

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Podiplomski program Gradbeništvo
Prometna smer

Kandidat:

Jure Pirc

Evalvacija prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa

Magistrska naloga št. 204

Mentor:

izr. prof. dr. Tomaž Kastelic

Ljubljana, 8. 10. 2008

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo

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



PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA

MAGISTRSKI ŠTUDIJ
PROMETNA SMER

Kandidat:

JURE PIRC, univ.dipl.inž.grad.

**EVALVACIJA PROMETNEGA MODELA SISTEMA ZA
NADZOR IN VODENJE PROMETA NA AVTOCESTAH**

Magistrsko delo štev.: 204

**EVALUATION OF TRAFFIC MODEL AS A PART OF THE
TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM ON HIGHWAYS**

Master of Science Thesis No.: 204

Mentor:

Izr.prof.dr. Tomaž Kastelic

Predsednik komisije:

Doc.dr. Marijan Žura

Član:

Doc.dr. Tomaž Maher

Ljubljana, oktober 2008

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **JURE PIRC** izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom:
**»EVALVACIJA PROMETNEGA MODELA SISTEMA ZA NADZOR IN VODENJE
PROMETA NA AVTOCESTAH«.**

Ljubljana, 26. 9. 2008

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 656.1.021+656.1.055/.057 (043.3)

Avtor: Jure Pirc

Mentor: izr.prof.dr. Tomaž Kastelic

Naslov: Evalvacija prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa na avtocestah

Obseg in oprema: 147 str., 13 pregl., 42 sl., 30 graf., 32 en.

Ključne besede: nadzor prometa, vodenje prometa, nivo usluge, prometno stanje, evalvacija, prometni model

Izveček

V magistrskem delu je obravnavan prometni model za določevanje prometnih stanj kot podmodul sistema za nadzor in vodenje prometa na avtocestah. Prometni model sistema za nadzor in vodenje prometa je kompleksen model, ki na podlagi vhodnih prometnih parametrov izmerjenih s pomočjo detekcijskih naprav v realnem času izračunava prometna stanja. Prvi del naloge obravnava teorijo prometnega toka, ki predstavlja osnovo za delovanje prometnega modela. V drugi fazi je opisan sistem za nadzor in vodenje prometa in njegovi ključni elementi s posebnim poudarkom na sistemu, ki je bil v začetku leta 2008 implementiran na zahodni ljubljanski obvoznici z namenom vodenja prometa in obveščanja voznikov v primeru potencialno nevarnih situacij. Opisano je določevanje prometnih stanj na podlagi prometnih podatkov izmerjenih na terenu. Predstavljeni so fundamentalni diagrami prometnega toka in korelacija z dejanskimi podatki izmerjenimi na trasi. Tretji del naloge predstavlja evalvacija prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa, izdelana na primeru vodenja prometa in izračunavanja prometnih stanj ob pojavu različnih izrednih dogodkov na trasi. Podrobno je analiziran odziv modela za določevanje prometnih stanj glede na dejanske razmere na avtocestnem odseku. Rezultati evalvacije zajemajo vpliv vodenja prometa glede na prometna stanja na obnašanje voznikov in vpliv na prometni tok ter prometno varnost. Prikazane so ekonomske, finančne in okoljevarstvene koristi. V smernicah za določitev mejnih vrednosti med prometnimi stanji je opisan pristop k reševanju problemov pri implementaciji modela za določevanje prometnih stanj na novih lokacijah.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

- UDC:** 656.1.021+656.1.055/.057 (043.3)
- Author:** Jure Pirc
- Supervisor:** assoc.prof.dr. Tomaž Kastelic
- Title:** Evaluation of Traffic Model as a part of the Traffic Management System on highways
- Notes:** 147 p., 13 tab., 42 fig., 30 graph., 32 eq.
- Key words:** Traffic Management System, Level Of Service, real time traffic data acquisition, Traffic Model

Abstract

The present work focuses on the traffic model for the level of service determination as a part of the Traffic Management System on highways in Slovenia. Based on the traffic data acquisition from various types of detectors (microwave detectors, video detection cameras) the system is capable of determining the levels of service in real time. Using Variable Message Signs, the information is then provided to the end users-the drivers. The first part of the work summarizes the traffic flow theory, which forms the basis of the traffic model. In the second part the Traffic Management System on the Ljubljana bypass, implemented in the first half of 2008, is introduced. The Ljubljana city ring is one of the most demanding motorway sections in Slovenia. The fundamental diagrams of traffic flow are represented in correlation with real traffic data acquired from the detectors. The third part of the work deals with the evaluation of the traffic model and the level of service determination. The response of the traffic model is analyzed on the basis of traffic data gained from the system. The results of the evaluation are represented through economic, financial and environmental benefits. In the guidelines for the level of service determination the approach to the implementation of the new model on new highway locations is described.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju magistrskega dela se zahvaljujem mentorju, izr.prof.dr. Tomažu Kastelicu in asist.mag. Robertu Rijavcu.

Posebna zahvala velja tudi vsem sodelavcem iz podjetja Traffic design d.o.o, Ljubljana, ki so s svojim interdisciplinarnim znanjem v veliki meri pripomogli k uveljavitvi sistemov za nadzor in vodenje prometa na slovenskih avtocestah.

Zahvalil bi se tudi moji Tini ter staršema, ki sta me skozi vsa leta študija moralno podpirala.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Opredelitev problema	1
1.2	Namen magistrskega dela	2
1.3	Pregled vsebine	2
2	TEORIJA PROMETNEGA TOKA	4
2.1	Karakteristike prometnega toka	4
2.1.1	Sestavljenost prometnega toka	4
2.1.2	Splošni pogoji odvijanja toka	4
2.1.3	Sestava ali struktura prometnega toka.....	5
2.1.4	Časovno nihanje prometnega toka.....	6
2.2	Parametri prometnega toka.....	8
2.2.1	Volumen prometnega toka in pretok vozil.....	8
2.2.2	Gostota prometnega toka	9
2.2.3	Hitrost prometnega toka	10
2.2.4	Časovni razmak med vozili.....	12
2.2.5	Prostorski razmak med vozili.....	13
2.2.6	Potovalni čas.....	14
2.2.7	Potovalni čas za enoto potovanja	15
2.3	Kapaciteta in nivo uslug.....	15
2.3.1	Definicija pojmov.....	15
2.3.2	Faktorji, ki vplivajo na kapaciteto in nivoje uslug	17
2.3.3	Redukcija kapacitete	19
2.4	Osnovni avtocestni odsek	24
2.4.1	Osnovne lastnosti avtocestnega odseka.....	25
2.4.2	Faktorji, ki vplivajo na hitrost prostega prometnega toka.....	26
2.4.3	Karakteristike prometnega toka na avtocestah.....	27
2.4.4	Določevanje hitrosti prostega prometnega toka	29

2.4.5	Določevanje ekvivalentnega pretoka.....	29
2.4.6	Določevanje nivoja uslug na osnovnem avtocestnem odseku.....	32
2.4.7	Določevanje nivoja uslug v praksi	34
2.4.8	Deljenje avtoceste na odseke	35
3	OPIS SISTEMA ZA NADZOR IN VODENJE PROMETA	37
3.1	Lokacija	37
3.2	Splošno o sistemu za nadzor in vodenje prometa	39
3.3	Merilniki za zbiranje prometnih podatkov	41
3.4	Obveščanje voznikov preko spremenljive prometno-informativne signalizacije	43
3.5	Opis funkcij sistema.....	45
3.5.1	Zbiranje prometnih podatkov.....	45
3.5.2	Obdelava prometnih podatkov	46
3.5.2.1	Preizkus veljavnosti prometnih podatkov	47
3.5.2.2	Izračuni prometnih količin.....	47
3.5.2.3	Glajenje prometnih količin in prognoza trenda.....	56
3.5.2.4	Izračuni prometnih količin za statistično analizo	57
3.5.3	Nadzor nad prometnim stanjem na cesti	60
3.5.3.1	Fundamentalni diagram prometnega toka	60
3.5.3.2	Določitev stopnje prometnega stanja	71
3.5.3.3	Določitev pojava zastoja	80
3.5.4	Vodenje prometa glede na prometno stanje	83
4	EVALVACIJA	87
4.1	Namen evalvacije.....	87
4.2	Status projekta	88
4.3	Čas in način evalvacije.....	88
4.4	Cilji evalvacije	89
4.5	Raziskovalna vprašanja.....	89
4.6	Območje evalvacije	90

4.7	Primeri evalvacije prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa	91
	
4.7.1	Vodenje prometa ob pojavu premične zapore	91
4.7.2	Vodenje prometa ob velikih prometnih obremenitvah	98
4.7.3	Vodenje prometa ob pojavu zastoja zaradi kratkotrajne redukcije števila pasov	104
	
5	REZULTATI	124
	
5.1	Rezultati analize	124
	
5.1.1	Procedure in organizacijski vidiki	125
5.1.2	Vplivi na prometni tok in obnašanje voznikov	126
5.1.3	Vpliv na prometno varnost	127
5.2	Statistične analize	129
5.3	Odgovori na raziskovalna vprašanja	130
5.4	Skupna ocena	133
	
6	SMERNICE ZA DOLOČITEV MEJNIH VREDNOSTI MED PROMETNIMI STANJI	135
	
7	ZAKLJUČKI	137
	
8	POVZETEK	141
	
9	SUMMARY	144
	
VIRI		146
	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 3.1: Primer podatkov pridobljenih iz mikrovalovnega detektorja; testiranje na zahodni ljubljanski obvoznici, avgust 2004	46
Preglednica 3.2: Izpis prometnih parametrov za potrebe poročil	59
Preglednica 3.3: Stopnje hitrosti	74
Preglednica 3.4: Stopnje gostote	74
Preglednica 3.5: Določitev stopnje prometnega stanja	75
Preglednica 3.6: Mejne vrednosti za 1. kriterij določevanja zastoja (zasedenost).....	81
Preglednica 3.7: Omejitve hitrosti za posamezno prometno stanje	84
Preglednica 4.1: Spreminjanje dejanskih vrednosti hitrosti, gostote in pretoka na lokaciji SPIS 03L v času nastanka zastoja	110
Preglednica 4.2: Spreminjanje prognoziranih vrednosti hitrosti, gostote in pretoka ter prometnih stanj na lokaciji portala SPIS 03L v času nastanka zastoja	110
Preglednica 4.3: Spreminjanje dejanskih vrednosti hitrosti, gostote in pretoka na lokaciji portala SPIS 03L po odstranitvi zapore	121
Preglednica 4.4: Spreminjanje prognoziranih vrednosti hitrosti, gostote in pretoka ter prometnih stanj na lokaciji portala SPIS 03L po odstranitvi zapore.....	122
Preglednica 5.1: Število nesreč v povezavi z PLDP	129
Preglednica 5.2: Skupna ocena vplivov (DARS, 2008b).....	133

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 2-1: Zmanjšanje hitrosti zaradi neugodnih vremenskih razmer.....	24
Grafikon 2-2: Odnos Hitrost-Pretok.....	27
Grafikon 2-3: Odnos Pretok-Gostota.....	28
Grafikon 3-1: Primerjava dejanske, glajene in prognozirane vrednosti pretoka.....	57
Grafikon 3-2: Prikaz prometnih parametrov (pretok osebnih vozil, pretok tovornih vozil in skupni pretok) v grafični obliki za potrebe poročil.....	59
Grafikon 3-3: Grafikon Pretok-Gostota.....	62
Grafikon 3-4: Prikaz odnosa Pretok-Gostota na merilnem mestu SPIS 02L na zahodni ljubljanski obvoznici za daljše časovno obdobje.....	63
Grafikon 3-5: Grafikon Hitrost-Gostota.....	63
Grafikon 3-6: Prikaz odnosa Hitrost-Gostota na merilnem mestu SPIS 02L na zahodni ljubljanski obvoznici za daljše časovno obdobje.....	64
Grafikon 3-7: Grafikon Hitrost-Pretok.....	65
Grafikon 3-8: Prikaz odnosa Hitrost-Pretok na merilnem mestu SPIS 02L na zahodni ljubljanski obvoznici za daljše časovno obdobje.....	65
Grafikon 3-9: Prikaz odnosa Hitrost-Pretok na merilnem mestu SPIS 03L na zahodni ljubljanski obvoznici. Hitrostna omejitev na lokaciji je zaradi del na cesti (»šikana«) omejena na 80 km/h.....	66
Grafikon 3-10: Razmerje med pretokom in gostoto v primeru prostega prometnega toka.....	67
Grafikon 3-11: Razmerje med pretokom in gostoto v primeru zgoščenega prometnega toka.....	68
Grafikon 3-12: Grafični prikaz določitve stopnje prometnega stanja.....	75
Grafikon 3-13: Primer določitve stopnje prometnega stanja na podlagi prognoziranih prometnih parametrov.....	76
Grafikona 3-14: Primerjava določevanja prometnih stanj in pripadajoče hitrostne omejitve v Sloveniji in v Nemčiji.....	79
Grafikon 4-1: Dejanski in prognoziran pretok.....	95
Grafikon 4-2: Dejanska in prognozirana hitrost.....	95
Grafikon 4-3: Primerjava dejanskih doseženih prometnih stanj in tistih določenih v prometnem modelu na podlagi prognostičnih vrednosti.....	96
Grafikon 4-4: Gibanje prometnih količin in pripadajoča prometna stanja.....	97

Grafikon 4-5: Nihanje prometnega pretoka	98
Grafikon 4-6: Gibanje prometnih količin in pripadajoča prometna stanja	101
Grafikon 4-7: Hitrost prometnega toka glede na omejitev hitrosti	102
Grafikon 4-8: Pretok v odvisnosti od omejitve hitrosti	103
Grafikon 4-9: Nihanje pretoka znotraj dneva na območju SPIS 03L za dan 21.4.2008	105
Grafikon 4-10: Primerjava dejanske in prognozirane povprečne hitrosti vseh vozil na lokaciji SPIS 03L	111
Grafikon 4-11: Razporeditev prognozirane povprečne hitrosti vseh vozil v odvisnosti od časa na treh zaporednih merilnih mestih (02L, 03L in A1L) v primeru izrednega dogodka na cesti (delo na cesti, zaprt prehitevalni pas).....	112
Grafikon 4-12: Gostota v odvisnosti od časa na treh zaporednih merilnih mestih (02L, 03L in A1L) v primeru izrednega dogodka na cesti (delo na cesti, zaprt prehitevalni pas).....	115
Grafikon 4-13: Pretok v odvisnosti od časa na dveh zaporednih merilnih mestih (03L in A1L) v primeru izrednega dogodka na cesti (delo na cesti, zaprt prehitevalni pas)	116

KAZALO SLIK

Slika 2-1: Osnovni avtocestni odsek	25
Slika 2-2: Deljenje avtoceste na odseke in pododseke	36
Slika 3-1: Shematski prikaz trase zahodne ljubljanske obvoznice	38
Slika 3-2: Testna lokacija - SPIS 03L nad voziščem na zahodni ljubljanski obvoznici	39
Slika 3-3: Območje detektiranja mikrovalovnih detektorjev	41
Slika 3-4: Zaznavanje vozil, ki menjajo pas	42
Slika 3-5: Grafični prikazovalnik spremenljive prometno-informativne signalizacije (SPIS)	43
Slika 3-6: Vodenje prometa in podajanje prometnih vsebin na več zaporednih grafičnih prikazovalnikov	44
Slika 3-7: Prikaz minutnih vrednosti prometnih podatkov za prometni pas iz mikrovalovnega detektorja	51
Slika 3-8: Prikaz prometnih podatkov za merilno mesto	55
Slika 3-9: Primer jutranje konice (zgoščeno prometno stanje PS 4) na severni ljubljanski obvoznici	73
Slika 3-10: Vodenje prometa ob pojavu občasnih zastojev na izvozu Brezovica (popoldanska konica)	83
Slika 3-11: Vodenje prometa glede na prometno stanje: jutranja konica na zahodni ljubljanski obvoznici (SPIS 03L)	85
Slika 3-12: Vodenje prometa v nasičenem prometnem stanju (petkova popoldanska konica) in ob pojavljanju občasnih zastojev na izvoznih rampah (Lj.-Sever in Brezovica)	86
Slika 4-1: Prikaz območja evalvacije	90
Slika 4-2: Območje premične zapore zaradi košnje	92
Slika 4-3: Ročno nameščena prometna vsebina	93
Slika 4-4: Nasičeno prometno stanje in pripadajoča hitrostna omejitev	93
Slika 4-5: Obveščanje v primeru zgoščenega prometnega stanja	94
Slika 4-6: Ročno nameščena vsebina za zastoj	94
Slika 4-7: Zgoščeno prometno stanje	97
Slika 4-8: Jutranja konica na zahodni ljubljanski obvoznici (SPIS 03L)	99
Slika 4-9: Prometno stanje in pripadajoča prometna vsebina (* zaradi specifičnosti odseka je bila hitrost omejena na 80 km/h)	100

Slika 4-10: Shematski prikaz trase z vrisano lokacijo kratkotrajne zapore prehitevalnega pasu (označeno z rdečo) in pripadajoče prometne vsebine za obveščanje voznikov v primeru izrednega dogodka (delo na cesti) v fazi zastoja.....	104
Slika 4-11: Prometna vsebina na SPIS 01L, B1D in 02L-datum in ura.....	106
Slika 4-12: Prometna vsebina na SPIS 03L - območje »šikane«.....	106
Slika 4-13: Prometna vsebina na SPIS A1L	106
Slika 4-14: Prometna vsebina na SPIS 01L in B1D lociranih pred razcepom Kozarje (SPIS B1D je zaradi statične omejitve hitrosti pred razcepom Kozarje prikazoval še omejitev hitrosti 80 km/h).....	106
Slika 4-15: Prometna vsebina na SPIS 02L	107
Slika 4-16: Prometna vsebina na SPIS 03L	107
Slika 4-17: Prometna vsebina na SPIS A1L – grafični prikazovalnik lociran po koncu del na cesti	107
Slika 4-18: Prikaz prometne vsebine v osnovnem stanju in po vzpostavitvi zapore	108
Slika 4-19: Vpliv kratkotrajne zapore prehitevalnega pasu protitočno (portal SPIS 03L)	113
Slika 4-20: Prikaz prometne vsebine na portalu SPIS 03L v prometnih stanjih PS 0, PS 2 in PS 3, ter prikaz PS 4 brez hitrostne omejitve.....	113
Slika 4-21: Počasno speljevanje iz zastoja in povečani prostorski razmaki med vozili	114
Slika 4-22: Vpliv kratkotrajne zapore prehitevalnega pasu protitočno.....	117
Slika 4-23: Prometna vsebina na SPIS 02L pred nastankom zastoja.....	117
Slika 4-24: Prometna vsebina na portalih SPIS 01L in B1D lociranih pred razcepom Kozarje (portal SPIS B1D je zaradi statične omejitve hitrosti pred razcepom Kozarje prikazoval še omejitev hitrosti 80 km/h).....	118
Slika 4-25: Prometna vsebina na portalu SPIS 02L.....	118
Slika 4-26: Neenakomerno pospeševanje (speljevanje) z območja zapore	119
Slika 4-27: Vpliv kratkotrajne zapore prehitevalnega pasu sotočno (portal SPIS A1L)	120
Slika 4-28: Prometna vsebina na SPIS 03L	121

1 UVOD

1.1 Opredelitev problema

Gospodarski razvoj in sodoben način življenja ljudi, ki iz različnih vzrokov spodbuja mobilnost, nezadržno vplivata na prometno rast motornega cestnega prometa in število potovanj. Kljub intenzivni gradnji in posodabljanju cestne infrastrukture ni mogoče v vsakem trenutku zagotoviti prostega prometnega toka. Kapacitete so sicer lahko zadostne prometnim obremenitvam v normalnih razmerah, ni pa se mogoče izogniti prometnim konicam zaradi povečanega prometa ob koncu delavnika, v času praznikov ali počitnic, posebnih prireditev in drugih dogodkov. Vzrok začasnega zmanjšanja kapacitet cest so tudi vzdrževalna dela, katerim se ni in se ne bo nikoli mogoče izogniti. In ne nazadnje ne smemo pozabiti na pojav nenačrtovanih izrednih dogodkov - poleg neugodnih vremenskih razmer na posameznih odsekih so to predvsem prometne nesreče, ki se bodo ne glede na zastavljene cilje prometnih politik in raznih strategij prometne varnosti dogajale tudi v bodoče. Ti dogodki še posebej specifično vplivajo na prometne razmere, saj jih ni mogoče predvideti niti po kraju niti po času. Vse navedeno napeljuje na potrebo po sistematičnem in pravočasnem obveščanju udeležencev v prometu o dogodkih, ki vplivajo na njihovo mobilnost.

Razvoj inteligentnih transportnih sistemov (ITS), ki med drugim skrbijo tudi za zaznavanje izrednih dogodkov in obveščanje uporabnikov cestnega omrežja o stanju na cesti, je v polnem razmahu. V zadnjih letih se na slovenskem avtocestnem omrežju intenzivno uvajajo Sistemi za nadzor in vodenje prometa (SNVP), ki v primeru potencialno nevarnih situacij omogočajo vzpostavitev optimalnih prometnih razmer glede na trenutno in predvideno stanje na cesti.

Prvi tak sistem je bil v drugi polovici leta 2004 implementiran na primorskem kraku avtocestnega odseka A1, med Klancem in Srminom, drugi pa sredi leta 2005 na štajerskem kraku avtocestnega odseka A1 med Vranskim in Blagovico. Oba sistema sta bila postavljena predvsem zaradi geometrijskih lastnosti avtocestnega odseka, ki v kombinaciji s predori in neugodnimi vremenskimi vplivi (burja na primorskem in sneg na štajerskem) zahtevajo nadzor in vodenje prometnega toka.

Medtem, ko so na predhodno omenjenih avtocestnih odsekih prometne obremenitve nizke in večino časa daleč pod kapaciteto, pa ljubljanska obvoznica prevzema velike prometne obremenitve tako tranzitnega kot tudi vsakodnevnega lokalnega prometa. V začetku leta 2008 je bil na zahodni ljubljanski obvoznici implementiran sistem za nadzor in vodenje prometa, s katerim med drugim želimo izboljšati pretočnost avtocestnega odseka tako v koničnih urah kot tudi v obdobju srednjih pretokov.

1.2 Namen magistrskega dela

Prometni model sistema za nadzor in vodenje prometa je kompleksen model, ki na podlagi vhodnih prometnih parametrov izmerjenih na terenu, glede na razmere v prometnem toku izračunava prometna stanja. Za homogeniziranje 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 oz. pospeševanjem hitrosti posledično vodi prometni tok.

Na področju vodenja prometa s pomočjo sistemov za nadzor in vodenje prometa v Sloveniji do sedaj še ni bilo narejenih nikakršnih podrobnejših analiz in raziskav. Pri dosedanjem delu smo se opirali predvsem na ugotovitve in smernice iz tujine, ki pa so zaradi drugačnih navad in obnašanja voznikov, le do neke mere primerne za avtoceste v Republiki Sloveniji.

Namen magistrskega dela je bila podrobnejša analiza in evalvacija odzivanja sistema in prometnega modela kot njenega podmodula na spreminjanje prometnega toka, kar je omogočilo prilagoditev spremenljivk slovenskim razmeram in določitev kritičnih dejavnikov, ki jih je potrebno upoštevati pri kalibraciji prometnega modela za vsak dotični pododsek.

1.3 Pregled vsebine

Podatki za evalvacijo prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa so pridobljeni iz merilnih mest postavljenih vzdolž obravnavanega avtocestnega odseka

(zahodna ljubljanska obvoznica), kjer se s pomočjo mikrovalovnih detektorjev nameščenih nad voznimi pasovi na portalih spremljive prometno-informativne signalizacije, zbirajo osnovni prometni parametri ločeni za osebna in tovorna vozila. V sistemu se na podlagi teh podatkov izračunavajo prometne količine, ki jih ne moremo neposredno meriti. S pomočjo izmerjenih in preračunanih prometnih podatkov se na merilnem mestu za posamezen pododsek določajo prometna stanja.

Magistrsko delo je zasnovano v skladu z evropskimi smernicami za evalvacijo projektov - TEMPO Guidelines for Reporting Evaluation Results (2005).

Magistrsko delo je sestavljeno iz sedmih poglavij. Uvodnemu poglavju sledi opis teorije prometnega toka kot osnova za izvajanje izračunov na podlagi osnovnih prometnih parametrov. Podrobno so opisane karakteristike prometnega toka, parametri prometnega toka, kapaciteta in nivoji uslug, ter osnovni avtocestni odsek. Tretje poglavje opisuje sistem za nadzor in vodenje prometa s pomočjo katerega pridobivamo podatke, izvajamo prometne izračune, ter obveščamo in vodimo prometni tok. Podrobno je opisan tudi model določanja prometnih stanj kot osnova za vodenje prometa in omejevanje hitrosti glede na prometna stanja. Četrto poglavje predstavlja evalvacijo prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa na konkretnih primerih vodenja prometa ob pojavu različnih izrednih dogodkov. V naslednjem, petem poglavju so predstavljeni rezultati analize in evalvacije. Šesto poglavje podaja smernice za določitev mejnih vrednosti med prometnimi stanji ob implementaciji sistema za nadzor in vodenje prometa na novih lokacijah, glede na specifične karakteristike prometnega toka. V zadnjem, sedmem poglavju so v skrajšani obliki prikazani zaključki in ugotovitve magistrskega dela.

2 TEORIJA PROMETNEGA TOKA

2.1 Karakteristike prometnega toka

Za opisovanje prometnega toka je poleg poznavanja zakonitosti gibanja motornih vozil, potrebno poznati tudi karakteristike prometnega toka. Med pomembnejše karakteristike prometnega toka štejemo:

- sestavljenost prometnega toka,
- splošne pogoje odvijanja toka,
- sestavo ali strukturo prometnega toka,
- časovno neenakomernost prometnega toka.

2.1.1 Sestavljenost prometnega toka

Pri opisovanju prometnega toka je pomembno vedeti koliko smeri in nizov se pojavlja v prometnem toku. Tako ločimo:

- enostaven prometni tok, ki predstavlja en niz vozil, ki se giblje v isti smeri. Imenujemo ga tudi elementarni ali enotni tok, sestavljata pa ga najmanj dve vozili.
- sestavljen prometni tok, ki sestoji iz dveh ali več nizov prometnih tokov, pri čemer ločimo sestavljen prometni tok dveh ali več vzporednih, v istem smislu potujočih tokov (večpasovna cesta); sestavljen prometni tok dveh ali več enostavnih tokov, ki se med seboj prepletajo (uvozne ali izvozne rampe) in pa sestavljen prometni tok iz dveh ali več osnovnih prometnih tokov, ki se med seboj križajo (križišča).

Na avtocestah se pojavlja prometni tok sestavljen iz več vzporednih nizov tokov, ki potujejo v isto smer, torej gre za sestavljen prometni tok.

2.1.2 Splošni pogoji odvijanja toka

Prometni tokovi so glede na pogoje odvijanja prometa:

- neprekinjeni prometni tokovi so tokovi, pri katerih na pogoje vožnje deluje medsebojna odvisnost med vozili, ki je odvisna od gostote prometnega toka. Neprekinjen prometni tok se pojavlja na odsekih avtoceste, v predorih...

- neprekinjeni, delno ovirani prometni tokovi so tokovi, kjer poleg medsebojne odvisnosti med vozili na gibanje vplivajo tudi elementi ceste: sprememba števila voznih pasov, vpletanje in izpletanje tokov. Tak tok se pojavlja ob izvennivojskih priključkih na avtocestah.
- občasno prekinjeni prometni tokovi so tokovi, kjer poleg medsebojne odvisnosti med vozili na gibanje vplivajo tudi zahteve po uporabi istih prometnih površin za vozila iz različnih smeri, ki se med seboj sekajo. Taki prometni tokovi se pojavljajo na mestnih cestah, v nivojskih križiščih.

Na avtocestah se pojavljata tako neprekinjeni prometni tok (na območju predorov, viaduktov in na odsekih s konstantnim številom pasov) kot tudi neprekinjeni, delno ovirani prometni tok (na območju, kjer pride do zmanjšanja števila pasov in na območju izvennivojskih priključkov, kjer pride do prepletanja).

2.1.3 Sestava ali struktura prometnega toka

Prometni tok se glede na sestavo oziroma strukturo deli na:

- homogen prometni tok je prometni tok sestavljen iz ene same vrste vozil: samo osebna, samo tovorna, samo rekreacijska. V praksi takšnega prometnega toka ni.
- nehomogen prometni tok je realen prometni tok, sestavljen iz dveh ali več vrst različnih kategorij vozil. Stopnjo nehomogenosti izraža delež tovornih vozil v prometnem toku. Delež nehomogenosti prometnega toka se lahko izraža tudi s karakteristikami voznikov (vsakodnevni vozniki, turisti, »vikend« vozniki). Z rastjo deleža nehomogenosti se slabšajo tudi pogoji gibanja v prometnem toku. Pri tem se razlike kažejo predvsem na vzponih in padcih.
- pogojno homogen prometni tok je teoretična aproksimacija, kjer se nehomogeni prometni tok pretvori v homogenega. Takšnega toka dejansko ni. Pogojno homogeni tok se izraža v enotah osebnih vozil (eov). Pretvorba se izvede s pomočjo določenih ekvivalentov (E). Velikost ekvivalenta je odvisna od vrste vozila, dolžine vozila, vozno-dinamičnih karakteristik vozila, karakteristik ceste in praktičnega problema, ki se rešuje. V splošnem so ekvivalenti sledeči: za motocikle $E < 1$, za potniška osebna vozila $E = 1$ in za ostala vozila $E > 1$.

V nadaljevanju je uporabljen pogojno homogen prometni tok s čimer so težka tovorna vozila s pomočjo ekvivalentov prevedena na osebna vozila.

2.1.4 Časovno nihanje prometnega toka

Pri opazovanju prometnega toka v realnih pogojih opazimo, da prihaja do časovnih nihanj. Prometni tok je spremenljivka, ki se v odvisnosti od časa spreminja glede na mesece v letu, dneve v tednu, ure v dnevu in celo znotraj ure. Te lastnosti so pomembne zlasti pri bolj obremenjenih avtocestnih odsekih, kjer povpraševanje lahko preseže kapaciteto. V takem primeru se na avtocestnem odseku, tudi ob najbolj obremenjenih konicah, ne smejo pojaviti zamaški. Pravtako moramo posebno pozornost nameniti »sezonskim« avtocestnim odsekom, kjer prihaja v določenem trenutku do velikih obremenitev. Karakteristika časovnega nihanja ima velik vpliv pri določanju strategije in načina vodenja prometnih tokov na opazovani cestni mreži.

Sezonsko in mesečno nihanje prometnega toka

Sezonska nihanja v prometnem toku so predvsem odraz socialnih in ekonomskih značilnosti opazovanega območja, kjer avtocestni odsek poteka. Opažene so bile naslednje značilnosti:

- na podeželskih avtocestah prihaja do večjih mesečnih nihanj kot na mestnih avtocestah,
- mesečna nihanja so opaznejša na podeželskih avtocestah, ki vodijo k rekreacijskim središčem kot na podeželskih avtocestah, ki vodijo k gospodarskim središčem,
- sezonska nihanja so prisotna predvsem pri avtocestah, ki vodijo do rekreacijskih središč (zimski in letni turizem).

Ta opazovanja pripeljejo do zaključka, da prihaja do večjih nihanj v prometnem toku na avtocestah, ki vodijo do rekreacijskih središč, medtem ko avtoceste, ki služijo povezavi gospodarskih središč ohranjajo dokaj konstanten volumen prometnega toka tekom leta.

Dnevno nihanje prometnega toka

Nihanja prometnega toka glede na dan v tednu so pravtako odvisna od značivosti in namena avtoceste. Na avtocestah, ki služijo predvsem povezovanju gospodarskih središč so večje obremenitve med tednom, medtem ko na avtocestah, ki služijo povezavi z rekreacijskimi območji prihaja do večjih obremenitev konec tedna. Pravtako so nihanja znotraj dneva bolj opazna ravno pri avtocestah, ki vodijo k rekreacijskim središčem.

Urno nihanje prometnega toka

Pri določanju nivoja uslug in vodenju prometnega toka je poznavanje nihanja prometa po manjših časovnih enotah kot je ura pomembno predvsem v koničnih urah. Pri avtocestah v urbanih območjih je opazna jutranja in večerna konica tekom tedna, pri čemer je večerna konica izrazitejša. Pri avtocestah, povezanih z rekreacijskimi središči, opazimo le eno dnevno konico in sicer v soboto zgodaj dopoldne (ko se potniki odpravljajo v rekreacijska središča) in v nedeljo pozno popoldne (ko se vračajo domov).

Konična ura

Kapaciteta in ostale prometne analize se osredotočajo na konično uro, še natančneje na urno konico. To je operativno gledano najbolj kritično obdobje, saj je zahteva po servisiranju prometnega toka v tem obdobju največja. Vendar pa obremenitev v času urne konice ni konstantna vrednost, temveč se spreminja iz dneva v dan in iz meseca v mesec.

Pri avtocestah, ki povezujejo kraje z rekreativnimi središči, se pojavljajo izredno velike obremenitve včasih samo nekaj vikendov na leto, medtem ko druge dni tudi ob urnih konicah obremenitev ni kritična. Na drugi strani pa pri mestnih avtocestah opazimo precej manjša nihanja. Večina uporabnikov je namreč stalnih.

2.2 Parametri prometnega toka

Pod pojmom prometni tok se razume urejeno gibanje več vozil na prometnici. Ključna razlika med gibanjem vozil v prometnem toku in gibanjem posameznega vozila je v tem, da v prometnem toku nastopa medsebojna odvisnost med posameznimi vozili.

Med najpomembnejše parametre prometnega toka lahko uvrstimo naslednje količine:

- volumen prometnega toka in pretok vozil,
- gostota prometnega toka,
- hitrost prometnega toka,
- časovni razmak med vozili,
- prostorski razmak med vozili,
- potovalni čas,
- potovalni čas na enoto potovanja.

2.2.1 Volumen prometnega toka in pretok vozil

Volumen prometnega toka in pretok vozil sta dva parametra, ki merita pretok vozil na preseku ceste v določenem časovnem intervalu. Po Highway Capacity Manualu (HCM) sta podani naslednji definiciji (2000):

Volumen prometnega toka je skupno število vseh vozil, ki prevozijo določen presek ceste v danem časovnem intervalu. Volumen se lahko izraža kot letni, dnevni, urni ali podurni volumen.

Pretok vozil je skupno število vseh vozil, ki prevozijo določen presek ceste v danem časovnem intervalu, ki pa je manjši od ene ure ponavadi vzamemo minutni ali 5-minutni interval.

Volumen prometnega toka in pretok vozil sta spremenljivki, ki določita količino vozil, ki bi rada uporabila določen prostorski odsek v določenem časovnem intervalu.

$$Q = \frac{N}{T} \quad (2.1)$$

kjer je:

Q = pretok

N = število vozil v prometnem toku

T = čas

Tu je potrebno omeniti tudi faktor urne konice (f_{UK}), ki se nanaša na minutni interval. Določa se kot razmerje pretoka v konični uri in 60-kratnega minutnega pretoka v konični uri:

$$f_{UK}(15') = \frac{Q}{4 * Q_{min}} \quad (2.2)$$

kjer je:

f_{UK} = faktor urne konice

Q = urni pretok (voz/h)

Q_{min} = minutni pretok

2.2.2 Gostota prometnega toka

Gostota prometnega toka predstavlja število vozil na enoto dolžine prometnice, glede na vozni pas. Pojem je prostorsko vezan na odsek ceste, časovno pa na trenutek. Označujemo jo s številom vozil na kilometer (voz/km) ali z ekvivalentom osebnih vozil na kilometer (eov/km). Direktna merjenja gostote so zahtevna, upoštevajoč uporabo fotografije ali snemanja z video kamero, zato jo izračunamo s pomočjo povprečne potovalne hitrosti in pretoka vozil, ki ju lažje izmerimo.

$$G = \frac{Q}{V} \quad (2.3)$$

kjer je:

G = gostota (voz/km)

Q = pretok vseh vozil (voz/h)

V = povprečna potovalna hitrost (km/h)

Obstaja pa tudi formula, kjer gostoto izračunamo s pomočjo števila vozil na enoto odseka v trenutku opazovanja:

$$G = \frac{N}{L} \quad (2.4)$$

kjer je:

G = gostota (voz/km)

N = število vozil v prometnem toku (voz)

L = dolžina avtocestnega odseka (km)

Gostota je pomemben parameter za opisovanje prometnega toka, ker opisuje kvaliteto prometnih stanj. Opisuje odnos med vozili in podaja prostost manevriranja.

2.2.3 Hitrost prometnega toka

Hitrost prometnega toka je, za razliko od hitrosti posameznih vozil, enaka srednji vrednosti hitrosti vseh vozil v opazovanem prometnem toku.

V teoriji prometnega toka sta, odvisno od načina opazovanja (glede na čas in/ali prostor) in odvisno od pomena pretoka vozil in gostote toka, po HCM-u znani dve definiciji za srednjo hitrost (2000):

Srednja prostorska hitrost toka, ki je analogno gostoti, prostorsko vezana na odsek ceste, časovno pa na trenutek. Srednja prostorska hitrost prometnega toka predstavlja aritmetično sredino trenutnih hitrosti vseh vozil v prometnem toku na opazovanem odseku. V literaturi se pojavi tudi izraz srednja trenutna hitrost. Naziv je odvisen od tega, kako imenujemo način opazovanja. Merjenje srednje prostorske hitrosti običajno temelji na trenutnem opazovanju (merjenju) na določenem odseku ceste.

Srednja časovna hitrost toka, ki je analogno pretoku vozil, prostorsko vezana na presek poti, časovno pa na interval opazovanja. Srednja časovna hitrost prometnega toka predstavlja aritmetično sredino hitrosti vseh vozil v prometnem toku, ki prevozijo opazovan presek ceste v določenem časovnem obdobju. V literaturi se tako merjenje lahko imenuje tudi lokalno opazovanje.

Srednjo prostorsko hitrost izračunamo tako, da delimo dolžino odseka z povprečnim potovalnim časom vozila, ki prevozi odsek. Če so izmerjeni potovalni časi $t_1, t_2, t_3 \dots t_n$ (v urah) za n vozil, ki prevozijo odsek dolžine L , se za izračun srednje prostorske hitrosti uporabi naslednja formula:

$$V = \frac{n * L}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{L}{t_a} \quad (2.5)$$

kjer je:

V = povprečna potovalna hitrost (km/h)

L = dolžina avtocestnega odseka (km)

t_i = potovalni čas i -tega vozila na odseku (h)

n = število časovnih intervalov

t_a = povprečni potovalni čas na odseku dolžine L (h)

Potovalni časi v tej enačbi vključujejo tudi zamude, ki nastanejo zaradi motenj prometnega toka in prometnih zastojev.

Hitrost prometnega toka v odvisnosti od pogojev gibanja vozil v prometnem toku glede na stopnjo medsebojnega vpliva

V odvisnosti od pogojev gibanja vozil v toku glede na stopnjo medsebojnega vpliva, dobi srednja prostorska hitrost (pravtako tudi časovna hitrost) novo poimenovanje:

Hitrost prostega prometnega toka

Hitrost prostega prometnega toka ponazarja hitrost vseh vozil v prometnem toku na opazovanem odseku ceste, ki se gibljejo v identičnih ali zelo podobnih pogojih, kot bi veljali za gibanje posameznih vozil na opazovanem odseku ceste.

Hitrost normalnega toka (stabilen, nestabilen, nasičen)

Pojem hitrosti normalnega toka je vezan na stabilen, nestabilen in nasičen prometni tok v katerem na pogoje gibanja vozil deluje tudi medsebojni vpliv vozil v toku.

Hitrost zgoščenega toka oz. hitrost pri doseženi kapaciteti

Pojem hitrosti zgoščenega toka je vezan na zgoščen prometni tok v katerem se vsa vozila gibljejo s polnim ali skoraj polnim medsebojnim vplivom vozil v toku. Pri pogojih zgoščenega toka se vsa vozila gibljejo s približno enako hitrostjo, kar pomeni, da ni nobene bistvene razlike med srednjo prostorsko in srednjo časovno hitrostjo prometnega toka.

Hitrost prisiljenega toka

Pojem hitrosti prisiljenega toka je vezan na t.i. prisiljen prometni tok. Vozila se v tem primeru gibljejo z enako hitrostjo, ki se giblje med hitrostjo zgoščenega toka in 0.

Hitrost je zelo pomemben parameter pri določevanju nivoja uslug in posledično prometnih stanj.

2.2.4 Časovni razmak med vozili

Časovni razmak med vozili je čas med prehodi sprednjega roba dveh zaporednih vozil preko namišljenega preseka na opazovanem odseku ceste. To so mikroskopske lastnosti, saj se nanašajo na posamezne pare vozil znotraj prometnega toka. V prometnem toku ima časovni

razmak med vozili široko razporeditev vrednosti, predvsem v odvisnosti od hitrosti prometnega toka.

V realnem prometnem toku ločimo glede na način opazovanja toka v času in prostoru:

- posamezne časovne intervale za N vozil, ki v časovnem intervalu T prevozijo opazovani odsek ceste,
- srednjo vrednost časovnega razmaka (intervala) med N vozili v prometnem toku v časovnem intervalu T ,
- časovni razmak med vozili na odseku ceste kot aritmetična sredina srednjih vrednosti časovnih razmakov na m opazovanih presekih ceste v času T .

Časovni razmak med vozili na preseku opazovanega odseka ceste predstavlja razliko zaporednih prehodov prednjih delov zaporednih vozil preko namišljenega preseka.

Časovni razmak med vozili na odseku predstavlja aritmetično sredino časovnih razmakov med zaporednimi vozili v opazovanem prometnem toku na n -presekih opazovanega odseka. Osnovna enota za prikazovanje razmaka med vozili je sekunda.

Časovni razmak med vozili ima velik vpliv v inženirski praksi kot pokazatelj kvalitete prometnega toka.

