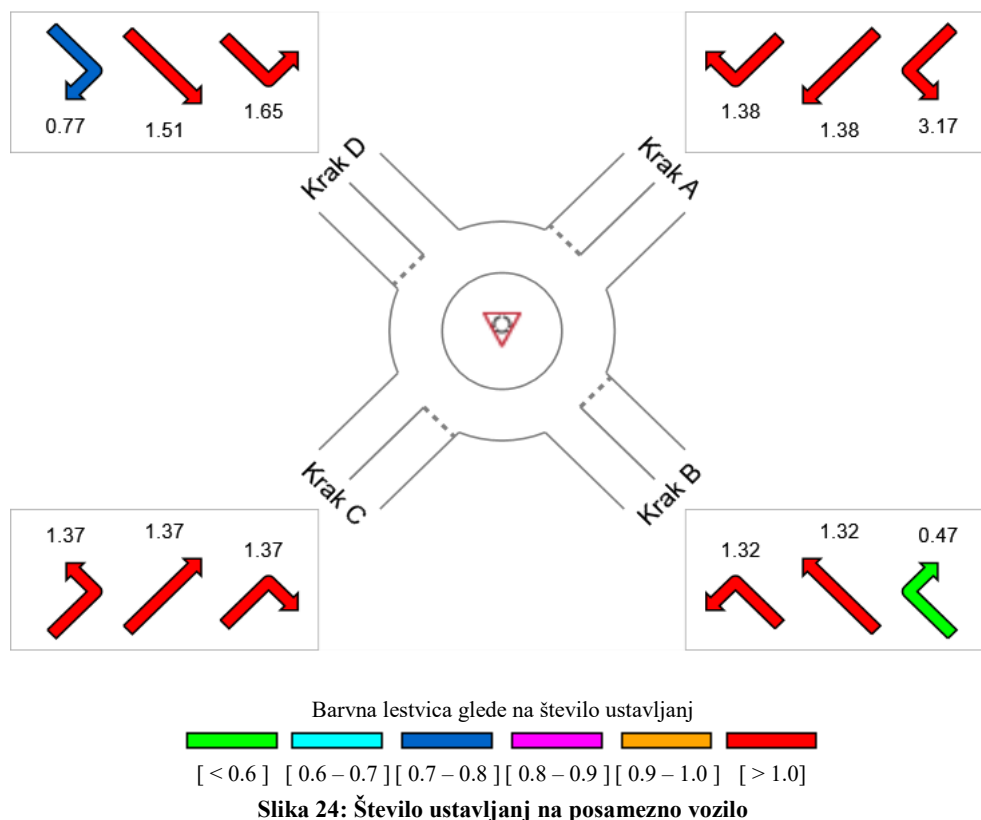




Slika 22: Stopnja zasičenosti - razmerje med dejanskim prometnim tokom in kapaciteto (v/c)



Slika 23: Dolžine kolon pri 95-odstotni percentili na posameznem voznem pasu



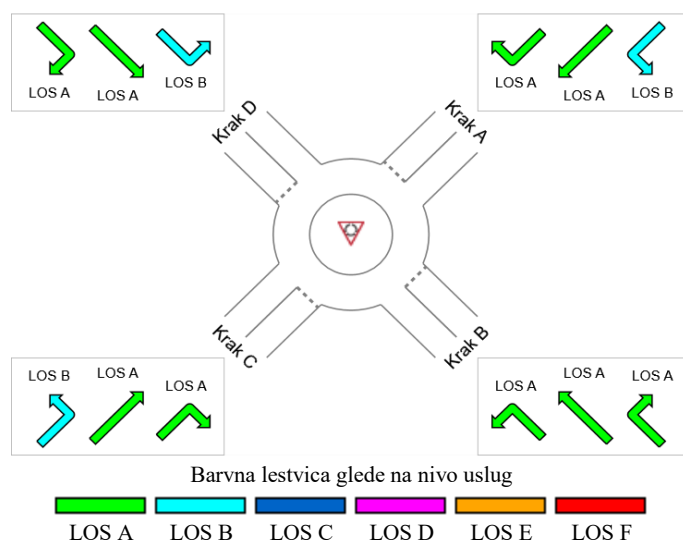
Preglednica 18: Kapacitetni parametri primerjalnega omrežja v jutranji konici 2038

Povzetek - primerjalno omrežje JK 2038									
Cesta	Smer	Tok [voz/h]	% TOV	Stopnja zasičenosti (v/c)	Povprečne zamude [s]	Raven uslug	Dolžina kolone [m]	Ustavljani/ vozilo	Povprečna hitrost [km/h]
Krak A									
7	L	837	4,3	1,242	119,2	LOS F	385,1	3,17	20,6
8	N	159	1,9	0,811	35,9	LOS E	58,2	1,38	35,1
9	D	5	0	0,811	35,9	LOS E	58,2	1,38	33,9
Skupaj		1001	3,9	1,242	105,6	LOS F	385,1	2,87	22
Krak B									
4	L	5	0	0,803	21,1	LOS C	141,3	1,32	43
5	N	754	10,6	0,803	21,3	LOS C	141,3	1,32	41,8
6	D	443	2,5	0,451	8,9	LOS A	19,1	0,47	45,2
Skupaj		1202	7,6	0,803	16,7	LOS C	141,3	1,01	42,9
Krak C									
1	L	231	0	0,81	43,7	LOS E	46,2	1,37	33,4
2	N	69	1,4	0,81	43,8	LOS E	46,2	1,37	32,7
3	D	5	0	0,81	43,7	LOS E	46,2	1,37	31,6
Skupaj		305	0,3	0,81	43,7	LOS E	46,2	1,37	33,2
Krak D									
10	L	5	0	0,876	42	LOS E	90,3	1,65	34,9
11	N	534	16,5	0,876	37,9	LOS E	90,3	1,51	35,4
12	D	116	0	0,367	12	LOS B	12,9	0,77	43,7
Skupaj		655	13,4	0,876	33,3	LOS D	90,3	1,38	36,6
Vsa vozila		3163	6,9	1,242	50,9	LOS F	385,1	1,71	31,3

V spodnji preglednici so povzeti rezultati analize s programom SIDRA INTERSECTION za popoldansko konico na koncu 20-letne planske dobe leta 2038. Rezultati analize so pokazali, da so kapacitetni parametri v popoldanski konici daleč pod kritično mejo, saj znaša najslabši nivo uslug NU = B, in sicer za leve zavijalce na krakih A, C in D. Povprečne zamude v nobenem primeru niso daljše kot 12,5 s, povprečno za celotno krožišče pa znašajo 6,4 s, kar pomeni nivo uslug NU = A.

Preglednica 19: Kapacitetni parametri primerjalnega omrežja v popoldanski konici 2038

Povzetek - primerjalno omrežje PK 2038									
Cesta	Smer	Tok [voz/h]	% TOV	Stopnja zasičenosti (v/c)	Povprečne zamude [s]	Raven uslug	Dolžina kolone [m]	Ustavljanj/ vozilo	Povprečna hitrost [km/h]
Krak A									
7	L	523	0,4	0,591	11,6	LOS B	32,9	0,96	47,9
8	N	76	9,7	0,591	5,8	LOS A	32,9	0,82	49,3
9	D	35	0	0,132	6,1	LOS A	4,1	0,7	49,8
Skupaj		634	1,5	0,591	10,6	LOS B	32,9	0,93	48,2
Krak B									
4	L	5	0	0,544	9	LOS A	30,5	0,44	51,9
5	N	541	12,1	0,544	3,4	LOS A	30,5	0,44	51,5
6	D	896	0,2	0,692	4,4	LOS A	49,5	0,62	50
Skupaj		1442	4,7	0,692	4	LOS A	49,5	0,55	50,6
Krak C									
1	L	125	0	0,37	10,7	LOS B	11,9	0,81	47
2	N	109	5,8	0,37	5	LOS A	11,9	0,81	46,4
3	D	5	0	0,37	5,7	LOS A	11,9	0,81	45,2
Skupaj		240	2,6	0,37	8	LOS A	11,9	0,81	46,7
Krak D									
10	L	5	0	0,671	12,5	LOS B	49,4	0,95	50,6
11	N	596	14,7	0,671	7	LOS A	49,4	0,95	50,2
12	D	204	0	0,301	5,8	LOS A	10,8	0,76	49,8
Skupaj		805	10,8	0,671	6,8	LOS A	49,4	0,9	50,1
Vsa vozila		3121	5,5	0,692	6,4	LOS A	49,5	0,74	49,6

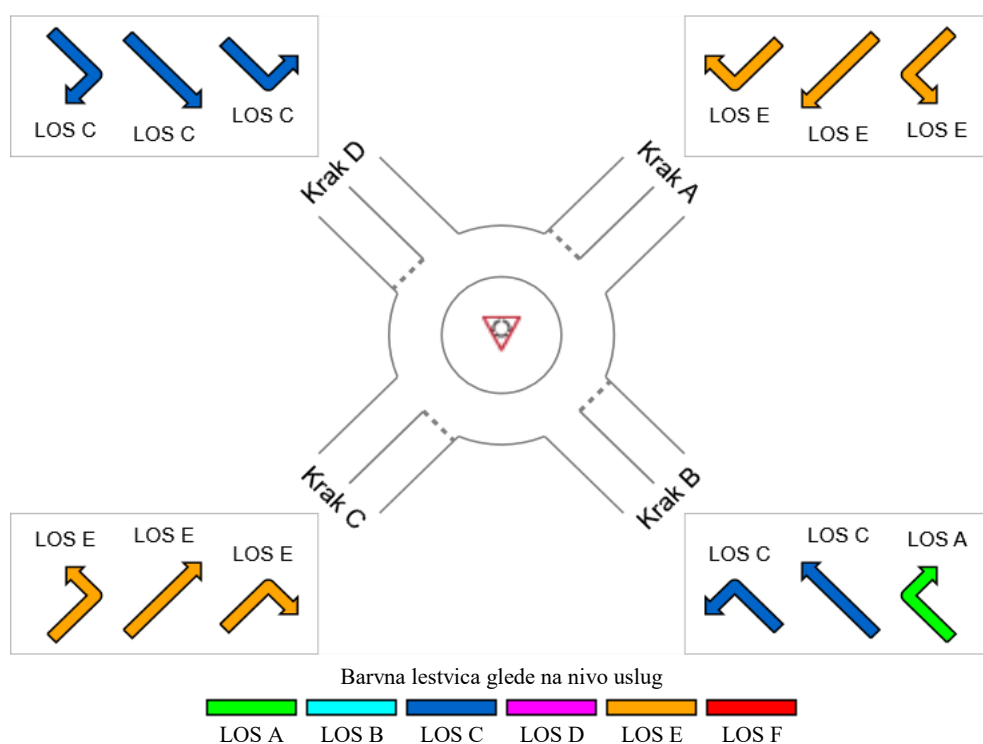


Slika 26: Nivo uslug v odvisnosti od zamud (HCM 6) za popoldansko konico

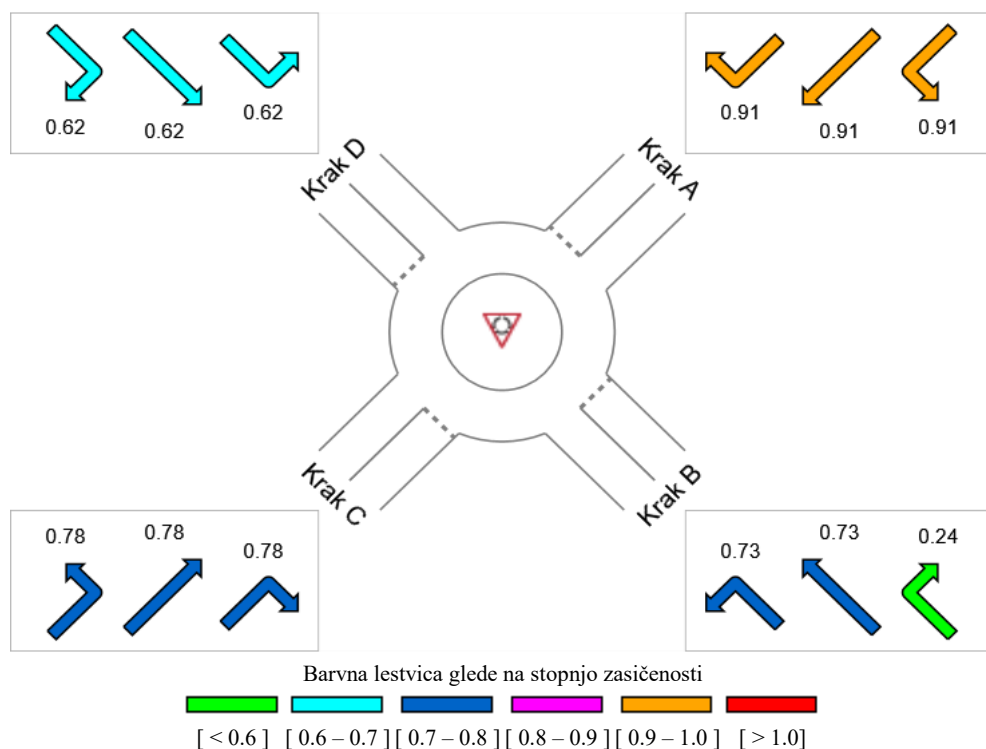
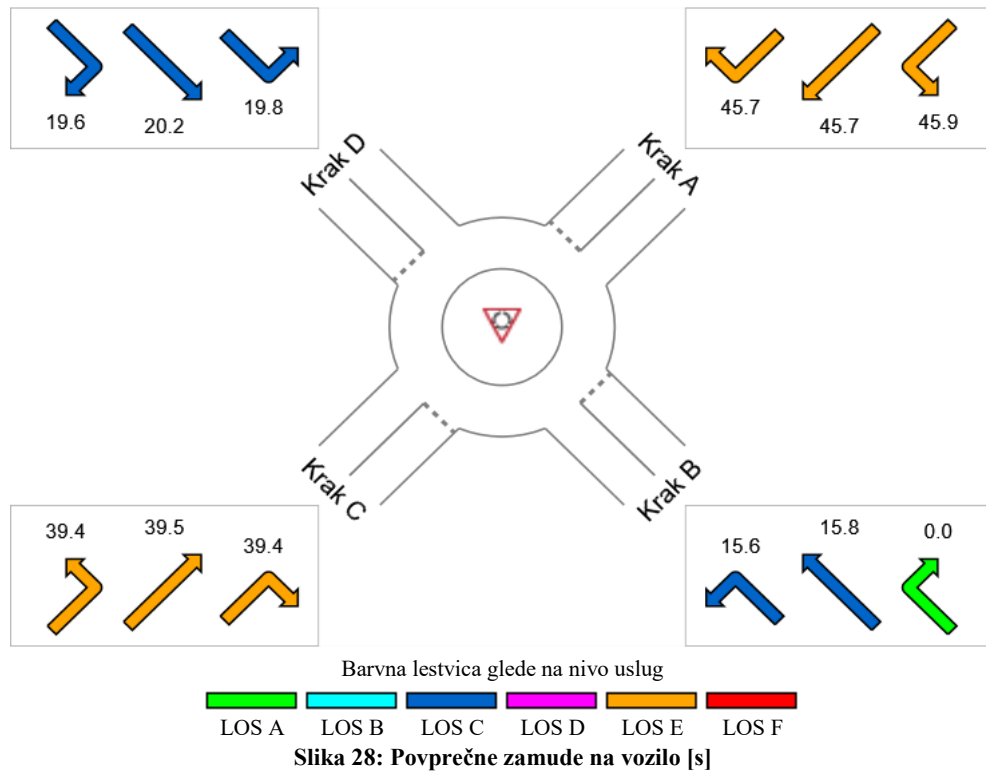
5.2.2 Analiza predlagane rešitve

