

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Marot, J., 2014. Avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Maher, T., somentor Rijavec, R.): 88 str.

Datum arhiviranja: 11-11-2014

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Marot, J., 2014. Avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Maher, T., co-supervisor Rijavec, R.): 88 pp.

Archiving Date: 11-11-2014

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM GRADBENIŠTVO  
PROMETNA SMER

Kandidat:

**JERNEJ MAROT**

**AVTOMATSKO ZAZNAVANJE IZREDNIH  
DOGODKOV**

Diplomska naloga št.: 3409/PS

**AUTOMATIC INCIDENT DETECTION**

Graduation thesis No.: 3409/PS

**Mentor:**

doc. dr. Tomaž Maher

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

viš. pred. mag. Robert Rijavec

**Član komisije:**

doc. dr. Franc Sinur

Ljubljana, 29. 10. 2014

## **STRAN ZA POPRAVKE**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

**IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani Jernej Marot izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 13. 10. 2014.

Jernej Marot



## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>656.1 (043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Jernej Marot</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Tomaž Maher</b>
<b>Somentor:</b>	<b>viš. pred. mag. Robert Rijavec</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Dipl. nal.–UNI</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>88 str., 17 pregl., 37 sl., 10 graf., 37 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>vodenje prometa, zaznavanje izrednih dogodkov, upravljanje z izrednimi dogodki, SNVP, videodetekcija</b>

### **Izvleček**

Promet ima v vsaki državi znaten vpliv na razvoj gospodarstva, zato je pomembno, da se odvija s čim manj motnjami. Ena izmed motenj v prometnem toku so izredni dogodki, ki se jih ne da napovedati niti po času niti po lokaciji. Njihova posledica so zastoji, ki povzročajo zamude vseh vozil v prometnem toku. Da bi zmanjšali njihov vpliv, je treba izredne dogodke zaznati kar se da hitro. S hitrim zaznavanjem je možno zmanjšati trajanje zastoja in znižati možnost za nastanek sekundarnih nesreč. V nalogi je sistem za zaznavanje izrednih dogodkov razdeljen na senzorje, ki pridobivajo prometne podatke in algoritme, ki te podatke obdelujejo. Glede na mesto vgradnje, v ali ob cestišče in v vozilu, senzorje različne vrste najprej predstavimo, nato pa še med seboj primerjamo. Za boljše razumevanje prometnih podatkov so na začetku naloge podane osnove teorije prometnega toka. V nadaljevanju so glede na učinkovitost in zahtevnost izvedbe raziskani različni algoritmi za zaznavanje izrednih dogodkov. V praktičnem delu teoretični čas zaznave algoritma primerjamo z dejanskim časom zaznave za dano nesrečo glede na skupno zamudo vseh vozil, ki je tudi ovrednotena. V sklepu podamo koristi vpeljave algoritmov, in sicer na podlagi prihrankov pri vrednosti izgubljenega časa in priporočila za vgradnjo in nadaljne delo na področju avtomatskega zaznavanja izrednih dogodkov.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 656.1 (043.2)  
**Author:** Jernej Marot  
**Supervisor:** assist. prof. Tomaž Maher, Ph.D.  
**Cosupervisor:** sen.lect. Robert Rijavec, M.Sc.  
**Title:** Automatic Incident Detection  
**Document type:** Graduation thesis – University studies  
**Scope and tools:** 88 p., 17 tab., 37 fig., 10 graph., 37 eq.  
**Keywords:** traffic management system, incident detection, incident management, videodetection

**Abstract**

Traffic has a significant impact on national economy. In order to be effective, traffic flow has to run smoothly. One of the things that can cause disturbances in traffic flow and delays are traffic incidents. They cause non-recurrent congestions that cannot be predicted by time nor space. To minimize their impact an incident has to be detected as soon as possible. Whatever the method of detection is, it should be quick enough to reduce consequences like duration of congestion and possibility of secondary accidents. Incident detection systems are determined on two level: data collection technologies and data processing algorithms. Thesis presents various sensor technologies that are categorized into two major categories; roadway-based and probe-based sensors. They are broadly discussed and compared against each other. For a better understanding of measured traffic variables the basics of traffic flow are explained at the beginning. A variety of algorithms for the purpose of incident detection are investigated in terms of their performance and ease of implementation which is later used for the case study. Theoretical detection time of implemented algorithm is compared against the one from given accident in terms of all vehicles delay. Finally, the delay is monetarized by value-of-time and the benefits are calculated for use of dedicated incident detection algorithms.

## ZAHVALA

*Najprej bi se rad zahvalil mentorju doc. dr. Tomažu Maherju, ki me je že med poukom približal tematiki ITS in kasneje tudi usmeril k izdelavi naloge s tem naslovom. Hvala za usmeritve in za ukrepanje, ko je bilo potrebno. Rad bi se zahvalil tudi somentorju viš. pred. mag. Robertu Rijavcu, ki mi je z nasveti in predlogi pomagal izboljšati diplomsko nalogo.*

*Za posredovanje prometnih podatkov bi se rad zahvalil operaterjem iz nadzornega centra Vransko ter Juretu Pircu za hitro odzivnost pri razjasnitvi pojmov na področju merilnikov.*

*Najlepša hvala vsem prijateljem, ki so me z besedami in dejanji spodbujali k zaključku študija ter mi nudili mentalno oporo tekom študijskih let, hvala Žigi, Dejanu, Maticu, Ambrožu, Agi, Mateji, Maticu, Urši, Urhu, Urbanu ter vsem, ki smo skupaj preživeli čudovite trenutke tekom let.*

*Rad bi se zahvalil staršem, ki so mi omogočili študij in me potrpežljivo spremljali do zaključka, hvala.*

*Najlepša hvala sestri Naji za vso pomoč tekom študija, ki mi je vsekakor olajšala marsikatero delo, hvala.*

*Rad bi se zahvalil tudi babi Ani, ki me je kljub bolezni nesebično in potrpežljivo po svojih močeh podpirala pri študiju, hvala babi.*

*Hvala Maši, ki me je s spodbudnimi besedami in dejanji razveseljevala v težkih trenutkih, hvala ti za odrekanja, ko se je bilo poleti potrebno učiti za izpite in hvala za nasvete pri izdelavi diplome.*

**KAZALO VSEBINE**

<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Opredelitev problema .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Izredni dogodek.....</b>	<b>2</b>
<b>2 TEORIJA PROMETNEGA TOKA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Prometne spremenljivke .....</b>	<b>3</b>
2.1.1 Gostota prometnega toka.....	3
2.1.2 Volumen prometnega toka in pretok vozil.....	4
2.1.3 Hitrost prometnega toka .....	4
2.1.4 Zasedenost.....	5
<b>2.2 Medsebojna relacija med hitrostjo, gostoto in pretokom vozil.....</b>	<b>5</b>
2.2.1 Razmerje pretok - gostota .....	5
2.2.2 Razmerje hitrost - pretok.....	6
2.2.3 Razmerje hitrost - gostota .....	6
<b>2.3 Trofazna teorija prometnega toka.....</b>	<b>7</b>
<b>2.4 Kapaciteta in nivo uslug .....</b>	<b>8</b>
2.4.1 Prometno povpraševanje .....	9
2.4.2 Nivo uslug .....	9
2.4.3 Zmanjšanje kapacitete.....	10
<b>2.5 Pojav udarnega vala.....</b>	<b>11</b>
<b>2.6 Karakteristike prometnega toka na avtocestah.....</b>	<b>11</b>
<b>3 SISTEM ZA NADZOR IN VODENJE PROMETA.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1 Upravljanje z izrednimi dogodki .....</b>	<b>16</b>
<b>4 METODE IN TEHNOLOGIJE ZAZNAVANJA IZREDNIH DOGODKOV .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 Obcestni senzorji .....</b>	<b>20</b>
4.1.1 Induktivni zračni detektorji .....	20
4.1.2 Magnetni senzorji.....	22
4.1.3 Mikrovalovni senzorji.....	23
4.1.4 Ultrazvočni senzorji .....	26
4.1.5 Infrardeči senzorji .....	26
4.1.6 Video detekcijski sistem.....	28
4.1.6.1 Namestitev kamere.....	29
4.1.7 Povzetek .....	30
<b>4.2 Mobilni detektorji .....</b>	<b>32</b>

4.2.1	Avtomatsko lociranje vozila .....	32
4.2.2	GPS – Globalni sistem pozicioniranja .....	33
4.2.3	eCall .....	35
4.2.4	Avtomatska identifikacija vozila .....	36
<b>4.3</b>	<b>Ročno obveščanje .....</b>	<b>37</b>
4.3.1	Sistem klica v sili .....	38
4.3.2	Mobilne aplikacije .....	38
<b>5</b>	<b>ALGORITMI ZA AVTOMATSKO ZAZNAVANJE IZREDNIH DOGODKOV ....</b>	<b>39</b>
<b>5.1</b>	<b>Vrednotenje algoritmov.....</b>	<b>40</b>
5.1.1	Stopnja zaznavanja.....	40
5.1.2	Stopnja lažnih detekcij.....	41
5.1.3	Čas zaznavanja.....	41
<b>5.2</b>	<b>Določitev pojava zastoja v Sloveniji .....</b>	<b>42</b>
5.2.1	Pogoj zasedenosti.....	42
5.2.2	Pogoj prometnega stanja .....	43
5.2.3	Zaznavanje stoječih vozil.....	44
<b>5.3</b>	<b>Primerjalni tip algoritmov .....</b>	<b>44</b>
5.3.1	Kalifornijski algoritem.....	45
5.3.2	Algoritem TSC 7, 8.....	46
<b>5.4</b>	<b>Algoritmi s statistično osnovo .....</b>	<b>46</b>
5.4.1	Bayesovski algoritem.....	47
5.4.2	ARIMA in HIOCC.....	47
5.4.3	Algoritem z dvojno eksponento izravnavo .....	48
<b>5.5</b>	<b>Teorija katastrofe.....</b>	<b>49</b>
5.5.1	McMasterjev algoritem .....	49
<b>5.6</b>	<b>Umetna inteligenca.....</b>	<b>50</b>
5.6.1	Nevronske mreže .....	51
5.6.2	Mehka logika .....	52
<b>5.7</b>	<b>Zaznavanje na podlagi slike .....</b>	<b>52</b>
5.7.1	Algoritem za obdelavo slike .....	53
5.7.2	Virtualni detektorji.....	55
5.7.2.1	Detektor dogodkov.....	55
5.7.2.2	Detektor prisotnosti vozil .....	56
5.7.2.3	Detektor hitrosti vozil.....	56
5.7.2.4	Tunelski linijski detektor.....	57
5.7.2.5	Zunanji linijski detektorji .....	58
5.7.2.6	Funkcijski detektorji.....	58

---

<b>5.8</b>	<b>Algoritmi s podatki z mobilnih detektorjev .....</b>	<b>58</b>
5.8.1	TRANSMIT .....	60
5.8.2	Waterloo .....	61
<b>5.9</b>	<b>Pregled algoritmov .....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>UPRAVIČENOST VPELJAVE SISTEMA ZA AVTOMATSKO ZAZNAVANJE IZREDNIH DOGODKOV .....</b>	<b>64</b>
<b>6.1</b>	<b>Določitev srednjega časa za zaznavo izrednega dogodka .....</b>	<b>65</b>
<b>6.2</b>	<b>Opis izrednega dogodka.....</b>	<b>69</b>
<b>6.3</b>	<b>Analiza prometnih obvestil.....</b>	<b>69</b>
<b>6.4</b>	<b>Analiza prometnih podatkov.....</b>	<b>71</b>
6.4.1	Merilno mesto MD 02D .....	71
6.4.2	Merilno mesto MD 12D .....	72
6.4.3	Merilno mesto MD 16D .....	75
<b>6.5</b>	<b>Izračun zamud .....</b>	<b>77</b>
6.5.1	Brez uporabe algoritma za avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov .....	78
6.5.2	Z uporabo kalifornijskega algoritma za avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov .....	79
6.5.3	Primerjava .....	80
<b>6.6</b>	<b>Izračun prihrankov pri vrednosti izgubljenega časa .....</b>	<b>80</b>
<b>7</b>	<b>SKLEP IN UGOTOVITVE.....</b>	<b>82</b>
	<b>VIRI.....</b>	<b>84</b>