2.2.5 Prostorski razmak med vozili

Razmak med vozili pri sledenju predstavlja razdaljo med prednjimi robovi zaporedno vozečih vozil v prometnem toku. Pravtako kot časovni razmak med vozili, je tudi to mikroskopska lastnost.

V pogledu realnih pogojev v prometnem toku na odseku ceste predstavlja razmak med vozili srednjo vrednost vseh razmakov med sledečimi vozili v opazovanem prometnem toku na odseku ceste.

Glede na način opazovanja ločimo:

- konkretna razdalja med posameznimi vozili v prometnem toku, ki se nahajajo v opazovanem trenutku na opazovanem odseku ceste,
- srednja vrednost trenutnih razmakov med vozili v prometnem toku, ki se nahajajo v opazovanem trenutku na opazovanem odseku ceste,
- aritmetična sredina m -srednjih trenutnih razmakov ugotovljenih na opazovanem odseku v časovnem intervalu T .

Osnovna enota za opisovanje razmaka med vozili je meter. Razmak med vozili je kot osnovni parameter prometnega toka pomemben za razumevanje in opisovanje medsebojne odvisnosti med vozili v prometnem toku.

2.2.6 Potovalni čas

Potovalni čas predstavlja srednjo vrednost potovalnega časa vseh vozil opazovanega prometnega toka preko določenega odseka ceste. Zapišemo ga z naslednjo formulo:

$$\bar{t} = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^q t_i \quad (2.6)$$

kjer je:

\bar{t} = srednja vrednost potovalnega časa vseh vozil v določenem prometnem toku q preko opazovanega odseka ceste

t_i = potovalni čas posameznih vozil v določenem prometnem toku q preko opazovanega odseka ceste

Q = opazovani prometni tok na določenem odseku ceste

Osnovna enota za opisovanje potovalnega časa prometnega toka je minuta, lahko pa uporabljamo tudi sekunde ali ure.

2.2.7 Potovalni čas za enoto potovanja

Potovalni čas za enoto potovanja predstavlja srednjo časovno vrednost, ki je potrebna za potovanje dolžinske enote potovanja vseh vozil v prometnem toku, npr. za 1 km opazovanega odseka ceste. Zapisano z enačbo:

$$\bar{t} = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^q t_{mi} = \frac{\bar{t}_1}{L} \quad (2.7)$$

kjer je:

\bar{t} = srednja vrednost potovalnega časa vseh vozil v prometnem toku za enoto potovanja na opazovanem odseku ceste

t_{mi} = potovalni čas posameznega vozila v prometnem toku q za enoto potovanja na opazovanem odseku

Q = opazovani prometni tok na določenem odseku

\bar{t}_1 = srednja vrednost potovalnega časa toka q

L = dolžina odseka

Osnovna enota za opisovanje potovalnega časa prometnega toka za enoto potovanja je (min/km), niso pa izključene tudi druge enote.

2.3 Kapaciteta in nivo uslug

2.3.1 Definicija pojmov

Kapaciteta

Kapaciteta je definirana kot maksimalno število vozil, ki lahko prevozi nek presek ceste v določenem časovnem intervalu pod točno določenimi pogoji. Navadno jo označujemo z ekvivalentom osebnih vozil na uro (eov/h). Tukaj je upoštevano, da doltočni odseki ne vplivajo na prometni tok protitočno (npr. kolone, ki nastajajo sotočno, ne vplivajo na gortočni odsek). Lastnosti prometnega toka in struktura prometa naj bi bili znotraj odseka, ki

ga opazujemo kar se le da homogeni, saj vsaka sprememba teh parametrov povzroči spremembo kapacitete.

Osnova za določevanje kapacitete je neka sprejemljiva (logična) verjetnost ponavljanja stopnje prometnega toka tekom urnih konic. Kapaciteta ni enaka maksimalnemu pretoku na določeni točki v določenem časovnem intervalu.

Povpraševanje

Povpraševanje je definirano kot število uporabnikov, ki bi radi uporabili prometnico in ga ponavadi označimo s številom vozil na uro (voz/h). Povpraševanje je odvisno od števila prihajajočih vozil - če ni nobene kolone, je povpraševanje enako prometnemu volumnu na določenem odseku prometnice.

Kvaliteta in nivoji uslug

Kvaliteta usluge zahteva kvantitativna merjenja za označitev voznih pogojev znotraj prometnega toka.

Nivoji uslug pa so kvalitativno merilo, ki opisuje vozne pogoje znotraj prometnega toka v smislu različnih merenj, kot so hitrost, potovalni čas, svoboda manevriranja, motnje toka in udobnost. Definiranih je šest nivojev uslug od A do F, pri čemer nivo usluge A predstavlja najboljše vozne pogoje, nivo usluge F pa najslabše vozne pogoje. Vsak nivo predstavlja skupek voznih pogojev in voznikovo odzivanje na posamezno stanje. Varnost ni vključena v meritve, ki določujejo posamezne razrede.

Po metodi HCM se prometni tok deli na šest nivojev uslug (2000):

- **nivo usluge A:** svobodni prometni tok z velikimi hitrostmi, majhno gostoto prometa in popolno svobodo manevriranja. Vozniki lahko ohranjajo zeleno hitrost z malo ali pa nič zamudami.
- **nivo usluge B:** svobodni prometni tok s hitrostmi, ki so le delno omejene z gostoto prometa. Vozniki imajo še vedno izbiro vozne hitrosti, zmanjšanje hitrosti je majhno.

- **nivo usluge C:** stabilen prometni tok, vendar sta tako hitrost kot zmožnost manevriranja omejena s povečanim številom vozil.
- **nivo usluge D:** stanje v prometnem toku se približuje nestabilnemu toku z bistveno omejenimi hitrostmi in majhno možnostjo manevriranja.
- **nivo usluge E:** stanje v prometnem toku je nestabilno zaradi vožnje v koloni, kjer je velika gostota prometa in kjer je pretok vozil enak prepustnosti. Maksimalni pretok pri nivoju E je enak kapaciteti.
- **nivo usluge F:** v ekstremnih primerih lahko tako hitrost kot tudi pretok dosežeta vrednost nič.

2.3.2 Faktorji, ki vplivajo na kapaciteto in nivoje uslug

Osnovni pogoji

Med osnovne pogoje štejemo ugodne vremenske pogoje, dobre lastnosti voziščne konstrukcije, uporabnike seznanjene (udomačene) z avtocestnim odsekom in predvidevanje, da ni nobenih motenj, ki bi ovirale prometni tok.

Navedeni so osnovni pogoji za neoviran prometni tok:

- širina pasu 3.6m,
- minimalna bočna oddaljenost med robom krajne talne označbe in najbližjim objektom mora znašati 1.8m,
- minimalna razdalja med pasovoma z ločenim smernim prometom mora biti 0.6m,
- prometni tok sestavljen izključno iz osebnih vozil,
- razdalja med priključnimi rampami min 3km (ne velja za mestne avtoceste),
- raven teren z največjim vzponom 2%,
- stalni udeleženci v prometu (udeleženci, ki stalno uporabljajo določen odsek).

Lastnosti cestišča

Lastnosti cestišča so odvisne od geometrijskih in ostalih elementov. V nekaterih primerih lastnosti cestišča vplivajo na kapaciteto ceste, v nekaterih primerih pa vplivajo na hitrost, na kapaciteto pa ne.

Lastnost cestišča so:

- število pasov,
- širina pasov,
- širina bankine in razmak med nasprotno-smernimi pasovi,
- računsko hitrost,
- horizontalni in vertikalni potek trase.

Horizontalni in vertikalni potek trase je odvisen od računske hitrosti in topografije terena po katerem bo cesta speljana. V splošnem raznolikost terena zmanjša kapaciteto.

Lastnosti prometa

Lastnosti prometa, ki vplivajo na kapaciteto in nivoje uslug so tipi vozil in distribucija vozil po pasovih oziroma smereh.

Tipi vozil

Vstop tovornih vozil (vozila, ki niso osebna vozila, kamor štejemo tudi manjše tovornjake in kombije) v prometni tok vpliva na število vozil, ki jim lahko strežemo. Tovorna vozila so vsa vozila, ki imajo več kot štiri kolesa na cestišču.

Vozila, ki spadajo med tovorna vozila, so: kamioni, avtobusi in t.i. rekreacijska vozila (kamperji, avtodomi).

Tovorna vozila vplivajo na promet v dveh primerih:

- so večja kot osebna vozila in zavzamejo več prostora,
- imajo slabše vozne karakteristike kot osebna vozila, kar se pozna predvsem pri pospeševanju, zaviranju in vzdrževanju enakomerne hitrosti na vzponih.

Drugi primer je veliko bolj kritičen. Tovorna vozila, ki ne morejo vzdrževati tempa osebnih vozil, ustvarjajo velike vrzeli v prometnem toku. Posledica tega je, da ne more biti zapolnjen ves odsek ceste. Ta pojav je opazen predvsem na vzponih. Do tega pojava pride tudi pri vožnji navzdol, saj morajo tovorna vozila obratovati pri nižjih hitrostih, kar spet ustvarja praznine med vozili. Na posameznih cestah predstavljajo tovorna vozila velik del prometnega toka in tako so vozni pogoji zelo odvisni od obtežitve tovornih vozil in moči motorja.

Distribucija vozil po pasovih oziroma smereh

V zvezi s tem problemom še ni bilo izvedenih konkretnjših raziskav na podlagi merjenj.

2.3.3 Redukcija kapacitete

Stalno (permanentno) zmanjšanje kapacitete

Največkrat se pojavi stalna redukcija kapacitete v primeru zmanjšanja števila pasov. Dokler je povpraševanje manjše od kapacitete ne prihaja do zastojev. Takoj pa, ko prihajajoči volumen preseže kapaciteto, se pojavijo zastoji protitočno od območja zmanjšanja števila pasov. Nekatere raziskave, objavljene v HCM-u kažejo, da slabo dimenzioniran spoj pri zmanjšanju števila pasov negativno vpliva na kapaciteto odseka z zmanjšanim številom pasov zaradi povečane turbulence (2000).

Zmanjšanje kapacitete zaradi del na cesti

Zmanjšanje kapacitete zaradi del na cesti se deli na premična in dolgotrajna dela na cesti. Ena izmed osnovnih razlik med obema vrstama del je razlika v načinu zavarovanja gradbišča. Za dolgotrajna dela na cesti se uporabljajo premične betonske ovire, za kratkotrajna dela pa

stožci in premični stebrički. Dolgotrajna dela na cesti, pod kar spada rekonstrukcija in vzdrževanje, lahko trajajo nekaj tednov ali celo mesecev, medtem ko kratkotrajna (premična) dela na cesti ponavadi trajajo le nekaj ur.

Premična dela na cesti

Raziskave, objavljene v HCM-u priporočajo, da se za območja kratkotrajnih del vzame kapaciteta 1.600 eov/h/pas, ne glede na razmere, kakšna je konfiguracija gradbišča. Za nekatere vrste konfiguracij naj bi bila kapaciteta celo nekoliko višja (2000).

Dolgotrajna dela na cesti

Če je potrebno speljati prometni tok na vozišče z nasprotnosmernim prometnim tokom, se kapaciteta po priporočilih HCM-a zmanjša na približno vrednost 1.550 eov/h/pas. Če pa je zaprt le vozni ali prehitevalni pas, je vrednost kapacitete višja in je v povprečju okoli 1.750 eov/h/pas (2000).

Upoštevanje širine pasu

Na območju kratkotrajnih in dolgotrajnih del na cesti moramo upoštevati tudi faktor zožanja širine pasu. Za prometni tok z izključno osebnimi vozili se pri prehodu širine pasu iz 3.5 m na 3.25-3.0 m, po ugotovitvah HCM-a, prostorski razmaki med vozili povečajo za 10 %, pri prehodu na 2.75 m pa celo za 16 %. Povečanje razmakov med vozili vodi do zmanjšanja kapacitete in to za 9 do 14 % na območju zožanja pasov (2000).

Zmanjšanje kapacitete zaradi neugodnih vremenskih razmer

V HCM-u je objavljenih več raziskav, kako dež, sneg in megla vplivajo na prometni tok (2000). Ugotovitve kažejo, da ne pride samo do zmanjšanja kapacitete, temveč tudi do zmanjšanja hitrosti.

Dež

Ugotovljeno je bilo, da ne pride do zmanjšanja hitrosti pri mokrem vozišču, dokler ni zmanjšana tudi vidljivost. Tako rahel dež nima vpliva na hitrosti in kapaciteto vse dotlej, dokler se ne pojavi zajetna količina vode na cestišču. Po drugi strani pa močan dež zelo zmanjša vidljivost in ima opazne vplive na prometni tok. Dejanske ugotovljene vrednosti, objavljene v HCM-u so naslednje (2000):

Zmanjšanje hitrosti pri rahlem dežju je približno 2 km/h. Pri pretoku 2400 voz/h je efekt rahlega dežja zmanjšal hitrosti iz 89 do 95 km/h pri ugodnih vremenskih pogojih (suho cestišče) na 82 km/h. Pri rahlem dežju skoraj ni opaziti sprememb kapacitete.

Pri močnem dežju pa je padec hitrosti prostega prometnega toka za 5 do 7 km/h. Efekt močnega dežja je pri pretoku 2400 voz/h zmanjšal hitrosti iz 89 do 95 km/h na 76 do 79 km/h. Pri tem pa lahko pride do zmanjšanja maksimalnega pretoka za 14 do 15 % glede na ugodne vremenske pogoje.

Sneg

Pri snegu se vozni pogoji še opaznejše spreminjajo glede na intenziteto padavin kot pri dežju. Problemi se pojavijo predvsem pri močnem sneženju, ki ne le da vpliva na slabšo vidljivost, temveč ob nepravočasnem delovanju zimske službe tudi na kvaliteto vozišča. Tako kopičenje snega na avtocesti prekrije talne označbe in iz tropasovne ceste dobimo le prometni tok v dveh linijah. Pri tem vozniki držijo večjo varnostno razdaljo, kar se pozna pri prostorskih razmakih med vozili. To pa vpliva na kapaciteto. V nadaljevanju so predstavljene ugotovitve iz HCM-a (2000).

Pri blagem sneženju je padec v hitrosti prostega prometnega toka le 1 km/h, zmanjšanje pretoka pa je nekje vmes med rahlim in močnim dežjem, torej za 5 do 10 %.

Močno sneženje pa ima velik vpliv na hitrost. Padec hitrosti prostega prometnega toka je za 37 do 42 km/h iz začetnih 102 do 106 km/h (pri ugodnih vremenskih razmerah). Maksimalni

opazovani padec pretoka je iz 2160 na 1200 voz/h/pas, kar predstavlja zmanjšanje pretoka za 45 %.

Megla

Čeprav nobena študija še ni dokazala kvantitativnega vpliva megle na zmanjšanje kapacitete in hitrosti, so bile izmerjene vrednosti, objavljene v HCM-u, zmanjšanja hitrosti za 8 do 10 km/h (2000). Pri tem je potrebno omeniti, da tu ne gre za zmanjšanje hitrosti zaradi same megle, temveč zaradi opozorilnih tabel, ki priporočajo zmanjšanje hitrosti.

Zmanjšanje kapacitete zaradi nesreč in pokvarjenih vozil

Zmanjšanje kapacitete zaradi nesreč in pokvarjenih vozil je ponavadi krajšega časovnega obdobja, ki lahko traja eno uro (pri lažjih trkih, kjer so vključena le osebna vozila), pa tja do dvanajst ur (za večje nesreče, kjer pride do prevrnitve polno naloženega tovornjaka) preden odstranijo posledice nesreče. Na podlagi raziskav v HCM-u, je bilo ugotovljeno, da je v povprečju trajanje nesreče 37 minut (kjer so bila v nesreči udeležena le osebna vozila), pri čemer so pri več kot polovici nesreč posledice odstranjene prej kot v pol ure, medtem ko se pri vpletenosti tovornjakov to obdobje poveča na povprečnih 63 minut (2000).

Kako sama nesreča vpliva na kapaciteto je predvsem odvisno od deleža vozišča, ki je zaradi nesreče blokiran in pa od skupnega števila pasov na tem mestu avtoceste. V preglednici je prikazan odstotek razpoložljive kapacitete na območju nesreče:

Preglednica: Vpliv nesreče na kapaciteto ceste (HCM 2000, poglavje 22, str. 11)

Table: Capacity of the road due to traffic accident (HCM 2000, chapter 22, p. 11)

Število pasov v eno smer	Zaprte odstavnega pasu	Nesreča na odstavnem pasu	Blokiran en pas	Blokirana dva pasova	Blokirani trije pasovi
2	0.95	0.81	0.35	0.00	-
3	0.99	0.83	0.49	0.17	0.00

Iz preglednice lahko razberemo, da je zmanjšanje kapacitete na območju nesreče večje, kot je dejanski delež prometa, ki je fizično blokiran. Na primer, na območju dvopasovne avtoceste, ki ima blokiran en pas, je po HCM-u razpoložljiva kapaciteta le 35 % prvotne kapacitete (2000). Do tega pojava pride, ker vozniki, ko so vzporedno z nesrečo, upočasnijo vožnjo in opazujejo posledice nesreče, hkrati pa počasi reagirajo na zmožnost pospeševanja po koncu območja nesreče.

Do zmanjšanja kapacitete pa pride tudi na nasprotno-smernem voznem pasu zaradi samih voznikov, ki na območju nesreče vozijo počasneje in opazujejo posledice nesreče. Niso bile še opravljene kvantitativne študije, ki bi ovrednotile ta pojav, vendar izkušnje iz HCM-a kažejo, da je glede na jakost nesreče priporočljivo vzeti zmanjšanje kapacitete od 5 % pri manjših nesrečah, do 25 % pri nesrečah z večjim številom udeležencev in velikim številom reševalnih vozil (2000).

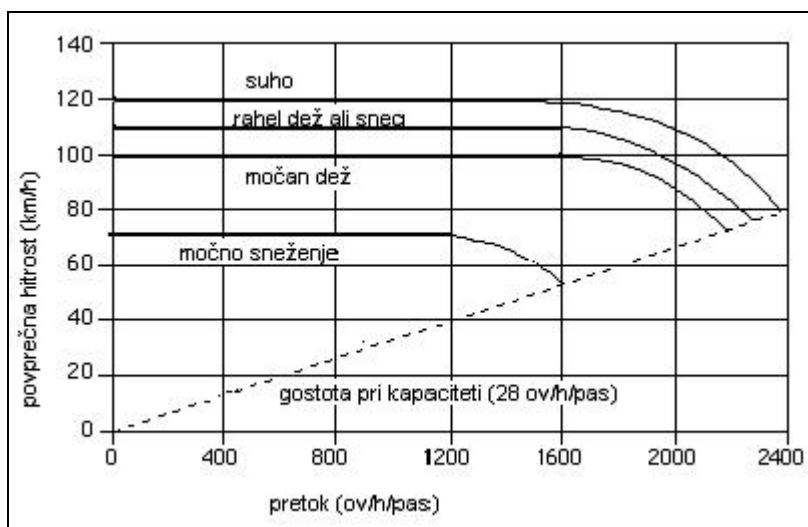
Uporaba redukcije kapacitete v praksi

Obstaja več načinov, na kakšen način upoštevamo zgoraj opisane redukcije kapacitete, od hitrih aproksimacij pa do detajlnejših metodologij. Hitra aproksimacija zahteva le primerjavo med razmerjem bodočega prometa in zmanjšanjem kapacitete na določenem odseku. Če povpraševanje ne presega razpoložljive kapacitete (reducirane), potem naj na tem odseku ne bi bilo težav s pretokom.

Sama metodologija po HCM-u pa deluje na podlagi krivulje hitrost – pretok (za nezasičen del), vendar je v večini zgoraj opisanih primerov podan le vpliv na kapaciteto (2000). V dosedanjih raziskavah še ni bil določen vpliv parametrov, kot so nesreče ali dela na cesti, na hitrosti oziroma na diagram hitrost – pretok.

Najbolj točne raziskave so bile v HCM-u izvedene za neugodne vremenske razmere (2000). Pri rahlem dežju ali snegu, je zmanjšanje hitrosti pri kapaciteti 7 do 13 km/h, kar lahko prevedemo na zmanjšanje hitrosti prostega promenega toka za 10 km/h. Pri močnem dežju je redukcija hitrosti prostega prometnega toka 20 km/h, pri močnem sneženju pa ta redukcija doseže že vrednost 50 km/h. Grafikon (2-1) prikazuje približen potek krivulj za različne

vremenske razmere, upoštevajoč konstantno gostoto za določitev kapacitete za vsako krivuljo posebej.



Grafikon 2-1: Zmanjšanje hitrosti zaradi neugodnih vremenskih razmer

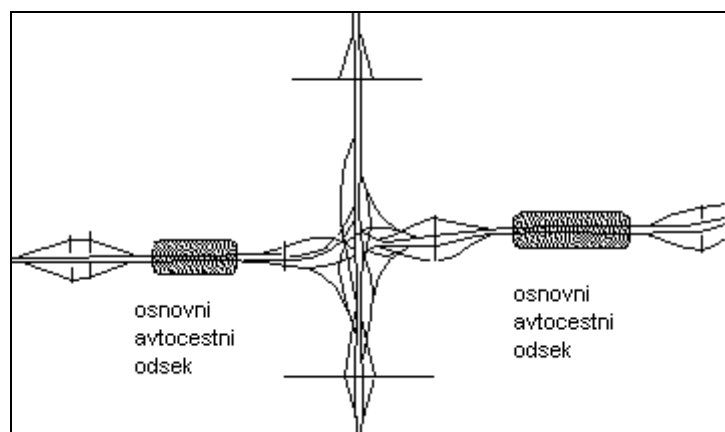
Diagram 2-1: Free-flow speed reduction due to diverse weather conditions

2.4 Osnovni avtocestni odsek

Avtocesta je hitra cesta z več kot dvema pasovoma za vsako smer in ločenim smernim voziščem. Dostop na in iz avtoceste je možen samo na uvoznih in izvoznih rampah, uporablja pa se izključno za motorni promet. Pragtako ni nobenih signaliziranih križišč in nivojskih križanj, nasprotno smerni promet pa je ločen s fizično prepreko.

Avtocesta zagotavlja neprekinjen prometni tok, sami operativni pogoji pa so odvisni od interakcij med vozili in vozniki v prometnem toku, od geometrijskega poteka trase in od naravnih razmer kot so svetlost, vremenski vplivi in stanje vozišča.

Osnovni avtocestni odsek se nahaja izven območij uvoznih in izvoznih ramp, ter izven območij prepletanja.



Slika 2-1: Osnovni avtocestni odsek

Figure 2-1: Basic freeway segments

2.4.1 Osnovne lastnosti avtocestnega odseka

Osnovne lastnosti avtocestnega odseka, pri katerih je dosežena polna kapaciteta osnovnega avtocestnega odseka so ugodne vremenske razmere, dobra vidljivost in odsek brez nesreč. Če katera od naštetih lastnosti ni izpolnjena, se hitrost, nivo usluge in kapaciteta na osnovnem avtocestnem odseku temu ustrezno zmanjšajo. Ostale osnovne lastnosti avtocestnega odseka po HCM-u so navedene v nadaljevanju (2000):

- minimalna širina pasu mora biti 3.6m,
- minimalna bočna oddaljenost med robom krajne talne označbe in najbližjim objektom mora znašati 1.8m,
- minimalna razdalja med pasovoma z ločenim smernim prometom mora biti 0.6m,
- prometni tok sestavljen izključno iz osebnih vozil,
- razdalja med priključnimi rampami najmanj 3 km (v mestnem območju najmanj 1 km),
- raven teren z maksimalnim vzponom 2%,
- stalni udeleženci v prometu (udeleženci ki stalno uporabljajo določen odsek).

Te osnovne lastnosti avtocestnega odseka predstavljajo zmožnost doseganja prostega prometnega toka hitrosti 100 km/h ali več.

2.4.2 Faktorji, ki vplivajo na hitrost prostega prometnega toka

Širina pasu in bočne ovire

Kjer se pojavi širina pasu manjša od 3.6 m, so vozniki prisiljeni potovati bližje eden drugemu kar kompenzirajo z zmanjšanjem hitrosti. Podobno se dogaja z bočnimi ovirami. Če so bočne ovire postavljene preblizu vozišča se vozniki umaknejo proti sredini vozišča, kar spet vodi k zmanjšanju hitrosti. Pri tem so bolj kritične ovire desno od bankine, ki morajo biti oddaljene minimalno 1.8 m, da ne vplivajo na zmanjšanje hitrosti, medtem ko ovire v sredinskem območju niso tako moteče in so lahko 0.6 m od vozišča.

Število pasov

Število pasov na osnovnem avtocestnem odseku vpliva na hitrost prostega prometnega toka. Večje kot je število pasov, lažje voznik izbere svojo pot in se izogne počasi vozečemu prometu. Na tipičnem avtocestnem odseku je promet razdeljen po pasovih glede na hitrosti – bližje sredinskemu pasu dosega prometni tok večje hitrosti, medtem ko se hitrosti proti bankini zmanjšujejo.

Gostota priključnih ramp

Značilno je, da se v urbanih področjih priključne rampe pojavljajo bolj nagosto, prihaja do prepletanja kar posledično vodi k zmanjšanju hitrosti prostega prometnega toka. Idealna razdalja med posameznimi priključki je 3 km ali več, minimalna razdalja med njimi pa je 1 km.

Ostali faktorji

Tukaj je mišljen predvsem horizontalni in vertikalni potek trase, pri čemer odseki z zahtevnejšimi horizontalnimi ali vertikalnimi elementi vplivajo na hitrost prostega prometnega toka.

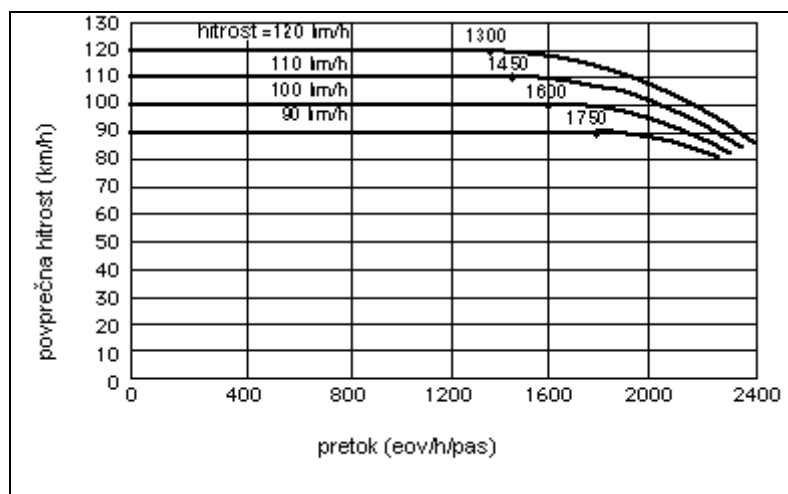
2.4.3 Karakteristike prometnega toka na avtocestah

Prometni tok na osnovnem avtocestnem odseku je v povezavi z razmerami, ki se dogajajo protitočno in sotočno od opazovanega odseka. Tu so mišljeni predvsem zastoji. Do zastoja lahko pride zaradi priključne rampe, zmanjšanja števila pasov, prepletanja več tokov, vzdrževalnih del, nesreč ali objektov na cesti. Prometni tok na osnovnem avtocestnem odseku lahko razdelimo v tri skupine, pri katerih vsaka predstavlja odvisnost med hitrostjo, tokom in gostoto:

- nezasičen tok je prometni tok, na katerega ne vplivajo gortočne in doltočne razmere,
- razpuščena kolona predstavlja prometni tok, ki je ravno prišel iz območja kolone in pospešuje nazaj proti prostemu prometnemu toku,
- zgoščen tok je prometni tok, na katerega vpliva sotočno ležeči zastoj.

Diagram Hitrost - Pretok in Gostota – Pretok

Na naslednjih dveh grafikonih (2-2 in 2-3) sta prikazani relaciji Hitrost – Pretok in Gostota – Pretok, za osnovni avtocestni odsek, pri čemer je znana hitrost prostega prometnega toka.



Grafikon 2-2: Odnos Hitrost-Pretok

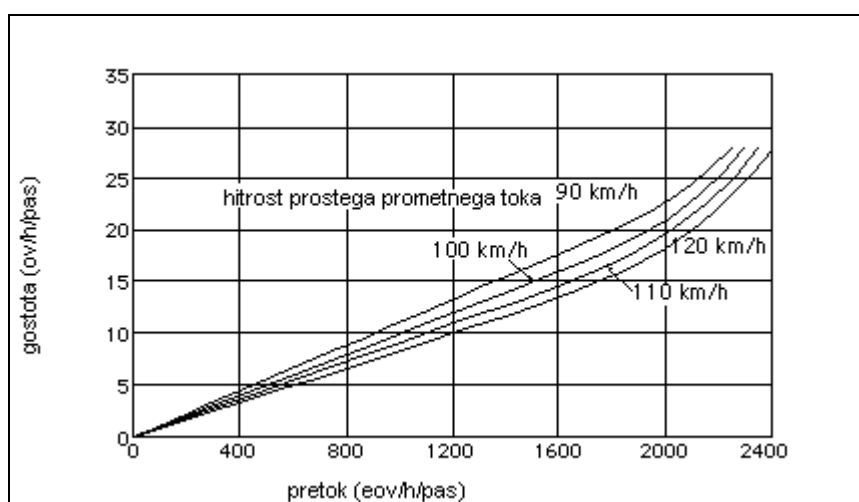
Diagram 2-2: Speed-Flow curves

Vse dosedanje raziskave v HCM potrjujejo, da je hitrost na avtocestah neodvisna od pretoka vse do vrednosti prometnega toka približno 1300 eov/h/pas za hitrost 120 km/h (2000). Za

manjše hitrosti pa je hitrost neodvisna od pretoka še do nekoliko večje vrednosti. Za vse vmesne vrednosti hitrosti med 90 in 120 km/h lahko uporabimo linearno interpolacijo.

Raziskave v HCM-u, ki so pripeljale do zgornjih krivulj pravijo, da na hitrost prostega prometnega toka vpliva več faktorjev: število pasov, širina pasu in razdalja med priključnimi rampami (2000). Obstajajo pa še drugi faktorji, o katerih pa je bolj malo znanega, kot so horizontalni in vertikalni potek trase, omejitev hitrosti, osvetljenost in vremenske razmere.

Pod osnovnimi geometrijskimi pogoji in osnovnimi pogoji prometnega toka, lahko avtocesta operira pri kapaciteti tja do 2400 eov/h/pas, pri čemer je ta kapaciteta dosežena pri hitrostih prostega prometnega toka 120 km/h ali več. Z zmanjšanjem hitrosti prostega prometnega toka pride do znatnega zmanjšanja kapacitete. Za primer, kapaciteta osnovnega avtocestnega odseka s hitrostjo prostega prometnega toka 90 km/h je približno 2250 eov/h/pas. Iz raziskav, objavljenih v HCM-u je opaženo tudi, da večja kot je hitrost prostega prometnega toka, večji je padec v hitrosti, ko se pretok približuje kapaciteti (2000). Pri hitrosti prostega prometnega toka 120 km/h je padec hitrosti 34 km/h pri doseženi kapaciteti glede na razmere z majhnim pretokom, pri hitrosti prostega prometnega toka 90 km/h pa je padec hitrosti le 10 km/h. Kot je vidno na grafu, ima mesto, kjer začne vplivati velikost pretoka na povprečno hitrost, vrednosti med 1300 in 1750 eov/h/pas.



Grafikon 2-3: Odnos Pretok-Gostota

Diagram 2-3: Flow-Density curves

V naslednji preglednici so prikazane vrednosti kapacitete za osnovni avtocestni odsek v odvisnosti od hitrosti prostega prometnega toka:

Preglednica: Vrednosti kapacitete v odvisnosti od hitrosti prostega prometnega toka (HCM 2000, poglavje 23, str. 3)

Table: Road capacity in relation with free flow speed (HCM 2000, chapter 23, p. 3)

Hitrost prostega prometnega toka – HPPT (km/h)	Kapaciteta (eov/h/pas)
120	2400
110	2350
100	2300
90	2250

2.4.4 Določevanje hitrosti prostega prometnega toka

Hitrost prostega prometnega toka, je povprečna hitrost osebnega vozila med prometnim tokom nizkega do srednjega pretoka (do 1300 eov/h/pas). Pri takem pretoku so hitrosti prostega prometnega toka skoraj konstantne.

Hitrost prostega prometnega toka lahko izmerimo na avtocestnem odseku. Osnovna hitrost prostega prometnega toka v Sloveniji znaša 100 km/h za mestne avtoceste in 130 km/h za podeželske avtoceste.

2.4.5 Določevanje ekvivalentnega pretoka

Urni pretok mora odražati vpliv težkih tovornih vozil, časovno spreminjanje prometnega toka znotraj ure in karakteristike voznikov. S pomočjo teh podatkov lahko pretvorimo pretok iz števila vozila na uro (voz/h) na ekvivalent pretoka osebnih vozil na uro (eov/h). To pretvorbo izvedemo s pomočjo ustreznih faktorjev za težka tovorna vozila in faktorjem urne konice, rezultat pa dobimo v številu osebnih vozil na uro na pas (eov/h/pas). Enačba 2.8 je uporabljena za izračun ekvivalenta:

$$Q_{EKV} = \frac{Q}{f_{UK} * N * f_{TV} * f_p} \quad (2.8)$$

kjer je:

Q_{EKV} = ekvivalent pretoka za osebna vozila (eov/h/pas)

Q = urni pretok (volumen) (voz/h)

f_{UK} = faktor urne konice

N = število pasov v eni smeri

f_{TV} = faktor težkih tovornih vozil

f_p = faktor tipa voznikov

Faktor urne konice

Faktor urne konice (f_{UK}), predstavlja spreminjanje prometnega toka znotraj ure. Na avtocestah se pojavljajo tipične vrednosti faktorja urne konice med 0.80 do 0.95, pri čemer je nižji faktor značilen za podeželske avtoceste, višji pa za mestne in obmestne avtoceste.

Faktor težkih tovornih vozil

Avtocestni promet, ki je sestavljen iz različnih kategorij vozil mora biti preveden na število osebnih vozil na uro na pas. Pretvorba se izvede na način, prikazan v enačbi 2.9:

$$f_{TV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)} \quad (2.9)$$

kjer je:

E_T, E_R = ekvivalent osebnih vozil za kamione/avtobuse in rekreacijska vozila (avtodomi, osebna vozila s prikolicami...) v prometnem toku

P_T, P_R = delež kamionov/avtobusov in rekreacijskih vozil v prometnem toku

f_{TV} = faktor težkih tovornih vozil

V praksi niso bile ugotovljene nobene razlike med vplivi kamionov in avtobusov na pretok, zato jih upoštevamo kot enakovredne. V veliko primerih so kamioni edina težka tovorna vozila, ki so prisotna na avtocesti, zato vpliv rekreacijskih vozil zanemarimo, če je njihova količina vsaj petkrat manjša od količine kamionov.

Faktor težkih tovornih vozil dobimo po dveh korakih: najprej poiščemo za vsak kamion/avtobus in rekreacijsko vozilo faktor E_T in E_R , ki predstavlja število osebnih vozil, ki bi porabila enak delež avtocestne kapacitete kot en kamion/avtobus ali rekreacijsko vozilo pod danimi cestno – prometnimi pogoji. Naslednji korak je, da z uporabo faktorjev E_T in E_R , ter z deležem vsake vrste težkih tovornih vozil v prometnem toku P_T in P_R izračunamo faktor težkih tovornih vozil f_{TV} .

Vpliv težkih tovornih vozil na prometni tok je odvisen od naklona vertikalnega poteka trase in od sestave prometa (deleža težkih tovornih vozil v njem). Ekvivalente osebnih vozil določimo na osnovi treh različnih naklonov: razpotegnjen avtocestni odsek, vzpon in padec.

Faktor tipa voznikov

V splošnem upoštevamo, da so vozniki seznanjeni z avtocestnim odsekom po katerem vozijo. Se pa občasno pojavijo tudi vozniki (t.i. rekreativni ali vikend vozniki), predvsem ob vikendih in v turističnih območjih, zaradi katerih pride do zmanjšanja kapacitete na posameznih odsekih. Faktor s katerim privzamemo lastnost neveščih voznikov označimo z f_P , ki ima vrednost med 0.85 in 1.0. V splošnem lahko za stalne voznike, seznanjene z avtocestnim odsekom privzamemo vrednost 1.0.

Izračun pretoka v praksi

Predmet analiz pretoka q_p je določitev pretoka v številu osebnih vozil na uro na pas, glede na avtocestni odsek in razmere v prometnem toku. Kot vhodni parameter podamo zeleni nivo usluge, nato določimo hitrost prostega prometnega toka, pri čemer upoštevamo štiri faktorje redukcije (širina pasu, oddaljenost bočnih ovir, gostota priključnih ramp in število pasov). Ko

je določena krivulja Hitrost–Pretok, lahko preverimo, če je pretok zadovoljiv za izbrani nivo usluge. Ta pretok lahko privzamemo za maksimalni pretok za dani nivo usluge.

2.4.6 Določevanje nivoja uslug na osnovnem avtocestnem odseku

Osnovni avtocestni odsek je lahko opisan s tremi učinkovitimi merjenji: gostoto (opisana s številom osebnih avtomobilov na kilometer za en vozni pas), hitrostjo (mišljena je povprečna hitrost osebnega vozila) in razmerjem volumen (pretok) – kapaciteta. Vsaka od teh meritev je pokazatelj kakovosti prometnega toka vzdolž osnovnega avtocestnega odseka. Gostota pa je vrednost, ki najbolj oceni nivo usluge, pri čemer so hitrost, gostota in pretok med seboj povezane količine in ob poznavanju dveh, lahko izračunamo tretjo.

V nadaljevanju so navedeni pragovi med različnimi nivoji uslug za osnovni avtocestni odsek po HCM (2000):

Preglednica: Nivoji uslug (HCM 2000, poglavje 23, str. 3)

Table: Level of service criteria (HCM 2000, chapter 23, p. 3)

Nivo usluge	Stopnja gostote (eov/km/pas)
A	0 - 7
B	> 7 – 11
C	> 11 – 16
D	> 16 – 22
E	> 22 – 28
F	> 28

Za vsak nivo usluge je pripadajoča dovoljena gostota nekoliko nižja kot tista napisana v tabeli (npr. gostota za nivo usluge B mora biti manjša od 11 eov/km/pas).

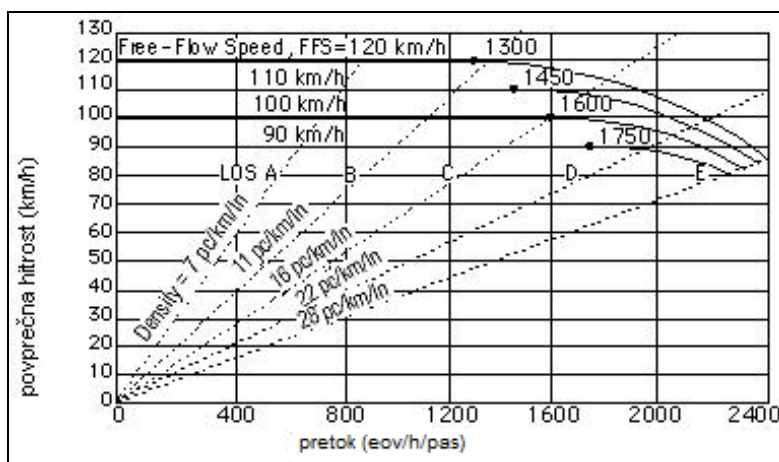
V naslednji preglednici povzeti po HCM-u pa so prikazani nivoji uslug za osnovne avtocestne odseke v odvisnosti od hitrosti prostega prometnega toka (2000).

Preglednica: Nivoji uslug v odvisnosti od hitrosti prostega prometnega toka (HCM 2000, poglavje 23, str. 3)

Table: Level of service criteria (HCM 2000, chapter 23, p. 3)

Kriterij	Nivo usluge				
	A	B	C	D	E
V=120 km/h					
Največja gostota (eov/km/pas)	7	11	16	22	28
Največja hitrost (km/h)	120.0	120.0	114.6	99.6	85.7
Največje razmerje volumen/kapaciteta	0.53	0.55	0.77	0.92	1.00
Največji pretok (eov/h/pas)	840	1320	1840	2200	2400
V=110 km/h					
Največja gostota (eov/km/pas)	7	11	16	22	28
Največja hitrost (km/h)	110.0	110.0	108.5	97.2	83.9
Največje razmerje volumen/kapaciteta	0.33	0.51	0.74	0.91	1.00
Največji pretok (eov/h/pas)	770	1210	1740	2135	2350
V=100 km/h					
Največja gostota (eov/km/pas)	7	11	16	22	28
Največja hitrost (km/h)	100.0	100.0	100.0	93.8	82.1
Največje razmerje volumen/kapaciteta	0.30	0.48	0.70	0.90	1.00
Največji pretok (eov/h/pas)	700	1100	1600	2065	2300
V=90 km/h					
Največja gostota (eov/km/pas)	7	11	16	22	28
Največja hitrost (km/h)	90.0	90.0	90.0	89.1	80.4
Največje razmerje volumen/kapaciteta	0.28	0.44	0.64	0.87	1.00
Največji pretok (eov/h/pas)	630	990	1440	1955	2250

Naslednji grafikon, povzet po HCM-u prikazuje odnos med hitrostjo, pretokom in gostoto za osnovni avtocestni odsek (2000):



Grafikon: Odnos med hitrostjo, pretokom in gostoto za osnovni avtocestni odsek (HCM 2000, poglavje 23, str. 4)

Diagram: Speed, flow and density relation (HCM 2000, chapter 23, p. 4)

Legenda: Free flow speed – hitrost prostega prometnega toka

Density – gostota

LOS (Level Of Service) – nivo usluge

2.4.7 Določevanje nivoja uslug v praksi

Za določitev nivoja uslug sta kot vhodna parametra potrebna hitrost in pretok (ki ga moramo pred tem pretvoriti na ekvivalent pretoka osebnih vozil). Nivo usluge nato razberemo iz diagrama Hitrost–Pretok.