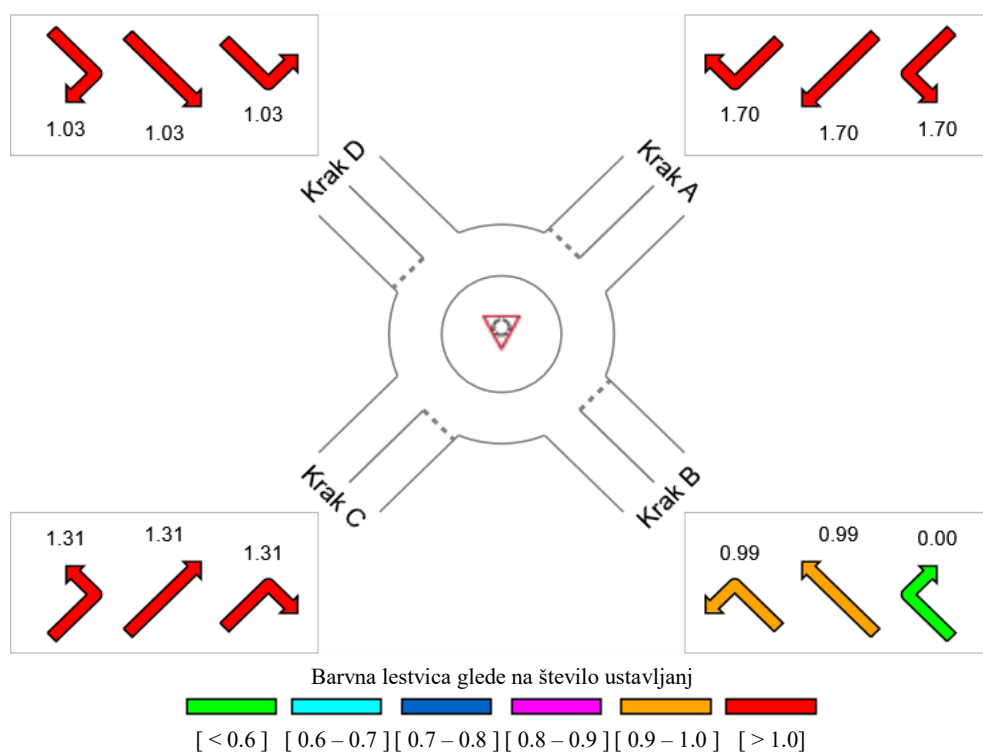
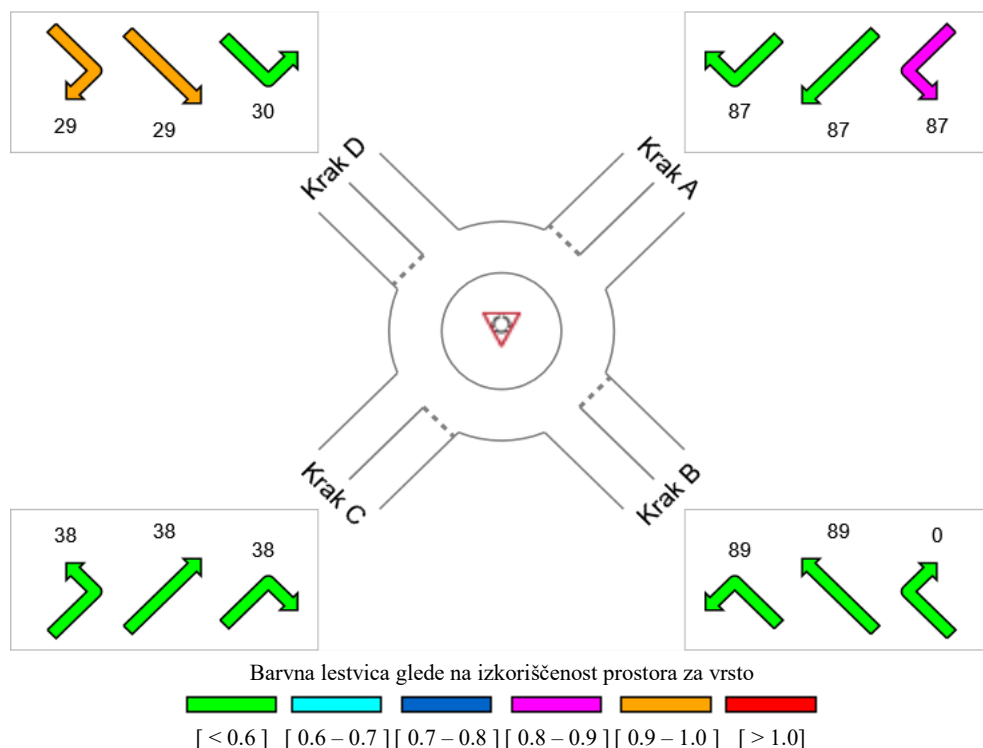
Analiza predlagane rešitve pokaže, da so povprečne zamude turbo krožišča na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 v jutranji konici 26,3 s, v popoldanski konici pa 9,2 s.

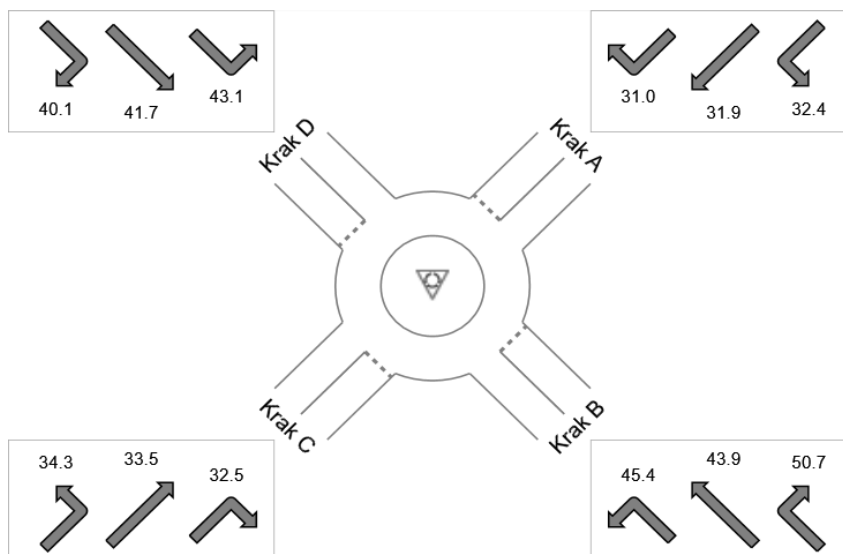
V tem primeru so zamude po uvozih razporejene bolj enakomerno, saj so najkrajše 10,0 s, najdaljše pa 45,8 s. Najslabši nivo uslug glede na zamude tako znaša $NU = E$, povprečno za celotno turbo krožišče pa $NU = D$, s čimer zadostimo zahtevi iz pravilnika. Podobno kot z zamudami je tudi z dolžinami kolon, ki so v tem primeru dolge med 38,0 in 89,4 m.



Slika 27: Nivo uslug za posamezni pas v odvisnosti od zamud (HCM 6)







Slika 32: Povprečna vozna hitrost z vključenimi vsemi zamudami [km/h]

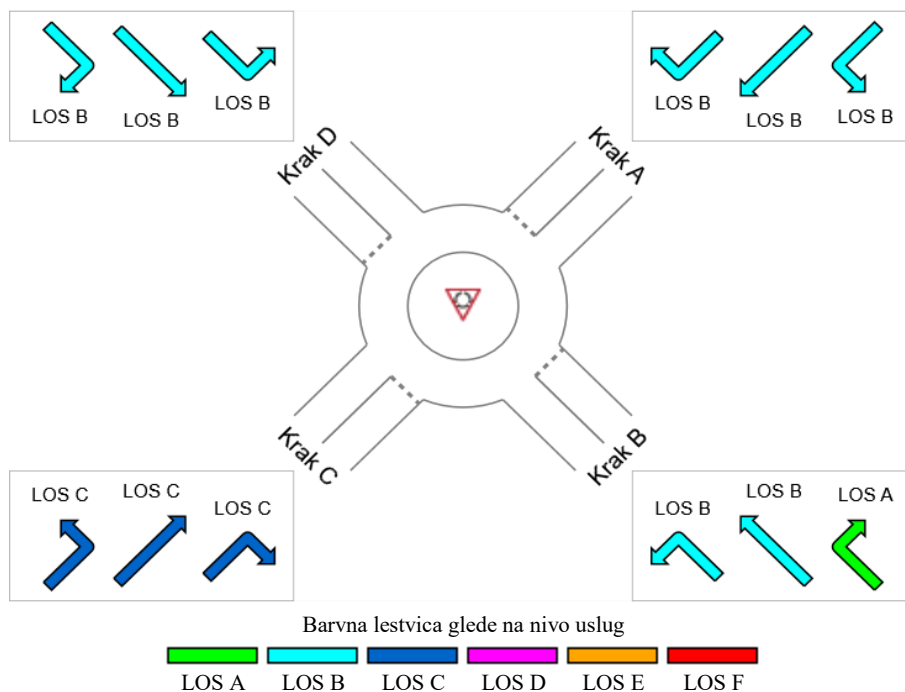
Preglednica 20: Kapacitetni parametri turbo krožnega križišča v jutranji konici 2038

Povzetek - turbo krožno križišče JK 2038									
Cesta	Smer	Tok [voz/h]	% TOV	Stopnja zasičenosti (v/c)	Povprečne zamude [s]	Raven uslug	Dolžina kolone [m]	Ustavljanj/ vozilo	Povprečna hitrost [km/h]
Krak A									
7	L	837	4,3	0,907	45,9	LOS E	87,5	1,7	32,4
8	N	159	1,9	0,907	45,7	LOS E	87,5	1,7	31,9
9	D	5	0	0,907	45,7	LOS E	87,5	1,7	31
Skupaj		1001	3,9	0,907	45,8	LOS E	87,8	1,7	32,3
Krak B									
4	L	5	0	0,729	15,6	LOS C	89,4	0,99	45,4
5	N	754	10,6	0,729	15,8	LOS C	89,4	0,99	43,9
6	D	443	2,5	0,239	0	LOS A	0	0	50,7
Skupaj		1202	7,6	0,729	10	LOS A	89,4	0,62	46,1
Krak C									
1	L	231	0	0,783	39,4	LOS E	38	1,31	34,3
2	N	69	1,4	0,783	39,5	LOS E	38	1,31	33,5
3	D	5	0	0,783	39,4	LOS E	38	1,31	32,5
Skupaj		305	0,3	0,783	39,5	LOS E	38	1,31	34,1
Krak D									
10	L	5	0	0,616	19,8	LOS C	29,5	1,03	43,1
11	N	534	16,5	0,616	20,2	LOS C	29	1,03	41,7
12	D	116	0	0,616	19,6	LOS C	29	1,03	40,1
Skupaj		655	13,4	0,616	20,1	LOS C	29,5	1,03	41,5
Vsa vozila		3163	6,9	0,907	26,3	LOS D	89,4	1,11	38,5

Tudi v tem primeru so kapacitetni parametri izračunani za popoldansko prometno konico pod kritično mejo. Povprečne zamude za celotno turbo krožišče znašajo 9,2 s, kar pomeni nivo uslug $NU = A$.

Preglednica 21: Kapacitetni parametri turbo krožnega križišča v popoldanski konici 2038

Povzetek - turbo krožno križišče PK 2038									
Cesta	Smer	Tok [voz/h]	% TOV	Stopnja zasičenosti (v/c)	Povprečne zamude [s]	Raven uslug	Dolžina kolone [m]	Ustavljanj/ vozilo	Povprečna hitrost [km/h]
Krak A									
7	L	523	0,4	0,424	10,4	LOS B	16,1	0,76	45,3
8	N	76	9,7	0,424	10,6	LOS B	16,2	0,76	44,4
9	D	35	0	0,424	10,4	LOS B	16,2	0,76	42,7
Skupaj		634	1,5	0,424	10,4	LOS B	16,2	0,76	45
Krak B									
4	L	5	0	0,634	11,7	LOS B	49,4	0,59	47,5
5	N	541	12,1	0,634	11,9	LOS B	49,4	0,59	45,9
6	D	896	0,2	0,634	2	LOS A	49,4	0,1	49,3
Skupaj		1442	4,7	0,634	5,8	LOS A	49,4	0,29	47,9
Krak C									
1	L	125	0	0,49	16,5	LOS C	17,3	0,92	43,3
2	N	109	5,8	0,49	16,8	LOS C	17,3	0,92	42
3	D	5	0	0,49	16,5	LOS C	17,3	0,92	40,4
Skupaj		240	2,6	0,49	16,6	LOS C	17,3	0,92	42,6
Krak D									
10	L	5	0	0,517	11,9	LOS B	26,2	0,85	47,4
11	N	596	14,7	0,517	12,2	LOS B	25,7	0,85	45,7
12	D	204	0	0,517	11,7	LOS B	25,7	0,85	43,7
Skupaj		805	10,8	0,517	12,1	LOS B	26,2	0,85	45,2
Vsa vozila		3121	5,5	0,634	9,2	LOS A	49,4	0,58	46,1



Slika 33: Nivo uslug v odvisnosti od zamud (HCM 6) za popoldansko konico

5.3 Modificirana Bovyjeva enačba

V tem delu bo predstavljen in uporabljen analitični model za analizo prepustne sposobnosti turbo krožišča, ki temelji na modificirani Bovyjevi enačbi, poznamo pa tudi modificirano Haringovo enačbo. Obe modifikaciji enačb temeljita na osnovi eksperimentov, ki so bili izvedeni v realnih razmerah na Nizozemskem.