## KAZALO SLIK

Slika 1: Diagram pretok – gostota .....	5
Slika 2: Diagram hitrost – pretok .....	6
Slika 3: Diagram hitrost - gostota .....	7
Slika 4: Odnos pretok – gostota .....	9
Slika 5: Odvisnost med potovalnimi hitrostmi in izkoriščenostjo kapacitete .....	10
Slika 6: Shema SNVP .....	13
Slika 7: Prikaz vsebin na SPIS v primeru zastoja .....	14
Slika 8: Polportal SPIS .....	14
Slika 9: Spremenljivi prometni znaki pred predorom .....	15
Slika 10: Spremenljiva kažipotna signalizacija.....	15
Slika 11: Funkcije sistema ob pojavu nepredvidljivih izrednih dogodkih .....	17
Slika 12: Prikaz vsebin na SPIS v primeru zastoja .....	18
Slika 13: Graf kumulativne prihodov in odhodov med pojavom izrednega dogodka .....	19
Slika 14: Prikaz odklona frekvence pri prehodu vozil preko induktivne zanke.....	22
Slika 15: Primer magnetometra.....	23
Slika 16: Graf spremembe frekvence pri odboju od vozila pri Dopplerjev radarju.....	24
Slika 17: Namestitev in delovanje mikrovalovnega detektorja.....	24
Slika 18: Graf spremembe frekvence pri odboju od vozila pri radarju.....	25
Slika 19: Delovanje ultrazvočnih senzorjev.....	26
Slika 20: Princip delovanja pasivnega IR detektorja .....	27
Slika 21: Shema sistema avtomatske detekcije prometa .....	28
Slika 22: Primer štirih procesorskih kartic .....	29
Slika 23: Ugotavljanje časovne razlike pri prejemu signala satelita .....	34
Slika 24: Prikaz delovanja sistema eCall.....	36
Slika 25: Oddajniki mobilnega operaterja ob avtocesti .....	37
Slika 26: Primer sporočanja izrednega dogodka preko aplikacije Waze .....	39
Slika 27: Časovna odvisnost uspešnosti zaznave .....	42
Slika 28: Prikaz zasedenosti gortočno in doltočno po nastanku nesreče .....	44
Slika 29: Stanja prometnega toka pri McMasterjevemu algoritmu.....	49
Slika 30: Primer nevronske mreže .....	51
Slika 31: Videodetekcija dima na podlagi evalvacije vsakega piksla .....	53
Slika 32: Diagram algoritma odštevanja ozadja.....	54
Slika 33: Nastavljanje usmerjenjega detektorja prisotnosti za sistem ISS Autoscope sistem .....	56
Slika 34: Tunelski linijski detektorji za sistem ISS Autoscope sistem .....	57
Slika 35: Arhitektura sistema GPS .....	59

---

Slika 36: Izredni dogodek (trk vozil) v srednjem segmentu.....	59
Slika 37: Prikaz merilnih mest na sistemu Scada.....	71



## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Razpoložljiva kapaciteta pri nesreči na enem ali več pasov, v odstotkih.....	10
Preglednica 2: Pregled merjenih količin posameznih senzorjev .....	30
Preglednica 3: Pregled prednosti in slabosti posameznih vrst senzorjev .....	31
Preglednica 4: Pregled senzorjev glede na občutljivost na vremenske razmere .....	32
Preglednica 5: Mejne vrednosti za pogoj zasedenosti pri določevanju pojava zastoja.....	43
Preglednica 6: Primerjava Waterloo algoritmov glede na stopnjo opremljenosti vozil z oddajniki.....	63
Preglednica 7: Pregled algoritmov .....	64
Preglednica 8: Primerjava uspešnosti algoritmov .....	65
Preglednica 9: Stopnja kompleksnosti algoritma in zahtevnost integracije v obstoječ SNVP .....	66
Preglednica 10: Primerjava uspešnosti algoritmov .....	67
Preglednica 11: Kronologija dogodkov ob pojavu izrednega dogodka z dne 23.9.2014 na štajerski avtocesti.....	70
Preglednica 12: Pregled sporočil s portala SPIS02D .....	71
Preglednica 13: Pregled sporočil s portala SPIS11D .....	73
Preglednica 14: Prihodi in odhodi za primer brez algoritma.....	78
Preglednica 15: Prihodi in odhodi za primer brez algoritma.....	79
Preglednica 16: Vrednost časa za posamezno vrsto vozila in namen potovanja in delež anketiranih na AC .....	81
Preglednica 17: Primerjava prihranka pri vrednosti izgubljenega časa .....	82

**KAZALO GRAFIKONOV**

Grafikon 1: Stopnja detekcije v odvisnosti od povprečnega časa za detekcijo .....	68
Grafikon 2: Ekvivalentni prometni pretok na MD 02D s časovnimi mejniki sporočil s SPIS02D in SPIS11D .....	71
Grafikon 3: Ekvivalentni prometni pretok na MD 12D s časovnimi mejniki sporočil s SPIS11D .....	72
Grafikon 4: Skupna povprečna hitrost na MD 12D s časovnimi mejniki sporočil s SPIS11D .....	72
Grafikon 5: Ekvivalentni prometni pretok na MD 16D s časovnimi mejniki sporočil s SPIS11D .....	75
Grafikon 6: Skupna povprečna hitrost na MD 16D s časovnimi mejniki sporočil s SPIS11D .....	75
Grafikon 7: Primerjava ekvivalentnega prometnega pretoka na MD 16D in MD 12D s časovnimi mejniki sporočil s SPIS11D .....	77
Grafikon 8: Kumulativa prihodov in odhodov v odvisnosti od časa za primer brez algoritma .....	78
Grafikon 9: Stopnja prihodov in odhodov v odvisnosti od časa za primer z algoritmom .....	79
Grafikon 10: Primerjava skupnih zamud vseh vozil brez in z uporabo algoritma .....	80

## KRATICE

AIDA	Autoscope Incident Detection Algorithm
ARIMA	<i>Auto-Regressive Integrated Moving Average</i> /Avtoregresivna integrirana drseča sredina
ASFiNAG	Die Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
AVI	<i>Automatic Vehicle Identification</i> /Avtomatska identifikacija vozila
CCTV	<i>Closed-Circuit TV</i> /Televizija zaprtega kroga
eCall	Vseevropski avtomobilski klic v sili
DES	<i>Double Exponential Smoothing</i> /Dvojno eksponentno glajenje
DOD	<i>Department of Justice USA</i> /Ministrstvo za pravosodje ZDA
DR	<i>Detection Rate</i> /Stopnja zaznavanja
EU	Evropska unija
FAR	<i>False Alarm Rate</i> /Stopnja lažnih zaznav
GLONASS	<i>Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema</i> /Satelitski sistem globalne navigacije
GNSS	Globalni navigacijski satelitski sistemi
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global positioning system</i> /Globalni sistem pozicioniranja
HCM	Highway Capacity Manual
HIOCC	<i>High Occupancy</i> /Visoka zasedenost
IR	Infrardeči
ISS	Image Sensing Systems, Inc.
ITS	Inteligentni transportni sistemi in storitve
MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i>
MTTD	<i>Mean time to detect</i> /Srednji čas za zaznavo
NTSC	National Television System Committee
PAL	<i>Phase-Alternating Line</i>
PI	Performance Index
PIC	Prometno-informacijski center
PPS	Precise Positioning Service
SKS	Spremenljiva kažipotna signalizacija
SPS	Standard Positioning Service
SNVP	Sistem za nadzor in vodenje prometa
SPIS	Spremenljiva prometno-informativna signalizacija
TLD	Tunelski linijski detektor

»Ta stran je namenoma prazna«

## 1 UVOD

### 1.1 Opredelitev problema

Vodenje prometa ob izrednem dogodku je del sistema za nadzor in vodenje prometa, ki se je v Sloveniji začel uporabljati pred desetimi leti. Sistem je bil vzpostavljen s ciljem zagotoviti večjo prometno varnost, večjo udobnost in ekonomičnost potovanj ljudi in blaga, manjše obremenitve okolja, izboljšanje izrabe prometne infrastrukture in večjo izkoriščenost kapacitete cestnega omrežja. Vodenje prometa ob izrednem dogodku je sestavljeno iz večih korakov, prvega predstavlja zaznavanje izrednega dogodka. Od prvega koraka so odvisni naslednji koraki v upravljanju z izrednim dogodkom in hitrejši kot je zaznavanje, učinkovitejši je celoten sistem. Na območju Slovenije se temu koraku z izjemo videodetekcije v preteklosti ni namenjalo veliko pozornosti, čeprav je v tujini število raziska na tem področju precej višje.

Področje avtomatskega zaznavanja izrednih dogodkov se mi zdi smiselno za raziskavo, saj smo v Sloveniji v preteklosti večino vlaganj v prometno infrastrukturo izvedli prav v avtoceste, prav tako pa se po podatkih Statističnega urada Republike Slovenije štirikrat več tonskih kilometrov opravi s cestnim kot železniškim prevozom. Dejavnosti povezane s transportom in logistiko predstavljajo predpogoj za razvoj gospodarstva in tako pomembno prispevajo k bruto domačemu proizvodu posamezne države. V Sloveniji promet v ustvarjenem BDP<sup>1</sup> predstavlja 2,90 % delež. Kljub temu, da v trenutni gospodarski situaciji promet osebnih vozil stagnira, se večina potniškega prometa kot tudi tovornega še vedno opravi na cestah.

Avtoceste in hitre ceste v skupni dolžini 762 km zasedajo manj kot desetino dolžine celotnega državnega cestnega omrežja, realizirajo pa polovico vsega prometa. Zato je pomembno, da je na njih vzpostavljen sistem, ki omogoča čim hitrejšo zaznavanje izrednih dogodkov. V Sloveniji je avtomatsko zaznavanje omejeno le na območja, kjer se uporabljajo videodetekcijske kamere. Te so sicer sposobne zaznati največ tipov izrednih dogodkov, vendar se ti zgodijo tudi na območjih, kjer tovrstnih kamer ni. Zato je namen diplomske naloge predstaviti drugačne rešitve avtomatskega zaznavanja izrednih dogodkov, ki se uporabljajo drugje v Evropi, še največ pa v ZDA. Pri tem sem se osredotočil na algoritme in senzorje, ki zaznavo zastojev omogočajo v kombinaciji. Problematični so zastoji, ki nastanejo kot posledica izrednih dogodkov, saj se jih ne da napovedati kot jutranje oziroma popoldanske konice, zato je njihovo zaznavanje še toliko bolj aktualno.

Z uporabo algoritmov pojava izrednih dogodkov ne moremo popolnoma preprečiti, lahko pa zmanjšamo posledice in tako dosežemo krajše zamude vozil, povišano varnost, zmanjšano možnost za

---

<sup>1</sup> v letu 2012 -

[http://www.mf.gov.si/fileadmin/mf.gov.si/pageuploads/Prora%C4%8Dun/Sprejeti\\_prora%C4%8Dun/2013/POL](http://www.mf.gov.si/fileadmin/mf.gov.si/pageuploads/Prora%C4%8Dun/Sprejeti_prora%C4%8Dun/2013/POL)

nastanek sekundarnih nesreč, nižjo porabo goriva, nižje emisije itd. Ne glede na izbiro tipa algoritma mora ta zagotavljati hitro zaznavo, ki cestnemu operaterju omogoča, da posledice zmanjša v največji možni meri.