Drug način določevanja nivoja uslug je, da na podlagi pretoka q_p in pripadajoče krivulje v diagramu Hitrost–Pretok, iz ordinatne osi razberemo povprečno hitrost osebnega vozila. Izračunamo gostoto po naslednji enačbi:

$$G = \frac{Q_{EKV}}{V} \quad (2.10)$$

kjer je:

G = gostota (eov/km/pas)

Q_{EKV} = ekvivalentni prometni pretok (eov/h/pas)

V = povprečna hitrost osebnega vozila (km/h)

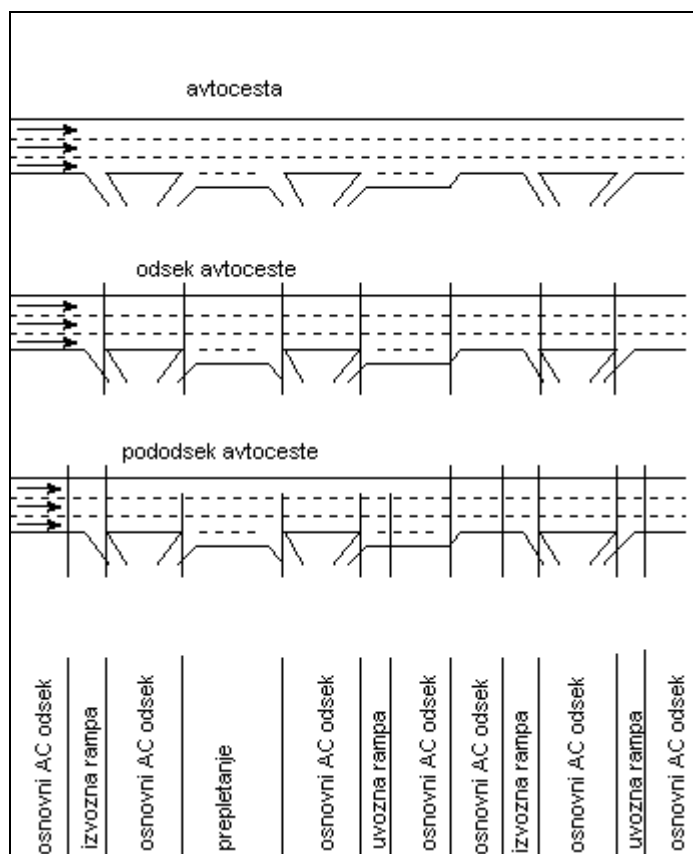
Nivo usluge določimo tako, da izračunano vrednost gostote primerjamo z mejnimi vrednostmi iz zgornje tabele.

2.4.8 Deljenje avtoceste na odseke

Določevanje kapacitete in nivoja uslug zahteva avtocestni odsek, ki ima enotne prometne in cestne karakteristike. Tako se ponavadi vsak opazovani odsek avtoceste začne in konča tam, kjer pride bodisi do spremembe v prometnem toku, ali pa se spremenijo karakteristike same avtoceste. Taka ločnica so lahko uvozne ali izvozne rampe, saj se na njih spremeni volumen prometnega toka, pravtako se ločnica pojavi na začetku ali koncu enostavnega ali sestavljenega naklona. Povsod kjer pride do sprememb, se uvede nov odsek, pri čemer vsakega zase analiziramo ločeno. V nadaljevanju so navedene še ostale ločnice, ki jih moramo upoštevati pri deljenju avtoceste na odseke:

- sprememba v številu pasov,
- sprememba v bočni oddaljenosti na desni bankini,
- sprememba naklona večja od 2 % in več ali konstanten naklon daljši od 1200 m,
- sprememba omejitve hitrosti.

Avtocesta je ponavadi sestavljena iz osnovnih avtocestnih odsekov, iz območij prepletanja in iz priključnih ramp. Območja prepletanja se pojavijo, ko pride do križanja dveh ali več prometnih tokov. Do tega pride ponavadi, ko območju priključevanja sledi območje razdruževanja, ali pa ko uvozni rampi sledi izvozna rampa in sta le-ti povezani s pomožnim pasom. Priključne rampe so območja, ki služijo za vključevanje in izključevanje prometnih tokov na avtocesto. Osnovni avtocestni odsek pa je del avtoceste, ki se nahaja izven območij prepletanja in priključnih ramp. Na sliki 2-2 je prikazano deljenje avtoceste na odseke in pododseke.



Slika 2-2: Deljenje avtoceste na odseke in pododseke

Figure 2-2: Segmenting the highway

3 OPIS SISTEMA ZA NADZOR IN VODENJE PROMETA

3.1 Lokacija

Avtocestni obroč okoli Ljubljane predstavlja enega izmed najbolj obremenjenih avtocestnih odsekov v državi, saj se vanj stekajo vsi kraki obeh glavnih smeri slovenskega avtocestnega križa, poleg tega pa predstavlja tudi obvožno pot okoli glavnega mesta Republike Slovenije. Zaradi svoje dvojne narave prevzema tako tranzitni kot tudi obvozni mestni promet.

Najbolj obremenjen del avtocestnega obroča okoli Ljubljane je zahodna ljubljanska obvoznica, ki po podatkih DRSC iz leta 2007 prevzema prometne obremenitve nad 68.000 vozil (PLDP) na dan. Zahodna ljubljanska obvoznica je odsek avtocestne povezave z oznako A2, ki se razprostira med razcepoma Kozarje in Koseze z vmesnim priključkom Brdo. V razcepu Kozarje se nadaljuje v južno ljubljansko obvoznico (A1) in primorski avtocestni krak (A1), v razcepu Koseze pa v gorenjski avtocestni krak (A2) in v severno ljubljansko obvoznico, ki sodi v kategorijo hitre ceste (H3).

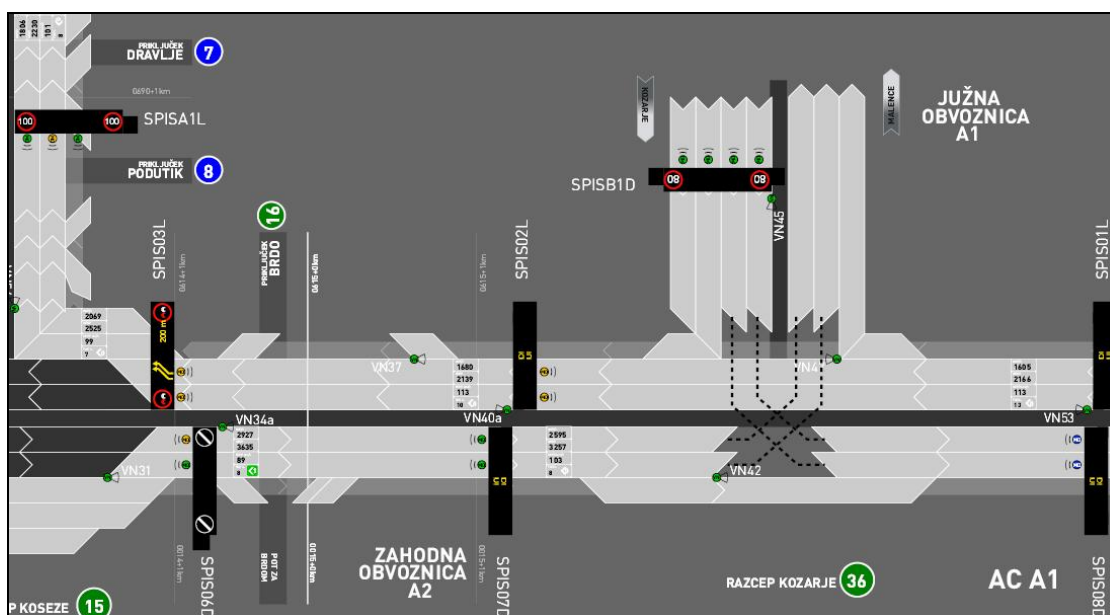
Zaradi velikih prometnih obremenitev, ki vključujejo tako tranzitni kot mestni obvozni promet, sodi zahodna ljubljanska obvoznica med potencialno nevarne avtocestne odseke slovenskega avtocestnega omrežja, na katerih je za zagotavljanje prometne varnosti v potencialno nevarnih situacijah na cesti nameščen sistem za nadzor in vodenje prometa.

Sistem za nadzor in vodenje prometa je razširjen na del gorenjskega avtocestnega kraka od razcepa Koseze do priključka Šmartno in na del severne ljubljanske obvoznice od razcepa Koseze do priključka na Celovško cesto. Razširitev zahteva predor Šentvid, ki sodi med prometno-tehnično najbolj zahtevne objekte na slovenskem avtocestnem omrežju. Za zagotavljanje prometne varnosti v primeru izrednih dogodkov v predoru bo potrebno voznike pravočasno obveščati in promet preusmerjati že na odseku pred predorom. Ob zaprtju predora bo zaradi velike prometne obremenjenosti obravnavanega odseka velika nevarnost nastanka sekundarnih izrednih dogodkov (naleti vozil) in zastojev. Za povečanje prometne varnosti in preprečitev nastanka zastojev bo v primeru zaprtja predora potrebno voznike obveščati in promet voditi po predlaganih obvoznih poteh. Pomemben del obvozne poti bo Celovška cesta,

ki povezuje severno ljubljansko obvoznico z gorenjskim avtocestnim krakom, zato bo obvozna signalizacija z avtocestnega obroča razširjena tudi na to pomembno mestno vpadnico.

Sistem za nadzor in vodenje prometa na zahodni ljubljanski obvoznici in na avtocestnem odseku Ljubljana Brod – razcep Koseze sodi v prvo fazo izgradnje sistema za nadzor in vodenje prometa na avtocestnem obroču okoli Ljubljane. Struktura sistema in še posebej regionalni center za nadzor in vodenje prometa sta zasnovana na tak način, da omogočata nadgradnjo v smislu razširitve sistema na preostale avtocestne odseke, tako da bo zajet celoten avtocestni obroč okoli Ljubljane.

Sistem za nadzor in vodenje prometa na zahodni ljubljanski obvoznici je bil implementiran z namenom vzpostavitve optimalnih prometnih razmer v primeru potencialno nevarnih situacij.



Slika 3-1: Shematski prikaz trase zahodne ljubljanske obvoznice

Figure 3-1: Schematic presentation of the highway section



Slika 3-2: Testna lokacija - SPIS 03L nad voziščem na zahodni ljubljanski obvoznici

Figure 3-2: Test site at VMS 03L

3.2 Splošno o sistemu za nadzor in vodenje prometa

Sistem za nadzor in vodenje prometa na avtocestah in hitrih cestah je inteligen transportni sistem, ki v primeru potencialno nevarnih situacij omogoča vzpostavitev optimalnih prometnih razmer glede na trenutno in predvideno stanje na cesti. V sistemu se nepretrgoma vrši zbiranje in obdelava podatkov ter nadzor nad trenutnim stanjem na cesti. V kritičnih situacijah na cesti se v sistemu izvajajo ukrepi vodenja prometa in informiranja uporabnikov avtocest. Delovanje sistema za nadzor in vodenje prometa na avtocestah in hitrih cestah omogoča več komponent, ki so med seboj povezane v hierarhično strukturo.

Osnovni cilji sistema za nadzor in vodenje prometa na avtocestah in hitrih cestah so sledeči:

- Večja izkoriščenost kapacitete cestnega omrežja. Ustrezno vodenje prometa omogoča večjo izkoriščenost kapacitete cestnega odseka v kritičnih situacijah na cesti.
- Večja prometna varnost v kritičnih situacijah na cesti. Ob upoštevanju ukrepov vodenja prometa in prilagoditvi načina vožnje trenutnim razmeram na cesti, se zmanjša možnost nastanka prometnih nesreč.

- Večje udobje in ekonomičnost potovanj ljudi in blaga. Uporabniki avtocest in hitrih cest na podlagi informacij o trenutnem stanju na cesti lažje načrtujejo potovanje in izberejo optimalno pot.
- Manjša obremenitev okolja. Ukrepi vodenja prometa posredno vplivajo na zmanjšanje negativnih vplivov na okolje,
- Manjši stroški uporabnikov in upravljalca v primeru izrednih dogodkov.

Osnovne funkcije sistema za nadzor in vodenje prometa na avtocestah in hitrih cestah, ki so med seboj interaktivno povezane in potekajo neprekinjeno ali pa se izvajajo le ob izpolnitvi določenih pogojev, so sledeče.

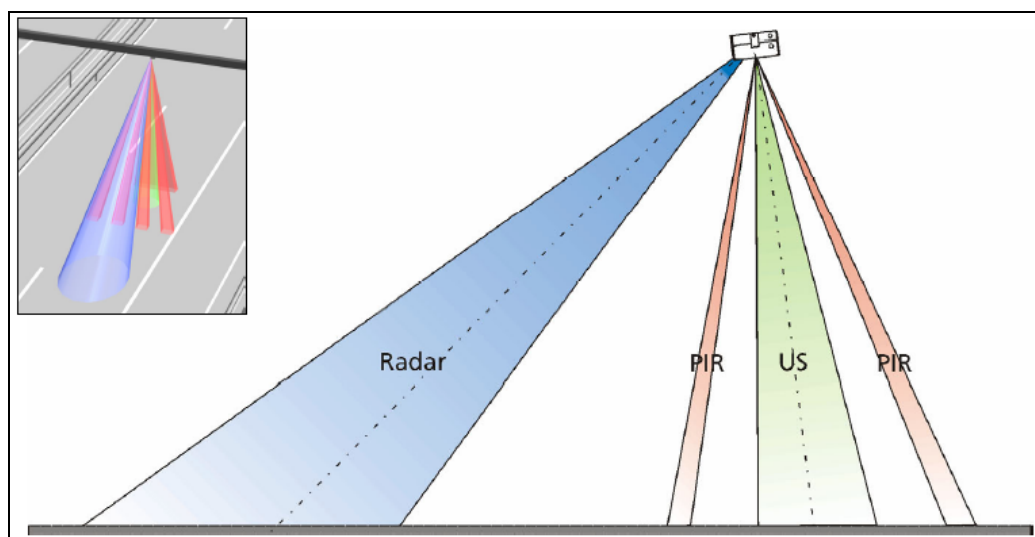
- Zbiranje podatkov: prometni podatki se zbirajo avtomatsko preko merilnikov v realnem času in sicer nepretrgoma v ciklih dolžine določenega merilnega časovnega intervala.
- Obdelava podatkov: pred nadaljnjo obdelavo avtomatsko zbranih prometnih podatkov se izvaja preizkus verodostojnosti podatkov.
- Nadzor nad trenutnim stanjem: omogoča določitev trenutnega prometnega stanja na cesti, ki predstavlja osnovo pri izvajanju ukrepov vodenja prometa.
- Nadzor nad delovanjem sistema: nadzor nad delovanjem celotnega sistema omogočajo obratovalni in sistemski podatki, ki se v sistemu zbirajo avtomatsko. Med obratovalne podatke sodijo podatki o stanju posameznih komponent sistema, ki podajajo način obratovanja določene komponente in vsebujejo tudi javljanja napak v delovanju.
- Vodenje prometa in informiranje uporabnikov avtocest: za vsak sklop je izdelan program ukrepov vodenja prometa in informiranja uporabnikov avtocest, ki se izvajajo ob nastanku kritičnih situacij na cesti.

V nadaljevanju je podrobneje opisan del sistema za nadzor in vodenje prometa, ki zajema, izračunava in obdeluje prometne podatke in na podlagi le-teh izvaja ukrepe vodenja prometa glede na različna prometna stanja.

3.3 Merilniki za zbiranje prometnih podatkov

Zajem prometnih količin se v sistemu za nadzor in vodenje prometa izvaja neprekinjeno s pomočjo mikrovalovnih detektorjev in video detekcijskih kamer. Za potrebe analize je magistrsko delo osredotočeno na podatke iz mikrovalovnih detektorjev, ki s pomočjo treh med seboj ločenih sistemov zagotavljajo visok nivo natančnosti izmerjenih prometnih parametrov:

- Dopplerjev radar detektira spremembo frekvence mikrovalovnega valovanja, ki se odbija od premikajočega vozila. Ta sprememba frekvence je sorazmerna hitrosti vozila in nam poda hitrost za vsako posamezno vozilo.
- Ultrazvočni del operira z neslišno akustično frekvenco velikosti približno 50 kHz. Za detekcijo in klasifikacijo pošilja in sprejema kratke snope ultrazvoka. Čas v katerem se zvok vrne do izvora (čas odmeva), nam da razdaljo med površino vozila in detektorjem. S tem posnamemo profil vozil in jih tako klasificiramo v razrede.
- Infrardeča svetloba zazna premikajoča vozila zaradi spremembe kontrasta glede na vozišče, s čimer sproži ultrazvočno merjenje. Dva zaporedno nameščena žarka infrardeče svetlobe določita smer gibanja vozila, kar nam omogoča detektiranje vožnje v napačno smer.



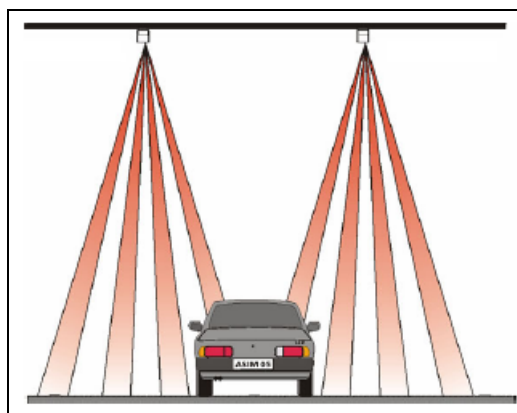
Slika 3-3: Območje detektiranja mikrovalovnih detektorjev

Figure 3-3: Four detection zones of the microwave detector

Mikrovalovni detektorji nam omogočajo:

- klasifikacijo vozil po razredih (v sistemu za nadzor in vodenje prometa ločimo dve klasi: osebna in tovorna vozila),
- štetje vozil po razredih,
- meritev hitrosti posameznega vozila,
- zaznavanje zaustavljenega vozila in zasedenost vozišča,
- določevanje časovnega razmaka med vozili (od odbijača do odbijača),
- zaznavanje vozil, ki vozijo v napačno smer.

Izredno pomembna lastnost sinhronizacije mikrovalovnih detektorjev, nameščenih na istem merilnem mestu je, da avtomatsko zaznajo vozila, ki menjajo pas in jih pravilno pripišejo merilniku nad posameznim pasom. Funkcija omogoča večjo natančnost pri štetju, saj v nasprotnem primeru vozila, ki menjajo pas preštejeta oba detektorja (kar pomeni presežek vozil na odseku, glede na dejansko stanje).



Slika 3-4: Zaznavanje vozil, ki menjajo pas

Figure 3-4: Detection of vehicles travelling between the lanes and lane-changing vehicles

Natančnost delovanja mikrovalovnih detektorjev po proizvajalčevi specifikaciji:

- štetje vozil: $\pm 3 \%$
- merjenje hitrosti: $\pm 3 \%$ ($> 100 \text{ km/h}$); $\pm 3 \text{ km/h}$ ($\leq 100 \text{ km/h}$)
- klasifikacija: glede na nemški standard TLS (Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen)

3.4 Obveščanje voznikov preko spremenljive prometno-informativne signalizacije

Za obveščanje voznikov o stanju na cesti se v sistemu za nadzor in vodenje prometa uporabljajo grafični prikazovalniki spremenljive prometno-informativne signalizacije (SPIS), kamor spadajo portali (SPIS), polportali (PP), obcestne table (OCT) in spremenljiva kažipotna signalizacija (SKS).

Za vodenje prometa in obveščanje voznikov glede na različna prometna stanja na avtocestnem odseku se uporablja spremenljiva prometno-informativna signalizacija (SPIS), ki omogoča prikaz programov prometnih vsebin, ki se aktivirajo v okviru ukrepov vodenja prometa in informiranja voznikov glede na prometno stanje. Portali SPIS so sestavljeni iz dveh stranskih polno barvnih in polnografičnih delov, na katerih se prikazujejo prometni znaki in iz osrednjega enobarvnega polnografičnega dela, kjer se voznikom v pisni obliki posredujejo prometno-potovalne informacije.

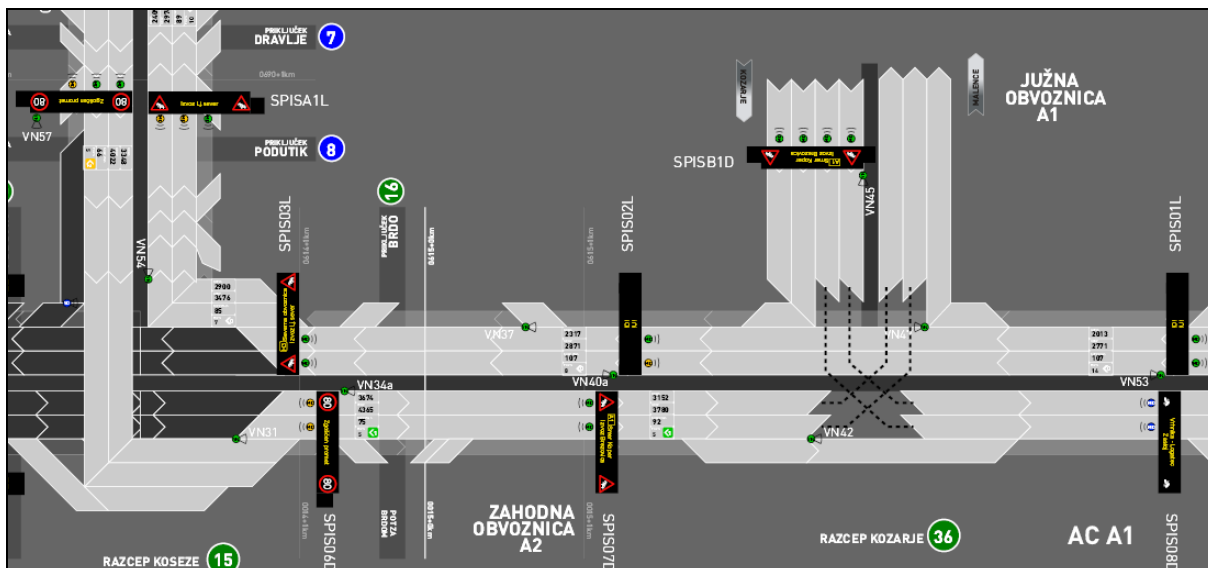


Slika 3-5: Grafični prikazovalnik spremenljive prometno-informativne signalizacije (SPIS)

Figure 3-5: Variable Message Sign (VMS)

Za uspešno vodenje prometa in obveščanje voznikov o razmerah na avtocestnem odseku je potrebno postopno umirjanje prometa in zmanjševanje hitrosti, kar dosežemo z podajanjem prometnih vsebin na več zaporednih grafičnih prikazovalnikov hkrati. S tem vozniki

informacije dobijo na zaporednih mestih obveščanja, zmanjšana pa je tudi možnost nastanka naleta, do česar lahko pride pri nenadnem zmanjševanju hitrosti.



Slika 3-6: Vodenje prometa in podajanje prometnih vsebin na več zaporednih grafičnih prikazovalnikov

Figure 3-6: Traffic management with information provided via VMSs

Operater v nadzornem centru sistema za nadzor in vodenje prometa preko grafičnega vmesnika podaja prometne vsebine na grafične prikazovalnike SPIS bodisi iz pre-definirane forme ali pa kreira poljubne vsebine iz vnaprej določenega nabora znakov. Operaterju so pravitako na voljo že vnaprej pripravljeni scenariji programov prometnih vsebin, ki omogočajo vnos prometnih vsebin za določeno stanje na več grafičnih prikazovalnikov hkrati.

Posameznemu prikazovalniku SPIS je pripisan eden ali več pododsekov z merilniki za zbiranje prometnih podatkov, katerih podatki so odločilni pri določevanju prometnih stanj, v katerih se izvaja vodenje prometa. Določevanje prometnih stanj v sistemu za nadzor in vodenje prometa poteka avtomatsko, kar omogoča avtomatiziranje podajanja prometnih vsebin, vezanih na različna prometna stanja, na portale SPIS.

3.5 Opis funkcij sistema

Sistem za nadzor in vodenje prometa na zahodni ljubljanski obvoznici v realnem času zbira prometne podatke. Na podlagi podatkov, obdelanih v centru sistema za nadzor in vodenje prometa, se vrši nadzor nad prometnim stanjem na obravnavanem avtocestnem odseku. Programska oprema v nadzornem centru je tehnološko izredno dovršena, napredna in skalabilna.

3.5.1 Zbiranje prometnih podatkov

Zbiranje prometnih podatkov poteka preko merilnikov za zbiranje prometnih podatkov (mikrovalovni detektorji in video detekcijske kamere), ki so nameščeni na merilnih mestih vzdolž obravnavanega avtocestnega odseka.

Prometni podatki, ki se zbirajo v sistemu za nadzor in vodenje prometa preko naprav za detektiranje so:

- prometni pretok osebnih vozil (voz/T),
- prometni pretok tovornih vozil (voz/T),
- trenutna izmerjena hitrost vozila (km/h),
- časovna zasedenost merilnega območja pod detekcijsko napravo (s),
- časovni razmak med dvema zaporednimi vozili (s),
- alarm: stoječe vozilo,
- alarm: vožnja v nasprotno smer.

Preglednica 3.1: Primer podatkov pridobljenih iz mikrovalovnega detektorja; testiranje na zahodni ljubljanski obvoznici, avgust 2004

Table 3.1: Traffic data from the microwave detectors; test site Ljubljana west ring, august 2004

addr;	time;	v ;	l ;	cl;	tOcc.;	tGap;	counter
1;	9:23:10;	81;	;	4;	0.76;	3.30;	133;
1;	9:23:10;	82;	;	1;	0.17;	0.79;	134;
1;	9:23:20;	74;	;	3;	0.38;	8.80;	135;
1;	9:23:23;	72;	;	1;	0.21;	2.53;	136;
1;	9:23:27;	80;	;	1;	0.30;	3.05;	137;
1;	9:23:27;	75;	;	1;	0.17;	0.68;	138;
1;	9:23:30;	71;	;	1;	0.21;	2.17;	139;
1;	9:23:35;	111;	;	1;	0.17;	4.54;	140;
1;	9:23:41;	106;	;	1;	0.13;	5.76;	141;
1;	9:23:45;	109;	;	1;	0.13;	3.94;	142;
1;	9:23:47;	119;	;	1;	0.13;	1.96;	143;
1;	9:23:51;	110;	;	1;	0.13;	3.82;	144;
1;	9:23:53;	85;	;	3;	0.47;	1.13;	145;

Prometni podatki se v sistemu za nadzor in vodenje prometa zbirajo za časovni interval T v realnem času z maksimalno zakasnitvijo T . Dolžina merilnega časovnega intervala T je nastavljen parameter, ki ga je mogoče spreminjati v območju od 10 s do 5 min. Začetna vrednost je 1 min. Parameter je nastavljen preko programske opreme regionalnega centra za nadzor in vodenje prometa.

V primeru izpada komunikacije z merilnikom prometnih podatkov ali napake na detektorju, je operater v nadzornem centru preko shematskega vmesnika obveščen o izpadu prometnih podatkov, kar mu omogoča, da preko slike iz video nadzornega sistema vseeno sprejema in uveljavlja ukrepe vodenja prometa glede na doseženo stopnjo prometnega stanja.

3.5.2 Obdelava prometnih podatkov

V fazi obdelave prometnih podatkov gredo vsi, preko detektorjev avtomatsko pridobljeni prometni podatki, skozi proceduro predstavljeno v nadaljevanju, kjer se preveri njihovo verodostojnost in izračuna količine, ki jih je nemogoče direktno izmeriti. Obdelava avtomatsko zbranih prometnih podatkov poteka v sledečem obsegu:

3.5.2.1 Preizkus veljavnosti prometnih podatkov

V sistemu za nadzor in vodenje prometa se za prometne podatke, pridobljene avtomatsko iz merilnikov za detektiranje prometa izvaja preizkus veljavnosti, ki omogoča prepoznavo neveljavnih podatkov. Preizkus veljavnosti z upoštevanjem dopustnega merilnega območja se izvaja za prometne podatke pridobljene iz mikrovalovnih detektorjev in iz video detekcijskih kamer. Namen preizkusa veljavnosti prometnih podatkov je izločiti neveljavne prometne podatke. Dopustna merilna območja so določena z mejnimi vrednostmi, ki so nastavljivi parametri. V primeru odstopanja izmerjene vrednosti glede na dopustno merilno območje je podatek označen kot neveljaven.

Primer: Mikrovalovni detektor izmeri hitrost osebnega vozila 256 km/h, dopustno merilno območje za hitrost osebnih vozil je med 0 km/h in 240 km/h, zato je podatek označen kot neveljaven.

3.5.2.2 Izračuni prometnih količin

V sistemu za nadzor in vodenje prometa se v merilnem časovnem intervalu T izračunavajo prometne količine, ki jih je nemogoče direktno meriti. Sem spada izračun prometnih podatkov glede na prometni pas (npr. gostota prometnega toka, povprečne hitrosti osebnih in tovornih vozil, delež tovornih vozil, standardni odklon hitrosti), izračun podatkov glede na merilno mesto (sestavljeno iz večih sosednjih voznih pasov), glajenje prometnih količin in prognoza trenda ter izračun prometnih podatkov za potrebe statistične analize in izdelave standardnih poročil.

3.5.2.2.1 Izračuni prometnih količin glede na prometni pas

Merilniki za zbiranje prometnih podatkov zbirajo prometne podatke za vsak prometni pas. Mikrovalovni detektorji so nameščeni na konstrukciji (portali SPIS) nad posameznim prometnim pasom.

V sistemu za nadzor in vodenje prometa se za vsak merilni časovni interval T glede na prometni pas $j=1\dots n$, vsakega merilnega mesta $i=1\dots m$, izračunavajo naslednje prometne količine:

Izračun povprečne hitrosti V

- Izračun povprečne hitrost osebnih vozil V_{OV}

$$V_{OV}(i, j) = \frac{\sum V_{OV(t)}(i, j)}{Q_{OV}(i, j)} \quad ; \text{ če } Q_{OV}(i, j) = 0, \text{ potem } V_{OV}(i, j) = 0 \quad (3.1)$$

kjer je:

$V_{OV}(i, j)$ = povprečna hitrost osebnih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

$V_{OV(t)}(i, j)$ = trenutna izmerjena hitrost osebnega vozila na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

$Q_{OV}(i, j)$ = pretok osebnih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (voz/h)

- Izračun povprečne hitrost tovornih vozil V_{TV}

$$V_{TV}(i, j) = \frac{\sum V_{TV(t)}(i, j)}{Q_{TV}(i, j)} \quad ; \text{ če } Q_{TV}(i, j) = 0, \text{ potem } V_{TV}(i, j) = 0 \quad (3.2)$$

kjer je:

$V_{TV}(i, j)$ = povprečna hitrost tovornih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

$V_{TV(t)}(i, j)$ = trenutna izmerjena hitrost tovornega vozila na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

$Q_{TV}(i, j)$ = pretok tovornih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (voz/h)

- Izračun skupne povprečne hitrosti V_{SK}

$$V_{SK}(i, j) = \frac{\sum V_{OV(t)}(i, j) + \sum V_{TV(t)}(i, j)}{Q_{OV}(i, j) + Q_{TV}(i, j)} \quad ; \text{ če } Q_{OV}(i, j) + Q_{TV}(i, j) = 0, \text{ potem } V_{SK}(i, j) = 0 \quad (3.3)$$

kjer je:

$V_{SK}(i, j)$ = skupna povprečna hitrost na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

$V_{OV(t)}(i, j)$ = trenutna izmerjena hitrost osebnega vozila na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

$V_{TV(t)}(i, j)$ = trenutna izmerjena hitrost tovornega vozila na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

$Q_{OV}(i, j)$ = pretok osebnih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (voz/h)

$Q_{TV}(i, j)$ = pretok tovornih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (voz/h)

Izračun deleža tovornih vozil D_{TV}

$$D_{TV}(i, j) = \left[\frac{Q_{TV}(i, j)}{Q_{OV}(i, j) + Q_{TV}(i, j)} \right] * 100 \quad ; \text{ če } Q_{OV}(i, j) + Q_{TV}(i, j) = 0, \text{ potem } D_{TV}(i, j) = 0 \quad (3.4)$$

kjer je:

$D_{TV}(i, j)$ = delež tovornih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (%)

$Q_{OV}(i, j)$ = pretok osebnih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (voz/h)

$Q_{TV}(i, j)$ = pretok tovornih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (voz/h)

Izračun standardnega odklona hitrosti O_{SK}

$$O_{SK}(i, j) = \sqrt{\frac{\sum [V_{OV(t)}(i, j) - V_{SK}(i, j)]^2 + \sum [V_{TV(t)}(i, j) - V_{SK}(i, j)]^2}{[Q_{OV}(i, j) + Q_{TV}(i, j)] - 1}} \quad (3.5)$$

če $Q_{OV}(i, j) + Q_{TV}(i, j) = 0$ ali 1, potem $O_{SK}(i, j) = 0$

kjer je:

$O_{SK}(i,j)$ = standardni odklon hitrosti na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

$V_{SK}(i,j)$ = skupna povprečna hitrost na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

$V_{OV(i)}(i,j)$ = trenutna izmerjena hitrost osebnega vozila na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

$V_{TV(i)}(i,j)$ = trenutna izmerjena hitrost tovornega vozila na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

$Q_{OV}(i,j)$ = pretok osebnih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (voz/h)

$Q_{TV}(i,j)$ = pretok tovornih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (voz/h)

Izračun ekvivalentnega prometnega pretoka Q_{EKV}

$$Q_{EKV}(i,j) = \frac{Q_{OV}(i,j) + Q_{TV}(i,j)}{f_{UK} * N * f_{TV} * f_p} \quad (3.6)$$

kjer je:

$Q_{EKV}(i,j)$ = ekvivalent pretoka za osebna vozila na prometnem pasu j merilnega mesta i (eov/h/pas)

$Q_{OV}(i,j)$ = pretok osebnih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (voz/h)

$Q_{TV}(i,j)$ = pretok tovornih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (voz/h)

f_{UK} = faktor urne konice - nastavljen parameter (začetna vrednost $f_{UK} = 0.95$)

N = število pasov v eni smeri

f_p = faktor tipa voznikov – nastavljen parameter (začetna vrednost $f_p = 0.95$)

f_{TV} = faktor težkih tovornih vozil

$$f_{TV} = \frac{1}{[1 + D_{TV}(e_{TV} - 1)]} \quad (3.7)$$

kjer je:

f_{TV} = faktor težkih tovornih vozil

$D_{TV}(i,j)$ = delež tovornih vozil (%)

e_{TV} = ekvivalent osebnih vozil za tovorna vozila – nastavljen parameter (vrednost za ravninski avtocestni odsek do naklona vozišča 3% $e_{TV} = 1.5$)

Izračun gostote prometnega toka G

$$G(i, j) = \begin{cases} \frac{Q_{EKV}(i, j) * (60 / T)}{V_{SK}(i, j)} & ; \text{če } V_{SK}(i, j) \neq 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} G(i, j) &= G_{max}(i, j) & ; \text{če } V_{SK}(i, j) = 0 \text{ in merilnik detektira pojav kolone stoječih vozil} \\ G(i, j) &= 0 & ; \text{sicer, če } V_{SK}(i, j) = 0 \end{aligned} \tag{3.8}$$

kjer je:

$G(i, j)$ = gostota prometnega toka na prometnem pasu j merilnega mesta i (eov/km/pas)

$Q_{EKV}(i, j)$ = ekvivalent pretoka za osebna vozila na prometnem pasu j merilnega mesta i (eov/h/pas)

T = merilni časovni interval označen v minutah – nastavljen parameter (začetna vrednost $T = 1$ min)

$V_{SK}(i, j)$ = skupna povprečna hitrost na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

$G_{max}(i, j)$ = maksimalna gostota na odseku dolžine 1 km – nastavljen parameter (eov/km/pas)

	info	prometni podatki	lastnosti det
Osebna vozila - števec prevozov	22 voz/min		
Tovorna vozila - števec prevozov	2 voz/min		
Vsa vozila - števec prevozov	24 voz/min		
Osebna vozila - povprečna hitrost	85 km/h		
Tovorna vozila - povprečna hitrost	81 km/h		
Vsa vozila - povprečna hitrost	85 km/h		
Hitrost zadnjega prevoza	101 km/h		
Zasedenost	8 %		
Povprečni časovni razmak med vozili	2.25 s		
Delež tovornih vozil	8 %		
Standardni odklon hitrosti	10 km/h		
Ekvivalentni prometni pretok	28 eov/min		
Gostota prometnega toka	20 eov/km		

Slika 3-7: Prikaz minutnih vrednosti prometnih podatkov za prometni pas iz mikrovalovnega detektorja

Figure 3-7: Traffic data from microwave detector as shown on SCADA

3.5.2.2.2 Izračuni prometnih količin glede na merilno mesto

Merilno mesto predstavlja presek ceste v dani smeri in je sestavljeno iz enega ali večih prometnih pasov (v primeru dvopasovne avtoceste je merilno mesto sestavljeno iz dveh prometnih pasov). Podatke za merilno mesto dobimo z agregiranjem ali povprečenjem podatkov iz posameznih sosednjih prometnih pasov na lokaciji merilnega mesta. Podatki z merilnega mesta nam dajo podatke o stanju na pododseku, ki se razteza med dvema merilnima mestoma.

V sistemu za nadzor in vodenje prometa se za vsak časovni interval T na podlagi vseh prometnih pasov $j=1\dots n$, vsakega merilnega mesta $i=1\dots m$, izračunavajo naslednje prometne količine:

Izračun prometnih pretokov $Q_{(s)}$

- Izračun prometnega pretoka osebnih vozil $Q_{OV(s)}$

$$Q_{OV(s)}(i) = \left[\sum_{j=1}^n Q_{OV}(i, j) \right] * 60 / T \quad (3.9)$$

kjer je:

$Q_{OV(s)}(i)$ = skupen prometni pretok osebnih vozil na merilnem mestu i (voz/h)

$Q_{OV}(i, j)$ = pretok osebnih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (voz/h)

T = merilni časovni interval označen v minutah – nastavljen parameter (začetna vrednost $T = 1$ min)

- Izračun prometnega pretoka tovornih vozil $Q_{TV(s)}$

$$Q_{TV(s)}(i) = \left[\sum_{j=1}^n Q_{TV}(i, j) \right] * 60 / T \quad (3.10)$$

kjer je:

$Q_{TV(s)}(i)$ = skupen prometni pretok tovornih vozil na merilnem mestu i (voz/h)

$Q_{TV}(i,j)$ = pretok tovornih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (voz/h)

T = merilni časovni interval označen v minutah – nastavljen parameter (začetna vrednost $T = 1$ min)

- Izračun ekvivalentnega prometnega pretoka $Q_{EKV(s)}$

$$Q_{EKV(s)}(i) = \left[\sum_{j=1}^n Q_{EKV}(i, j) \right] * 60 / T \quad (3.11)$$

kjer je:

$Q_{EKV(s)}(i)$ = ekvivalenten prometni pretok na merilnem mestu i (eov/h)

$Q_{EKV}(i,j)$ = ekvivalenten prometni pretok na prometnem pasu j merilnega mesta i (eov/h)

T = merilni časovni interval označen v minutah – nastavljen parameter (začetna vrednost $T = 1$ min)

Izračun povprečnih hitrosti $V_{(s)}$

- Izračun povprečne hitrosti osebnih vozil $V_{OV(s)}$

$$V_{OV(s)}(i) = \frac{\sum_{j=1}^n V_{OV}(i, j)}{N} \quad (3.12)$$

kjer je:

$V_{OV(s)}(i)$ = povprečna hitrost osebnih vozil na merilnem mestu i (km/h)

$V_{OV}(i,j)$ = povprečna hitrost osebnih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

N = število pasov v eni smeri, na katerih je $V_{OV}(i,j) > 0$

- Izračun povprečne hitrosti tovornih vozil $V_{TV(s)}$

$$V_{TV(s)}(i) = \frac{\sum_{j=1}^n V_{TV}(i, j)}{N} \quad (3.13)$$

kjer je:

$V_{TV(s)}(i)$ = povprečna hitrost tovornih vozil na merilnem mestu i (km/h)

$V_{TV}(i, j)$ = povprečna hitrost tovornih vozil na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

N = število pasov v eni smeri, na katerih je $V_{TV}(i, j) > 0$

- Izračun skupne povprečne hitrosti $V_{SK(s)}$

$$V_{SK(s)}(i) = \frac{\sum_{j=1}^n V_{SK}(i, j)}{N} \quad (3.14)$$

kjer je:

$V_{SK(s)}(i)$ = skupna povprečna hitrost na merilnem mestu i (km/h)

$V_{SK}(i, j)$ = skupna povprečna hitrost na prometnem pasu j merilnega mesta i (km/h)

N = število pasov v eni smeri, na katerih je $V_{SK}(i, j) > 0$

Izračun deleža tovornih vozil $D_{TV(s)}$

$$D_{TV(s)}(i) = \left[\frac{Q_{TV(s)}(i)}{Q_{OV(s)}(i) + Q_{TV(s)}(i)} \right] * 100 \quad ; \text{ če } Q_{OV(s)}(i) + Q_{TV(s)}(i) = 0, \text{ potem } D_{TV}(i) = 0 \quad (3.15)$$

kjer je:

$D_{TV(s)}(i)$ = skupen delež tovornih vozil na merilnem mestu i (%)

$Q_{OV(s)}(i)$ = skupen prometni pretok osebnih vozil na merilnem mestu i (voz/h)

$Q_{TV(s)}(i)$ = skupen prometni pretok tovornih vozil na merilnem mestu i (voz/h)

Izračun zasedenosti merilnega območja $Z_{(s)}$

$$Z_{(s)}(i) = \frac{\sum_{j=1}^n Z(i, j)}{N} \quad (3.16)$$

kjer je:

$Z_{(s)}(i)$ = zasedenost merilnega območja na merilnem mestu i (%)

$Z(i, j)$ = zasednost merilnega območja na prometnem pasu j merilnega mesta i (%)

N = število pasov v eni smeri

Izračun gostote prometnega toka $G_{(s)}$

$$G_{(s)}(i) = \begin{cases} \frac{Q_{EKV(s)}(i)}{V_{SK(s)}(i)} & ; \text{če } V_{SK(s)}(i) \neq 0 \end{cases}$$

$G_{(s)}(i) = G_{max(s)}(i)$; če $V_{SK(s)}(i) = 0$ in merilnik detektira pojav kolone stoječih vozil

$G_{(s)}(i) = 0$; sicer, če $V_{SK(s)}(i) = 0$ (3.17)

kjer je:

$G_s(i)$ = gostota prometnega toka na merilnem mestu i (eov/km)

$Q_{EKV(s)}(i)$ = ekvivalenten prometni pretok na merilnem mestu i (eov/h)

$V_{SK(s)}(i)$ = skupna povprečna hitrost na merilnem mestu i (km/h)

$G_{max(s)}(i)$ = maksimalna gostota na odseku dolžine 1 km – nastavljen parameter (eov/km)

Skupen pretok osebnih vozil	2524 voz/h
Skupen pretok tovornih vozil	149 voz/h
Povprečna hitrost osebnih vozil	92 km/h
Povprečna hitrost tovornih vozil	78 km/h
Povprečna hitrost vseh vozil	92 km/h
Računski prometni pretok	3032 eov/h
Računska lokalna gostota prometnega toka	35 eov/km
Povprečna zasedenost	6 %
Delež tovornih vozil	6 %
Stopnja prometnega stanja	PS0

Slika 3-8: Prikaz prometnih podatkov za merilno mesto

Figure 3-8: Traffic data on the subsection

3.5.2.3 Glajenje prometnih količin in prognoza trenda

Za izključitev dejavnikov, ki bi lahko povzročili kratkotrajne motnje v prometnem toku, se v sistemu za nadzor in vodenje prometa izvaja glajenje prometnih količin. V nadaljevanju opisana ekstrapolacijska metoda »drsečih sredin z dodanim drsečim trendom« omogoča skrajšanje časovnega obdobja, po preteku katerega sistem reagira z uvedbo določenega ukrepa vodenja prometa.