5.3.1 Splošno

((povzeto po TSC 02.XXX:2015 KROŽNA KRIŽIŠČA S SPIRALNIM POTEKOM KROŽNEGA VOZIŠČA – TURBO KROŽNA KRIŽIŠČA in Perme, 2013))

Prvotna Bovyjeva enačba je sledeča:

$$L_e = \frac{(1500 - \frac{8}{9} * (\beta * M_K + \alpha * M_A))}{\gamma}$$

pri tem je:

L_e kapaciteta uvoza [EOV/h]

M_K jakost krožečega prometnega toka [EOV/h]

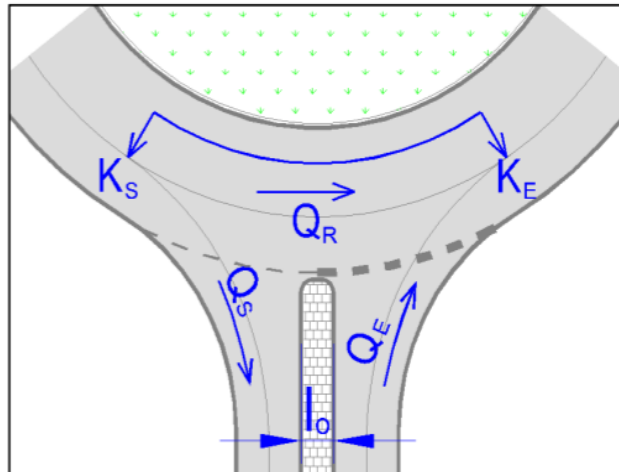
M_A jakost prometnega toka na izvozu [EOV/h]

α faktor uvoznega prometnega toka v primerjavi z izvoznim [-]

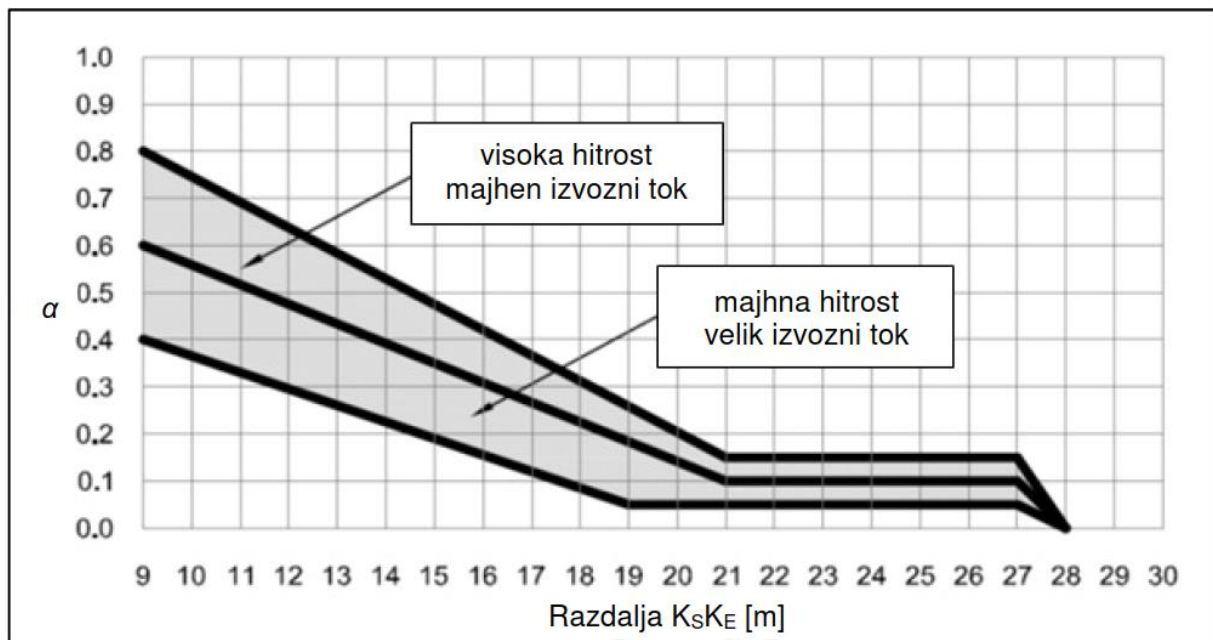
β faktor števila voznih pasov v krožnem vozišču [-]

γ faktor števila voznih pasov na uvozih [-]

Faktor α je odvisen od geometrije krožnega križišča, in sicer od dolžine krožnega loka $K_S K_E$. Pri tem je K_S točka, kjer se izvozni tok odcepi od krožečega prometnega toka ter K_E točka, kjer se uvozni tok združuje s krožečim prometnim tokom.



Slika 34: Prikaz prometnih tokov za izračun kapacitete ter razdalje $K_S K_E$ (Perme, 2013: str. 5)



Slika 35: Definicija faktorja α (Perme, 2013: str.6)

Faktor β je odvisen od števila krožnih vozniških pasov. Njegove vrednosti so naslednje:

- 1-pasovno krožno križišče: $0,9 \leq \beta \leq 1$,
- 2-pasovno krožno križišče: $0,6 \leq \beta \leq 0,8$,
- 3-pasovno krožno križišče: $0,5 \leq \beta \leq 0,6$.

Faktor γ pa je odvisen od števila pasov na uvozu in znaša za:

- 1-pasovni uvoz: $\gamma = 1$,
- 2-pasovni uvoz: $0,6 \leq \gamma \leq 0,7$,
- 3-pasovni uvoz: $\gamma = 0,5$.

Modificirana Bovyjeva enačba za izračun prepustne sposobnosti večpasovnih krožnih križišč se glasi:

$$C_n = 1550 - \frac{8}{9} * (\beta * (q_x + q_y + q_z) + \\ + \alpha_{nru}(f_k * q_k + f_1 * q_1 + q_m) + \\ + (\alpha_{nri}((1 - f_k) * q + (1 - f_1) * q_1))$$

kjer je:

C_n	kapaciteta uvoza [EOV/h]
β	faktor števila voznih pasov na krožnem vozišču [-]
$q_x + q_y + q_z$	jakost krožnih prometnih tokov pred uvozom v krožno križišče [EOV/h]
α_{nru}	faktor zmanjšanja vpliva izvoznega prometnega toka (vpliv zunanjega izvoznega toka na desni/levi uvozni prometni tok) [-]
α_{nri}	faktor zmanjšanja vpliva izvoznega prometnega toka (vpliv notranjega izvoznega toka na desni/levi uvozni prometni tok) [-]

Osnovne značilnosti modificirane Bovyjeve metode so:

- kapaciteta za vsak prometni pas na uvozu se računa posebej,
- kapaciteta posameznega uvoza je vsota kapacitet posameznih prometnih pasov na tem uvozu in
- povečanje maksimalne teoretične kapacitete prometnega pasu na uvozu z 1500 voz/h na 1550 voz/h.

Prepustne sposobnosti levega pasu na uvozu v dvopasovno turbo krožno križišče ni možno računati po linearni porazdelitvi intenzitete!

Porazdelitev prometa v turbo krožnem križišču je bolj kompleksna kot pri standardnem dvopasovnem krožnem križišču, zato je potrebno osnovno Bovyjevo enačbo, če jo želimo uporabljati za turbo krožno križišče, modificirati. Na Nizozemskem je izbrana prav Bovyjeva enačba za izračun prepustne sposobnosti turbo krožnih križišč zaradi dveh vzrokov:

- vsebuje vpliv "levo zavijajočega prometnega toka",
- omogoča enostavno modeliranje porazdelitve prometa po prometnih pasovih.

Pri turbo krožnem križišču je zaradi preprečene menjave krožnega voznega pasu porazdelitev prometa jasno definirana, zato sta korekcijska faktorja vpliva izvoznega prometnega toka "a" (v izvorni enačbi α) in vpliva krožečega prometnega toka različna za vsak krožni vozni pas v krožnem vozišču.

Dr. L.G.H. Fortuijn, izumitelj turbo krožnega križišča, je enačbo modificiral tako, da je parameter β razdelil na dva parametra, in sicer b_1 za notranji krožni vozni pas ter na b_2 , ki velja za zunanji krožni vozni pas. Po tej metodi lahko vsak vozni pas ločeno upoštevamo v izračunu, v odvisnosti od porazdelitve jakosti po pasovih pa lahko imata b_1 in b_2 minimalno (b_{min}) oz. maksimalno (b_{max}) vrednost.

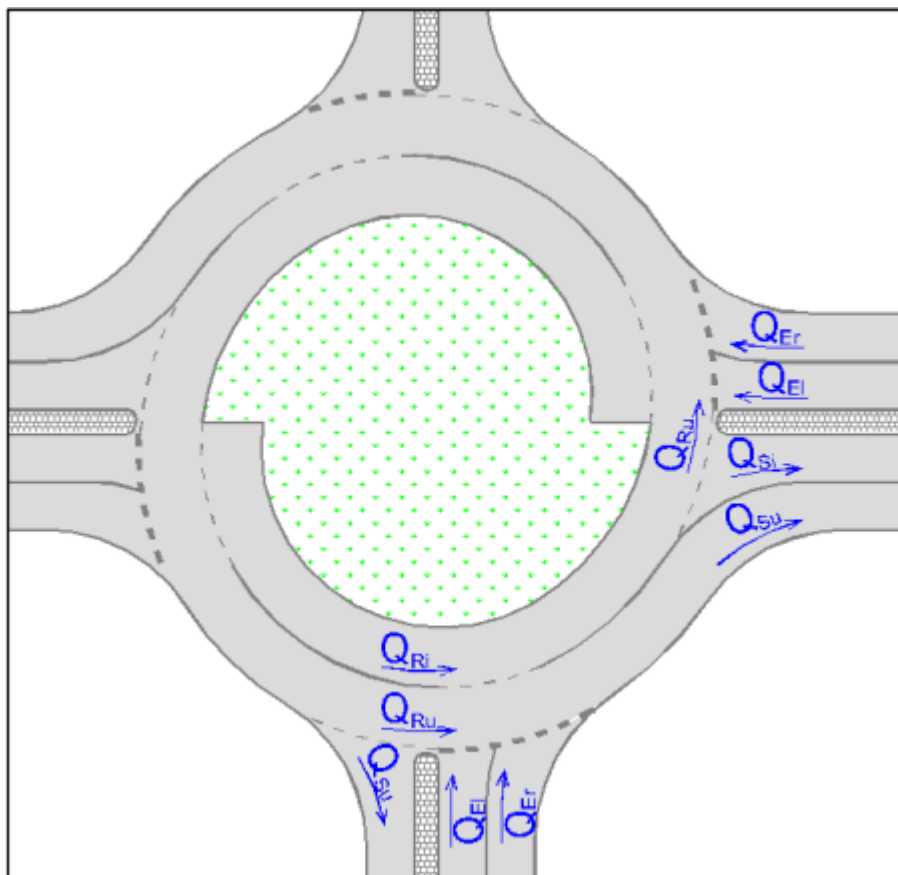
Modificirana Bovyjeva enačba za izračun prepustne sposobnosti turbo krožnega križišča je ob upoštevanju tega, naslednja:

$$C_{E,1} = C_0 - b_m \cdot Q_{R,m} - b_M \cdot Q_{R,M} - a_1 \cdot Q_s$$

$$C_{E,2}^* = C_{02}^* - b_2^* \cdot Q_{RZ}^* - a_{2,1}^* \cdot Q_{SN}^*$$

Pri tem je:

indeks 1	levi prometni pas na uvozu
indeks 2	desni prometni pas na uvozu
indeks m	manjša od dveh jakosti prometnega toka v krožnem vozišču
indeks M	večja od dveh jakosti prometnega toka v krožnem vozišču
indeks N	jakost prometnega toka na notranjem pasu krožnega vozišča
indeks Z	jakost prometnega toka na zunanjem pasu krožnega vozišča



Slika 36: Prikaz prometnih tokov v turbo krožnem križišču (Perme, 2013: str. 7)

Osnovne značilnosti modificirane Bovyjeve enačbe za potrebe izračuna prepustne sposobnosti turbo krožnega križišča so:

- kapaciteta za vsak prometni pas na uvozu se računa ločeno,
- kapaciteta posameznega uvoza je vsota kapacitet posameznih prometnih pasov na tem uvozu in
- povečanje maksimalne teoretične kapacitete prometnega pasu na uvozu z 1.500 voz/h na 1.550 voz/h.

Parametri za izračun prepustne sposobnosti turbo krožnega križišča po modificirani Bovyjevi enačbi:

$$C_o = 1550 \text{ vozil/h}$$

$$b_{\max} = 0.82$$

$$b_{\min} = 0.68$$

$$a_1 = 0.21 [-] \quad \text{v primeru, da je širina sredinskega ločilnega otoka 2.5 m}$$

$$a_2 = 0.14 [-] \quad \text{v primeru, da je širina sredinskega ločilnega otoka 2.5m}$$

$$a_1 = 0.14 [-] \quad \text{v primeru, da je širina sredinskega ločilnega otoka 7 m}$$

$$a_2 = 0.07 [-] \quad \text{v primeru, da je širina sredinskega ločilnega otoka 7 m}$$

Pretvorba posameznega tipa vozila na enoto osebnih vozil je po naslednjih faktorjih:

- osebno vozilo = 1 EOVS
- tovorno vozilo = 1.9 EOVS
- tovorno vozilo s prikolico in sedlasti vlačilec = 2.4 EOVS

Po nizozemskih izkušnjah daje Bovyjeva enačba kljub njeni enostavnosti korektne rezultate. Enačba se smatra enostavna zato, ker temelji na geometriji krožnega križišča in linearni porazdelitvi rezultatov.

5.3.2 Analiza primerjalnega omrežja

Za to analizo smo za lažje delo pripravili excel datoteko, ki smo jo sestavili tako, da imamo polja za vnos (obarvana oranžno):

- prometnih obremenitev (uvoza, krožnih vozniških pasov in izvoza),
- željenega faktorja EOVS in
- dolžino povprečnega vozila za izračun kolon.

