

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Jamova 2, p.p. 3422  
1115 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



**MAGISTRSKI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
PROMETNA SMER**

Kandidat:

**GREGOR PRETNAR, univ. dipl. inž. grad.**

**MODELIRANJE UKREPOV ITS V MIKROSKOPSKI  
SIMULACIJI**

**Magistrsko delo štev.: 219**

**MODELLING OF ITS MEASURES WITH  
MICROSCOPIC SIMULATION**

**Master of Science Thesis No.: 219**

**Mentor:**  
doc. dr. Tomaž Maher

**Predsednik in član komisije:**  
doc. dr. Marijan Žura

**Član:**  
izr. prof. dr. Tomaž Kastelic

Ljubljana, 20. junij 2011

## **POPRAVKI**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

## **IZJAVE**

Podpisani **GREGOR PRETNAR** izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom:  
“**MODELIRANJE UKREPOV ITS V MIKROSKOPSKI SIMULACIJI**”

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

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

Ljubljana, 20. 6. 2011

Podpis:

---

## **BIBLIOGRAFSKA-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK: 625.7:004.94 (043.2)**

**Avtor: Gregor Pretnar**

**Mentor: doc. dr. Tomaž Maher**

**Naslov: Modeliranje ukrepov ITS v mikroskopski simulaciji**

**Obseg in oprema: 98 str., 18 pregl., 56 sl.**

**Ključne besede: inteligentni transportni sistemi, mikroskopska simulacija, ITS ukrep**

### **Izvleček:**

Magistrsko delo obravnava uporabo mikroskopske simulacije za modeliranje ITS ukrepov. V začetnem delu naloge je predstavljena tematika, vsebina in aktualnost. V drugem poglavju so predstavljeni ukrepi ITS, ki so primerni za modeliranje v mikroskopski simulaciji. To so predvsem ukrepi za povečanje kapacitet na samem cestnem omrežju. Tretje poglavje podaja osnove mikroskopskega modeliranja s poudarkom na tistih vsebinah, ki so ključne pri ITS ukrepih. Predstavljeno je tudi ekonomsko vrednotenje na podlagi rezultatov mikroskopske simulacije. Četrto poglavje je ključni del naloge, to je modeliranje in analiza rezultatov uvedbe ITS ukrepov. Za posamezne praktične primere so rezultati prikazani vizualno in analitično, na način, ki hkrati predstavi možnosti, ki jih za to ponujajo orodja za mikroskopsko simulacijo. V zaključku so povzete koristi, ki jih prinaša uvedba ITS ukrepov in podani predlogi za še hitrejše uvajanje ITS tehnologije v slovenski prostor.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDK: 625.7:004.94 (043.2)**

**Author: Gregor Pretnar**

**Supervisor: Assist. Prof. Tomaž Maher, Ph. D.**

**Title: Modelling of ITS measures with microscopic simulation**

**Notes: 98 p., 18 tab., 56 fig.**

**Key words: Intelligent transport systems, microscopic simulation, ITS measure**

### **Abstract:**

The present master's thesis deals with the use of microscopic simulation to model ITS measures. The beginning of the thesis presents the theme, its relevance and content. The second chapter presents the ITS measures that are appropriate for modeling with the microscopic simulation. These are mainly measures to increase capacity of the road network. The third chapter presents basics of microscopic modeling with emphasis on those topics that are relevant for ITS measures. Economic evaluation based on the results of microscopic simulations is also presented. The fourth chapter is a key part of the task, that is, modeling and analysis of the results of ITS measure deployment. For all practical examples the results are shown visually and analytically, in a way that simultaneously presents opportunities to do so by suitable software for the microscopic simulation. Conclusion summarizes the benefits from the introduction of ITS measures and proposes even faster deployment of ITS technologies in Slovenian.

## SLOVAR POJMOV IN TUJK

*hard shoulder* (tudi *shoulder metering*) - ukrep uporabe odstavnega pasu

homogenizacija (prometnega toka) - ukrep dinamičnega spreminjanja dovoljene (priporočene) hitrosti (z namenom poenotenja prometnega toka)

ITS (inteligentni transportni sistemi) - uporaba informacijske in komunikacijske tehnologije v prometnih sistemih

kalibracija - postopek prilagajanja modelskih parametrov

*lane control* - ukrep spremenljive uporabe voznih pasov

*ramp metering* - ukrep nadzorovanega uvoza na večpasovno cesto

SNVP (sistem za nadzor in vodenje prometa) - sistem za upravljanje s prometnim tokom (cestnega omrežja), ki na podlagi obdelave zbranih prometnih in vremenskih podatkov ter podatkov o izrednih dogodkih (delo na cesti, prometna nesreča, zaustavljeno vozilo, vožnja v napačno smer), določa ukrepe in o njih preko različnih načinov obvešča udeležence v prometu

SPIS (spremenljiva prometno-informativna signalizacija) - signalne naprave, ki omogočajo prikaz prometnih vsebin (na primer omejitve hitrosti, opozorila, navodila) v okviru ukrepov vodenja prometa in so običajno nameščene na portalih

validacija - postopek preverjanja ustreznosti rezultatov modela glede na izmerjene vrednosti (prometni tok, hitrost, potovalni časi)

vrednotenje - postopek ugotavljanja prometnih, ekonomskih, okoljevarstvenih in drugih učinkov obravnavane investicije in s tem njene upravičenosti

*Žanu*

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Tomažu Maherju za pomoč pri magistrskem delu.

Hvala tudi ing. Tomažu Guzelju in ing. Dubravku Lovrečiču za nesebično pomoč in bogate izkušnje, kakor tudi drugim sodelavcem oddelka promet podjetja PNZ svetovanje projektiranje d.o.o.

Hvala mag. Juretu Pircu iz podjetja Traffic Design d.o.o. za ideje, spodbudo in pomoč.

Hvala moji dragi ženi Mateji za vse.

Hvala staršem in bratu za vzor in podporo.



## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Aktualnost tematike.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Namen naloge.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3</b>	<b>Pregled vsebine.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>UKREPI ITS .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Uporaba odstavnega pasu .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Nadzorovan uvoz (kontrola dostopa).....</b>	<b>7</b>
<b>2.3</b>	<b>Spremenljiva oblika cestne infrastrukture.....</b>	<b>8</b>
2.3.1	Spremenljiva uporaba voznih pasov.....	10
<b>2.4</b>	<b>Homogenizacija prometnega toka.....</b>	<b>10</b>
<b>2.5</b>	<b>Preusmerjanje .....</b>	<b>11</b>
<b>2.6</b>	<b>Upravljanje parkirnih površin za osebna in tovorna vozila .....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>MIKROSKOPSKA SIMULACIJA .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Modeli obnašanja.....</b>	<b>15</b>
3.1.1	Model sledenja vozil.....	16
3.1.2	Model menjave pasov .....	16
3.1.3	Model prometnih pravil prednosti .....	17
<b>3.2</b>	<b>Vhodni podatki.....</b>	<b>17</b>
3.2.1	Območje obdelave .....	17
3.2.2	Cestno omrežje .....	18
3.2.3	Coning.....	19
3.2.4	Matrika potovanj.....	19
3.2.5	Terenske meritve .....	19
<b>3.3</b>	<b>Obremenjevanje.....</b>	<b>20</b>
3.3.1	Način izbire poti .....	20
<b>3.4</b>	<b>Kalibracija in validacija.....</b>	<b>21</b>
<b>3.5</b>	<b>Analiza rezultatov .....</b>	<b>26</b>
<b>3.6</b>	<b>Ekonomsko vrednotenje ITS ukrepov na podlagi rezultatov mikroskopske simulacije.....</b>	<b>26</b>

<b>4</b>	<b>PRIMERI UPORABE .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Modeliranje v fazi načrtovanja .....</b>	<b>30</b>
4.1.1	Ukrep spremenljive uporabe odstavnega pasu .....	30
4.1.2	Ukrep nadzorovanega uvoza na avtocesto .....	35
4.1.3	Ukrep spremenljive redukcije pri vključevanju .....	40
4.1.4	Ukrep spremenljive uporabe voznih pasov v razcepu .....	46
<b>4.2</b>	<b>Modeliranje v fazi upravljanja .....</b>	<b>55</b>
4.2.1	Ukrepi sistema za nadzor in vodenje prometa (SNVP) na ljubljanski obvoznici .....	56
4.2.2	Kalibracija in validacija .....	57
4.2.3	Ukrep preusmerjanja .....	66
4.2.4	Homogenizacija prometnega toka .....	75
<b>4.3</b>	<b>Uporaba mikroskopske simulacije v realnem času .....</b>	<b>84</b>
<b>4.4</b>	<b>Povzetek .....</b>	<b>87</b>
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČKI .....</b>	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>POVZETEK .....</b>	<b>92</b>
<b>7</b>	<b>SUMMARY .....</b>	<b>94</b>
<b>VIRI</b>	<b>.....</b>	<b>96</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 4-1: Pregled praktičnih primerov modeliranja ITS ukrepov z mikroskopsko simulacijo .....	29
Preglednica 4-2: Primerjava potovalnega časa in hitrosti brez ITS ukrepa in z njim .....	34
Preglednica 4-3: Sprememba prometa ob uvedbi vinjet in odprtju predora Šentvid na avtocestnem odseku Vodice - Lj.-Šmartno .....	36
Preglednica 4-4: Analiza prometnih koristi ITS ukrepa .....	46
Preglednica 4-5: Analiza prometne učinkovitosti za celotno omrežje, jutranja konica, leto 2015 .....	49
Preglednica 4-6: Pregled investicijskih stroškov za vzpostavitev ukrepa ITS spremenljive uporabe odstavnih pasov .....	51
Preglednica 4-7: Stroški časa za voznike in sopotnike osebnih vozil, ter za voznike tovornih vozil, cene september 2009 .....	52
Preglednica 4-8: Delež potovanj po namenih z osebnim avtom .....	52
Preglednica 4-9: Ekonomska upravičenost uvedbe ITS ukrepa spremenljive uporabe voznih pasov .....	54
Preglednica 4-10: Ustreznost kalibracije makroskopskega modela, jutranja konica, leto 2008 .....	58
Preglednica 4-11: Možni obvozi in delež preusmerjenih voznikov .....	68
Preglednica 4-12: Učinkovitost ITS ukrepov pri prometni nesreči v predoru Šentvid, jutranja konica, leto 2012 .....	74
Preglednica 4-13: Učinkovitost ITS ukrepov pri prometni nesreči v predoru Šentvid, popoldanska konica, leto 2012 .....	74
Preglednica 4-14: Primerjava učinkov brez ITS ukrepov in z njim pri nesreči v predoru Šentvid, leto 2012 .....	74
Preglednica 4-15: Vrednosti parametrov z ITS ukrepom homogenizacije in brez njega, jutranja konica, leto 2008 .....	78
Preglednica 4-16: Prometno-varnostna analiza .....	80
Preglednica 4-17: Indikatorji prometne varnosti na analiziranem odseku .....	83
Preglednica 4-18: Povzetek vrednotenja ITS ukrepov .....	87

## KAZALO SLIK

Slika 2-1: Primer ITS ukrepa uporabe odstavnega pasu na britanski avtocesti M42 (Highway Agency, 2011) .....	6
Slika 2-2: Primer ITS ukrepa uporabe odstavnega pasu na nemški avtocesti (pri Muenchnu)..	7
Slika 2-3: ITS ukrep nadzorovanega uvoza na avtocesto (TU Delft, 2011).....	8
Slika 2-4: Primer ITS ukrepa spremenljive oblike infrastrukture, Tampa Bay Reversible Express Way (THEA, 2011).....	9
Slika 2-5: Primer ITS ukrepa spremenljive oblike križišča (Immers, 2008).....	9
Slika 2-6: Primer ITS ukrepa homogenizacije prometnega toka na ljubljanski obvoznici .....	11
Slika 2-7: Primer ITS ukrepa preusmerjanja na ljubljanski obvoznici.....	12
Slika 2-8: Primer ITS ukrepa upravljanja parkirišč, Dublin (Dambach, 2011).....	12
Slika 2-9: Primer ITS ukrepa razporejanja tovornih vozil, Avstrija (ASFINAG, 2011).....	13
Slika 3-1: Medsebojna odvisnost voznik-vozilo-omrežje .....	15
Slika 3-2: Porazdelitev verjetnosti željene hitrosti za različni vrsti večpasovnih cest (DARS, 2009).....	22
Slika 3-3: Parametri modela sledenja vozilu (PTV, 2009).....	23
Slika 3-4: Parametri modela menjave pasu (PTV, 2009) .....	24
Slika 3-5: Graf hitrosti v odvisnosti od prometnega toka (minutne vrednosti prenesene na urno vrednost) (DARS, 2009).....	25
Slika 4-1: Obseg mikroskopske simulacije, prihodnje primerjalno omrežje z vključenimi predvidenimi investicijami (PNZ, 2008a) .....	31
Slika 4-2: Zgoščen promet z zastoji v popoldanski konici na odseku severne obvoznice med krožiščem Tomačevo in priključkom Nove Jarše (BTC), leto 2008 .....	32
Slika 4-3: ITS ukrep uporabe odstavnega pasu na kratkem odseku Tomačevo-Šmartinska....	33
Slika 4-4: Krožišče Tomačevo, popoldanska konica, leto 2008, omrežje brez ITS ukrepov...33	
Slika 4-5: Krožišče Tomačevo, popoldanska konica, leto 2008, omrežje z ITS ukrepom spremenljive uporabe odstavnega pasu .....	34
Slika 4-6: Priključek Šmartno, jutranja konica, leto 2012, omrežje brez ITS ukrepov.....	37
Slika 4-7: Priključek Šmartno, jutranja konica, leto 2012, omrežje z ukrepom nadzorovanega uvoza.....	38

Slika 4-8: Priključek Šmartno, jutranja konica, leto 2010, primerjava povprečnih hitrosti vozil na omrežjih brez ukrepa nadzorovanega uvoza in z njim .....	39
Slika 4-9: Območje priključka Slavček (Prometno-informacijski center za državne ceste, 2010).....	40
Slika 4-10: Skica ITS ukrepa na priključku Slavček (Traffic Design, 2011).....	41
Slika 4-11: Območje obdelave mikroskopskega modela .....	42
Slika 4-12: Shema algoritma za izvajanje ITS ukrepa .....	43
Slika 4-13: Odzivnost ITS ukrepa na prometne razmere (dolžina vrst na rampi HC in Šmarski cesti) .....	44
Slika 4-14: Statistična analiza dolžine najdaljših vrst .....	45
Slika 4-15: Razcep Malence, jutranja konica, leto 2015, omrežje brez ITS ukrepov .....	47
Slika 4-16: Razcep Malence, jutranja konica, leto 2015, omrežje z ITS ukrepom spremenljive uporabe voznih pasov .....	48
Slika 4-17: Shematski prikaz vhodnih podatkov in rezultatov orodja TUBA.....	50
Slika 4-18: Povezava med makroskopskim in mikroskopskim modelom ter ekonomskim izračunom .....	53
Slika 4-19: Letne koristi v obdobju vrednotenja .....	54
Slika 4-20: Vrste prihrankov .....	55
Slika 4-21: Shema SNVP na ljubljanskem avtocestnem obroču in priključnih krakih (DARS, 2009) z mesti odločanja/preusmerjanja .....	56
Slika 4-22: Prometne obremenitve in ujemanje s števničnimi podatki, jutranja konica, leto 2008 .....	59
Slika 4-23: Vzrok zastoja (pomoč na cesti).....	60
Slika 4-24: Časovni in prostorski razvoj zastoja (vizualno).....	61
Slika 4-25: Časovni razvoj zastoja (analitično).....	62
Slika 4-26: Primerjava minutnih vrednosti povprečne hitrosti v mikroskopski simulaciji z izmerjenimi vrednostmi na lokaciji detektorja A1L.....	63
Slika 4-27: Primerjava minutnih vrednosti povprečne hitrosti v mikroskopski simulaciji z izmerjenimi vrednostmi na lokaciji detektorja 03L.....	64
Slika 4-28: Primerjava minutnih vrednosti povprečne hitrosti v mikroskopski simulaciji z izmerjenimi vrednostmi na lokaciji detektorja 02L.....	64

Slika 4-29: Primerjava minutnih vrednosti povprečnega urnega pretoka vozila v mikroskopski simulaciji z izmerjenimi vrednostmi na lokaciji detektorja 03L .....	65
Slika 4-30: Primerjava minutnih vrednosti povprečnega urnega pretoka vozila v mikroskopski simulaciji z izmerjenimi vrednostmi na lokaciji detektorja 02L .....	66
Slika 4-31: Skupna zamuda vseh vozil med 7. in 9. uro zjutraj .....	69
Slika 4-32: Lokacija nesreče v predoru Šentvid .....	71
Slika 4-33: Priključek Šentvid, jutranja konica, leto 2012, omrežje brez ITS ukrepa preusmerjanja .....	71
Slika 4-34: Priključek Šentvid, jutranja konica, leto 2012, omrežje z ITS ukrepom preusmerjanja .....	72
Slika 4-35: Priključek Šentvid, popoldanska konica, leto 2012, omrežje brez ITS ukrepa preusmerjanja .....	73
Slika 4-36: Priključek Šentvid, popoldanska konica, leto 2012, omrežje z ITS ukrepom preusmerjanja .....	73
Slika 4-37: Shema postopka analize učinkov ITS ukrepa na prometno varnost na podlagi rezultatov mikroskopske simulacije .....	76
Slika 4-38: Vrste konfliktov, kot jih upošteva programsko orodje SSAM (Jelenc, 2010, povzeto po SSAM) .....	77
Slika 4-39: Analiza konfliktnih točk brez ITS ukrepa homogenizacije prometnega toku (levo) in z njim (desno) .....	80
Slika 4-40: Pojav nenadnega zaviranja v območju prepletanja- priključek Šentjakob .....	82
Slika 4-41: Obravnavani koridor, ki ga pokriva model v realnem času .....	85
Slika 4-42: Primer postopka ocenjevanja, izbire in potrditve strategije ukrepanja .....	86

## 1 UVOD

Promet je za sodoben način življenja pomembno merilo njegove kakovosti. Omogoča in pospešuje razvoj, hkrati pa slabe prometne razmere ovirajo gospodarski razvoj, onesnažujejo okolje in zavirajo razvoj urbanega prostora, kar je vse dobro vidno tudi v Sloveniji.

Promet raste ne glede na demografsko in ekonomsko situacijo. Glavni element rasti je poleg ekonomskega razvoja, ki vpliva predvsem na poslovni in tovorni promet, rast mobilnosti. Povečuje se namreč predvsem število nedelovnih potovanj. Če je bilo včasih obveznih potovanj (delo, šola) okoli 60 %, jih je danes manj kot tretjino (PNZ in drugi, 2003). V razvitih državah je ta delež še manjši in je okoli 20 % (INFAS in drugi, 2010).

V Evropski Uniji, katere del je danes Slovenija, je na cestah vsak dan okoli 300 milijonov voznikov. Zastoji, povezani s prometom, na ravni Evropske unije stanejo vsako leto okoli 100 milijard evrov oziroma 1 % bruto družbenega proizvoda celotne unije. Že danes je namreč okoli 10 % vseh evropskih cest obremenjenih z dnevnimi zastoji. Zaradi naraščanja števila voznikov in prevožene razdalje Evropska komisija pričakuje, da bo do leta 2050 omenjeni strošek narastel na 200 milijard evrov (2011). In to kljub številnim predvidenim ukrepom.

Gradnja prometnih sistemov (cestna infrastruktura, sistemi javnega prevoza) zahteva velika sredstva, hkrati pa imajo prometni sistemi dolgo življenjsko dobo in s tem povezane dolgoročne vplive. Že danes, predvsem pa v bližnji prihodnosti, bo zelo pomembno, da so prometni sistemi čim bolj izkoriščeni, saj bo prostora za novogradnje vse manj. Učinkovitost prometnih sistemov lahko izboljšamo s pametnim upravljanjem tako samih sistemov (angleško *traffic management*) kot tudi prometnih potreb (*demand management*).

Naloga prometnega načrtovanja je zagotoviti organom odločanja (angleško *decision-maker*) na vseh ravneh (država, lokalna skupnost, upravljavec) čim bolj zanesljive informacije tako v fazi načrtovanja kot v fazi upravljanja.

Upravljanje prometnih sistemov in omrežij je ena od možnosti integrirane uporabe komunikacijskih, nadzornih in informacijskih tehnologij v prometu, ki se je v svetu uveljavila pod skupnim imenom inteligentni transportni sistemi (ITS). Za upravljanje prometnega

omrežja se uporablja več sistemov, ki se razlikujejo predvsem po njihovih možnostih vplivanja na sam sistem. Slovenska ITS arhitektura SITSA-C definira področje sistemov za upravljanje prometa kot eno izmed funkcij inteligentnih transportnih sistemov (PTI, 2005). Področje sistemov za upravljanje prometa sestavljajo podpodročja zagotavljanja delovanja svetlobno-signalizacijskih naprav, upravljanja v primeru nesreč, upravljanja povpraševanja, zagotavljanja informacij o vplivih na okolje in vzdrževanja. Najosnovnejši je torej sistem za nadzor prometa (angleško *traffic control system*), kjer upravljavec nadzira odvijanje prometa in po potrebi spreminja delovanje svetlobno-signalizacijskih naprav (semaforji, spremenljiva prometno-informativna signalizacija). Nadgradnja je sistem za vodenje prometa (angleško *traffic management system*), kjer so večje možnosti za upravljanje cestne infrastrukture (možnost spreminjanja in povečevanja kapacitet v konicah, preusmerjanje voznikov v primeru izrednih dogodkov). V primeru povezave več sistemov za nadzor in vodenje prometa (cestna infrastruktura, javni promet) s sistemi za informiranje (internet, navigacija v vozilih, TMC) lahko govorimo o kompleksnem prometno potovalnem informacijskem sistemu (angleško *traffic information system*), kjer upravljamo tako s ponudbo (cestna infrastruktura) kot povpraševanjem (vozniki).

## 1.1 Aktualnost tematike

V Sloveniji se je za inteligen ten transportni sistem za upravljanje cestnega omrežja uveljavil izraz sistem za nadzor in vodenje prometa (SNVP), ki omogoča zbiranje prometnih podatkov, njihovo obdelavo in podajanje prometno potovalnih informacij preko grafičnih prikazovalnikov spremenljive prometno-informativne signalizacije. Trenutno pri nas delujejo štiri SNVP. Prva dva SNVP sta bila postavljena na avtocestnih odsekih Klanec-Srmin (2004) z nadzornim centrom v Kozini in Vransko-Blagovica (2005) z nadzornim centrom na Vranskem. Glavni razlog za postavitev omenjenih SNVP je bilo zagotavljanje prometne varnosti zaradi zahtevnosti odsekov (predori, viadukti, vremenske razmere). Tretji SNVP je začel delovati leta 2008 na zahodnem delu ljubljanske obvoznice in je prva faza širšega sistema, ki bo pokrival celoten obroč okoli Ljubljane s priključnimi kraki. Avtocestni obroč okoli Ljubljane je prometno in varnostno eden najbolj zahtevnih v državi. Vanj se stekajo in v njem prepletajo prometni tokovi obeh glavnih smeri slovenskega avtocestnega križa, hkrati pa



predstavlja tudi obvoznico in mestno hitro cesto glavnega mesta. Zato je naloga SNVP (poleg zagotavljanja večje varnosti) predvsem povečanje izkoriščenosti prometnega omrežja in s tem povezano zmanjšanje prometnih zastojev. Nadzorni center se je v letu 2010 iz Brda preselil v regionalni nadzorni center v Dragomlju. V letu 2009 je začel nadzorni center v Kozini nadzorovati tudi novi odsek hitre ceste čez Rebrnice. Zadnji SNVP je začel leta 2010 delovati na območju predora Karavanke.

Preden se dokončno odločimo za uvedbo sistema ITS je običajno potrebno oceniti, kakšne koristi prinaša in če bo naložba upravičena. Na splošno se projekte ITS vrednoti tako, kot druge prometne projekte. Naložba je upravičena, če zaželeni učinki presegajo nezaželene.

Vprašanje pa je, kako ugotoviti koristi in upravičenost uvedbe sistema ITS? Mnoge tehnologije, povezane z uvedbo inteligentnih transportnih sistemov, so relativno nove, in za zdaj delujejo le v nekaterih deželah. Zato še ni razvitih ustaljenih postopkov za napoved njihove prometne učinkovitosti. Ekonomsko vrednotenje ITS zato predstavlja zelo kompleksno nalogo, saj tradicionalne kvantitativne metode pogosto ne zmorejo ustrezno vrednotiti njegovih učinkov, predvsem pa ne vseh učinkov.

V zadnjih letih se je tudi v Sloveniji uveljavilo prometno modeliranje z mikroskopsko simulacijo, ki daje realno oceno sedanjih ali prihodnjih prometnih razmer. Zato je mikroskopska simulacija zelo koristno orodje v projektiranju in upravljanju sistemov ITS. Inteligentni transportni sistem je namreč samo orodje v rokah upravljavca. Od njega je odvisno, kako dobro bo sistem izkoriščen.

Sodelovanje prometnih planerjev in načrtovalcev sistemov ITS zahtevajo tudi okoliščine, v katerih delujejo. Prometni planerji so pri iskanju rešitev prometnih težav zelo omejeni s prostorskimi in drugimi omejitvami, zato je uporaba ITS ukrepov za izboljšanje prometnega sistema včasih edina rešitev. Na drugi strani je možnost preverjanja učinkov omenjenih sistemov (pred ali med samim delovanjem) zelo koristna tudi za načrtovalce teh sistemov, ki so pogosto inovativni in v praksi nepreizkušeni.

## **1.2 Namen naloge**

Namen te magistrske naloge je preveriti uporabo mikroskopske simulacije za modeliranje ukrepov ITS, hkrati pa preko rezultatov vrednotenja praktičnih primerov tudi dokazati učinkovitost teh ukrepov in pospešiti njihovo hitrejše uveljavljanje.

## **1.3 Pregled vsebine**

Magistrsko delo sestavlja pet poglavij. V uvodnem poglavju je predstavljena aktualnost tematike in namen naloge. V drugem poglavju so predstavljeni in opisani ITS ukrepi, ki se jih lahko modelira v mikroskopski simulaciji. Tretje poglavje opisuje osnove mikroskopske simulacije in delovne faze izdelave modela.

Četrto poglavje opisuje praktične primere uporabe v fazah načrtovanja in upravljanja. Za vsak ukrep je podan pristop in način modeliranja ter prikazani rezultati. Opisana je tudi uporaba mikroskopske simulacije v realnem času kot sestavni del sistema za nadzor in vodenje prometa.

V zadnjem poglavju so podani zaključki in predlog za že večjo uveljavitev uporabe ukrepov ITS v Sloveniji.

## 2 UKREPI ITS

Inteligentni transportni sistemi in storitve predstavljajo združevanje informacijske in komunikacijske tehnologije v vozilih, na prometnem omrežju in pri uporabnikih. Uvedba in uporaba vsake tehnologije zahteva skrbno načrtovanje. Zaradi nenehnega razvoja tehnologije, povezane z inteligentnimi transportnimi sistemi in njene raznovrstnosti je veliko različnih ukrepov. V magistrski nalogi je poudarek na ukrepih na samem cestnem omrežju, ki jih je mogoče simulirati z mikroskopsko simulacijo, zato so v nadaljevanju ti naštet in opisani.

Povečanje kapacitete obstoječih (ali načrtovanih) prometnih povezav in izboljšanje prometne varnosti lahko dosežemo z naslednjimi ukrepi:

- uporaba odstavnega pasu,
- nadzorovan uvoz (uvozna rampa) na avtocesto oziroma hitro cesto,
- spremenljiva cestna infrastruktura,
- dinamičen nadzor hitrosti (homogenizacija prometnega toka),
- preusmerjanje na alternativne poti,
- upravljanje parkirnih površin za tovorna vozila.

### 2.1 Uporaba odstavnega pasu

Uporaba odstavnega pasu (*hard shoulder* ali *shoulder metering*) je ukrep, kjer se ob povečanju pretoka voznikom dovoli uporaba odstavnega pasu. Ta mora imeti ustrezno voziščno konstrukcijo in prometno signalizacijo. Ukrep je razmeroma enostavno vzpostaviti (ob seveda že postavljeni komunikacijski infrastrukturi in nadzornem centru), saj potrebujemo detektorje stanja (števeci prometa) in spremenljivo prometno-informativno signalizacijo (SPIS). Prikazovalniki SPIS s simbolom (običajno zelena puščica in rdeči križ) sporočata

voznikom možnost uporabe odstavnega pasu. Ukrep se že množično uporablja, predvsem v Nemčiji in Veliki Britaniji. Pri nas so možnosti za omenjeni ukrep omejene, saj so običajno razdalje med priključki v urbanem okolju, kjer je ukrep najbolj učinkovit, prekratke.