V diplomski nalogi so na začetku razloženi pojmi teorije prometnega toka, osrednji del je posvečen različnim tipom senzorjev, ki se vgrajujejo v ali ob cesti ter v vozila. Podrobneje je predstavljena še videodetekcija, ki se edina uporablja pri nas. Prav tako so predstavljeni še mobilni senzori, ki bodo zaradi razvoja novih tehnologij vse bolj aktualni. Za obdelavo prometnih podatkov z namenom avtomatskega zaznavanja izrednih dogodkov so v nadaljevanju opisani različni tipi algoritmov, ki jim sledi še njihova primerjava. V sklepnem delu naloge je z namenom upravičenosti vpeljave sistema za avtomatsko zaznavo analiziran primer nesreče brez in z uporabo algoritma. Na podlagi podatkov merilnih mest smo z deterministično metodo izračunali zamude vozil v dejanskem in teoretičnem primeru, če bi izredni dogodek zaznal algoritem. Te smo kasneje še ovrednotili in tako izračunali, koliko lahko z vpljavo tovrstnega sistema prihranimo.

## 1.2 Izredni dogodek

Izredni dogodek je neponovljiv in nepovraten dogodek na cesti, ki se odraža v prekinitvi normalnega poteka prometnega toka oziroma zmanjšanju kapacitete ceste. Pomen pojma izhaja že iz definicije po SSKJ, kjer je incident, tujka za izredni dogodek, opisan kot »nepričakovan, neprijeten dogodek, ki prekine normalen potek kakega dejanja« (SSKJ, 2014).

Izredni dogodki na cesti se delijo na predvidljive:

- delo na cesti,
- izločanje tovornih vozil iz prometa,
- delna ali popolna zapora na cesti zaradi določenega vzroka (npr. športni dogodek),
- izredni prevoz;

in nepredvidljive:

- prometne nezgode,
- kolona vozil, zastoje,
- poplavljeni vozišče,
- izgubljeni/razliti tovor,
- nasproti vozeča vozila,
- zaustavljena – okvarjena oziroma počasi vozeča vozila,
- izginotje prometnice in
- ostali dogodki, ki se jih ne da predvideti niti po kraju niti po času.

Nas zanimajo predvsem nepredvideni, saj pride do nenadnega znižanja varnosti na cestah. Ključnega pomena je, da so tovrstni dogodki odkriti čimprej in služijo kot podpora sistemom za vodenje prometa ob pojavu izrednega dogodka.

V splošnem lahko zgornje dogodke zaznamo ročno s pomočjo obveščanja voznikov in nadzora iz zraka ali avtomatsko z uporabo različne tehnologije (Rijavec, 2000). Dogodki kot so razliti tovor, nasproti vozeča vozila, zaustavljena vozila, izginotje prometnice, so za avtomatsko zaznavo zelo zahtevni in jih dobro zaznajo le video detekcijski sistemi, ki temeljijo na prostorski detekciji (video, radar itd.) Za zaznavanje nesreč pa je na voljo več tehnologij. V nalogi se osredotočimo predvsem na tehnologije, ki omogočajo zaznavanje zastojev, ki se pojavijo kot posledica izrednih dogodkov v prometu.

Zastoje glede na pojavnost ločimo v dve skupini (Chung in Rosalion, 1999):

- prometni zastoji, ki se ponavljajo (npr. prometne konice, običajni zastoji),
- prometni zastoji, ki se ne ponavljajo (npr. posledice izrednih dogodkov),

Vzroki zastojev so različni, kar 15 % pa jih nastane kot posledica prometne nesreče. Ti predstavljajo tudi največji negativen vpliv v prometu.

## **2 TEORIJA PROMETNEGA TOKA**

Pojem prometnega toka predstavlja urejeno gibanje več vozil na prometnici (Maher, 2006). Pri tem ločimo med gibanjem vozil v prometnem toku (kjer nastopa medsebojna odvisnost med posameznimi vozili) in gibanjem posameznega vozila v njem. Za določitev prometnega stanja je potrebno poznati pretok, hitrost in gostoto. Prometni tok je prostorsko-časovna funkcija naštetih spremenljivk, ki so med seboj povezane s fundamentalnim diagramom prometnega toka.

### **2.1 Prometne spremenljivke**

#### **2.1.1 Gostota prometnega toka**

Gostota prometnega toka je definirana kot število vozil na določenem prostorskem odseku v danem trenutku, glede na vozni pas oziroma smer pri enosmernih cestah ali glede na obe smeri pri dvosmerni cesti. Označujemo jo s številom vozil na kilometer ali z ekvivalentom osebnih vozil na kilometer. Neposredna meritev gostote je praktično neizvedljiva, zato jo izračunamo kot kvocient pretoka in povprečne hitrosti (HCM, 2000).

$$G = \frac{Q}{V} \tag{2.1}$$

kjer je:

$Q$  – pretok v vozilih na uro,

$V$  – povprečna potovalna hitrost v kilometrih na uro,

$G$  – gostota.

### 2.1.2 *Volumen prometnega toka in pretok vozil*

Highway Capacity Manual (2000) razlikuje med pojmom volumen in pretok, vendar oba merita pretok vozil na preseku v danem časovnem intervalu.

Volumen prometnega toka predstavlja skupno število vseh vozil, ki prevozijo določen presek v danem časovnem intervalu. Izraža se v letnem, dnevnem, urnem ali manj kot urnem volumnu.

Pretok vozil pomeni urni ekvivalent vozil, ki določen presek prevozijo v časovni enoti manjši od ene ure (15- ali 5-minutna perioda), izražen za čas ene ure. Za ilustracijo, imamo volumen 10 vozil, ki prevozijo odsek v petnajstih minutah. Pretok tako znaša 10 vozil/0,25h, kar je 40 vozil/h.

Sicer pa z obema spremenljivkama merimo količino vozil, ki bi v določenem časovnem intervalu rada uporabila določen odsek ceste. Pretok izračunamo po naslednji enačbi:

$$Q = \frac{N}{T} \quad (2.2)$$

kjer je:

$Q$  – pretok v vozilih na uro,

$N$  – število vozil,

$T$  – čas.

### 2.1.3 *Hitrost prometnega toka*

Hitrost posameznih vozil v prometnem toku je različna. Za opis toka se zato upošteva srednja vrednost hitrosti vseh vozil v opazovanem prometnem toku in je izražena v kilometrih na uro. Po HCM poznamo glede na način opazovanja dve hitrosti, in sicer:

- srednjo prostorsko hitrost, ki predstavlja aritmetično sredino trenutnih hitrosti vseh vozil v prometnem toku na opazovanem odseku ter je analogna gostoti vozil in
- srednjo časovno hitrost, ki predstavlja aritmetično sredino hitrosti vseh vozil v prometnem toku, ki v določenem časovnem obdobju prevozijo določeni presek ceste ter je analogna pretoku vozil.

Srednjo prostorsko hitrost izračunamo kot kvocient med številom vozil, ki so prevozili določeni odsek in povprečnim potovalnim časom na tem odseku.



$$V_s = \frac{n * L}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{L}{t_a} \quad (2.3)$$

kjer je:

$V_s$  – srednja prostorska hitrost v kilometrih na uro,

$n$  – število opazovanih potovalnih časov,

$L$  – dolžina odseka v kilometrih,

$t_i$  – potovalni čas i-tega vozila v urah,

$t_a$  – povprečen potovalni čas na odseku dolžine  $L$  v urah.

#### 2.1.4 Zasedenost

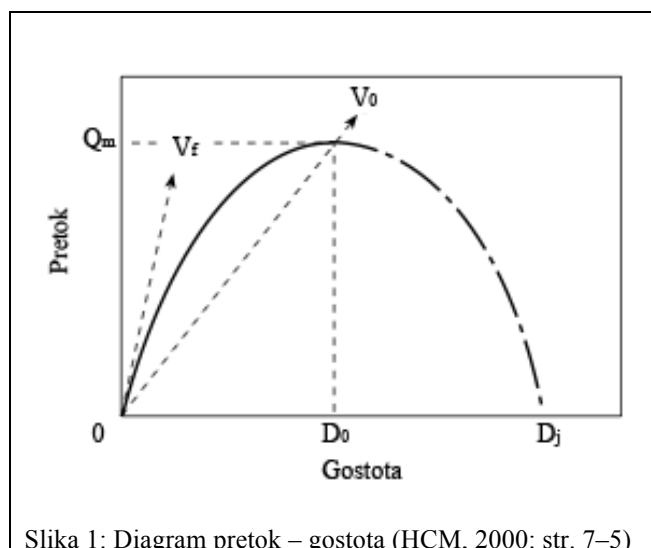
Mnogokrat se zaradi lažje izmere uporablja spremenljivka zasedenost senzorjev, ki je pravtako makroskopska spremenljivka prometnega toka (Kerner, 2009). Predstavlja razmerje med skupno časovno zasedenostjo merilnega območja pod detekcijsko napravo  $T_{veh}$  in dolžino časovnega intervala  $T_{av}$ . Izračunamo jo po naslednji enačbi:

$$o = \frac{T_{veh}}{T_{av}} * 100\% \quad (2.4)$$

## 2.2 Medsebojna relacija med hitrostjo, gostoto in pretokom vozil

Relacije, ki so predstavljene v nadaljevanju, veljajo za neoviran prometni tok.

### 2.2.1 Razmerje pretok - gostota



Slika 1: Diagram pretok – gostota (HCM, 2000: str. 7–5)

Na zgornjem diagramu je prikazana odvisnost pretoka in gostote vozil na avtocestnem odseku. Po pregledu pridemo do naslednjih ugotovitev:

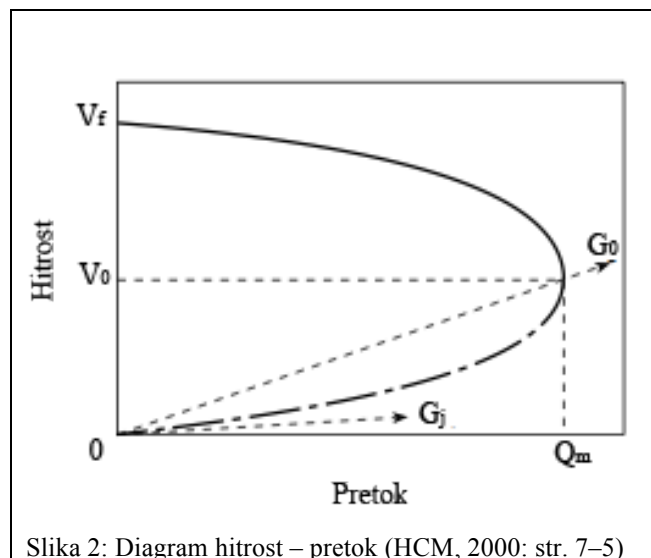
- ko je gostota enaka nič, je tudi pretok enač nič,
- z naraščanjem gostote narašča tudi pretok vozil,

- maksimalen pretok je dosežen pri optimalni (kritični) gostoti,
- pri gostoti, ki je višja od optimalne, se pretok manjša vse do nič, ko je dosežena maksimalna gostota. To je stanje, ko se vozila se ne premikajo – zastoj.

Iz zgornjega diagrama je mogoče odčitati tudi srednjo prostorsko hitrost prometnega toka. Ta je enaka naklonu tangente na krivuljo v poljubni točki.

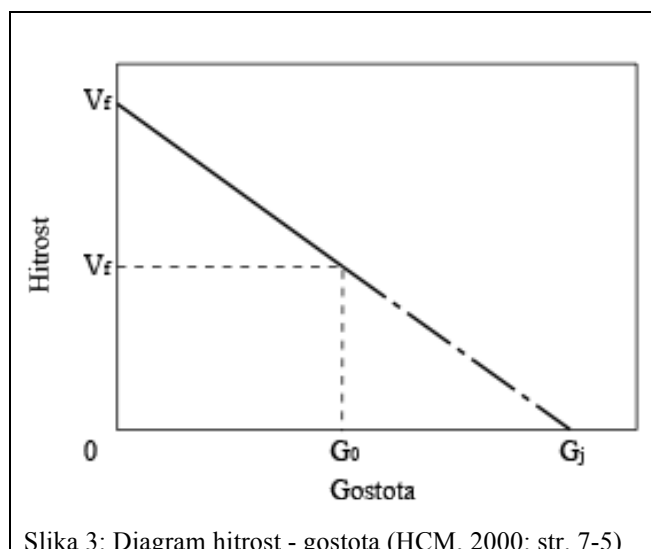
### 2.2.2 Razmerje hitrost – pretok

Odnos med hitrostjo in pretokom je predstavljen v Slika 2. Maksimalen pretok je dosežen pri vrednosti hitrosti med nič in med hitrostjo prostega prometnega toka. Hitrost za maksimalen pretok namreč zavzema različne vrednosti in je odvisna od različnih dejavnikov.