Druga skupina so polja za vnos faktorjev α , β in γ . Potem pa imamo še polja s formulami, kjer se izračunajo:

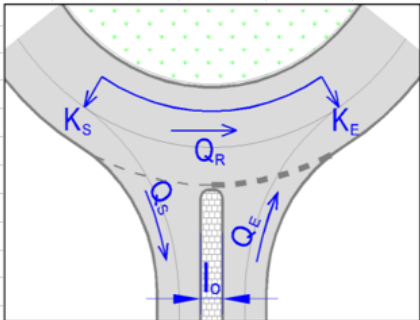
- ekvivalentne prometne obremenitve,
- kapaciteta uvoza,
- zamude ter

- dolžina kolone, ki nastane na uvozu.

Pri izračunu smo uporabili naslednje vrednosti faktorjev:

- α med 0,17 in 0,18,
- β 0,80 kot za dvopasovna krožna križišča veleva TSC in
- γ za dvopasovne uvoze 0,65 in za enopasovnega 1.

Analitični izračun nivoja uslug za krožišče - Bovyjeva enačba			
#izpolni samo oranžna polja			
Obremenitve:		Faktorji:	
OA _E =	voz	OA=	1 EOv
TTV _E =	voz	TTV=	2.4 EOv
QE=	0 EOv	dolžina kolone	8 m/veh
OA _R =	voz	α	0.2
TTV _R =	voz	β	0.8
QR=	0 EOv	γ	1
OA _S =	voz	Co=	1500 voz/h
TTV _S =	voz		
QS=	0 EOv		
Kapaciteta:			
CE=	1500.0 EOv	0%	
Zamude:			
d _E =	2.4 sec		
Kolone:			
Q ₉₅ =	0.0 m		
NU uvoza	LOS = A		



Slika 37: Pripravljeno delovno okolje za vnos podatkov za analizo krožišča

Preglednica 22: Rezultati analize primerjalnega omrežja – nivo uslug, povprečne zamude in povprečna dolžina kolone

Nivo usluge 2038	Jutranja konica	Popoldanska konica
krak A	LOS F	LOS A
krak B	LOS B	LOS C
krak C	LOS E	LOS A
krak D	LOS D	LOS A
skupaj	LOS E	LOS B

Povprečna zamuda 2038 (s/vozilo)	Jutranja konica	Popoldanska konica
krak A	70,3	6,2
krak B	12,4	15,2
krak C	49,2	9,9
krak D	25,8	7,5
skupaj	37,1	11,0

Dolžina kolone (m)	Jutranja konica	Popoldanska konica
krak A	181,3	25,7
krak B	90,6	118,4
krak C	48,6	11,8
krak D	94,4	43,3

Iz zgornje preglednice lahko razberemo podobno, kot smo ugotovili že z analizo s programom SIDRA INTERSECTION, in sicer, da se na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 kot merodajna konica za odločitve o obliki krožišča izkaže jutranja konica. V letu 2038 znašajo v jutranji konici na kraku A nesprejemljive povprečne zamude v dolžini 70,3 s, kar pomeni nivo uslug $NU = F$. Na ostalih priključnih krakih so zamude znotraj še sprejemljivih meja ($NU \leq E$).

V popoldanski konici težav s prepustnostjo krožišča ni, nivo uslug je na vseh krakih $NU = A$, razen na kraku B, kjer je tako močen prometni tok, da nivo uslug pade na $NU = C$. Ker pa gre na kraku B za večino desnih zavijalcev, ki hitro praznijo krožišče, tako nimajo vpliva na prestale voznike in jih ne ovirajo.

Na podlagi izdelanih analiz lahko zaključimo, da bi obstoječe krožišče (s štirimi priključnimi kraki) bilo na koncu planske dobe preobremenjeno in ne bi bilo sposobno sprejeti vseh predvidenih prometnih obremenitev, v kolikor upoštevamo kot merilo nivo uslug v skladu s pravilnikom o projektiranju cest.

Brez sprememb oziroma ukrepov za povečanje kapacitete bi se na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 na posameznih priključnih krakih pojavljale nesprejemljive zamude vozil. Nivo uslug celotnega krožišča bi bil v še sprejemljivih mejah ($NU = E$).

5.3.3 Analiza predlagane rešitve

Pri tej analizi smo dopolnili prejšnjo excel datoteko s polji za posamezne pasove na uvozih, izvozih in krožnih voznih pasovih. Za analizo turbo krožišča upoštevamo vsak uvozni pas posebej. Postopek dela je enak kot pri prejšnji analizi, potrebnih je le več vhodnih podatkov ter drugi faktorji a_1 , a_2 in b ter kapaciteta c_0 .

Analitični izračun nivoja uslug za krožišče - modificirana Bovyjeva metoda

#izpolni samo oranžna polja

Obremenitve: 1 = levi p. 2 = desni p.

Faktorji:

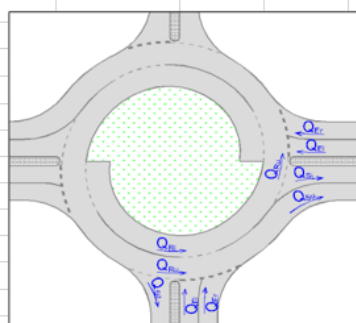
OA _{E1} =	voz
TTV _{E1} =	voz
Q _{E1} =	0 EOVS
OA _{E2} =	voz
TTV _{E2} =	voz
Q _{E2} =	0 EOVS

OA=	1 EOVS
TTV=	2.4 EOVS
dolžina kolone	7 m/veh
lo=	7 m

OA _{R1} =	voz
TTV _{R1} =	voz
Q _{R1} =	0 EOVS
OA _{R2} =	voz
TTV _{R2} =	voz
Q _{R2} =	0 EOVS

b _{min} =	0.68
b _{max} =	0.82
a _{1 2,5m} =	0.21
a _{2 2,5m} =	0.14
a _{1 7m} =	0.14
a _{2 7m} =	0.07
C ₀ =	1550 voz/h

OA _{S1} =	voz
TTV _{S1} =	voz
Q _{S1} =	0 EOVS
OA _{S2} =	voz
TTV _{S2} =	voz
Q _{S2} =	0 EOVS



Kapaciteta:		
C _{E1} =	1550.0 EOVS	0%
C _{E2} =	1550.0 EOVS	0%

Zamude:		
d _{E1} =	2.3 sec	
d _{E2} =	2.3 sec	

Kolone:		
Q _{95,1} =	0.0 m	
Q _{95,2} =	0.0 m	

Levi uvoz	LOS =	A
Desni uvoz	LOS =	A

Slika 38: Pripravljeno delovno okolje za vnos podatkov za analizo turbo krožišče

Preglednica 23: Rezultati analize predlagane rešitve - nivo uslug, povprečne zamude in povprečna dolžina kolone

Nivo usluge 2038		Jutranja konica	Popoldanska konica
krak A	levi uvoz	LOS D	LOS A
	desni uvoz	LOS D	LOS A
krak B	levi uvoz	LOS B	LOS A
	bypass	LOS A	LOS A
krak C		LOS E	LOS C
krak D	levi uvoz	LOS C	LOS A
	desni uvoz	LOS A	LOS A

Povprečna zamuda 2038 (s/vozilo)		Jutranja konica	Popoldanska konica
krak A	levi uvoz	27,5	6,3
	desni uvoz	27,0	6,4
krak B	levi uvoz	13,2	8,5
	bypass	3,3	4,5
krak C		48,9	23,9
krak D	levi uvoz	16,6	7,1
	desni uvoz	6,2	4,8

Dolžina kolone 2038 (m)		Jutranja konica	Popoldanska konica
krak A	levi uvoz	71,4	13,3
	desni uvoz	70,2	13,6
krak B	levi uvoz	65,3	41,6
	bypass	10,0	21,7
krak C		48,4	25,4
krak D	levi uvoz	38,5	21,8
	desni uvoz	15,4	14,3

V zgornji preglednici so prikazani rezultati analize predlagane rešitve turbo krožišča po modificirani Bovyjevi metodi. Nivo uslug, zamude in dolžine kolon so izračunane za vsak uvozni pas posebej. V jutranji konici imamo na koncu planske dobe leta 2038 najdaljše zamude na kraku C, torej na uvozu iz smeri centra Mengša, znašajo pa 48,9 s. Na kraku A, ki bi bil brez ukrepov najbolj problematičen, se izkaže, da predlagana rešitev odpravlja težave, saj se zamude vozil znižajo na okoli 27 s na obeh uvoznih pasovih. Na ostalih dveh uvozih prav tako ni težav, zamude so povsod krajše od 17 sekund. Najdaljša kolona se po tem izračunu ustvari na kraku A, in sicer dolžine 71,4 m.

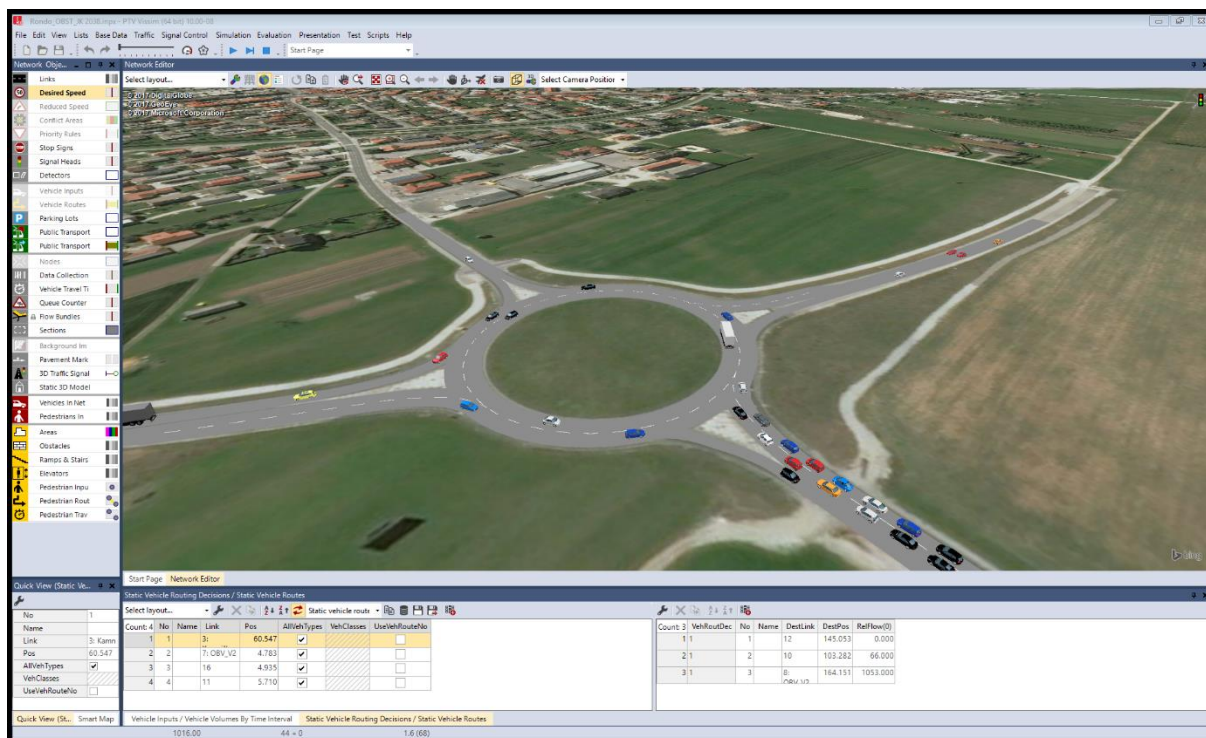
V času popoldanske konice prav tako ni kapacitetnih težav, najdaljše zamude so tudi v tem primeru na kraku C, medtem ko so na ostalih uvozih povsod krajše kot 9 s. Razen uvoza na kraku C, kjer je nivo uslug $NU = C$, so na vseh ostalih uvozih nivoji uslug $NU = A$.

Vidimo, da po tej metodi izračuna kapacitetnih parametrov predlagana rešitev na koncu 20 letne planske dobe leta 2038 ustreza, saj je najslabši nivo uslug $NU = E$, kar je po pravilniku o projektiranju še vedno sprejemljiv nivo.

6 SIMULACIJSKI MODEL

6.1 PTV VISSIM

VISSIM (Verkehr In Städten – SIMulationsmodell) je mikroskopski simulacijski program, ki so ga razvili pri nemškem podjetju PTV Planung Transport Verkehr AG. Prva različica je izšla leta 1992, trenutno pa je na voljo PTV Vissim 10 iz leta 2017.

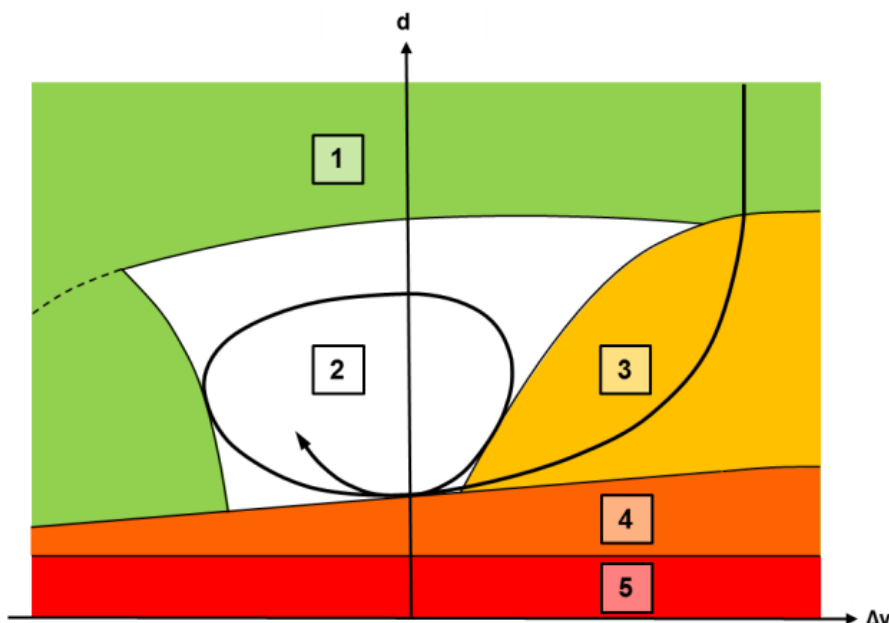


Slika 39: Programski vmesnik PTV VISSIM

VISSIM predstavlja stohastični, diskretni ter časovno orientiran mikrosimulacijski model, ki uporablja psihofizične karakteristike t.i. "car following" modela za longitudinalna gibanja vozil in algoritme, ki temeljijo na pravilih vožnje za vozila, ki se vključujejo iz stranskih smeri. Matematični model je koncipiran na ideji, ki izhaja iz Wiedermannove teorije, katere osnovna ideja je da se lahko vsak voznik znajde v eni izmed naslednjih situacij (povzeto po Tollazzi, Toplak in Jovanović, 2006):

- vožnja v prostem prometnem toku (brez vpliva ostalih vozil, vozilo želi doseči in ohranjati želeno hitrost),
- dohodna vožnja (proces prilagajanja hitrosti sledečega vozila, vozilu kateremu sledi, vozilo zmanjšuje hitrost dokler ni na željeni razdalji do predhodnega vozila, ko to doseže je razlika v hitrosti obeh vozil enaka nič),
- zasledovalna vožnja (voznik ohranja konstantno razdaljo do vozila pred njim brez pospeševanja ali zaviranja),

- zaviranje (uporabi se, ko varnostna razdalja pade pod minimalno, vozilo začne pospešeno zavirati).