Slika 2-1: Primer ITS ukrepa uporabe odstavnega pasu na britanski avtocesti M42 (Highway Agency, 2011)

Figure 2-1: ITS measure “hard shoulder” on British M42 motorway (Highway Agency, 2011)



Slika 2-2: Primer ITS ukrepa uporabe odstavnega pasu na nemški avtocesti (pri Muenchnu)

Figure 2-2: ITS measure “hard shoulder” on German highway near Munich

## 2.2 Nadzorovan uvoz (kontrola dostopa)

Ukrep nadzorovanega uvoza na večpasovno cesto (*ramp metering*) je ukrep, kjer nadzorujemo in po potrebi s semaforjem omejimo uvozni tok vozil, ki moti glavni tok. Ukrep je lahko zelo učinkovit, če obstaja dovolj zmogljivo sekundarno omrežje, ki je sposobno prenesti povečane obremenitve. Mikroskopska simulacija je zelo primerno orodje, saj za razliko od analitičnih metod obravnava posledice ukrepa na širšem omrežju. V Sloveniji je ta ukrep zaradi zasičenosti sekundarnega omrežja težko vzpostaviti. Največ se ga uporablja na Nizozemskem in v Združenih državah Amerike.



Slika 2-3: ITS ukrep nadzorovanega uvoza na avtocesto (TU Delft, 2011)

Figure 2-3: ITS measure “ramp metering” on Dutch highway (TU Delft, 2011)

Poseben primer nadzorovanega uvoza je v primeru večpasovnega turbo krožišča, kjer se, glede na prometne tokove, spreminja vodenje prometa skozi krožišče.

### 2.3 Spremenljiva oblika cestne infrastrukture

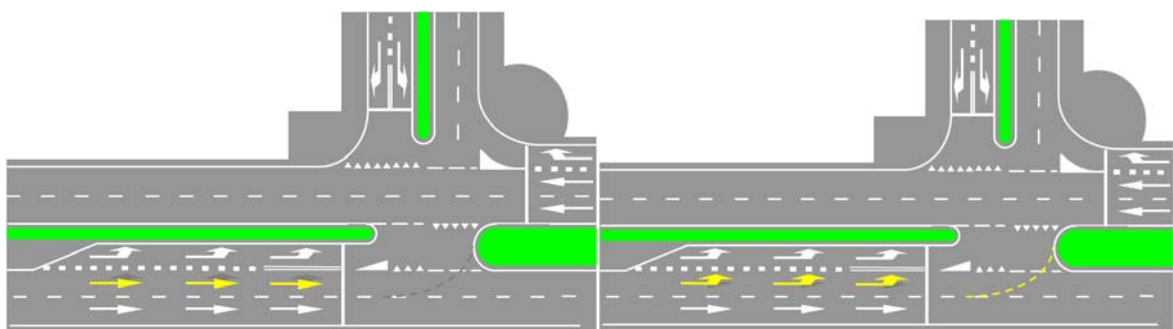
Spremenljiva oblika cestne infrastrukture je ukrep, kjer se s spremenljivo linijsko signalizacijo (SLS) spremeni oblika in/ali funkcija odseka, križišča ali priključka. Cestnemu odseku se lahko spremeni usmerjenost, običajno se jo spremeni enemu voznemu pasu na večpasovni cesti. S tem se doseže bistveno povečanje kapacitete v bolj obremenjeni smeri. Za ukrep so primerne predvsem glavne mestne ceste, vpadnice ali avenije z ustreznimi križišči, kjer lahko pride do spremembe.



Slika 2-4: Primer ITS ukrepa spremenljive oblike infrastrukture, Tampa Bay Reversible Express Way (THEA, 2011)

Figure 2-4: ITS measure “reversible lanes” on Tampa Bay Reversible Express Way (THEA, 2011)

V razvoju so tudi sistemi za dinamično spreminjanje oblike križišča (na primer dodajanje pasu za levo zavijanje v konicah), kar je prikazano na spodnji sliki.



Slika 2-5: Primer ITS ukrepa spremenljive oblike križišča (Immers, 2008)

Figure 2-5: ITS measure “dynamic intersection layout” (Immers, 2008)

Spreminjanje priključka ali nadzorovan izvoz iz avtoceste oziroma hitre ceste pride v poštev ob dveh enako močnih izvoznih tokovih, ki se združujeta v semaforiziranem križišču. S spreminjanjem vertikalne (semafor, spremenljiv prometni znak) in talne (spremenljive talne oznake) signalizacije je mogoče spreminjati, kateri prometni tok ima prednost in tako vzpostaviti prometno stanje z najmanjšimi zamudami.

### **2.3.1 Spremenljiva uporaba voznih pasov**

Spremenljiva uporaba voznih pasov (*lane control*) je ukrep, ki je uporaben tam, kjer prihaja do zmanjšanja števila pasov in združevanja prometnih tokov, običajno v razcepkih. Glede na prometne razmere se reducira šibkejši tok. V Sloveniji bi bil ukrep izvedljiv in koristen na primer v razcepkih na ljubljanskem avtocestnem obroču.

## **2.4 Homogenizacija prometnega toka**

Homogenizacija oziroma homogeniziranje prometnega toka je ukrep, kjer s spreminjanjem dovoljene hitrosti homogeniziramo prometni tok do točke, kjer je dosežena največja izkoriščenost med obremenitvami in kapaciteto glede na prometne razmere.

Iz teorije prometnega toka namreč izhaja, da bolj homogeniziran prometni tok zagotavlja večjo kapaciteto in prepustnost odseka. Ukrep se v okviru sistema za nadzor in vodenje prometa (SNVP) na ljubljanskem avtocestnem obroču že izvaja. Zelo koristen je predvsem ob zmanjšani kapaciteti posameznega odseka (dela na cesti, nesreče), pravtako ob vsakodnevnih jutranjih in popoldanskih urnih konicah.

Omenjeni ukrep poleg večje prepustnosti pomeni tudi večjo varnost. Izboljšanje varnosti je drugo področje, kjer lahko ukrepi ITS izboljšajo razmere. Bolj homogeniziran tok povzroči manjše število manevrov (menjavanju voznega pasu, prehitevanje, pospeševanje, zaviranje) in posledično manjšo verjetnost za nesreče. Mikroskopska simulacija je na primer uporabna pri načrtovanju razvrstilne signalizacije ob zožitvah ali analiziranju vplivov razmaka med vozili v predoru.





Slika 2-6: Primer ITS ukrepa homogenizacije prometnega toka na ljubljanski obvoznici

Figure 2-6: ITS measure “traffic flow homogenization” on Ljubljana Ring Road, Slovenia

## 2.5 Preusmerjanje

Ob pojavu izrednih dogodkov (nesreče, dela na cesti) je z ukrepom preusmerjanja (*rerouting*) mogoče učinkoviteje izkoristiti ostalo omrežje. Z mikroskopsko simulacijo lahko simuliramo alternativne poti in ugotovimo posledice na omrežju. V konicah je namreč včasih bolje ne uporabiti tega ukrepa, kot povzročiti dodatne zastoje na že tako obremenjenem omrežju. Ljubljanski avtocestni obroč je zelo primeren za uporabo tega ukrepa, ki se delno tudi že izvaja.



Slika 2-7: Primer ITS ukrepa preusmerjanja na ljubljanski obvoznici

Figure 2-7: ITS measure “rerouting” on Ljubljana Ring Road, Slovenia

## 2.6 Upravljanje parkirnih površin za osebna in tovorna vozila

Inteligentno upravljanje parkirnih površin v osnovi pomeni zbiranje informacij o razpoložljivih parkirnih mestih in njihovo posredovanje uporabnikom. S tem ukrepom se voznikom omogoči krajše in bolj ugodne poti, upravljavcem pa boljšo izkoriščenost.



Slika 2-8: Primer ITS ukrepa upravljanja parkirišč, Dublin (Dambach, 2011)

Figure 2-8: ITS measure “parking management”, Dublin (Dambach, 2011)

Ukrep je za osebna vozila posebno učinkovit v mestnih središčih, kjer vozila, ki iščejo parkirna mesta, predstavljajo okoli 5-10 % celotnega prometa. Gantelet in Lefauconnier ocenjujeta, da v Franciji tako na leto izgubijo okoli 700 milijonov €, ne vključujoč škodljivih vplivov na onesnaženje zraka in hrup (2006). Anketa največjega britanskega podjetja za upravljanje parkirnih hiš NCP je pokazala, da povprečen voznik izgubi 152 ur na leto z iskanjem prostega parkirnega mesta (2010).

Parkiranje tovornih vozil ob avtocesti, tako legalno na počivališčih kot nelegalno (mesta, odstavni pasovi, odstavne niše) je postalo velika težava povsod, tudi v Sloveniji. Vozniki tovornih vozil, ki morajo obvezno počivati, nimajo informacij o lokaciji in številu prostih parkirnih mest. Sistem, ki bi nadzoroval parkirna mesta in usmerjal voznike na koridorju, lahko izboljša tako učinkovitost prometnega omrežja kot poveča prometno varnost.



Slika 2-9: Primer ITS ukrepa razporejanja tovornih vozil, Avstrija (ASFINAG, 2011)

Figure 2-9: ITS measure “truck management”, Austria (ASFINAG, 2011)

Evropska Unija je začela projekt EasyWay, v okviru katerega je posebno podpoglavje namenjeno inteligentnemu parkiranju vozil.

Vse opisane ukrepe je možno modelirati v mikroskopski simulaciji, s tem preveriti njihovo učinkovitost in jih po potrebi še izboljšati.

### 3 MIKROSKOPSKA SIMULACIJA

Beseda simulacija izvira iz latinske besede simulare, ki pomeni posnemati oziroma umetno ustvarjati pogoje za opravljanje nalog ali operacij, torej predstavitev pojava iz resničnega sveta v umetnem okolju s pomočjo računalniškega programa. Ključno pri simulaciji je, da predstavlja dejanski proces in ne samo imitira rezultatov.

Mikroskopska simulacija je v splošnem tehnika modeliranja na ravni posameznika. Uporablja se jo na različnih področjih, na primer socialnem (osebe, gospodinjstva), ekonomskem (podjetja) in prometnem (vozniki, vozila). Prometna mikroskopska simulacija torej pomeni posnemanje realnega stanja na nivoju vsakega udeleženca v prometu.

Ukrepi ITS se uporabljajo dinamično v prostoru in času, glede na prometne razmere. Izvajajo se namreč na različnih lokacijah in v različnih časovnih obdobjih. Zato je za vrednotenje prometnih in ekonomskih učinkov uporabe ukrepov ITS potrebno poznati postopke in imeti orodja, ki so sposobna to zajeti. Za prometne učinke je edino možno orodje mikroskopska simulacija (včasih tudi mezoskopska simulacija).

Mikroskopski model, ki vključuje podrobno modelirano omrežje, individualno obravnavo udeležencev v prometu, iskanje poti v prostoru in času ter mikroskopsko raven odločanja, omogoča natančno in realistično posnemanje stvarnosti. Zato so tudi izidi, ki vključujejo tudi potovalne čase, blizu stvarnosti in kar najbolj verodostojni.

Rezultati mikroskopske simulacije omogočajo natančno analizo prometnih učinkov. Analiza je vizualna in analitična. Programska orodja ponujajo številne možnosti, ki so v nadaljevanju tudi predstavljene na praktičnih primerih uporabe.

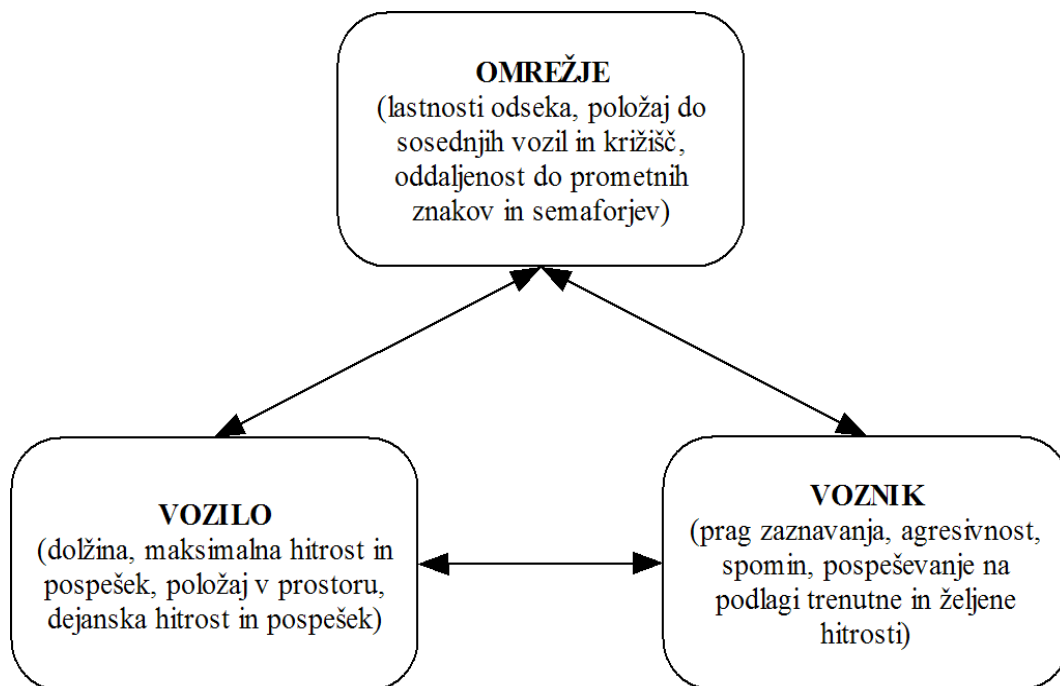
V zadnjem času se je začela razvijati tudi naslednja generacija mikroskopskih simulacij NGSIM (angleško *Next Generation Simulation*). Modeli obnašanja voznikov so dopolnjeni na podlagi grafične analize trajektorij, to je poti posameznih vozil. Ti modeli trenutno še niso uporabljeni v komercialnih mikroskopskih simulacijah. Hkrati se lahko z analizo omenjenih trajektorij določi indikatorje, ki vplivajo na verjetnost konfliktna situacije (na primer čas do trčenja). Ker mikroskopska simulacija omogoča zapis trajektorij vozil, se to lahko uporabi za

analizo možnih konfliktnih situacij. Tako lahko s simulacijo ocenimo učinke ITS ukrepov na prometno varnost.

V nadaljevanju so na kratko opisani principi mikroskopske simulacije.

### 3.1 Modeli obnašanja

Mikroskopski simulacijski model je sestavljen iz treh modelov obnašanja, ki opišejo medsebojni odnos voznik-vozilo-cesta. Prvi model je model sledenja vozil, ki opiše, kako se vozilo obnaša v odnosu na predhodno vozilo. Drugi model je model menjave pasov, ki posnema obnašanje voznikov ob menjavi pasov na večpasovni cesti ali pri razvrščanju v križišču. Tretji model je model prometnih pravil prednosti, kot so vključevanje v križišču ali krožišču in upoštevanje semaforških ciklusov.



Slika 3-1: Medsebojna odvisnost voznik-vozilo-omrežje

Figure 3-1: Interdependence driver-vehicle-network

### 3.1.1 Model sledenja vozil

Natančnost simulacijskega modela je odvisna predvsem od kakovosti modeliranja premikanja vozil v omrežju. Sodobni modeli uporabljajo osnovni princip interakcijskega diagrama obnašanja voznika, ki nenehno spreminja hitrost. Voznik namreč pospešuje do želene hitrosti, pri tem pa mora z zaviranjem tudi upoštevati pred seboj vozeče vozilo. Hitrost in pospešek vozil nista določena deterministično, temveč stohastično preko statistično določenih distribucij.

Voznik ima štiri možne načine vožnje:

- prosta vožnja (ni vpliva pred seboj vozečih vozil, voznik želi doseči ali ohraniti želeno hitrost)
- približevanje (proces prilagajanja hitrosti pred seboj vozečemu vozilu, s ciljem doseči razliko v hitrosti enako nič na varnostni razdalji)
- sledenje (vzdrževanje varnostne razdalje, brez zavednega pospeševanja ali zaviranja) in
- zaviranje (v primeru, da razdalja do pred seboj vozečega vozila pade pod varnostno razdaljo, kar se zgodi o nenadni spremembi hitrosti ali manevru tretjega vozila).

Modeli, uporabljeni v sodobnih mikrosimulacijskih orodjih, upoštevajo ne samo več pred seboj vozečih vozil, ampak tudi vozila na sosednjih (istosmernih) pasovih.

### 3.1.2 Model menjave pasov

Model menjave pasov je kombinacija modelov minimalnega razmaka potrebnega za menjavo pasov (angleško *gap acceptance*) in pospeševanja, ki določi, ali bo voznik zamenjal pas ali ne. V zadnjem času se razvijajo t.i. taktični modeli menjave pasov, ki upoštevajo tudi predhodne poskuse menjave pasov posameznega voznika. Tako se potreben minimalen razmak s številom poskusov krajša. Potreben razmak je odvisen tudi od tega, ali je manever nujen (izbira pasov v križišču ali izvozna rampa) ali prostovoljen (menjava pasov na večpasovni cesti).

### 3.1.3 Model prometnih pravil prednosti

Osnova za model prometnih pravil prednosti temelji na dveh principih. Lokacija prometnega znaka določi, katero vozilo ima prednost. Vozilo, ki se vključuje, se za vključevanje odloča na podlagi razmaka do vozila, ki ima prednost. Model upošteva oddaljenost, hitrost in pospeševanje prednostnega vozila in se na podlagi tega (upoštevajoč svoj pospešek) odloči za vključevanje ali ne. Naprednejši modeli upoštevajo tudi to, da se s čakanjem na vključevanje krajša minimalni razmak še sprejemljiv za vključevanje.

Pri obnašanju v semaforiziranih križiščih, je princip upoštevanja prednosti podoben. Voznik zazna bližajoči se semafor, in se na podlagi trenutne hitrosti in oddaljenosti do križišča odloči za pospeševanje ali zaviranje.

## 3.2 Vhodni podatki

Osnovi za mikroskopski model sta matrika potovanj (iz makroskopskega modela) in detajlno cestno omrežje z vsemi elementi (cestni odseki, križišča, semaforji, javni promet) in njihovimi karakteristikami (hitrost, število pasov, prednost v križiščih, semaforski ciklusi, vozni redi). Pregled potrebnih vhodnih podatkov je prikazan skozi tipičen deloven proces izdelave mikroskopske simulacije v nadaljevanju.

### 3.2.1 Območje obdelave

Prvi korak pri izdelavi mikroskopske simulacije je določitev študijskega območja. Običajno je osnova za njegovo določitev makroskopski prometni model širšega območja. Pri določitvi območja obdelave je potrebno upoštevati:

- območje mora dovolj *široko*, da omogoči toliko različnih možnosti izbire poti, da je možna analiza učinkov sprememb na cestnem omrežju ali omrežju javnega prometa (na primer če analiziramo vpliv nove prometne povezave, morajo biti zajete tudi vse obstoječe povezave, katere bodo razbremenjene)

- območje mora biti dovolj *detajlno*, da je rezultat realen (na primer v mestnem območju morajo biti zajeta vsa križišča znotraj območja, v katerih prihaja do zastojev).

### 3.2.2 Cestno omrežje

Cestno omrežje v mikroskopski simulaciji je sestavljeno iz osnovnih odsekov (angleško *links*), povezovalnih odsekov (angleško *connectors*) in vozlišč (angleško *nodes*). Vloga in pomen posameznih elementov se sicer razlikuje med posameznimi programskimi orodji. Vsakemu odseku je potrebno določiti porazdelitev hitrosti in tip obnašanja voznikov.

Pri izdelavi cestnega omrežja obstajata dva pristopa. Prvi pristop je “začetek iz nič” (angleško *from scratch*), drugi pristop je uvoz (angleško *import*) osnovnega omrežja iz drugega orodja (na primer makroskopski model, GIS orodje). Vsak pristop ima svoje prednosti in slabosti, vendar se z razvojem programske opreme vse bolj uveljavlja zadnji pristop.

Mikroskopska simulacija ponuja številne možnosti vizualizacije, zato je pomembna uporaba čimboljše grafične podlage. Običajno se uporabljajo “ortofoto” posnetki iz zraka. Poleg tega je natančna podlaga tudi v pomoč pri samem modeliranju (na primer število in razporeditev voznih pasov v križišču).

Poleg osnovnih elementov omrežja je potrebno modelirati vse ostale (za posamezne študije relevantne) elemente:

- prometni znaki za prednost v križiščih in krožiščih,
- semaforji,
- omejitve hitrosti,
- zračni detektorji,
- postajališča javnega prometa,
- merilna mesta (števci prometa, hitrosti, vrst, potovalnih časov),
- parkirišča.



### **3.2.3 Coning**

Coning je razdelitev študijskega območja na posamezna zaključena območja - cone. Pri mikroskopski simulaciji je zelo pomembno, da je coning tako podroben, da omogoča enakomerno porazdelitev vozil na omrežju. To se doseže z dodajanjem priključkov con na sekundarno cestno omrežje.

### **3.2.4 Matrika potovanj**

Mikroskopska simulacija je zadnji korak v klasičnem štiristopenjskem procesu (generacija, distribucija, izbira prometnega sredstva in obremenjevanje), zato je matrika potovanj v primeru dinamičnega obremenjevanja povzeta po makroskopskem modelu. Pri statičnem obremenjevanju se število in cilj potovanj sicer lahko določi tudi na podlagi števnih podatkov. Vendar je ta metoda primerna samo za manjše in bolj enostavne modele, zato je vse manj v uporabi.

### **3.2.5 Terenske meritve**

Sestavni del vsakega modela morajo biti tudi podatki s terena, s katerimi se preverja ustreznost modela. Obseg teh podatkov je odvisen od projektnih pogojev in predvsem razpoložljivosti. Osnoven podatek je urni prometni pretok na odsekih in zavijalcih. To je število vozil, ki v eni uri prevozi določen presek. Merijo se tudi urni pretoki v krajših minutnih časovnih intervalih, ki v kombinaciji s povprečnimi hitrostmi v teh intervalih, pokažejo, če nihanje hitrosti v odvisnosti od prometnega toka ustreza dejanskim prometnim razmeram (Slika 3-5).

Poleg števila vozil se meri tudi vrste na ključnih mestih v omrežju (priključkih, križiščih). Pri analizi dolžine vrst se meri maksimalna in povprečna vrsta. Pogosto je povprečna vrsta bolj primerna za analizo, saj pokaže mesta, kjer lahko pride do daljših zastojev.

Potovalni čas je dober pokazatelj dejanskih razmer na omrežju, saj na daljši poti povzame prometne razmere. Meri se jih na koridorjih in poteh z največ prometa.

Uporaben pripomoček pri izdelavi (in kasneje kalibraciji in validaciji) mikroskopske simulacije so tudi slike in video posnetki prometnih razmer. Pogosto se lahko samo z njihovo pomočjo ugotovi pravi vzrok težav v prometu.

### **3.3 Obremenjevanje**

Obremenjevanje je model izbire poti. Pri modelu izbire poti v omrežju je najprej potrebno določiti nabor možnih poti, ki jih je nato potrebno oceniti oziroma izmeriti njihov upor (potovalni čas, razdalja in strošek). Običajno se za oceno upora uporablja generalizirani strošek, ki je izbrana kombinacija uporov. Zadnji korak je način odločanja voznikov, kako bodo izbirali med možnimi potmi.

Klasično, statično obremenjevanje predpostavlja, da se prometne razmere v obravnavanem časovnem intervalu ne spreminjajo. Zato je tudi izbira poti v tem obdobju enaka, statična. Vendar vsi vemo, da se razmere na omrežju spreminjajo, v koničnih obdobjih celo zelo pogosto in hitro. Spreminjajo se lahko tudi elementi samega omrežja, poleg na primer prometni in časovno odvisnih semaforjev tudi delovanje ITS ukrepov. Njihova značilnost je prav dinamično spreminjanje v času.

#### **3.3.1 Način izbire poti**

Obstajata dva načina oziroma pristopa pri iskanju najkrajših poti v prostoru in času. Prvi pristop je statično obremenjevanje, kjer je izbira poti določena pred začetkom simulacije na podlagi terenskih raziskav ali rezultatov makroskopskega modela. Drugi način je dinamično obremenjevanje, kjer se izbira najkrajših (najugodnejših) poti spreminja glede na trenutne prometne razmere.

Pri dinamičnem obremenjevanju se v časovnih intervalih (5-15 minut) znotraj obravnavane časovne enote (običajno 1-3 ur) spreminjajo generalizirani stroški posameznih poti. To nato vpliva na izbiro poti voznikov in posledično seveda na prometne razmere na omrežju. Programska orodja različno obravnavajo dinamično spreminjanje. Izbira poti je lahko na podlagi predhodnega intervala ali na podlagi predhodne iteracije simulacije. Oba načina sta

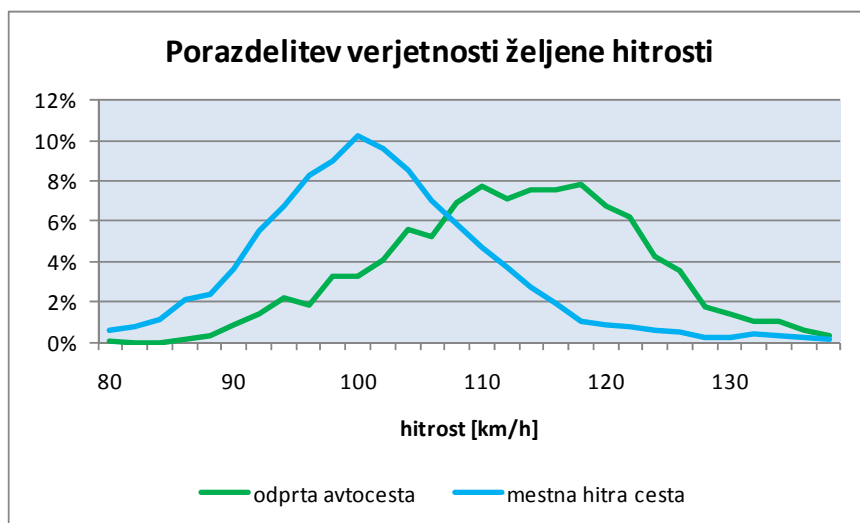
seveda uporabna, pri modeliranju ITS ukrepov pa ima določeno prednost možnost na podlagi predhodnega intervala.

### **3.4 Kalibracija in validacija**

Pomembna faza pri izdelavi prometnega modela je kalibracija in validacija modela. Pri vsakem modelu je potrebna kalibracija parametrov. Ustreznost modela se nato preveri z validacijo.

Mikroskopska simulacija (posebno z dinamičnim obremenjevanjem) je v svetu že uveljavljeno in na mnogo primerih preizkušeno in preverjeno orodje. Zato sta v magistrskem delu predstavljeni predvsem kalibracija in validacija mikroskopskega modela z vidika posnemanja izrednih dogodkov (nesreče, delo na cesti) in odzivanja sistema ITS na njih.

Model mikroskopske simulacije je skupek različnih podmodelov, ki se odzivajo glede na postavljene enačbe in statistično določene porazdelitve verjetnosti posameznih vhodnih podatkov. Tako je eden ključnih vhodnih podatkov porazdelitev t.i. željene hitrosti (angleško *desired speed*). To je hitrost, ki jo vozniki želijo doseči na posameznem odseku. Za razliko od analitičnih modelov, kjer je hitrost na posameznem odseku določena kot enotna vrednost (na primer 130 km/h na avtocesti), je v mikroskopski simulaciji zelena hitrost opisana kot porazdelitev. Porazdelitev željene hitrosti se določi na podlagi analize terenskih podatkov v neoviranem prometnem toku. Na spodnji sliki je primer porazdelitve hitrosti za odprto avtocesto in mestno hitro cesto.



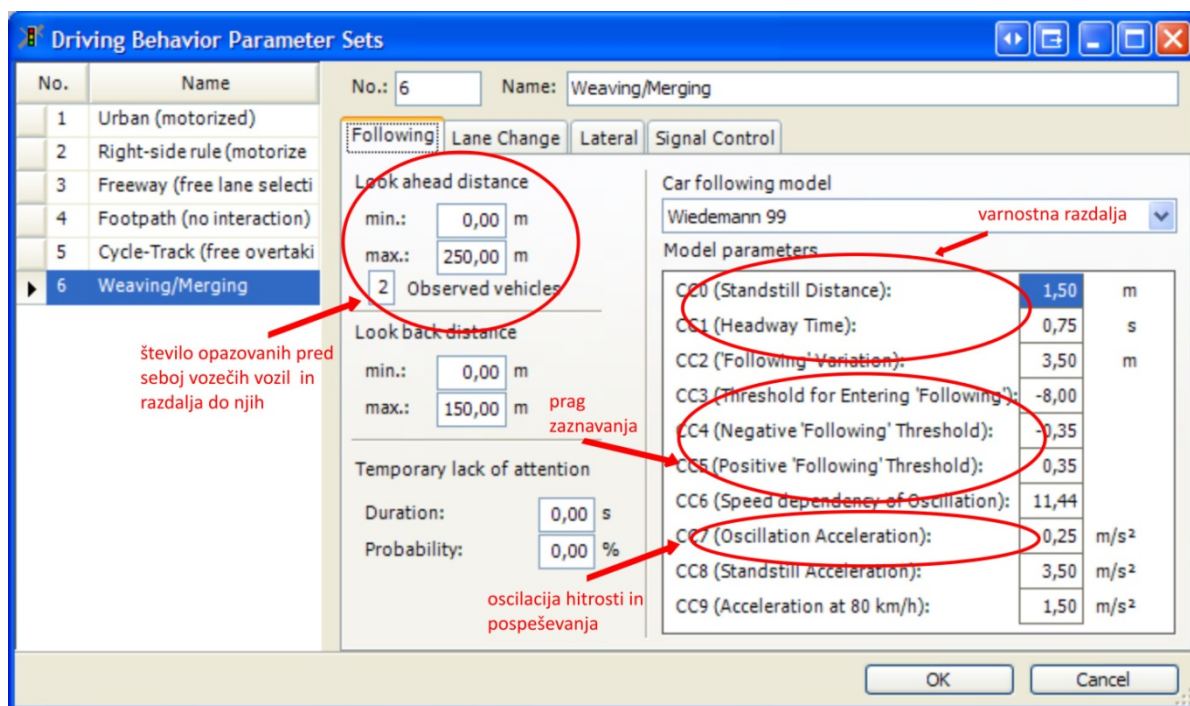
Slika 3-2: Porazdelitev verjetnosti željene hitrosti za različni vrsti večpasovnih cest (DARS, 2009)

Figure 3-2: Desired speed distribution for different multilane roads (DARS, 2009)

Ključni niz vhodnih parametrov, ki ga je potrebno kalibrirati, je obnašanje voznikov. Pomembnejši parametri so prikazani in opisani v nadaljevanju.