### 2.2.3 Razmerje hitrost – gostota

V neoviranem prometnem toku velja linerarna relacija med hitrostjo in gostoto. Najvišja hitrost  $V_f$  je dosežena pri najmanjši gostoti in obratno, najvišja gostota  $G_j$  je dosežena pri najnižni hitrosti.



### 2.3 Trofazna teorija prometnega toka

Medtem, ko HCM loči med neoviranim in oviranim prometnim tokom, Kerner (2009) predlaga trofazno teorijo prometnega toka, ki temelji na empiričnih vrednosti prometnih spremenljivk v oviranem prometnem toku v Nemčiji. Poleg prostega toka avtor predlaga delitev zastoja na sinhronizirani tok in obsežni premikajoči zastoj. Skozi raziskave se je pokazalo, da se vzorci za oba ponavljajo ne glede na cestno infrastrukturo, vremenskih razmer, razmer na cesti in podobnega (Kerner in sod., 2009).

Obsežni premikajoči zastoj je definiran kot premikajoči se zastoj, ki ohranja srednjo hitrost prednjega dela (pročelja) zastoja tudi takrat, ko se širi skozi različne faze prometnega toka. Lahko ga opišemo tudi kot lokalno zgoščeni prometni vzorec (zastoj), ki se premika v nasprotni smeri prometnega toka in je omejen s pročeljem in repom zastoja. Zanj je značilno, da je znotraj zastoja srednja hitrost vozil nizka, gostota pa velika. Vozila, ki so na pročelju zastoja, pospešujejo k hitrosti prostega prometnega toka, medtem ko morajo vozila na repu zmanjšati hitrost zaradi približevanju obsežnemu premikajočemu zastoju (Kerner, 2009).

Sinhronizirani tok je stanje, v katerega preide prosti prometni tok zaradi zmanjšanja povprečne hitrosti pri ozkem grlu kljub nezmanjšanemu pretoku. Do njega lahko pride spontano ali pa zaradi zunanjih dejavnikov. V prvem primeru govorimo o povečanem povpraševanju na območju zastoja, v drugem primeru pa do sinhroniziranega toka privede širjenje sinhroniziranega toka ali obsežnega premikajočega zastoja, ki se širita v nasprotni smeri toka. Načeloma velja, da večji kot je pretok v prostem prometnem toku na ozkem grlu, večja je verjetnost spontanega prehoda v sinhronizirani tok. Za razliko od obsežnega premikajočega zastoja se hitrosti lahko spreminjajo, medtem ko je pročelje

zastoja pogosto stalno. Sinhronizirani tok predstavlja tudi vmesno fazo med prostim prometnim tokom in obsežnim premikajočim zastojem, saj do slednjega nikdar ne pride neposredno (Kerner, 2009).

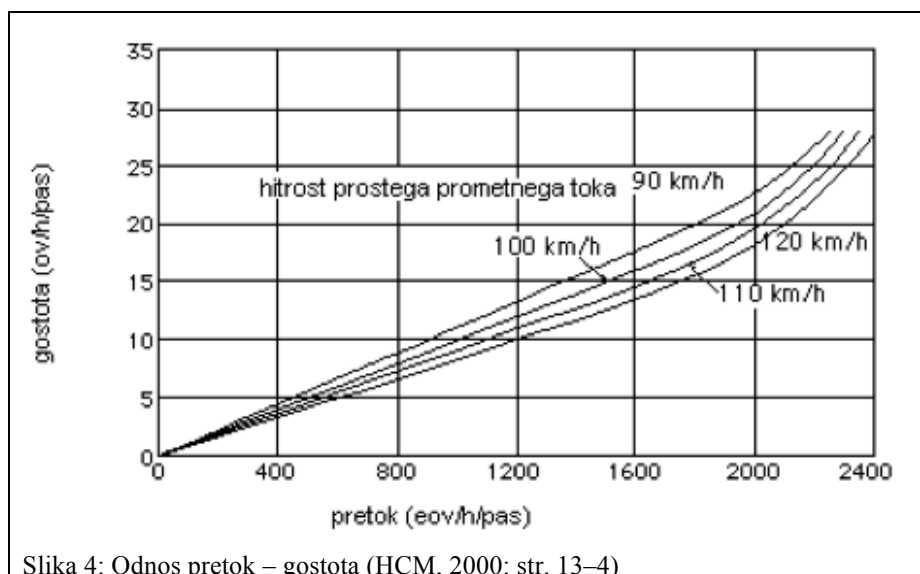
Kerner (2009) je prepoznal tudi stanje metastabilnosti prostega toka. Pojem se nanaša na stanje, ko so v prometnem toku zaznane motnje, vendar tok ostane stabilen. To se zgodi v primeru, ko je hitrost večja od kritične in gostota manjša od kritične gostote. V nasprotnem primeru pa pride do nestabilnega prometnega toka. To lahko opišemo tudi na način, da je prometni tok stabilen, v kolikor pride le do majhnega povečanja prometnega toka. Pri velikem povečanju pa ta ni več stabilen, kar vodi do premikajočih zastojev. V tem delu se tudi trofazna teorija razlikuje od klasične teorije prometnega toka, ki loči le stanji neoviranega in oviranega prometnega toka, prehajanje med njima pa je spontano, ko gostota prometnega toka preseže kritično vrednost.

Pri upoštevanu teorije trofaznega toka je potrebno upoštevati, da je osnovana na podlagi meritev na nemški avtocesti Bundesautobahn 5, ki povezuje prometno križišče Hattenbach v zvezni deželi Hessen s švicarsko mejo. Zaradi tega so se v preteklosti pojavili očitki, da enakih rezultatov ni mogoče pričakovati drugje, vendar so Rehborn in ostali (2011) prišli do istih ugotovitev na podatkih iz Velike Britanije in ZDA. Nadaljna kritika se nanaša na interpolacijo podatkov, saj so bile meritve izvedene na podlagi zančnih detektorjev, medtem ko je zaključke sklepal na podlagi trajektorij. Ni namreč razvidno, kako so bili točkovni podatki interpolirani. Schönhof in Helbing (2009) pravtako ugotavljata, da zaradi nadaljne delitve sinhroniziranega toka na več stopenj teh ni mogoče združiti pod skupen pojem sinhroniziranega toka. V literaturi se pojavi še več kritik, ki pa za nadaljne branje diplomske naloge niso bistvene, zato si jih lahko radoveden bralec prebere v članku Schönhofa in Helbinga (2009).

## **2.4 Kapaciteta in nivo uslug**

V primeru planiranja in načrtovanja cest govorimo o kapaciteti kot konstanti, pri upravljanju prometa pa ne. V tem primeru jo obravnavamo kot spremenljivko, saj je ravno namen upravljanja zvišanje znižane kapacitete. Kapaciteto lahko razumemo tudi kot kvantitativno merilo za določeni odsek. Po HCM (2000) je definirana kot maksimalno število vozil, ki v dani časovni enoti prepotujejo presek ali enoten segment ceste pri prevladujočih cestnih, geometrijskih, okoljskih in prometnih pogojih. Osnova za določitev kapacitete je neka logična verjetnost ponavljanja stopnje prometnega toka tekom urnih konic.

HCM (2000) navaja, da je polna kapaciteta avtocestnega odseka dosežena pri ugodnih geometrijskih pogojih in pogojih prometnega toka. To je pri avtocestah izvedljivo pri hitrosti prometnega toka 120 km/h ali več. V tem primeru ta znaša 2400 ev/h/pas, pri nižjih hitrostih pa je ustrezno nižja, kot prikazuje diagram na sliki 4.



Slika 4: Odnos pretok – gostota (HCM, 2000: str. 13–4)

#### 2.4.1 Prometno povpraševanje

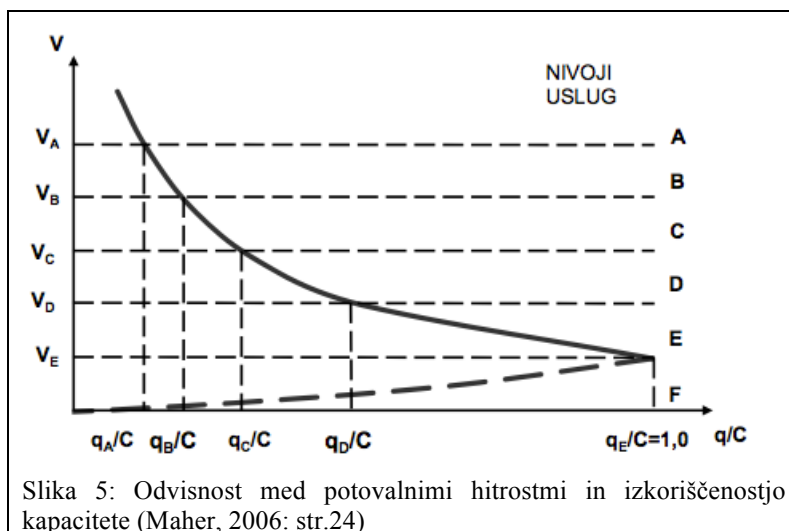
Prometno povpraševanje je glavno merilo za število vozil ali uporabnikov, ki bi radi uporabljali določen odsek. Označimo ga s številom vozil na uro. Povpraševanje se nanaša na prihajajoča vozila. V primeru, da je prometni tok tekoč in ni kolone, je povpraševanje enako prometnemu volumnu (HCM, 2000).

#### 2.4.2 Nivo uslug

Nivo uslug predstavlja kvalitativno merilo, ki opisuje vozne pogoje v prometnem toku ter je definirano kot razmerje med maksimalnim pretokom in kapaciteto. Odvisen je od hitrosti in potovalnega časa, svobode manevriranja z vozilom, motnje toka, udobja med vožnjo ter varnosti vožnje ter stroškov uporabe vozila. HCM definira šest nivojev uslug od A do F, kjer nivo usluge A predstavlja najboljše vozne pogoje, F pa najslabše. Pri nivoju F se zaradi pogojev vožnje (ustavi-spelji) ne da določiti prepustnosti, zato imamo za posamezen odsek definiranih zgolj pet maksimalnih pretokov (do razreda E) (Maher, 2006):

- Nivo usluge A, kjer imamo svobodni tok z visokimi hitrostmi in kjer je gostota prometa majhna ter manevriranje z vozili ni omejeno. Vozniki ohranjajo željeno hitrost z malo ali nič zamudami.
- Nivo usluge B, kjer imamo svobodni prometni tok s hitrostmi, ki so le delno omejene z gostoto prometa. Vozniki so pri manevriranju že delno omejeni, vendar zmanjšanje hitrosti ni pretirano.
- Nivo usluge C, kjer imamo stabilni prometni tok, vendar sta hitrost in možnost manevriranja omejena s povečanim številom vozil. Na tej ravni je dosežena hitrost še zadovoljiva.
- Nivo usluge D, kjer se stanje prometnega toka približuje nestabilnemu toku z bistveno omejenimi hitrostmi in majhno možnostjo manevriranja.

- Nivo usluge E, kjer je stanje prometnega toka nestabilno zaradi vožnje v koloni. Na tej ravni je gostota prometa velika in je pretok vozil enak prepustnosti, zaradi česar so možni zastoji. Maksimalni pretok pri nivoju E je enak kapaciteti.
- Nivo usluge F, kjer so hitrosti v prometnem toku nižje od kritičnih, pretok se giblje od nič do vrednosti, ki je manjša od prepustnosti. V skrajnem primeru sta lahko tako hitrost, kakor tudi pretok, enaka nič.