Slika 40: Model sledenja vozil Wiedermann 1974 (PTV VISSIM 10 user manual, 2017)

Na zgornji sliki je grafično prikazan Wiedermannov model sledenja. Pri tem je:

- d (vertikalna os) – oddaljenost od predhodnega vozila,
- Δv (horizontalna os) – sprememba hitrosti,
- "cona" 1 – vožnja v prostem prometnem toku,
- "cona" 2 – zasledovalna vožnja oz. sledenje,
- "cona" 3 – dohodna vožnja oz. približevanje,
- "cona" 4 – zaviranje,
- "cona" 5 – trčenje.

Za vsako od štirih zgoraj naštetih situacij je pospeševanje opisano kot rezultat trenutne hitrosti, razlike v hitrosti, razdalje do predhodnega vozila ter individualnih karakteristik vozila in voznika. Voznik preklopi iz enega stanja v drugega takoj, ko doseže mejo, ki jo opisuje funkcija razlike v hitrosti in medsebojne razdalje vozil. Na primer, majhne razlike v hitrosti se odvijajo na kratkih razdaljah, medtem ko velike razlike v hitrostih silijo voznike v reakcije na večjih razdaljah in v hitrejše reakcije. Ker je vsak voznik posameznik drugačen tudi drugače zaznava razlike v hitrosti in spremembi varnostne razdalje. Zaradi tega ker je ta model odvisen od psiholoških in fizičnih omejitev dojemanja, ga imenujemo psihofizični model sledenja vozil. VISSIM z uporabo tega modela obnašanja voznika simulacije zelo približa realnemu stanju. (Pretnar, 2004)

Za programski paket VISSIM je značilno da ne uporablja konvencionalnega link/node modularnega sistema, temveč link/connector sistem, ki omogoča modeliranje zelo kompleksnih geometrij.

VISSIM ponuja možnost statičnega in dinamičnega obremenjevanja. Pri statičnem obremenjevanju obstajata dva načina vnosa zavijalcev. Klasično se vnaša zavijalce v križiščih, novejša pa je vnašanje po odsekih, kjer je bolj realno (neodvisno) obnašanje vozil. Dinamično obremenjevanje poteka po učni metodi preteklih iteracij. Vse poti s pripadajočimi stroški se zapišejo za vsako iteracijo, kar vozniki upoštevajo v naslednji simulaciji. To vodi k prerazporejanju prometa v nasičenih razmerah, kar pripomore k boljši izkoriščenosti omrežja in večji realnosti rezultatov.

S programom PTV VISSIM 10 smo izvedli kapacitetno analizo obravnavanega krožnega križišča na koncu planske dobe leta 2038. Na podlagi digitalnega ortofoto posnetka, ki ga ima program integriranega ter predhodno izdelane projektne dokumentacije za obravnavano kroženo križišče smo z vrsto povezav (links & connectors) izdelali matematični model predvidene geometrije obravnavanega območja.

Podatki o prometnih obremenitvah, ki so predstavljeni v prejšnjih poglavjih te naloge, so osnova za obremenjevanje matematičnega modela, ki je v tem primeru statično (dinamično obremenjevanje ni smiselno, saj gre za izolirano križišče in voznik nima možnosti izbire poti). Na vsakem kraku so podane dejanske prometne obremenitve in razmerje vozil v smereh levo/naravnost/desno.

Za pravilno analizo in vrednotenje kapacitetnih parametrov je potrebno zbrati prometne karakteristike in rezultate "real time" simulacije. VISSIM nudi široko paleto izhodnih rezultatov. Skladno z obravnavanim problemom smo se odločili za vrednotenje uspešnosti analizirane geometrije na podlagi naslednjih primerjalnih kriterijev števila vozil v obravnavanem omrežju, povprečnih zamud na vozilo, povprečnega števila ustavljanj, povprečne dolžine kolone in maksimalne dolžine kolone.

Preglednica 24: Primerjalni kriteriji za vrednotenje uspešnosti

Kratica iz programa	Angleški termin	Slovenski prevod
Veh(All)	Number of Vehicles, All Vehicle Types	Št. vozil v smeri, upoštevani so vsi tipi vozil
VehDelay(All)	Average delay per vehicle [sec], All Vehicle Types	Povprečna zamuda na vozilo [s], upoštevani so vsi tipi vozil
Stops(All)	Average number of stops per vehicles, All Vehicle Types	Povprečno št. ustavljanj vseh vozil, upoštevani so vsi tipi vozil
QLen	Average Queue Length [m]	Povprečna dolžina kolon [m]
QLenMax	Maximum Queue Length [m]	Maksimalna dolžina kolone [m]
LOS(All)	Level of service, All Vehicle Types	Nivo uslug, upoštevani so vsi tipi vozil

Pri vrednotenju uspešnosti križišč je poleg zamud in nivoja uslug ključnega pomena kriterij zaježitvenih dolžin. Zaježitvene dolžine nastopijo ob prekinjanju prometnega toka, ko hitrost vozil pade pod določeno vrednost. Pomemben podatek pri vrednotenju zaježitvenih dolžin je število ustavljanj vozil, na podlagi katerega lahko sklepamo ali so kolone vozil stoječe ali zelo počasi tekoče. Število ustavljanj 1 pomeni, da se v povprečju ustavi vsako vozilo. Če je število manjše, se ustavi manj kot vsako vozilo, če je število večje se vsako vozilo ustavi večkrat.

Predpostavke, ki so bile upoštevane pri modeliranju:

- vozniki prilagajajo hitrost vožnje vozilu pred seboj (car-following model),
- vozniki pri uvažanju dajejo prednost vsem vozilom v krožečem toku (Conflict areas) in
- na uvozih in krožnih voznih pasovih zmanjševanje hitrosti (Reduced speed areas).

Simulacijo istega modela smo ponovili desetkrat, kar je tudi zahteva pri tovrstnih analizah, saj se rezultati posameznih mikrosimulacij razlikujejo na podlagi izbranega začetka (Random seed) posamezne simulacije. Rezultati posameznih simulacij so načeloma blizu skupnemu povprečju, vendar se vsi med seboj razlikujejo, odstopanja so lahko celo do 25 odstotkov. To poskušamo čimbolj izničiti z večjim številom simulacij, iz rezultatov pa izločimo tiste, ki najbolj izstopajo. Med prikazanimi rezultati so prikazani numerični izpisi programa. Pri izračunih zamud so upoštevana vsa vozila, ki se v času obravnavane konice nahajajo v obravnavanem omrežju.

6.2 Kapacitetna analiza primerjalnega omrežja



Slika 41: Simulacijski model primerjalnega omrežja

Za potrebe simulacije smo izdelali omrežje uvoznih krakov, ki so modelirani v naslednjih dolžinah:

- krak A: 670 m,
- krak B: 470 m,
- krak C: 285 m in
- krak D: 285 m.

Celotne prometne obremenitve krožišča v jutranji konici na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 znašajo 3092 vozil. Krak A generira skupno 943 vozil, krak B 1216 vozil, krak C 276 vozil in krak D 657 vozil.

Preglednica 25: Rezultati kapacitetne analize z mikrosimulacijo za primerjalno omrežje v JK 2038

Movement	Veh (All)	VehDelay (All)	Stops (All)	Qlen	QlenMax	LOS
Krak A - levo	789	114,9	11,3	173,6	510,0	LOS F
Krak A - naravnost	149	110,2	11,1	173,6	510,0	LOS F
Krak A - desno	5	155,3	16,6	173,6	510,0	LOS F
Krak B - desno	446	18,5	1,2	18,8	383,2	LOS C
Krak B - levo	12	20,0	1,6	18,8	383,2	LOS C
Krak B - naravnost	758	31,5	1,9	18,8	383,2	LOS D
Krak C - naravnost	44	445,0	62,5	202,5	291,5	LOS F
Krak C - desno	6	402,6	63,0	202,5	291,5	LOS F
Krak C - levo	226	368,8	53,2	202,5	291,5	LOS F
Krak D - levo	4	35,4	3,5	50,2	267,9	LOS E
Krak D - naravnost	543	47,3	3,1	50,2	267,9	LOS E
Krak D - desno	110	35,9	2,7	50,2	267,9	LOS E
Skupaj krožno križišče	3092	89,1	9,6	129,5	510,0	LOS F

Upoštevajoč karakteristike primerjalnega krožišča je iz preglednice moč razbrati, da obravnavano krožno križišče prevozi 3092 vozil. Razlika med številom vozil iz podatkov o prometnih obremenitvah in številom obravnavanih vozil na krakih A (97,4 %) in C (98 %) nastaja, ker omrežje ni sposobno generirati vseh predvidenih vozil iz jutranje konice v obdobju 60 minutne simulacije. Povprečna zamuda celotnega krožnega križišča znaša 89 s. K temu največ doprinese uvoz iz smeri Mengša, kjer znašajo zamude 400 s, saj uvažanje močno ovira tok "levih zavijalcev" iz kraka A na krak B. Povprečno število ustavljanj je 9,6, povprečne dolžine kolon so 130 m, najdaljša kolona pa je 510 metrov. Nivo uslug celotnega krožišča na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 znaša $NU = F$ in ni sprejemljiv glede na pravilnik o projektiranju cest.

Rezultati analize torej pokažejo, da so kapacitetni parametri za napovedane prometne obremenitve na koncu planske dobe preseženi, saj omrežje ni sposobno sprejeti vseh predvidenih prometnih obremenitev v obravnavanem simulacijskem času 3600 s. Posledično to pomeni, da se bi jutranja konica podaljšala na daljše obdobje od 3600 s.

6.3 Kapacitetna analiza predlagane rešitve v JK 2038



Slika 42: Simulacijski model turbo krožišča

Kot že pri prejšnjem modelu smo tudi tokrat simulacije ponovili desetkrat, dolžine krakov so ostale enake, dodan je "bypass" iz kraka B na krak A ter dodaten pas na izvozu na krak B. Celotne prometne obremenitve krožišča v jutranji konici na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 znašajo 2831 vozil. Krak A generira skupno 697 vozil, krak B 1184 vozil, krak C 299 vozil in krak D 651 vozil.

Iz spodnje preglednice je razvidno, da obravnavano turbo krožno v času simulacije prevozi 2831 vozil. Razlika med številom vozil iz podatkov o prometnih obremenitvah in številom obravnavanih vozil na kraku A (80 %) nastaja, ker omrežje ni sposobno generirati vseh predvidenih vozil iz jutranje konice v obdobju 60-minutne simulacije. Povprečna zamuda celotnega krožišča znaša 62,6 s. K temu največ doprinese uvoz iz smeri Kamnika, kjer znašajo zamude povprečno na obeh uvozech kar 208 s. Povprečno število ustavljanj za celotno krožno križišče je 7,3, povprečna dolžina kolone, ki se ustvari so 86,3 m, najdaljša pa je dolžine 510 m.

Nivo uslug celotnega krožišča na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 tako kot pri analizi obstoječega stanja znaša $NU = F$ in ni sprejemljiv glede na pravilnik o projektiranju cest. Do nesprejemljivih zamud vozil prihaja zaradi dejstva, da vozila ki uvažajo na priključnem kraku A zelo težko izvajajo manever vključevanja v krožišče. To jim preprečuje močan prometni tok vozil, ki vozijo iz smeri mengeške obvoznice in vozijo mimo uvoznega kraka A. V kolikor se analizira ostale tri uvoze je rezultat

sprejemljiv, saj so najdaljše zamude vozil 21,7 s in na nobenem od priključnih krakov na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 nivo uslug ni višji kot $NU = C$.

Preglednica 26: Rezultati kapacitetne analize z mikrosimulacijo za predlagano rešitev v JK 2038

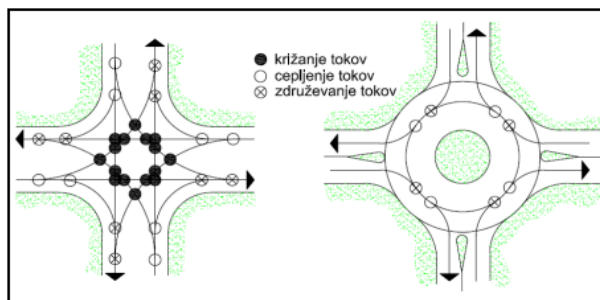
Movement	Veh (All)	VehDelay (All)	Stops (All)	Qlen	QlenMax	LOS
Krak A levi uvoz - levo	295	204,2	24,0	324,4	510,2	LOS F
Krak A desni uvoz - levo	290	250,2	31,6	344,4	510,2	LOS F
Krak A desni uvoz - naravnost	110	256,0	33,3	344,4	510,2	LOS F
Krak A desni uvoz - desno	2	121,9	12,5	344,4	510,2	LOS F
Krak B - levo	12	7,7	0,9	6,0	290,2	LOS A
Krak B - naravnost	736	7,5	0,4	6,0	290,2	LOS A
Krak B - desno "bypass"	436	1,4	0,0	0,0	0,0	LOS A
Krak C - levo	243	16,2	1,0	4,9	68,3	LOS C
Krak C - naravnost	50	11,5	0,7	4,9	68,3	LOS B
Krak C - desno	6	7,4	0,7	4,6	68,3	LOS A
Krak D levi uvoz - levo	4	21,7	1,8	5,9	80,1	LOS C
Krak D levi uvoz - naravnost	338	12,2	0,6	5,9	80,1	LOS B
Krak D desni uvoz - naravnost	200	3,1	0,1	0,4	27,4	LOS A
Krak D desni uvoz - desno	109	2,0	0,1	0,4	27,4	LOS A
Skupaj krožno križišče	2831	62,6	7,3	86,3	510,2	LOS F

Pri opravljeni primerjavi obstoječega stanja krožišča in turbo krožišča z uporabo mikrosimulacijskega orodja VISSIM smo v nasprotju z analizo z analitičnim programom SIDRA na kraku A v jutranji konici na koncu planske dobe leta 2038 dobili nesprejemljive dolžine zamud in posledično nesprejemljiv nivo uslug ($NU = F$).