Parametri obnašanja voznikov so v osnovi določeni in kalibrirani na podlagi obsežnih meritev prometnega toka in analize obnašanja voznikov, že v okviru razvoja programske opreme. Naloga izdelovalca posamezne mikroskopske simulacije je, da vsaj logično preveri ustreznost teh parametrov na dejanskem obravnavanem območju. Natančne raziskave in meritve namreč presegajo okvir prometne študije.

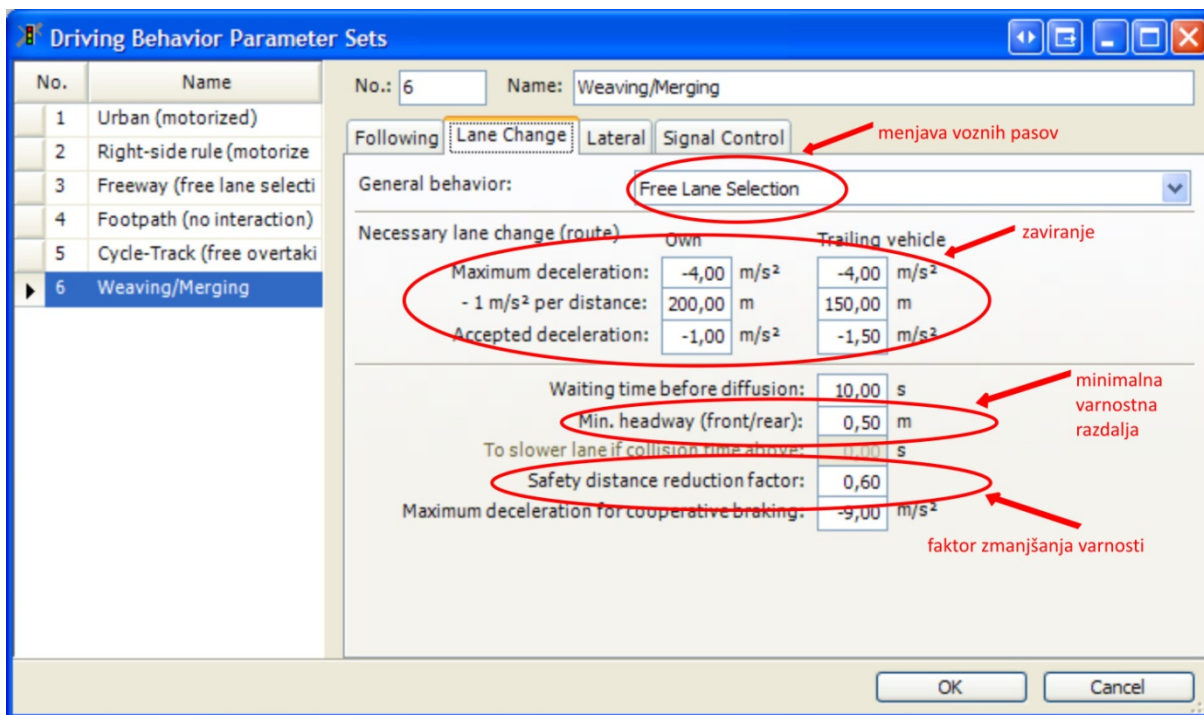
Pri modelu sledenja vozila je v mikrosimulacijskih orodjih na razpolago več oblik zapisa prej opisanega interakcijskega diagrama. Med najbolj razširjenimi je Wiedemannov model, katerega bistveni parametri so opisani na sliki (Slika 3-3). V slovenščino so prevedeni parametri, ki bistveno vplivajo na način obnašanja voznikov.



Slika 3-3: Parametri modela sledenja vozilu (PTV, 2009)

Figure 3-3: Car following model parameters (PTV, 2009)

Izkušnje pri modeliranju mikroskopskih simulacij na večpasovnih cestah v Sloveniji kažejo, da je pogosto pri uspešnosti posnemanja dejanskih prometnih razmer, odločilen model menjave pasov. Glede na obravnavan odsek je potrebno določiti, ali vozniki prosto menjajo vozne pasove (*free lane selection*), kot na primer na ljubljanski obvoznici, ali pa izberejo levi vozni pas samo za prehitevanje (*right lane selection*), kot na primer na običajni avtocesti. Na sliki (Slika 3-4) so v slovenščino prevedeni parametri, ki bistveno vplivajo na način obnašanja voznikov.

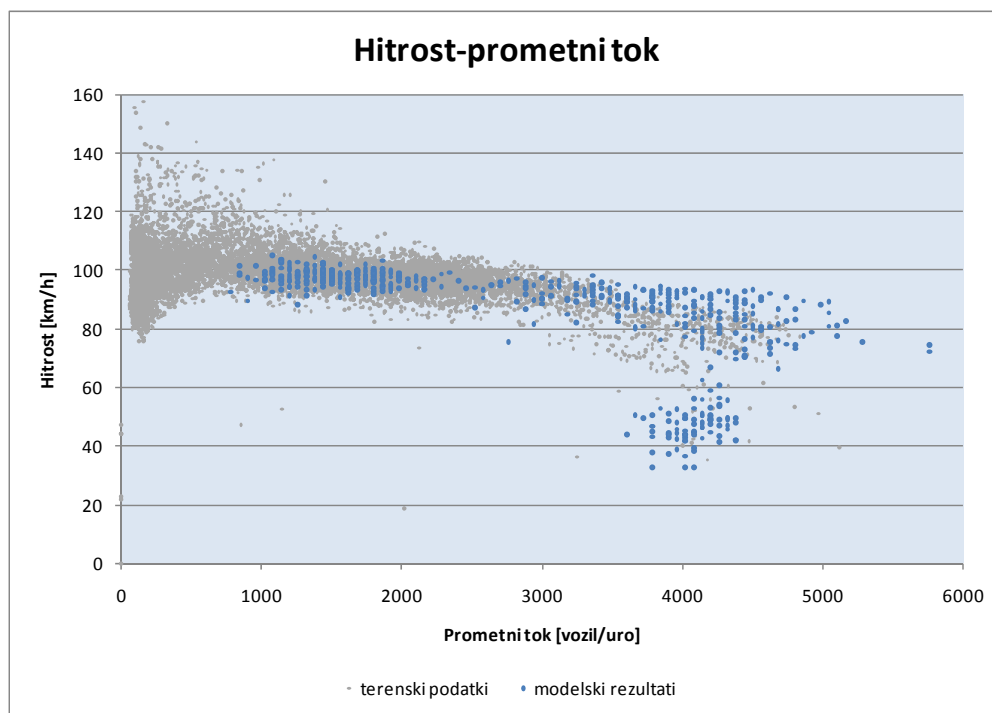


Slika 3-4: Parametri modela menjave pasu (PTV, 2009)

Figure 3-4: Lane change model parameters (PTV, 2009)

Faktor zmanjšanja varnosti (in drugi parametri) določajo agresivnost voznikov. Predvsem v območjih zgoščitve (priključki, razcepi) se minimalne razdalje za vključevanje zmanjšajo in pospeški povečajo. Vse to se lahko opiše s parametri obnašanja voznikov.

Uspešnost validacije porazdelitve željene hitrosti in modela obnašanja voznikov se preveri z grafom odvisnosti hitrosti od prometnega toka, kjer se na izbranih merilnih mestih modelski rezultati primerjajo s terenskimi meritvami. Za odnos hitrost-prometni tok je značilna D-krivulja, kjer začne pri določenem pretoku vozil zaradi zgoščitvev in minimalnih razdalj hitrost padati. To je točka, kjer posamezni odsek dejansko doseže svojo kapaciteto.



Slika 3-5: Graf hitrosti v odvisnosti od prometnega toka (minutne vrednosti prenesene na urno vrednost) (DARS, 2009)

Figure 3-5: Speed-volume diagram (minute values transferred to hourly volume) (DARS, 2009)

Pri validaciji mikroskopske simulacije se ustreznost (glede na razpoložljive podatke) lahko preverja glede na:

- prometne tokove na odsekih in v križiščih (indikator  $GEH < 5$ ),
- potovalne čase na izbranih poteh,
- izmerjene hitrosti na presekih,
- dolžina vrst,
- vizualno oceno prometnih razmer.

Indikator GEH se v prometnem modeliranju uporablja za analizo ustreznosti prometnega modela glede na števne podatke. Vrednost GEH manjša od 5 pomeni dobro ujemanje, medtem ko se pogojno sprejemljive tudi vrednosti GEH do 10.

Praktičen primer kalibracije in validacije modela izrednega dogodka v mikroskopski simulaciji je predstavljen v poglavju 4.2.1 Ukrepi sistema za nadzor in vodenje prometa (SNVP) na ljubljanski obvoznici.

### **3.5 Analiza rezultatov**

Analiza prometnih učinkov na podlagi rezultatov mikroskopske simulacije je vizualna in analitična. Vizualno preučevanje omogoča dobro prostorsko seznanitev z učinki, medtem ko analitična primerjava omogoči njihovo kvantitativno primerjavo. Vizualno preučevanje ITS ukrepov se izvaja na dveh ravneh. Z opazovanjem in primerjavo ožjega območja lahko ocenimo učinke ukrepov ITS na posameznih kritičnih točkah. Širše pa analiziramo učinke na celotnem omrežju, predvsem njihovo medsebojno povezanost in soodvisnost. Pogosto se namreč zgodi, da rešitev posamezne kapacitetne težave povzroči nove težave na sosednjih območjih (križiščih, priključkih, razcepah). S pomočjo postopnega povečevanja prometnih obremenitev je v mikroskopski simulaciji mogoče tudi ugotoviti sam vzrok težav na omrežju. V prometnem planiranju pogosto namreč pride do pomešanja vzroka in posledic.

Za analitično primerjavo uporabimo običajne kazalce prometne učinkovitosti (povprečna hitrost vozil na omrežju, povprečni čas potovanja, povprečna zamuda, število ustavljanj idr.).

Praktični primeri različnih načinov analize rezultatov mikroskopske simulacije so prikazani v poglavju 4.

### **3.6 Ekonomsko vrednotenje ITS ukrepov na podlagi rezultatov mikroskopske simulacije**

Pred dokončno uvedbo sistema ITS ukrepov je potrebno oceniti, kakšne koristi prinašajo in če bo naložba upravičena. Na splošno se ITS projekte vrednoti tako, kot druge prometne projekte. Naložba je upravičena, če zaželeni učinki (koristi) presegajo nezaželene (stroški).



Pri vsakem ekonomskem vrednotenju investicije v prometno omrežje se primerja omrežje brez investicije (ukrepa) in z njim. Tako se torej vrednoti scenarij z uvedenim ITS ukrepom (angleško *do something*) in brez njega (angleško *do nothing* ali *do minimum*). Oceni se stroške in koristi obeh scenarijev ter na osnovi medsebojne primerjave ugotovi neto koristi, ki morajo presegati stroške.

Na splošno se loči *neposredne* in *posredne* koristi.

*Neposredne koristi* v glavnem zadevajo skrajšanje potovalnih časov in zmanjšanje obratovalnih stroškov vozil.

*Posredne koristi* zadevajo vplive na okolje (hrup, zrak, vodni viri), stroške prometnih nesreč, vplive na regionalno gospodarstvo, na delovanje javnih služb (sodišč, policije, urgentnih vozil) in vplive na rabo površin idr.

Neposredne koristi so razmeroma lahko izmerljive, zato se praviloma izvednoti te stroške in koristi. Posredne koristi se lahko dodatno oceni ali pa tudi ne. To je odvisno od primera do primera. Toda če nam že neposredni del koristi opravičuje naložbo, je ta gotovo upravičena. **To je tudi eden temeljnih aksiomov vrednotenja: če že del koristi opravičuje naložbo, je ta upravičena.**

Oceno upravičenosti se ugotavlja na osnovi t.i. socioekonomskega vrednotenja. Če je to mogoče, se priporoča uporabo CBA analize, to je analiza stroškov in koristi (*CBA – Cost-Benefit Assesment*), kjer so stroški in učinki izraženi v denarnih vrednostih in omogoča kvantitativno izvednotenje neposrednih koristi, izraženih v denarnih vrednostih.

Tu se pojavi težava pri napovedovanju in merjenju koristi. Zaenkrat obstajajo zanesljivejše metode le za ugotovitev stroškov potovalnih časov in obratovalnih stroškov vozil, vpliva hrupa in onesnaženja zraka. V zadnjem času se v svetu in tudi pri nas za to uporabljajo različne simulacijske metode, ki omogočajo natančno analizo vsakega vozila in udeleženca v prometu posebej.

Glede napovedi prometnih nesreč in drugih vplivov se intenzivno razvijajo simulacijski modeli in statistične metode za njihovo vrednotenje.

Največkrat se upošteva prihranke časa in obratovalnih stroškov vozil. Kot rečeno, brez težav se lahko vključi tudi vpliv hrupa in onesnaženja zraka, kajti tudi te vplive je mogoče razmeroma natančno ugotoviti.

Lahko se vrednoti tudi stroške prometnih nesreč. Toda tu se na splošno soočamo s težavo zanesljivejše napovedi nesreč. V okviru te magistrske naloge smo prikazali način, kako bi lahko z uporabo sodobnih orodij ocenili zmanjšanje števila prometnih nesreč.

Doba vrednotenja ITS projektov je zaradi hitro spreminjajoče se tehnologije običajno krajša kot sicer pri prometnih projektih. Kot je znano, pri prometnih projektih doba vrednotenja znaša 20-60 let, pri predorih celo 100 in več let. Pri ITS ukrepih je običajno doba vrednotenja 10-20 let.

Merilo za upravičenost naložbe predstavljata neto sedanja vrednost, ki mora biti pozitivna in odnos koristi/stroški, ki mora biti več kot 1.

#### 4 PRIMERI UPORABE

Delovno hipotezo o uporabnosti mikroskopske simulacije za modeliranje ukrepov ITS bomo poskusili dokazati v fazi načrtovanja in v fazi upravljanja. Razvoj kompleksnega mikroskopskega modela zahteva veliko časa in presega okvir magistrske naloge. Zato izvirajo prikazani primeri iz različnih virov, ki so navedeni na začetku vsakega podpoglavja. Prvi vir so mikroskopski modeli, ki so bili pod avtorjevim vodstvom razviti v podjetju PNZ svetovanje projektiranje d.o.o. za potrebe prometnih študij (2007, 2008a). Drugi vir so avtorske nadgradnje omenjenih modelov za magistrsko nalogo. Primer najnovejše uporabe mikroskopske simulacije za vrednotenje scenarijev ITS ukrepov v realnem času, je predstavljen na primeru obstoječega sistema v Madridu.

Namen poglavja je dokazati uporabnost in prikazati aplikativnost mikroskopske simulacije za potrebe načrtovanja in upravljanja s sistemi ITS. V preglednici (Preglednica 4-1) so naštet in opisani izbrani primeri z njihovo funkcijo, lokacijo, učinkom in načinom vrednotenja.

Preglednica 4-1: Pregled praktičnih primerov modeliranja ITS ukrepov z mikroskopsko simulacijo

Table 4-1: Overview of practical examples for ITS measures modeled with microscopic microsimulation

Ukrep	Lokacija	Učinek	Posledica	Vrednotenje	Faza
Spremenljiva uporaba odstavnega pasu	Severna ljubljanska obvoznica	Lažje prepletanje prometnih tokov	Povečanje vozne hitrosti in potovalnih časov	Primerjava prometnih kazalcev	Načrtovanje
Ukrep nadzorovanega uvoza na avtocesto	Priključek Šmartno	Manjše oviranje glavnega prometnega toka na avtocesti	Povečanje vozne hitrosti glavnega prometnega toka (ob še sprejemljivih zamudah na uvozu)	Primerjava prometnih kazalcev	Načrtovanje
Ukrep spremenljive redukcije pri vključevanju	Priključek Slavček	Lažje prepletanje prometnih tokov	Zmanjšanje zamud	Primerjava prometnih kazalcev	Načrtovanje

Ukrep	Lokacija	Učinek	Posledica	Vrednotenje	Faza
Ukrep spremenljive uporabe voznih pasov v razcepu	Razcep Malence	Lažje prepletanje prometnih tokov	Zmanjšanje zamud	Primerjava prometnih kazalcev in ekonomsko vrednotenje	Načrtovanje
Homogenizacija prometnega toka	Severna in zahodna ljubljanska obvoznica	Lažje prepletanje prometnih tokov	Zmanjšanje števila možnih konfliktnih situacij	Prometno-varnostna analiza	Upravljanje
	Priključek Šentjakob	Varnejša vožnja			
Preusmerjanje	Zahodna ljubljanska obvoznica	Preusmeritev prometnih tokov	Zmanjšanje zamud	Primerjava prometnih kazalcev	Upravljanje
	Predor Šentvid				
Uporaba mikroskopske simulacije v realnem času	Madrid	Boljša izkoriščenost omrežja	Zmanjšanje zamud	-	Upravljanje

#### 4.1 Modeliranje v fazi načrtovanja

Modeliranje v fazi načrtovanja se uporablja za preverjanje predvidenih projektnih rešitev in možno optimizacijo. Rezultati modeliranja ukrepov ITS z mikroskopsko simulacijo se uporabijo tudi za prometno in običajno tudi ekonomsko vrednotenje.

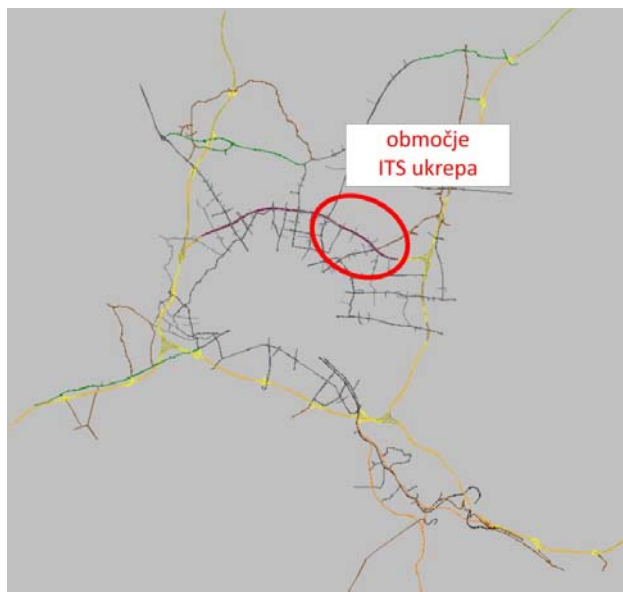
V fazi načrtovanja običajno obravnavamo povprečne prometne razmere brez motenj. Modelira se torej konična obdobja, največkrat jutranjo in popoldansko konico.

##### 4.1.1 Ukrep spremenljive uporabe odstavnega pasu

Ukrep spremenljive uporabe odstavnega pasu (*hard shoulder*) je eden najbolj razširjenih ITS ukrepov v Evropi (in po svetu). Običajno se ga uporablja na avtocestnih odsekih v mestnih in primestnih območjih, kjer so razdalje med posameznimi avtocestnimi priključki vseeno dovolj velike (2-5 km), zato da je učinkovitost in izkoriščenost odstavnega pasu optimalna. Ukrep je namreč učinkovit predvsem tam, kjer so močni prometni tokovi na uvoznih in izvoznih rampah, kar povzroča večje število manevrov prepletanja. V Sloveniji bi bil ukrep torej najbolj učinkovit v območju večjih mest Ljubljana, Maribor, Celje, Koper, kjer pa so razdalje med priključki ponavadi dokaj kratke (1-2 km). Z uporabo mikroskopske simulacije smo torej

želeli preveriti, ali je smiselna uvedba omenjenega ukrepa na ljubljanskem avtocestnem obroču

Uporabljen mikroskopski prometni model obsega celoten ljubljanski avtocestni obroč s priključnimi kraki (PNZ, 2008a). Vključuje tudi mestne ceste v območju obroča, ki pomembno vplivajo na prometne razmere na njem.



Slika 4-1: Obseg mikroskopske simulacije, prihodnje primerjalno omrežje z vključenimi predvidenimi investicijami (PNZ, 2008a)

Figure 4-1: Microscopic simulation study area, future “do-minimum” network (PNZ, 2008a)

Rešitev prometnih težav na posameznem delu omrežja lahko povzroči še večje težave na drugem (sosednjem, bližnjem) odseku. Zato je pri analiziranju ITS ukrepov pomembno obravnavati širše omrežje.

Kalibracija in validacija tukaj nista prikazani, saj smo uporabili že predhodno ustrezno dokazan model.

Na odseku ljubljanske severne obvoznice med krožiščem Tomačevo in priključkom Ljubljana Nove Jarše (Šmartinska cesta) predvsem v popoldanski konici (med 15. in 18. uro) nastajajo zastoji. Zastoji so posledica relativno kratkega odseka (1.300 m), na katerem se prepletajo

tokovi vozil, ki vozijo naravnost, s tokovi, ki se vključujejo iz uvozne rampe (iz smeri krožišča Tomačevo), kakor tudi s tokovi, ki želijo izbrati izvozno rampo priključka Nove Jarše. Hitrost na odseku pogosto pade pod 40 km/h oziroma poteka v ritmu “ustavi-spelji” (angleško *stop&go*). Poleg zamud, ki nastajajo, to pomembno vpliva tudi na zmanjšanje prometne varnosti.



Slika 4-2: Zgoščen promet z zastoji v popoldanski konici na odseku severne obvoznice med krožiščem Tomačevo in priključkom Nove Jarše (BTC), leto 2008

Figure 4-2: Traffic congestion in afternoon peak hour on Northern Ljubljana Ring road between Tomačevo roundabout and junction Nove Jarše (BTC), year 2008

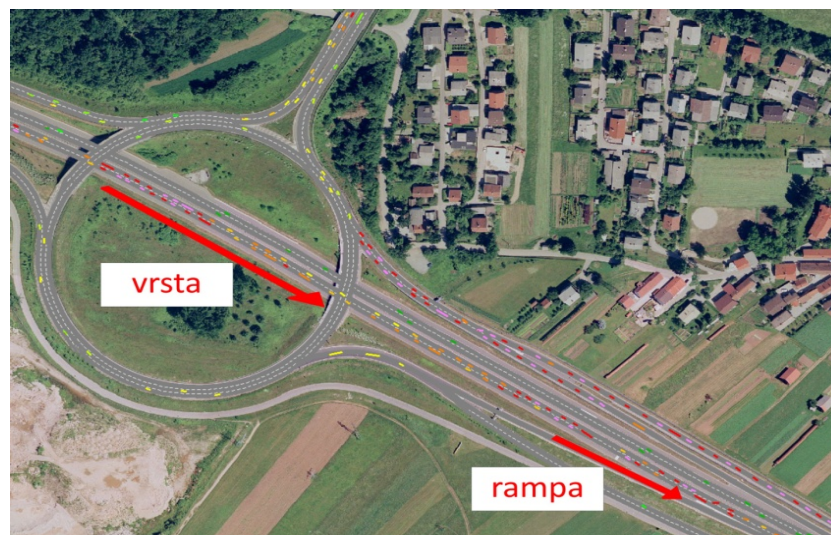
Modeliranje ITS ukrepa uporabe odstavnega pasu je relativno enostavno, saj samo dovolimo voznikom uporabo odstavnega pasu (4-pasovno hitro cesto začasno razširimo v 6-pasovno cesto). S tem omogočimo daljšo razdaljo tako za vključevanje kot izključevanje iz glavnega prometnega toka. Voznikom, ki se vključijo na obvoznico na začetku ukrepa in izključijo na koncu ukrepa, pa omogočimo vožnjo brez prepletanja. Posledica je manjše število nujnih manevrov prepletanja, ki z nenadnim zaviranjem povzročajo zgoščevanje.



Slika 4-3: ITS ukrep uporabe odstavnega pasu na kratkem odseku Tomačevo-Šmartinska

Figure 4-3: ITS measure hard shoulder on short section Tomačevo-Šmartinska

Primerjava prometnih razmer pred in ob uvedbi ITS ukrepa je vidna iz slik (Slika 4-4 in Slika 4-5). Vijolično in rdeče obarvana vozila so vozila, ki imajo trenutno hitrost manjšo od 20 km/h.



Slika 4-4: Krožišče Tomačevo, popoldanska konica, leto 2008, omrežje brez ITS ukrepov

Figure 4-4: Tomačevo roundabout, afternoon peak hour, year 2008, “do-nothing” network

Daljši zastoji nastajajo zaradi priključevanja uvozne rampe s smeri krožišča Tomačevo proti razcepu Zadobrova, kjer vrsta seže vse do priključka obvoznice z Dunajsko cesto



Slika 4-5: Krožišče Tomačevo, popoldanska konica, leto 2008, omrežje z ITS ukrepom spremenljive uporabe odstavnega pasu

Figure 4-5: Tomačevo roundabout, afternoon peak hour, year 2008, ITS measure “hard shoulder”

Z ITS ukrepom, ki v koničnih obdobjih omogoča uporabo odstavnega pasu, se razmere bistveno izboljšajo, saj imajo vozila večjo dolžino za vključevanje (tako manj ovirajo glavni tok na obvoznici)

Razmere se torej bistveno izboljšajo, kar poleg vizualne pokaže tudi analitična primerjava. V mikroskopski simulaciji je možno namreč natančno izmeriti številne kazalce prometnih razmer na izbranih odsekih ali za celotno omrežje. Učinek uporabe odstavnega pasu najbolje prikaže primerjava potovalnih časov in hitrosti na izbranem odseku.

Preglednica 4-2: Primerjava potovalnega časa in hitrosti brez ITS ukrepa in z njim

Table 4-2: Comparison of travel times and speed without and with ITS measure

ODSEK SEVERNE OBVOZNICE (Celovška cesta-priključek BTC)		
	potovalni čas	potovalna hitrost
brez ITS ukrepov	6,0 min	57 km/h
ITS ukrep uporabe odstavnega pasu	3,5 min	95 km/h
razlika	-2,5 min (-42 %)	+38 km/h (+40 %)



Mikroskopska simulacija je torej primerno orodje za modeliranje ukrepa uporabe odstavnega pasu. Z njeno uporabo smo dokazali, da je uvedba omenjenega ukrepa smiselna tudi na krajših odsekih, če je seveda možna izvedba.

#### **4.1.2 Ukrep nadzorovanega uvoza na avtocesto**

Nadzorovani uvoz (*ramp metering*) je ukrep, kjer se s pomočjo semaforja omejuje prometni tok na uvozni rampi. Delujoči algoritem upošteva podatke o trenutnem pretoku vozil glavnega prometnega toka na avtocesti pred priključkom in ustrezno določi dolžino zelenega časa za uvozni prometni tok. Tako je glavni prometni tok manj moten. Težava nastane na uvozni rampi, kjer se pretok ustrezno zmanjša. To ima lahko za posledico vrste, ki se lahko podaljšajo tudi na sekundarno omrežje (glavne, regionalne ali lokalne ceste). Algoritem mora zato imeti tudi t.i. varovalko, ki v primeru prevelikega razlitja vrste, prekine delovanje semaforja in sprosti uvozni tok.

Ukrep je smiseln predvsem tam, kjer ima sekundarno omrežje še dovolj prostih kapacitet (prometne razmere so tekoče), hkrati pa je priključek dovolj oddaljeno od naselij. Trenutno se ga uporablja predvsem na Nizozemskem, Veliki Britaniji in ZDA.

Kot je bilo že predhodno omenjeno, v Sloveniji ni veliko povsem primernih lokacij za vzpostavitev tega ukrepa. Možnosti modeliranja in analiz, ki jih ponuja mikroskopska simulacija v fazi načrtovanja ukrepov (in omrežja), so zato še bolj uporabne. Bolje je namreč ukrep najprej preveriti, kot pa ali takoj začeti z izvedbo ali opustiti idejo na začetku (kar je lahko pogosto slabša odločitev). Izkušnje iz tujine kažejo, da je mikroskopska simulacija zelo uporabna ne samo pri načrtovanju tega ukrepa, ampak tudi pri optimizaciji samega algoritma.

Za analizo je bil uporabljen isti mikroskopski model kot pri ukrepu uporabe odstavnih pasov (PNZ, 2008a). Ukrep je bil preizkušen na priključku Ljubljana Šmartno na AC Ljubljana-Kranj. Z odprtjem predora Šentvid in uvedbo vinjet se je promet na omenjenem odseku bistveno povečal.