Glajenje prometnih količin

$$P_n = \alpha(T) * P_i + (1 - \alpha(T)) * P_s \quad (3.18)$$

kjer je:

P_n = zglajena prometna količina

P_i = izmerjena (izračunana) prometna količina

P_s = zglajena prometna količina v predhodnem merilnem časovnem intervalu (začetna vrednost je P_{izm} – izmerjena ali izračunana prometna količina v prvem merilnem časovnem intervalu)

$\alpha(T)$ = faktor glajenja povprečne vrednosti za merilni časovni interval dolžine T – nastavljen parameter (začetna vrednost $\alpha(T) = 0.25$)

Prognoza trenda

$$P_p = P_n + \Delta P_n \quad (3.19)$$

$$\Delta P_n = \beta(T) * (P_i - P_s) + (1 - \beta(T)) * \Delta P_s \quad (3.20)$$

kjer je:

P_p = prognostična prometna količina

P_n = zglajena prometna količina

ΔP_n = prognostična diferenca

P_i = izmerjena (izračunana) prometna količina

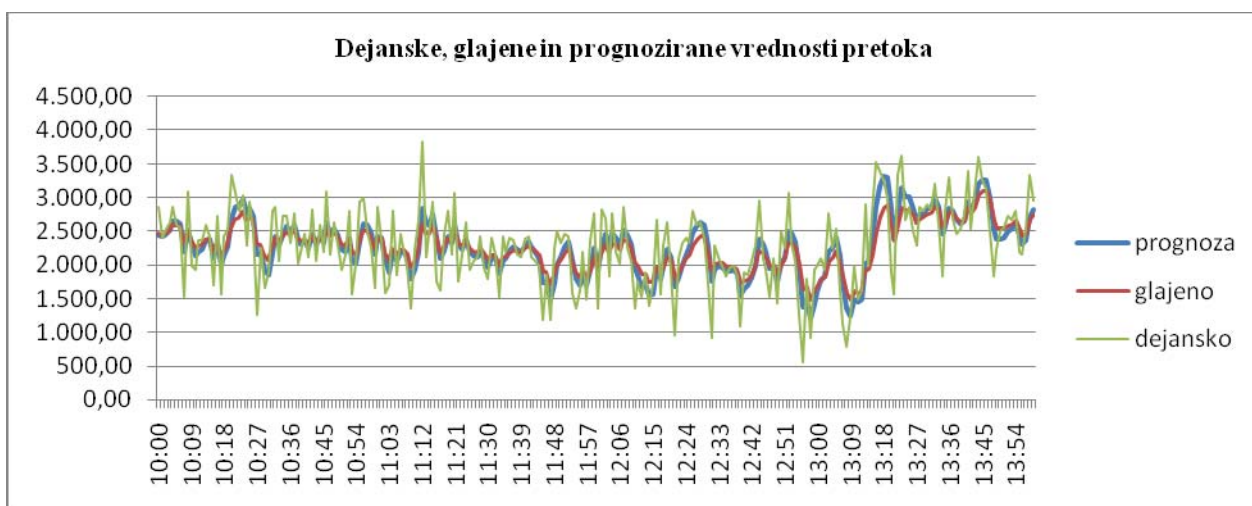
P_s = zglajena prometna količina v predhodnem merilnem časovnem intervalu (začetna vrednost je P_{izm} – izmerjena ali izračunana prometna količina v prvem merilnem časovnem intervalu)

ΔP_s = stara prognostična diferenca (začetna vrednost je 0)

$\beta(T)$ = faktor glajenja trenda za merilni časovni interval dolžine T– nastavljiv parameter (začetna vrednost $\beta(T) = 0.15$)

V sistemu za nadzor in vodenje prometa se za posamezno merilno mesto prognozirajo naslednji prometni parametri (grafikon 3.1):

- skupna povprečna hitrost,
- ekvivalentni pretok,
- gostota.



Grafikon 3-1: Primerjava dejanske, glajene in prognozirane vrednosti pretoka

Diagram 3-1: Actual, smoothed and forecasted values of traffic flow

3.5.2.4 Izračuni prometnih količin za statistično analizo

Za potrebe izvajanja statističnih analiz in spremljanja trendov prometnih tokov je v sistemu za nadzor in vodenje prometa na voljo vmesnik za izdelavo poročil. Aplikacija ponuja možnost izdelave standardnih, vnaprej pripravljenih poročil. Prometna poročila prikazujejo prometne podatke v tabelarični obliki in v obliki grafa.

Vmesnik za poročila uporabniku omogoča izbiro časovnega obdobja želenega poročila (od-do) in pa časovni interval (minutni interval, 15-minutni interval, urni interval, dnevni interval...).

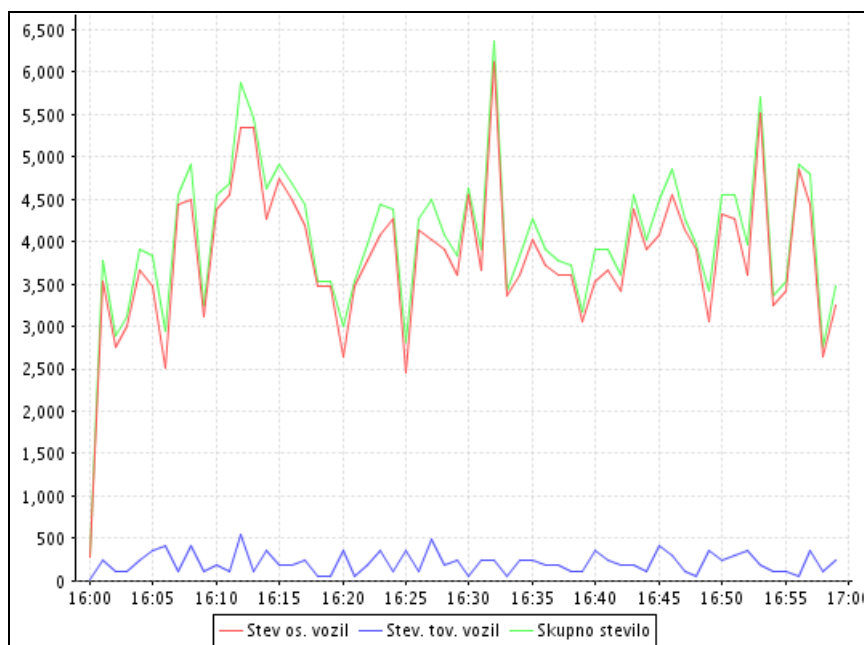
V poročilih (preglednica 3.2 in grafikon 3-2) je zajet prikaz naslednjih prometnih podatkov za vsako posamezno merilno mesto:

- Osebna vozila - števec prevozov,
- Tovorna vozila - števec prevozov,
- Osebna vozila - povprečna hitrost,
- Tovorna vozila - povprečna hitrost,
- Vsa vozila - povprečna hitrost,
- Časovna zasedenost merilnega območja,
- Povprečni časovni razmak med vozili,
- Delež tovornih vozil,
- Standardni odklon hitrosti,
- Skupni prometni pretok,
- Ekvivalentni prometni pretok,
- Gostota prometnega toka,
- Stopnja prometnega stanja (PS),
- Velik delež tovornih vozil ob velikih prometnih obremenitvah.

Preglednica 3.2: Izpis prometnih parametrov za potrebe poročil

Table 3.2: Traffic data report

 Prometni podatki 																	
Merilno mesto		MD-01L															
Časovno obdobje	Q_OV	Q_TV	Q_SK	V_OV	V_TV	V_SK	Z	T_V	D_TV	O_SK	G	Q_EK	PS	VDTV	G_P	QOV	VSKP
14.05.2008 06.01	720	180	900	111	92	109	3	8	18	13	5	1,080	PS0	DA	53	377	6
14.05.2008 06.02	1,200	180	1,380	113	86	111	3	5	11	13	7	1,620	PS0	DA	53	456	6
14.05.2008 06.03	1,380	360	1,740	107	87	105	6	3	20	26	10	2,100	PS0	DA	53	548	6
14.05.2008 06.04	1,140	120	1,260	113	80	111	3	5	7	14	6	1,440	PS0	DA	54	563	7
14.05.2008 06.05	900	300	1,200	112	90	111	4	8	17	15	7	1,440	PS0	DA	54	528	7
14.05.2008 06.06	960	300	1,260	109	99	106	4	5	23	10	7	1,560	PS0	DA	53	511	7
14.05.2008 06.07	840	240	1,080	115	87	110	3	6	20	14	6	1,320	PS0	DA	54	478	7
14.05.2008 06.08	1,920	180	2,100	110	89	110	5	3	8	18	11	2,400	PS0	DA	54	670	7
14.05.2008 06.09	1,740	120	1,860	112	89	111	4	3	6	11	9	2,100	PS0	DA	54	766	7
14.05.2008 06.10	1,260	240	1,500	109	90	108	5	4	14	13	8	1,740	PS0	DA	54	734	8
14.05.2008 06.11	1,860	300	2,160	102	81	100	7	2	14	14	13	2,520	PS0	DA	52	840	8
14.05.2008 06.12	1,500	300	1,800	112	87	109	5	4	19	15	9	2,160	PS0	DA	53	830	9
14.05.2008 06.13	2,400	180	2,580	101	86	100	7	2	7	14	14	2,940	PS0	DA	52	1,005	10
14.05.2008 06.14	1,560	240	1,800	111	87	109	5	3	13	17	10	2,100	PS0	DA	52	951	10
14.05.2008 06.15	1,500	180	1,680	113	88	111	4	4	10	12	9	1,920	PS0	DA	53	899	10
14.05.2008 06.16	1,320	240	1,560	110	92	109	4	4	15	12	8	1,860	PS0	DA	54	828	10
14.05.2008 06.17	1,680	360	2,040	107	79	104	7	3	20	14	12	2,400	PS0	DA	53	844	10
14.05.2008 06.18	2,100	480	2,580	104	87	100	8	2	21	12	15	3,120	PS0	DA	52	939	11
14.05.2008 06.19	2,100	180	2,280	106	99	105	6	3	8	10	12	2,580	PS0	DA	52	1,006	11
14.05.2008 06.20	1,440	180	1,620	109	85	108	5	4	9	16	9	1,860	PS0	DA	52	917	11



Grafikon 3-2: Prikaz prometnih parametrov (pretok osebnih vozil, pretok tovornih vozil in skupni pretok) v grafični obliki za potrebe poročil

Diagram 3-2: Traffic flow report

3.5.3 Nadzor nad prometnim stanjem na cesti

Na podlagi predhodno opisanih izračunov prometnih količin glede na prometni pas in merilno mesto, se v sistemu za nadzor in vodenje prometa izvaja nadzor nad prometnim stanjem preko določanja:

- stopnje prometnega stanja,
- pojava zastoja,
- pojava nemira v prometnem toku,
- velikega deleža tovornega prometa pri velikih prometnih obrmenitvah.

V nadaljevanju je podrobneje opisana določitev stopnje prometnega stanja in pojav zastoja.

Posameznemu prikazovalniku SPIS je pripisan eden ali več pododsekov z merilniki za zbiranje prometnih podatkov, katerih podatki so odločilni pri določevanju prometnih stanj, v katerih se izvaja vodenje prometa.

3.5.3.1 Fundamentalni diagram prometnega toka

Fundamentalni diagram prometnega toka je diagram, ki podaja relacije med prometnim pretokom, hitrostjo prometnega toka in gostoto. Fundamentalni diagram predstavlja zelo pomemben element pri določevanju kapacitete avtocestnega omrežja, določevanju prometnih stanj in hitrostnih omejitev.

Osnovne ugotovitve:

- Gostota prometnega toka in hitrost sta med seboj povezani: več kot je vozil na avtocestnem odseku, manjša je njihova hitrost.
- Za preprečitev pojava zastoja in za zagotovitev stabilnega prometnega stanja, mora biti število vozil, ki vzstopajo na pododsek manjše ali enako številu vozil, ki izstopajo iz pododseka, v istem časovnem trenutku.
- Ob dosegu mejne vrednosti gostote in pripadajoče mejne vrednosti hitrosti, bo prometno stanje prešlo iz nasičenega v zgoščeno.

Fundamentalni diagram ima velik pomen pri določevanju in kalibriranju mejnih vrednosti v sistemu za nadzor in vodenje proemta.

3.5.3.1.1 Klasični fundamentalni diagram prometnega toka

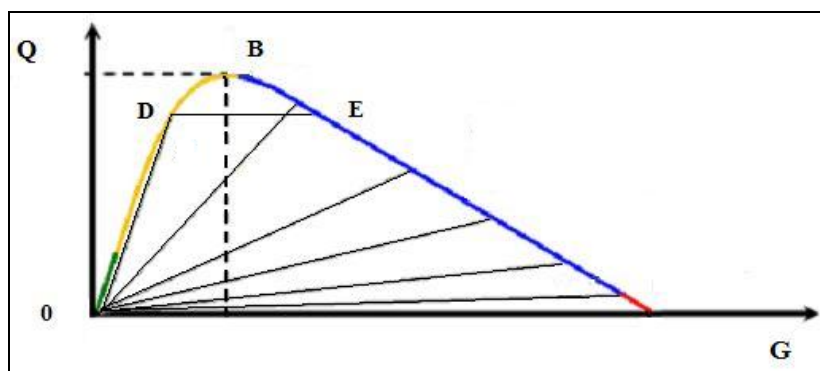
Odnos med pretokom in gostoto, gostoto in hitrostjo, ter hitrostjo in pretokom, lahko ponazorimo v obliki krivulj. Te krivulje imenujemo fundamentalni diagrami prometnega toka.

Grafikon Pretok-Gostota

Tako pretok kot gostota prometnega toka se spreminjata glede na čas in lokacijo. Odnos med gostoto in pripadajočim prometnim tokom na avtocestnem odseku je predstavljen z enim izmed treh fundamentalnih diagramov prometnega toka.

Osnovne karakteristike idealnega odnosa med pretokom in gostoto so:

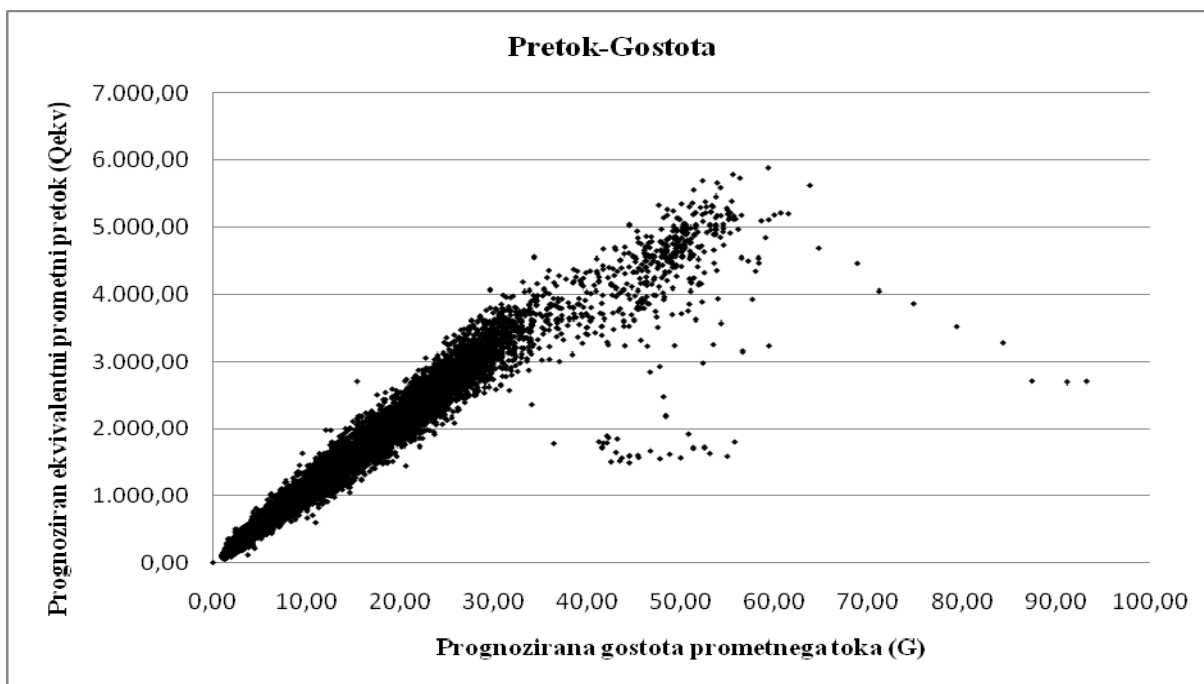
- Ko je gostota prometnega toka nič, je tudi pretok nič, saj na odseku ni nobenega vozila.
- Ko se povečuje število vozil na odseku, se povečujeta tudi pretok in gostota prometnega toka.
- Če se število vozil na odseku poveča do meje, ko se vozila ne morejo več premikati, pride do maksimalne gostote (gostota zastoja). Pri maksimalni gostoti je pretok prometnega toka nič, saj se vozila ne morejo premikati.
- Kritična gostota je vrednost gostote med nič in maksimalno gostoto (točka B), kjer prometni pretok doseže maksimalno vrednost. Odnos je predstavljen v obliki parabole na grafikonu Pretok-Gostota (3.3).



Grafikon 3-3: Grafikon Pretok-Gostota

Diagram 3-3: Flow-Density diagram

V grafikonu Pretok-Gostota predstavlja točka 0 trenutek, ko sta tako pretok kot gostota nič. Točka B predstavlja maksimalni pretok in pripadajočo kritično gostoto. V diagramu je prikazanih več daljic, ki predstavljajo hitrosti za različne pare vrednosti pretoka in gostote (hitrost je tangens naklonskega kota). Točki D in E imata enaki vrednosti pretoka, vendar različni vrednosti gostote. Naklon premice OD nam da hitrost prometnega toka v točki D, naklon premice OE pa hitrost prometnega toka v točki E.

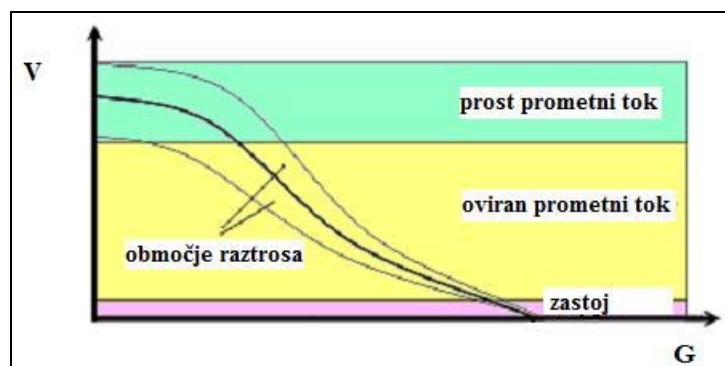


Grafikon 3-4: Prikaz odnosa Pretok-Gostota na merilnem mestu SPIS 02L na zahodni ljubljanski obvoznici za daljše časovno obdobje

Diagram 3-4: Flow-Density diagram based on real traffic data

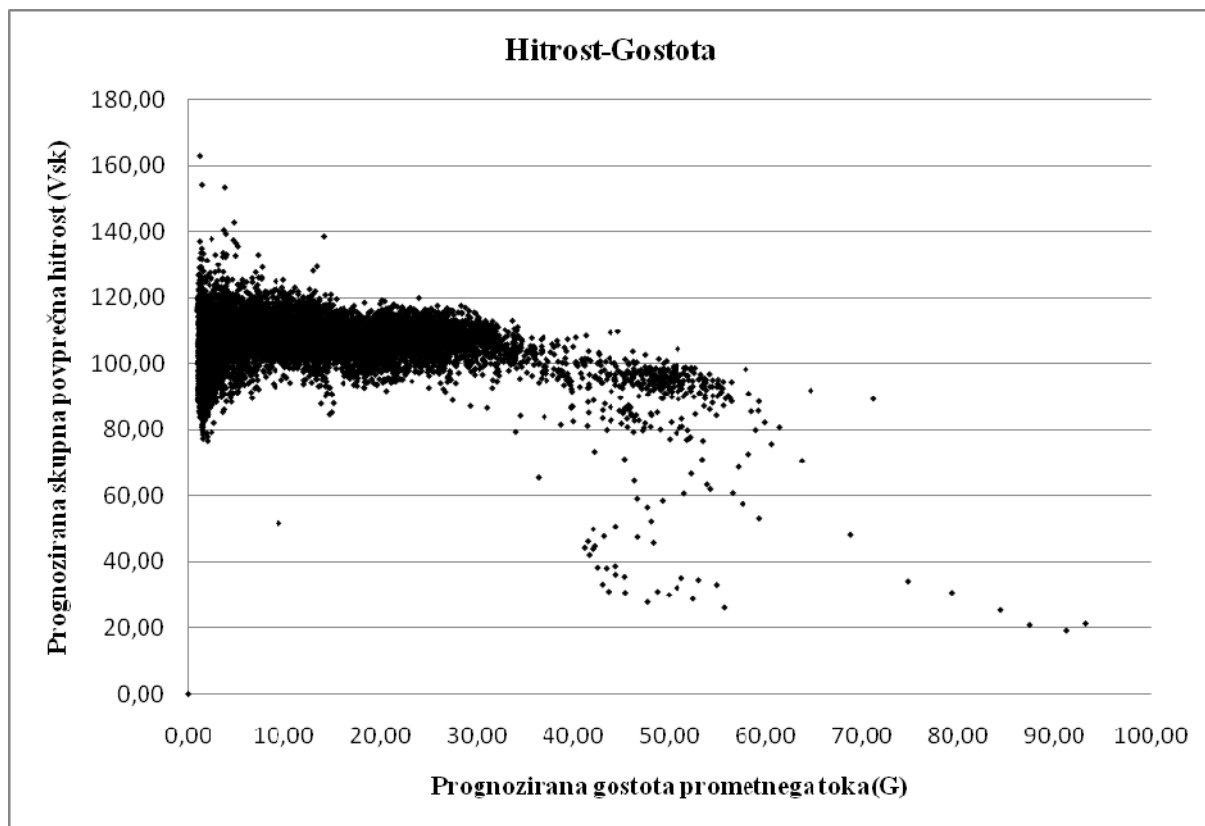
Grafikon Hitrost-Gostota

Podobno kot v grafikonu Pretok-Gostota, je največja hitrost (hitrost prostega prometnega toka) dosežena pri najmanjši gostoti, po drugi strani pa je pri maksimalni gostoti (gostoti zastoja) hitrost prometnega toka enaka nič.



Grafikon 3-5: Grafikon Hitrost-Gostota

Diagram 3-5: Speed-Density diagram

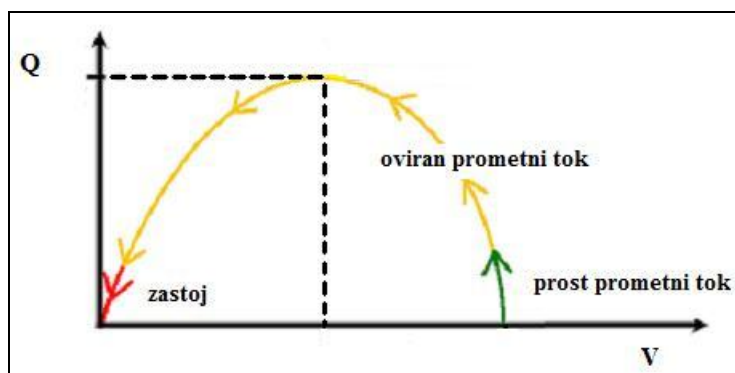


Grafikon 3-6: Prikaz odnosa Hitrost-Gostota na merilnem mestu SPIS 02L na zahodni ljubljanski obvoznici za daljše časovno obdobje

Diagram 3-6: Flow-Density diagram based on real traffic data

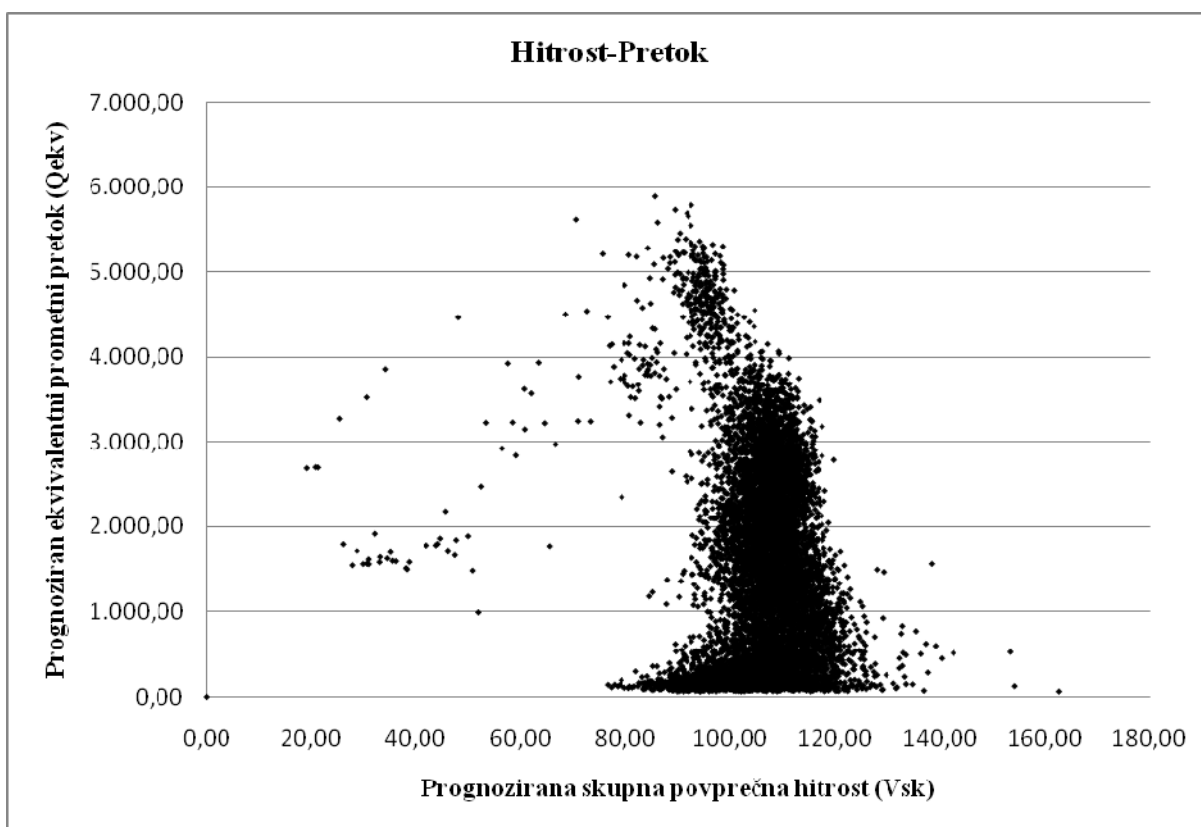
Grafikon Hitrost-Pretok

Odnos med hitrostjo in pretokom je predstavljen v grafikonu 3-7 - prometni tok je enak nič v primeru, da na odseku ni vozil, ali pa da je na odseku preveliko število vozil in se zato prometni tok ne premika. Pri maksimalnem pretoku zavzema hitrost vrednost med nič in med hitrostjo prostega prometnega toka. Optimalna hitrost, pri kateri dosežemo največji pretok lahko za dan odsek zavzema različne vrednosti in je odvisna od različnih dejavnikov.



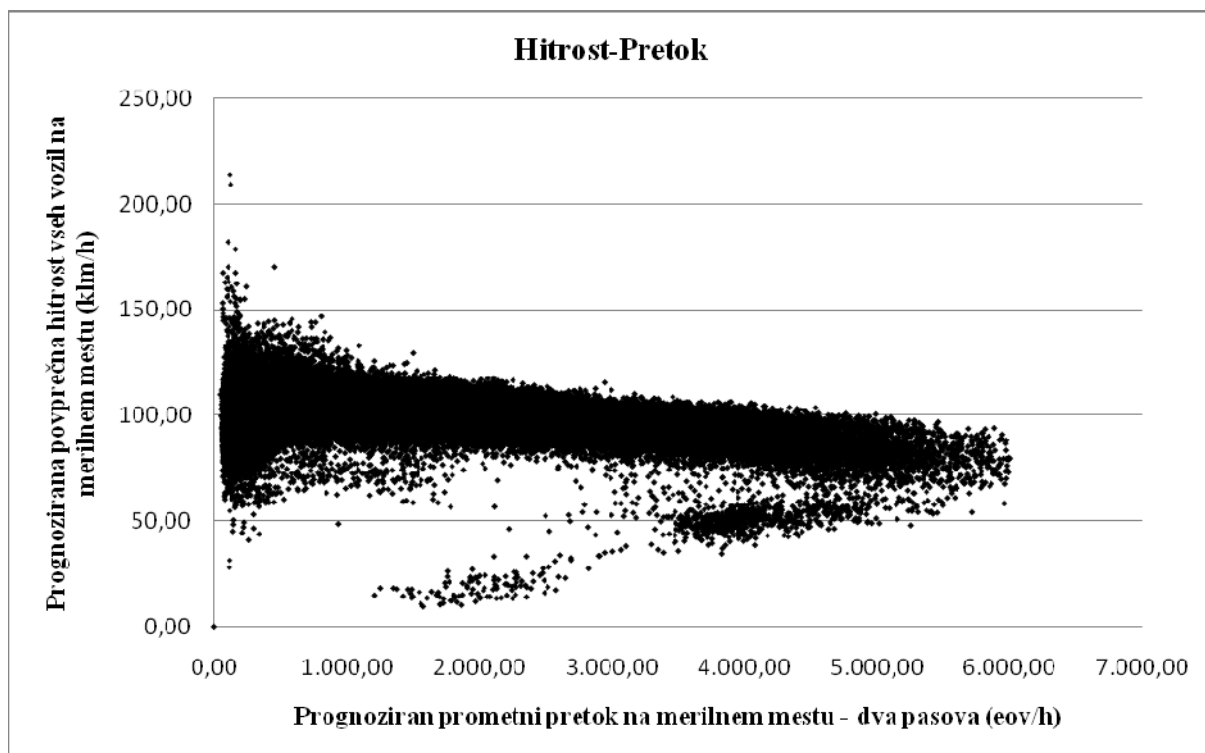
Grafikon 3-7: Grafikon Hitrost-Pretok

Diagram 3-7: Speed-Flow diagram



Grafikon 3-8: Prikaz odnosa Hitrost-Pretok na merilnem mestu SPIS 02L na zahodni ljubljanski obvoznici za daljše časovno obdobje

Diagram 3-8: Speed-Flow diagram based on real traffic data



Grafikon 3-9: Prikaz odnosa Hitrost-Pretok na merilnem mestu SPIS 03L na zahodni ljubljanski obvoznici. Hitrostna omejitev na lokaciji je bila zaradi del na cesti (»šikanak«) omejena na 80 km/h.

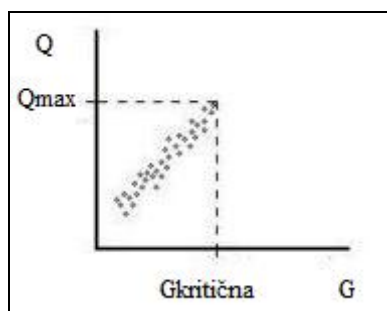
Diagram 3-9: Speed-Flow diagram on the location where speed limit was 80 km/h due to road works

3.5.3.1.2 Trifazna teorija prometnega toka po Kernerju

V klasični teoriji fundamentalnega diagrama prometnega toka obstajata dve stanji: prosti prometni tok in zastoj. V literaturi se pojavlja tudi Trifazna teorija prometnega toka po Kernerju, ki temelji na izkušnjah iz Nemčije in pravi, da klasični fundamentalni diagram v primeru zastoja ne more enolično opisati kompleksne dinamike gibanja vozil znotraj prometnega toka (2004). Trifazna teorija prometnega toka, tako prometni tok v območju zastoja nadalje razdeli na sinhroniziran prometni tok in obsežen premikajoč zastoj.

Prosti prometni tok

V razmerah prostega prometnega toka imajo vozniki popolno svobodo manevriranja in izbiranja hitrosti. Kernerjevi empirični podatki s terena so pokazali, da obstaja relacija med količino prometnega toka in gostoto (2004). Razmerje med pretokom in gostoto doseže maksimalno vrednost pri maksimalnem pretoku in pripadajoči kritični gostoti (ki pa ni enaka maksimalni).

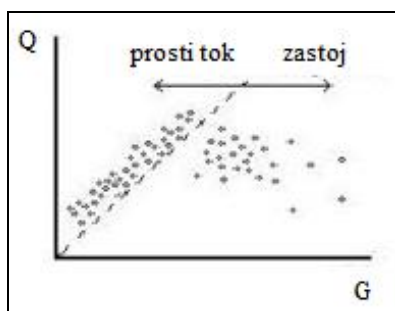


Grafikon 3-10: Razmerje med pretokom in gostoto v primeru prostega prometnega toka

Diagram 3-10: Flow-Density relation at free flow

Zastoj

Teorija klasičnega fundamentalnega diagrama enolično opiše gibanje prometnega toka v primeru zastoja. Trifazna Kernerjeva teorija prometnega toka pa trdi, da klasični fundamentalni diagram v primeru zastoja ne more enolično opisati kompleksne dinamike gibanja vozil znotraj prometnega toka (2004). Trifazna teorija prometnega toka, tako prometni tok v območju zastoja nadalje razdeli na sinhroniziran prometni tok in obsežen premikajoč zastoj.



Grafikon 3-11: Razmerje med pretokom in gostoto v primeru zgoščenega prometnega toka

Diagram 3-11: Flow-Density relation at dense flow

Po trifazni teoriji prometnega toka v primeru, ko prometni pretok in posledično gostota presežeta mejni vrednosti (Q_{max} in $G_{kritična}$), preide prometni tok v t.i. metastabilno stanje (postane metastabilen). To pomeni, da ko pride do majhnega povečanja prometnega toka, promet ostane stabilen (sinhroniziran prometni tok), pri velikem povečanju prometnega toka pa promet ni več stabilen in pojavijo se »premikajoči zastoji«. Druga interpretacija metastabilnosti je naslednja: če je prometni tok na pročelju zastoja $Q_{sotočno}$ (Q_{ven}) manjši od maksimalnega pretoka Q_{max} , je posledično hitrost prometnega toka na čelu zastoja višja od hitrosti na repu zastoja, kar pomeni, da bo čelo zastoja ujelo (v nasprotni smeri gibanja prometnega toka) rep zastoja in premikajoč zastoj bo izginil.

Prav metastabilnost je ena izmed razlik Kernerjeve teorije v primerjavi s klasičnimi teorijami o prometnem toku. Klasični fundamentalni diagram namreč predpostavi, da ko gostota preseže kritično vrednost $G_{kritična}$, prometni tok spontano preide v premikajoč zastoj.

Obsežen premikajoč zastoj

Obsežen premikajoč zastoj je zastoj, ki se premika protitočno (proti smeri prometnega toka). Premikajoč zastoj je obsežen, če učinek povratnega vala znatno presega širino pročelja zastoja. Znotraj obsežnega premikajočega zastoja je srednja hitrost vozil enaka srednji hitrosti na pročelju zastoja. Na pročelju vozila ponovno pospešujejo k hitrosti prostega prometnega toka, medtem ko vozila na repu premikajočega zastoja prihajajo iz prostega prometnega toka in so prisiljena k zmanjšanju hitrosti. V splošnem ohranja obsežen premikajoč zastoj hitrost pročelja, tudi v primeru, da zastoj tekom časa prehaja v različna druga prometna stanja ali

celo v popoln zastoju. Pretok vozil znotraj obsežnega premikajočega zastoja je opazno zmanjšan.

Kernerjevi empirični rezultati kažejo, da so nekatere karakteristike obsežnega premikajočega zastoja neodvisne od povpraševanja (2004). Te karakteristični parametri so lahko odvisni od izrednih vremenskih razmer, razmer na cesti in podobno. Kerner med drugim ugotavlja tudi, da je prometni tok sotočno od obsežnega premikajočega zastoja manjši od maksimalnega možnega prometnega pretoka v razmerah prostega prometnega toka. Z drugimi besedami, ko vozniki pripeljejo iz območja obsežnega premikajočega zastoja je prometni tok manjši kot tisti, preden so zapeljali v območje obsežnega premikajočega zastoja. To lahko pripišemo individualnemu obnašanju voznikov: protitočno od repa obsežnega premikajočega zastoja so hitrosti skoraj homogene. V homogenih razmerah puščajo vozniki precej manjše časovne razmake, kar poveča prometni pretok. Ko pa vozniki pospešujejo ven iz obsežnega premikajočega zastoja (iz mirovanja), pa hitrosti niso homogene, kar vodi k povečanju časovnih razmakov med vozili in posledično k manjšemu prometnemu pretoku.

Takoj ko obsežen premikajoč zastoj preide preko območja popolnega zastoja dobi ime zunanji obsežen premikajoč zastoj, ki lahko znatno vpliva na razvoj zastoja: v primeru da je premikajoč zastoj šele v nastanku in je blizu pročelja zunanjega obsežnega premikajočega zastoja je lahko le-ta zadušen, kar posledično lahko pomeni ponovno vzpostavitev normalnih razmer v prometnem toku.

Sinhroniziran prometni tok

V nasprotju z obsežnim premikajočim zastojem, se hitrosti znotraj sinhroniziranega prometnega toka lahko spreminjajo (varirajo z večjo amplitudo). Pročelje sinhroniziranega prometnega toka je pogosto stalno. Prometni tok v tej fazi ohrani zmožnost manevriranja, kljub temu, da so hitrosti znatno zmanjšane. Kernerjev model sinhroniziranega prometnega toka s stalnim pročeljem in stalnim repom se imenuje lokalni sinhroniziran prometni tok (2004). Obstaja možnost, da se sinhroniziran prometni tok razširi protitočno. Če pride do gortočne razširitve repa sinhroniziranega prometnega toka, le-tega imenujemo razširjajoči se sinhroniziran prometni tok, v primeru pa da pride do gortočne razširitve repa in doltočne

razširitve pročelja sinhroniziranega prometnega toka, pa tak prometni tok imenujemo premikajoči se sinhroniziran prometni tok.

Razlika med temi sinhroniziranimi prometnimi tokovi in obsežnim premikajočim zastojem je v temu, da ko sinhroniziran prometni tok doseže gortočni zastoj, pride do efekta zaustavitve - sinhroniziran prometni tok je zaustavljen in se neha premikati protitočno. Na drugi strani pa obsežen premikajoč zastoj nikoli ni zaustavljen in se kontinuirano premika protitočno.

Razširjen zastoj

Model razširjenega zastoja je kompleksen vzorec, do katerega pride, ko se v neposredni bližini pojavita dva ali več zastojev. Kot predhodno pojasнено, ko se sinhroniziran prometni tok razširi protitočno, je zaustavljen z protitočno lociranim zastojem. Vendar v primeru, ko je gortočni zastoj lociran zelo blizu doltočnemu zastojem, sinhroniziran prometni tok vmes, ni zaustavljen na gortočnem delu. V tem primeru pride do razširjenega zastoja. Tako je razširjen zastoj sestavljen iz sinhroniziranega prometnega toka in iz obsežnega premikajočega zastoja.

Prehod med prostim in sinhroniziranim prometnim tokom

Do sinhroniziranega prometnega toka pride po prehodu iz prostega prometnega toka zaradi zmanjšanja povprečne hitrosti, kljub temu da prometni tok ostane več ali manj konstanten. Do prehoda med prostim in sinhroniziranim prometnim tokom ponavadi pride zaradi povečanja prometnega pretoka.