7 PROMETNO-VARNOSTNA ANALIZA

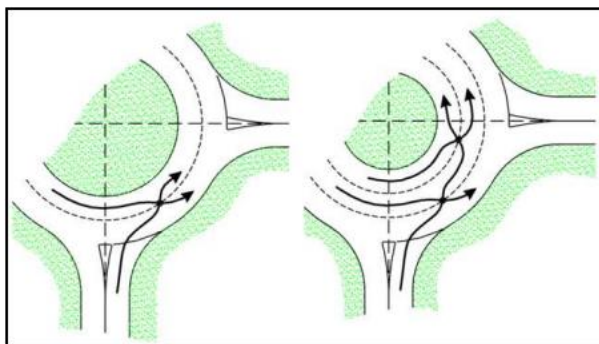
7.1 Splošno

V primerjavi s klasičnimi štirirakimi križišči so krožna križišča v veliki prednosti. Klasično štirirako križišče ima 32 konfliktnih točk (16 križanj, 8 združevanj in 8 cepljenj), enopasovno štirirako krožno ima kar štirikrat manj konfliktnih točk, torej le 8 (4 cepljenje in 4 združevanja).



Slika 43: Konfliktna točka v klasičnem štirirakem ter v krožnem štirirakem križišču (TSC 03.341 : 2011 Krožna križišča, str. 10)

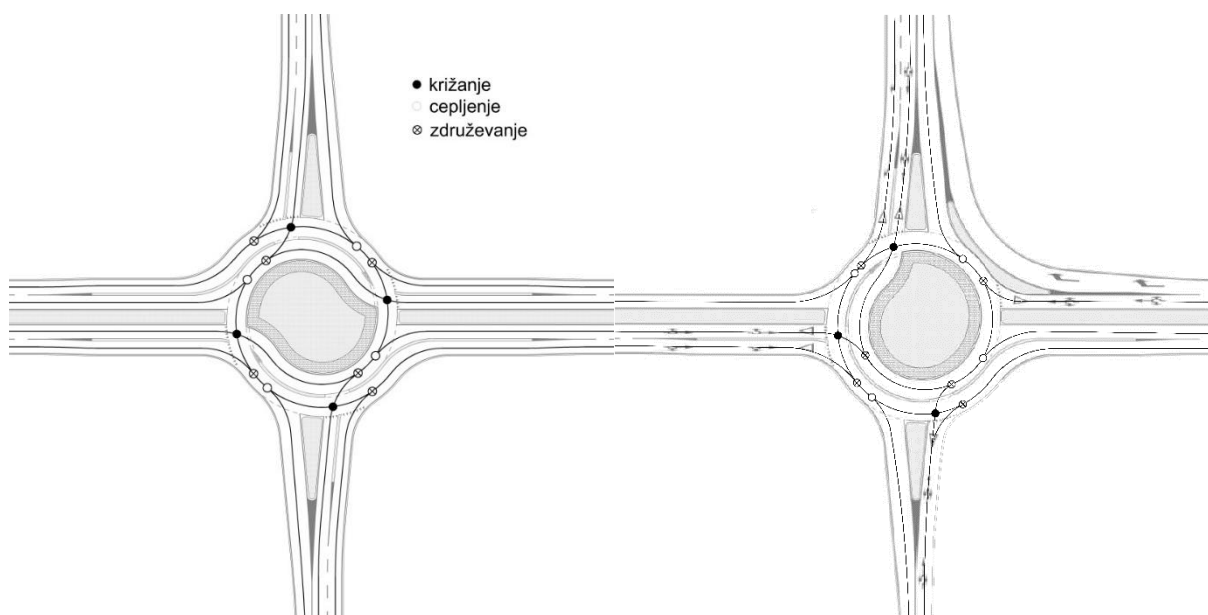
Z dodajanjem krožnih voznih pasov se zadeva poslabša, saj dobimo v teoriji na mestih prepletanja dodatnih konfliktnih točk toliko, kolikor je priključnih cest. V praksi se pokaže, da se z dodajanjem krožnih voznih pasov ustvarijo tudi konfliktni odseki, saj vozniku nikakor ni preprečena menjava krožnega voznega pasu.



Slika 44: Konfliktna točka prepletanja in konfliktni odsek (TSC 03.341 : 2011 Krožna križišča, str. 10)

Pri turbo krožnih križiščih pa je zaradi fizično ločenih krožnih voznih pasov in s tem omejenim menjavanjem le-teh zmanjšano število konfliktnih točk za število prepletanj. Standardno turbo krožno križišče ima tako 14 konfliktnih točk, to so 4 cepljenja na izvozih in 4 cepljenja ter 6 križanj na uvozih. Prav tako ni konfliktnih odsekov.

Izbrani kolenast tip krožnega križišča z "bypassom" ima tako 13 konfliktnih točk in sicer 3 križanja, 4 cepljenja in 4 združevanja. Prikaz je na spodnji sliki v primerjavi s standardnim turbo krožnim križiščem.



Slika 45: Konfliktne točke v standardnem turbo krožnem križišču (levo) in v izbranem kolenastem turbo krožnem križišču (desno)

Večji problem se pri turbo krožnih križiščih zaradi višjih hitrosti, ki jih dosegajo motorizirani udeleženci v prometu, pojavi pri zagotavljanju prometne varnosti nemotoriziranih udeležencev v prometu. Ta problem lahko rešimo z izvennivojskim vodenjem pešcev in kolesarjev, ločevanjem uvoznih in izvoznih prometnih pasov z vmesnim ločilnim otokom, zamikanjem prehodov za pešce in kolesarje ali pa z dvignjenimi ploščadmi na mestih prehodov. (povzeto po TSC 02.XXX:2015 KROŽNA KRIŽIŠČA S SPIRALNIM POTEKOM KROŽNEGA VOZIŠČA – TURBO KROŽNA KRIŽIŠČA)

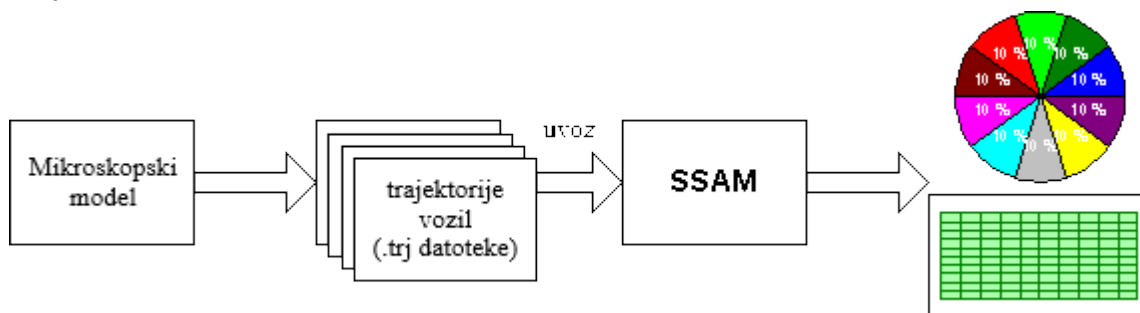
7.2 Metodologija

Pravilnik o projektiranju cest (Ur.l. 91/05) zahteva (člen 5), da se načrtovane variante primerjajo po prometno-varnostnih pogojih, kar lahko Precej pripomore k izboljšanju prometne varnosti na slovenskih cestah, saj se projektant tako lažje odloči za varianto, ki je vsaj glede na napoved prometne varnosti boljša.

Prometno-varnostna analiza za potrebe te naloge je izdelana s programskim orodjem SSAM (Surrogate Safety Assessment Module), ki ga je razvilo raziskovalno središče "Turner-Fairbank Highway Research Center" iz okolice Washingtona (McLean, Virginia) v povezavi z Ameriško zvezno agencijo za ceste (FHWA) in podjetjem Siemens iz Nemčije.

Gre za eno izmed kompleksnejših orodji iz nabora podobnih, ki jih omenjena agencija priporoča za prometno-varnostne analize. Na podlagi rezultatov mikroskopske simulacije in analize konfliktnih točk se določi pogostost in tip prometnih nesreč. Na ta način je omogočena prometno-varnostna analiza načrtovane cestne infrastrukture pred izgradnjo, ne da bi bilo potrebno čakati na podatke o dejanskih

prometnih nesrečah po izgradnji. Uporabnost modela glede kategorije ali tipa ceste sicer ni omejena, vendar je primeren predvsem za križišča in priključke. Orodje je primerno predvsem za izdelavo primerjalnih analiz alternativnih rešitev.



Slika 46: Postopek dela s programskim orodjem SSAM
(<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/03050/06.cfm>, 17.7.2018)

Za prometno-varnostno analizo določene ceste je potrebno najprej izdelati mikroskopski model, in sicer z enim izmed štirih programskih orodji (VISSIM, Paramics, AIMSUN ali TEXAS), ki omogočajo izvoz datoteke *.trj, v kateri so zapisane trajektorije vozil.

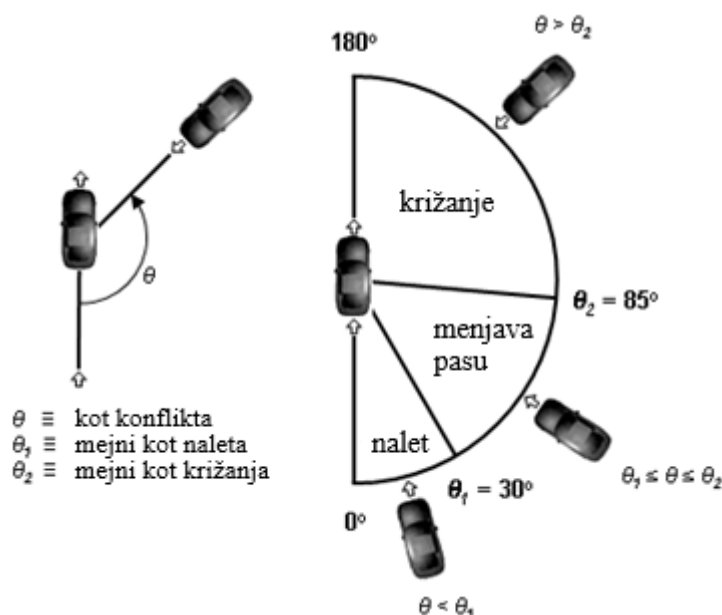
Z modelom SSAM se nato analizira interakcije med vozili in izdela seznam vseh potencialnih prometnih nesreč. Za vsako izmed njih se izračuna nadomestne prometno-varnostne parametre (surogate) kot so:

- najmanjši čas do trka, ki je določen na podlagi hitrosti, lokacije in trajektorije vozil – minimum time-to-collision (TTC),
- najmanjši čas, ko prvo vozilo zapusti točko potencialnega trka in jo zasede drugo vozilo (vrednost 0 pomeni trk) – minimum post-encroachment time (PET),
- začetni pojemek drugega vozila pri konfliktu – initial deceleration rate (DR),
- največji pojemek drugega vozila – maximum deceleration rate (MaxD),
- največja hitrost hitrejšega vozila v konfliktu – maximum speed (MaxS),
- največja razlika v hitrosti obeh vozil v konfliktu – maximum differential (DeltaS).

Končni rezultat prometno-varnostne analize s programskim orodjem SSAM so torej:

- preglednica konfliktov določena na osnovi analize *.trj datoteke trajektorij vozil in
- število konfliktov po tipih s povprečnimi nadomestnimi vrednostmi.

Omogočena je vizualizacija lokacij konfliktov na karti cestnega omrežja z ikonami različnih oblik in barv za konflikte različnih tipov in različne teže posledic.



Slika 47: Tipi konfliktov in mejni kot med njimi, kot jih upošteva programsko orodje SSAM (program SSAM)

Zanesljivost rezultatov programskega orodja je dosežena s teoretično in terensko validacijo ter z analizo elastičnosti samega orodja. Teoretična validacija programskega orodja je izdelana s pomočjo teoretičnih enačb za račun relativne stopnje prometnih nesreč po različicah. Razvijalec programa jo je izdelal glede na statistične podatke o prometnih nesrečah v 83 križiščih, za 5 izmed teh pa je bila narejena tudi analiza elastičnosti.

7.3 Analiza primerjalnega omrežja



Slika 48: Prikaz vseh konfliktov v dvopasovnem krožišču

Analiza interakcij med vozili in izdelan seznam vseh potencialnih prometnih nesreč (konfliktne situacije) pokazata, da prihaja do konflikta tipa "rear end" (nalet) skoraj na celotnem obravnavanem območju. To je posledica visokih prometnih obremenitev in kratkih vmesnih razdalj med vozili, ki vozijo v počasi premikajoči se koloni. Posledično smo se odločili, da za primerjavo med obstoječim krožiščem in turbo krožiščem upoštevamo samo ožje območje uvoza krožišč. To zajema krožni vozni pas in uvažanje vozil v krožišče. Slika in rezultati so prikazani spodaj



Slika 49: Konflikti križanj in menjave pasov v dvopasovnem krožišču

Preglednica 27: Parametri analize dvopasovnega krožišča

	SSAM_Measure	Min	Max	Mean	Variance
najmanjši čas do trka	TTC	0,00	1,50	1,05	0,25
priključni čas	PET	0,00	4,93	1,97	1,72
največja hitrost obeh vozil	MaxS	0,00	16,25	4,80	5,99
razlika v hitrosti vozil	DeltaS	0,00	15,44	2,64	3,75
pojemek vozila	DR	-8,38	3,23	-1,72	5,38
največji pojemek drugega vozila	MaxD	-8,48	3,23	-4,18	7,15
največja razlika v hitrosti	MaxDeltaV	0,00	11,60	1,48	1,24

Preglednica 28: Število konfliktov v dvopasovnem krožišču

	skupno število konfliktov	neuvrščeni	križanje	nalet	menjava voznega pasu
skupaj	1858	0	37	0	1821
trj_01	196	0	2	0	194
trj_02	218	0	3	0	215
trj_03	185	0	2	0	183
trj_04	181	0	5	0	176
trj_05	159	0	2	0	157
trj_06	201	0	3	0	198
trj_07	200	0	8	0	192
trj_08	174	0	3	0	171
trj_09	172	0	5	0	167
trj_10	172	0	4	0	168

Iz zgornjih preglednic je razvidno, da je število konfliktov relativno visoko. V večini primerov pride do konfliktnih situacij zaradi menjave voznega pasu, nekaj konfliktov pa je tudi posledica križanj. Čas do konflikta je v povprečju 1,05 s, kar pomeni da je verjetnost trka srednja. Naleti so bili izvzeti iz analize, kot je navedeno v prejšnjem odstavku.