Preglednica 4-3: Sprememba prometa ob uvedbi vinjet in odprtju predora Šentvid na avtocestnem odseku Vodice - Lj.-Šmartno

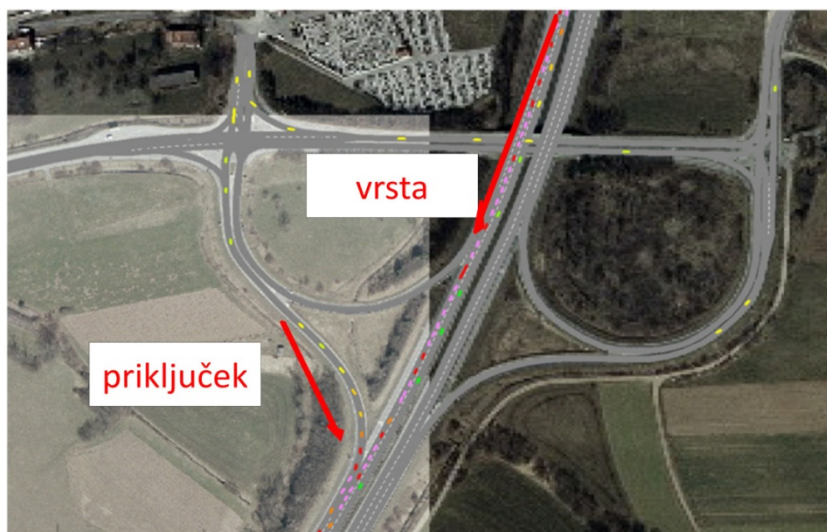
Table 4-3: Change of traffic flows after vignette introduction and opening of Šentvid tunnel

PROMET NA ODSEKU VODICE - LJUBLJANA-ŠMARTNO (vseh vozil v smeri proti Ljubljani)			
obdobje (povprečni delovni dan)	pred uvedbo vinjet in odprtjem predora Šentvid (maj 2008)	po uvedbi vinjet in odprtju predora Šentvid (oktober 2008)	razlika
jutranja konica (7-8)	1.883	2.761	878 (+46 %)
popoldanska konica (15-16)	1.138	1.422	284 (+25 %)
16-urni promet (6-22)	17.782	21.709	3.927 (+22 %)

Predvsem v jutranji konici se je bistveno povečal promet, zato po izkušnjah voznikov že prihaja do težav pri vključevanju v glavni prometni tok.

Pri modeliranju ukrepa nadzorovanega uvoza je potrebno opozoriti, da je še posebno odločujoč parameter obnašanja voznikov (predvsem njihovo dožemanje minimalne razdalje in sposobnosti pospeševanja oziroma zaviranja). V Sloveniji še ni bila narejena raziskava, ki bi preučila ta vidik obnašanja voznikov, zato tudi ni bilo mogoče bolj natančno kalibrirati mikroskopske simulacije. Zato je potrebno rezultate in tudi samo mikroskopsko simulacijo razumeti kot orodje in pomoč pri odločanju.

Na sliki (Slika 4-6) se jasno vidijo vozila na avtocesti s hitrostjo manjšo od 20 km/h, kar poleg zamud, na avtocesti predstavlja veliko nevarnost za naletna trčenja.



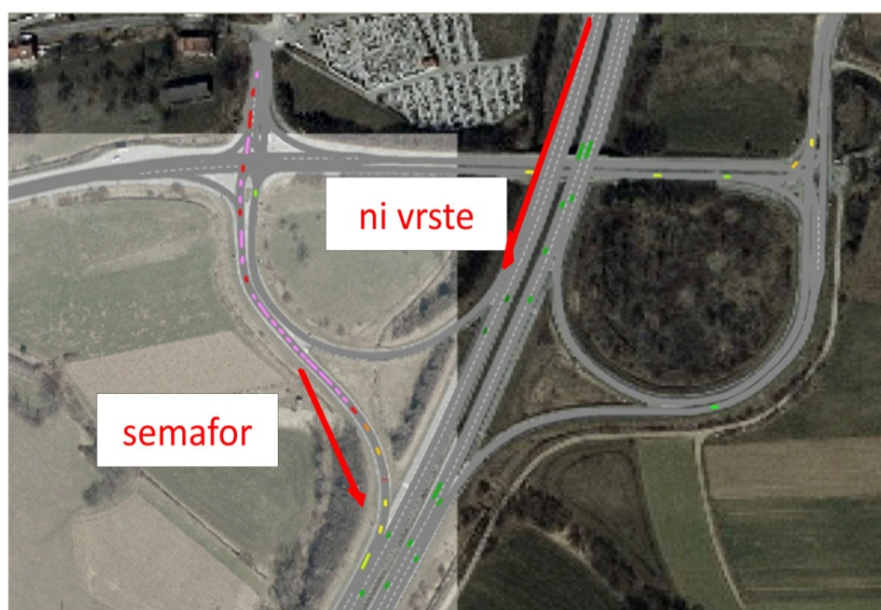
Slika 4-6: Priključek Šmartno, jutranja konica, leto 2012, omrežje brez ITS ukrepov

Figure 4-6: Šmartno junction, morning peak, year 2010, “do-nothing” network

Zaradi vključevanja vozil z uvozne rampe na priključku Šmartno bi prišlo na avtocesti Kranj-Ljubljana do zastoja oziroma najmanj vsaj oviranega prometnega toka.

Z uvedbo ITS ukrepa nadzorovanega uvoza na rampi bi se razmere na avtocesti bistveno izboljšale (Slika 4-7), saj je prometni tok neoviran. Kot posledica s semaforjem omejenega uvoza na avtocesto nastaja vrsta na uvozni rampi. Ta bi se lahko razširila tudi na sekundarno omrežje, zato je pomembno analizirati razmere tudi tam.

Ukrep je bil modeliran tako, da je bil na priključno rampo iz smeri Šmartno postavljen prometno odvisen semafor, katerega čas zelene faze so določali prometne razmere na avtocesti. Kadar je prišlo do zgoščevanja glavnega toka na avtocesti, se je na priključni rampi prižgala rdeča luč.



Slika 4-7: Priključek Šmartno, jutranja konica, leto 2012, omrežje z ukrepom nadzorovanega uvoza

Figure 4-7: Šmartno junction, morning peak, year 2012, ITS measure “ramp metering”

Razmere bi se na avtocesti izboljšale, zaradi tega sicer nastajajo zastoji na priključni rampi, vendar je prometna varnost večja in splošna učinkovitost omrežja boljša.

Orodja za mikroskopsko simulacijo ponujajo številne možnosti analiz in primerjav. Zelo koristna je grafična primerjava dveh omrežij (običajno brez investicije in z njo). V obravnavanem primeru smo primerjali povprečne hitrosti vozil na omrežju brez ukrepa nadzorovanega uvoza in z njim (Slika 4-8).

Slika (Slika 4-7) in primerjava (Slika 4-8) kažeta, da uvedba nadzorovanega uvoza na avtocesto ne bi povzročila večjih zamud na sekundarnem omrežju. Zavedati se je potrebno, da izboljšanje prometnih razmer na eni točki v omrežju, skoraj vedno povzroči poslabšanje teh razmer na drugi točki. Poleg tega lahko na primer izboljšanje prometne varnosti povzroči poslabšanje prepustnosti ali povečanje zamud. Zato je pri vrednotenju pomembno upoštevati vse vidike prometne učinkovitosti na celotnem omrežju.



Slika 4-8: Priključek Šmartno, jutranja konica, leto 2010, primerjava povprečnih hitrosti vozil na omrežjih brez ukrepa nadzorovanega uvoza in z njim

Figure 4-8: Šmartno junction, morning peak, year 2010, comparison of average vehicle speed between “do-nothing” network (without ITS measure) and with ITS measure “ramp metering

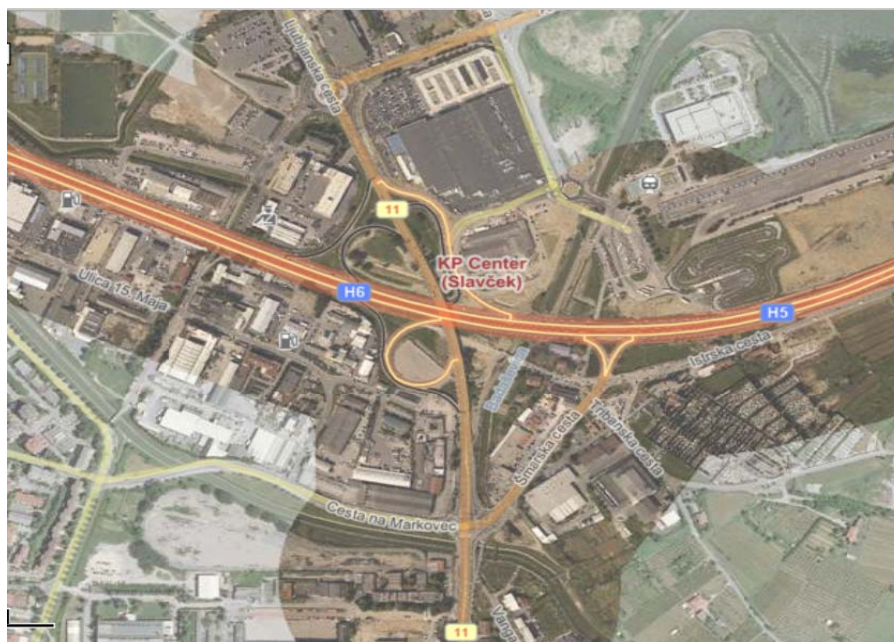
Razmere se na avtocesti bistveno izboljšajo (hitrost se poveča tudi za 100 km/h -> iz 30 km/h na 130 km/h), na priključni rampi sicer nastajajo zastoji, kjer se povprečna hitrost zmanjša pod 20 km/h, kar pa je običajna hitrost v semaforiziranih križiščih

Pri uvedbi ukrepa nadzorovanega uvoza na avtocesto je potrebno še posebej natančno analizirati lokalne razmere (štetje prometa, merjenje vrst, analiza odvijanja prometa na sekundarnem omrežju) in po potrebi vgraditi varovalne algoritme, ki lokalnemu prometu ne bodo bistveno poslabšale razmer.

### 4.1.3 Ukrep spremenljive redukcije pri vključevanju

Sisteme ITS je možno uporabiti tudi za dinamično spreminjanje prometne infrastrukture v križiščih in območjih vključevanja (število pasov za vožnjo, pasovi za zavijalce v križišču, razporeditev pasov v krožišču, podaljšanje pasu za vključevanje).

Za primer modeliranja v mikroskopski simulaciji smo se odločili za predlog ITS ukrepa v območju priključka Slavček v Kopru. Priključek Slavček se nahaja na koncu hitre ceste H5 Škofije-Koper in je namenjen priključevanju vozil na glavno cesto G1-11 (Šmarska cesta) in smer proti mejnemu prehodu Dragonja s Hrvaško. V času turistične sezone (od maja do septembra) pride zaradi oteženega priključevanja na glavno cesto in kratke dolžine izvozne rampe Koper-center za smer Pula (Šmarje, Poreč) pogosto do nastanka vrste na hitri cesti. Poleg časovnih izgub voznikov, to tudi močno poslabša prometno varnost. Priključevanje je posebej težko ob povečanem prometnem toku na glavni cesti iz smeri Kopra, kar je običajno v popoldanski konici. Zato je najbolj kritično obdobje v petek popoldne v turistični sezoni. Pojav se občasno zgodi tudi v soboto dopoldne.



Slika 4-9: Območje priključka Slavček (PIC Prometno-informacijski center za državne ceste, 2010)

Figure 4-9: Junction Slavček area (PIC Prometno-informacijski center za državne ceste, 2010)



Za modeliranje z orodjem VISSIM smo se odločili zaradi možnosti vključitve delovanja algoritma v mikroskopsko simulacijo. Program VISSIM to omogoča v modulu VISVAP, kjer z logičnimi operatorji zgradimo model algoritma, po katerem deluje ITS ukrep v simulaciji. Za osnovo smo uporabili predhodno validiran mikroskopski model širšega območja hitre ceste H5 (PNZ, 2009), ki je prikazano na sliki (Slika 4-11). Obravnavali smo popoldansko konico v petek v turistični sezoni. Za potrebe modeliranja ITS ukrepa smo morali poti, ki so bile najdene in uravnotežene z metodo dinamičnega obremenjevanja, spremeniti v statične.



Slika 4-11: Območje obdelave mikroskopskega modela

Figure 4-11: Microscopic model area

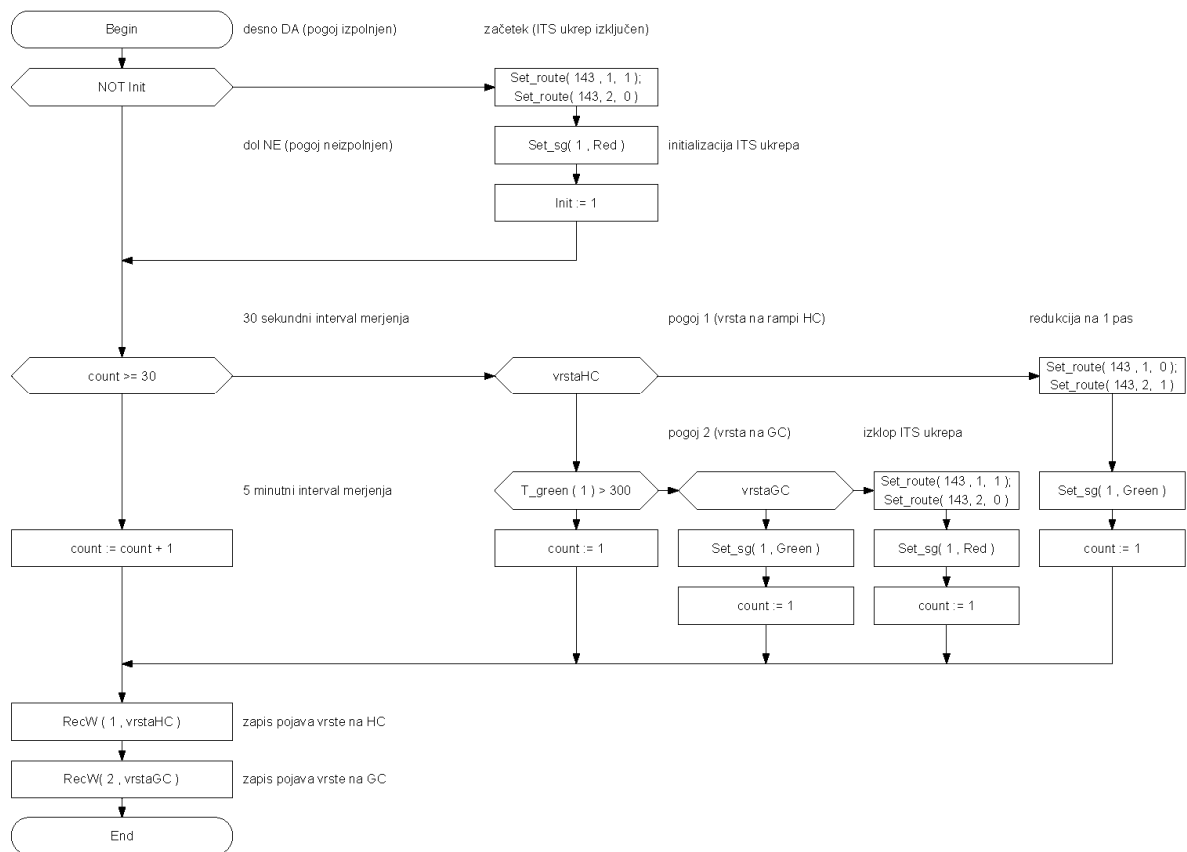
Osnovno delovanje ukrepa poteka po naslednji logiki:

- merjenje vrste na rampi hitre ceste vsakih 30 sekund
- detektiranje vrste na rampi hitre ceste -> vklop ITS ukrepa redukcije na glavni cesti za najmanj 5 minut



- merjenje vrste na območju redukcije na glavni cesti
- detektiranje vrste na območju redukcije na glavni cesti -> izklop ITS ukrepa redukcije do ponovnega pojava vrste na rampi hitre ceste.

Na sliki (Slika 4-12) je opisan algoritem (razlaga v slovenščini, programski ukazi v angleščini).



Begin = start algoritma      NOT Init = ali je ukrep iniciliziran      End = konec algoritma      count = šteje trajanja algoritma

Set\_route = izbira poti      1 = ITS ukrep je izključen      2 = ITS ukrep je vključen

Set\_sg = vklop signalizacije      Red = ITS ukrep je izključen      Green = ITS ukrep je vključen

count >= 30 = 30 sekundni interval      T\_green ( 1 ) > 300 = 5 minutni interval

T\_green ( 1 ) > 300 = 5 minutni interval

RecW = zapis pojava

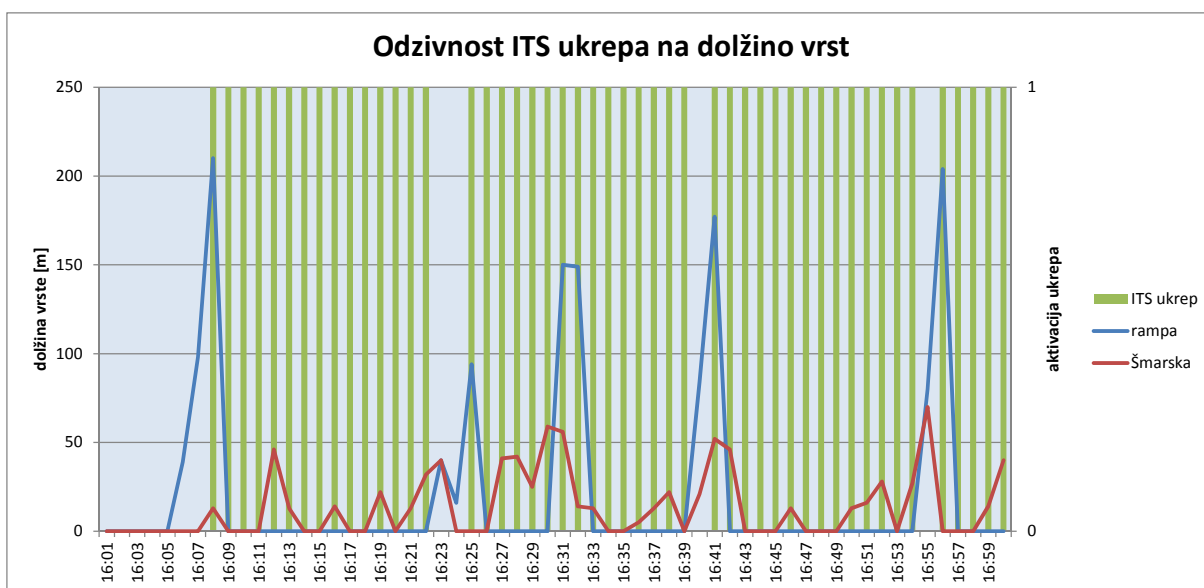
Slika 4-12: Shema algoritma za izvajanje ITS ukrepa

Figure 4-12: Algorithm for ITS measure

Za večjo zanesljivost rezultatov smo simulacijo pognali desetkrat, z različnimi naključnimi začetnimi semeni (angleško *random seed*). Pri analizi rezultatov smo se osredotočili na ključna vprašanja, na katere je morala dati odgovor mikroskopska simulacija:

- ali se ITS ukrep ustrezno odzove na nastalo prometno situacijo in njene spremembe
- ali ITS ukrep povzroči bistveno poslabšanje razmer na sekundarni Šmarski cesti
- ali ITS ukrep prinaša koristi uporabnikom.

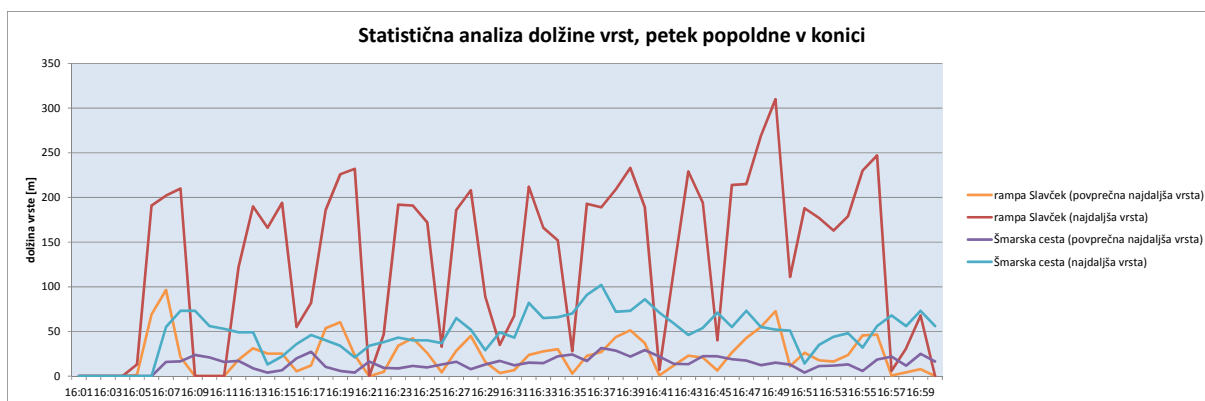
Na sliki (Slika 4-13) je prikazano delovanje (vklop/izklop) ITS ukrepa v odvisnosti od dolžine vrst na hitri cesti in Šmarski cesti. Ko nastane daljša vrsta na rampi hitre ceste (modra črta) se ITS ukrep vklopi (zelen stolpec), kar povzroči skrajšanje vrste. Med vključenim ITS ukrepom lahko pride do nastanka vrste na Šmarski cesti (rdeča črta), kar rešujemo z začasnim izklopom ITS ukrepa (brez zelenega stolpca). Algoritem torej vklaplja in izklaplja ITS ukrep in se tako ustrezno odziva na prometno situacijo.



Slika 4-13: Odzivnost ITS ukrepa na prometne razmere (dolžina vrst na rampi HC in Šmarski cesti)

Figure 4-13: ITS measure response to traffic conditions (queue lengths on HC motorway ramp and Šmarska road)

Na sliki (Slika 4-14) so analizirane najdaljše vrste na rampi hitre ceste (v območju priključka Slavček) in na Šmarski cesti. Prikazane so povprečne najdaljše vrste in absolutne najdaljše vrste (v okviru desetih simulacij, kar na primer predstavlja deset konic v turistični sezoni). Povprečna najdaljša vrsta je povprečje najdaljših vrst in predstavlja povprečne prometne razmere v konici. Tako vrsta na rampi hitre ceste (oranžna črta) kot vrsta na Šmarski cesti (vijolična črta) ne dosežeta vrednosti 100 m, kar pomeni, da ITS ukrep uspešno rešuje situacijo na rampi hitre ceste, hkrati pa ne povzroči bistvenega poslabšanja na Šmarski cesti. Absolutno najdaljši vrsti (rdeča in modra črta) predstavljata dogodek, ki se bo zgodil verjetno enkrat na leto v turistični konici. Tudi v tem primeru je vrsta na rampi hitre ceste dolga največ 300 m in ne seže do voznih pasov hitre ceste. Najdaljša vrsta na Šmarski cesti je dolga največ 100 m in ne seže do prvega krožišča v smeri proti centru Kopra.



Slika 4-14: Statistična analiza dolžine najdaljših vrst

Figure 4-14: Statistical analysis of the longest queue lengths

Analiza dolžine vrst torej dokazuje (na podlagi ustreznih in validiranih prometnih obremenitev), da ITS ukrep rešuje težavo nastanka vrste na rampi hitre ceste in istočasno ne povzroča poslabšanja na glavni Šmarski cesti.

V preglednici (Preglednica 4-4) so prikazane prometne koristi uvedbe ITS ukrepa. Vsi indikatorji jasno kažejo, da ITS ukrep prinaša uporabnikom predvsem prihranke čase.

Preglednica 4-4: Analiza prometnih koristi ITS ukrepa

Table 4-4: ITS measure benefits

PROMETNE RAZMERE BREZ ITS UKREPA IN Z NJIM		
prometni kazalec	brez ITS ukrepa	z ITS ukrepom
število vozil na omrežju	14.191	14.181
povprečni potovalni čas na vozilo [min]	6,9	5,1
povprečna hitrost [km/h]	35,9	53,9
povprečna zamuda na vozilo [min]	3,2	1,0
povprečno število ustavljanj na vozilo	9,1	1,5

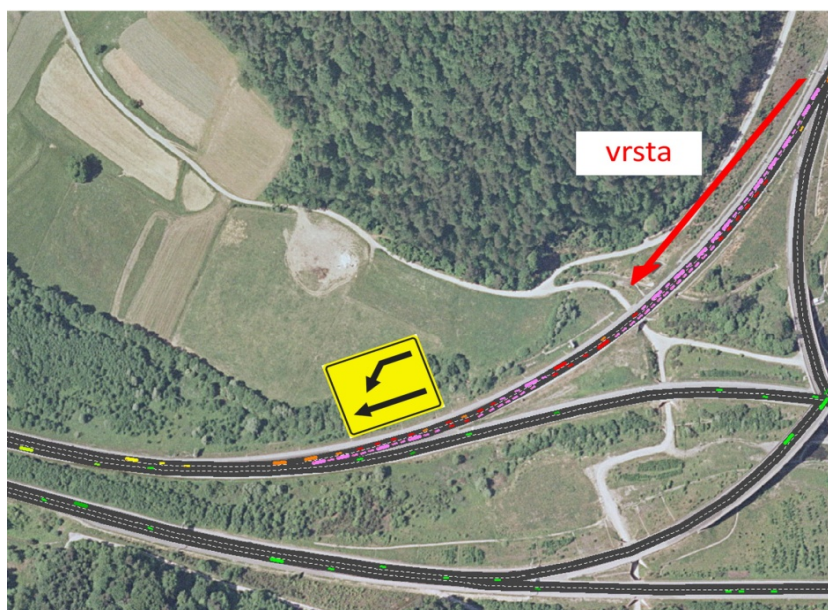
Ostale koristi (prihranki goriva, okoljske koristi zaradi zmanjšanja emisij v prometnih zastojih) niso bile analizirane, vendar lahko z logičnim sklepanjem na osnovi drugih, podobnih primerov iz prakse ugotovimo, da tudi te ne bi bile zanemarljive.

#### 4.1.4 Ukrep spremenljive uporabe voznih pasov v razcepu

Ukrep spremenljive uporabe voznih pasov v razcepu je eden od ukrepov, kjer se s pomočjo ITS sistemov spreminja prometna infrastruktura. Trenutno je (še) relativno nerazširjen. Glavni vzrok je po našem mnenju pomanjkanje primernih mest za njegovo uvedbo. Primerna mesta so predvsem v območjih avtocestnih razcepov, kjer je običajno izvedena redukcija ene od dveh združujočih se ramp. Pogosta težava pri opisani redukciji je, da promet v konicah ni simetričen. To pomeni, da je vsaj v eni konici promet na reducirani rampi močnejši od "glavne" rampe, kar se dogaja predvsem v mestnih območjih. Zato je ukrep spremenljive uporabe voznih pasov verjetno smiseln, potrebno pa je to dokazati z mikroskopsko simulacijo.

Za primer modeliranja smo izbrali razcep Malence na ljubljanskem avtocestnem obroču, kjer smo uporabili obstoječi prometni model (PNZ, 2007), in sicer napoved za leto 2015.

Na priključni rampi iz predora Malence proti južni obvoznici zaradi redukcije dveh pasov na enega v obeh urnih konicah prihaja do zastojev. Nastane vrsta, ki se potegne do predora in še dlje (Slika 4-15).

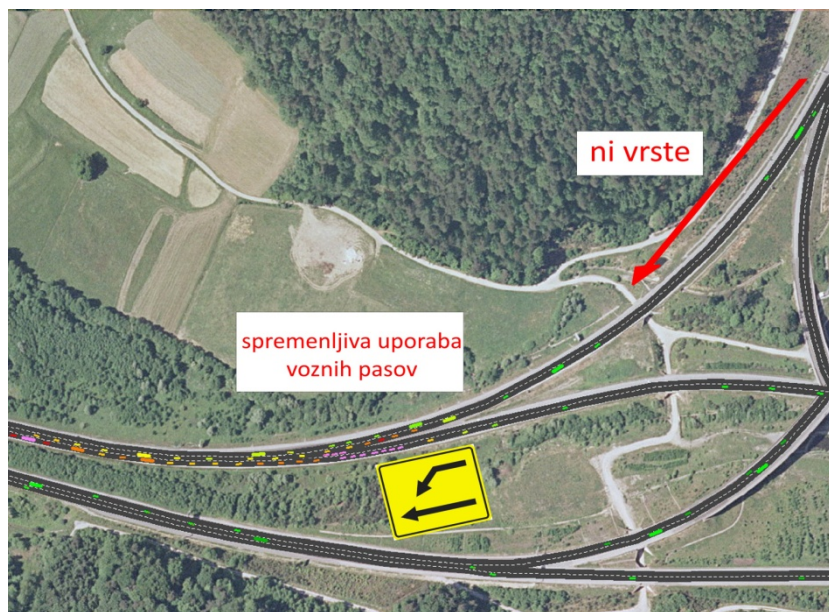


Slika 4-15: Razcep Malence, jutranja konica, leto 2015, omrežje brez ITS ukrepov

Figure 4-15: Malence motorway junction, morning peak, year 2015, “do-nothing” network

Zaradi redukcije dveh pasov na enega na severozahodni rampi, se pojavi dolga vrsta, ki sega do predora Golovec in dlje.