Kerner na podlagi empiričnih podatkov ugotavlja, da do prehoda med prostim in sinhroniziranim prometnim tokom pride bodisi spontano, bodisi zaradi zunanjih dejavnikov v prostem prometnem toku (2004). Spontan prehod pomeni, da do njega pride zaradi povečanega povpraševanja na območju zastoja, prehod zaradi zunanjih dejavnikov pa se zgodi zaradi pojava obsežnega premikajočega zastoja ali sinhroniziranega prometnega toka, ki nastaneta kot posledica doltočnega zastoja.

Prehod med sinhroniziranim prometnim tokom in obsežnim premikajočim zastojem

Do nastanka obsežnega premikajočega zastoja nikoli ne pride spontano, temveč je temu vedno vzrok predhodni sinhroniziran prometni tok. V praksi torej iz prostega prometnega toka nastane sinhronizirani prometni tok, nato pa se povečuje gostota in zmanjšuje hitrost, ter tako nastane obsežen premikajoč zastoj. Kerner je ugotovil, da večja kot je gostota, večja je frekventnost pojava obsežnega premikajočega zastoja znotraj sinhroniziranega prometnega toka.

Opomba: Kernerjeva teorija je zasnovana skoraj izključno samo na merjenjih na nemški avtocesti Bundesautobahn 5 (kar postavi pod vprašaj vse ostale odseke po Evropi in drugod), kot drugič pa meritve izhajajo iz točkovnih merenj induktivnih zank (način interpolacije vmesnih podatkov ni znan), zaključki pa se nanašajo na trajektorije vozil, ki jih dejansko lahko dobimo le s sledenjem vozil (floating car data).

3.5.3.2 Določitev stopnje prometnega stanja

Stopnje prometnega stanja so v tesni povezavi z nivoji uslug, ki predstavljajo kvalitativno merilo, ki opisuje vozne pogoje znotraj prometnega toka v smislu različnih merenj, kot so hitrost, potovalni čas, svoboda manevriranja, motnje toka in udobnost. Definiranih je pet stopenj prometnih stanj od stabilnega do zgoščenega, pri čemer stabilno prometno stanje (PS 0) predstavlja najboljše vozne pogoje, zgoščeno prometno stanje (PS 4) pa najslabše vozne pogoje.

- **Stabilno prometno stanje (PS 0):** svobodni prometni tok z velikimi hitrostmi, majhno gostoto prometa in popolno svobodo manevriranja. Vozniki lahko ohranjajo želeno hitrost z malo ali pa nič zamudami, zmanjšanje hitrosti je majhno.



- **Pogojno stabilno prometno stanje (PS 1):** pogojno stabilen prometni tok, vendar sta tako hitrost kot zmožnost manevriranja omejena s povečanim številom vozil.



- **Nestabilno prometno stanje (PS 2):** stanje v prometnem toku se približuje nestabilnemu toku z bistveno omejenimi hitrostmi in majhno možnostjo manevriranja.



- **Nasičeno prometno stanje (PS 3):** stanje v prometnem toku je nestabilno zaradi vožnje v koloni, kjer je velika gostota prometa in kjer je pretok vozil enak prepustnosti. Maksimalni pretok pri nivoju E je enak kapaciteti.



- **Zgoščeno prometno stanje (PS 4):** v ekstremnih primerih lahko tako hitrost kot tudi pretok dosežeta vrednost nič.





Slika 3-9: Primer jutranje konice (zgoščeno prometno stanje PS 4) na severni ljubljanski obvoznici

Figure 3-9: Morning peak (LOS F) on Ljubljana city ring

Določevanje prometnih stanj poteka na podlagi preverjanja prognostične stopnje hitrosti in prognostične stopnje gostote:

$$PS = f(V_{ST}, G_{ST}) \quad (3.21)$$

kjer je:

PS = stopnja prometnega stanja

V_{ST} = prognostična stopnja hitrosti

G_{ST} = prognostična stopnja gostote

Pri čemer se za določevanje stopnje prometnega stanja preverjajo:

- Prognozirana povprečna hitrost vseh vozil v prometnem toku,
- Prognozirana gostota prometnega toka na merilnem mestu.

Vrednosti, ki določajo meje med stopnjami hitrosti so navedene v preglednici 3.3 in so nastavljen parameter:

Preglednica 3.3: Stopnje hitrosti

Table 3.3: Speed levels

Stopnja hitrosti	Hitrost (km/h)
V0	0 - 30
V1	30 - 50
V2	50-60
V3	60-75
V4	75 in več

Vrednosti, ki določajo meje med stopnjami gostote so nastavljiv parameter in so navedene v preglednici 3.4:

Preglednica 3.4: Stopnje gostote

Table 3.4: Density levels

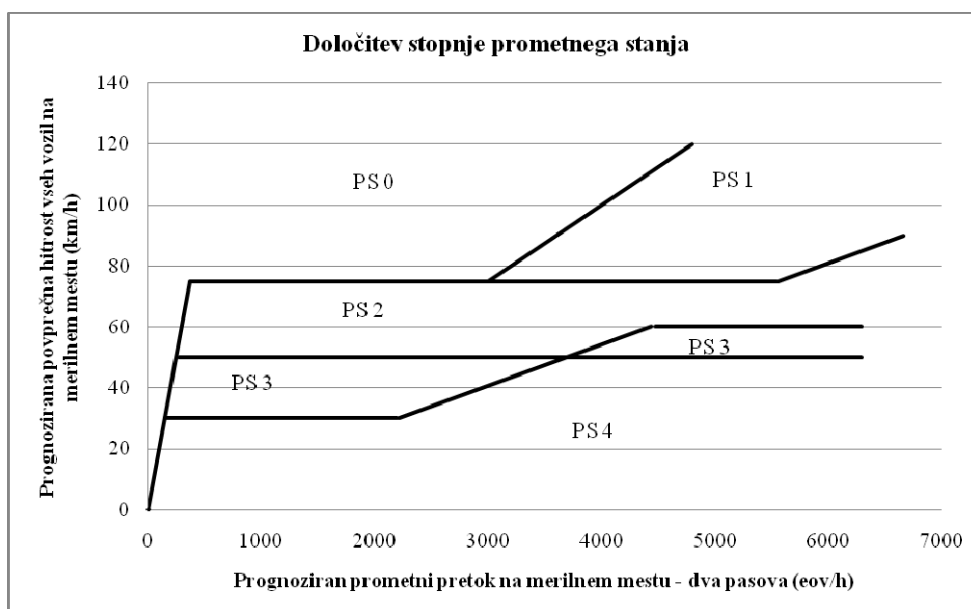
Stopnja gostote	Gostota (eov/km) 2 prometna pasova
G0	0 - 5
G1	5 – 40
G2	40 - 74
G3	74 ali več

Način določitve stopnje prometnega stanja glede na stopnjo hitrosti in gostote je predstavljen v preglednici 3.5 in grafikonu 3-12:

Preglednica 3.5: Določitev stopnje prometnega stanja

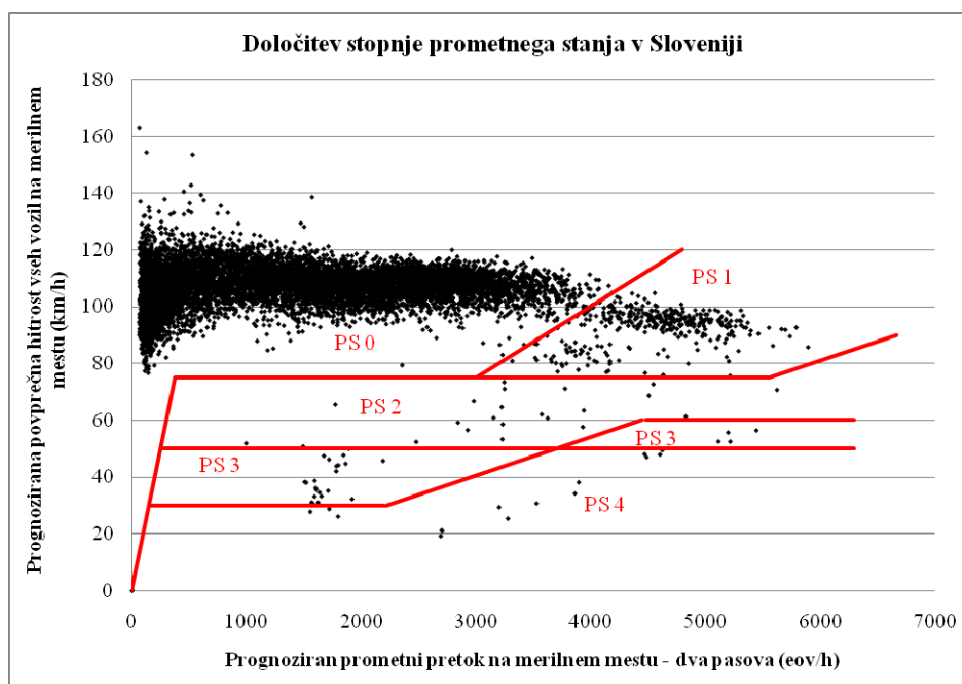
Table 3.5: Level of service estimation

	G0	G1	G2	G3
V0	PS0	PS4	PS4	PS4
V1	PS0	PS3	PS3	PS4
V2	PS0	PS2	PS2	PS3
V3	PS0	PS2	PS2	PS2
V4	PS0	PS0	PS1	PS2



Grafikon 3-12: Grafični prikaz določitve stopnje prometnega stanja

Diagram 3-12: Level of service estimation



Grafikon 3-13: Primer določitve stopnje prometnega stanja na podlagi prognoziranih prometnih parametrov

Diagram 3-13: Level of service estimation based on real data

Prometna stanja v sistemu za nadzor in vodenje prometa se izračunavajo v merilnem časovnem intervalu T , ki je spremenljiv parameter (trenutna vrednost $T=1$ min). V cikličnem intervalu 1 minute se preverja prognozirana skupna hitrost vseh vozil v prometnem toku in prognozirana gostota prometnega toka na merilnem mestu, na podlagi česar se vsako minuto določa stopnja prometnega stanja za posamezno merilno mesto glede na trenutne razmere v prometnem toku. Na podlagi predvidenih ukrepov sistema za nadzor in vodenje prometa, se preko grafičnih prikazovalnikov spremenljive prometno-informativne signalizacije vodi prometni tok (opisano v poglavju »Vodenje prometa glede na prometno stanje«) z maksimalno zakasnitvijo T .

Proces določitve mejnih vrednosti med prometnimi stanji in določitev prometnega modela sistema za nadzor in vodenje sta bila narejena na podlagi podatkov iz podobnih sistemov v tujini. Razmere na ameriških avtocestah se glede na razpoložljive podatke preveč razlikujejo od slovenskih, medtem ko so navade voznikov in karakteristike avtocest v Nemčiji bližje navadam slovenskih voznikov. Model določevanja prometnih stanj je bil zastavljen na podlagi

modelov, ki se uporabljajo za določevanje omejitev hitrosti v sistemih za vodenje prometa v tujini z manjšimi spremembami in prilagoditvami.

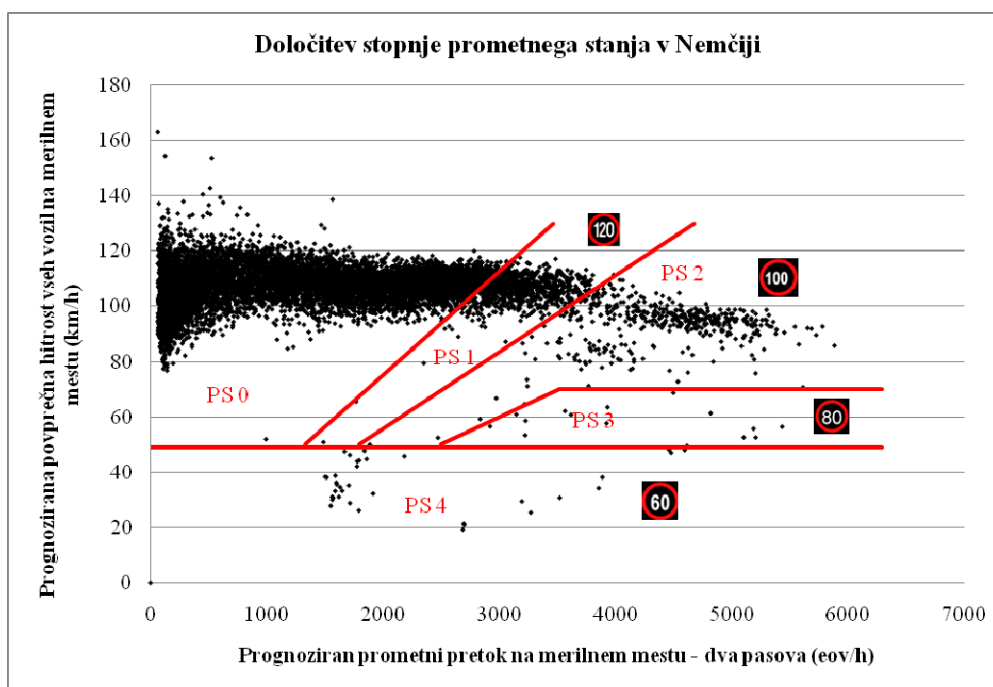
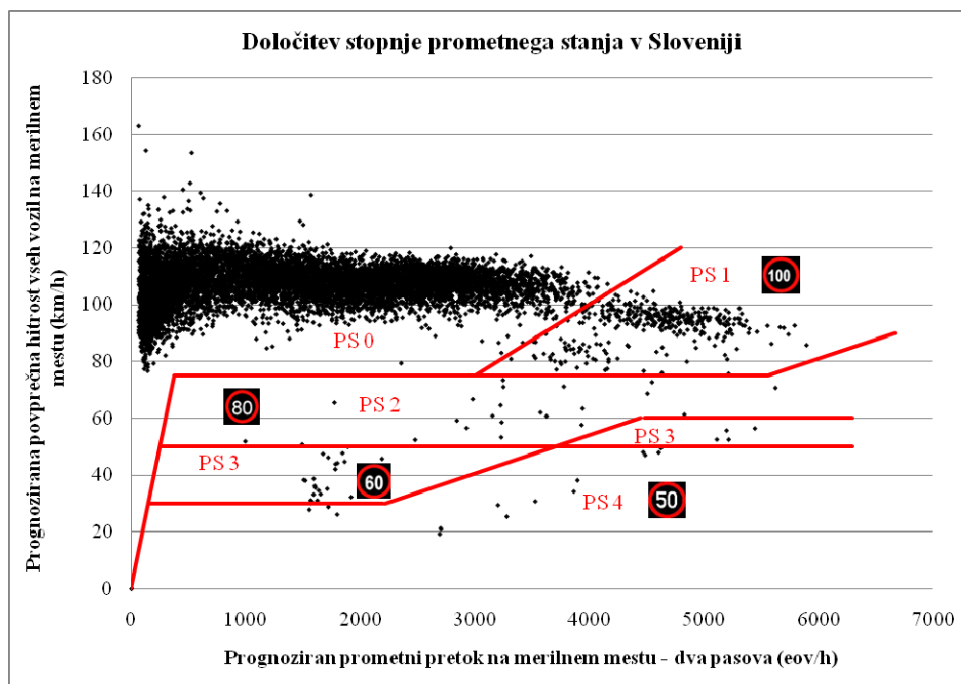
Na zahodni ljubljanski obvoznici so opazna izrazita dnevna nihanja prometnega toka. Največji prometni pretoki iz smeri razcepa Kozarje proti severni ljubljanski obvoznici so doseženi ob jutranjih konicah. Ameriške smernice HCM za kapaciteto voznega pasu na avtocesti pri hitrosti prostega prometnega toka 120 km/h navajajo kapaciteto 2400 eov/h, za dvo-pasovno avtocesto torej 4800 eov/h (2000). Nemške smernice po Marzu za kapaciteto enega voznega pasu navajajo vrednost 2600 eov/h, pri čemer za dva vozna pasova predvidijo nekoliko nižjo kapaciteto in sicer 4000 eov/h (1999). Zanimivo je, da je kapaciteta štiri pasovne avtoceste po nemških smernicah 5600 eov/h.

Iz primerjave zgoraj navedenih podatkov in podatkov izmerjenih na terenu je razvidno, da so navade slovenskih voznikov drugačne od tistih v ZDA in pa tudi od voznikov v Nemčiji. Podrobna analiza obnašanja voznikov je vodila k potrebi po kalibraciji mejnih vrednosti med prometnimi stanji, na podlagi katerih se v sistemu izvajajo ukrepi nadzora in vodenja prometa.

Model določitve prometnih stanj je bil razvit v okviru kalibracije prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa na zahodni ljubljanski obvoznici, na podlagi več mesečnega opazovanja spreminjanja osnovnih prometnih parametrov v različnih pogojih odvijanja prometnega toka, od stabilnega do zgoščenega. Model je bil določen na kritičnih lokacijah na zahodni ljubljanski obvoznici, ki zaradi svoje specifične lege in velikih prometnih obremenitev predvsem ob koničnih urah predstavljajo primerni testni poligon za spremljanje prometnega toka. Tekom spremljanja obnašanja prometnega toka na različnih lokacijah so bile pridobljene pomembne izkušnje, ki predhodno zaradi pomanjkanja opreme za detektiranje na slovenskih avtocestah niso bile možne. Opazovanja so prinesla številne podatke o karakteristikah prometnega toka in o obnašanju voznikov v različnih situacijah. Poleg prometnih parametrov detektiranih s pomočjo detekcijskih naprav na trasi smo različne kritične situacije analizirali tudi s pomočjo slike iz sistema video nadzora, s čimer smo tekom časa sproti izboljševali logiko sistema za nadzor in vodenje prometa in njegovo odzivanje na potencialno nevarne izredne situacije.

Na podlagi analize velikega števila prometnih podatkov s kritičnih odsekov na zahodni ljubljanski obvoznici ter glede na ugotovitve, da so razmere v Sloveniji specifične in da so navade voznikov drugačne kot v tujini, smo na novo določili mejne vrednosti med prometnimi stanji. Opažene so bile višje vrednosti pretokov pri podobnih hitrostih napram podatkom iz tujine, zaradi česar so dosežene višje vrednosti gostote, kar je bilo opaženo tudi na podlagi analize časovnih razmakov med vozili in pregledu slike iz video nadzornih kamer. Dosežene višje vrednosti gostote se v grafu določevanja prometnih stanj poznajo kot bolj položen naklon mejnih daljic gostote (tangens kota med pretokom in hitrostjo nam da naklon daljice, ki predstavlja gostoto). Manjši časovni razmaki med vozili posledično pomenijo zmanjšano prometno varnost, saj vozniki zaradi majhne razdalje med vozili bistveno težje odreagirajo na potencialno nevarne situacije.

Slovenski in nemški model določevanja prometnih stanj se razlikujeta tudi v pripadajočih hitrostnih omejitvah. Medtem ko sistem za nadzor in vodenje prometa v Nemčiji voznikom, ko hitrost pade pod 50 km/h, prikazuje hitrostno omejitev 60 km/h, smo se v Sloveniji odločili da v primeru t.i. »stop&go« prometnega toka, ko hitrosti dosežajo vrednosti med 0 km/h in 50 km/h, voznikom prikazujemo hitrostno omejitev 50 km/h, s čimer želimo pospešiti prometni tok obenem pa voznikom, ki vozijo s hitrostmi blizu 0 km/h ne prikazujemo nerealno visokih hitrostnih omejitev glede na dejansko možno hitrost vožnje.



Grafikona 3-14: Primerjava določevanja prometnih stanj in pripadajoče hitrostne omejitve v Sloveniji in v Nemčiji

Diagrams 3-14: Level of service estimation in Slovenia and Germany

3.5.3.3 Določitev pojava zastoja

V sistemu za nadzor in vodenje prometa preko merilnikov za zbiranje prometnih podatkov (mikrovalovni detektorji in video detekcijske kamere) zbiramo osnovne prometne parametre (navedene v predhodnih poglavjih) in podatke o izrednih dogodkih (vožnja v nasprotno smer, zaustavljeno vozilo). Na podlagi podatkov pridobljenih iz detekcijskih naprav, centralni del sistema na podlagi logičnih operacij določa pojav zastoja oz. zazna skokovito spremembo prometnih parametrov, ki potencialno lahko privede do zastoja. Operater v nadzornem centru na podlagi avtomatskih alarmov ročno ali polavtomatsko namešča ustrezne prometne vsebine spremenljive prometno-informativne signalizacije.

Za določitev pojava zastoja mora biti izpolnjen vsaj en izmed treh navedenih kriterijev.

1. Kriterij: Zasedenost

Zasedenost merilnega območja pod detekcijsko napravo (mikrovalovni detektor ali video detekcijska kamera) se določa na podlagi razmerja med skupno časovno zasedenostjo merilnega območja pod detekcijsko napravo in dolžino časovnega intervala T . V praksi to pomeni, da seštejemo čase zasednosti merilnega območja (v sekundah) za vsako posamezno vozilo znotraj časovnega intervala ($T=1$ min) in delimo z T (v sekundah). Za določitev pojava zastoja na merilnem mestu i morata biti vsaj na enem prometnem pasu j tega merilnega mesta izpolnjena pogoja:

$$(z(i,j) > z_d) \text{ in } (s_v_ov_p(i) \leq s_v_z_d) \quad (3.22)$$

kjer je:

$z(i,j)$ = zasedenost prometnega pasu j na merilnem mestu i

z_d = mejna vrednost zasedenosti za določitev zastoja (%)

$s_v_ov_p(i)$ = skupna prognozirana hitrost osebnih vozil na merilnem mestu i (km/h)

$s_v_z_d$ = mejna vrednost hitrosti za določitev zastoja (km/h)

Za razveljavitev pojava zastoja na merilnem mestu i mora biti na vseh prometnih pasovih j tega merilnega mesta izpolnjen vsaj eden izmed teh dveh pogojev:

$$(z(i,j) > z_r) \text{ ali } (s_{v_ov_p}(i) > s_{v_z_r}) \quad (3.23)$$

kjer je:

$z(i,j)$ = zasedenost prometnega pasu j na merilnem mestu i

z_r = mejna vrednost zasedenosti za razveljavitev zastoja (%)

$s_{v_ov_p}(i)$ = skupna prognozirana hitrost osebnih vozil na merilnem mestu i (km/h)

$s_{v_z_r}$ = mejna vrednost hitrosti za razveljavitev zastoja (km/h)

Vrednosti z_d , z_r , $s_{v_z_d}$ in $s_{v_z_r}$ so parametri, nastavljivi za posamezne prometne pasove. Začetne vrednosti so podane v preglednici 3.6:

Preglednica 3.6: Mejne vrednosti za 1. kriterij določevanja zastoja (zasedenost)

Table 3.6: Boundary values for traffic jam determination

mejna vrednost zasedenosti za določitev zastoja	50 %
mejna vrednost zasedenosti za razveljavitev zastoja	35 %
mejna vrednost hitrosti za določitev zastoja	50 km/h
mejna vrednost hitrosti za razveljavitev zastoja	70 km/h

2. Kriterij: Stopnja prometnega stanja

Za določitev pojava zastoja na merilnem mestu i mora biti doseženo prometno stanje PS 4 (opisano v predhodnem poglavju).

Pojav zastoja na določenem merilnem mestu je razveljavljen, ko je na tem merilnem mestu izpolnjen pogoj:

$$\text{stopnja prometnega stanja} < PS 4$$

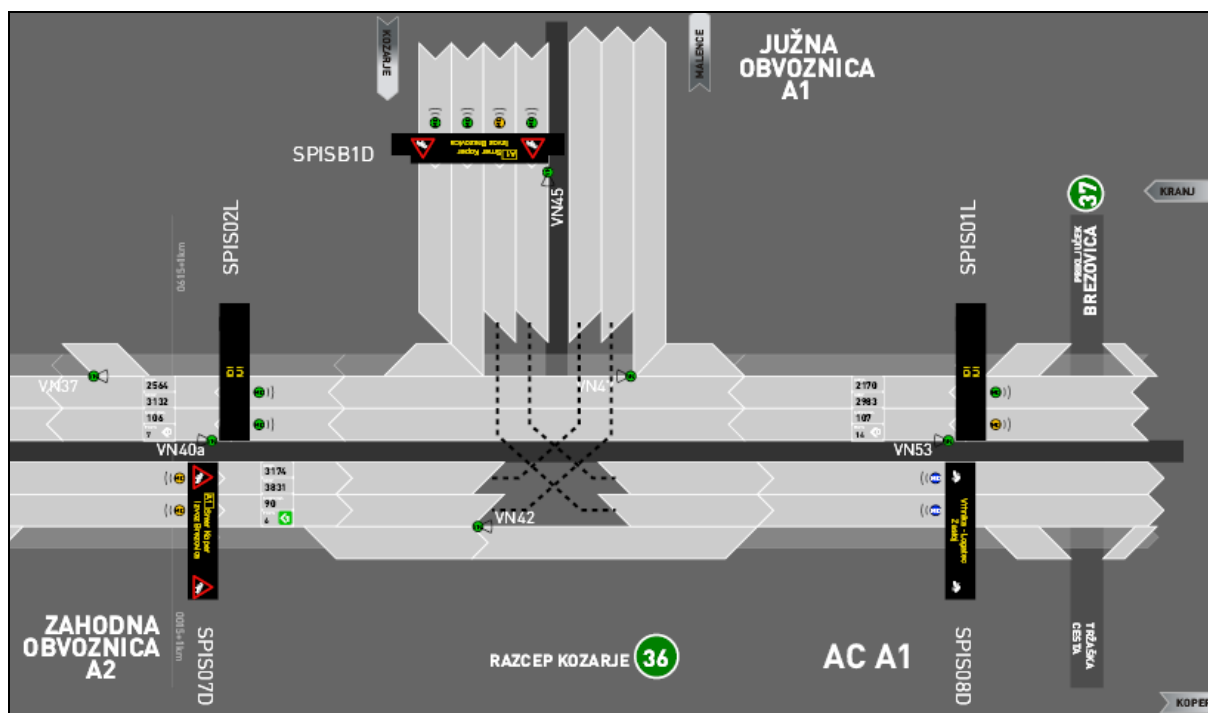
3. Kriterij: Zaznavanje stojećih vozil

Detekcijske naprave (mikrovalovni detektorji in video detekcijske kamere) poleg zbiranja prometnih podatkov omogočajo tudi javljanje zastoja. Mikrovalovni detektorji zaznajo stoječe vozilo, če le-to stoji v območju detektiranja določen časovni interval (nastavljiv parameter med 6 in 60 sekund, v sistemu za nadzor in vodenje prometa na zahodni ljubljanski obvoznici je vrednost nastavljena na 25 sekund). Video detekcijske kamere za procesiranje video slike in sprejemanje odločitev za javljanje kolone stojećih vozil uporabljajo večje območje (cca. 40 m dolžine) in so tako z uporabo t.i. linijskih detektorjev (nastavljiv čas zasedenosti merilnega območja) bolj uporabne pri določevanju zastoja. S pomočjo uporabe logičnih funkcij lahko število lažnih alarmov zmanjšamo na minimum.

Zaradi točkovne razporeditve detektorjev je malo verjetno, da bo do začetka zastoja prišlo ravno na mestu detekcije. Zato je v primeru velikih prometnih obremenitev na mestih potencialnega nastanka zastoja izredno pomembno spremljanje prometne situacije s strani operaterjev preko sistema video nadzora. Ko merilnik za zbiranje prometnih podatkov sproži alarm za stoječe vozilo, se generira sporočilo v okencu za alarme hkrati pa se pododsek na shematskem prikazu trase (SCADA) obarva rdeče. Takrat operater v nadzornem centru s pomočjo slike video nadzornega sistema preveri ali je na tem odseku res nastala kolona stojećih vozil ali pa se je v merilnem območju detektorjev ustavilo eno samo vozilo (npr. okvara vozila).

Pojav zastoja je določen, ko merilniki za zbiranje prometnih podatkov sprožijo alarm za stoječe vozilo in ko operater preko slike video nadzora potrdi nastanek kolone stojećih vozil.

Pojav zastoja je razveljavljen, ko merilniki ne zaznajo več kolone stojećih vozil in ko je hkrati pojav zastoja razveljavljen tudi po vseh ostalih kriterijih (ki omogočajo tudi zaznavo kolone počasi vozećih vozil).



Slika 3-10: Vodenje prometa ob pojavu občasnih zastojev na izvozu Brezovica (popoldanska konica)

Figure 3-10: Traffic control in case of periodical traffic jam

3.5.4 Vodenje prometa glede na prometno stanje

Ukrepi vodenja prometa in informiranja uporabnikov glede na prometno stanje se v sistemu nadzora in vodenja prometa izvajajo v pogojno stabilnem, nestabilnem, nasičenem ali zgoščenem prometnem stanju. Izvajanje ukrepov vodenja prometa je določeno s pragovi oziroma mejnimi vrednostmi prometnih količin.

Namen vodenja prometa glede na prometno stanje je optimizirati prometni tok do take mere, da je dosežen maksimalen izkoristek kapacitete glede na trenutne razmere v prometnem toku. Prometni tok vodimo z ustreznimi hitrostnimi omejitvami glede na doseženo prometno stanje v kombinaciji s tekstualnim delom, ki voznike opozarja na zgoščen promet. V preglednici 3.7 so podane hitrostne omejitve glede na posamezno prometno stanje, s katerimi vodimo voznike preko portalov spremenljive prometno-informativne signalizacije:

Preglednica 3.7: Omejitve hitrosti za posamezno prometno stanje

Table 3.7: Speed limits for different traffic states

Stopnja prometnega stanja	Omejitev hitrosti (km/h)
PS1	100
PS2	80
PS3	60
PS4	50

Glede na doseženo prometno stanje, v sistemu za nadzor in vodenje prometa voznike obveščamo z naslednjimi prometnimi vsebinami preko grafičnih prikazovalnikov spremljive prometno-informativne signalizacije:

Pogojno stabilno prometno stanje PS 1

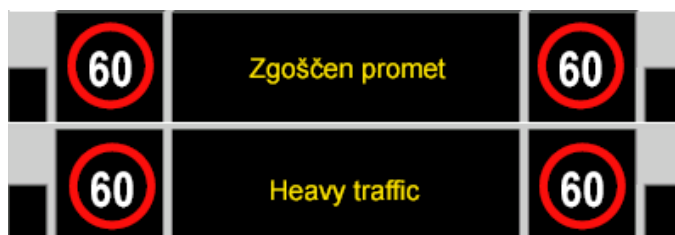


*Ne velja v primeru, da je na lokaciji SPIS statična omejitev hitrosti manjša (npr. 80 km/h pred razcepi)

Nestabilno prometno stanje PS 2



Nasičeno prometno stanje PS 3

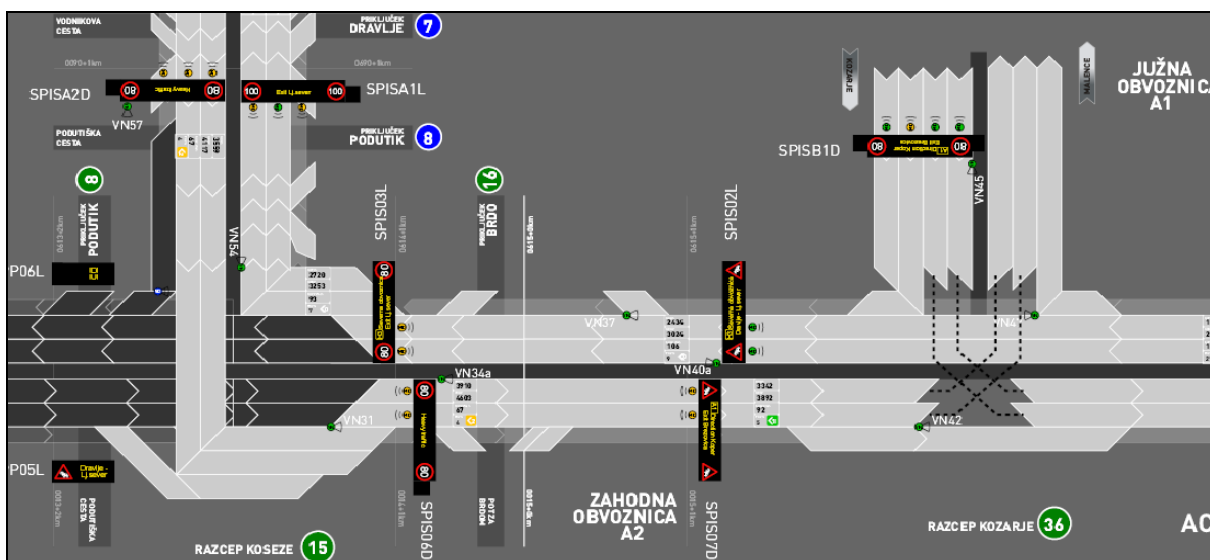


Zgoščeno prometno stanje PS 4



Slika 3-11: Vodenje prometa glede na prometno stanje: jutranja konica na zahodni ljubljanski obvoznici (SPIS 03L)

Figure 3-11: Traffic management - morning peak at Ljubljana city ring



Slika 3-12: Vodenje prometa v nasičenem prometnem stanju (petkova popoldanska konica) in ob pojavljanju občasnih zastojev na izvoznih rampah (Lj.-Sever in Brezovica)

Figure 3-12: Traffic management measures in case of major breakdowns due to traffic jams

4 EVALVACIJA

4.1 Namen evalvacije

Prometni model sistema za nadzor in vodenje prometa je kompleksen model, ki na podlagi vhodnih prometnih parametrov, izmerjenih na terenu, glede na razmere v prometnem toku izračunava prometna stanja. Za homogeniziranje prometnega toka v času konic se voznike preko sistema za nadzor in vodenje prometa (predvsem preko grafičnih prikazovalnikov spremenljive prometno-informativne signalizacije) obvešča o trenutnem stanju na cesti in posledično vodi prometni tok.

Na tem področju v Sloveniji do sedaj še ni bilo narejenih nikakršnih podrobnejših analiz in raziskav. Pri dosedanjem delu smo se opirali predvsem na ugotovitve in smernice iz tujine, ki pa so zaradi drugačnih navad in obnašanja voznikov, le do neke mere primerne za avtoceste v Republiki Sloveniji. Mejne vrednosti med prometnimi stanji privzete iz tujih modelov zahtevajo prilagoditve na razmere v Sloveniji.

Namen evalvacije prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa je bil preveriti in oceniti prvotno definirano formo in procedure za določevanje prometnih stanj privzete iz tujih smernic in na podlagi specifičnih karakteristik prometnega toka na slovenskem avtocestnem omrežju prilagoditi mejne vrednosti med prometnimi stanji. Evalvacija in kalibracija prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa sta se izvajali z namenom zagotovitve najoptimalnejših nivojev uslug voznikom na avtocestnem omrežju.

Podrobnejša analiza odzivanja sistema in prometnega modela kot njenega podmodula je omogočila prilagoditev spremenljivk slovenskim razmeram in določitev kritičnih dejavnikov, ki jih je potrebno upoštevati pri kalibraciji prometnega modela za vsak dotični pododsek.

4.2 Status projekta

Sistem za nadzor in vodenje prometa je v obratovanju od 14. januarja 2008. Po začetnem testnem delovanju, namenjenem kalibriranju prometnih stanj na vseh merilnih mestih, sistem sedaj deluje v vsej svoji funkcionalnosti, ki pa glede na zasnovo sistema omogoča nadgradnje in bodoče izboljšave glede na dejansko stanje na cestni mreži ter potrebe in zahteve naročnika. Ob vidnem povečanju količine prometa in spremembi navad voznikov bo potrebna ponovna preveritev delovanja prometnega modula in po potrebi kalibracija in prilagoditev na novo stanje.

4.3 Čas in način evalvacije

Evalvacija prometnega modula sistema za nadzor in vodenje prometa na zahodni ljubljanski obvoznici je potekala v času delovanja sistema (ex-post evalvacija) in sicer v času med 14. januarjem 2008 (datum odprtja sistema) in 10. septembrom 2008.

V bazi podatkov sistema za nadzor in vodenje prometa, se od začetka obratovanja sistema zbirajo prometni podatki, merodajni za določevanje prometnih stanj. Izbira izrednih dogodkov za evalvacijo sistema za nadzor in vodenje prometa je potekala na podlagi pregleda vnešenih izrednih dogodkov v aplikacijo Kažipot in na podlagi izstopajočih (maksimalnih in minimalnih) vrednosti prometnih parametrov, kot posledica potencialnih izrednih dogodkov. Evalvacija je potekala na podlagi analiz obnašanja prometnega modula sistema za nadzor in vodenje prometa in njegovega odzivanja na različne izredne situacije. Za evalvacijo sta bili uporabljeni statistična in analitično-sintetična metoda.

Kot paralelna metoda za preveritev dejanskega stanja na terenu je služil sistem video nadzora, ki omogoča zvezen način spremljanje dogajanja v prometnem toku.

4.4 Cilji evalvacije

Cilj evalvacije prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa je bil preveriti in skalibrirati mejne vrednosti med posameznimi prometnimi stanji, določenimi na podlagi nivojev uslug za vsako posamezno merilno mesto. Različne karakteristike prometnega toka (količina prometa ob jutranjih in popoldanskih konicah, delež težkih tovornih vozil) so namreč zahtevale individualno preučitev vseh merilnih mest, pri čemer so nekatera merilna mesta izkazala potrebo po natančnejši analizi in ponovni kalibraciji mejnih vrednosti.

Cilj evalvacije je bil določiti optimalno hitrost, pri kateri dosežemo največji pretok za dan presek glede na razmere na odseku. Cilj evalvacije je bil tudi določitev vplivov vodenja prometa glede na različna prometna stanja z namenom razširitve pridobljenega znanja na druge lokacije (merilna mesta), kjer s pomočjo implementiranega sistema za nadzor in vodenje prometa želimo ali bomo želeli v prihodnje voditi prometni tok.

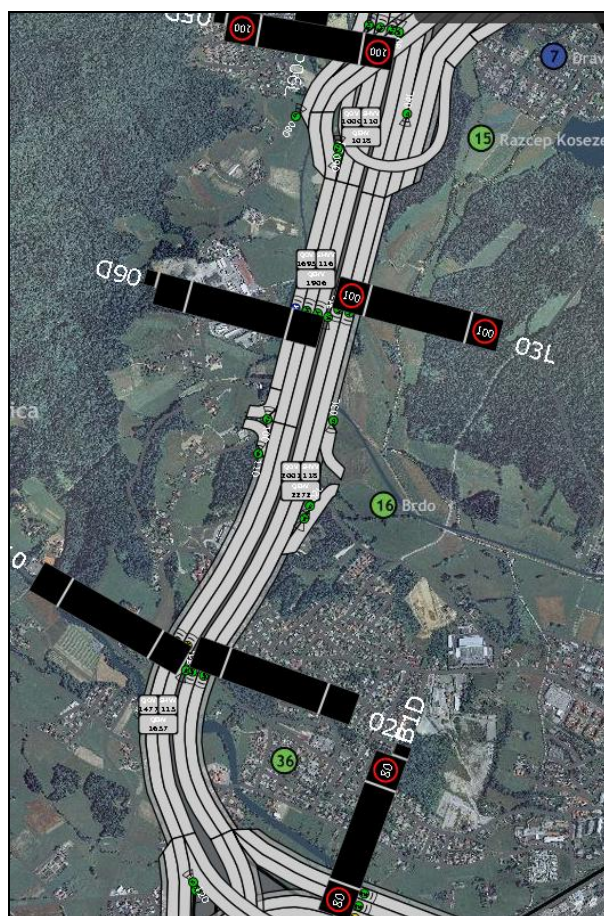
4.5 Raziskovalna vprašanja

- Kako voditi prometni tok glede na prometna stanja, da dosežemo maksimalno izkoriščenost avtocestnega omrežja in kako uporabniku ponuditi najboljši nivo usluge za dane razmere v prometnem toku?
- Kako ukrepati pri vodenju prometa v primeru nizkih hitrosti pri nizkih in srednje velikih pretokih (primerjava slovenskega in nemškega modela določevanja prometnih stanj in pripadajočih prometnih obremenitev)?
- Kako učinkovite so uporabljene procedure in scenariji vodenja prometa glede na prometna stanja?
- Kakšen pomen ima vodenje prometa glede na različna prometna stanja in kakšen je odziv pri voznikih (ali le-ti upoštevajo ukrepe umirjanja prometa in zmanjševanja hitrosti)?

4.6 Območje evalvacije

Zaradi svoje specifične lege na zahodni ljubljanski obvoznici, je bilo za območje podrobnejše evalvacije izbran odsek med razcepom Kozarje in razcepom Koseze (iz smeri Kopra proti Kranju) na lokaciji portalov SPIS 02L in SPIS 03L, kjer predvsem v času jutranje konice prihaja do velikih prometnih obremenitev in posledično do pojava zastojev.

Portala SPIS 02L in 03L sta locirana na zahodni ljubljanski obvoznici, prvi med razcepom Kozarje in priključkom Brdo, drugi pa med priključkom Brdo in razcepom Koseze. Portala sta med seboj oddaljena približno 1500 m. Na obeh lokacijah je avtocestni pododsek sestavljen iz dveh voznih pasov, voznega in prehitevalnega pasu širine 3.75m, ter iz odstavnega pasu.



Slika 4-1: Prikaz območja evalvacije

Figure 4-1: Evaluation site

4.7 Primeri evalvacije prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa

Evalvacija prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa je potekala na podlagi analiz različnih izrednih dogodkov, pri čemer je bil opazovan odziv sistema na spremembe osnovnih karakteristik prometnega toka kot posledica motnje v prometnem toku.

V začetni fazi delovanja prometnega modela so bile opažene posamezne neskladnosti med pričakovanim in dejanskim odzivanjem sistema na posamezen izredni dogodek, kar je bilo tekom kalibracije popravljeno in prilagojeno glede na specifične robne pogoje.