7.4 Analiza predlagane rešitve



Slika 50: Prikaz vseh konfliktov v turbo krožišču

Kot že pri dvopasovnem krožišču tudi v analizi turbo krožišča pride do veliko potencialnih konfliktnih situacij po celotnem modeliranem omrežju. Tudi tu smo se osredotočili zgolj na območje krožišča, izvzeli pa bomo tudi konflikte tipa "rear end" (nalet), saj jih je večina posledica velikih prometnih obremenitev in ustavljanj vozil v koloni. Slika in rezultati so prikazani spodaj.



Slika 51: Grafični prikaz konfliktov v turbo krožnem križišču

Preglednica 29: Vrednosti parametrov za turbo krožišče

	SSAM_Measure	Min	Max	Mean	Variance
najmanjši čas do trka	TTC	0,00	1,50	1,05	0,27
priključni čas	PET	0,00	4,90	1,88	1,73
največja hitrost obeh vozil	MaxS	0,01	15,34	5,78	8,44
razlika v hitrosti vozil	DeltaS	0,00	14,62	2,96	4,13
pojemek vozila	DR	-8,38	3,12	-1,61	4,68
največji pojemek drugega vozila	MaxD	-8,42	3,12	-3,97	8,40
največja razlika v hitrosti	MaxDeltaV	0,00	10,81	1,65	1,38

Preglednica 30: Število konfliktov v turbo krožišču

	skupno število konfliktov	neuvrščeni	križanje	nalet	menjava voznega pasu
skupaj	33	0	0	0	33
trj_01	4	0	0	0	4
trj_02	6	0	0	0	6
trj_03	1	0	0	0	1
trj_04	2	0	0	0	2
trj_05	3	0	0	0	3
trj_06	2	0	0	0	2
trj_07	3	0	0	0	3
trj_08	0	0	0	0	0
trj_09	7	0	0	0	7
trj_10	5	0	0	0	5

Iz zgornjih preglednic vidimo, da je število konfliktov relativno nizko glede na prometne obremenitve turbo krožišča. Čas do konflikta je v povprečju 1,05 s, kar pomeni da je verjetnost trka srednja do majhna.

Iz zgornjih preglednic je razvidno, da je število konfliktov relativno nizko glede na prometne obremenitve. Razen konfliktnih situacij naleta, ki je izvzet iz analize, pride pri turbo krožišču samo do konfliktnih situacij zaradi menjave voznega pasu, kar pomeni kot trka med 30 in 80 stopinj. Čas do konflikta je v povprečju 1,05 s, kar pomeni da je verjetnost trka srednja.

7.5 Ugotovitve

V uvodu je bilo navedeno, da se z rekonstrukcijo dvopasovnega krožišča v turbo krožišče zmanjša število konfliktnih točk in eliminira konfliktne odseke. Na osnovi izvedene analize smo to tudi potrdili. Nivo prometne varnosti se je ob izvedbi rekonstrukcije dvopasovnega krožišča v turbo krožišče neprimerno izboljšal. Število konfliktnih točk se v merodajni jutranji konici na koncu 20. letne planske dobe zmanjša iz števila 1821 na 33. Analiza prometne varnosti turbo krožišča je pokazala tudi, da ni več nobenega konflikta tipa križanje, ki se lahko konča najhujšimi posledicami.

8 PRIMERJAVA REZULTATOV IN UGOTOVITVE

8.1 Primerjava kapacitetnih parametrov

Na podlagi izvedenih analiz se je ugotovilo, da kapacitetni parametri na začetku 20-letne planske dobe leta 2018 niso preseženi tako v obstoječem krožišču, kot tudi v turbo krožišču.

V sklopu magistrske naloge so bile izdelane 3 kapacitetne analize. Prva s programom SIDRA, druga z Bovyjevo enačbo in tretja s pomočjo mikrosimulacije. Na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 v jutranji konici prihaja v obstoječem krožišču do nesprejemljivih zamud vozil in posledično do prekoračitev še dovoljene meje nivoja uslug $NU = E$ (na kraku A $NU = F$) v skladu s pravilnikom o projektiranju cest.

Na podlagi izvedenih analiz s programom SIDRA se je izkazalo, da so kapacitetni parametri na vseh krakih v sprejemljivih mejah ($NU \leq E$). Najdaljše zamude se pojavljajo na kraku A, in sicer 45,9 s na uvoza za levo zavijanje.

Za predlagano rešitev turbo krožišča smo po modificirani Bovyjevi metodi ugotovili, da imamo v jutranji konici na koncu planske dobe leta 2038 najdaljše zamude na kraku C, torej na uvozu iz smeri centra Mengša, ki znašajo 48,9 s. Na kraku A, ki bi bil brez ukrepov najbolj problematičen, se izkaže da predlagana rešitev odpravlja težave, saj se zamude vozil znižajo na okoli 27 s na obeh uvoznih pasovih. Na ostalih dveh uvozih prav tako ni težav, zamude so povsod krajše kot 17 s. Vidimo, da je po tej metodi izračuna kapacitetnih parametrov predlagana rešitev na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 ustrezna, saj je najslabši nivo uslug $NU = E$, kar je po pravilniku o projektiranju še vedno sprejemljiv nivo.

Pri izdelani simulaciji turbo krožišča z uporabo mikrosimulacijskega orodja VISSIM smo v nasprotju z analizo z analitičnim programom SIDRA in modificirano enačbo na kraku A v jutranji konici na koncu planske dobe leta 2038 dobili nesprejemljive dolžine zamud in posledično nesprejemljiv nivo uslug ($NU = F$ na kraku A).

Na podlagi izdelanih kapacitetnih analiz smo ugotovili, da oba analitična modela zadostita pogoju, da mora biti na koncu planske dobe nivo uslug $NU \leq E$. Mikrosimulacijski model je dokazal, da je varianta turbo krožišča kapacitetno ustreznejša vendar ne izpolnjuje pogoja dolžine zamud, kot ga predpisuje pravilnik o projektiranju cest.

Preglednica 31: Primerjava rezultatov izračunanih zamud in nivoja uslug za primerjalno omrežje v JK leta 2038

Zamude JK 2038 (s/vozilo)	SIDRA	Bovy	VISSIM
krak A	105,6	70,3	126,8
krak B	16,7	12,2	23,3
krak C	43,7	49,2	405,5
krak D	33,3	25,8	39,5
skupaj	50,9	37,1	89,1

Nivo uslug JK 2038	SIDRA	Bovy	VISSIM
krak A	LOS F	LOS F	LOS F
krak B	LOS C	LOS B	LOS C
krak C	LOS E	LOS E	LOS F
krak D	LOS D	LOS D	LOS E
skupaj	LOS F	LOS E	LOS F

V zgornji preglednici so zbrani rezultati treh različnih metod analize kapacitetnih parametrov dvopasovnega krožišča na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 v jutranji konici.

Preglednica 32: Primerjava rezultatov izračunanih zamud in nivoja uslug za primerjalno omrežje v PK leta 2038

Zamude PK 2038 (s/vozilo)	SIDRA	Bovy
krak A	10,6	6,2
krak B	4,0	15,2
krak C	8,0	9,9
krak D	6,8	7,5
skupaj	6,4	11,0

Nivo uslug PK 2038	SIDRA	Bovy
krak A	LOS B	LOS A
krak B	LOS A	LOS C
krak C	LOS A	LOS A
krak D	LOS A	LOS A
skupaj	LOS A	LOS B

V zgornji preglednici so zbrani rezultati dveh metod analize kapacitetnih parametrov dvopasovnega krožišča na koncu planske dobe leta 2038 v popoldanski konici. Mikrosimulacijo smo izdelali samo za merodajno konico – jutranjo konico.

Preglednica 33: Primerjava rezultatov izračunanih zamud in nivoja uslug za predlagano rešitev v JK leta 2038

Zamude JK 2038 (s/vozilo)		SIDRA	Bovy	VISSIM
krak A	levi uvoz	45,9	27,5	204,2
	desni uvoz	45,8	27,0	251,2
krak B	levi uvoz	15,8	13,2	7,6
	bypass	0,0	3,3	1,4
krak C		39,5	48,9	15,3
krak D	levi uvoz	20,3	16,6	12,3
	desni uvoz	19,9	6,2	2,7
skupaj		26,3	19,3	62,6

Nivo uslug JK 2038		SIDRA	Bovy	VISSIM
krak A	levi uvoz	LOS E	LOS D	LOS F
	desni uvoz	LOS E	LOS D	LOS F
krak B	levi uvoz	LOS C	LOS B	LOS A
	bypass	LOS A	LOS A	LOS A
krak C		LOS E	LOS E	LOS C
krak D	levi uvoz	LOS C	LOS C	LOS B
	desni uvoz	LOS C	LOS A	LOS A
skupaj		LOS D	LOS C	LOS F

Preglednica 34: Primerjava rezultatov izračunanih zamud in nivoja uslug za predlagano rešitev v PK leta 2038

Zamude PK 2038 (s/vozilo)		SIDRA	Bovy
krak A	levi uvoz	10,4	6,3
	desni uvoz	10,5	6,4
krak B	levi uvoz	11,9	8,5
	bypass	0,1	4,5
krak C		16,6	23,9
krak D	levi uvoz	12,2	7,1
	desni uvoz	11,9	4,8
skupaj		9,2	7,5

Nivo uslug PK 2038		SIDRA	Bovy
krak A	levi uvoz	LOS B	LOS A
	desni uvoz	LOS B	LOS A
krak B	levi uvoz	LOS B	LOS A
	bypass	LOS A	LOS A
krak C		LOS C	LOS C
krak D	levi uvoz	LOS B	LOS A
	desni uvoz	LOS B	LOS A
skupaj		LOS A	LOS A

8.2 Primerjava glede na kriterije upravičenosti

8.2.1 Funkcionalni kriterij

Temu kriteriju ustrezata obe varianti, tako primerjalno omrežje, ki je obstoječe dvopasovno krožišče po izgradnji tudi četrtega uvoznega kraka, kot tudi predlagana rešitev, ki je turbo krožišče kolenastega tipa. Obe krožišči namreč zagotavljata pretočnost in prevoznost ob umestitvi v cestno omrežje.

8.2.2 Kriterij prepustnosti

Na podlagi izvedenih analiz se je ugotovilo, da kapacitetni parametri na začetku 20-letne planske dobe leta 2018 niso preseženi tako v obstoječem krožišču, kot tudi v turbo krožišču.

Na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 prihaja v jutranji konici na obstoječem krožišču do nesprejemljivih zamud vozil in posledično do prekoračitev še dovoljene meje nivoja uslug $NU = E$ (na kraku A $NU = F$) v skladu s pravilnikom o projektiranju cest.

V sklopu magistrske naloge so bile izdelane 3 kapacitetne analize. Prva s programom SIDRA, druga z Bovyjevo enačbo in tretja s pomočjo mikrosimulacije.

Na podlagi izvedenih analiz s programom SIDRA se je izkazalo, da so kapacitetni parametri na vseh kraki v sprejemljivih mejah ($NU \leq E$). Najdaljše zamude se pojavljajo na kraku A in sicer 45,9 s na uvoza za levo zavijanje.

Za predlagano rešitev turbo krožišča smo po modificirani Bovyjevi metodi ugotovili, da imamo v jutranji konici na koncu planske dobe leta 2038 najdaljše zamude na kraku C, torej na uvozu iz smeri centra Mengša, ki znašajo 48,9 s. Na kraku A, ki bi bil brez ukrepov najbolj problematičen, se izkaže, da predlagana rešitev odpravlja težave, saj se zamude vozil znižajo na okoli 27 s na obeh uvoznih pasovih. Na ostalih dveh uvozih prav tako ni težav, zamude so povsod krajše kot 17 s. Vidimo, da je po tej metodi izračuna kapacitetnih parametrov predlagana rešitev na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 ustreza, saj je najslabši nivo uslug $NU = E$, kar je po pravilniku o projektiranju še vedno sprejemljiv nivo.

Pri izdelani simulaciji turbo krožišča z uporabo mikrosimulacijskega orodja VISSIM smo v nasprotju z analizo z analitičnim programom SIDRA in modificirano enačbo na kraku A v jutranji konici na koncu planske dobe leta 2038 dobili nesprejemljive dolžine zamud in posledično nesprejemljiv nivo uslug ($NU = F$ na kraku A).

Na podlagi izdelanih kapacitetnih analiz smo ugotovili, da oba analitična modela zadostita pogoju, da mora biti na koncu planske dobe nivo uslug $NU \leq E$. Mikrosimulacijski model je dokazal, da je varianta turbo krožišča kapacitetno ustrežnejša, vendar ne izpolnjuje pogoja dolžine zamud, kot ga predpisuje pravilnik o projektiranju cest.