To težavo lahko rešimo s spremenljivo redukcijo pasov na uvoznih rampah v različnih obdobjih dneva (angleško *lane control*). Gre torej za ITS ukrep, s katerim se izboljša prepustnost obstoječe cestne infrastrukture. Na ta način razcep ni več problematičen glede prepustnosti (Slika 4-16). Ukrep smo v mikroskopski simulaciji modelirali tako, da se je redukcija iz dveh pasov na enega iz rampe iz smeri predora Golovec prestavila na manj obremenjeno rampo iz smeri Dolenjske. V modelu smo to naredili s spremembo števila pasov povezovalnih odsekov.



Slika 4-16: Razcep Malence, jutranja konica, leto 2015, omrežje z ITS ukrepom spremenljive uporabe vozni pasov

Figure 4-16: Malence motorway junction, morning peak, year 2015, ITS measure “lane control

Razmere se z uvedbo ITS ukrepa bistveno izboljšajo.

Ukrep je možno relativno enostavno vzpostaviti, saj je poleg detektorjev, ki merijo prometne tokove in hitrosti, potrebno postaviti nekaj portalov z grafičnimi prikazovalniki na obe rampi. Ti portali sporočajo voznikom ali imajo možnost uporabe obeh vozni pasov ali pa se morajo postopoma preusmeriti na en vozni pas. Ukrep je potrebno seveda voditi iz nadzornega centra in torej ne zahteva večjih gradbenih posegov. Potrebno pa je zagotoviti ustrezno komunikacijo in napajanje.

Rezultati mikroskopske simulacije so lahko za posamezno vozilo (povprečna hitrost, vrsta, zamuda), vozila na izbranem odseku (potovalni čas) ali pa za vsa vozila na omrežju (povprečni potovalni čas na vozilo, povprečna hitrost, povprečna zamuda, povprečno število ustavljanj in drugo).

Za omenjeni primer smo naredili primerjavo prometnih kazalcev za celotno omrežje.

Preglednica 4-5: Analiza prometne učinkovitosti za celotno omrežje, jutranja konica, leto 2015

Table 4-5: Network performance, morning peak, year 2015

CELOTNO OMREŽJE				
	potovalni čas na vozilo	povprečna hitrost	povprečna zamuda na vozilo	povprečno število ustavljanj na vozilo
brez ITS ukrepov	7,5 min	58 km/h	3,0 min	5,7
ukrep spremenljive uporabe voznih pasov	6,7 min	68 km/h	1,7 min	1,7
razlika	-0,8 min (-11 %)	+10 km/h (+17 %)	-1,3 min (-43 %)	-4,0 (-70 %)

Tudi numerična primerjava jasno pokaže prednosti uvedbe ITS ukrepa spremenljive uporabe voznih pasov.

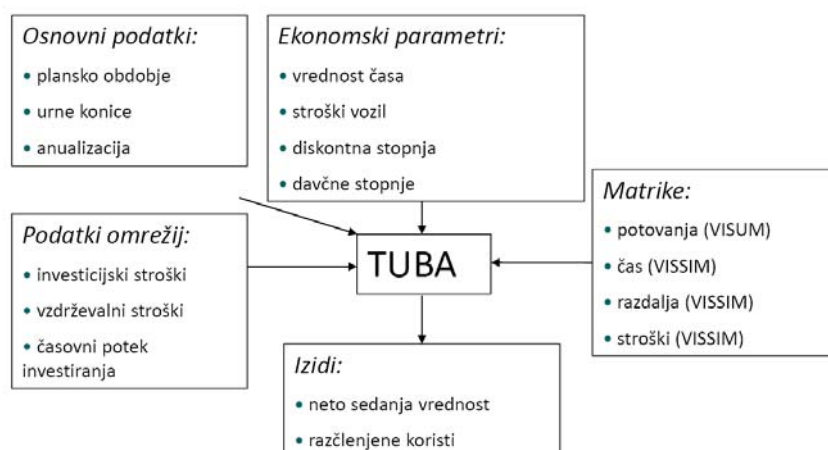
Mikroskopska simulacija, poleg že prej opisanih možnosti analiziranja, omogoča tudi ekonomsko vrednotenje izboljšanja prometnih razmer (skrajšanje potovalnih časov, zmanjšanje zamud, prihrank pri gorivu). Z uporabo dodatnih modulov nekatera orodja omogočajo tudi izračun emisij izpušnih plinov.

Za uvedbo omenjenega ukrepa smo z uporabo orodja za ekonomsko vrednotenje TUBA izračunali družbeno ekonomske koristi.

#### 4.1.4.1 Ekonomsko vrednotenje uvedbe ITS ukrepov

ITS ukrepi se dinamično spreminjajo skozi obdobja dneva, odvisno od prometnih razmer. Zato mora izračun ekonomskega vrednotenja (podpoglavje 3.6) temeljiti na urnih količinah prometa, ki omogočajo natančno oceno potovalnih časov, zamud ter prihrankov goriva in drugih stroškov. Orodje za ekonomsko vrednotenje mora omogočati uporabo rezultatov mikroskopske simulacije, ki obravnava vsako vozilo individualno.

Za izračun ekonomske upravičenosti opisanega ukrepa spremenljive uporabe voznih pasov je bilo uporabljeno orodje TUBA. Na sliki (Slika 4-17) so prikazani potrebni vhodni podatki, za katere so v nadaljevanju navedene tudi uporabljene vrednosti in viri.



Slika 4-17: Shematski prikaz vhodnih podatkov in rezultatov orodja TUBA

Figure 4-17: Overview of input and output data for TUBA software

#### 4.1.4.1.1 Osnovni podatki

Za plansko obdobje oziroma obdobje vrednotenja je bilo izbrano obdobje 15 let (2015-2030), upoštevana je 7-odstotna diskontna stopnja in raven cen september 2009. Upoštevano je, da je prvo leto obratovanja ukrepa leto 2015.

Modeliran, upoštevan in s tem vrednoten je bil samo promet v eni jutranji konici (7.00-8-00). To je v Evropski uniji (in tudi pri nas) dokaj razširjen način vrednotenja, kajti če že del koristi upravičuje naložbo, je ta logično upravičena. To je tudi skladno s slovensko Uredbo, ki ne določa, kolikšna količina prometa mora biti upoštevana.

Anualizacija je vrednost, ki predstavlja povprečno število delovnih dni v letu, za katere se vrednotijo koristi. V Sloveniji se upošteva 253 delovnih dni.

#### 4.1.4.1.2 Investicijski stroški

Investicijski stroški so bili na podlagi veljavnega investicijskega programa za sistem za vodenje in nadzor prometa v okviru magistrske naloge ocenjeni na 1.362.800,22 €, raven cen september 2009 (PNZ, 2008b). Prikazani so v preglednici (Preglednica 4-6) in vključujejo stroške projektov, gradnje, montaže vseh potrebnih sistemov za vzpostavitev ukrepa



spremenljive uporabe voznih pasov v razcepu Malence. Predvideno leto vzpostavitve sistema (časovni potek investicije) je v letu 2014. Vzdrževalni stroški niso bili upoštevani.

Preglednica 4-6: Pregled investicijskih stroškov za vzpostavitev ukrepa ITS spremenljive uporabe odstavnih pasov

Table 4-6: Investment costs for ITS measure “lane control”

Opis postavke			raven cen		
			nov.06	mar.08	sep.09
Splošno	splošno (cena na 1 km)			30.651,57 €	31.663,07 €
	RNC (Dragomelj) (cena na 1 km)			102.630,30 €	106.017,10 €
Periferna oprema	nadzorni sistem Malence		115.882,16 €	125.036,85 €	129.163,07 €
	TK sistem Malence		220.211,81 €	237.608,54 €	245.449,62 €
	video nadzorni sistem Malence		150.961,61 €	162.887,58 €	168.262,87 €
	štetje prometa Malence		91.971,29 €	99.237,02 €	102.511,84 €
	portali in obvestilne table Malence	6 SLS	313.920,88 €	338.720,63 €	349.898,41 €
Gradbena dela	gradbena dela Malence	izdelava temelja za enojni SLS (12 kom)	38.980,97 €	42.060,47 €	43.448,46 €
		urejanje okolice, varnostna ograja, razno (1 km)	77.412,50 €	83.528,09 €	86.284,51 €
Elektromontažna dela	elektromontažna dela Malence		213.332,08 €	230.185,31 €	237.781,43 €
Skupaj			<b>1.222.673,30 €</b>	<b>1.319.264,49 €</b>	<b>1.362.800,22 €</b>

#### 4.1.4.1.3 Ekonomski parametri

Prihranki časa prinašajo običajno več kot 80 % vseh koristi, zato je to najpomembnejši ekonomski podatek na enoto za analizo stroškov uporabnikov.

Osnovni strošek časa na uro znaša 8,63 € in predstavlja vrednost povprečne slovenske bruto plače.

Po priporočilih angleškega Department for Transport je vrednost časa poslovnih potnikov precej večja kot potnikov, ki potujejo z drugimi nameni. Tudi vozniki osebnih avtomobilov, ki se vozijo poslovno, imajo večjo vrednost časa kot njihovi sopotniki na poslovni vožnji. Poslovni potniki na javnem prometu imajo enako vrednost časa kot poslovni sopotniki v osebnih avtomobilih in torej prav tako nižjo kot poslovni vozniki osebnih avtomobilov. Ta

razmerja so ugotovljena na podlagi anket. Uporabljene vrednosti so predstavljene v preglednici (Preglednica 4-7).

Vrednosti časa, ki so bile uporabljene, so primerljive s preteklimi domačimi izračuni ekonomske upravičenosti. Zadnja slovenska raziskava, ki jo je opravil PTI (2007) in evropske smernice sicer priporočajo še precej višje vrednosti časa, zlasti za neposlovne namene, kot je dom-delo (IER, 2007).

Preglednica 4-7: Stroški časa za voznike in sopotnike osebnih vozil, ter za voznike tovornih vozil, cene september 2009

Table 4-7: Value of time for car and truck drivers and passengers, September 2009

prometno sredstvo	namen potovanja	oseba	strošek časa osebe na uro (€)	delež od bruto plače (%)	zasedenost vozila
osebni avto	poslovno	voznik	8,63	100	1,25
		potnik	6,90	80	
	ostalo		2,59	30	1,45
tovorno vozilo	poslovno	voznik	9,49	110	

Rast plač (in s tem vrednosti časa) je skladno z evropsko prakso enaka rasti družbenega proizvoda in je bila ocenjena s strani Urada RS za makroekonomske analize (UMAR). Zadnja projekcija je v razponu med 0,7 % in 3,7 %.

Zasedenost vozil glede na namen potovanja (1,45 za neposlovna potovanja in 1,25 za poslovna potovanja) in delež poslovnih in neposlovnih potovanj (.).

Preglednica 4-8) sta vzeta iz ankete ljubljanske regije (PNZ, 2003).

Preglednica 4-8: Delež potovanj po namenih z osebnim avtom

Table 4-8: Purpose split for car

urna konica	osebni avto	
	poslovno	neposlovno
jutranja	8 %	92 %



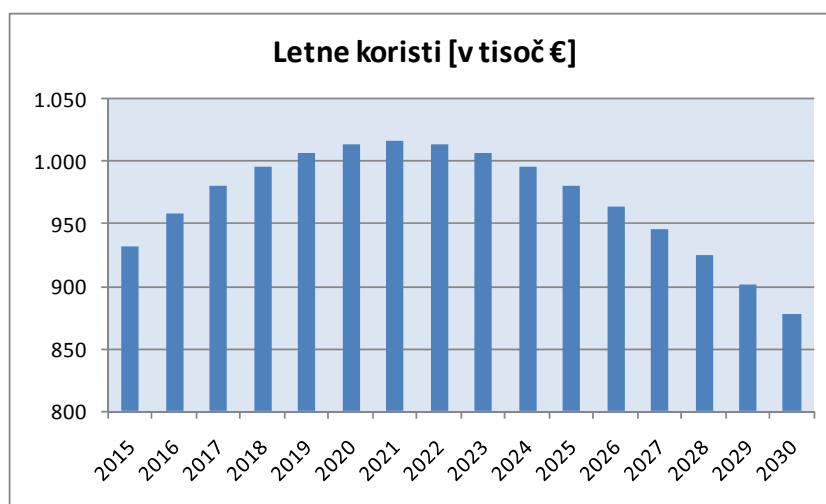
Osnovni (in najbolj pomemben) rezultat ekonomskega vrednotenja je razmerje med koristmi in stroški. Če je neto sedanja vrednost pozitivna in če je razmerje med koristmi in stroški večje kot 1, je naložba ekonomsko upravičena.

Preglednica 4-9: Ekonomska upravičenost uvedbe ITS ukrepa spremenljive uporabe voznih pasov

Table 4-9: Economic appraisal of ITS measure “lane control”

kazalci				
sedanji stroški [mio €]	sedanje koristi [mio €]	neto sedanja vrednost [mio €]	razmerje koristi/stroški	prihranek goriva [v mio l/ 15 let]
1,590	15,509	13,919	9,754	3 (3 %)

Naložba v uvedbo ITS ukrepa nedvomno prinaša veliko koristi. To je logična posledica zastojev, do katerih bi prišlo, če ukrep ne bi bil uveden. Ukrep prinaša koristi skozi celotno obdobje vrednotenja, v prvem obdobju letne koristi naraščajo zaradi rasti prometa, v drugem obdobju pa padajo zaradi upoštevanja diskontne stopnje.

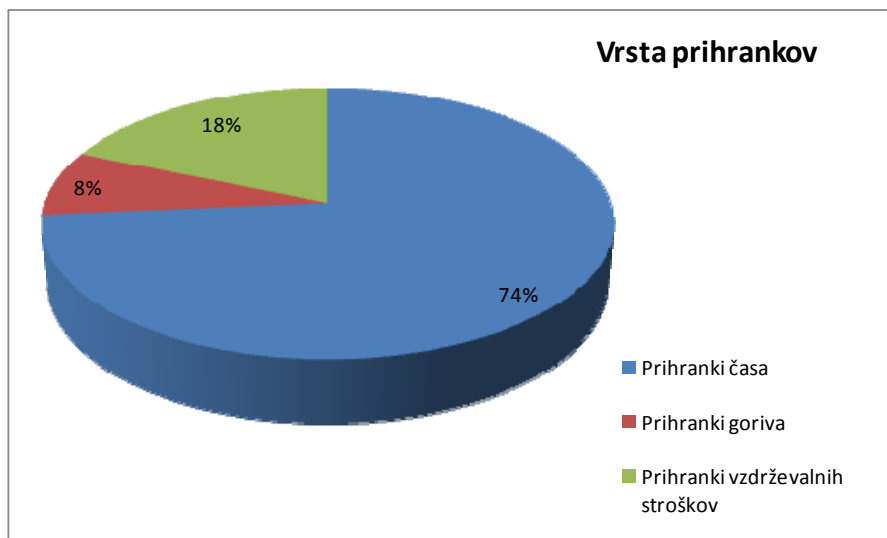


Slika 4-19: Letne koristi v obdobju vrednotenja

Figure 4-19: Annual benefits during appraisal period.

Veliko večino koristi (Slika 4-20) predstavljajo prihranki pri času (74 %), sledijo prihranki pri vzdrževanju, tem pa prihranki goriva. Zato je seveda pomembno, da je porabljen čas

podrobno (mikroskopsko) vrednoten. Samo podrobno prometno vrednotenje omogoča ugotovitev resničnih koristi in s tem resnične upravičenosti naložbe.



Slika 4-20: Vrste prihrankov

Figure 4-20: Benefit types

Z uporabo rezultatov mikroskopske simulacije je torej možno natančno vrednotiti ekonomsko upravičenost uvedbe ITS ukrepov. Pogosto je visoka stopnja upravičenosti tudi dodaten argument pri odločitvi o začetku izvedbe.

## 4.2 Modeliranje v fazi upravljanja

Modeliranje v fazi upravljanja pomaga upravljavcu sistema ITS, da bolje razume obnašanje voznikov, ugotovi vzroke za nastajanje zastojev, izboljša delovanje sistema in z vsem tem zmanjša zamude in poveča prometno varnost ter udobje voznikov.

V nadaljevanju so prikazani primeri uporabe na že delujočem ITS sistemu.

Za praktični primer kalibracije mikroskopskega modela je bil izbran izredni dogodek na severni obvoznici. Najprej bi namreč radi v postopku kalibracije in validacije dokazali, da je mikroskopska simulacija ustrezna za posnemanje dejanskega stanja tudi izrednih dogodkov.

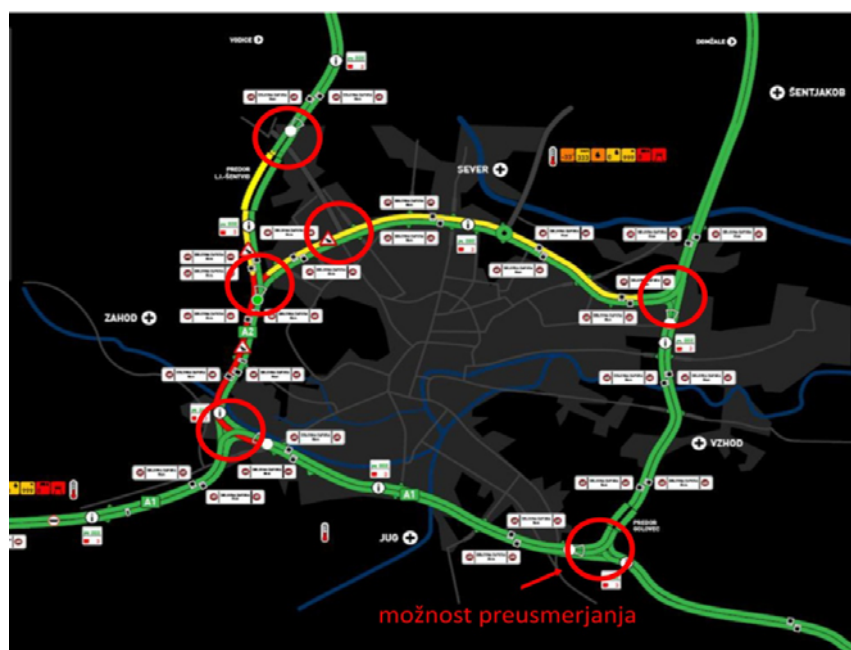
Nato smo na tem primeru prikazali nekatere možne izboljšave delovanja celotnega sistema, ki bi jih lahko tudi praktično uporabili (ukrep preusmerjanja in hitrejši odziv interventnih služb).

V nadaljevanju smo na primeru širšega modela prikazali še koristi delovanja ITS sistema v primeru nesreče v predoru Šentvid.

Za zaključek smo na dveh primerih z dvema metodama prikazali še vpliv ITS ukrepa homogenizacije prometnega toka na prometno varnost.

#### 4.2.1 Ukrepi sistema za nadzor in vodenje prometa (SNVP) na ljubljanski obvoznici

Sistem za nadzor in vodenje prometa na zahodni in severni obvoznici (z vključenim predorom Šentvid), ki je začel delovati leta 2008, je prva faza širšega sistema, ki bo pokrival in upravljal z omrežjem avtocest in hitrih cest na območju ljubljanskega avtocestnega obroča in priključnih krakov. Sistem je bil razvit v podjetju Traffic Design in je v upravljanju DARS-a. Regionalni nadzorni center (RNC) je na začetku deloval v avtocestni bazi Brdo v Ljubljani, v letu 2009 pa se je preselil v regionalni nadzorni center v Dragomlju.



Slika 4-21: Shema SNVP na ljubljanskem avtocestnem obroču in priključnih krakih (DARS, 2009) z mesti odločanja/preusmerjanja

Figure 4-21: Ljubljana motorway ring TMS scheme with rerouting points (DARS, 2009)

Sistem omogoča izvajanje več ITS ukrepov v vseh obdobjih dneva in ob izrednih dogodkih.

Prometni model sistema za nadzor in vodenje prometa na podlagi vhodnih parametrov prometnega toka, izmerjenih na terenu, nenehno izračunava prometna stanja. V koničnih obdobjih in ob izrednih dogodkih pa predlaga oziroma izvaja ukrepe. Stopnje prometnega stanja so povezane z nivoji uslug, ki predstavljajo kvalitativno merilo, ki opisuje vozne pogoje znotraj prometnega toka v smislu različnih merjenj, kot so hitrost, potovalni čas, svoboda manevriranja, motnje toka in udobnost. Vozni pogoji so opisani s petimi stopnjami prometnih stanj od stabilnega do zgoščenega, pri čemer stabilno prometno stanje predstavlja najboljše vozne pogoje, zgoščeno prometno stanje pa najslabše vozne pogoje. Za homogenizacijo prometnega toka v času konic se voznike preko sistema za nadzor in vodenje prometa (predvsem s portali spremenljive prometno-informativne signalizacije (SPIS)) obvešča o trenutnem stanju na cesti in z omejevanjem oziroma pospeševanjem hitrosti posledično vodi prometni tok.

Ob izrednih dogodkih, kot so nesreča, okvara vozila, zapora ceste ali dela na cesti, sistem omogoča izvajanje ukrepa preusmeritve prometa na predvidene alternativne poti. Ob zaprtju predora Šentvid (nesreča, dela) se promet preko SPIS-ov preusmeri preko Celovške ceste in severne obvoznice. Sistem omogoča tudi preusmeritev na južno obvoznico pred razcepom Kozarje ob primeru zastojev ali izrednih dogodkov na zahodni obvoznici.

#### **4.2.2 Kalibracija in validacija**

Vsaka simulacija mora biti pred uporabo kalibrirana in validirana. Kalibracija in validacija v običajnih prometnih razmerah brez motenj sta že uveljavljena postopka, zato bomo v nadaljevanju opisali postopka kalibracije in validacije ob izrednih dogodkih. Tako želimo preveriti, ali mikroskopska simulacija lahko dovolj natančno prikaže dejansko stanje na terenu.

Uporabljeni mikroskopski simulacijski model je avtorska nadgradnja obstoječega širšega modela (PNZ, 2008a). Mikroskopske modele lahko delimo namreč tudi na širše in ožje, glede na obseg omrežja in namen naloge, ki ga posamezni model pokriva. Širši modeli (na primer celoten ljubljanski avtocestni obroč) so zaradi večjega obsega primerni za celovite analize vplivov posameznih elementov omrežja (na primer širitev odsekov, dodatni priključki) na

celotno omrežje (na primer zamude vseh uporabnikov na širšem območju). Zaradi obsega modela je težko nadzirati posamezne detajle (na primer zapora, odvijanje prometa v posameznih križiščih). Pri mikroskopskih modelih, kjer je obravnavano manjše točkovno ali linijsko območje (na primer posamezno križišče ali več zaporednih križišč, avtocestni odsek s pripadajočimi priključki), je možnost bolj natančnega modeliranja posameznih elementov, kjer se lahko veliko lažje opazuje odvijanje prometa (prepletanje, vključevanje).

Mikroskopski model vključuje samo zadnjo fazo pri prometnem modeliranju, to je obremenjevanje, zato je najprej potrebno pripraviti matriko potovanj osebnih in tovornih vozil. Matrika potovanj pri dinamičnem obremenjevanju vedno izvira iz makroskopskega modela, ki za natančno analizo izbranega območja zahteva dodatno kalibracijo. Za primer uporabe mikrosimulacijskega modela je bil iz širšega modela ljubljanskega avtocestnega obroča narejen izsek zahodne in dela severne obvoznice, ki je z obremenitvami povprečne jutranje konice in odstopanji od števnih podatkov (oboje v vozilih na uro in smer) prikazan na sliki (Slika 4-22).

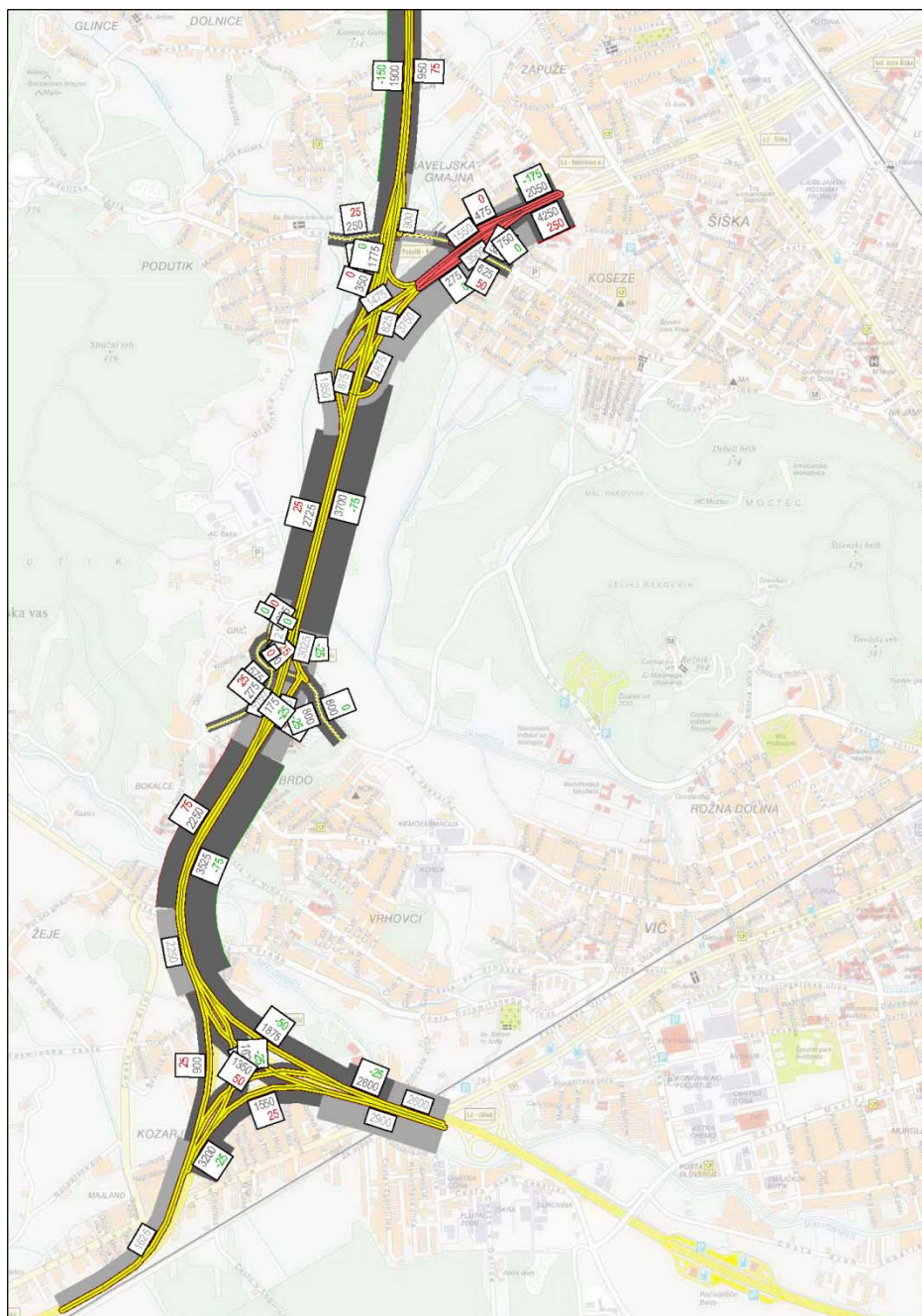
Model je bil torej na makroskopski ravni dodatno kalibriran na števne podatke povprečne jutranje konice. Uspešnost kalibracije matrike potovanj se preveri s primerjavo števnih in modelskih podatkov pretoka vozil. Uporablja se več indikatorjev ustreznosti, ki so prikazani v preglednici (Preglednica 4-10).

Preglednica 4-10: Ustreznost kalibracije makroskopskega modela, jutranja konica, leto 2008

Table 4-10: Goodness of fit of calibration for macroscopic model, morning peak, year 2008

indikator	kriterij	rezultat		
		osebna vozila	tovorna vozila	vsa vozila
RMSE	<0,30	0,06	0,19	0,06
korelacija	>0,95	0,99	0,98	0,99
delež odsekov z GEH <5	>85 %	100 %	98 %	100 %





Slika 4-22: Prometne obremenitve in ujemanje s števničnimi podatki, jutranja konica, leto 2008

Figure 4-22: Traffic volumes and deviation from count data, morning peak, year 2008

Za primer kalibracije, validacije in primera uporabe mikroskopske simulacije za potrebe upravljanja sistema je bil izbran izreden dogodek na ljubljanski severni obvoznici, ki se je zgodil 11. marca 2009 v obdobju jutranje konice. Za omenjene namene so bili uporabljeni

podatki, ki jih je posredoval Regionalni nadzorni center Ljubljana (v upravljanju DARS-a) in sicer minutni podatki mikrovalovnih detektorjev (število vozil, povprečna hitrost) in posnetki nadzornih kamer.

Izredni dogodek se je začel, ko je vozilo na odstavnem pasu, zaradi manjše nesreče, potrebovalo pomoč na cesti. Vozilo pomoči na cesti se je iz neznanega razloga zaustavilo neposredno na voznem pasu in tako zmanjšalo kapaciteto hitre ceste na en pas. Dogodek, ko je zaradi različnih vzrokov (nesreča, okvara, delo na cesti) zaprt vozni pas, je precej pogost. Posebno na ljubljanskem avtocestnem obroču, kjer je velika gostota priključkov. Zastoj se je začel ob 7:31, kot je tudi vidno na sliki (Slika 4-23).