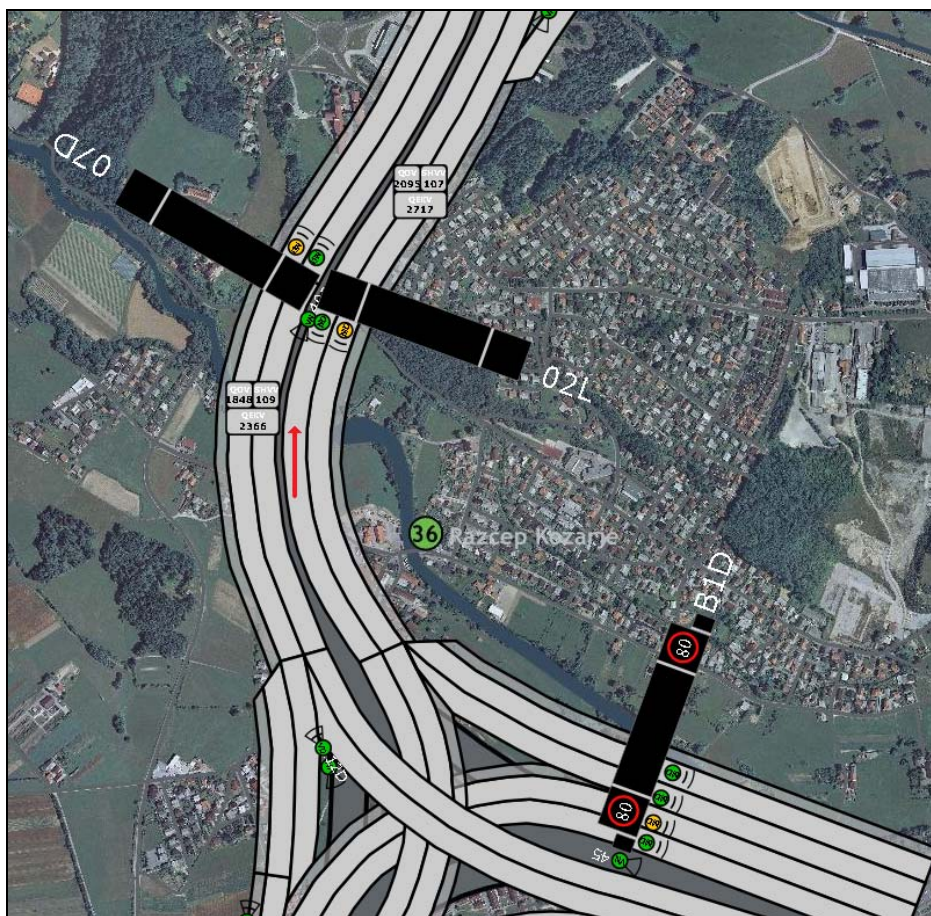
V nadaljevanju so predstavljeni trije primeri odzivanja prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa na nastale situacije na obravnavanem avtocestnem odseku.

4.7.1 Vodenje prometa ob pojavu premične zapore

Uvod

V nadaljevanju je analiziran odziv prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa v primeru premikajočih del na cesti (košnja sredinskega pasu), ki so potekala 4. septembra 2008 na preHITEVALNEM pasu med razcepom Kozarje in razcepom Podutik. Vzdrževalnemu vozilu namenjenemu za košnjo je sledilo vozilo s spremenljivo signalizacijo, ki je voznike v kombinaciji z grafičnimi prikazovalniki obveščalo o preusmeritvi na vozni pas. Analiziran je odziv prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa na hipne spremembe prometnih parametrov na lokaciji SPIS 02L (pred priključkom Brdo).

Primer je bil izbran zaradi specifičnosti premikanja vzdrževalne zapore tekom del, kjer lahko spremljamo premikanje pročelja zastoja.



Slika 4-2: Območje premične zapore zaradi košnje

Figure 4-2: Location of the mowing

Analiza

Vzdrževalno vozilo za košnjo se je premikalo od razcepa Kozarje v smeri proti zahodni ljubljanski obvoznici. Minutne vrednosti prometnih pretokov pretvorjene na urno vrednost so v tistem času na merilnem mestu SPIS 02L dosegale povprečno vrednost okoli 2800 ev/h s povprečno hitrostjo 107 km/h.

Operater v nadzornem centru je preko sistema video nadzora opazoval gibanje vzdrževalnega vozila in že pred njegovim prihodom na lokacijo grafičnega prikazovalnika (ob 13:24) nanj namestil prometno vsebino, s katero so bili vozniki obveščeni o zapori prehitevalnega pasu.



Slika 4-3: Ročno nameščena prometna vsebina

Figure 4-3: VMS content set manually

Hitrosti so po namestitvi vsebine s hitrostno omejitvijo začele padati, kljub temu, da so bile zaradi oddaljenosti vzdrževalnega vozila in portala SPIS 02L (cca. 200 m), na lokaciji prikazovalnika ponovno omogočene normalne vozne razmere, saj je promet spet normalno potekal v dveh pasovih. Vozniki so torej upoštevali hitrostno omejitev na grafičnem prikazovalniku SPIS in povprečna hitrost je padla za približno 15 km/h na 83 km/h. Nekoliko znižana hitrost je tudi posledica počasnega in neenakomernega speljevanja z območja začasne redukcije pasov.

Ko je premična zavora dosegla lokacijo portala SPIS 02L (ob 13:29) je prometni model zaznal nestabilno prometno stanje (PS 2), predlagana hitrost se ni spremenila, saj je bila enaka omejitev že (ročno) nameščena na grafični prikazovalnik SPIS 02L. Prometne razmere so se hitro poslabšale. Prometni model je že v naslednji minuti (ob 13:30) zaznal nasičeno prometno stanje (PS 3) in na portalu avtomatsko zamenjal hitrostno omejitev na 60 km/h. Hitrosti so padle pod 50 km/h.



Slika 4-4: Nasičeno prometno stanje in pripadajoča hitrostna omejitev

Figure 4-4: Speed limit for Traffic state 2

Naslednjih nekaj minut je prometno stanje ostalo nasičeno z vmesnim eno-minutnim prehodom na nestabilno prometno stanje kot posledica neenakomernega speljevanja znotraj zastoja in nekonstantnih prostorskih razmakov med vozili. Ob 13:41 je sistem javil zgoščeno

prometno stanje s hitrostno omejitvijo 50 km/h. Ker se je premikajoča zapora zaradi košnje že oddaljila od lokacije portala SPIS 02L in operater ni več obveščal o zapori prehitevalnega pasu, je sistem na grafični prikazovalnik SPIS 02L avtomatsko namestil prometno vsebino za primer zgoščenega prometnega stanja. Operaterjem so bila namreč podana navodila, da v primeru dveh izrednih dogodkov, voznike obveščajo o tistem, na katerega tekom vožnje naletijo najprej: v tem primeru je to kolona zaustavljenih vozil.



Slika 4-5: Obveščanje v primeru zgoščenega prometnega stanja

Figure 4-5: VMS content for Traffic state 4

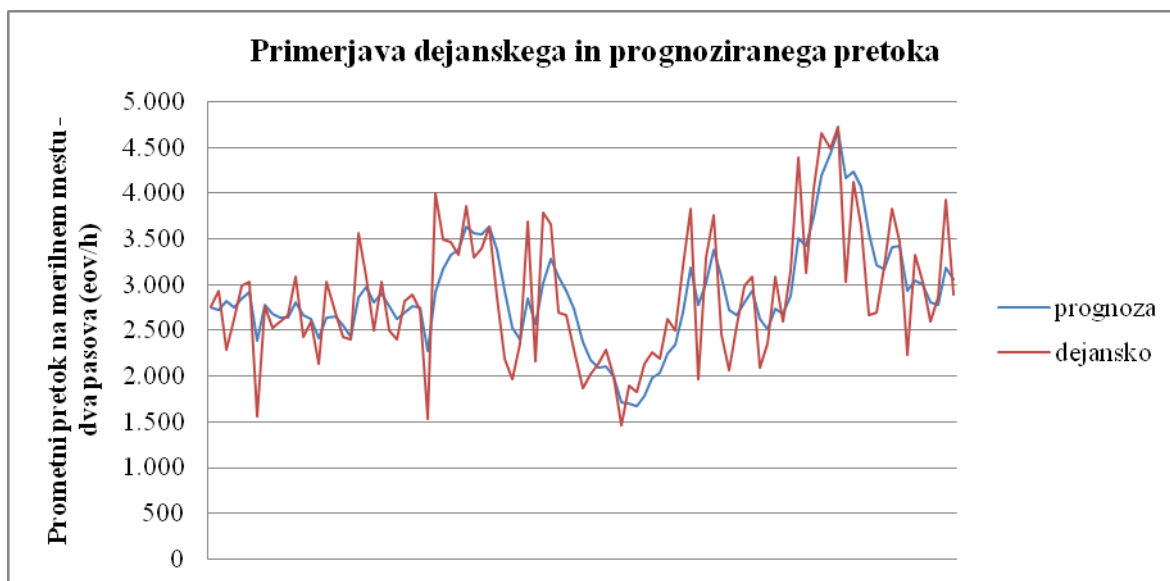
Hitrosti so kot posledica premikajočega sotočno lociranega zastoja v naslednjih 15-minutah skokovito padle in dosegle povprečno vrednost 25 km/h. Ker prometni model sistema za nadzor in vodenje prometa v primeru zgoščenega prometnega stanja (hitrosti pod 40 km/h) predvidi splošno prometno vsebino predstavljeno predhodno, je operater v primeru padca hitrosti na portal ročno namestil prometno vsebino, ki voznike obvešča o zastoju.



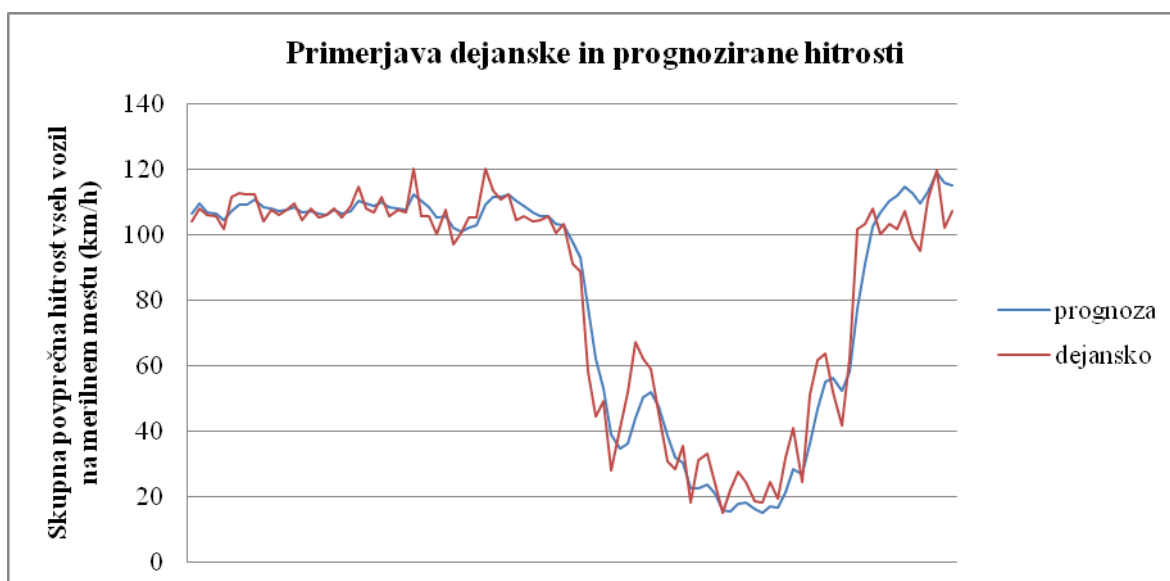
Slika 4-6: Ročno nameščena vsebina za zastoj

Figure 4-6: VMS content set manually

Primerjava dejanskih in prognoziranih vrednosti pretoka in hitrosti nam pokaže učinkovitost delovanja prognoze.



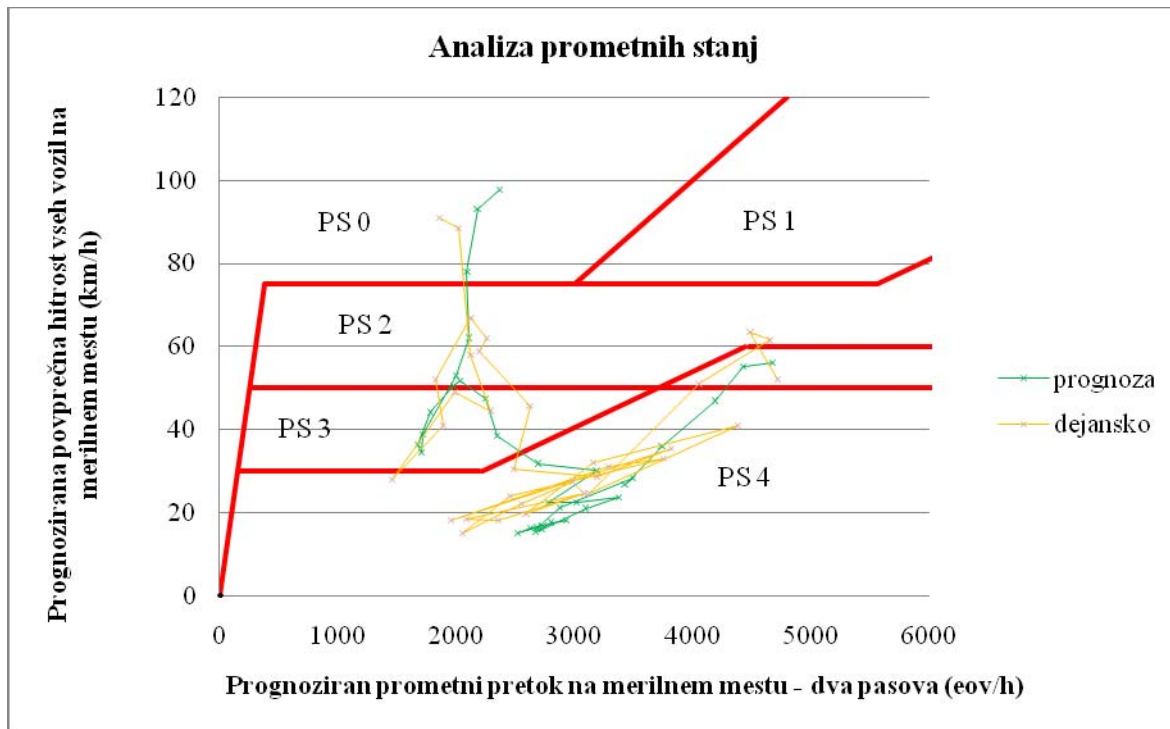
Grafikon 4-1: Dejanski in prognoziran pretok
Diagram 4-1: Actual and forecasted traffic flow



Grafikon 4-2: Dejanska in prognozirana hitrost
Diagram 4-2: Actual and forecasted speeds

V nadaljevanju je prikazana primerjava med dejanskim doseženim prometnim stanjem na podlagi števnih podatkov iz mikrovalovnih detektorjev in prometnim stanjem določenim v prometnem modelu sistema za nadzor in vodenje prometa v času največjih prometnih obremenitev (od 13:25 do 14:00). Iz zaporednega gibanja prometnih količin v odvisnosti od

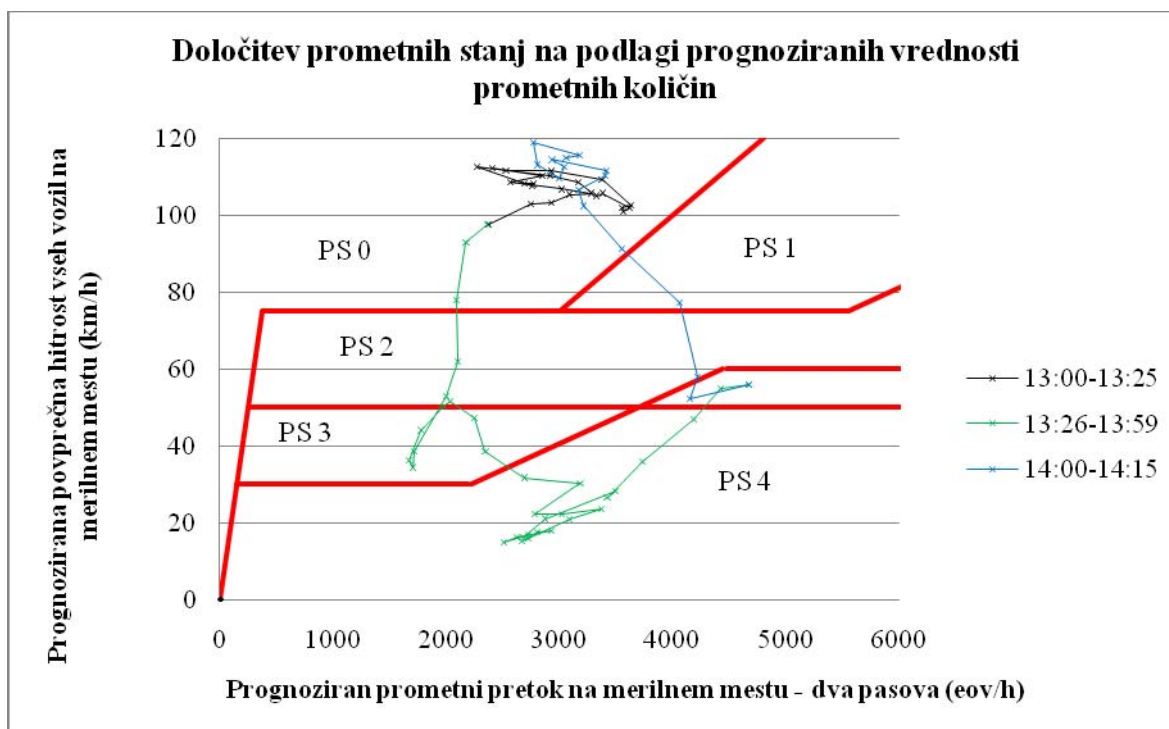
časa je razvidna dobra prognoza prometnega stanja in učinkovito glajenje dejanskih vrednosti, s čimer so dosežena manjša nihanja v določevanju prometnih stanj.



Grafikon 4-3: Primerjava dejanskih doseženih prometnih stanj in tistih določenih v prometnem modelu na podlagi prognostičnih vrednosti

Diagram 4-3: Traffic state determination on the basis of actual and forecasted values

Po koncu premične delovne zapore zaradi košnje, se je prometno stanje ob 13:58 počasi začelo izboljševati. Prometno stanje je iz zgoščenega preko nasičenega (PS 3) in stabilnega (PS 1) ob 14:07 ponovno prešlo na normalno (PS 0). Na naslednjem grafu je prikazano gibanje prometnih količin in določevanje prometnih stanj tekom premične zapore prehitevalnega pasu zaradi košnje za celoten časovni interval (od 12:30 do 14:15).



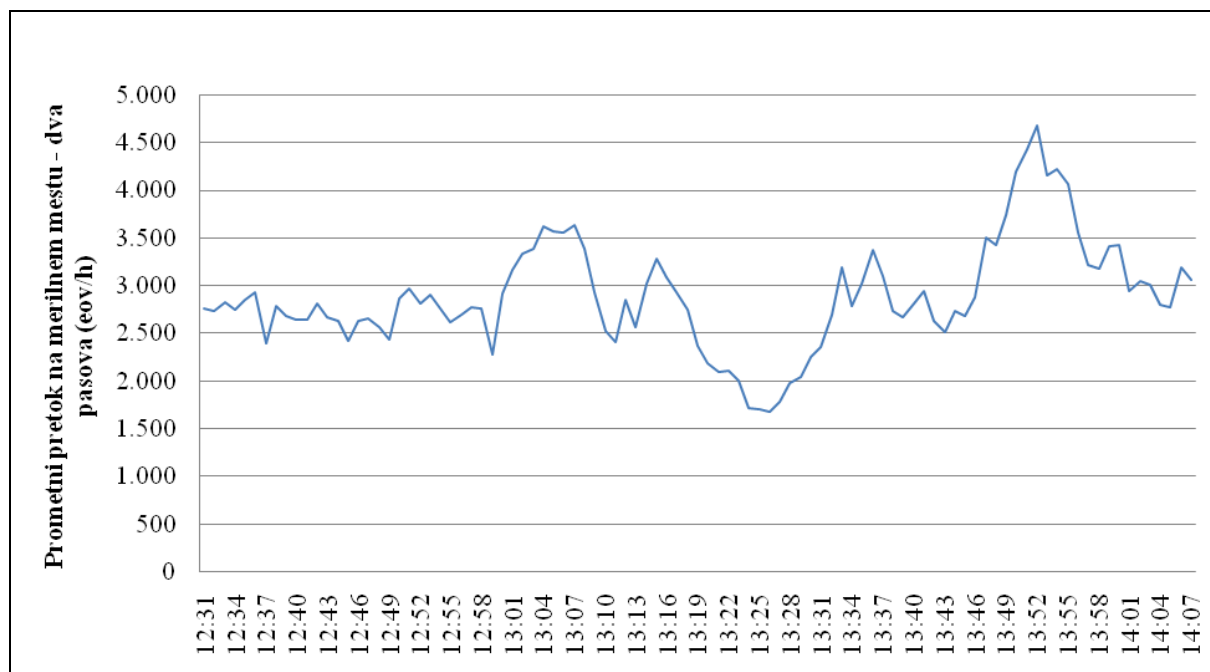
Grafikon 4-4: Gibanje prometnih količin in pripadajoča prometna stanja
Diagram 4-4: Movement of the traffic parameters and belonging Traffic state



Slika 4-7: Zgoščeno prometno stanje
Figure 4-7: Traffic state 4

Zaključek

Analiza določevanja prometnih stanj v primeru premočne zapore zaradi košnje je pokazala optimalno odzivanje prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa na skokovite nenadne spremembe prometnih parametrov. S pomočjo vodenja prometa preko grafičnih prikazovalnikov SPIS smo na podlagi predlaganih ukrepov prometnega modela homogenizirali prometni tok in s pomočjo primernih hitrostnih omejitev omogočili maksimalno prepustnost avtocestnega odseka glede na dane razmere v prometnem toku, kar je razvidno iz naslednjega grafikona: med 13:30 in 13:55 je opažena povečana prepustnost avtocestnega odseka.



Grafikon 4-5: Nihanje prometnega pretoka

Diagram 4-5: Traffic flow oscillation

4.7.2 Vodenje prometa ob velikih prometnih obremenitvah

Uvod

V nasprotju s prvim in tretjim primerom evalvacije vodenja prometa glede na prometna stanja predstavljenima v delu, ki sta posledica redukcije števila pasov zaradi del na cesti, je v tej

analizi predstavljeno odzivanje prometnega modela na vsakodnevne konične obremenitve na zahodni ljubljanski obvoznici. Na zahodni ljubljanski obvoznici so opazna izrazita dnevna nihanja prometnega toka. Največji prometni pretoki iz smeri razcepa Kozarje proti severni ljubljanski obvoznici so doseženi ob jutranjih konicah med 6:30 in 8. uro, pri čemer prednjačijo ponedeljki.



Slika 4-8: Jutranja konica na zahodni ljubljanski obvoznici (SPIS 03L)

Figure 4-8: Morning peak on Ljubljana west ring

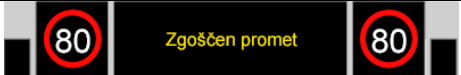
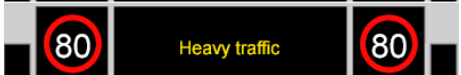
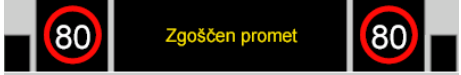
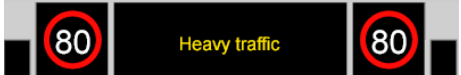
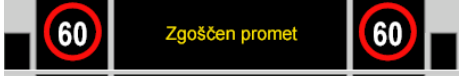

Vodenje prometnega toka na podlagi prognoziranega ekvivalentnega prometnega pretoka in prognozirane skupne povprečne hitrosti vseh vozil na merilnem mestu je glavna funkcija prometnega modula sistema za nadzor in vodenje prometa. Na podlagi teh dveh prometnih parametrov se izračunava prognozirana vrednost gostote prometnega toka. Kriteriji določitve prometnih stanj temeljijo na podlagi primerjave prognozirane skupne povprečne hitrosti vseh vozil na merilnem mestu in prognozirane vrednosti gostote prometnega toka z vnaprej določenimi mejnimi vrednostmi teh dveh količin, ki določata meje med prometnimi stanji.

Namen prognoze trenda osnovnih prometnih količin je zmanjšati vplive nenadnih nihanj. Slaba stran prognoze prometnih količin, pa je dokaj počasno odreagiranje na izredni dogodek, v primeru, ko ne gre za naključno nihanje. Zato ima operater ključen pomen v upravljanju

sistema za nadzor in vodenje prometa, saj je na podlagi pregleda slike iz video nadzornih kamer zmožen v relativno kratkem času identificirati izredni dogodek in ustrezno ukrepati s posredovanjem potrebnih informacij vozniku.

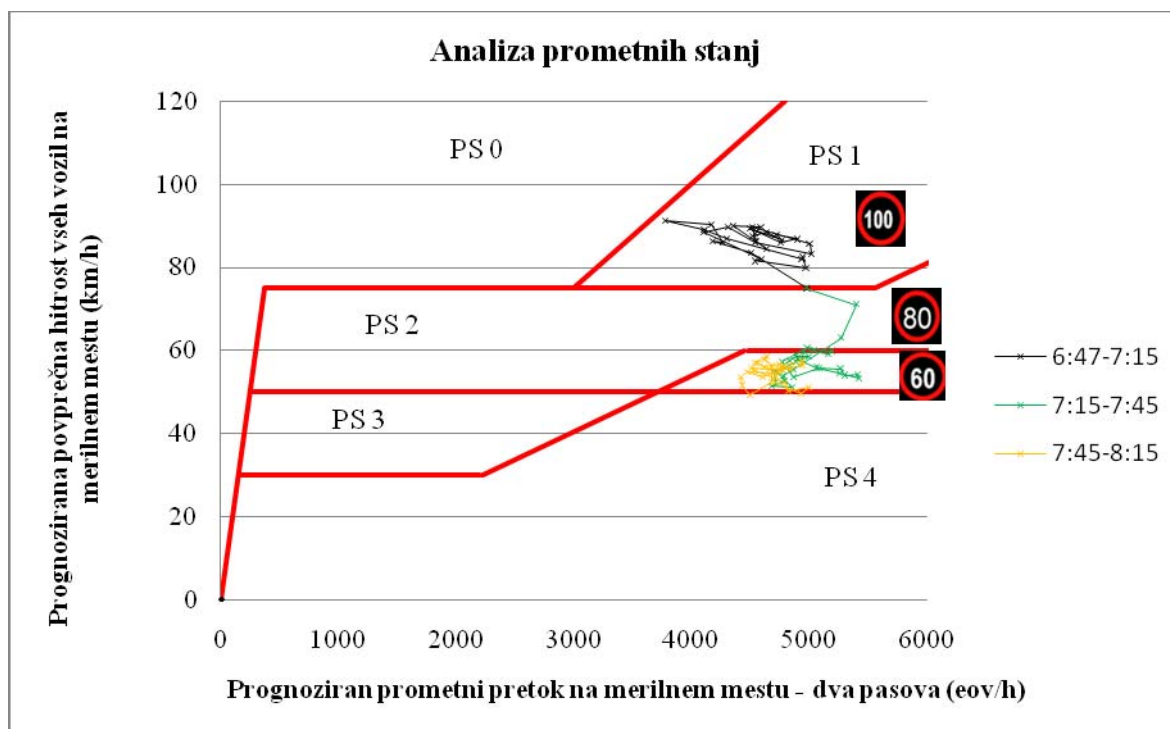
Analiza

Analiza spreminjanja prometnih parametrov in odziv prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa je bila opravljena za ponedeljek 31. marca 2008, med 6:45 in 8:15 na lokaciji portala SPIS 02L, kjer je bila zaradi t.i. »šikane« hitrost omejena na 80 km/h. V grafu prometnih stanj je prikazano spreminjanje od stabilnega preko nestabilnega do zgoščenega prometnega stanja. Natančnejša analiza podatkov pokaže, da je bilo že pred 6:45 doseženo stabilno prometno stanje (PS 1), ki ob 7:15 preide v nestabilno prometno stanje (PS 2) in nato kot posledica nadaljevanja padanja hitrosti ob 7:18 v nasičeno prometno stanje (PS 3).

Prometno stanje	Pripadajoča prometna vsebina
PS 1*	
	
PS 2	
	
PS 3	
	

Slika 4-9: Prometno stanje in pripadajoča prometna vsebina (* zaradi specifičnosti odseka je bila hitrost omejena na 80 km/h)

Figure 4-9: Traffic state and VMS content

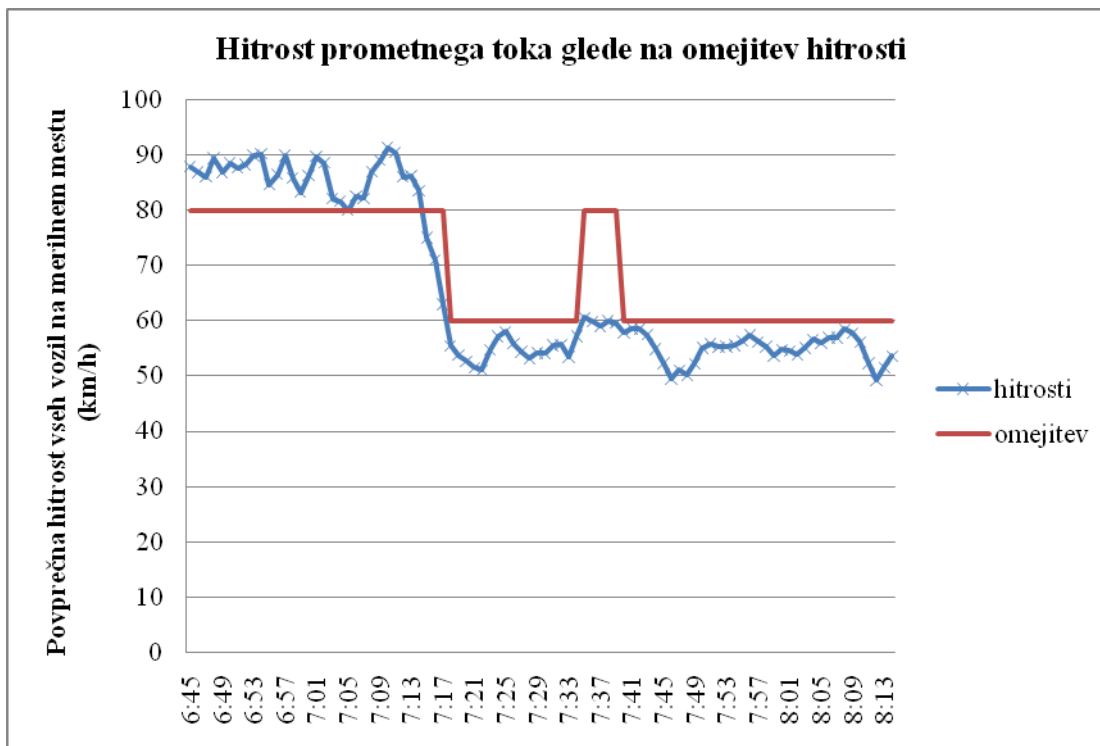


Grafikon 4-6: Gibanje prometnih količin in pripadajoča prometna stanja

Diagram 4-6: Movement of the traffic parameters and belonging Traffic state

V nadaljevanju je prikazana analiza povprečne hitrosti prometnega toka v odvisnosti od hitrostnih omejitev prikazanih na grafičnem prikazovalniku SPIS 02L. Iz grafa je razvidno gibanje hitrosti v odvisnosti od hitrostnih omejitev prikazanih na grafičnem prikazovalniku SPIS 02L. Hitrostna omejitev na območju »šikane« je bila omejena na 80 km/h. Hitrost 80 km/h predstavlja optimalno hitrost za doseganje največjega pretoka kot predstavljeno v tuji literaturi. Prometni tok je v obdobju stabilnega prometnega stanja (PS 1) dosegal vrednosti med 80 km/h in 90 km/h. Ob 7:15 je hitrost padla pod 80 km/h, po treh minutah (ob 7:18) pa celo pod 60 km/h. Hitrostne omejitve v vmesnem obdobju (prehajanje hitrosti med 80 km/ in 60 km/h) se v sistemu niso spreminjale, saj je bil namen voznike vzpodbuditi k hitrejši vožnji, s čimer je bila želja hitrost prometnega toka ponovno približati 80 km/h. Hitrost je kljub zelenemu pospeševanju še naprej padala vse tja do vrednosti 50 km/h. Ker je voznikom nesmiselno prikazovati nerealno visoke omejitve hitrosti glede na dejansko hitrost, je sistem odreagiriral s hitrostno omejitvijo 60 km/h. Prometni tok je začel ponovno pospeševati vse tja do vrednosti 60 km/h, meja med PS 2 in PS 3 je (poleg upoštevanja faktorja gostote) namreč ravno pri 60 km/h. Ko je hitrost prometnega toka ponovno narasla nad 60 km/h (ob 7:38) je

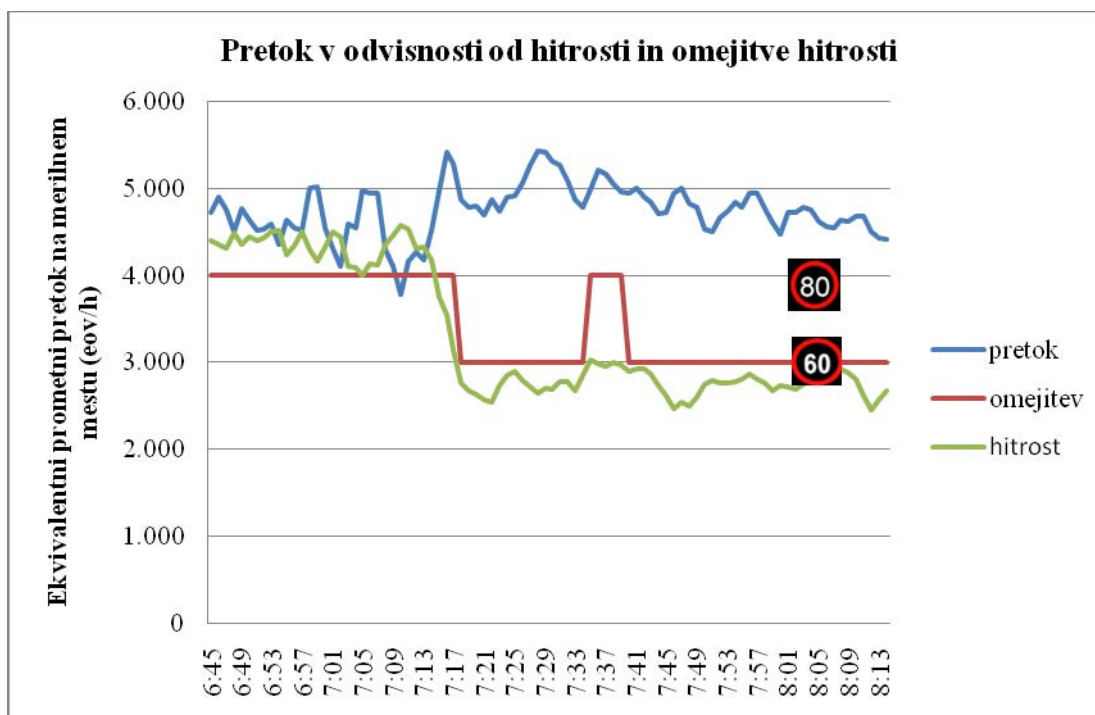
sistem odreagiral s hitrostno omejitvijo 80 km/h, vendar je hitrost po dveh minutah (ob 7:40) ponovno padla pod 60 km/h. Vzrok temu bi bili lahko sotočno ležeči zastoji, ki so onemogočili, da bi prometni tok pospešil na optimalno hitrost 80 km/h.



Grafikon 4-7: Hitrost prometnega toka glede na omejitev hitrosti

Diagram 4-7: Average speed versus speed limit

Predhodno trditev o sotočno ležečih zastojih deloma potrjuje tudi graf pretoka v odvisnosti od hitrosti in omejitev hitrosti. Kljub temu da je sistem s hitrostno omejitvijo 80 km/h želel prometni tok pospešiti na optimalno raven, ki bi omogočila največji izkoristek med pretokom in kapaciteto, je hitrost pri relativno konstantnem pretoku padla pod 60 km/h, kljub temu, da je bila hitrost predhodno pri enakem pretoku blizu 100 km/h. Predhodno opisano nakazuje na možnost pojavljanja zastojev sotočno.



Grafikon 4-8: Pretok v odvisnosti od omejitve hitrosti

Diagram 4-8: Traffic flow versus speed limit

Zaključek

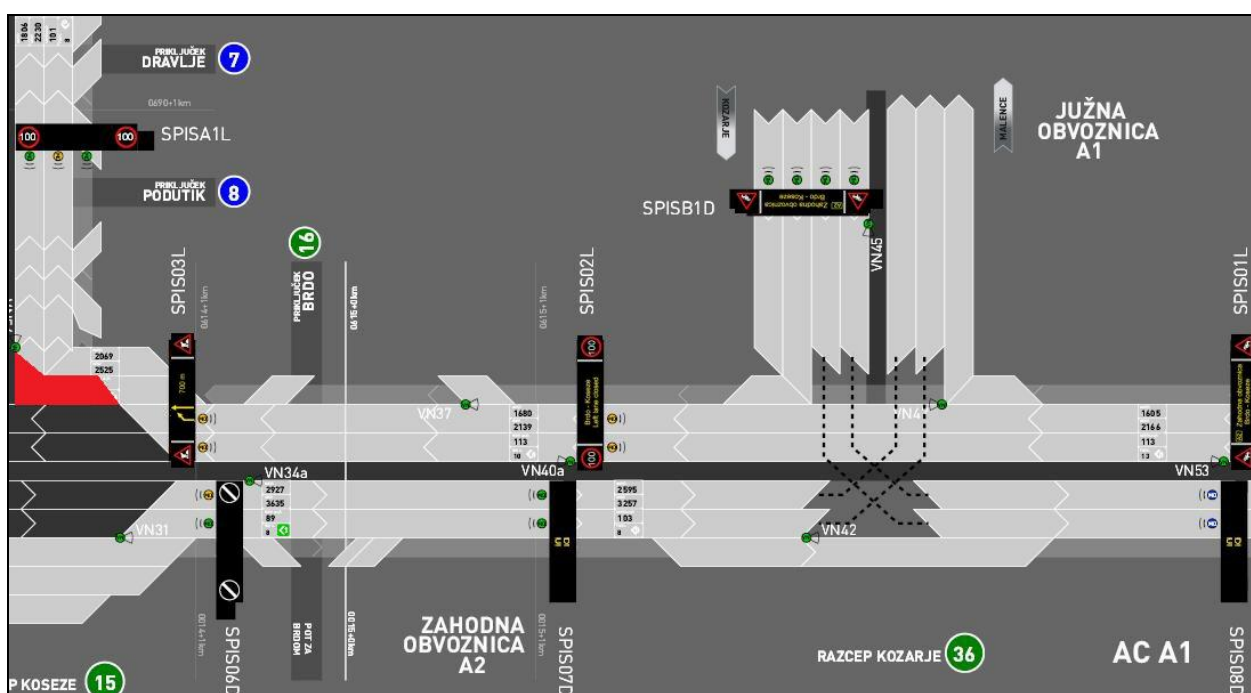
V primeru nastanka zastojev ali zgoščenega prometnega toka sotočno, prometni model sistema za nadzor in vodenje prometa kljub zelenemu pospeševanju prometnega toka ne doseže svoje največje učinkovitosti. Problem je v temu, da je skozi presek nemogoče spraviti več prometa kot je kapaciteta sotočno ležečega odseka. V takem primeru je potrebno ročno ukrepanje operaterja sistema za nadzor in vodenje prometa, ki z omejevanjem hitrosti protitočno doseže, da na mesto zastoja pride kar se le da homogen in umirjen prometni tok. Ukrepi umirjanja in vodenja prometa morajo tako segati več kilometrov protitočno od mesta nastanka zastoja oz. zgostitve prometnega toka.

Do zgoraj opisanega primera je predhodno (pred odprtjem predora Šentvid) pogosto prihajalo v jutranjih konicah pri prehodu iz zahodne na severno obvoznico, ki je s svojimi številnimi izvoznimi rampami (izvozne rampe na Podutiško, Vodnikovo in Celovško cesto) predstavljala mesto nastanka zastojev.

4.7.3 Vodenje prometa ob pojavu zastoja zaradi kratkotrajne redukcije števila pasov

Primer evalvacije prometnega modula sistema za nadzor in vodenje prometa in njegovo fazno odzivanje je prikazano na konkretnem primeru izrednega dogodka, ko je bil zaradi del na cesti krajši časovni interval zaprt prehitevalni pas. Prometni modul sistema za nadzor in vodenje prometa je z določitvijo prometnih stanj na podlagi vhodnih prometnih parametrov s terena operaterju služil kot podpora pri odločitvah o vodenju prometa, predvsem pri omejevanju hitrosti v času nastanka zastoja protitočno od začasne redukcije pasov.

Delovna zapora prehitevalnega pasu v dolžini 150 m zaradi menjave odbojne ograje na prehitevalnem pasu, je potekala 21. aprila 2008 med 11:17 in 13:12 uro. Promet je v času zapore potekal samo po voznem pasu.