### 2.4.3 Zmanjšanje kapacitete

Glavni razlog za vpeljavo sistemov za avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov je čimhitrejša povrnitev začetne kapacitete ceste. Do zmanjšanja kapacitete lahko pride zaradi del na cesti, neugodnih vremenskih razmer, pokvarjenih vozil ali nesreč. Zmanjšanje kapacitete zaradi pokvarjenih vozil in nesreč je običajno kratkotrajno, saj odstranjevanje posledic prometne nesreče traja od manj kot ene (manjši trk z osebnim vozilom) in vse do dvanajst ur (večja nesreča, ki vključuje polno naložen tovornjak). Povprečno trajanje nesreče, kjer je udeležno osebno vozilo, traja 37 minut, pri čemer so pri več kot polovici posledice odstranjene v manj kot pol ure. V primeru nesreče s tovornjakom, pa je povprečni čas trajanja nesreče 63 minut (HCM, 2000).

Zmanjšanje kapacitete je odvisno od deleža vozišča, ki je zaradi nesreče blokiran in od števila pasov na preseku ceste. Delež razpoložljive kapacitete je prikazan v preglednici 1.

Preglednica 1: Razpoložljiva kapaciteta pri nesreči na enem ali več pasov, v odstotkih (HCM, 2000: str. 22–11)

Število pasov v eni smeri	Zaprto odstavnih pasov	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

Pri pregledu ugotovimo, da zmanjšanje kapacitete ni proporcionalno številu blokiranih pasov. Razpoložljiva kapaciteta pri treh pasovih v eni smeri je v primeru blokirane enega pasu le še polovica prvotne. Do tega pride zaradi vedenja voznikov, ki v območju nesreče vozijo počasneje in opazujejo posledice, zato je tudi njihovo reagiranje počasnejše. S tujko temu početje pravimo *rubbernecking*, ki je tudi problem znižanja kapacitete cestnega odseka v nasprotni smeri. Zmanjšanje je po oceni HCM v tem primeru od 5 odstotkov (pri lažji nesreči) do 25 odstotkov pri nesrečah z večjim številom udeležencev (HCM, 2000).

## 2.5 Pojav udarnega vala

Pri oviranem prometnem toku pride do situacije, kjer so vozila v čedalje večji medsebojni odvisnosti. V tem primeru mora voznik paziti na sosednja vozila, saj vsaka nenadna sprememba lahko povzroči večjo motnjo v prometnem toku. Ta sproži nastanek vala v prometnem toku, ki se širi v času in prostoru. Udarni val je definiran kot val, ki se premika v nasprotni smeri toka, pri čemer vozila, ki se približujejo zastoju, zavirajo, ali pa kot val, ki se premika v smeri toka in redči promet v isti smeri (HCM, 2000). V odvisnosti od predznaka enačbe (2.5) je odvisno, v katero smer toka se bo val širil.

$$V_{sw} = \frac{V_2 g_2 - V_1 g_1}{g_2 - g_1} \quad (2.5)$$

$V_{sw}$  – hitrost udarnega vala,

$V_2$  – hitrost vozil v ozkem grlu,

$V_1$  – hitrost prihajajočih vozil,

$g_2$  – gostota vozil v ozkem grlu,

$g_1$  – gostota prihajajočih vozil,

V praksi to pomeni, da negativna vrednost hitrosti udarnega vala pomeni daljšanje zastoja, saj je »povpraševanje« večje od trenutne kapacitete odseka ceste. Na ta način je možna tudi boljša ocena dolžine zastoja, ki je nastal pred ozkim grlom.

## 2.6 Karakteristike prometnega toka na avtocestah

Karakteristike prometnega toka na osnovnem avtocestnem odseku so odvisne od dogajanja v smeri toka in nasprotni smeri toka od opazovanega odseka, s čimer mislimo na zastoje. Za nas so zanimivi zastoji, do katerih pride zaradi nesreč, lahko pa do njih pride tudi zaradi priključnih ramp, zmanjšanja števila pasov, prepletanja več tokov, vzdrževalnih del ali objektov na cesti. Na avtocesti razdelimo prometni tok v tri skupine glede na medsebojno odvisnost med hitrostjo, tokom in gostoto:

- Nezasičen prometni tok je tok, na katerega ne vplivajo razmere v in nasprotni smeri toka,
- razpuščena kolona je tok, ki je prišel iz območja zastoja in pospešuje nazaj proti prostemu prometnemu toku,
- zgoščen tok je tok, na katerega vpliva sotočno ležeči zastoj.

### 3 SISTEM ZA NADZOR IN VODENJE PROMETA

Sistem za nadzor in vodenje prometa (SNVP) je inteligentni transportni sistem, ki ga v Sloveniji uporabljamo že od leta 2003 in sicer na prostorsko in tehnično zahtevnih odsekih ter na odsekih, kjer spremenljivi vremenski pogoji pogosto vplivajo na vozne razmere. Do sedaj je SNVP nameščen na odsekih Klanec—Ankaran, Vransko—Blagovica, na zahodni ljubljanski obvoznici s podaljškom do Kosez in deloma na gorenjsko avtocesto, na hitri cesti Razdrto—Vipava in pred predorom Karavanke (Zorin, 2010). SNVP se je vpeljal z namenom:

- izboljšanja prometne varnosti,
- povečanja izkoriščenosti obstoječega cestnega omrežja,
- zmanjševanja onesnaženosti okolja,
- zagotovitavljanja večjega udobja in ekonomičnosti potovanj ljudi in blaga.

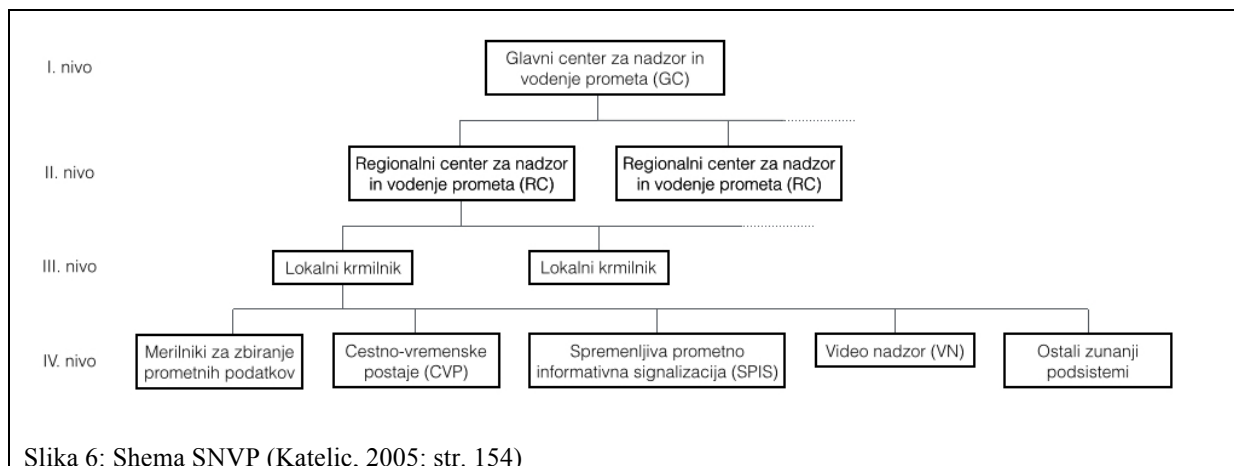
Njegove osnovne funkcije so:

- zbiranje in shranjevanje podatkov o prometnih in vremenskih dogodkih na obravnavanem odseku s pomočjo kamer, detektorjev, vremenskih postaj,
- nadzor nad trenutnim prometnim in vremenskim stanjem,
- nadzor nad delovanjem sistema,
- upravljanje prometa v različnih prometnih in vremenskih stanjih,
- upravljanje prometa ob pojavu izrednih dogodkov,
- komuniciranje z drugimi organi (gasilci, reševalci, policija, vzdrževalne službe) (Zorin, 2006).

Zaradi delovanja sistema se lahko vzpostavijo optimalni prometni pogoji glede na dane razmere na cestah v realnem času.

Kompleksna zasnova sistema za nadzor in vodenje prometa temelji na več ravneh, ki so hierarhično razdeljene. Med seboj so povezane z optičnim telekomunikacijskim omrežjem, ki mora zagotavljati hiter in pravilen prenos podatkov, zaščito prenosa informacij, možnost nadgradnje oziroma razširitve ter omogočati celovit daljinski nadzor upravljanje v skladu s standardi (Žura in sod., 2005).





Slika 6: Shema SNVP (Katelic, 2005: str. 154)

1) Najvišja raven predstavlja glavni center za nadzor in vodenje prometa, ki opravlja nadzorno funkcijo nad delovanjem celotnega sistema v državi.

2) Druga raven so regionalni nadzorni centri, ki so postavljeni ob izbranih avtocestnih odsekih in 24 ur na dan vršijo ukrepe za nadzor in vodenje prometa. Njihove naloge so zajem podatkov od lokalnih krmilnikov in uporabnikov, vzdrževanje baze podatkov, statistična obdelava podatkov za krajše obdobje, nadzor nad realnim stanjem na cesti na regionalnem odseku, izmenjava informacij z drugimi organi na regionalni ravni (reševalci, gasilci, policija,..) in navsezadnje tudi posredovanje informacij uporabnikom cest preko portalov spremenljivo prometno-informativne signalizacije (SPIS) ali prometno-informacijskega centra (PIC) (Zorin, 2006).

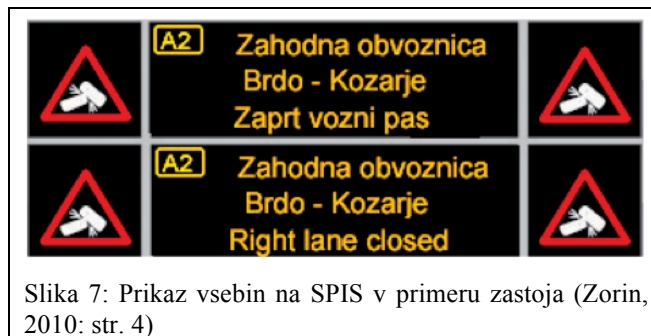
Slednji je bil ustanovljen leta 2006 z namenom zbiranja in posredovanja informacij javnosti o stanju celotnega državnega cestnega omrežja in prometa na njem. PIC v Sloveniji deluje znotraj regionalnega nadzornega centra v Dragomlju. Sicer funkcije centra delimo še na tri skupine: glede na prometno stanje, glede na vremensko stanje in glede na pojav izrednih dogodkov na cesti, o čemer bom več napisal v nadaljevanju (Kastelic, 2005).

3) Tretja raven sestavljajo lokalni krmilniki, nameščeni vzdolž celotnega odseka. Njihova naloga je krmiljenje zunanjih podsistemov in posredovanje podatkov regionalnim centrom, hkrati pa izvajajo tudi nekatere ukrepe za vodenje prometa (Kastelic, 2005).

4) Četrta raven omogoča neprekinjeno zbiranje vseh prometnih podatkov, potrebnih za delovanje SNVP. To so video nadzorni sistem za kontrolo prometnic, cestno-vremenske postaje, ki zbirajo podatke okoljskih vplivih ter SPIS, ki je še posebej pomembna pri izvajanju ukrepov vodenja prometa. Vzdolž avtocestnega odseka so nad posamezno smerjo nameščeni sledeči grafični prikazovalniki (Zorin, 2010):

- Portal SPIS – sestavljen je iz osrednjega enobarvnega in dveh krajnjih polnobarvnih polj, ki sta namenjena prikazu prometnih znakov. V primeru, da se prometna znaka razlikujeta od

statične prometne signalizacije na odseku, ju je potrebno upoštevati prioritarno. Osrednje polje pa je tekstovno in namenjeno informacijam in opisu dogodka. Običajno je sestavljen iz treh vrstic, kjer ena vrstica navaja makro lokacijo dogodka, drugo mikro lokacijo in tretja dodaten opis dogodka (Slika 7). Možno pa je tudi prikazovanje simbolov za označevanje odprtih/zaprtyh pasov, kar je pogosto v uporabi predvsem pred predori. Na avtocestnem odseku je nameščenih več portalov, povprečna razdalja med njimi pa znaša do 3 km.