Slika 4-23: Vzrok zastoja (pomoč na cesti)

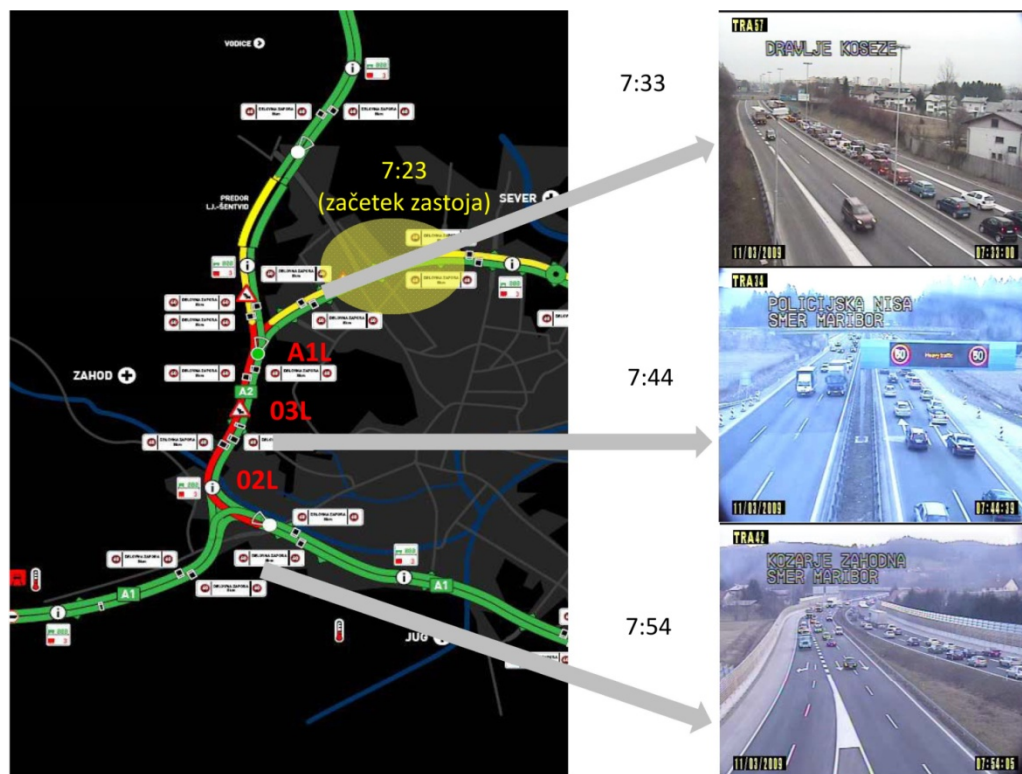
Figure 4-23: Reason for traffic jam (road assistance)

Za analizo prometnih razmer pred in po dogodku so bili uporabljeni podatki, ki jih zbira RNC. Podatki so bili najprej analizirani, nato pa uporabljeni za kalibracijo in validacijo.

Mikrovalovni detektorji (naprave za štetje in klasifikacijo vozil), nameščeni na portalih nad cesto, detektirajo čas prehoda posameznega vozila na posameznem voznem pasu in določijo njegov tip (osebno, tovorno vozilo) in hitrost prehoda. Z beleženjem časa prehoda posameznih vozil, se lahko določi tudi povprečen časovni razmak med vozili. Podatke, ki se

zbirajo, sistem avtomatsko obdela in izračuna minutne vrednosti (povprečni urni pretok, povprečno hitrost in povprečni razmak) posameznih tipov vozil.

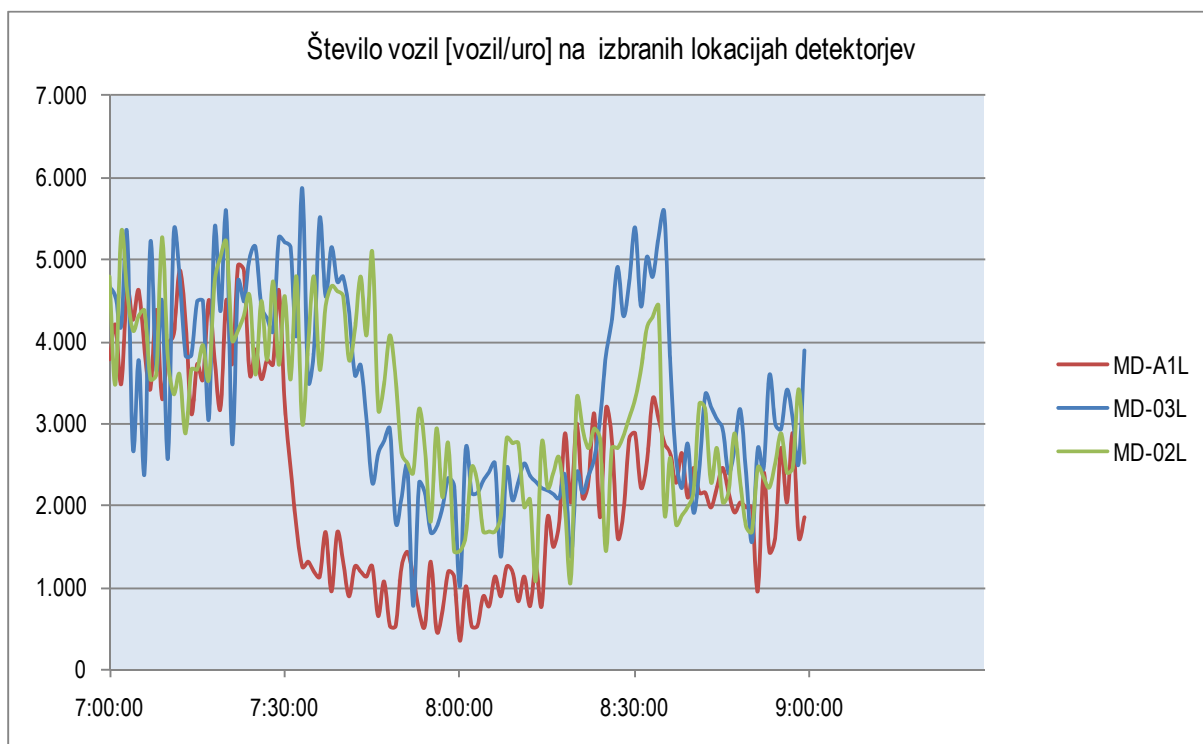
Na vsakem portalu je nameščena tudi video kamera, ki služijo za pomoč operaterju pri analizi prometnih razmer. Nekatere kamere so tudi detekcijske, saj zaznajo nastanek vrste. Iz slik in video posnetkov se lahko določi razvoj zastoja v prostoru in času. Razvoj zastoja na shemi mreži je prikazan na sliki (Slika 4-24).



Slika 4-24: Časovni in prostorski razvoj zastoja (vizualno)

Figure 4-24: Time and spatial development of the traffic jam (visual)

V približno 30 minutah od začetka zastoja, je ta segel do razcepa Kozarje in pokrival celotno zahodno obvoznico v smeri proti Celovški cesti. Iz minutnih vrednosti pretoka vozil in povprečne hitrosti na treh merilnih mestih, ki so prikazana na sliki (Slika 4-25), se lahko tudi analitično ugotovi razvoj zastoja.



Slika 4-25: Časovni razvoj zastoja (analitično)

Figure 4-25: Time development of the traffic jam (analysis)

Mikroskopska simulacija omogoča merjenje minutnih vrednosti prometnih kazalcev na poljubnih mestih na omrežju. Skupaj z vizualnim preučevanjem odvijanja prometa je torej primerno orodje za analizo izrednega dogodka.

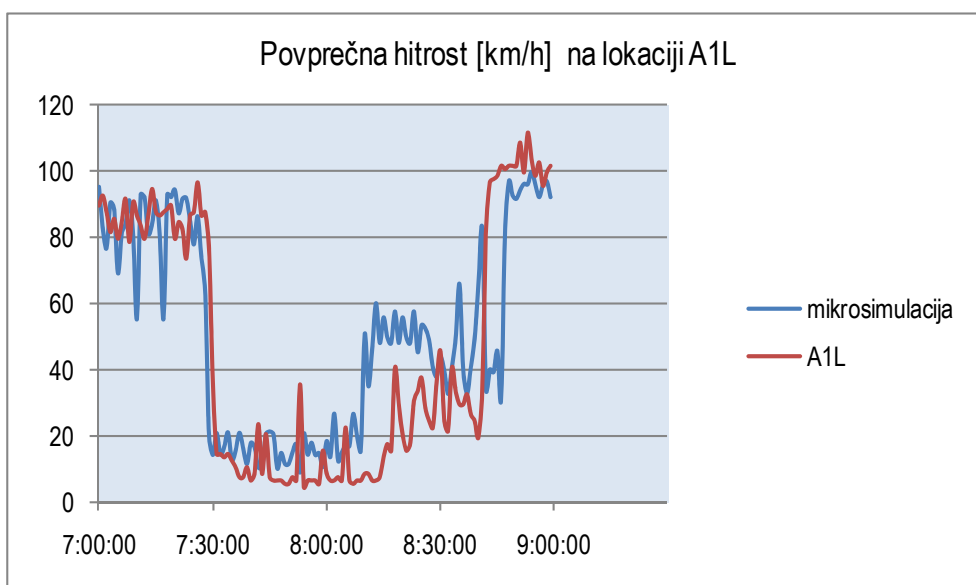
Primerjava rezultatov mikroskopskega simulacijskega modela s stanjem, ugotovljenim na terenu, je potekala na dveh ravneh. Z vizualnim preučevanjem je bilo analizirano obnašanje (razvrščanje iz dveh voznih pasov na enega) voznikov ob prehodu zapore in časovni potek zastoja (kdaj je zastoj dosegel posamezno točko na omrežju). Analitična primerjava minutnih vrednosti pretoka in povprečne hitrosti na mestih, kjer so postavljeni detektorji, pa potrdi ali ovrže dejansko ujemanje mikroskopske simulacije z resničnim stanjem.

Prometni zastoj zaradi zmanjšane kapacitete odseka je predvsem linijski dogodek, to pomeni, da se opazuje razmere na koridorju. Prisoten in obravnavan je tudi vpliv na pripadajoče priključke in z njimi povezano cestno omrežje.

Zato je bil v fazi kalibracije poudarek na modeliranju in kalibriranju obnašanja voznikov ob prehodu ovire (prepletanje, vključevanje, princip zadrge) in obnašanju voznikov v vrsti (prepletanje, pospeševanje, menjavanje pasov). Pri osnovni kalibraciji je bil glede na vizualno primerjavo postavljen sistem pravil prednosti, ki je natančno opisal obnašanje voznikov pri zapori. Tako je bilo lahko natančno modelirano dejansko obnašanje voznikov na primer pri redukciji na en pas, kjer se morajo vozniki iz stoječe vrste vključiti na sosednji pas z majhnimi razmaki med vozili.

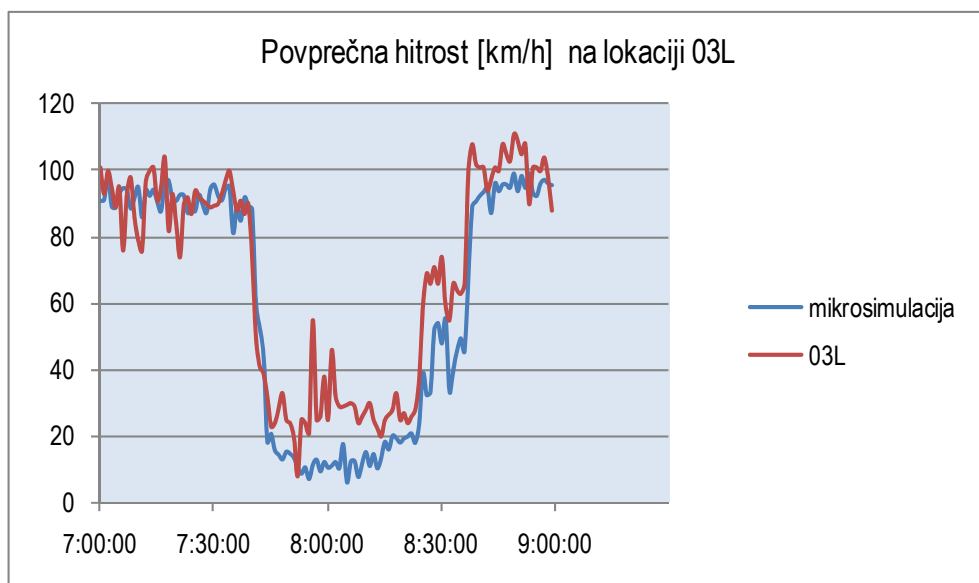
Kalibraciji vedno sledi validacija. S podatki, ki niso odvisni od tistih, ki smo jih uporabili pri kalibraciji, preverimo, kako model simulira dejansko stanje. Če je bilo v fazi kalibracije uporabljeno vizualno preučevanje, so bili za fazo validacije uporabljeni minutni podatki.

Na slikah (Slika 4-26, Slika 4-27, Slika 4-28) je prikazano ujemanje rezultatov mikroskopske simulacije z izmerjenimi na terenu.



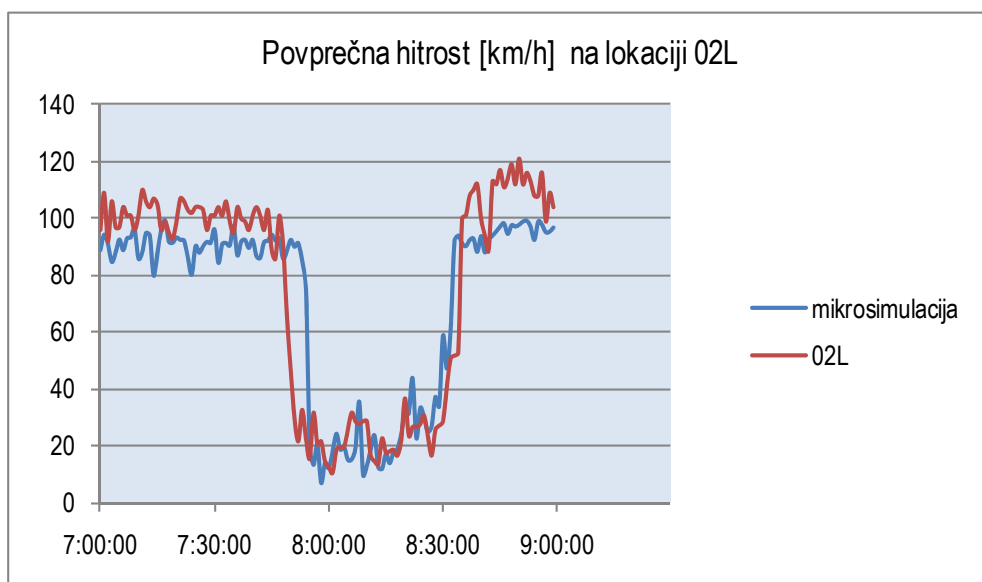
Slika 4-26: Primerjava minutnih vrednosti povprečne hitrosti v mikroskopski simulaciji z izmerjenimi vrednostmi na lokaciji detektorja A1L

Figure 4-26: Comparison of minute values for average speed between microscopic simulation and field data for detector point A1L



Slika 4-27: Primerjava minutnih vrednosti povprečne hitrosti v mikroskopski simulaciji z izmerjenimi vrednostmi na lokaciji detektorja 03L

Figure 4-27: Comparison of minute values for average speed between microscopic simulation and field data for detector point 03L

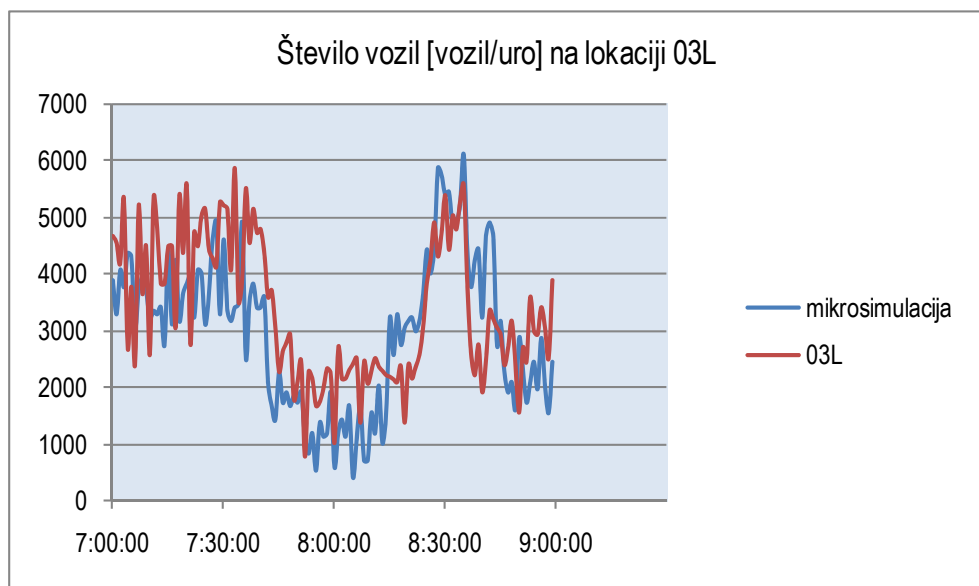


Slika 4-28: Primerjava minutnih vrednosti povprečne hitrosti v mikroskopski simulaciji z izmerjenimi vrednostmi na lokaciji detektorja 02L

Figure 4-28: Comparison of minute values for average speed between microscopic simulation and field data for detector point 02L

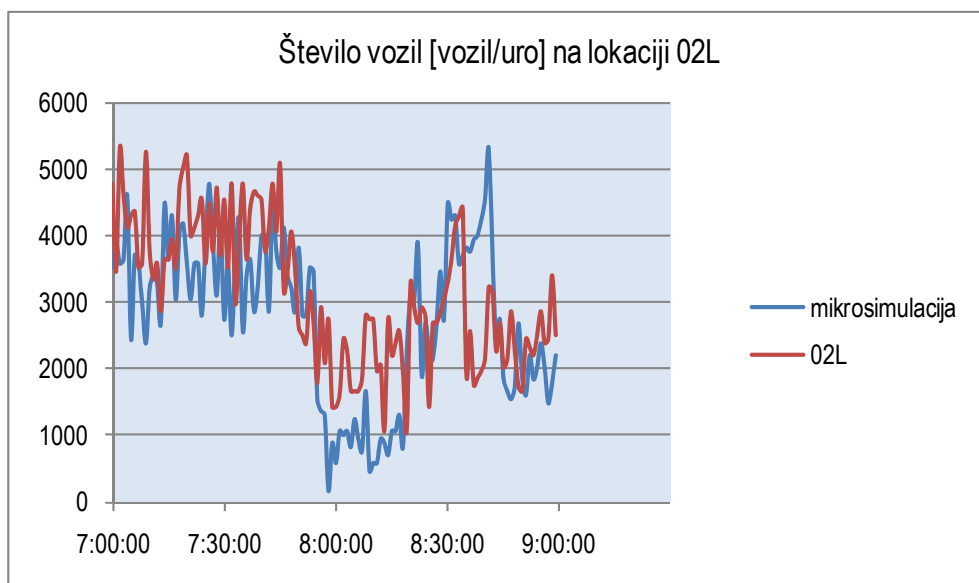
Mikroskopska simulacija je že dalj časa uveljavljeno orodje za modeliranje normalnih prometnih razmer. Tukaj pa je bila ugotovljena visoka stopnja ujemanja tudi pri izrednih dogodkih, kar pomeni, da je mikroskopska simulacija primerno orodje za modeliranje ukrepov ITS, ki se uporabljajo v fazi upravljanja z omrežjem.

Pred analizo koristi je bilo dodatno preverjeno ujemanje nihanja prometnega toka ob izrednem dogodku med rezultati mikroskopske simulacije in podatki, izmerjenimi na terenu (Slika 4-29 in Slika 4-30).



Slika 4-29: Primerjava minutnih vrednosti povprečnega urnega pretoka vozila v mikroskopski simulaciji z izmerjenimi vrednostmi na lokaciji detektorja 03L

Figure 4-29: Comparison of minute values for hourly traffic flow between microscopic simulation and field data for detector point 03L



Slika 4-30: Primerjava minutnih vrednosti povprečnega urnega pretoka vozila v mikroskopski simulaciji z izmerjenimi vrednostmi na lokaciji detektorja 02L

Figure 4-30: Comparison of minute values for hourly traffic flow between microscopic simulation and field data for detector point 02L

Mikroskopska simulacija omogoča prikaz rezultatov za vsako individualno vozilo posebej in njihovo agregiranje po odsekih, poteh in relacijah med conami. Z omenjenimi rezultati se lahko (skupaj z vizualnim preučevanjem) primerja posamezne ukrepe med seboj. To omogoča optimizacijo obstoječih in preizkušanje morebitnih dodatnih ukrepov.

Analiza koristi zaradi ITS ukrepa preusmerjanja in hitrejšega ukrepanja ob zastoju je prikazano v nadaljevanju.

### 4.2.3 Ukrep preusmerjanja

Prometno omrežje je (kot pove že ime samo) mreža poti, ki jih ima posamezen voznik na izbiro. Vsak voznik si želi imeti čim manjši strošek svojega potovanja (čas, razdalja, gorivo, cestnina). Zato je pri običajnih razmerah v nasičenih omrežjih doseženo prometno ravnovesje. Inženirski pogled na prometno ravnovesje je Wardrop zapisal v svojem drugem principu kot:

*“Ko je doseženo socioekonomsko ravnovesje v nasičenih omrežjih, bi moral biti promet urejen tako, da so povprečni (skupni) stroški minimalni.”*



V interesu vseh uporabnikov je torej, da je izgubljeni čas čim manjši. Ko se zgodi izredni dogodek (nesreča, zastoje) se prometno ravnovesje poruši, saj nimajo vsi vozniki popolne informacije o trenutnih prometnih razmerah. Sistem ITS ukrepov je v teh primerih zelo učinkovito orodje za vzpostavitev ravnotežja.

Upravljaec omrežja ima poleg obveščanja uporabnikov možnost vplivati na dva načina. Prvi način je skrajšanje časa zapore, kar se lahko doseže ali s krajšim odzivnim časom ali s hitrejšim posredovanjem na mestu dogodka samega. V obeh primerih je lahko simulacija uporabna za izračun zmanjšanja zamud, kar je prikazano v nadaljevanju. Ekonomsko vrednotenje, ki temelji na mikroskopskih rezultatih, je na primer lahko osnova pri odločanju za investicije, ki bi izboljšale posredovanje ob izrednih dogodkih. Zamude uporabnikov omrežja lahko upravljaec zmanjša tudi s preusmerjanjem voznikov na alternativne poti. Tukaj je zelo pomembno analizirati vpliv preusmeritve na celotno omrežje. Zgodi se namreč lahko, da preusmeritev povzroči zastoje na alternativnih poteh in tako poveča zamude na celotnem omrežju.

Mikroskopska simulacija omogoča natančno merjenje prometnih kazalcev kot so trenutna in povprečna hitrost, potovalni čas na omrežju, število ustavljanj, zamuda za vsako vozilo posebej. Tako se lahko natančno ugotovi skupna zamuda zaradi izrednega dogodka.

Trenutno delujoči sistem SNVP na ljubljanski obvoznici ima več vozlišč, kjer je možnost preusmerjanja vozil. V primeru zapore predora Šentvid je možno voznike iz gorenjskega avtocestnega kraka na priključku Šentvid, voznike na zahodni obvoznici pa pred razcepom Koseze, preusmeriti na Celovško cesto. Ostala vozlišča primerna za preusmerjanje so prikazana na sliki (Slika 4-21).

#### **4.2.3.1 Preusmerjanje v primeru zastoja na severni obvoznici**

V obravnavanem primeru zastoja na severni obvoznici (Slika 4-23), je na primer možno voznike pred razcepom Kozarje preusmeriti na južno in vzhodno obvoznico. To so vozniki, ki imajo cilje na severovzhodu Ljubljane (BTC, Bežigrad, Moste) ali nadaljujejo pot proti štajerskemu avtocestnemu kraku. Druge možne preusmeritve so prikazani v preglednici (Preglednica 4-11).

Ukrep je bil v mikroskopski simulaciji modeliran tako, da smo najprej izračunali najugodnejše poti za primer brez prometne nesreče. Nato smo izključili iskanje najugodnejših poti in na odsek severne obvoznice postavili zaporo, ki je predstavljala prometno nesrečo. Vozniki v mikroskopski simulaciji niso iskali novih poti, kar je predstavljalo obnašanje brez delovanja ITS sistema za obveščanje. Zato so nastale daljše zamude. Pri modeliranju ITS ukrepa v mikroskopski simulaciji smo takoj po nastanku nesreče (v naslednji iteraciji) vključili iskanje najugodnejših poti, zaradi česar so imeli vozniki manjše časovne izgube.

Na osnovi makroskopskega modela Ljubljane je bil ocenjen delež voznikov, ki prihajajo iz posameznih smeri, ki ga je možno preusmeriti (PNZ, 2008). Dodani so tudi modelski podatki za dolžino, potovalni čas in hitrost za posamezne poti (običajno in obvoz).

Preglednica 4-11: Možni obvozi in delež preusmerjenih voznikov

Table 4-11: Rerouting possibilities with share of drivers redirected

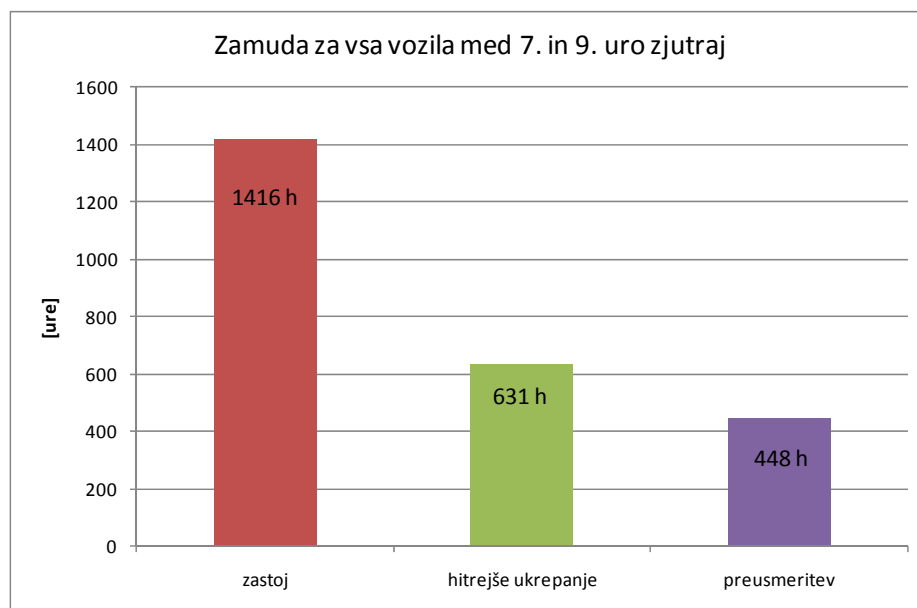
pot	obvoz	delež preusmerjenih voznikov	čas [min]		razdalja [km]		povprečna hitrost [km/h]	
			običajna pot	obvoz	običajna pot	obvoz	običajna pot	obvoz
Šentvid-Koseze-Celovška	Celovška cesta	100 %	07:49	08:48	5,9	3,1	48	21
Kozarje-Koseze-BTC	južna in vzhodna obvoznica	50 %	15:29	26:31	12,1	17,5	47	44
Kozarje-priključek Brdo	izvoz Lj.-center	50 %	03:48	12:02	3,0	5,0	47	29
Južna obvoznica -Celovška	vzhodna in severna obvoznica	50 %	16:40	22:13	15,2	15,1	55	43

Kot je razvidno iz preglednice so alternativne poti primerne, saj je izgubljeni čas v zastoju mnogo daljši od alternativne poti. Pomembno je torej voznike obvestiti o dejanskih razmerah in možnostih, ki jih imajo.

V mikroskopski simulaciji je možno izmeriti zamudo vseh vozil na omrežju. V primeru opisanega zastoja (Slika 4-24) se z uporabo ITS ukrepa preusmerjanja skupno število

izgubljenih ur v koničnem obdobju (med 7. in 9. uro zjutraj) zmanjša s 1.416 ur na 448 ur (za 68 %). Zaradi daljših alternativnih poti je skupni prihranek sicer nekoliko manjši. Vendar je ITS ukrep preusmerjanja nedvomno koristen in upravičen.

Poleg tega je na sliki (Slika 4-31) prikazan prihranek časa voznikov v primeru hitrejšega ukrepanja interventnih služb pomoči na cesti. Če se čas zastoja zmanjša za 50 % (v obravnavanem primeru iz 44 na 22 minut), se zamuda voznikov zmanjša za 55 %.