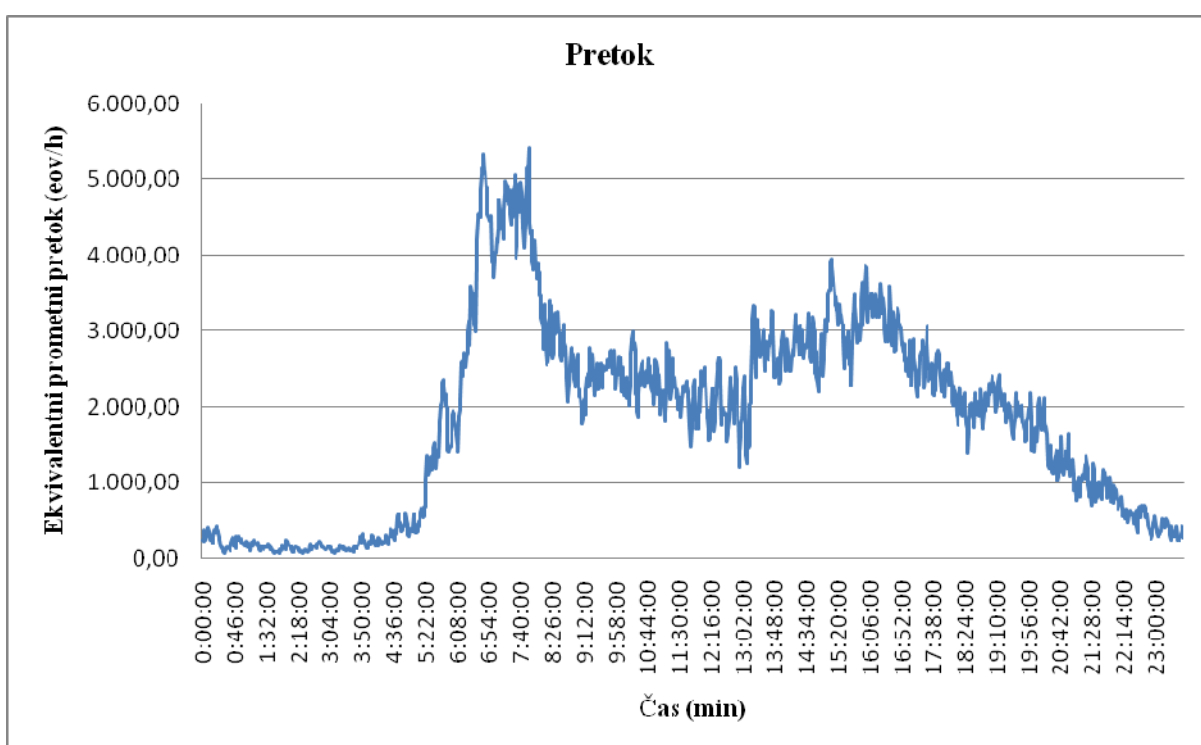


Slika 4-10: Shematski prikaz trase z vrisano lokacijo kratkotrajne zapore prehitevalnega pasu (označeno z rdečo) in pripadajoče prometne vsebine za obveščanje voznikov v primeru izrednega dogodka (delo na cesti) v fazi zastoja

Figure 4-10: Location of short-term lane reduction due to road works

Nulto stanje: stanje pred postavitvijo zapore

Izbor primerne časa obdobja za izvajanje kratkotrajnih cestnih zapora zaradi del na cesti je ključnega pomena za zmanjšanje možnosti nastanka zastojev v fazi začasne redukcije števila pasov. Iz grafikona nihanj pretoka znotraj dneva (grafikon 4.1) je razvidno, da je najbolj primeren čas za postavitev zapora med 11. in 13. uro, torej v času, ko je bila zapora dejansko tudi izvedena. V tem času pretoki dosežejo vrednosti med 1200 in 2800 eov/h na merilno mesto.



Grafikon 4-9: Nihanje pretoka znotraj dneva na območju SPIS 03L za dan 21.4.2008

Diagram 4-9: Flow oscillation for the 24-hour period

Prometni pretoki (preračunani na urno vrednost) pred vzpostavitev zapora so dosegali vrednosti okoli 2200 eov/h, prometni modul sistema za nadzor in vodenje prometa je javljal stabilno prometno stanje (PS 0). Povprečne hitrosti vseh vozil na lokaciji pred zaporo so se gibale okoli 95 km/h kljub statični hitrostni omejitvi na grafičnem prikazovalniku SPIS 03L - 80 km/h. Vozniki v stabilnem prometnem stanju vozijo z maksimalnimi še dopustnimi hitrostmi glede na dejanske razmere v prometnem toku ne oziraje se na hitrostne omejitve.

Na grafičnih prikazovalnikih spremenljive prometno-informativne signalizacije so bile nameščene prometne vsebine t.i. nultega ali osnovnega stanja (slike 4-11 – 4-13):



Slika 4-11: Prometna vsebina na SPIS 01L, B1D in 02L-datum in ura
Figure 4-11: Variable Message Sign contents on VMSs 01L, B1D and 02L



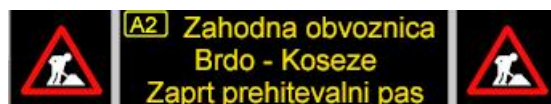
Slika 4-12: Prometna vsebina na SPIS 03L - območje »šikane«
Figure 4-12: Variable Message Sign content on VMS 03L



Slika 4-13: Prometna vsebina na SPIS A1L
Figure 4-13: Variable Message Sign content on VMS A1L

Nastanek zastoja zaradi redukcije števila pasov

S postavljanjem zapore so začeli ob 11:17. Operater v nadzornem centru je na portale SPIS namestil naslednje prometne vsebine (slike 4-14 – 4-17) za obveščanje o delu na cesti in zaprtem prehitevalnem pasu:



Slika 4-14: Prometna vsebina na SPIS 01L in B1D lociranih pred razcepom Kozarje (SPIS B1D je zaradi statične omejitve hitrosti pred razcepom Kozarje prikazoval še omejitev hitrosti 80 km/h)

Figure 4-14: Variable Message Sign contents on VMSs 01L in B1D



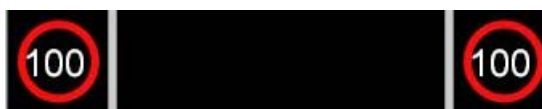
Slika 4-15: Prometna vsebina na SPIS 02L

Figure 4-15: Variable Message Sign content on VMS 02L



Slika 4-16: Prometna vsebina na SPIS 03L

Figure 4-16: Variable Message Sign content on VMS 03L



Slika 4-17: Prometna vsebina na SPIS A1L – grafični prikazovalnik lociran po koncu del na cesti

Figure 4-17: Variable Message Sign content on VMS A1L

Operater je preko grafičnih prikazovalnikov spremenljive-prometno informativne signalizacije voznike že pred razcepom Kozarje iz smeri Brezovice in južne ljubljanske obvoznice obvestil o izrednem dogodku (delo na cesti) z navedbo makro lokacije (A2 Zahodna obvoznica) in mikro lokacije (Brdo-Koseze), podrobnim opisom (Zaprta prehitevalni pas) ter prikazom prometnega znaka za delo na cesti. Voznike, ki se približujejo mestu nastanka izrednega dogodka in so že na odseku, kjer so dela locirana (SPIS 02L), obveščamo le z navedbo makro lokacije (Brdo-Koseze) in opisom (Zaprta prehitevalni pas) ter prikazom prometnega znaka za delo na cesti, ki se izmenjuje s hitrostno omejitvijo. Zadnji grafični prikazovalnik SPIS pred lokacijo del na cesti (SPIS 03L) ima nalogo obveščanja voznikov o preusmeritvi iz prehitevalnega na vozni pas in prikazom prometnega znaka za delo na cesti z ustrezno hitrostno omejitvijo.

Operater v nadzornem centru je na na dveh zaporednih grafičnih prikazovalnikih, lociranih pred začasno redukcijo pasov zaradi del na cesti postopoma omejeval hitrost in s tem zmanjšal možnost naleta.

Zaradi zapore prehitevalnega pasu in posledično prevoznosti samo voznega pasu je prišlo do zmanjšanja kapacitete ceste na odseku, kjer so bila locirana kratkotrajna dela na cesti. Prometni pretok 2300 eov/h, ki je predhodno potekal po dveh pasovih, voznem in prehitevalnem, je zaradi zapore prehitevalnega pasu sedaj potekal le po voznem pasu. Raziskave v HCM-u priporočajo, da se za območja kratkotrajnih del (pomična zapora) vzame kapaciteta 1.600 eov/h/pas, neglede na razmere, kakšna je konfiguracija gradbišča (2000). Za nekatere vrste konfiguracij naj bi bila kapaciteta celo nekoliko višja. Ena izmed osnovnih razlik med dolgotrajnimi in kratkotrajnimi vrstami del na cesti je razlika v načinu zavarovanja gradbišča. Za dolgotrajna dela na cesti se uporabljajo premične betonske ovire, za kratkotrajna dela pa stožci in premični stebrički.

Naslednjih nekaj minut od postavitve zapore je prometni tok na merilnem mestu na portalu SPIS 03L, oddaljenem od mesta redukcije pasov 700 m, potekal nemoteno. Pretok je ostal konstanten, zanimivo pa je, da je hitrost na portalu SPIS 03L padla iz 105 na 90 km/h, kljub enaki hitrostni omejitvi na grafičnem prikazovalniku pred in po postavitvi zapore. Hitrost na območju portala SPIS 03L je namreč zaradi » šikane« že v osnovnem stanju omejena na 80 km/h. Dejansko zmanjšanje gre najbrž pripisati prometnemu znaku za delo na cesti in dopolnilni tabli o preusmeritvi prometnega toka na vozni pas, ki ju vozniki dojamejo kot bolj restriktivno.



Slika 4-18: Prikaz prometne vsebine v osnovnem stanju in po vzpostavitvi zapore

Figure 4-18: Variable Message Sign contents before and during the road works

Zaradi redukcije števila pasov na mestu kratkotrajne zapore je prišlo do gortočnega efekta udarnega vala, ki je ob 11:23 dosegel lokacijo portala SPIS 03L, kar so naprave za detektiranje prometnih parametrov (mikrovalovni detektorji) zaznale kot skokovit padec hitrosti. V časovnem intervalu med 11:23 in 11:30 je povprečna hitrost vseh vozil na lokaciji portala SPIS 03L padla za 72 km/h, iz 91,5 km/h na 19,5 km/h. Prometni modul sistema za nadzor in vodenje prometa je na podlagi prognoziranih vrednosti hitrosti in gostote določil pripadajoče prometno stanje, na podlagi katerega je operaterju preko grafičnega vmesnika predlagal spremembo hitrostnih omejitev.

Opomba: Sistem za nadzor in vodenje prometa na podlagi prognoziranih prometnih podatkov (prognozirana povprečna hitrost vseh vozil in prognozirana gostota) določa prometna stanja. Sistem za nadzor in vodenje prometa operaterju v primeru preseženih mejnih vrednosti javi pripadajoče prometno stanje in mu predlaga ustrezne ukrepe vodenja prometa preko portalov spremenljive prometno-informativne signalizacije. Ukrepi vodenja prometa glede na različna prometna stanja obsegajo hitrostne omejitve v kombinaciji s prometnim znakom za zastoj in po potrebi dopolnilno tablo, ki voznike obvešča o zgoščenem prometu (več v predhodnem poglavju Določitev stopnje prometnega stanja). Ker sistem za nadzor in vodenje prometa sprejema odločitve le na podlagi spremembe prometnih parametrov je vnos vrste izrednega dogodka (v tem primeru delo na cesti, v splošnem tudi npr. nesreča...) v pristojnosti operaterja. S tem je mišljena predvsem namestitvev prometnih vsebin (prometnega znaka in dopolnilne table).

Preglednica 4.1: Spreminjanje dejanskih vrednosti hitrosti, gostote in pretoka na lokaciji SPIS 03L v času nastanka zastoja

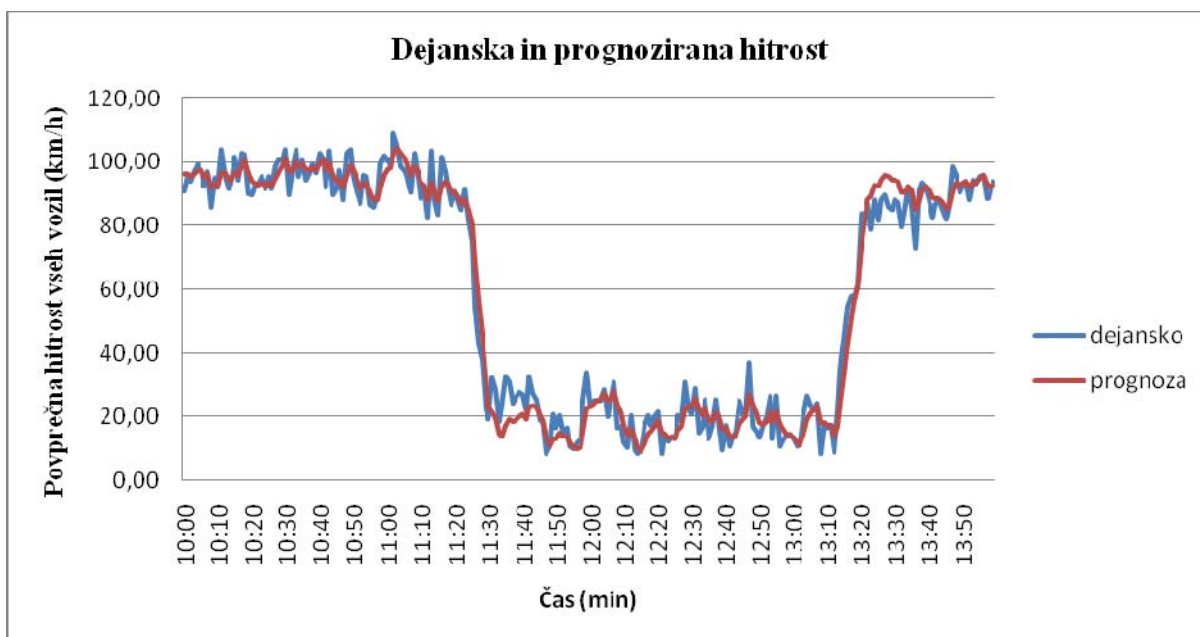
Table 4.1: Speed, density and traffic flow during the traffic jam

Čas	V (km/h)	G (eov/km)	Q (eov/h)
11:23	91	25	2.160
11:24	81	27	2.625
11:25	75	26	1.927
11:26	54	28	2.061
11:27	43	31	2.127
11:28	38	36	2.426
11:29	22	42	1.960
11:30	19	48	1.795

Preglednica 4.2: Spreminjanje prognoziranih vrednosti hitrosti, gostote in pretoka ter prometnih stanj na lokaciji portala SPIS 03L v času nastanka zastoja

Table 4.2: Forecasted values of speed, density and traffic flow during the traffic jam

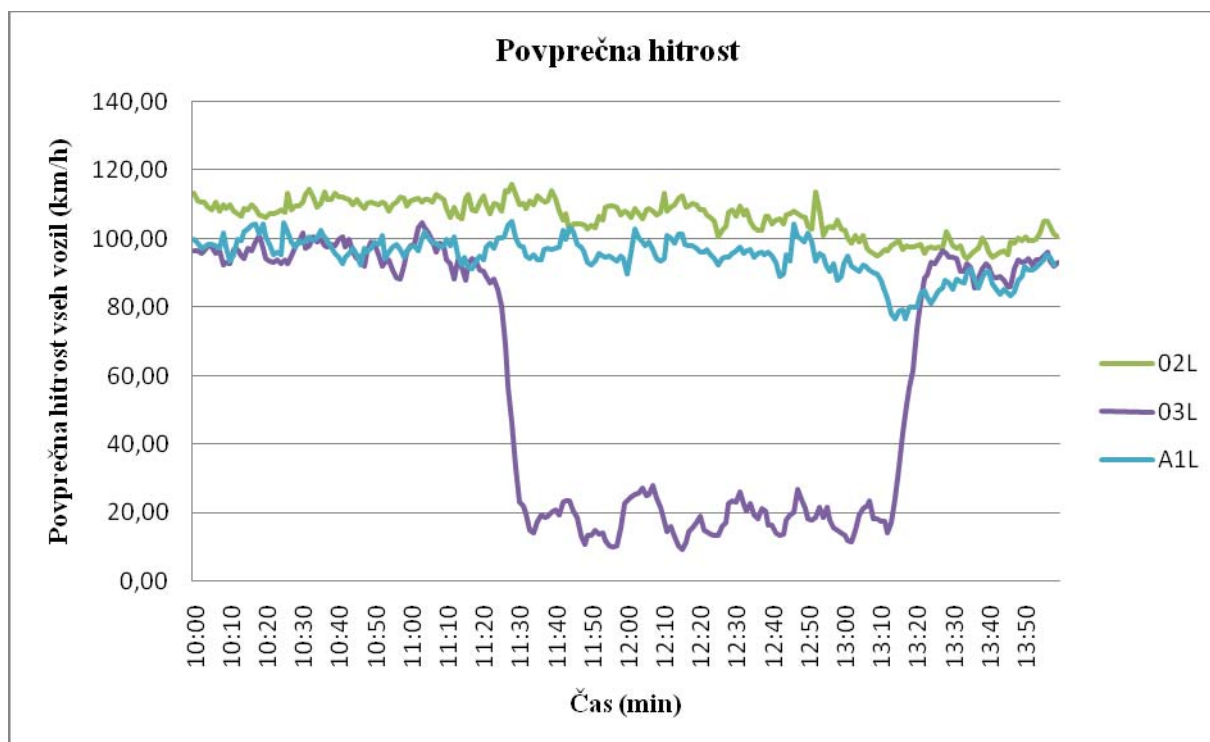
Čas	V _{prog} (km/h)	G _{prog} (eov/km)	Q _{prog} (eov/h)	Prometno stanje
11:23	88	26	2.243	PS0
11:24	85	26	2.386	PS0
11:25	80	26	2.206	PS0
11:26	68	27	2.135	PS2
11:27	56	29	2.113	PS2
11:28	46	32	2.219	PS3
11:29	33	37	2.108	PS3
11:30	23	42	1.966	PS4



Grafikon 4-10: Primerjava dejanske in prognozirane povprečne hitrosti vseh vozil na lokaciji SPIS 03L

Diagram 4-10: Actual and forecasted speed values

Zaradi skokovitega padca hitrosti, je sistem za nadzor in vodenje prometa odreagirjal s spremembo prometnega stanja iz PS 0 (stabilno prometno stanje) v PS 2 (nestabilno prometno stanje), kar posledično pomeni omejitev hitrosti na 80 km/h. Predlagana hitrost prometnega stanja PS 2 sovpada s hitrostno omejitvijo, ki je bila na portal predhodno že nameščena ročno zaradi del na cesti, zato posredovanje operaterja ni bilo potrebno. Ker se je pri konstantnem pretoku padanje hitrosti nadaljevalo in se je s tem povečevala tudi gostota, je sistem javil nasičeno prometno stanje PS 3, ki operaterju predlaga hitrostno omejitev 60 km/h. Operater se na predlog sistema s hitrostno omejitvijo 60 km/h ni odzval. Po preteku dveh minut je zaradi padca hitrosti pod 30 km/h sistem javil zgoščeno prometno stanje PS 4, ki preko portalov spremenljive prometno-informativne signalizacije voznikom (med 0 in 50 km/h) prikazuje hitrostno omejitev 50 km/h. Operater se je na podlagi alarma za zgoščeno prometno stanje (PS 4) odzval na nastalo situacijo in na portal spremenljive prometno-informativne signalizacije vsebine namestil vsebino o delu na cesti brez hitrostne omejitve.



Grafikon 4-11: Razporeditev prognozirane povprečne hitrosti vseh vozil v odvisnosti od časa na treh zaporednih merilnih mestih (02L, 03L in A1L) v primeru izrednega dogodka na cesti (delo na cesti, zaprt prehitevalni pas)

Diagram 4-11: Distribution of forecasted speeds on subsequent locations during the road works

Hitrosti so se nato v času zapore prehitevalnega pasu na merilnem mestu portala SPIS 03L gibale med 10 km/h in 28 km/h, s povprečno vrednostjo 18 km/h, povprečen prometni pretok pa je bil tekom zapore 2030 eov/h.



Slika 4-19: Vpliv kratkotrajne zapore prehitevalnega pasu protitočno (portal SPIS 03L)

Figure 4-19: Upstream end of the traffic jam



Slika 4-20: Prikaz prometne vsebine na portalu SPIS 03L v prometnih stanjih PS 0, PS 2 in

PS 3, ter prikaz PS 4 brez hitrostne omejitve

Figure 4-20: Variable Message Signs contents during different stages of traffic jam

Opomba: Na portalu SPIS 03L je bila v celotni fazi trajanja zastoja nameščena prometna vsebina s prometnim znakom za delo na cesti. Operaterjem so bila v fazi šolanja podana navodila, da v primeru dveh izrednih dogodkov (v konkretnem primeru nastanek zastoja zaradi redukcije števila pasov kot posledica del na cesti) obveščajo o tistem izrednem dogodku, na katerega vozniki tekom vožnje naletijo najprej (v konkretnem primeru je to zastoj).

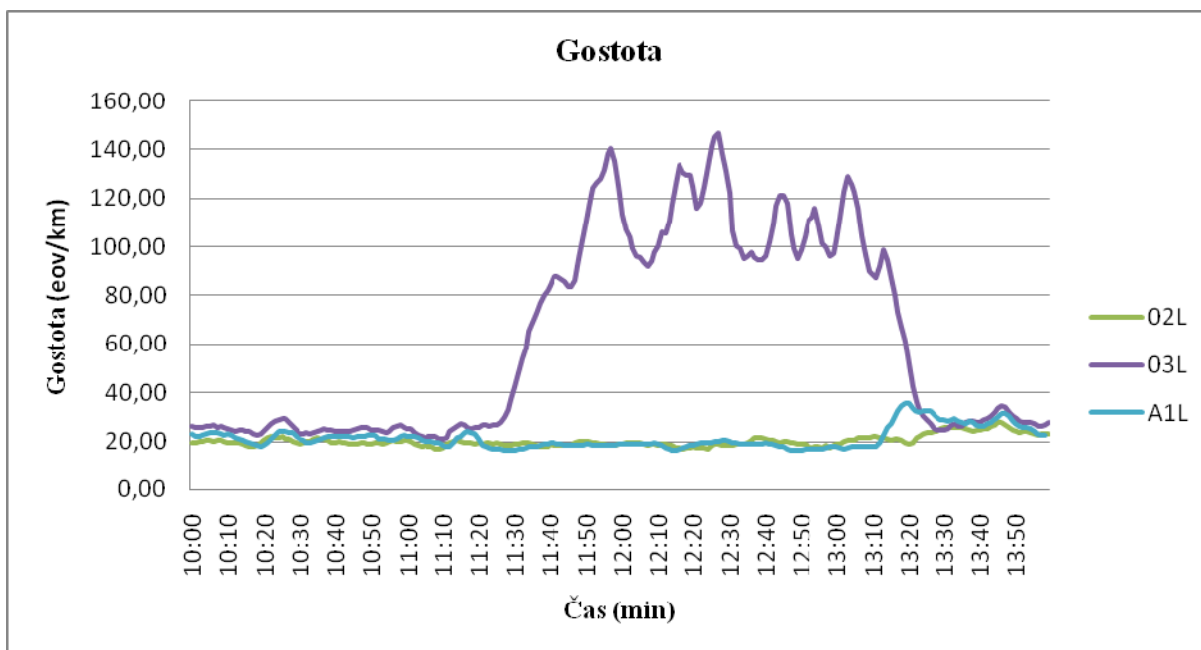
Iz grafikona gostote 4-12 je razvidno, da je par minut po postavitvi zapore in redukciji števila pasov prišlo do znantnega povečanja gostote prometnega toka na lokaciji portala SPIS 03L.

Navidezno postopno večanje gostote je posledica prognoziranih vrednosti gostote, ki v sistemu za nadzor in vodenje prometa ublažijo nenadno odreagiranje na izredni dogodek. V času zapore prehitevalnega pasu se vrednosti gostote gibljejo med 95 eov/km in 147 eov/km, s povprečno vrednostjo 110 eov/km. Zanimivo je, da po metodologiji HCM, maksimalna vrednost gostote pri zastoju znaša 120 eov/km, kar pri poenostavljenem izračunu pomeni zmanjšanje prostorskih razmakov med vozili za 1 meter v primerjavi z raziskavami v Združenih Državah Amerike (ob upoštevanju dolžine vozil v ZDA) (2000). Ta ugotovitev dokazuje predpostavko, da metodologija HCM zahteva prilagoditve za območje avtocest v Sloveniji. Ker se podatki v sistemu za nadzor in vodenje prometa zbirajo točkovno, so vrednosti in spreminjanje osnovnih parametrov prometnega toka med lokacijami merilnikov neznane. Nihanje gostote med 95 eov/km in 147 eov/km v praksi pomeni nihanje prostorskih razmakov med posameznimi vozili za približno 4 m (ob predpostavki, da so prostorski razmaki med vozili na en kilometer trase konstantni). Dejansko so ta nihanja točkovne narave, kar pomeni, da prihaja v primeru zelo nizkih hitrosti v območju zastoja (med 0 in 15 km/h) do različnih reakcij voznikov pri pospeševanju, kar je vzrok različnim vrednostim prostorskega (in časovnega) razmaka med vozili. Pravtako nihanje količine prometnega pretoka že samo po sebi vpliva na prostorski razmak med vozili.



Slika 4-21: Počasno speljevanje iz zastoja in povečani prostorski razmaki med vozili

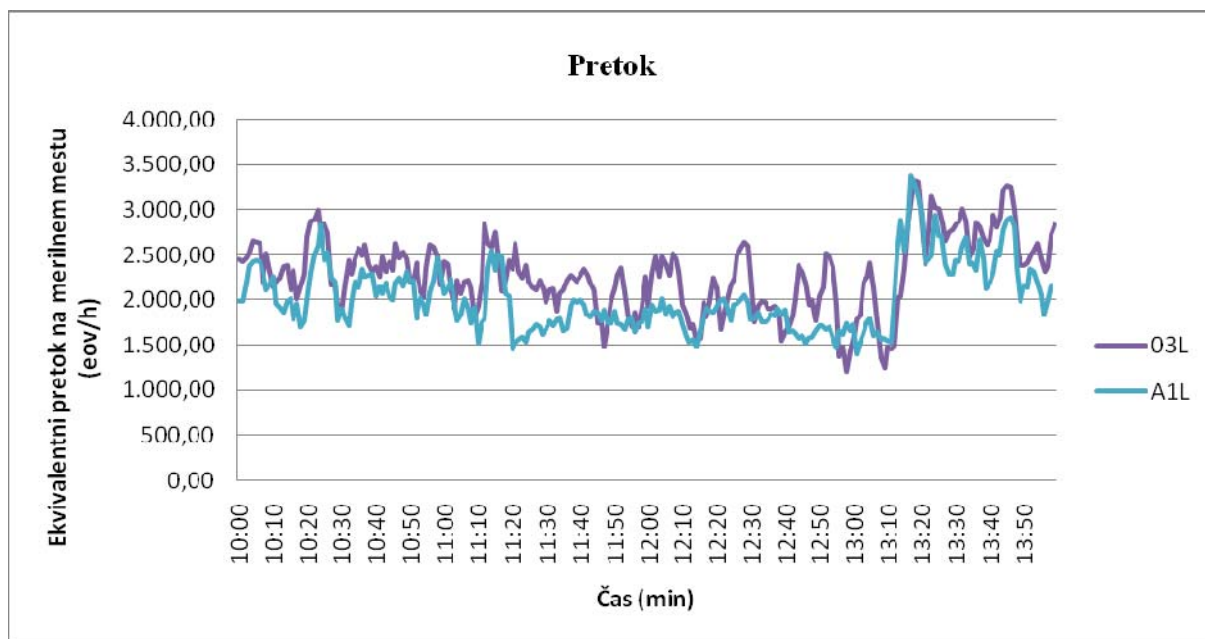
Figure 4-21: Slow acceleration out of the traffic jam



Grafikon 4-12: Gostota v odvisnosti od časa na treh zaporednih merilnih mestih (02L, 03L in A1L) v primeru izrednega dogodka na cesti (delo na cesti, zaprt prehitevalni pas)

Diagram 4-12: Distribution of density on subsequent locations during the road works

Zanimivo je to, da je prometni pretok na lokaciji SPIS 03L ostal nezmanjšan, opazna so le velika nihanja zaradi nehomogenosti prometnega toka in različnih manevrov pospeševanja, kar vodi k povečanim prostorskim razmakom med vozili. Analogno temu grafu so vidna nihanja tudi v grafu hitrosti in gostote, kot že opisano predhodno. Velika nihanja so bila v praksi še toliko bolj izrazita, ker na grafu prikazane vrednosti predstavljajo prognoziran prometni pretok, ki se na nihanja ne odzove tako skokovito.



Grafikon 4-13: Pretok v odvisnosti od časa na dveh zaporednih merilnih mestih (03L in A1L) v primeru izrednega dogodka na cesti (delo na cesti, zaprt prehitevalni pas)

Diagram 4-13: Distribution of flow on subsequent locations during the road works

Zanimivo je spremljati, kako so se razmere spreminjale protitočno od portala 03L in sotočno od zapore prehitevalnega pasu.

Na protitočnem portalu 02L, je bila od začetka zapore prehitevalnega pasu pa do začetka nastanka zastoja poleg obvestila o delu na cesti podana tudi omejitev hitrosti 100 km/h. Povprečne hitrosti vseh vozil so se v tem časovnem intervalu gibale okoli 110 km/h, kar sovпада s povprečno vrednostjo hitrosti vseh vozil na tem merilnem mestu skozi daljše časovno obdobje (omejitev hitrosti v normalnih pogojih na lokaciji portala SPIS 02L je 130 km/h).



Slika 4-22: Vpliv kratkotrajne zapore prehitevalnega pasu protitočno

Figure 4-22: Upstream end of the traffic jam

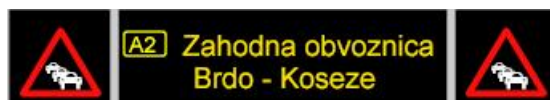


Slika 4-23: Prometna vsebina na SPIS 02L pred nastankom zastoja

Figure 4-23: Variable Message sign content before the traffic jam

Ko je na sotočni lokaciji SPIS 03L prišlo do nastanka zastoja, je operater na SPIS 02L namestil prometno vsebino, ki voznike obvešča o možnosti nastanka zastoja na odseku Brdo-Koseze s hitrostno omejitvijo 100 km/h. Vsebinska je ostala nameščena na portalu SPIS 02L vse do konca zastoja. Hitrost je kljub obveščanju voznikov o možnosti nastanka zastoja sotočno, padla le malenkostno in sicer na vrednost 105 km/h. To gre pripisati predvsem nepravilni hitrostni omejitvi (100 km/h), ki bi morala biti glede na razmere sotočno nastavljena na 60 km/h ali maksimalno 80 km/h, odvisno od dejanskih trenutnih razmer tekom zastoja (te hitrostne omejitve bi moral operater nastaviti ročno glede na stanje na sotočno lociranih grafičnih prikazovalnikih SPIS). Hitrostna omejitev 100 km/h je neprimerna z vidika umirjanja hitrosti in homogeniziranja prometnega toka, saj vozniki s hitrostne omejitve 100 km/h naleti na sotočno ležeči zastoj, kjer se hitrosti gibljejo med 10 in 30 km/h.

Operater je pravilno ukrepal pri namestitvi prometnih vsebine na SPIS 01L, B1D (pred razcepom Kozarje iz smeri Brezovice in južne ljubljanske obvoznice) (slika 4-24) pri namestitvi vsebine na SPIS 02L (slika 4-25) pa bi glede na dejanske razmere v prometnem toku moral prilagoditi hitrostno omejitvev.



Slika 4-24: Prometna vsebina na portalih SPIS 01L in B1D lociranih pred razcepom Kozarje (portal SPIS B1D je zaradi statične omejitve hitrosti pred razcepom Kozarje prikazoval še omejitvev hitrosti 80 km/h)

Figure 4-24: Variable Message Sign contents on VMSs 01L and B1D



Slika 4-25: Prometna vsebina na portalu SPIS 02L

Figure 4-25: Variable Message Sign content on VMS 02L

Opomba: Skupna povprečna hitrost na lokaciji portala SPIS 02L je bila tekom trajanja zastoja pod portalom SPIS 03L 106 km/h. Naloga operaterja v takem primeru je, da prometni tok postopoma umiri in homogenizira, kar doseže z ustreznimi hitrostnimi omejitvami. V konkretnem primeru so vozniki na razdalji manj kot 1500 m med portaloma SPIS 02L in 03L naleteli na zmanjšanje hitrosti iz 100 km/h na 20 km/h brez vmesnega omejevanja hitrosti, kar poveča možnost nastanka naleta.

Iz grafa skupne povprečne vrednosti hitrosti je razvidno, da zaradi zapore prehitevalnega pasu pri navedenih pretokih v času začasne redukcije pasov ni prišlo do udarnega vala protitočno, ki bi segal do merilnega mesta na lokaciji 02L, oddaljenega od mesta redukcije pasov 2200 m. V primeru večjih prometnih obrnenitev in posledično povečanega pretoka bi predvidoma zastoj segal protitočno proti SPIS 02L.

Na lokaciji SPIS A1L, ki leži sotočno od začasne redukcije pasov, je zaradi lokacije na hitri cesti, hitrost omejena na 100 km/h. Izračunana povprečna hitrosti na merilnem mestu A1L je skozi daljše časovno obdobje 98 km/h. Ker je merilno mesto od mesta začasne redukcije pasov oddaljeno 600 m sotočno, je prometni tok v tem času že uspel pospešiti na hitrost prostega prometnega toka, tako da vpliv začasne redukcije pasov ni segal tako daleč sotočno od zapore preHITEVALNEGA PASU. Sotočno od začasne redukcije pasov, na lokaciji portala SPIS A1L je iz grafa razvidno zmanjšanje prometnega pretoka v času zapore, do česar je prišlo zaradi zmanjšane kapacitete na območju kratkotrajnih del na cesti (prevozen samo vozni pas). Vrednosti prometnega pretoka na tej lokaciji so veliko bolj konstantne, nihanja so manj izrazita kot na portalu SPIS 03L lociranem protitočno od zapore zaradi del na cesti. To lahko pripišemo enakomernemu doziranju prometnega toka iz območja zapore.



Slika 4-26: Neenakomerno pospeševanje (speljevanje) z območja zapore

Figure 4-26: Nonuniform acceleration from the road works area



Slika 4-27: Vpliv kratkotrajne zapore prehitevalnega pasu sotočno (portal SPIS A1L)

Figure 4-27: Downstream effect of the traffic jam

Stanje po odstranitvi zapore

Po odstranitvi zapore ob 13.12 (to je čas naveden v aplikaciji Kažipot kot čas konca zapore prehitevalnega pasu) je skupna povprečna hitrost vseh vozil počasi začela naraščati. Z naraščanjem hitrosti je pri dokaj konstantnem pretoku (pri katerem so bila še vedno opazna nihanja zaradi počasnega speljevanja iz zastoja protitočno od lokacije portala SPIS 03L) začela padati tudi gostota, kar je prometni modul sistema za nadzor in vodenje prometa javil kot prehod iz zgoščenega prometnega stanja (PS 4) v nestabilno prometno stanje (PS 2). Operater se je na izboljšanje nivoja uslug odzval s spremembo prometne vsebine na portalu SPIS 03L in z namenom, da bi pospešil prometni tok, po predlogu prometnega modula sistema za nadzor in vodenje prometa, namestil prometno vsebino z omejitvijo hitrosti 80km/h in prepovedjo prehitevanja za vsa vozila (prometna vsebina osnovnega stanja). Prometni tok je z večanjem hitrosti prešel preko pogojno stabilnega prometnega stanja (PS 1) v stabilno prometno stanje (PS 0), prometna vsebina na portalu SPIS 03L pa je ostala enaka, saj je zaradi »šikanek« hitrost na tem odseku omejena na 80 km/h (preglednica 4-3).



Slika 4-28: Prometna vsebina na SPIS 03L

Figure 4-28: Variable Message Sign content on VMS 03L

Preglednica 4.3: Spreminjanje dejanskih vrednosti hitrosti, gostote in pretoka na lokaciji portala SPIS 03L po odstranitvi zapore

Table 4.3: Speed, density and traffic flow after the traffic jam

Čas	V (km/h)	G (eov/km)	Q (eov/h)
13:13	22	112	2.892
13:14	35	89	1.994
13:15	45	78	2.758
13:16	55	72	3.523
13:17	58	67	3.390
13:18	57	64	3.258
13:19	61	59	2.991
13:20	84	45	1.894
13:21	83	37	1.562
13:22	87	37	3.324
13:23	79	39	3.623

Preglednica 4.4: Spreminjanje prognoziranih vrednosti hitrosti, gostote in pretoka ter prometnih stanj na lokaciji portala SPIS 03L po odstranitvi zapore

Table 4.4: Forecasted values of speed, density and traffic flow after the traffic jam

Čas	V_{prog} (km/h)	G_{prog} (eov/km)	Q_{prog} (eov/h)	Prometno stanje
13:13	16	98	2.027	PS4
13:14	24	94	2.040	PS4
13:15	33	87	2.353	PS4
13:16	43	79	2.873	PS4
13:17	51	73	3.176	PS2
13:18	56	67	3.324	PS2
13:19	61	61	3.310	PS2
13:20	73	51	2.850	PS2
13:21	81	42	2.388	PS1
13:22	88	36	2.767	PS0
13:23	89	33	3.149	PS0

Zanimiv pa je tudi porast prometnega pretoka na lokaciji SPIS A1L po odstranitvi zapore, ko je prišlo do povečanega povpraševanja in posledično večjega pretoka, ki je skokovito narastel in celo presegel vrednosti prometnega pretoka na lokaciji SPIS 03L (ki ima v povprečju višje pretoke), vendar se je prometni tok po parih minutah stabiliziral.

Operater je na grafičnih prikazovalnikih protitočno od začasne redukcije pasov po koncu zapore prehitevalnega pasu namestil prometne vsebine osnovnega stanja, prikazane v podpoglavju Stanje pred postavitvijo zapore.

Zaključki in ugotovitve

Predhodno opisana nihanja karakteristik prometnega toka in spremembe prometnih stanj se nanašajo na konkreten primer določevanja prometnih stanj v primeru redukcije kapacitete v praksi v območju srednjih pretokov. Vplivi na prometni tok bi bili seveda v primeru večjih

prometnih pretokov veliko bolj negativni, zastoji bi se razširili protitočno do portala SPIS 02L in naprej proti razcepu Kozarje.

V primeru izrednega dogodka kot je redukcija števila pasov zaradi del na cesti, je naloga operaterja v nadzornem centru, da pravilno ukrepa in nastavi ustrezne prometne vsebine vezane na izredni dogodek (delo na cesti, prometna nesreča...) in s tem homogenizira prometni tok ter prepreči možnost nastanka zastojev in naletov. Naloga prometnega modula sistema za nadzor in vodenje prometa pa je, da operaterju v primeru izrednih dogodkov, preko merilnikov za zbiranje prometnih podatkov, zagotovi merodajne podatke s terena in mu preko določitve prometnih stanj predlaga ustrezne ukrepe omejitve hitrosti in vodenja prometa in na podlagi spremembe osnovnih prometnih količin določi vplivno območje mesta potencialnega nastanka zastoja. Operater sistema za nadzor in vodenje prometa ima ključno vlogo pri vodenju prometa, saj merilniki prometnih podatkov zbirajo podatke točkovno, vizualni pregled slike preko sistema video nadzora pa operaterju omogoča zvezni pregled nad situacijo na obravnavanem odseku.

Opisan primer je iz časa polavtomatskega delovanja prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa, kjer je moral operater v nadzornem centru vsako spremembo hitrostne omejitve glede na doseženo prometno stanje potrditi ročno. Po končani kalibraciji sistema je bilo vzpostavljeno avtomatsko spreminjanje prometnih vsebin s hitrostnimi omejitvami na grafičnih prikazovalnikih SPIS glede na izračunano prometno stanje v prometnem modelu sistema za nadzor in vodenje prometa.

5 REZULTATI

5.1 Rezultati analize

Z vodenjem prometa glede na prometna stanja na podlagi kompleksnih izračunov in logike delovanja centralnega dela sistema za nadzor in vodenje prometa, optimiziramo in homogeniziramo prometni tok do take mere, da je dosežena maksimalna izkoriščenost med povpraševanjem in kapaciteto glede na dane razmere v prometnem toku. Z maksimalno izkoriščenostjo avtocestnega odseka se zmanjšajo potovalni časi in zamude. Uporabniki avtocestnega omrežja so s pomočjo grafičnih prikazovalnikov spremenljive prometno-informativne signalizacije z ustreznim umirjanjem prometnega toka s pomočjo omejitev hitrosti, na eni strani vodeni glede na razmere v prometnem toku, na drugi strani pa so obveščeni o pojavu izrednega dogodka (povečan promet, zgoštitve, možnost nastanka zastojev), kar jim na podlagi informacij omogoča izbiro o nadaljevanju poti.

Sistem za nadzor in vodenje prometa se je v primeru izrednih dogodkov na spremembe osnovnih prometnih parametrov odzval z določitvijo pripadajočih prometnih stanj in predlaganimi ukrepi vodenja prometa z namenom umiritve in homogeniziranja prometnega toka. Sistem je tako, glede na dejanske razmere v prometnem toku predlagal ustrezne hitrostne omejitve, ki v kombinaciji z vsebinami o izrednem dogodku predstavljajo optimalen način obveščanja in vodenja voznikov v primeru izrednega dogodka na trasi.

V primeru izrednega dogodka je naloga operaterja v nadzornem centru, da pravilno ukrepa in nastavi ustrezne prometne vsebine vezane na izredni dogodek (delo na cesti, prometna nesreča..) in s tem homogenizira prometni tok ter prepreči možnost nastanka zastojev in naletov. Naloga prometnega modula sistema za nadzor in vodenje prometa pa je, da operaterju v primeru izrednih dogodkov, preko merilnikov za zbiranje prometnih podatkov, zagotovi merodajne podtakte s terena in mu preko določitve prometnih stanj predlaga ustrezne ukrepe omejitve hitrosti in vodenja prometa in na podlagi spremembe osnovnih prometnih količin določi vplivno območje mesta potencialnega nastanka zastoja. Operater sistema za nadzor in vodenje prometa ima ključno vlogo pri vodenju prometa, saj merilniki prometnih podatkov

zbirajo podatke točkovno, vizualni pregled slike preko sistema video nadzora pa operaterju omogoča zvezni pregled nad situacijo na obravnavanem odseku.