Slika 7: Prikaz vsebin na SPIS v primeru zastoja (Zorin, 2010: str. 4)

- Polportal SPIS – sestavljen je iz enobarvnega in dvobarvnega grafičnega prikazovalnika. Slednji je namenjen prikazovanju prometnih znakov, prvi pa tekstovnim sporočilom, ki lahko vsebujejo tudi enobarvne simbole. Običajno so locirani pred priključkom na avtocesto, da voznike obvestijo o stanju na avtocesti.



Slika 8: Polportal SPIS (Zorin, 2010: str. 8)

- Spremenljivi prometni znaki – sestavljeni so iz dveh dvobarvnih prikazovalnikov, ki prikazujeta dva prometna znaka. Nameščeni so na obeh straneh smernega vozišča po priključkih na avtocesto v primerih, ko je do naslednjega portala SPIS prevelika razdalja, da bi bilo možno vodenje uvoznih prometnih tokov.



Slika 9: Spremenljivi prometni znaki pred predorom (Zorin, 2010: str. 5)

- Spremenljiva kažipotna signalizacija (SKS) – njen namen je vodenje prometa po obvoznih poteh v primeru zaprtja določenega avtocestnega odseka. Vgrajena je v statične kažipotne table pred razcepi in priključki. Sestavljeni so iz dveh polj. Prvo polje omogoča prikaz vsebin v rdeči, beli in rumeni barvi ter je namenjeno prikazovanju prometnih znakov in puščic za smer obvoza. Drugi del pa je namenjen prikazovanju tekstovnih sporočil.



Slika 10: Spremenljiva kažipotna signalizacija (Zorin, 2010: str. 5)

Prometne vsebine, ki jih prikazuje zgornja signalizacija, delimo na dve skupini. V prvi so sporočila, ki so namenjena vodenju prometa in vsebujejo omejitve, prepovedi in druge informacije za vodenje prometa. Ta se uporabljajo v primerih izrednih dogodkov, ko je potrebno voditi promet na način, da se zagotovi maksimalna varnost. V drugo skupino sodijo sporočila, ki so namenjena obveščanju. Njihov cilj je pravočasno obveščanje voznikov o pojavu dogodka na kritičnem odseku avtoceste, da lahko izberejo alternativno pot oz. so obveščeni o oviri na njihovi poti.

### 3.1 Upravljanje z izrednimi dogodki

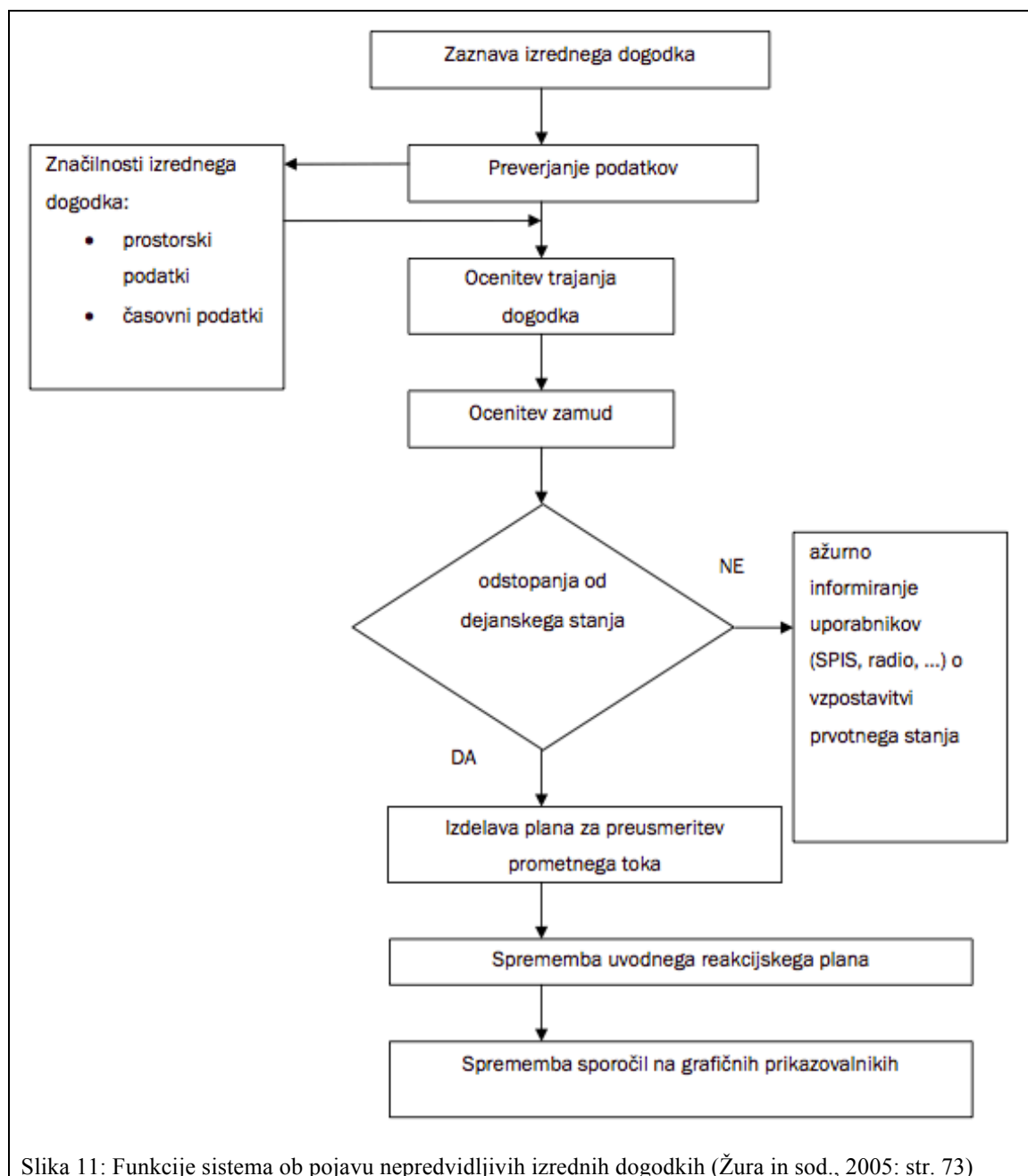
SNVP nudi podporo sistemu za upravljanje z izrednimi dogodki, kjer usposobljeni operaterji v nadzornih centrih skrbijo za nemoteno odvijanje prometa na cestah. V primeru pojava izrednega dogodka imajo že vnaprej pripravljene ukrepe, s katerimi minimalizirajo škodo, ki jo je dogodek povzročil, hkrati pa vrniti promet v prvotno, normalno stanje. Glavni cilji upravljanja prometa so (Žura in sod., 2005):

- zmanjšanje števila ponesrečencev v prometu in materialne škode,
- preprečitev nastanka sekundarnih izrednih dogodkov,
- zagotavljanje varnosti reševalcev,
- preprečitev nastanka zastojev.

Upravljanje z izrednimi dogodki razdelimo na več faz:

- zaznavanje izrednega dogodka,
- preverjanje izrednega dogodka,
- odziv na izredni dogodek,
- odstranitev posledice izrednega dogodka in
- vzpostavitev prometnega stanja pred izrednim dogodkom.

Zgornje so Žura in sodelavci (2005) prikazali na diagramu, ki je prikazan na sliki 11.

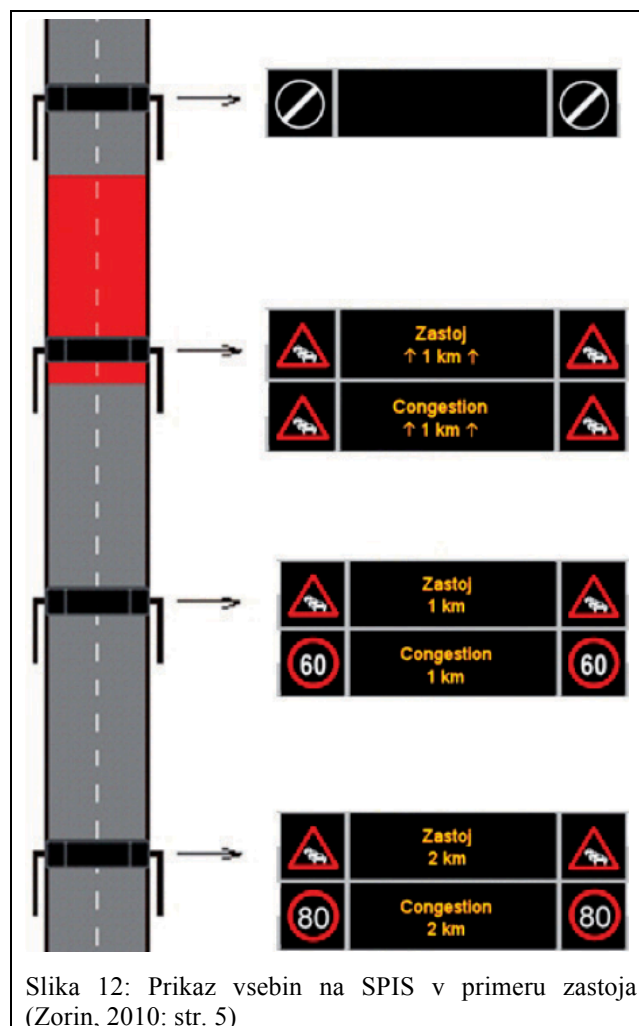


V diplomski nalogi se osredotočimo na prvi korak v sistemu, ki je zaznavanje izrednega dogodka. Po zaznavi dogodka se zahvaljujoč sodobnim algoritmom operaterju na velikem zaslonu v nadzorni sobi prikaže živa slika mesta, kjer naj bi se izredni dogodek zgodil. Na podlagi dogajanja se operater odloči za potrditev izrednega dogodka in sprejme nadaljnje ukrepe za blaženje posledic. V Sloveniji se z namenom nadzora nad izrednim dogodkom takoj za potrditvijo začne v sistemu zbirati podatke o (Kastelic, 2005):

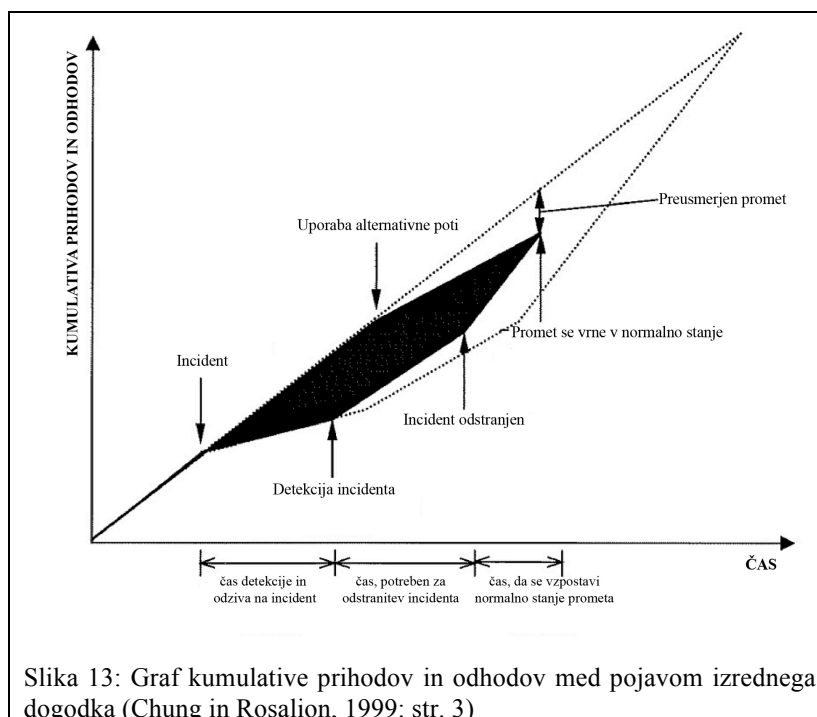
- vrsti,
- lokaciji,
- času začetka in konca,
- številu zaprtih prometnih pasov in o

- podatkih o posledicah/sekundarnih dogodkih.