Slika 4-31: Skupna zamuda vseh vozil med 7. in 9. uro zjutraj

Figure 4-31: Total delay for all vehicle between 7-9 AM

#### 4.2.3.2 Preusmerjanje ob prometni nesreči v predoru Šentvid

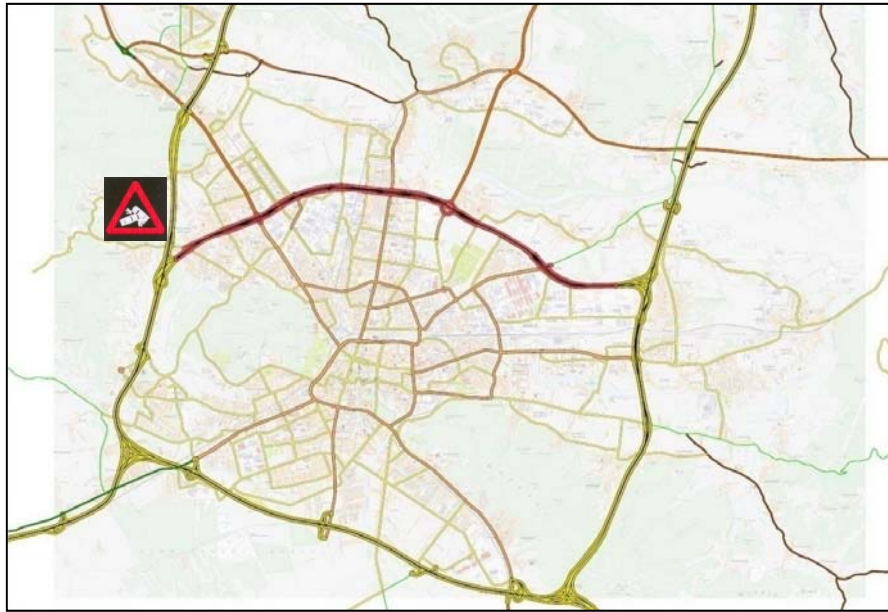
Predor Šentvid povezuje gorenjski avtocestni krak preko zahodne obvoznice s primorskim avtocestnim krakom in južno obvoznico. S priključkom Šentvid je povezan na Celovško cesto, ki je pomemben del ljubljanskega mestnega omrežja. Zaradi svoje vloge je po eni strani precej obremenjen, po drugi pa morebitna zapora bistveno vpliva na prometne razmere. Oboje bo postalo še bolj izrazito z dograditvijo polovičnega priključka Šentvid v polnega. Za analizo posledic preusmeritve prometa na mestno mrežo sta potrebna mikroskopski model širšega omrežja in ustrezen scenarij.

Obravnavani scenarij predvideva nesrečo v predoru Šentvid v smeri proti razcepu Koseze. Scenarij predvideva popolno zaporo avtoceste v eni smeri za 15-20 minut. Za primerjavo je smo obravnavali tudi primer brez uporabe ITS ukrepa preusmerjanja. V tem primeru bi bil tudi čas zapore daljši za 10 minut, saj bi bil odzivni čas brez uporabe naprav in objektov v sklopu sistema za nadzor in vodenje prometa (video nadzor, nadzorni center idr.) po preteklih izkušnjah najmanj toliko daljši. Upravljevec slovenskega avtocestnega omrežja DARS ugotavlja, da se odzivni čas (od časa nesreče do zaprtja predora) v primeru nesreče v predoru Podmilj skrajša iz 1 ure na 2 minuti (2007).

Ukrep smo modelirali tako, da smo najprej izračunali najugodnejše poti za primer brez prometne nesreče. Nato smo izključili iskanje najugodnejših poti in na odsek v predoru Šentvid postavili zaporo, ki je predstavljala prometno nesrečo. Vozniki v mikroskopski simulaciji niso iskali novih poti, kar je predstavljalo obnašanje brez delovanja ITS sistema za obveščanje, medtem ko smo pri delujočem ITS ukrepu takoj po nastanku nesreče (v naslednji iteraciji) vključili iskanje najugodnejših poti, zaradi česar so imeli vozniki manjše časovne izgube.

Za oba scenarija je bila analizirana učinkovitost prometnega omrežja v obeh koničnih urah brez uporabe ITS ukrepov in z njimi v letu 2012. Ugotovljene so posledice zapore in preusmerjanja na vzporedne ceste.

Obravnavani scenarij predvideva prometno nesrečo, ki se zgodi v predoru Šentvid v smeri vožnje sever-jug. Brez uporabe ITS ukrepov vozila niso pravočasno obveščena o nesreči in popolni zavori v predoru, zato zapeljejo v predor. Vrsta, ki se pojavi, sega iz predora in onemogoči uporabo izvozne rampe na Celovško cesto. Tudi po odstranitvi popolne zapore je potrebno precej časa, da se razmere normalizirajo, saj vrsta občasno sega tudi do priključka Šmartno.



Slika 4-32: Lokacija nesreče v predoru Šentvid

Figure 4-32: Location of the accident in the Šentvid tunnel



Slika 4-33: Priključek Šentvid, jutranja konica, leto 2012, omrežje brez ITS ukrepa preusmerjanja

Figure 4-33: Šentvid junction, morning peak, year 2012, “do-nothing” network.

Vrsta nastane v predoru, prav tako tudi na izvozni rampi na Celovško cesto in sami Celovški cesti.

Z uporabo ITS ukrepa preusmerjanja so vozila preusmerjena na Celovško cesto, ki pomeni dobro alternativo vožnji skozi predor. Težava se pojavi, ko je presežena prepustnost križišča s Celovško cesto in uvozne rampe. Tedaj vrsta krajši čas seže tudi na avtocesto. Kljub temu so globalne prometne razmere (zamude vseh voznikov na omrežju) boljše.



Slika 4-34: Priključek Šentvid, jutranja konica, leto 2012, omrežje z ITS ukrepom preusmerjanja

Figure 4-34: Šentvid junction, morning peak, year 2012, ITS measure “rerouting”

Zaradi preusmeritve na Celovško cesto občasno nastane zastoj na izvozni rampi na Celovško cesto in tudi na sami Celovški cesti, ko tu promet doseže prepustnost ceste. Podobne so tudi razmere v popoldanski konici. Koristi ukrepa so še večje, saj zaradi manjšega prometnega toka ne nastanejo zastoji na priključni rampi.



Slika 4-35: Priključek Šentvid, popoldanska konica, leto 2012, omrežje brez ITS ukrepa preusmerjanja

Figure 4-35: Šentvid junction, afternoon peak, year 2012, “do-nothing” network



Slika 4-36: Priključek Šentvid, popoldanska konica, leto 2012, omrežje z ITS ukrepom preusmerjanja

Figure 4-36: Šentvid junction, morning peak, year 2012, ITS measure “rerouting

Vrsta nastane v predoru, prav tako tudi na izvozni rampi na Celovško cesto in sami Celovški cesti. Z uporabo ITS ukrepa preusmerjanja se prometne razmere izboljšajo, kot je vidno na sliki (Slika 4-36).

Izmerjena je učinkovitost omrežja za scenarija brez uporabe ITS ukrepov in z njim, in sicer za leto 2012.

Preglednica 4-12: Učinkovitost ITS ukrepov pri prometni nesreči v predoru Šentvid, jutranja konica, leto 2012

Table 4-12: Network performance without and with ITS measure at accident in the Šentvid tunnel, morning peak, year 2012

scenarij	učinkovitost omrežja					
	porabljen čas [h]	čas/vozilo [min]	povprečna hitrost [km/h]	zamuda [h]	zamuda/vozilo [min]	št. ustavljanj/vozilo
brez ITS ukrepov	10.121	8,720	52	3.786	3,262	15,0
ITS ukrep	9.801	8,463	54	3.414	2,948	17,6

Preglednica 4-13: Učinkovitost ITS ukrepov pri prometni nesreči v predoru Šentvid, popoldanska konica, leto 2012

Table 4-13: Network performance without and with ITS measure at accident in the Šentvid tunnel, afternoon peak, year 2012

scenarij	učinkovitost omrežja					
	porabljen čas [h]	čas/vozilo [min]	povprečna hitrost [km/h]	zamuda [h]	zamuda/vozilo [min]	št. ustavljanj/vozilo
brez ITS ukrepov	10.116	8,338	52	3.770	3,107	18,3
ITS ukrep	9.589	7,888	55	3.180	2,616	15,0

Preglednica 4-14: Primerjava učinkov brez ITS ukrepov in z njim pri nesreči v predoru Šentvid, leto 2012

Table 4-14: Network performance comparison for ITS measure at accident in the Šentvid tunnel

	konica	povprečna hitrost		zamuda/vozilo		ustavljanja/vozilo	
		km/h	%	min	%	št.	%
ITS ukrep	jutranja	2	3,8	-0,31	-9,6	2,6	17,3
	popoldanska	3	5,8	-0,49	-15,8	-3,3	-18,0



Iz preglednic se vidi, da ITS ukrep preusmerjanja v primeru zapore predora Šentvid znatno izboljša prometne razmere v času prometnih nesreč. Zamude se skrajšajo, ustavljanja je manj, poraba časa je manjša in vožnja je manj stresna. Število ustavljanj je v jutranji konici sicer večje pri uporabi ITS ukrepa. To je zaradi povečanega prometa na Celovški cesti, kjer je večje število semaforjev. Vendar je skupna zamuda manjša, saj se promet vseeno premika.

Ni dvoma, da ukrep preusmerjanja precej omili posledice zapor zaradi prometnih nesreč ali kakršnih koli drugih zapor ceste.

Potrebno je opozoriti, da se (predvsem v primeru nesreč in večjih zastojev) ob bistvenem izboljšanju prometnih razmer na določenem območju, te običajno poslabšajo na sosednjem območju. Razmere se poslabšajo, ker zaradi sprostitve zamaška pride do večjih prometnih obremenitev na teh območjih. Vendar so koristi vseh udeležencev še vedno pozitivne.

Z uporabo mikroskopske simulacije je mogoče analizirati možne scenarije (glede na pričakovane prometne razmere) in izdelati seznam in zaporedje ukrepov, ki jih lahko operater v nadzornem centru uporabi ob izrednem dogodku.

Mikroskopska simulacija pa je lahko uporabna tudi pri modeliranju glede na dejanske prometne razmere, kar prinaša še večjo zanesljivost pri odločitvah.

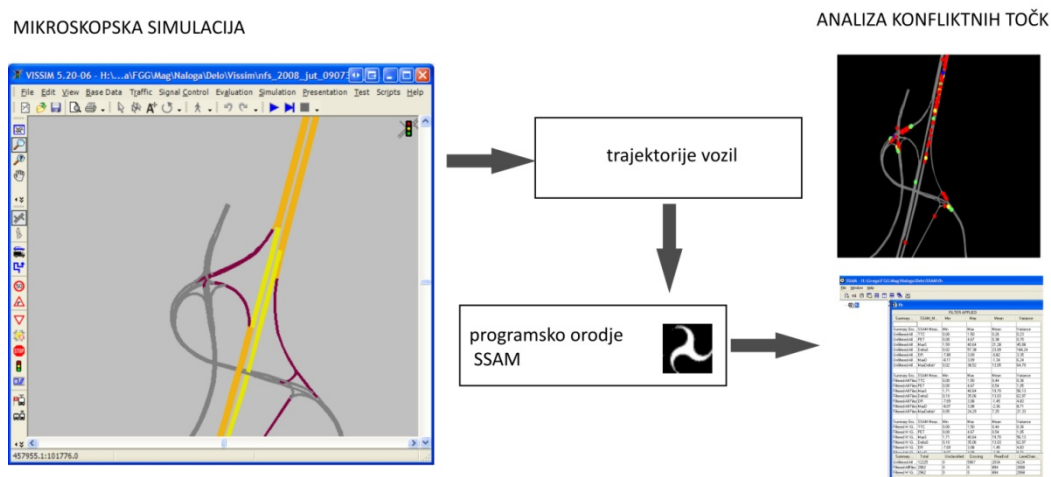
#### **4.2.4 Homogenizacija prometnega toka**

V teoriji prometnega toka je prepustnost odseka največja ob homogenem prometnem toku in določeni hitrosti. Homogeni prometni tok je prometni tok, ki je homogen glede na sestavo (na primer samo osebna vozila brez motečega vpliva tovornih vozil) ali glede na hitrost. ITS ukrep homogenizacije prometnega toka je namenjen predvsem homogenizaciji glede na vozno hitrost.

Na primeru homogenizacije prometnega toka je prikazana možnost vrednotenja učinka ITS ukrepa na prometno varnost.

Z dodatnimi programskimi orodji se namreč lahko analizira tudi prometna varnost pri različnih scenarijih ITS ukrepov, kar je lahko dodatni kriterij pri prometnem vrednotenju. Zakonskih določil glede metodologije za prometno-varnostne analize v Sloveniji še ni, kljub

temu, da Pravilnik o projektiranju cest (Ur.l. 91/05) zahteva, da se načrtovane različice medsebojno primerjajo tudi po prometno-varnostnih pogojih. Običajno je to narejeno opisno (kvalitativno) na podlagi preteklih izkušenj in ni podprto z izračuni (kvantitativno). Mikroskopska simulacija pa omogoča zapis trajektorij vozil, ki je osnova za izračun števila konfliktnih situacij. Uporaba trajektorij je opisana v uvodu poglavja 3, medtem ko je delovni proces prikazan na sliki (Slika 4-37).

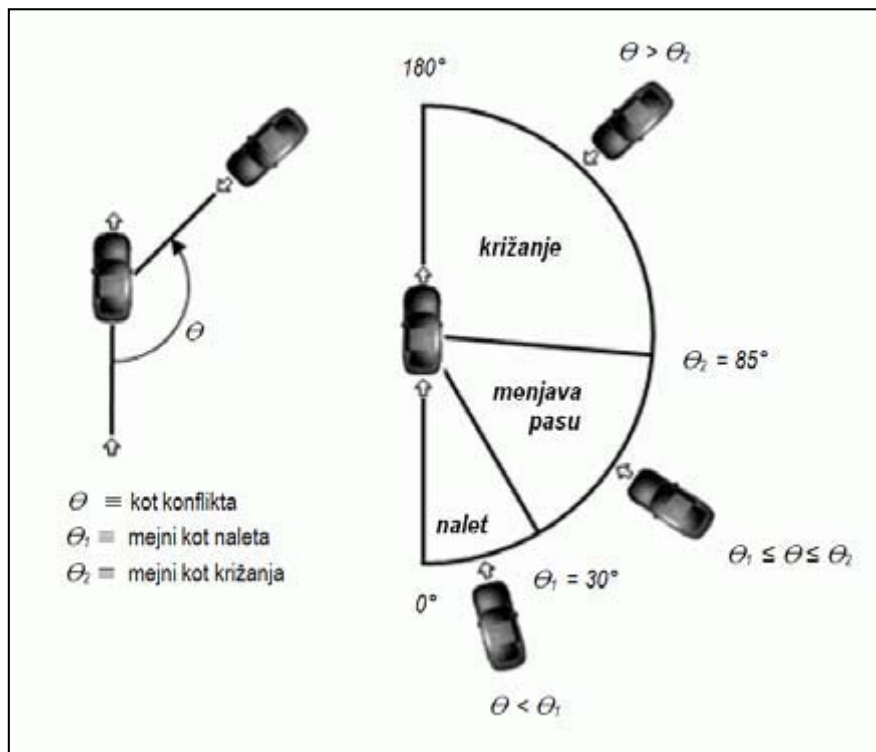


Slika 4-37: Shema postopka analize učinkov ITS ukrepa na prometno varnost na podlagi rezultatov mikroskopske simulacije

Figure 4-37: Conflict analysis process of ITS measure (from microsimulation results to traffic safety analysis)

Za analizo prometne varnosti smo uporabili programsko orodje SSAM (Surrogate Safety Assessment Module), ki ga je za Ameriško zvezno agencijo za ceste (FHWA) razvilo raziskovalno središče Turner-Fairbank Highway Research Center. Je eno izmed kompleksnejših orodij 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-varnostno 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. Obravnava različne vrste konfliktov (Slika 4-38), med

drugim tudi nalet od zadaj in pri menjavi pasu. To pa je uporabno pri analizi prometne varnosti tudi na odseku avtoceste ali hitre ceste.



Slika 4-38: Vrste konfliktov, kot jih upošteva programsko orodje SSAM (Jelenc, 2010, povzeto po SSAM)

Figure 4-38: Conflict types considered by SSAM software (Jelenc, 2010, summarized after SSAM)

Program, na podlagi v mikroskopski simulaciji zapisanih trajektorij vozil, analizira interakcije med posameznimi vozili in izdela seznam vseh možnih konfliktov - prometnih nesreč. Za vsak možen konflikt izračuna nadomestne prometno-varnostne parametre:

- 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)*.

Za modeliranje smo izbrali že prej opisani kalibrirani model jutranje konice na zahodni ljubljanski obvoznici (Slika 4-22).

Rezultati analize (na podlagi nadomestnih prometno-varnostnih parametrov) so prikazani v preglednici (Preglednica 4-15).

Preglednica 4-15: Vrednosti parametrov z ITS ukrepom homogenizacije in brez njega, jutranja konica, leto 2008

Table 4-15: Values of parameters with and without ITS measure "traffic flow homogenization", morning peak, year 2008

parameter SSAM	homogenizacija prometnega toka	brez ITS ukrepa
<i>TTC</i>	0,44	0,49
<i>PET</i>	0,54	0,68
<i>MaxS</i>	19,7	19,01
<i>DeltaS</i>	13,03	12,58
<i>DR</i>	-1,45	-1,63
<i>MaxD</i>	-2,36	-2,63
<i>MaxDeltaV</i>	7,25	7,01

Interpretacija nadomestnih prometno-varnostnih parametrov je kompleksna, saj noben parameter ni zadosten za zaključke. Parametri so namreč med seboj povezani in se dopolnjujejo. Za pravilno razumevanje je potrebna pravilna inženirska presoja, na kar opozarjajo tudi razvijalci programske opreme. Razlaga parametrov je povzeta v nadaljevanju (Jelenc, 2010)

Najmanjši čas do trka - *time-to-collision (TTC)* je običajno bolj varen, če je večji. Vendar lahko razlika v hitrostih vozil v posameznih primerih bistveno vpliva na prometno varnost. Ta parameter namreč ne upošteva hitrosti vozil v interakciji. To pomeni, da je lahko pri dveh »skoraj nesrečah« *TTC* enak, vendar so hitrosti pri prvi »skoraj nesreči« nizke (primer A), pri drugi pa visoke (primer B). Tako bi lahko »skoraj nesreča« v primeru A pomenila le manjšo materialno škodo, medtem ko »skoraj nesreča« v primeru B hudo telesno poškodbo ali celo smrtno žrtev.

Najmanjši čas, ko prvo vozilo zapusti točko potencialnega trka - *post-encroachment time (PET)* je običajno bolj varen, če je večji. Kot pri TTC je tudi tu razlika v hitrostih vozil v posameznih primerih bistveno vpliva na prometno varnost. Tudi ta parameter namreč ne upošteva hitrosti vozil v interakciji. Možni so torej podobni primeri kot opisana primera A in B.

Največja hitrost hitrejšega vozila v konfliktu - *maximum speed (MaxS)* je običajno bolj varna, če je manjša. Vendar tudi tu interpretacija ni tako enoznačna. Če namreč primerjamo »skoraj nesrečo« tovornega in osebnega vozila pri čelnem trku (primer C) in »skoraj nesrečo« dveh osebnih vozil pri naletu (primer D) je lahko slednji bistveno manj nevaren, čeprav so hitrosti bistveno večje kot v primeru C.

Največja razlika v hitrosti obeh vozil v konfliktu - *maximum differential (DeltaS)* je običajno bolj varna, če je manjša, a to ni nujno. Pri tem parametru se namreč ne upošteva smer gibanja obeh vozil v interakciji. Tako je majhna razlika vsekakor dobrodošla v primeru naleta. Vendar v primeru križanja (čelnega trka) temu ni nujno tako. Dve vozili ki vozita z enako hitrostjo drug drugemu nasproti s hitrostjo 30 km/h (in je vrednost  $\Delta S = 0$  km/h) sta si bolj nevarna kot vozili, od katerih eden vozi s hitrostjo 30 km/h drugi pa le 1 km/h (in je vrednost  $\Delta S = 29$  km/h). Interpretacija vrednosti tega parametra je torej nemogoča brez poznavanja trajektorij teh vozil.

Začetni pojemek drugega vozila pri konfliktu - *initial deceleration rate (DR)* nima enoznačnih karakteristik glede svojih vrednosti. Če je v primeru naleta ta pospešek velik, lahko namreč to pomeni, da je drugo vozilo odločno zavrlo in s tem preprečilo dejansko nesrečo ali pa je vozilo hitro ali bližje prvemu in je tako možnost dejanske nesreče večja.

Največji pojemek vozila - *maximum deceleration rate (MaxD)* je običajno bolj varen, če je manjši. Vendar lahko večji pojemek pomeni tudi to, da je večja verjetnost, da se bo dejanska nesreča preprečila ali pa da je bila situacija bolj nevarna. Tudi ta parameter je zato zelo težko interpretirati brez ostalih parametrov.

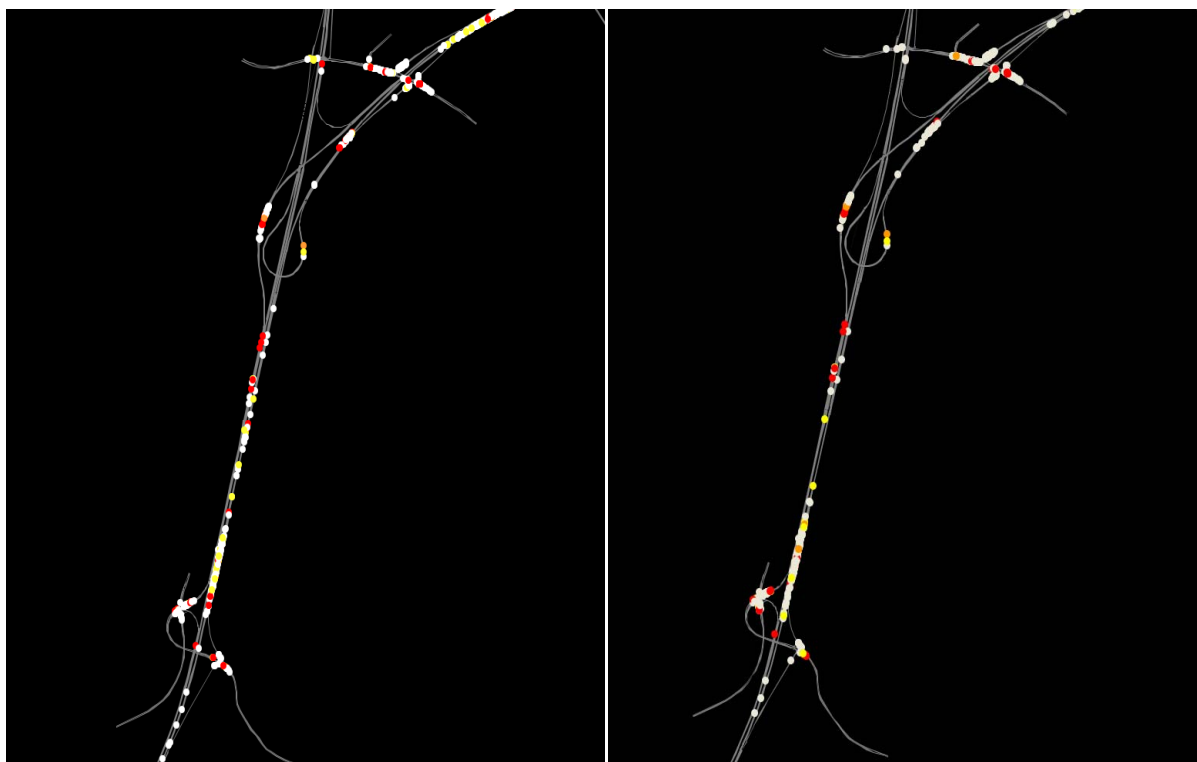
Za inženirsko presojo in vrednotenje koristi je najbolj uporaben rezultat število konfliktov po njihovi vrsti, ki je prikazano v preglednici (Preglednica 4-16).

Preglednica 4-16: Prometno-varnostna analiza

Table 4-16: Traffic safety analysis

število in vrsta konfliktov	nalet	menjava pasu
homogenizacija prometnega toka	894	2068
brez ITS ukrepa	1140	2156
zmanjšanje	-22 %	-4 %

Prometno-varnostna analiza je pokazala, da uvedba ITS ukrepa homogenizacije prometnega toka zmanjša število možnih konfliktov pri naletu za 22 %, pri menjavi pasu pa za 4 %. Število, lokacija in teža posameznih konfliktnih točk za nalet so grafično prikazani na sliki (Slika 4-39)



Slika 4-39: Analiza konfliktnih točk brez ITS ukrepa homogenizacije prometnega toka (levo) in z njim (desno)

Figure 4-39: Conflict analysis without (left) and with (right) ITS measure “traffic flow homogenization”

Zanesljivost rezultatov programskega orodja je dosežena s teoretično in terensko validacijo ter z analizo elastičnosti samega orodja. Teoretična validacija programskega orodja je bila s strani izdelovalca izdelana s pomočjo enačb za račun relativne stopnje prometnih nesreč po različicah. Razvijalec programa jo je izdelal glede na statistične podatke o prometnih nesrečah v ZDA v 83 križiščih, za 5 izmed teh pa je bila narejena tudi analiza elastičnosti. Za še večjo zanesljivost bi bilo potrebno izvesti terenske raziskave na območju Slovenije, saj bi tako lahko natančneje in še z večjo zanesljivostjo modelirali obnašanje (reakcije) voznikov.

ITS ukrepi torej ne prinašajo samo časovnih koristi, ampak tudi povečajo prometno varnost. Tudi to je možno pokazati in dokazati z uporabo rezultatov mikroskopske simulacije.

Za konec bomo prikazali še enostavnejšo analizo indikatorjev prometne varnosti v mikroskopski simulaciji, brez uporabe dodatnih orodij.

Za primer smo izbrali območje priključka Šentjakob na avtocestnem odseku Domžale-Šentjakob-Sneberje na avtocesti A1. Zaradi gostega prometa in kratkih razdalj med priključki Šentjakob, Sneberje in razcepom Zadobrova v jutranjih konicah pogosto prihaja do zastojev v smeri proti Ljubljani. Ti nastajajo zaradi različnih razlogov, kateri so bili analizirani s pomočjo vsakodnevnega opazovanja med vožnjo, video analize in rezultatov mikroskopske simulacije. Na podlagi tega smo izbrali ITS ukrep homogenizacije prometnega toka in njegove učinke ocenili s pomočjo mikroskopske simulacije.

Ugotovili smo, da so zastoji v jutranji konici nastajajo zaradi:

- prepletanja vozil v območju priključka Sneberje
- prepletanja vozil v območju priključka Šentjakob
- izrednih dogodkov (nesreče, vozila na odstavnem pasu...).

Prvi razlog za zastoje so v večji meri odpravili s fizično povezavo vključevalnega pasu priključka Sneberje in izključevalnega pasu za smer severne obvoznice razcepa Zadobrova. Od tedaj so se zastoji bistveno zmanjšali, kar ima za posledico višje hitrosti, ki pomenijo večjo nevarnost za prometne nesreče. Zato je bil naš namen ugotoviti, kako bi lahko zmanjšali verjetnost za nastanek prometnih nesreč, hkrati pa ne bistveno poslabšali prometnih razmer.

Na podlagi video analize (Slika 4-40) prepletanja vozil na območju priključka Šentjakob smo ugotovili, da v jutranji konici prihaja do številnih nenadnih zaviranj, ki pa zaradi dinamičnega (in pogosto nevarnega) obnašanja voznikov nimajo za posledico nastanka zastoja.



Slika 4-40: Pojav nenadnega zaviranja v območju prepletanja- priključek Šentjakob

Figure 4-40: Emergency braking in weaving area- junction Šentjakob

Zato smo se odločili, da preizkusimo ITS ukrep homogenizacije prometnega toka in njegov vpliv tako na prometno varnost kot prometne razmere.

Ukrep smo modelirali tako, da smo v mikroskopski simulaciji uporabili omejitve hitrosti (angleško *desired speed decisions*), s katerimi smo simulirali prehod pod obvestilnimi portali nad avtocesto, ki voznikom sporočajo dovoljeno hitrost. Od priključka Domžale do priključka Šentjakob smo hitrost postopoma omejili iz 130 km/h preko 100 km/h na 80 km/h.



Za analizo prometne varnosti smo primerjali značilne vrednosti, ki jih za vsako vozilo v vsaki sekundi zapiše mikroskopska simulacija. Pri vplivu na prometne razmere smo za omrežje brez ITS ukrepa in z njim primerjali potovalni čas na odseku Domžale-Zadobrova.

Za primerjavo indikatorjev prometne varnosti na območju priključka smo izbrali 250 m dolg odsek, kjer se vozila iz rampe vključujejo v glavni prometni tok v smeri proti Ljubljani.

Preglednica 4-17: Indikatorji prometne varnosti na analiziranem odseku

Table 4-17: Safety indicators on analysed section

indikatorji prometne varnosti	povprečni pospešek [ $m/s^2$ ]	povprečna varnostna razdalja [m]	povprečna razdalja med vozili [m]
homogenizacija prometnega toka	-0,283	14,88	20,90
brez ITS ukrepa	-0,437	19,89	31,58
zmanjšanje	-35 %	-25 %	-34 %

Iz preglednice lahko vidimo, da se povprečne vrednosti indikatorjev prometne varnosti zmanjšajo za približno 35 %. Kadar je vključen ukrep postopnega omejevanja hitrosti je povprečni pospešek bližji vrednosti  $0 m/s^2$ . To pomeni, da je stopnja zaviranja nižja in možnost za nalet manjša. Poudariti je potrebno, da so to indikatorji, na podlagi katerih lahko samo sklepamo o povečanju prometne varnosti, ne moremo pa z gotovostjo trditi, da se bo prometna varnost dejansko povečala.