V primeru nastanka zastojev ali zgoščenega prometnega toka sotočno, prometni model sistema za nadzor in vodenje prometa kljub želenemu pospeševanju prometnega toka ne doseže svoje največje učinkovitosti. Problem je v temu, da je skozi presek nemogoče spraviti več prometa kot je kapaciteta sotočno ležečega odseka. V takem primeru je potrebno ročno ukrepanje operaterja sistema za nadzor in vodenje prometa, ki z omejevanjem hitrosti protitočno doseže, da na mesto zastoja pride kar se le da homogen in umirjen prometni tok. Ukrepi umirjanja in vodenja prometa morajo tako segati več kilometrov protitočno od mesta nastanka zastoja.

5.1.1 Procedure in organizacijski vidiki

Upravljanje s sistemom za nadzor in vodenje prometa, ki se uporablja za vodenje prometa na avtocestah v Republiki Sloveniji, je v domeni Družbe za Avtoceste v Republiki Sloveniji (DARS). S sistemom upravljajo operaterji v nadzornih centrih, lociranih v avtocestnih bazah širom po Sloveniji.

Procedure vodenja prometa in obveščanja voznikov so definirane v sami strukturi sistema za nadzor in vodenje prometa in so določene na nivoju avtomatskega in polavtomatskega delovanja sistema. Ročni ukrepi vodenja prometa glede na različne potencialno nevarne izredne dogodke na avtocestnem omrežju so v domeni operaterjev in v večini primerov temeljijo na podlagi njihove reakcije in presoje brez vnaprej določenih procedur določenih in potrjenih s strani upravljalca avtocest. Z namenom enoličnega vodenja prometa in obveščanja uporabnikov avtocestnega omrežja, bo v prihodnje potrebno določiti procedure odzivanja operaterjev na različne situacije v prometnem toku. Tu bo potrebno vzpostaviti tudi sodelovanje s policijo, ki izvaja nadzor nad prometom na sami avtocesti.

5.1.2 Vplivi na prometni tok in obnašanje voznikov

Z vodenjem prometa glede na prometna stanja na podlagi kompleksnih izračunov in logike delovanja centralnega dela sistema, optimiziramo in homogeniziramo prometni tok do take mere, da je dosežena maksimalna izkoriščenost med povpraševanjem in kapaciteto glede na dane razmere v prometnem toku. Z maksimalno izkoriščenostjo avtocestnega odseka se zmanjšajo potovalni časi in zamude. Uporabniki avtocestnega omrežja so s pomočjo grafičnih prikazovalnikov spremenljive prometno-informativne signalizacije z ustreznim umirjanjem prometnega toka s pomočjo omejitev hitrosti, na eni strani vodeni glede na razmere v prometnem toku, na drugi strani pa tudi obveščeni o pojavu izrednega dogodka (povečan promet, zgostitve, možnost nastanka zastojev), kar jim na podlagi informacij omogoča izbiro o nadaljevanju poti.

Ob spremljanju prometnega toka in njegovih karakteritik ob pojavu izrednih dogodkov je bil opažen pozitiven odziv voznikov na informacije podane preko grafičnih prikazovalnikov spremenljive prometno-informativne signalizacije. Ugotovljeno je bilo, da se vozniki različno odzivajo na omejitve hitrosti, glede na pripadajoč prometni znak, ki je postavljen v kombinaciji. Tako je bilo opaženo znatno zmanjšanje hitrosti v primeru, da je bil poleg hitrostne omejitve prikazan tudi prometni znak za prometno nesrečo, zastoj ali delo na cesti, medtem ko je bila hitrostna omejitev brez »dopolnilnega« prometnega znaka s strani voznikov v večini primerov neupoštevana.

S pomočjo vodenja prometa glede na prometna stanja je prišlo do homogeniziranja prometnega toka, kar je pomembno vplivalo na zmanjšanje zamud in potovalnih časov tako v času koničnih ur kot tudi v obdobju srednjih pretokov.

S pomočjo sistema za nadzor in vodenje prometa zmanjšamo možnost nastanka zastoja s homogeniziranjem prometnega toka s pomočjo omejevanja hitrosti, s čimer povečamo maksimalni izkoristek povpraševanja glede na kapaciteto za dane razmere v prometnem toku. Po oceni Ministrstva za promet, se družbeni produkt Slovenije vsako leto zaradi zastojev in zamud (na delovna mesta, sestanke, dobave blaga) na cesti v zadnjih desetih letih vsako leto zmanjša za okoli 4 do 6 % (leto analize 2006).

S prilagajanjem hitrosti trenutnim prometnim razmeram se doseže večja izkoriščenost cestne infrastrukture. V primeru zastoja ali možne zgojitve prometnega toka sistem opravlja funkcijo pravočasnega obveščanja voznikov že pred kritičnim odsekom, na podlagi česar se voznik lahko odloči ali bo pot nadaljeval po prvotno načrtani poti ali se bo odločil za spremembo smeri, glede na informacije o stanju na cesti. S tem se zmanjša možnost nastanka nesreč in zastojev, hkrati pa se optimalno izkoristi celotna cestna infrastruktura.

Cestnega omrežja zaradi stroškov in okoljskih vzrokov ni mogoče razširjati v nedogled. Rešitve torej ne predstavlja gradnja in razširjanje prometnih poti, temveč čim večja izkoriščenost že obstoječega avtocestnega omrežja, kar opazno lahko izboljšamo z namestitvijo sistema za nadzor in vodenje prometa.

5.1.3 Vpliv na prometno varnost

Sistem za nadzor in vodenje prometa je na ljubljanski zahodni obvoznici v obratovanju od 14. januarja 2008, kar pomeni, da je za konkretnije zaključke in analize vplivov na prometno varnost vsekakor prezgodaj. Je pa splošen odziv voznikov na svetlobno prometno signalizacijo ugoden, pravtako so bili opaženi pozitivni odzivi voznikov v primeru podajanja prometno-informativnih vsebin na grafične prikazovalnike SPIS. V primeru izrednih dogodkov je bilo opaženo umirjanje prometnega toka skladno z informacijami na grafičnih prikazovalnikih SPIS.

Upravljalca avtocestnega omrežja, DARS d.d. je v okviru analize, navedel koristi na področju prometne varnosti predstavljene v nadaljevanju (2007):

Informiranje uporabnikov o prometnem in vremenskem stanju na odseku, po katerem vozijo

S sistemom za nadzor in vodenje prometa je v realnem času mogoče opozoriti uporabnike na razmere, tako vremenske kot prometne, na cestnem odseku, na katerega bodo zapeljali. To pomeni, da se prometna varnost izboljša zaradi pravočasnega informiranja uporabnikov o stanju na cestnem omrežju. Z namenom povečanja prometne varnosti, ukrepi vodenja prometa

v kombinaciji s hitrostnimi omejitvami vozniku podajajo maksimalno dopustno hitrost (hitrostna omejitev), ki še omogoča varno vožnjo.

Umirjanje prometa

Največji vzrok prometnih nezgod je neprilagojena hitrost vozil. Z uravnavanjem hitrosti vozil, sistem za nadzor in vodenje prometa zagotovi večjo prometno varnost. Ker je sistem zmožen na osnovi vhodnih podatkov sam predlagati in obveščati voznike o primerni hitrosti, je omejevanje hitrosti lahko tudi samodejno na podlagi izračunov prometnega modula sistema za nadzor in vodenje prometa. Seveda je možno hitrost omejiti tudi ročno (operator) na podlagi vseh zaznanih posebnosti na cesti (vreme, velik delež tovornih vozil...).

Zapiranje cestnega odseka in preusmeritev prometa iz avtoceste ali na avtocesto v nekaj sekundah

V primeru izrednega dogodka je možno s sistemom takoj preusmeriti promet na drug vozni pas ali pa ga ustaviti oz. preusmeriti z avtoceste. S pomočjo portalov SPIS promet počasi umirimo (hitrostne omejitve), preusmerimo na prevozen pas ali z avtoceste na sekundarno cestno omrežje. Primerjava časa med obveščanjem in vodenjem uporabnikov s portali in pa obveščanje/vodenje uporabnikov z mobilnimi enotami (vzdrževalci) nam pokaže prednosti sistema za nadzor in vodenje prometa.

Izboljšanje prometne varnosti s pomočjo SNVP

Primer/analiza (DARS, 2007):

AC odsek: Vranksko-Blagovica (obe smeri), s predoroma Ločica in Jasovnik (razlog: omenjena predora sta bila v funkciji že pred vzpostavitvijo sistema za nadzor in vodenje prometa, zato je mogoča primerjava predhodno stanje/trenutno stanje).

V preglednici 5.1 so prikazani podatki za omenjeni AC odsek:

Preglednica 5.1: Število nesreč v povezavi z PLDP

Table 5.1: Average annual daily traffic and number of accidents

Leto	Število vozil (PLDP)	Število nesreč
2004	20.500	51
2005	22.000	34
2006	25.000	24
2004-2006	+21.9 %	-61 %

Upad nesreč je posledica obveščanja uporabnikov (voznikov) na ovire (na trasi, v predoru), kjer jih s portali spremenljive prometno-informativne signalizacije obveščamo in usmerjamo na tisti pas, ki je prevozen in na katerem ni ovire. Pred vzpostavitvijo sistema za nadzor in vodenje prometa je bilo veliko naletov vozil zaradi umika oviram (predmet, vozilo, tovor), naleta v kolono, ki je nastala zaradi ovire ter zaradi nenadne spremembe voznega pasu zaradi prepozne zazanave ovire. S sistemom za nadzor in vodenje prometa preko SPIS voznike obvestimo o lokaciji ovire in jim predhodno s kombinacijo zaporednih grafičnih prikazovalnikov omejimo hitrost.

5.2 Statistične analize

Podjetje PNZ je v okviru študije prometnih in ekonomskih osnov sistema za nadzor in vodenje prometa na ljubljanskem avtocestnem obroču izdelane za DARS simuliralo večje število izrednih dogodkov na celotnem avtocestnem obroču okoli Ljubljane in na osnovi obsežne in podrobne prometne ter ekonomske analize prišlo do naslednjih rezultatov (2008):

- Uvedba vsakodnevnih ukrepov, ki jih omogoča sistem za nadzor in vodenje prometa, bo leta 2008 v času urnih konic povzročila za 0,4-1,1-odstotno skrajšanje potovalnih časov, 2,8-4,1-odstotno zmanjšanje zamud in 1,6-2,3% manj ustavljanj. Leta 2020 bodo ti ukrepi v času urnih konic povzročili 0,6-1,7-odstotno skrajšanje potovalnih časov, 2,3-5,2-odstotno zmanjšanje zamud in 3,6-2,4% manj ustavljanj. Torej, ti ukrepi bodo nedvomno prinesli prometne koristi. Ob tem je potrebno omeniti, da bodo te koristi v obdobju, ko ni urnih konic, precej večje.

- V primeru prometnih nesreč ocenjujemo, da se bodo zaradi pravočasnega obveščanja zamude zmanjšale za 10-15%. Ob tem je potrebno omeniti, da bodo te koristi v obdobju, ko ni urnih konic, precej večje, saj bo tedaj vzporedne ceste lahko sprejele več prometa, ki se bo preselil z avtoceste ali hitre ceste.
- Neto sedanja vrednost v 15-letnem obdobju pri 25-odstotnem celoletnem prometu in ciljnem razvoju BDP znaša 6,917 mio € in koristi za 19% presegajo stroške. Interna stopnja donosnosti znaša 9,3%. Tudi pri manj ugodnem razvoju BDP koristi presegajo stroške. Zato je naložba v SNVP na ljubljanskem avtocestnem obroču in priključnih avtocestnih krakih ekonomsko upravičena.
- Naložba bo izboljšala tudi prometno varnost, zmanjšala negativne vplive na okolje in imela še druge pozitivne vplive. Naložba v SNVP je nedvomno prometno, ekonomsko, varnostno in okoljsko upravičena.

5.3 Odgovori na raziskovalna vprašanja

Kako voditi prometni tok glede na prometna stanja, da dosežemo maksimalno izkoriščenost avtocestnega omrežja in kako uporabniku ponuditi najboljši nivo usluge za dane razmere v prometnem toku?

Model določevanja prometnih stanj na podlagi dejanskih razmer v prometnem toku (hitrost in gostota) izračuna pripadajoče prometno stanje, na podlagi katerega se izvajajo ukrepi vodenja prometa. Namen vodenja prometa glede na prometna stanja je uporabniku avtocestnega omrežja zagotoviti najboljši nivo usluge glede na dane razmere v prometnem toku, kar dosežemo z omejevanjem hitrosti in obveščanju o zgoščenem prometnem toku. Na podlagi gibanja osnovnih karakteristik prometnega toka (fundamentalni diagrami) vodimo prometni tok glede na teoretične ugotovitve o kapaciteti ceste in dejansko pretočnost. S pomočjo hitrostnih omejitev bodisi omejujemo hitrost prometnega toka, bodisi z višanjem hitrostnih omejitev stremimo k pospeševanju prometnega toka z namenom povečanja pretoka in izboljšavi razmerja med pretokom in kapaciteto.

Kako ukrepati pri vodenju prometa v primeru nizkih hitrosti pri nizkih in srednje velikih pretokih (primerjava slovenskega in nemškega modela določevanja prometnih stanj in pripadajočih prometnih obremenitev)?

Določevanje prometnih stanj poteka na podlagi prognoziranih vrednosti hitrosti in gostote. Namen prognoze osnovnih prometnih parametrov je zmanjšati vpliv kratkotrajnih konic (primer: ponoči ko so vrednosti pretoka nizke). Izven obdobja koničnih ur v obdobju nizkih do srednjih pretokov (predvsem ponoči), se občasno zaradi daljšega časovnega intervala (par zaporednih minut) z nizkimi hitrostmi, zgodi, da prognozirana povprečna hitrost vseh vozil pade na vrednosti pod 70 km/h, kljub temu da je prometni tok neoviran (skrajno levi del grafikona 3-14). Problem smo rešili s fiktivno mejo gostote ($G = 5$ eov/km), s čimer v območju nizkih hitrosti pri nizkih in srednjih pretokih ne odreagiramo na zmanjšanje prometnih parametrov in posledično ne omejujemo hitrosti. To je tudi prednost pred nemškim modelom določevanja prometnih stanj, ki v primeru da prognozirana hitrost vseh vozil pade pod 50 km/h (tudi pri nizkih pretokih, npr.ponoči), odreagira z omejevanjem hitrosti na 60 km/h.

Kako učinkovite so uporabljene procedure in scenariji vodenja prometa glede na prometna stanja?

Evalvacija prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa je pokazala, da so implementirane procedure in ukrepi vodenja prometa učinkoviti za vodenje prometa v primeru pojava izrednih dogodkov. Študija obnašanja prometnega modela v območju mejnih vrednosti je pokazala, da se prometni modul sistema za nadzor in vodenje prometa odziva v skladu z želenimi in načrtovanimi ukrepi vodenje prometa glede na dejanske razmere v prometnem toku.

Kakšen pomen ima vodenje prometa glede na različna prometna stanja in kakšen je odziv pri voznikih (ali le-ti upoštevajo ukrepe umirjanja prometa in zmanjševanja hitrosti)?

Spremljanje osnovnih karakteristik prometnega toka ob ukrepih vodenja prometa glede na prometna stanja je pokazalo, da se vozniki različno odzivajo na prometne vsebine prikazane

preko grafičnih prikazovalnikov spremenljive prometno-informativne signalizacije. Odvisno od prometnega znaka, ki v kombinaciji s hitrostno omejitvijo voznike obvešča o stanju na cesti, je bila tudi odzivnost in prilagodljivost voznikov. Medtem, ko je bila hitrostna omejitev brez dodatnega prometnega znaka z navedenim vzrokom omejitve večinoma ignorirana, pa se vozniki na prometni znak za nesrečo, zastoj ali delo na cesti v kombinaciji s hitrostno omejitvijo v večji meri odzovejo s prilagoditvijo hitrosti. V splošnem je bilo v veliko situacijah opaženo, da vozniki kljub hitrostni omejitvi vozijo z maksimalno hitrostjo, ki jo prometni tok glede na dane razmere še dopušča (predvsem na območju portala SPIS 03L pri t.i. »šikani«, kjer je bila na začetku delovanja sistema zaradi del na cesti hitrost omejena na 80 km/h).

5.4 Skupna ocena

Preglednica 5.2: Skupna ocena vplivov (DARS, 2008)

Table 5.2: Assessment summary table (DARS, 2008)

Cilji	Parametri	Kazalci	Dejanski kvalitativni rezultati	Dejanski kvantitativni rezultati
Prometna varnost	Sekundarne nesreče	Število nesreč	Preprečitev nastanka sekundarnih nesreč, manj nesreč	Zmanjšanje zamud 10-15% ob nesrečah zaradi pravočasnega obveščanja
Izkoriščenost cestne infrastrukture	Pretočnost, zastoji	Potovalni časi, hitrosti	Manj zastojev in zamud	Glej ekonomske koristi
Upoštevanje pri voznikih	Odziv voznikov	Prilagoditev hitrosti omejitvam	Hitrostne omejitve v kombinaciji z prometnim znakom za zastoj, nesrečo ali delo na cesti DA; brez »dopolnilnega« prometnega znaka NE	Padec povprečne hitrosti vseh vozil v primeru hitrostne omejitve 80 km/h v kombinaciji z znakom za delo na cesti za 15 km/h (iz 105 km/h na 90 km/h) napram predhodni situaciji, ko je bila na portalu SPIS nameščena samo hitrostna omejitev 80 km/h
Okolje	Obremenitev okolja	Hrup, onesnaževanje zraka	Manj hrupa, zmanjšanje onesnaževanja z izpušnimi plini (SO ₂ , CO)	Ni podatkov

Cilji	Parametri	Kazalci	Dejanski kvalitativni rezultati	Dejanski kvantitativni rezultati
Ekonomske koristi	Transport, ekonomija, učinkovitost	Zamude	Zmanjšanje zamud	2008: 0,4-1,1% skrajšanje potovalnih časov; 2,8-4,1% zmanjšanje zamud 2020: 0,6-1,7 % skrajšanje potovalnih časov; 2,3-5,2 % zmanjšanje zamud
Finančne koristi	Razmerje med vložkom in koristjo	Koristi napram stroškom	Manjša poraba bencina, ni stroškov širitve vozne površine, neposredni prihranki v stroških države (zdravstvo, policija)	Koristi za 19% presegajo stroške Interna stopnja donosnosti znaša 9,3%

6 SMERNICE ZA DOLOČITEV MEJNIH VREDNOSTI MED PROMETNIMI STANJI

Cilj evalvacije je bil določitev vplivov vodenja prometa glede na različna prometna stanja z namenom razširitve pridobljenega znanja na druge lokacije (merilna mesta), kjer s pomočjo implementiranega sistema za nadzor in vodenje prometa želimo ali bomo želeli v prihodnje voditi prometni tok.

Medtem ko na dveh obstoječih sistemih za nadzor in vodenje prometa, na odseku med Klancem in Srminom (primorski del avtocestnega križa) ter Vranskim in Blagovico (štajerski krak) prometne obremenitve ne dosežajo kritičnih prometnih stanj, pa vodenje prometa na ljubljanskem avtocestnem ringu nemalokrat zahteva ukrepe vodenja prometa v nasičenem in zgoščenem prometnem stanju. Rezultati pridobljeni z izkušnjami na zahodni ljubljanski obvoznici, nam bodo v bodoče lahko služili kot orientacijske začetne vrednosti ob vzpostavitvi sistema za nadzor in vodenje prometa na drugih, predvsem mestnih avtocestah, pri čemer pa je zaradi specifičnosti, vsak avtocestni odsek potrebno obravnavati individualno.

Na podlagi podrobne analize prometnega toka na obravnavanem avtocestnem odseku smo prišli do optimalnih parametrov za določitev mejnih vrednosti med prometnimi stanji. Potrdila se je predpostavka, da je vsak individualen avtocestni odsek potrebno obravnavati ločeno, saj so karakteristike glede na vsako posamezno lokacijo specifične. Ugotovili smo, da je prometni model v sistemu za nadzor in vodenje prometa zastavljen dovolj fleksibilno, da omogoča spremembe in prilagoditve vsaki specifični lokaciji oziroma skupku lokacij.

Določevanje mej med prometnimi stanji temelji na podlagi mejnih vrednosti med nivoji uslug, ki predstavljajo kvalitativno meritev. Ker gre za empirično določevanje mejnih vrednosti med prometnimi stanji, je na posamezni lokaciji potrebno predhodno izmeriti osnovne prometne parametre (prometni pretok, povprečna hitrost) na podlagi katerih s pomočjo grafičnega prikaza določimo najoptimalnejšo rešitev. Model določitve mejnih vrednosti med prometnimi stanji je načeloma za vse lokacije z isto hitrostjo prostega prometnega toka enak, zahteve pa fino kalibracijo na območju mejnih vrednosti na tistih

lokacijah, kjer je zaradi dejanskih razmer na cesti (območja razcepov, geometrijske karakteristike ceste, območje vpliva semaforja...) stanje na odseku specifično.

Namen vodenja prometa in obveščanja voznikov glede na prometna stanja se izvaja z namenom vozniku ponuditi najkvalitetnejši nivo usluge glede na trenutne razmere v prometnem toku. Vodenje prometa in obveščanje voznikov se izvaja s pomočjo prometnih vsebin sestavljenih iz hitrostnih omejitev in osrednjega tekstualnega dela, ki voznike obvešča o zgoščenem prometu. Prav določitev hitrostnih omejitev glede na posamezno prometno stanje in zelene ukrepe vodenja prometa zahteva podrobnejšo analizo grafikona Pretok-Hitrost na podlagi katere za vsako prometno stanje določimo ukrepe umirjanja oziroma pospeševanja prometnega toka z namenom dosege maksimalnega izkoristka razmerja med pretokom in kapaciteto.

7 ZAKLJUČKI

Z vodenjem prometa glede na prometna stanja na podlagi kompleksnih izračunov in logike delovanja centralnega dela sistema, optimiziramo in homogeniziramo prometni tok do take mere, da je dosežena maksimalna izkoriščenost med povpraševanjem in kapaciteto glede na dane razmere v prometnem toku. Z maksimalno izkoriščenostjo avtocestnega odseka se zmanjšajo potovalni časi in zamude. Uporabniki avtocestnega omrežja so s pomočjo grafičnih prikazovalnikov spremenljive prometno-informativne signalizacije na eni strani z ustreznim umirjanjem prometnega toka s pomočjo omejitev hitrosti, vodeni glede na razmere v prometnem toku, na drugi strani pa so obveščeni o pojavu izrednega dogodka (povečan promet, zgostitve, možnost nastanka zastojev), kar jim na podlagi informacij o potovanju omogoča izbiro o nadaljevanju poti.

V magistrskem delu je evalviran prometni model sistema za nadzor in vodenje prometa. Prometni model na podlagi dejanskih razmer v prometnem toku (hitrost in gostota) izračuna pripadajoče prometno stanje, na podlagi katerega se izvajajo ukrepi vodenja prometa. Namen vodenja prometa glede na prometna stanja je uporabniku avtocestnega omrežja zagotoviti najboljši nivo usluge glede na dane razmere v prometnem toku, kar dosežemo z omejevanjem hitrosti in obveščanjem o zgoščenem prometnem toku. Na podlagi gibanja osnovnih parametrov prometnega toka (fundamentalni diagrami) vodimo prometni tok glede na teoretične ugotovitve o kapaciteti ceste in dejansko pretočnost. S pomočjo hitrostnih omejitev bodisi omejujemo hitrost prometnega toka, bodisi z višanjem hitrostnih omejitev stremimo k pospeševanju prometnega toka z namenom povečanja pretoka in izboljšavi razmerja med pretokom in kapaciteto. Na podlagi spremljanja prometnega toka na posameznih lokacijah na zahodni ljubljanski obvoznici in priključnih krakih, so bile s pomočjo merilnikov za zbiranje prometnih parametrov (mikrovalovni detektorji), določene mejne vrednosti med prometnimi stanji. Različni modeli za določevanje prometnih stanj (ZDA, Nemčija) so služili kot podlaga za določitev in prilagoditev prometnega modela za določevanje prometnih stanj za območje avtocest v Republiki Sloveniji, s poudarkom na specifičnosti posameznih merilnih mest, kar vodi k potrebi po individualni preučitvi vsake posamezne lokacije. Tekom analize smo spremljali različne izredne dogodke in odziv prometnega modela na nastalo situacijo v prometnem toku. Odziv prometnega toka na ukrepe vodenja prometa preko grafičnih

prikazovalnikov spremenljive prometno-informativne signalizacije (hitrostne omejitve), je poleg pretočnosti med drugim služil tudi kot orodje za določevanje mer uspešnosti podanih ukrepov. Sistem video nadzora, nameščen na celotnem obravnavanem območju zahodne ljubljanske obvoznice in priključnih krakov, je poleg podatkov iz merilnikov za detektiranje prometnih parametrov, služil kot paralelna metoda pregleda stanja na terenu in obnašanja prometnega toka. Z merilniki za spremljanje prometnega toka je znotraj izbranega časovnega intervala (v našem primeru ena minuta) namreč nemogoče natančno definirati obnašanje prometnega toka, nasprotno pa sistem video nadzora omogoča spremljanje obnašanja vsakega individualnega vozila.

Na konkretnem primeru izrednih dogodkov je bilo predstavljeno delovanje prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa. Sistem za nadzor in vodenje prometa se je na spremembe osnovnih prometnih parametrov odzval z določitvijo pripadajočih prometnih stanj in predlaganimi ukrepi vodenja prometa z namenom umiritve in homogeniziranja prometnega toka. Sistem je tako, glede na dejanske razmere v prometnem toku predlagal ustrezne hitrostne omejitve, ki v kombinaciji z vsebinami o izrednem dogodku predstavljajo optimalen način obveščanja in vodenja voznikov v primeru izrednega dogodka na trasi. V primeru izrednega dogodka na avtocesti, je naloga operaterja v nadzornem centru, da pravilno ukrepa z nastavitvijo ustreznih prometnih vsebin vezanih na izredni dogodek (delo na cesti, prometna nesreča...) in s tem homogenizira prometni tok ter prepreči možnost nastanka zastojev in naletov. Naloga prometnega modula sistema za nadzor in vodenje prometa pa je, da operaterju v primeru izrednih dogodkov, preko merilnikov za zbiranje prometnih podatkov, zagotovi merodajne podatke s terena in mu preko določitve prometnih stanj predlaga ustrezne ukrepe omejitve hitrosti in vodenja prometa in na podlagi spremembe osnovnih prometnih količin določi vplivno območje mesta potencialnega nastanka zastoja. Operater sistema za nadzor in vodenje prometa ima ključno vlogo pri vodenju prometa, saj merilniki prometnih podatkov zbirajo podatke točkovno, vizualni pregled slike preko sistema video nadzora pa operaterju omogoča zvezni pregled nad situacijo na obravnavanem odseku.

V primeru nastanka zastojev ali zgoščenega prometnega toka sotočno, prometni model sistema za nadzor in vodenje prometa kljub zelenemu pospeševanju prometnega toka ne doseže svoje največje učinkovitosti. Problem je v temu, da je skozi presek nemogoče spraviti

več prometa kot je kapaciteta sotočno ležečega odseka. V takem primeru je potrebno ročno ukrepanje operaterja sistema za nadzor in vodenje prometa, ki z omejevanjem hitrosti protitočno doseže, da na mesto zastoja pride kar se le da homogen in umirjen prometni tok. Ukrepi umirjanja in vodenja prometa morajo tako segati več kilometrov protitočno od mesta nastanka zastoja.

Sistem za nadzor in vodenje prometa na zahodni ljubljanski obvoznici se je od začetka delovanja izkazal za koristnega. V primeru pojava izrednih dogodkov so bili ugotovljeni pozitivni učinki vodenja prometa glede na prometna stanja in pozitiven odziv pri voznikih. Z opazovanjem in preučevanjem osnovnih prometnih parametrov in odzivanja voznikov smo na podlagi rezultatov določili optimalen prometni model, ki vsakemu prometnemu stanju pripiše pripadajočo omejitev hitrosti, na podlagi česar homogeniziramo prometni tok in dosežemo maksimalni izkoristek med povpraševanjem in kapaciteto. Ugotovljeno je bilo, da se vozniki različno odzivajo na omejitve hitrosti, glede na pripadajoč prometni znak, ki je postavljen v kombinaciji. Tako je bilo opaženo znatno zmanjšanje hitrosti v primeru, da je bil poleg hitrostne omejitve prikazan tudi prometni znak za prometno nesrečo, zastoj ali delo na cesti, medtem ko je bila hitrostna omejitev brez »dopolnilnega« prometnega znaka s strani voznikov v večini primerov neupoštevana.

S pomočjo vodenja prometa glede na prometna stanja je prišlo do homogeniziranja prometnega toka, kar je pomembno vplivalo na zmanjšanje zamud in potovalnih časov ne le v času koničnih ur, temveč tudi v obdobju srednjih pretokov. Po oceni Ministrstva za promet, se družbeni produkt Slovenije vsako leto zaradi zastojev in zamud (na delovna mesta, sestanke, dobave blaga) na cesti v zadnjih desetih letih vsako leto zmanjša za okoli 4 do 6 % (leto analize 2006). S prilagajanjem hitrosti trenutnim prometnim razmeram se doseže večja izkoriščenost cestne infrastrukture. V primeru zastoja ali možne zgostitve prometnega toka sistem opravlja funkcijo pravočasnega obveščanja voznikov že pred kritičnim odsekom, na podlagi česar se voznik lahko odloči ali bo pot nadaljeval po prvotno načrtani poti ali se bo odločil za spremembo smeri, glede na informacije o stanju na cesti. S tem se zmanjša možnost nastanka nesreč in zastojev, hkrati pa se optimalno izkoristi celotna cestna infrastruktura. Cestnega omrežja zaradi stroškov in okoljskih vzrokov ni mogoče razširjati v nedogled. Rešitve torej ne predstavlja gradnja in razširjanje prometnih poti, temveč čim večja

izkoriščenost že obstoječega avtocestnega omrežja, kar opazno lahko izboljšamo z namestitvijo sistema za nadzor in vodenje prometa. Potrebno pa je poudariti, da s pomočjo ukrepov vodenja prometa lahko izboljšamo pretočnost glede na dane razmere v prometnem toku (izboljšamo nivo usluge), nerealno pa je pričakovati, da bodo z namestitvijo sistemov za nadzor in vodenje prometa zastoji in zgostitve prometa popolnoma izginili.

Sistem za nadzor in vodenje prometa je na ljubljanski zahodni obvoznici v obratovanju od 14. januarja 2008, kar pomeni, da je za konkretnije zaključke in analize vplivov na prometno varnost vsekakor prezgodaj. Je pa splošen odziv voznikov na svetlobno prometno signalizacijo ugoden, pravtako so bili opaženi pozitivni odzivi voznikov v primeru podajanja prometno-informativnih vsebin na portale SPIS. V primeru izrednih dogodkov je bilo opaženo umirjanje prometnega toka skladno z informacijami na grafičnih prikazovalnikih SPIS.

8 POVZETEK

Promet, mobilnost in transport so osrednje dejavnosti, brez katerih si sodobnega življenja ni več mogoče predstavljati. Za posameznika mobilnost pomeni svobodo in način življenja, za širšo družbo pa simbol razvoja, napredka ter gospodarske rasti. Gospodarski razvoj in sodoben način življenja ljudi nezadržno vplivata na prometno rast cestnega prometa in število potovanj. Gradnja novih prometnic se zaradi prostorskih in ekonomskih omejitev ne bo mogla nadaljevati v nedogled, zato se vse bolj uveljavljajo sodobni sistemi za nadzor in vodenje prometa (SNVP), s pomočjo katerih lahko izboljšamo prometni pretok in s tem bolje izkoristimo obstoječe cestno omrežje, izboljšamo prometno varnost, zmanjšamo negativne vplive na okolje ter zmanjšamo zamude in transportne stroške.

Razvoj inteligentnih transportnih sistemov (ITS), ki med drugim skrbijo tudi za zaznavanje izrednih dogodkov in obveščanje uporabnikov cestnega omrežja o stanju na cesti, je v polnem razmahu. V zadnjih letih se na slovenskem avtocestnem omrežju intenzivno uvajajo sistemi za nadzor in vodenje prometa, ki v primeru potencialno nevarnih situacij omogočajo vzpostavitev optimalnih prometnih razmer glede na trenutno in predvideno stanje na cesti. Ljubljanska obvoznica zaradi svoje centralne lege, v kateri se križata V. in X. evropski koridor, prevzema velike prometne obremenitve tako tranzitnega kot tudi vsakodnevnega lokalnega prometa. V začetku leta 2008 je bil na zahodni ljubljanski obvoznici implementiran sistem za nadzor in vodenje prometa, s katerim med drugim želimo izboljšati pretočnost avtocestnega odseka v koničnih urah.

Prometni model kot podmodul sistema za nadzor in vodenje prometa, je kompleksen model, ki na podlagi vhodnih prometnih parametrov izmerjenih na terenu, glede na razmere v prometnem toku, izračunava prometna stanja. Prometni podatki so bili pridobljeni iz merilnih mest postavljenih vzdolž obravnavanega avtocestnega odseka (zahodna ljubljanska obvoznica), kjer se s pomočjo mikrovalovnih detektorjev nameščenih nad voznimi pasovi na portalih spremenljive prometno-informativne signalizacije, zbirajo osnovni prometni parametri ločeni za osebna in tovorna vozila. V sistemu se na podlagi teh podatkov izračunavajo prometne količine, ki jih ne moremo neposredno meriti. S pomočjo izmerjenih

in preračunanih prometnih podatkov se na merilnem mestu za posamezen pododsek določajo prometna stanja.

Glede na pripadajoča prometna stanja, se za homogeniziranje prometnega toka v času konic, voznike preko sistema za nadzor in vodenje prometa (predvsem z grafičnimi prikazovalniki spremenljive prometno-informativne signalizacije) obvešča o trenutnem stanju na cesti in posledično vodi prometni tok. V nalogi je podrobneje analizirano in evalvirano odzivanje sistema in prometnega modela kot njenega podmodula na dejansko stanje na cesti ob pojavu izrednega dogodka, kar je omogočilo prilagoditev spremenljivk slovenskim razmeram in določitev kritičnih dejavnikov, ki jih je potrebno upoštevati pri kalibraciji prometnega modela za vsak dotični pododsek. Na tem področju v Sloveniji do sedaj še ni bilo narejenih nikakršnih podrobnejših analiz in raziskav. Pri dosedanjem delu smo se opirali predvsem na ugotovitve in smernice iz tujine, ki pa so zaradi drugačnih navad in obnašanja voznikov, le do neke mere primerne za avtoceste v Republiki Sloveniji.

Magistrska naloga je zasnovana v skladu z evropskimi smernicami za evalvacijo projektov - TEMPO Guidelines for Reporting Evaluation Results in je sestavljena iz sedmih poglavij. Uvodnemu poglavju sledi opis teorije prometnega toka kot osnova za izvajanje izračunov na podlagi osnovnih prometnih parametrov. Podrobno so opisane karakteristike prometnega toka, parametri prometnega toka, kapaciteta in nivoji uslug, ter osnovni avtocestni odsek kot osnovni gradnik pri proučevanju gibanja prometnega toka na avtocestah. Tretje poglavje opisuje sistem za nadzor in vodenje prometa s pomočjo katerega pridobivamo podatke, izvajamo prometne izračune, ter obveščamo in vodimo prometni tok. Predstavljena je zasnova sistema, podrobneje pa je predstavljen sistem za nadzor in vodenje prometa na zahodni ljubljanski obvoznici. Predstavljen je tudi model določanja prometnih stanj kot osnova za vodenje prometa in omejevanje hitrosti glede na prometna stanja. Četrto poglavje predstavlja evalvacija prometnega modela sistema za nadzor in vodenje prometa na konkretnem primeru vodenja prometa ob pojavu zastoja zaradi kratkotrajne redukcije števila pasov. V naslednjem, petem poglavju so predstavljeni rezultati analize in evalvacije s prikazom vplivov vodenja prometa glede na prometna stanja na obnašanje voznikov in vplivov na prometni tok, ter na prometno varnost. Prikazane so ekonomske, finančne in okoljevarstvene koristi. Šesto poglavje podaja smernice za določitev mejnih vrednosti med prometnimi stanji ob

implementaciji sistema za nadzor in vodenje prometa na novih lokacijah glede na specifične karakteristike prometnega toka. V zadnjem, sedmem poglavju so prikazani zaključki in ugotovitve magistrskega dela.

9 SUMMARY

Traffic, mobility and transportation are central activities, without which contemporary life can no longer be imagined. For an individual, mobility means freedom and a way of life and for the wider society a symbol of development, progress and economic growth. Traffic growth can also be expected in the future. The fact is that due to spatial and economic limits it will not be possible to meet the growing traffic demands by merely constructing new roads. For this reason, contemporary Traffic Management Systems are gaining importance, since they allow us to improve the traffic flow and thus make better use of the possibilities offered by the existing road network, improve traffic safety, reduce negative impacts on the environment and transportation costs.

The implementation of the Intelligent Transportation Systems (ITS), being in charge of incident detection on the highways and providing traffic and travel information to the drivers, is in full scale. Slovenian road operator DARS has lately implemented a number of Traffic Management Systems on the highway network. Beside incident detection, the Traffic Management System has a function of calculating the level of service on the basis of real time traffic data acquired from the traffic detectors (microwave detectors, video detection cameras). The boundary values of levels of service serve as a trigger when choosing the speed limits in combination with queue warning signs to be displayed on the Variable Message Signs, when the traffic flow reaches critical values defined in the traffic model. The presented traffic model was implemented in the Traffic Management System on the western bypass of the Ljubljana city ring, which is one of the most demanding motorway sections in Slovenia. All parts of the motorway network cross in Ljubljana. Its dual function means that it is used by both through and bypass traffic.

The traffic model used in the Traffic Management System is technologically extremely sophisticated and advanced. The traffic data acquisition, based on microwave detectors mounted on the Variable Message Signs is separated into personal cars and heavy vehicles. With specific methods the system first performs a reliability test of the collected traffic data and eliminates unreliable data. Later with the help of data processed in this way the traffic

parameters that cannot be measured are calculated (e.g. density). Based on the real time analysis of traffic data, the system defines the level of service. If the prescribed limit values for individual traffic data (prognostic value of speed and density) are exceeded, the traffic model reacts with an alarm and at the same time the system automatically activates the predefined traffic contents program with the display of messages on the adequate Variable Message Signs. As there was no analysis of the level of service determination on the highways in Slovenia based on real traffic data made so far, the evaluation of the traffic model calculating the level of service will serve as a model for adjustment of the level of service boundary values for each individual location.

The present work has been made in accordance with TEMPO Guidelines for Reporting Evaluation Results. It focuses on the traffic model for the level of service determination as a part of the Traffic Management System on the highways in Slovenia. The first part of the work summarizes the traffic flow theory, which forms the basis of the traffic model. In the second part the Traffic Management System on Ljubljana bypass, implemented in the first half of 2008, is introduced. The fundamental diagrams of traffic flow are represented in correlation with real traffic data acquired from the detectors. The third part of the work deals with the evaluation of the traffic model and the level of service determination on the example of traffic queuing due to a short duration lane reduction caused by road works. The response of the traffic model is analyzed on the basis of traffic data gained from the system. The results of the evaluation are represented through drivers' behaviour, traffic flow influence, economic, financial and environmental benefits. In the guidelines for the level of service determination the approach to the implementation of the new model on new highway locations is described.

VIRI

ASFINAG. 2003. Verkehrsmanagement und Informationssystem der ASFINAG – Gewerk IT und Zentraltechnik. Technische Anforderungen. 330 str.

Določitev potencialno nevarnih odsekov kot osnova za upravičenost postavitve sistema za nadzor in vodenje prometa na avtocestah v RS, 2004. Celje, DARS: 45 f.

Sistemi za nadzor in vodenje prometa – upravičenost vzpostavitve, prednosti in uporabnost, 2007. Celje, DARS: 16 f.

Baza podatkov sistema za nadzor in vodenje prometa na zahodni ljubljanski obvoznici, 2008. Celje, DARS.

Prometne in ekonomske osnove sistema za nadzor in vodenje prometa na ljubljanskem avtocestnem obroču, 2008. Celje, DARS: 248 f.

Dinkel, A. 2007. Steuerung des Verkehrsablaufs auf BAB. München. Technische Universität München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik: 48 f.

Kerner, B. 2004. The Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory. Berlin.

Kuehne, R. 2004. Das Fundamentaldiagramm - Grundlagen und Anwendungen. Berlin. Instituts für Verkehrsforschung: 59 f.

Maher, T. 1994. Teorija prometnega toka – skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Prometna smer.

Marz, M. 1999. Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen. Bundesanstalt für Straßenwesen: str. 33-36.

Muench, S. 2005. Traffic concepts.

<http://courses.washington.edu/cee320w/lectures/Traffic%20Concepts.ppt>, University of Washington. (12.3.2008).

Pirc, J. 2004. Določitev pragov med nivoji uslug za različne prometne, izredne in vremenske razmere na avtocestah. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Prometna smer: 149 f.

Schick, P. 2003. Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität von Verkehrsflüssen. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik: 251 str.

Schönhof, M., Helbing, D. 2008. Empirical Features of Congested Traffic States and Their Implications for Traffic Modeling. Institute for Economics and Traffic, Dresden University of Technology: 39 f.

TEMPO programme. 2005. TEMPO Guidelines for Reporting Evaluation Results. Brussels, European Commission, Directorate General Energy and Transport: 10 f.

HCM 2000, Highway Capacity Manual 2000. Washington, D.C., Transportation Research Board, National Research Council.