Operaterju je na voljo program prometnih vsebin, ki ustrezajo posamezni vrsti izrednega dogodka, ki jih lahko objavi preko SPIS in tako ostale udeležence v prometu obvesti o dogodku na njihovi poti (Slika 12). Uporabnike cest lahko v nadzornih centrih obvestijo tudi preko medijev – prometna obvestila na teletekstu, radijskih postajah, spletnih straneh, v zadnjem času pa tudi preko družbenega omrežja Twitter. Primer namestitve prometnih vsebin vzdolž odseka zaradi zastoja je prikazan na Slika 12.



V kolikor je potrebno, operater sproži še alarm za intervencijsko ekipo, da posreduje na cesti. Prvi trije koraki so zelo pomembni, saj hitro ukrepanje skrajša čas trajanja dogodka. V podjetju Traficon trdijo (2013), da sistem za detekcijo, ki zazna in potrdi izredni dogodek v roku dveh minut, že v 34 minutah povrne 100% kapaciteto ceste. Medtem ko počasnejši sistemi, ki za potrditev potrebujejo 16 minut, zagotovi polno kapaciteto šele po 77 minutah (Tang, 2014). Če podatka grobo ocenimo, je zaradi raznolikosti izrednih dogodkov nemogoče čez palec oceniti čas za očiščenje posledice dogodka. Drži pa zagotovo, da hitro reagiranje zmanjša nastanek sekundarnih dogodkov, ki se v polovici primerov zgodijo znotraj časovnega intervala 10 minut od nastanka prvega dogodka.



Zamudo zaradi zastoja lahko prikažemo tudi grafično. Na ordinatni osi je prikazana kumulativna prihodov in odhodov, medtem ko abscisna os predstavlja čas. Diagram prikazuje faze dogodka v primeru uporabe sistema za upravljanje z izrednimi dogodki. Takoj po izrednem dogodku se stopnja odhodov glede na prihode zniža, kar povzroči zamudo, ki je na diagramu osenčena v črno. Površina je enaka zamudi vseh vozil v zastoju. V vmesnem času je operater že opozoril voznike, da je prišlo do dogodka na njihovi poti, zato se nekateri odločijo za alternativno pot, kar se pokaže v znižanju stopnje prihodov. Na diagramu je vidna zadnja faza – vzpostavitev normalnega stanja, ki se ne zgodi takoj po koncu dogodka, vendar je stopnja odhodov občutno večja kot med izrednim dogodkom. Praznjene kolone se izvaja v obliki nasičenega toka 2000 vozil na uro. V tem primeru se zaradi manjšega števila prihodov normalno stanje vzpostavi prej, kot bi se sicer, če sistem za upravljanje z izrednimi dogodki ne bi deloval. Zamude v tem primeru so na diagramu označene s črtkano črto (Chung in Rosalion, 1999).

#### 4 METODE IN TEHNOLOGIJE ZAZNAVANJA IZREDNIH DOGODKOV

Senzorji za zbiranje podatkov predstavljajo četrto raven sistema za nadzor in vodenje prometa in so za zaznavanje dogodkov bistvenega pomena. Vzdolž avtocestnega odseka so razporejeni različne vrste senzorji in naprave, ki nepretrgoma zbirajo prometne podatke (Parkany in Xie, 2005):

- obcestni senzorji (ang. *roadway-based*)
- mobilni senzorji (ang. *probe-based*)
- ročno obveščanje (ang. *driver-based*)

Delujejo tako, da zaznajo prisotnost vozila, ko to zaide v njihovo območje. V sistemih za nadzor in vodenje prometa se običajno zbirajo naslednji podatki (Kastelic, 2005):

- prometni pretok osebnih vozil,
- prometni pretok težkih tovornih vozil,
- hitrost prevoza po kategorijah,
- časovni razmak med vozili,
- stoječe vozilo in
- vožnja v napačno smer.

Po izmerjenih vrednostih sledi preizkus verodostojnosti podatkov, kjer se na podlagi mejnih vrednosti posameznih parametrov nepravilne meritve izločijo. Nekateri senzorji omogočajo merjenje določenih količin, ki jih je sicer potrebno izračunati. Iz izmerjenih podatkov se za posamezni pas izračunajo naslednje količine (Kastelic, 2005):

- gostota prometnega toka,
- delež težkih tovornih vozil,
- ekvivalent prometnega pretoka,
- povprečne hitrosti za osebna vozila,
- povprečne hitrosti za težka tovorna vozila,
- skupne povprečne hitrosti,
- zasedenost in
- standardnega odklona hitrosti.

#### **4.1 Obcestni senzorji**

Najbolj klasični senzorji so obcestni, ki so vgrajeni v ali ob vozišče ter jih imenujemo tudi točkovni senzorji – izmerjeni prometni podatek je točkoven. Pri uporabi večih takšnih senzorjev v zaporedju je možno pridobiti tudi prostorske podatke, npr. prostorsko hitrost. Razlikujejo se glede na tip tehnologije in vrsto parametrov, ki so jih sposobni meriti.

##### **4.1.1 Induktivni zančni detektorji**

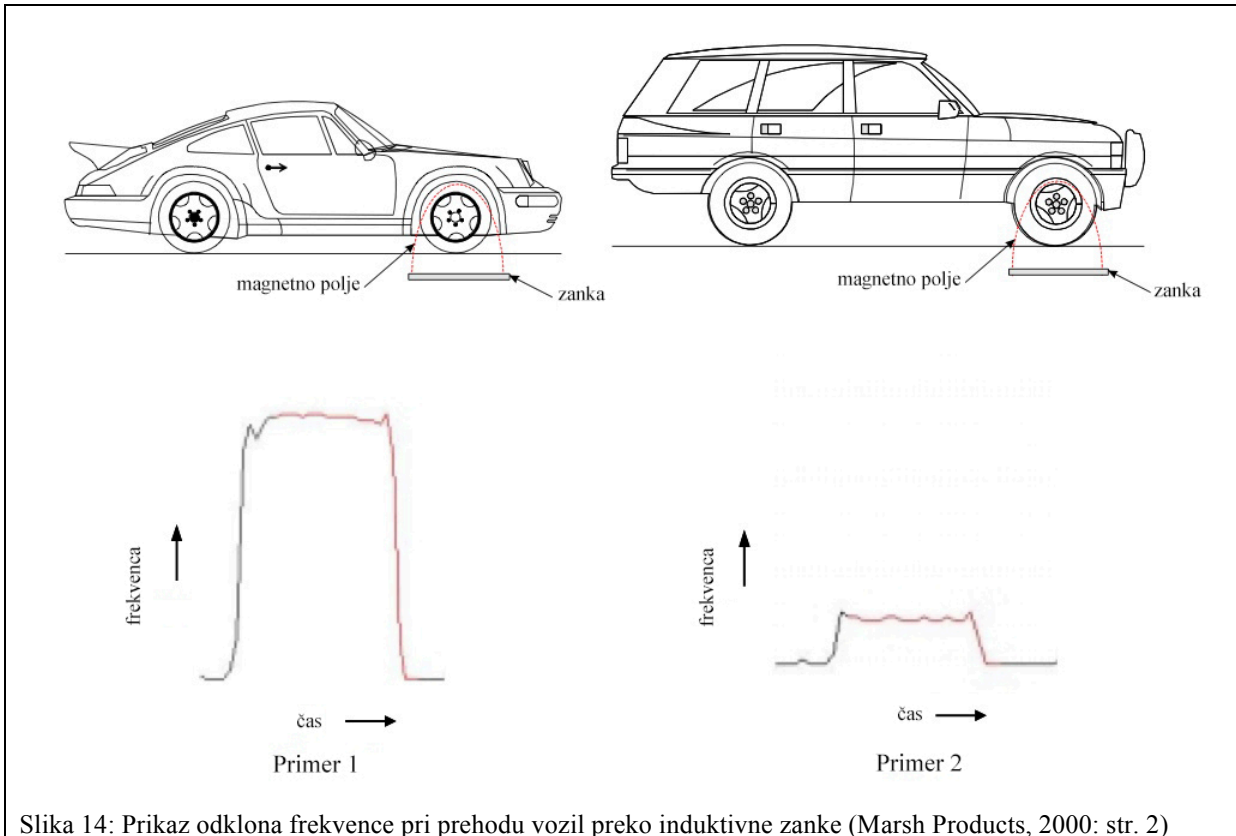
Pri pridobivanju prometnih podatkov so induktivne zanke ena najbolj razširjenih, zanesljivih in cenovno ugodnih tehnologij. Zgrajene so iz enega ali več ovojev žice, povezanih v krog. Na enem koncu se žica nadaljuje v podaljšek zančnega kabla, ki se priključi v senzorsko enoto. Vgrajujejo se 5 cm pod vozno površino v obliki pravokotnika (običajno z daljšo stranico 2 m in krajšo 1,5 m) s prirezanimi robovi, saj se tako zmanjša možnost poškodbe ovoja žice. Vgradnja zanke mora biti izvedena kvalitetno, saj je ta ves čas izpostavljena prometu, mehanske poškodbe pa največkrat povzročijo nepravilno delovanje.



Princip delovanja temelji na merjenju spremembe magnetnega polja, ko vozilo prečka zanko, zato jo je ob vgradnji potrebno umeriti. Na sprednjem in zadnjem koncu je priklopljena na dva oscilatorja za merjenje induktivnosti zanke. Te ponavadi delujejo na frekvenci od 30 kHz do 100 kHz (Rijavec, 2000). Ko nad njo ni vozila oziroma drugih feromagnetnih predmetov, se vzpostavi osnovna frekvenca. Ko pa se čez zanko zapelje vozilo, se induktivnost v njej spremeni. To spremembo zazna občestna enota, ki nakaže prehod vozila oziroma njegovo prisotnost v detekcijski coni. Podatki, ki jih lahko izmerimo na tak način, so:

- volumen,
- zasedenost,
- razmak med vozili,
- hitrost vozil (dve zaporedni zanki) in
- klasifikacijo vozil.

Klasifikacija vozil je mogoča zaradi različnega odklona frekvence, če zanke delujejo na višjih frekvencah. Pri vozilih, ki imajo podvozje nižje dnu, je odklon večji kot pri terenskih vozilih oziroma tovornjakih (slika 14). Potrebno se je zavedati, da lahko zanka klasificira priklopnik kot dve osebni vozili, saj občutljivost ni odvisna od količine kovinskih delov, temveč od površine, ki je v ravnini, vzporedni s cestiščem, t.i. »induktivnim odtisom« (Marsh Products, 2000). V Sloveniji se pri štetju že uporabljajo znamke tipa QLTC-8, ki so sposobne razvrstiti vozila v 10+1 razredov: motorno kolo, osebni avto, kombi, lahki tovornjak, srednje težki tovornjak, težji tovornjak, tovornjak s prikolico, vlačilec, avtobus, zgibni avtobus in nekategorizirano vozilo.



Slika 14: Prikaz odklona frekvence pri prehodu vozil preko induktivne zanke (Marsh Products, 2000: str. 2)

Induktivna zanka izmeri podatek za točno določen presek enega ali več pasov ceste, zato je potrebno njeno lokacijo skrbno določiti. Za pravilno delovanje se je potrebno izogniti jeklenim mostovom ali bližini železniških tirov, saj ti lahko povzročijo motnje pri delovanju (Jaušovec, 2006). Sicer zanke ob pravilni vgradnji in vzdrževanju merijo parametre ne glede na vremenske pogoje, njihova glavna pomankljivost pa je v vgradnji v cestno telo, saj je treba v primeru vzdrževanja zapreti vozní pas.