Potovalni čas na odseku Domžale-Zadobrova (približno 7 kilometrov) se podaljša s 4 minut (povprečna hitrost 107 km/h) na dobrih 5 minut (povprečna hitrost 82 km/h), kar lahko ocenimo kot nebitveno poslabšanje.

Ugotovimo lahko, da bi ukrep homogenizacije prometnega toka (z postopnim omejevanjem dovoljene hitrosti) izboljšal prometno varnost, hkrati pa voznikom ne bi preveč poslabšal prometnih razmer. Ukrep bi torej bil smiseln.

Poudariti je potrebno, da bi bilo za večjo zanesljivost rezultatov potrebno opraviti obsežnejše meritve, ki bi bile podlaga prilagoditev modela obnašanja voznikov dejanski situaciji.

### 4.3 Uporaba mikroskopske simulacije v realnem času

V zadnjem času pomemben napredek v modeliranju predstavlja razvoj mikroskopske simulacije v realnem času. Razvoj strojne in programske opreme omogoča preizkušanje različnih scenarijev uporabe ITS ukrepov v realnem času. To je čas, ki je primeren za takojšnji odziv (5-10 minut) sistema na trenutne prometne razmere. V praksi je namreč vnaprej pripravljenih več (3-10) različnih scenarijev ukrepanja (preusmerjanje, spreminjanje semaforških ciklusov, omejitve hitrosti, uporaba odstavnih pasov) v izrednih razmerah (predvsem ob nesrečah ali drugih nepredvidenih dogodkih). Sistem sam oceni učinkovitost posameznih scenarijev glede na dejanske prometne razmere na podlagi indikatorjev (dolžina vrst, zamude) in predlaga najbolj učinkovitega. Operater v centru za nadzor in vodenje prometa nato potrdi izbiro.

Glavni motiv za vzpostavitev opisanega sistema je napovedati pričakovane prometne razmere, zato da je reakcija operaterja preko ITS ukrepov čim hitrejša. Analitični pristop (statični prikaz trenutnih in pričakovanih prometnih obremenitev) pogosto ne zadošča, saj ne more zajeti vseh značilnosti kompleksnih prometnih omrežij (nastajanje vrst, delovanje semaforjev, ITS ukrepi). Mikroskopska simulacija poleg tega ponuja vrsto rezultatov, ki so uporabni tako za operaterja kot uporabnike (na primer povprečni potovalni časi, zastoji v križiščih, stopnja onesnaženosti) preko informacijskih sistemov (grafični prikazovalniki SPIS, internet, navigacijske naprave). Njena vloga je, da uporabi omejene statistične ("zgodovinske") in trenutne (angleško *real time*) prometne podatke in ponudi trenutne in pričakovane prometne razmere na celotnem območju. Število števnih podatkov je namreč omejeno na najbolj pomembne odseke in običajno predstavljajo manj kot 10 % vseh odsekov. Statistični prometni podatki so podlaga za povprečne prometne obremenitve v povprečnih konicah (na primer jutranja in popoldanska konica, turistična konica, konica ob prireditvah, dež). Na podlagi analize teh podatkov so pripravljene t.i. značilni profili (matrike potovanj). Trenutni prometni podatki pa služijo za modeliranje dejanskih prometnih razmer.

Prometni modeli so sestavljeni iz povpraševanja in ponudbe. Zaradi lažjega obvladovanja je povpraševanje omejeno s številom značilnih profilov (v opisanem primeru jih uporabljajo 10-20). Ponudba je na drugi strani neomejena in jo določajo stanje cestnega omrežja (cestna dela), signalne naprave, ITS ukrepi, dogodki (nesreče, prireditve).

Za opis primera sistema nadzora prometa, ki za izbiro scenarija ukrepanja uporablja mikroskopsko simulacijo v realnem času, smo izbrali primer že delujočega sistema v Madridu, ki ga je izdelalo podjetje TSS (2009).

Naročnik modela v Madridu je mestna agencija za ceste, njegov glavni cilj pa je upravljanje cestnega omrežja v primeru nesreč na koridorju M-30 (Slika 4-41). Na koridorju je večje število predorov in priključnih ramp, hkrati pa je koridor močno povezan s sekundarnim lokalnim omrežjem.

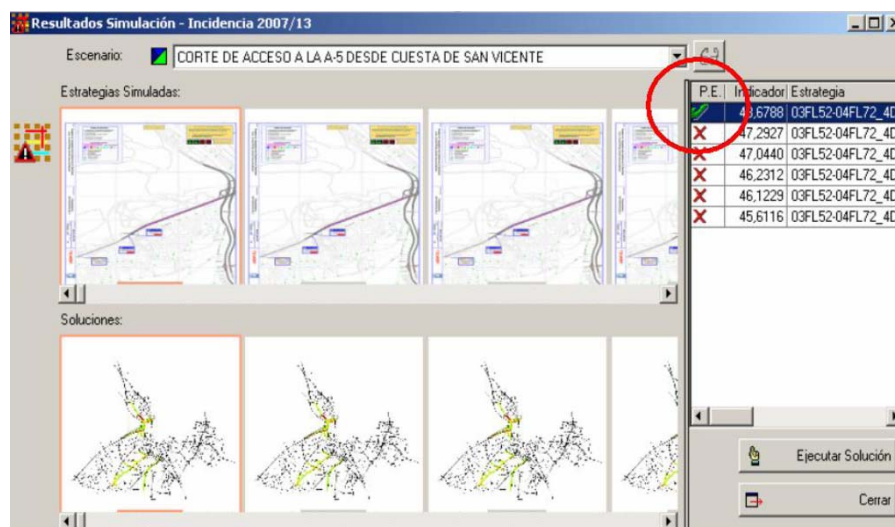


Slika 4-41: Obravnavani koridor, ki ga pokriva model v realnem času (TSS, 2009)

Figure 4-41: Corridor covered by real-time model (TSS, 2009)

Mikroskopski prometni model zajema 567 kilometrov cest in 1.224 vozlišč (primer v Singapurju obsega 1.650 kilometrov cest in 10.580 vozlišč).

V modelu so že vnaprej pripravljene strategije ukrepanja glede na izredni dogodek, ki jih mikroskopski model (v realnem času) simulira in oceni njihovo učinkovitost na podlagi številnih indikatorjev. Operaterju na koncu predlaga v potrditev optimalno strategijo.



Slika 4-42: Primer postopka ocenjevanja, izbire in potrditve strategije ukrepanja

Figure 4-42: Process of evaluation, selection and confirmation of measure strategy

Vzpostavitev opisanega sistema zahteva sodelovanje upravljavcev posameznih delov prometnega sistema (cestno omrežje, signalne naprave, nadzorni center), prometnih planerjev, strokovnjakov za tehnologijo ITS sistemov in drugih. Rezultat je učinkovito orodje, ki operaterju omogoča optimalno izkoriščenost obstoječe prometne infrastrukture. Operater lahko za vsako od nastalih prometnih situacij izbira med okoli petimi scenariji ukrepanja.

Prometne zahteve ter stopnja strojne in programske razvitosti omogočata razvoj takšnega modela tudi v večjih slovenskih mestih, predvsem v Ljubljani. Po eni strani nastajajo v konicah vsakodnevni zastoji, hkrati pa so prisotni številni predvideni in nepredvideni dogodki (prireditve, cestna dela, nesreče), ki dodatno vplivajo na prometne razmere.

Sistem za nadzor in vodenje prometa, ki je predviden (in delno že v obratovanju) na celotnem ljubljanskem avtocestnem obroču omogoča zbiranje trenutnih podatkov s terena in obveščanje voznikov. V okviru različnih projektov so bili tudi razviti in validirani najsodobnejši makroskopski in mikroskopski modeli. Prvi korak pri razvoju omenjenega sistema je lahko na primer že uporaba mikroskopske simulacije v pripravi in optimizaciji ukrepov ITS.

#### 4.4 Povzetek

Namen prikazanih primerov uporabe je bil po eni strani dokazati uporabnost mikroskopske simulacije za analizo učinkov ITS ukrepov, po drugi strani pa predstaviti ukrepe same in koristi njihove uvedbe.

Praktični primeri so bili prikazani za fazi načrtovanja in upravljanja. V okviru upravljanja je bil opisan primer zadnje uporabe mikroskopske simulacije v realnem času.

Na različne načine so bile prikazane prometne, ekonomske, varnostne in okoljske koristi uvedbe ITS ukrepov.

Preglednica 4-18: Povzetek vrednotenja ITS ukrepov

Table 4-18: Summary of ITS measure evaluation

Ukrep	Lokacija	Učinek	Posledica	Rezultat vrednotenja
Spremenljiva uporaba odstavnega pasu	Severna ljubljanska obvoznica	Lažje prepletanje prometnih tokov	Povečanje vozne hitrosti in potovalnih časov	Povečanje vozne hitrosti za 40 %, skrajšanje potovalnih časov za 40 %
Ukrep nadzorovanega uvoza na avtocesto	Priključek Šmartno	Manjše oviranje glavnega prometnega toka na avtocesti	Povečanje vozne hitrosti glavnega prometnega toka (ob še sprejemljivih zamudah na uvozu)	Nemoteno odvijanje glavnega prometnega toka na avtocesti
Ukrep spremenljive redukcije pri vključevanju	Priključek Slavček	Lažje prepletanje prometnih tokov	Zmanjšanje zamud	Zmanjšanje zamud za 70 %, preprečitev popolnega prometnega kaosa
Ukrep spremenljive uporabe voznih pasov v razcepu	Razcep Malence	Lažje prepletanje prometnih tokov	Zmanjšanje zamud	Koristi voznikov za 10-krat presegajo stroške uvedbe ITS ukrepa
Homogenizacija prometnega toka	Severna in zahodna ljubljanska obvoznica	Lažje prepletanje prometnih tokov	Zmanjšanje števila možnih konfliktnih situacij	Zmanjšanje konfliktnih situacij za 5-20 %

Ukrep	Lokacija	Učinek	Posledica	Rezultat vrednotenja
	Priključek Šentjakob	Varnejša vožnja		Zmanjšanje intenzivnosti zaviranja za 35 %
Preusmerjanje	Zahodna ljubljanska obvoznica	Preusmeritev prometnih tokov	Zmanjšanje zamud	Zmanjšanje zamud za 55-70 %
	Predor Šentvid			Zmanjšanje zamud za 10-15 %
Uporaba mikroskopske simulacije v realnem času	Madrid	Boljša izkoriščenost omrežja	Zmanjšanje zamud	Priprava in vrednotenje 5 scenarijev za ukrepanje v realnem času

V strokovni literaturi najdemo podobne ugotovitve o koristih uvedbe ITS ukrepov, večinoma na podlagi pilotskih projektov:

- uvedba spremenljive uporabe odstavnega pasu na avtocesti M42 v Veliki Britaniji (DfT, 2008) je povzročila skrajšanje potovalnih časov za 10-25 %, škodljive emisije so se zmanjšale za 5-10 %, razmerje koristi/stroški okoli 7 (v primerjavi z 2,3 za širitev na 6 pasov),
- pilotski projekti uvedbe nadzorovanega uvoza na avtocesto v Parizu, Münchnu, Utrechtu in Tel Avivu (Euramp, 2007) so pokazali, da se skupni potovalni čas voznikov na omrežju skrajša za 5-10 %, razmerja koristi/stroški pa se gibljejo med 2 in 8,
- nemške in francoske izkušnje (OECD, 2007) kažejo, da uvedba dinamičnega spreminjanja hitrosti (homogenizacija prometnega toka) zmanjša število nesreč za 30-50 % in poveča kapaciteto za 5-10 %.

Vse to potrjuje, da je mikroskopska simulacija primerno orodje za modeliranje ITS ukrepov in vrednotenje njihovih učinkov.

## 5 ZAKLJUČKI

Gradnja prometnih sistemov, ki je in bo potrebna zaradi nenehne rasti prometa, je vse bolj otežena zaradi pomanjkanja prostora in zahtev trajnostnega razvoja. Zato je uvedba inteligentnih transportnih sistemov (ITS), ki omogočajo boljšo izkoriščenost obstoječega in že načrtovanega omrežja, nujna. Prometno modeliranje z mikroskopsko simulacijo se je v zadnjih letih tudi v Sloveniji uveljavilo kot zanesljivo orodje za oceno sedanjih in prihodnjih razmer. V nalogi je prikazana uporaba mikroskopske simulacije za modeliranje ukrepov ITS. Dokazana je visoka stopnja ujemanja rezultatov mikroskopske simulacije z dejanskimi podatki, izmerjenimi na terenu.

Mikroskopsko simulacijo se lahko uporabi za modeliranje večine ukrepov ITS, ki imajo neposreden vpliv na odvijanje prometnega toka, predvsem v koničnih obdobjih in ob izrednih dogodkih. Koristna je tako v fazi načrtovanja teh ukrepov, kot tudi med samim obratovanjem oziroma med upravljanjem prometnega sistema.

Za modeliranje ITS ukrepov je običajno dovolj obstoječi nabor možnosti v programskih orodjih za mikroskopsko simulacijo. Za ukrepe, ki so povezani z dinamičnim spreminjanjem lastnosti odsekov (povečanje kapacitete, spreminjanje dovoljene hitrosti) je potrebno izdelati še nadzorni algoritem, ki skrbi za vklop, nadzor, delovanje in izklop posameznega ITS ukrepa. Pri ukrepih, ki vključujejo spremembo poti voznikov (preusmerjanje) je potrebno način iskanja poti določiti tako, da čimbolj realno posnema odločanje in obnašanje voznikov v dejanskih razmerah.

Namen naloge je bil predstaviti in hkrati predlagati čimboljši in čimbolj praktični pristop pri vrednotenju ITS ukrepov, ter ugotoviti koristi, ki jih njihova uvedba prinaša.

Z mikroskopsko simulacijo so bile na podlagi prometnih, ekonomskih, varnostnih in drugih kazalcev ugotovljene naslednje koristi, ki jih prinašajo ukrepi ITS:

- povečanje vozne hitrosti,
- skrajšanje potovalnih časov,

- zmanjšanje števila ustavljanj,
- ekonomske koristi zaradi manjših časovnih izgub in nižjih obratovalnih in vzdrževalnih stroškov,
- manjša poraba goriva,
- povečanje prometne varnosti.

Ugotovitve o smiselnosti uvedbe ITS ukrepov in njihovih koristih so primerljive z razpoložljivimi v strokovni literaturi, ki pa so bile ugotovljene zlasti po njihovi izvedbi (angleško *post-analysis*). Prednost pristopa opisanega v magistrski nalogi je analiza pred uvedbo ITS ukrepov na terenu (angleško *pre-analysis*).

Uporaba mikroskopske simulacije za modeliranje ITS ukrepov je zelo koristna tudi za upravljavce cestnega omrežja in operaterje nadzornih sistemov, saj bi s tem lahko omogočili sprotno analizo delovanj ITS ukrepov in jih po potrebi optimizirali ali nadgradili. Poleg tega bi možnosti, ki jih ponuja mikroskopska simulacija, lahko izkoristili za izobraževanje operaterjev v nadzornih centrih. Verjetno bo tudi v Sloveniji prišlo do uvedbe koncesij za izgradnjo in upravljanje z avtocestnim omrežjem. Koncesionar običajno še strožje nadzoruje porabo sredstev za investicije, zato bo tudi potreba po natančnem vrednotenju koristi večja.

V zadnjem času so bili v nekaterih evropskih (Madrid, Milano) in svetovnih (Singapur) mestih, v okviru centrov za nadzor in vodenje, razviti mikroskopski modeli, ki v realnem času analizirajo trenutne prometne razmere in predlagajo scenarij ukrepov. S tem upravljavcu omogočajo bolj zanesljiv odziv na stanje na omrežju. Ti "on-line" modeli so naslednji korak v razvoju. Za razvoj in uvedbo omenjenih modelov v Sloveniji (na primer Ljubljani) že obstajajo osnovni pogoji, kot so pokritost cestnega omrežja z detektorji in razviti makroskopski in mikroskopski modeli. Manjka predvsem zavedanje o potrebnosti takega sistema. Zato je eden od namenov naloge tudi prispevati k večji prepoznavnosti koristi uvedbe ukrepov ITS.

Evropska komisija je v enem svojih zadnjih načrtov ponovno poudarila pomen nadaljnega razvoja in čimširše uvedbe inteligentnih transportnih sistemov kot enega ukrepov za doseg trajnostnih ciljev v prometu do leta 2050 (2011). Nenazadnje to dokazuje tudi z julija 2010 sprejeto ITS direktivo (2010/40/EU) in sredstvi, ki jih namenja projektom, povezanimi z



inteligentnimi transportnimi sistemi. V obdobju 2002-2009 je bilo temu namenjeno okoli 300 milijonov €, v obdobju 2007-2013 pa več kot 200 milijonov €.

Metode predstavljene v magistrskem delu so bile že uporabljene v okviru izdelave prometnih študij in investicijske dokumentacije za izvedbo ITS ukrepov na priključku Slavček v Kopru in prvo fazo vzpostavitve sistema za nadzor in vodenje prometa na ljubljanski obvoznici. To dokazuje, da je možno natančno modelirati in seveda tudi vrednotiti učinke ITS ukrepov na omrežje in uporabnike. Predvsem je to potrebno in pomembno v zadnjem času, ko se o številnih investicijah odloča brez pravih strokovnih argumentov.

## 6 POVZETEK

Promet je za sodoben način življenja pomembno merilo njegove kakovosti. Omogoča in pospešuje razvoj, hkrati pa slabe prometne razmere ovirajo gospodarski razvoj, onesnažujejo okolje in zavirajo razvoj urbanega prostora, kar je vse dobro vidno tudi v Sloveniji.

Gradnja prometnih sistemov (cestna infrastruktura, sistemi javnega prevoza) zahteva velika sredstva, hkrati pa imajo prometni sistemi dolgo življenjsko dobo in s tem povezane dolgoročne vplive. Že danes, predvsem pa v bližnji prihodnosti, bo zelo pomembno, da so prometni sistemi čim bolj izkoriščeni, saj bo prostora za novogradnje vse manj. Učinkovitost prometnih sistemov lahko izboljšamo s pametnim upravljanjem tako samih sistemov kot tudi prometnih potreb.

Upravljanje prometnih sistemov in omrežij je ena od možnosti integrirane uporabe komunikacijskih, nadzornih in informacijskih tehnologij v prometu, ki se je v svetu uveljavila pod skupnim imenom inteligentni transportni sistemi (ITS). V Sloveniji se je za inteligen ten transportni sistem za upravljanje cestnega omrežja uveljavil izraz sistem za nadzor in vodenje prometa (SNVP), ki omogoča zbiranje prometnih podatkov, njihovo obdelavo in podajanje prometno potovalnih informacij preko grafičnih prikazovalnikov spremenljive prometno-informativne signalizacije. Trenutno pri nas delujejo štiri taki sistemi.

V zadnjih letih se je tudi v Sloveniji uveljavilo prometno modeliranje z mikroskopsko simulacijo, ki daje realno oceno sedanjih ali prihodnjih prometnih razmer. Zato je mikroskopska simulacija zelo koristno orodje v projektiranju in upravljanju sistemov ITS, kjer je potrebno sodelovanje prometnih planerjev in načrtovalcev sistemov ITS. Prometni planerji so pri iskanju rešitev prometnih težav zelo omejeni s prostorskimi in drugimi omejitvami, zato je uporaba ITS ukrepov za izboljšanje prometnega sistema včasih edina rešitev. Na drugi strani je možnost preverjanja učinkov omenjenih sistemov (pred ali med samim delovanjem) zelo koristna tudi za načrtovalce teh sistemov, ki so pogosto inovativni in v praksi nepreizkušeni.

Mikroskopsko simulacijo se lahko uporabi za modeliranje večine ukrepov ITS, ki imajo neposreden vpliv na odvijanje prometnega toka, predvsem v koničnih obdobjih in ob izrednih dogodkih. Koristna je tako v fazi načrtovanja teh ukrepov, kot tudi med samim obratovanjem oziroma med upravljanjem prometnega sistema.

Magistrska naloga je sestavljena iz petih poglavij. V uvodnem poglavju je predstavljena vsebina in tematika z njeno aktualnostjo. V drugem poglavju so naštet, opisani in s praktičnimi primeri predstavljeni ITS ukrepi primerni za modeliranje z mikroskopsko simulacijo. To so predvsem ITS ukrepi za povečanje kapacitete samega cestnega omrežja oziroma njegove večje izkoriščenosti. Tretje poglavje predstavlja opis elementov mikroskopske simulacije in načina dela z njo. Poudarek je predvsem na značilnostih pri modeliranju ITS ukrepov. Ključno je četrto poglavje, kjer so z mikroskopsko simulacijo modelirani ITS ukrepi in predstavljeni učinki njihove uvedbe. Modelirani so štiri praktični primeri v fazi načrtovanja in dva primera v fazi upravljanja. Prikazana je tudi kalibracija in validacija mikroskopske simulacije izrednega dogodka. Za vsak primer je opisan način modeliranja ukrepa in njegov učinek. V zaključku četrtega poglavja je predstavljena tudi uporaba mikroskopske simulacije v realnem času. Peto poglavje vsebuje ključne ugotovitve o smiselnosti uporabe mikroskopske simulacije za modeliranje ITS ukrepov, navaja ugotovljene koristi (povečanje vozne hitrosti, skrajšanje potovalnih časov, zmanjšanje števila ustavljanj, ekonomske koristi zaradi manjših časovnih izgub in nižjih obratovalnih in vzdrževalnih stroškov, manjša poraba goriva, povečanje prometne varnosti) in predlaga nadaljnje ukrepe za še hitrejše uvajanje ITS tehnologije v slovenski prostor.

## 7 SUMMARY

Traffic is an important measure of quality of the modern way of life. It facilitates and promotes the development, but poor road conditions slow economic development, pollute the environment and hinder the development of an urban area, all of which are clearly visible even in Slovenia.

Construction of transport systems (road infrastructure, public transport systems) requires substantial resources, while transportation systems have long life and the associated long-term effects. Even today, and especially in the near future, it will be very important that the transport systems are utilized as much as possible, because the space for new infrastructure is becoming very limited. Efficiency of transport systems can be improved with intelligent management of both the systems themselves as well as transport demand.

The management of transport systems and networks is one of the possibilities of the integrated use of communication, surveillance and information technologies in the transport, which has been known in the world as intelligent transportation systems (ITS). In Slovenia there are currently four Traffic Management Systems in use. They provide traffic data collection, processing and delivering traffic travel information through variable message signs.

In recent years, the modeling of microscopic traffic simulation, which gives a realistic assessment of current and future traffic conditions, became a standard in Slovenia. Therefore, the microscopic simulation shows itself as a very useful tool in the design and management of ITS systems. This requires the involvement of transport planners and designers of ITS. Traffic planner's search for solution of traffic problems is extremely limited by space and other constraints, so sometimes the use of ITS measures is the only solution to traffic problem. On the other hand, the possibility of verifying the effects of such systems (before or during implementation) is very helpful for the designers of these systems that are often innovative and untested in practice.

Microscopic simulation can be used to model most of ITS measures, which have a direct impact on the traffic flow, especially in peak periods and emergencies. It is a useful tool also in the planning phase of these measures, as well as during the operation or management of the transport system.

Master's thesis consists of five chapters. The introductory chapter presents the theme, its relevance and content. The second chapter lists, describes and presents practical examples of ITS measures that are appropriate for modeling with the microscopic simulation. These are mainly ITS measures to increase the capacity of a road network and utilization. The third chapter presents a description of elements of the microscopic simulation and typical workflow. The focus is primarily on the characteristics of the modeling of ITS measures. The most important is the fourth chapter, where ITS measures are modeled with the microscopic simulation and the effects of their deployment are presented. Modeled are four practical examples in the planning stage, and two cases in the management stage. It also shows the calibration and validation of microscopic simulation of an emergency. For each example a method of modeling the ITS measure and its effect are described. At the end of the fourth chapter the use of microscopic simulation in real time is introduced. The final section presents the key findings regarding the reasonableness of the use of microscopic simulation to model ITS measures, states identified benefits (increased driving speeds, shorter journey times, reduction of the number of stops, the economic benefits from reduced time losses and lower operating and maintenance costs, reduced fuel consumption, increasing traffic safety), and proposes further measures for even faster deployment of ITS technologies in the Slovenia.

## VIRI

ASFINAG. 2011. LKW-Stellplatzinformation.

<http://www.asfinag.at/unterwegs/rastanlagen/lkw-stellplatzinfo> (10.6.2011)

Dambach. 2011. UTMC Compliant Parking Guidance.

<http://www.dambach.co.uk/utmcparkingguidance.html> (10.6.2011)

DARS. 2009. Baza podatkov sistema za nadzor in vodenje prometa na ljubljanski obvoznici. Celje. Delovno gradivo v elektronski obliki.

Department for Transport. 2008. Advanced motorway signalling and traffic management feasibility study. London. Department for Transport: 81 str.

Department for Transport. 2009. Values of Time and Operating Costs, TAG Unit 3.5.6. London. Department for Transport: 22 str.

EURAMP. 2007. European RAMP Metering Project, Deliverable D6.3, Evaluation Results. Edinburgh. EURAMP: 295 str.

Evropska komisija. 2011. Transport 2050: Commission outlines ambitious plan to increase mobility and reduce emissions. Bruselj.

<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/11/372&format=HTML>.  
(10.6.2011)

Evropska komisija. 2011. White paper: Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system, Impact Assessment. Bruselj, Evropska komisija: 171 f.

Gantelet E., Lefauconnier A. 2006. The time looking for a parking space: strategies, associated nuisances and stakes of parking management in France. Strasbourg, European Transport Conference. <http://www.etcproceedings.org/paper/the-time-looking-for-a-parking-space-strategies-associated-nuisances-and-stake> (10.6.2011)

Highway Agency. 2011. What is Active Traffic Management?

<http://www.highways.gov.uk/knowledge/10862.htm> (10.6.2011)

IER. 2007. HEATCO - Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment, Deliverable 5. Stuttgart: 193 f.

Immers B. 2008. The Dutch experience with traffic telematics and plans for the future. V: Predstavitev na ATTC Symposium. Dunaj, 21. oktober 2008. Dunaj, ATTC.

INFAS, DLR. 2010. Mobilität in Deutschland 2008, Ergebnisbericht. Bonn in Berlin, Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: 207 f.

Jelenc M. 2010. Modelske metode za ocenjevanje prometne varnosti. V: Zbornik referatov 10. slovenskega kongresa o cestah in prometu. Portorož, 20. – 22. oktober 2010. Ljubljana, Društvo za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: str. 691-698.

NCP. 2010. Parking survey. London. <http://conversation.which.co.uk/transport-travel/parking-in-britain-takes-us-too-long/> (10.6.2011)

OECD. 2007. Managing Urban Traffic Congestion. Pariz. OECD/ECMT: 294 str.

PNZ, Ninamedia, URBI. 2003. Anketa po gospodinjstvih, raziskava potovalnih navad prebivalcev ljubljanske regije. Ljubljana, Mestna občina Ljubljana: 31 f.

PNZ. 2007. Prometna študija ter prometna in ekonomska primerjava različic obvoznice Škofljica. Celje, DARS: prometni model.

PNZ. 2008a. Prometne in ekonomske osnove sistema za nadzor in vodenje prometa na ljubljanskem avtocestnem obroču. Celje, DARS: prometni model.

PNZ. 2008b. IP za sistem za nadzor in vodenje prometa na ljubljanskem avtocestnem obroču. Celje, DARS.

PNZ. 2008c. Preureditev strateškega prometnega modela na raven mestne občine Ljubljana. Ljubljana, Mestna občina Ljubljana: prometni model.

PNZ. 2009. Prometna preveritev nove projektne rešitve razcepa Škocjan na odseku HC Koper-Dragonja, Celje, DARS: prometni model.

Prometni studio in Traffic Design. 2010. PZI Izvedba ukrepov vodenja prometa za povečanje pretočnosti prometa na hitri cesti H5 v priključku Slavček. Ljubljana, DRSC.

PIC Prometno-informacijski center za državne ceste. 2010. Prometna karta.  
<http://promet.si/portal/map/portal.aspx> (10.6.2011)

PTI. 2005. SITSA-C: Slovenska ITS Arhitektura - modul Ceste. Ljubljana, Ministrstvo za promet: 207 f.

PTI. 2007. Vrednost časa za vse udeležence v prometu, razvojno raziskovalna naloga, končno poročilo. Celje, DARS: 46 f.

PTV. 2009. Vissim 5.20 User Manual. Karlsruhe: 608 f.

THEA - Tampa Hillsborough County Expressway Authority. 2010. Reversible Express Lanes.  
<http://tampa-xway.com/pages.aspx?ID=112210101919> (10.6.2011)

Torday A. 2009. Decision Support System for Real-Time Traffic Management Traffic Simulation as Central Element. Honolulu, 2nd International Symposium on Freeway and Tollway Operations, Honolulu.

Traffic Design. 2011. Delovno gradivo.

TU Delft. 2011. Advanced control techniques for optimal adaptive traffic control.  
<http://www.dsc.tudelft.nl/~crweb/research/node20.html> (10.6.2011)

Uredba o metodologiji za pripravo in obravnavo investicijske dokumentacije na področju državnih cest. UL RS št. 124/07: 18317-18332.

Zorin U. 2007. Delovno gradivo DARS, d.d., področje za IT in ITS. Celje.