8.2.3 Prostorski kriterij

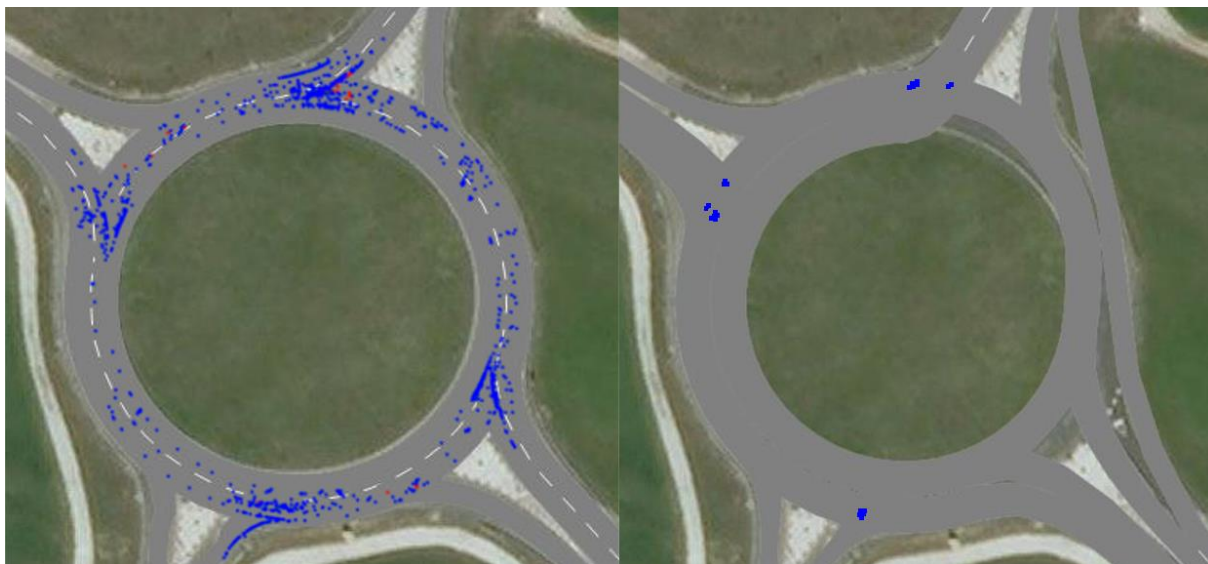
Glede na to, da je na tem območju že obstoječe krožišče, obe varianti zadostujeta temu kriteriju. Okoli krožišča je dovolj prostora, ker neposredno ob njem ni pozidave, v vsakem primeru pa bi bili posegi v prostor tudi ob rekonstrukciji minimalni.

8.2.4 Projektno-tehnični kriterij

Ker je na tej lokaciji že obstoječe krožišče, ki je dokaj novo in projektirano v skladu s predpisi, so vsi priključni kraki pripeljeni v krožišče pravilno, zato to ne predstavlja težav. Problemi bi se lahko pojavili zaradi visokih prometnih obremenitev na stranski prometni smeri (uvoz iz smeri Kamnika – krak A), kar pa s predlagano rešitvijo ni več problematično.

8.2.5 Kriterij prometne varnosti

Iz analize prometne varnosti obstoječega krožišča in turbo krožišča se lahko zaključi, da se kot prometno varnejše križišče izkaže turbo krožišče.



Slika 52: Število konfliktnih točk "menjava voznega pasu" in "križanje" v dvopasovnem krožišču (levo) in turbo krožišču (desno)

V primeru rekonstrukcije bi se zmanjšalo število konfliktnih točk in posledično zmanjšala verjetnost pojava situacij "skoraj nesreča", ki v primeru obstoječega krožišča ne zagotavljajo visokega kriterija

prometne varnosti. Poleg tega na podlagi opazovanja prometa iz snemanja obstoječega stanja (za potrebe štetja vozil) lahko upravičeno trdimo, da se bodo še vedno pojavljale naslednje situacije, da:

- veliko voznikov uvaža iz desnega uvoznega pasu na notranji krožni vozni pas,
- nekateri pri uvažanju izsiljujejo voznike v krožečem toku in
- se velikokrat pojavi tudi izvažanje iz notranjega krožnega pasu.

Vse zgoraj navedene situacije bodo pri predvidenih prometnih obremenitvah v še večji meri kot danes predstavljale situacije "skoraj nesreča" in posledično zmanjševale prometno varnost obstoječega dvopasovnega krožišča.

8.2.6 Ekonomski kriterij

Na obravnavanem območju je že locirano obstoječe dvopasovno krožišča tako, da v primeru rekonstrukcije v turbo krožišče dodatni posegi v parcele (izven obstoječega krožišča) niso predvideni. Dodatni stroški, ki bodo nastali:

- dodatni robniki,
- delineatorji,
- stroški dograditve voziščne konstrukcije "bypass-a", dodatnega izvoznega pasu na kraku B in dela krožnega voznega pasu, kjer sega izven obstoječega,
- stroški rekultivacije dela, kjer se odstrani obstoječa voziščna konstrukcija,
- spremenjena vertikalna in horizontalna signalizacija.

Ti stroški ne bodo predstavljali večjih gradbenih stroškov. Pričakujemo, da bo zaradi zmanjšanja zamud voznikov in števila prometnih nesreč (predvsem manjših, ki jih vozniki rešujejo sami) investicija v rekonstrukcijo upravičena.

8.3 Ugotovitve

Glede na zgornje kriterije in rezultate analize s programskim orodjem SIDRA INTERSECTION in analitično po Bovyjevi metodi lahko zaključimo, da je turbo krožišče kolenastega tipa na tem mestu primernejša rešitev od klasičnega dvopasovnega krožišča. Glede na rezultate izvedenih kapacitetnih analiz bo potrebno pri načrtovanju posebno pozornost nameniti odločitvi o izvedbi v tej magistrski nalogi predlagane rešitve oziroma o dodatnem (izvennivojskem) pasu za leve zavijalce iz kraka A. Iz mikrosimulacije je razvidno, da bi ob pričakovanih prometnih obremenitvah lahko zaradi visokih obremenitev vozil iz kraka B na krak D pojavile težave pri vključevanju vozil na drugih priključnih krakih.

Vozila, ki vozijo preko krožnega križišča močno ovirajo uvažanje vozil iz smeri Kamnika (krak A) in posledično nesprejemljive zamude in zaježitvene dolžine vozil (na kraku A).

Bo pa potrebno pred odločitvijo o obliki krožišča ponovno preveriti pričakovane prometne obremenitve oziroma izdelati ponovno napoved glede na obstoječe stanje. V magistrski nalogi so upoštevane prometne obremenitve iz prometne napovedi iz leta 2007, ki upoštevajo, da bodo do danes že izvedeni določeni projekti oziroma nove industrijske in poslovne cone ter prometne povezave. V prometni napovedi ni upoštevana gospodarska kriza, ki je prizadela tudi Slovenijo, kar je spremenilo načrte in tako se nekateri dejavniki, ki so vključeni v prometno študijo niso nikoli izvedli oz. zaživel. Prav tako je v napovedi upoštevana dokončana prometna povezava od priključka Krtina na AC A1, preko Želodnika, Mengša in Most do Vodic, ki pa tudi ni realizirana

Za potrditev le tega bi bilo potrebno po odprtju četrtega kraka in dokončanju mengeške obvoznice izvesti štetje prometa, novelirati prometni model in izdelati napoved prometnih obremenitev za leto 2038.

V kolikor bi se izkazalo, da bodo prometne obremenitve in deleži zavijalcev dejansko takšni, kot so napovedani v prometni študiji pa na podlagi izdelane mikrosimulacije menimo, da turbo krožišče ne bo sposobno prevzeti vseh prometnih obremenitev v skladu s pravilnikom o projektiranju cest. V takšnem primeru bi bilo smiselno razmisliti ali o semaforiziranem turbo krožišču tipa "turbina", ki ima kapaciteto preko 4000 EO/h ali pa o zunajnivojskem vodenju "levih zavijalcev" na uvozu iz smeri Kamnika, ki ovirajo vse ostale uvoze v krožišče. Tretja možnost pa je izvennivojsko vodenje tranzitnega prometa na mengeški obvoznici, kar bi sprostilo krožišče, ki bi glede na izdelane simulacije v takšnem primeru delovalo brez večjih kapacitetnih problemov.

9 ZAKLJUČEK

V magistrskem delu smo obravnavali dvopasovno krožno križišče na mengerski obvoznici. Izvedli smo prometno-tehnično in prometno-varnostno analizo z namenom predloga ustrežnejše rešitve tako z vidika kapacitetnih parametrov kot z vidika prometne varnosti, saj dvopasovna krožišča niso najboljša rešitev in se zato tudi ne projektirajo več.

Pri analizi smo kot obstoječe stanje (primerjalno omrežje) predpostavili, da ima obstoječe krožišče štiri uvozne krake, saj je gradnja zadnjega manjkajočega kraka le še vprašanje časa. Analiza zajema opis obstoječega krožišča, tehničnih elementov, prometne podatke, ki smo jih pridobili s štetjem prometa ter prometne podatke avtomatskih števec na okoliškem cestnem omrežju.

Izvedli smo tudi analizo prometnih nesreč, ki so se zgodile v obravnavanem krožnem križišču od njegovega odprtja oktobra 2011 pa do konca leta 2017. Žal ta analiza ne odraža dejanskega stanja prometne varnosti, saj so zajete samo prometne nesreče, ki smo jih pridobili na spletni strani Javne agencije Republike Slovenije za varnost prometa. V ta vzorec niso zajete prometne nesreče, ki niso prijavljene policiji, ampak jih udeleženci rešujejo samo s prijavo škode pri zavarovalnici. Večje zavarovalnice v Sloveniji smo zaprosili za te podatke, vendar jih nismo prejeli.

Za zasnovo predloga rekonstrukcije smo potrebovali napoved prometnih obremenitev v ciljnem letu 2038. Te smo pridobili iz prometne študije, ki jo je za to območje izdelalo podjetje PNZ d.o.o. leta 2007. Napoved je bila izdelana za leto 2033, tako da smo prometne obremenitve iz študije za naše potrebe korigirali z enotno 1 % letno rastjo na leto 2038. Glede na predvidene prometne obremenitve smo se odločili za predlog turbo krožišča kolenastega tipa z "bypass-om" iz kraka B na krak A, ki razbremenjuje krožno križišče v času popoldanske konice, ko je prometni tok iz mengerske obvoznice proti Kamniku zelo močan.

Za obe obravnavani rešitvi primerjalno omrežje in predlagano rešitev turbo krožišča smo izvedli kapacitetno analizo s pomočjo programskega orodja SIDRA INTERSECTION, kot to za bolj zahtevna krožišča zahteva tehnična specifikacija za krožna križišča. Še dodatno smo obe rešitvi analizirali z analitičnim modelom po Bovyjevi in modificirani Bovyjevi metodi.

Na koncu 20-letne planske dobe leta 2038 v merodajni jutranji konici v obstoječem krožišču prihaja do nesprejemljivih zamud vozil in posledično do prekoračitev še dovoljene meje nivoja uslug $NU = E$ (na kraku A $NU = F$) v skladu s pravilnikom o projektiranju cest. Na podlagi izvedenih analiz s programom SIDRA se je izkazalo, da so kapacitetni parametri na vseh kraki v sprejemljivih mejah ($NU \leq E$). Najdaljše zamude se pojavljajo na kraku A, in sicer 45,9 s na uvoza za levo zavijanje.

Za predlagano rešitev turbo krožišča smo po modificirani Bovyjevi metodi ugotovili, da imamo v jutranji konici na koncu planske dobe leta 2038 najdaljše zamude na kraku C, torej na uvozu iz smeri centra Mengša, ki znašajo 48,9 s. Na kraku A, ki bi bil brez ukrepov najbolj problematičen, se izkaže da predlagana rešitev odpravlja težave, saj se zamude vozil znižajo na okoli 27 s na obeh uvoznih pasovih. Na ostalih dveh uvozih prav tako ni težav, zamude so povsod krajše kot 17 s. Vidimo, da je po tej metodi

izračuna kapacitetnih parametrov predlagana rešitev na koncu 20 letne planske dobe leta 2038 ustreza, saj je najslabši nivo uslug $NU = E$, kar je po pravilniku o projektiranju še vedno sprejemljiv nivo.

Za oba primera smo izdelali tudi simulacijski model. Ker je merodajna jutranja prometna konica, smo zanj izvedli mikrosimulacijo na koncu planske dobe leta 2038. Poleg kapacitetnih parametrov smo kot rezultat simulacije dobili tudi trajektorije vozil, ki smo jih uporabili kot vhodni podatek za modelsko analizo konfliktnih točk.

Na podlagi izdelanih kapacitetnih analiz smo ugotovili, da oba analitična modela zadostita pogoju, da mora biti na koncu planske dobe nivo uslug $NU \leq E$. Mikrosimulacijski model pa je dokazal, da je varianta turbo krožišča kapacitetno ustrežnejša, vendar ne izpolnjuje pogoja o nivoju uslug, kot ga predpisuje pravilnik o projektiranju cest.

Na podlagi analize prometne varnosti obstoječega krožišča in turbo krožišča lahko zaključimo, da se turbo krožišče izkaže kot prometno varnejše. V primeru rekonstrukcije bi se zmanjšalo število konfliktnih točk, ki v primeru obstoječega krožišča ne zagotavljajo visokega kriterija prometne varnosti.

Generalno gledano je torej rekonstrukcija obstoječega krožišča smiselna in upravičena tako iz vidika prometne varnosti kot z vidika kapacitetnih parametrov.

VIRI

Google Zemljevidi - ©2018 Google.

<https://www.google.com/maps> (pridobljeno 11. 6. 2018).

Guzelj, T., Jelenc, M., Lovrečič, D., Pretnar, G., Trošt, D., Nose, M. 2007. Prometna študija ter prometno in ekonomsko vrednotenje nove cestne povezave Želodnik-Mengeš-Vodice, PNZ svetovanje projektiranje d.o.o., Ljubljana: 24 str.

Javni pregledovalnik grafičnih podatkov MKGP

<http://rkg.gov.si/GERK/WebViewer/> (pridobljeno 14. 7. 2018).

Perme, S. 2013. Kapaciteta krožnega križišča z upoštevanjem izvoznega toka. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Perme): 97 str.

Podatki o prometu 2011-2017. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo

http://www.di.gov.si/si/delovna_podrocja_in_podatki/ceste_in_promet/podatki_o_prometu/ (pridobljeno 3. 8. 2018).

Pretnar, G. 2004. Primerjava modelov za fazo obremenjevanja cestnega omrežja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G. Pretnar): 67 str.

PTV VISSIM 10 User manual 2018. Karlsruhe, PTV AG: 1170 str.

SIDRA INTERSECTION 7 user guide, december 2017. Balwyn, Akcelik & Associates Pty Ltd: 731 str.

Slika turbo krožnega križišča

https://www.inteylingen.nl/resize/upload/18/1745/DJI_0029-SOCIALSHARING.jpg

(pridobljeno 16. 7. 2018).

Tollazzi, T., Toplak, S., Jovanović, G. 2006. Ocena kapacitete turbo krožnega križišča. Gradbeni vestnik 55, 12: 310-318.

TSC 02.XXX:2015 Krožna križišča s spiralnim potekom krožnega vozišča – turbo krožna križišča. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo: 38 str.

TSC 03.341:2011. Krožna križišča. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste: 40 str.