Čeprav je zanesljivost induktivnih zank nad 95 % (Jaušovec, 2006), so na cestah z nizkim volumnom manj primerne za zaznavanje izrednih dogodkov, saj dobi algoritem v tem primeru premalo podatkov za hitro, točno in zanesljivo določitev izrednega dogodka.

#### 4.1.2 Magnetni senzori

Magnetni senzori se vgrajujejo v cestišče in delujejo po istem načelu kot zanke, saj zaznajo vozilo glede na spremembo zemeljskega magnetnega polja ob njegovem prehodu. V primerjavi z zankami se manj kvarijo, pravtako so bolj odporni na zunanje vplive in preprostejši za vgradnjo (Parkany in Xie, 2005). Glede na način delovanja se delijo na aktivne in pasivne magnetne detektorje. Aktivne poimenujemo tudi magnetometri in so sestavljeni iz navitja žice (tuljave) okoli magnetnega jedra. Moderni magnetometri delujejo v brezžični navezavi z dostopno točko, na katero v realnem času pošiljajo podatke o prometu. Dostopna točka se običajno nahaja v neposredni bližini na obstoječi ali dodatni cestni opre. Magnetometri merijo komponente (x,y,z) magnetnega polja zemlje in

spremembe na vsaki osi. Uporabljajo se za zaznavanje prisotnosti in merjenje hitrosti, če sta dva detektorja vgrajena drug zraven drugega. Potrebno pa je paziti, da nista vgrajena preblizu, saj lahko prihaja do motenj.



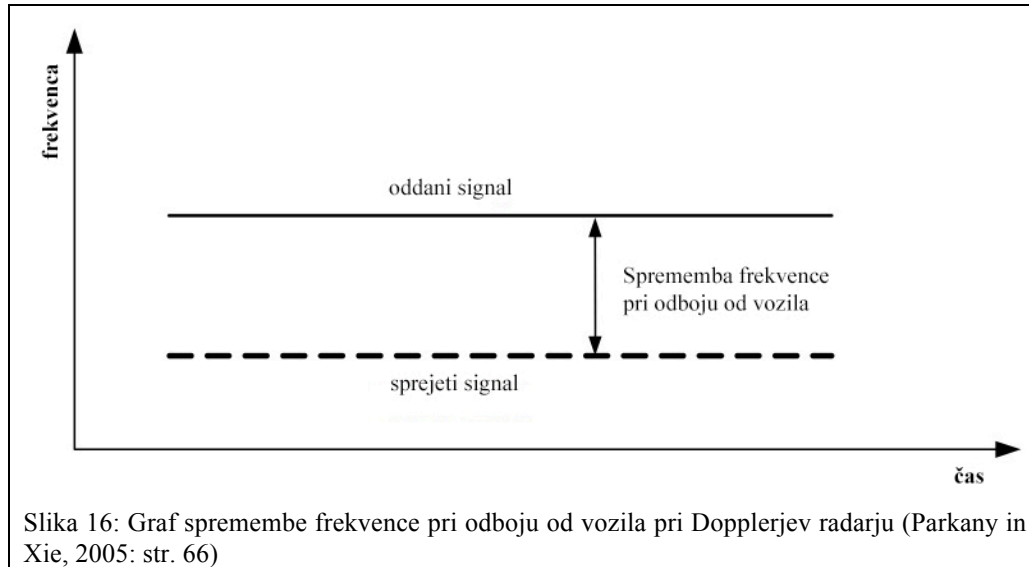
Pasivni, z drugo besedo tudi induktivni magnetometri, zaznajo motnje zemeljskega magnetnega polja, ko vozilo prevozi detekcijsko cono. Vozilo zaznajo le v primeru, če je hitrost višja od 5 km/h, kar pomeni, da niso sposobni zaznati ustavljenih vozil, niti se jih ne da uporabiti za zaznavanje prisotnosti.

#### 4.1.3 Mikrovalovni senzorji

Radarje ali mikrovalovne senzorje uvrščamo med nevsiljive, saj za njihovo vgradnjo ni potreben poseg v vozno površino. Glede na način valovanja, ki pogojuje, katere prometne količine pridobimo, ločimo dve vrsti mikrovalnih detektorjev:

- kontinuirano valovanje s konstantno frekvenco
- valovanje s spremenljivo frekvenco

Detektorji na osnovi kontinuiranega valovanja delujejo po načelu Dopplerjevega radarja, ki zazna spremembo frekvence mikrovalovnega valovanja, ki se odbije od premikajočega vozila. Tako pridobljena hitrost vozila je sorazmerna spremembi frekvence.



Ta pa se razlikuje glede na začetno valovno dolžino delovanja radarja. Z enačbo (4.1) podamo zvezo med hitrostjo vozila, oddano frekvenco in spremembo v frekvenci (Klein in Kelley, 1996).

$$fD = \frac{2v}{c} f \cos q \quad (4.1)$$

kjer je:

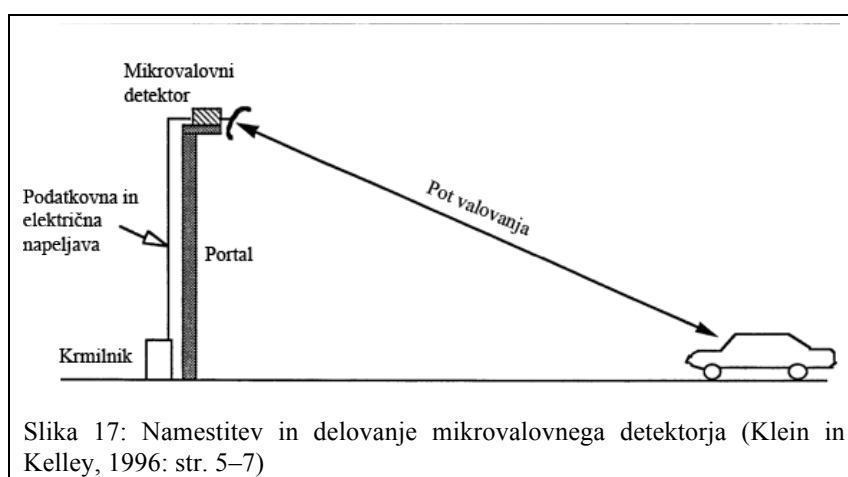
$fD$  – sprememba v frekvenci

$f$  – frekvenca delovanja radarja

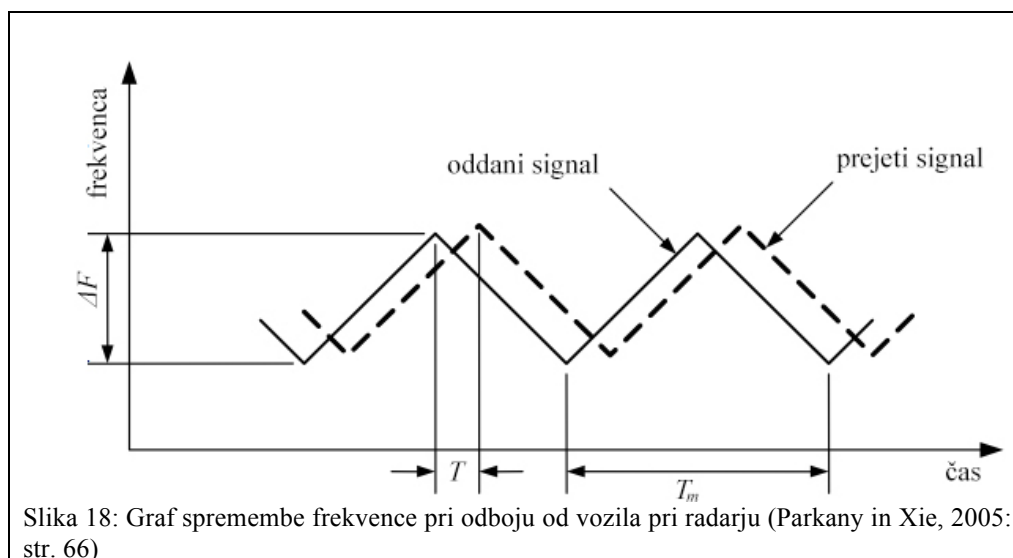
$v$  – hitrost vozila

$c$  – hitrost svetlobe

$q$  – kot med smerjo vozila in smerjo žarkov od detektorja proti vozilu



Zaradi načina delovanja, tovrstni mikrovalovni detektorji zaznajo le premikajoča se vozila in jih tako ne moremo uporabljati kot detektorje za prisotnost (Hoel in sod., 2011). Običajno delujejo na frekvenci okoli 24 GHz, njihov dolet je odvisen od posameznih modelov.



Drugi tip predstavljajo detektorji, ki oddajajo valovanje s spremenljivo frekvenco (ang. *FMCW* – *Frequency Modulated Continuous Wave*) med 2,5 in 24 GHz. Na ta način merimo tako hitrost vozil kot tudi njihovo prisotnost v detekcijski coni. Prisotnost je nastavljen parameter med 6 in 60 sekund. Za primer, na zahodni ljubljanski obvoznici je vrednost nastavljena na 25 sekund. Hitrost se pri tovrstnih detektorjih izračuna na dva načina. V prvem primeru je polje detekcije razdeljeno na več zaporednih mest, ki so med seboj oddaljeni na znani razdalji  $d$ . Hitrost vozila  $v$  se izračuna iz časovne razlike  $\Delta T$ , ko vozilo s prednjim robom zapelje v detekcijsko mesto (ang. *range bin*), kot to narekuje enačba (4.2) (Klein in Kelley, 1996).

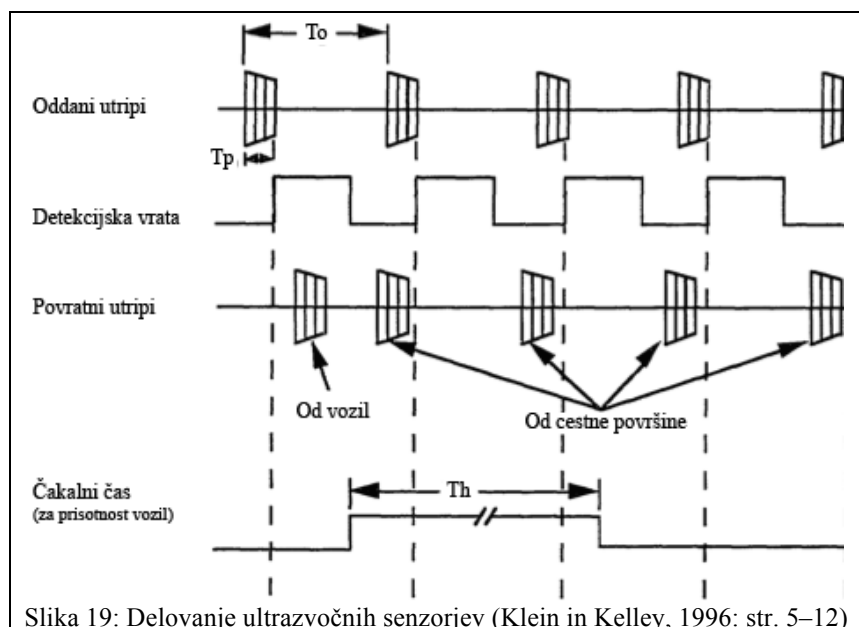
$$v = \frac{d}{\Delta T} \quad (4.2)$$

Na ta način delujejo tudi radarji, ki imajo med vsemi detektorji najdaljši dolet in se uporabljajo na slovenskih avtocestah. To so vrtiljivi radarji, ki pokrivajo območje 360°, imajo ozek azimut in širok vertikalni odklon snopa. Zaradi ozkega snopa v azimutu lahko radar natančno določi položaj vozil oziroma drugih objektov. Ta znaša okoli 2 stopinje, kar zadošča, da na razdalji 500 metrov naprava zazna predmete dimenzij vsaj 0,25 metra, kar imenujemo resolucija območja. V vertikalni smeri je snop širši, zato lahko radar, četudi je montiran na višini, zazna predmete, ki so blizu. Primeren kot za uporabo v tunelih je 40°. Pri tovrstnih radarjih se meritve običajno izvajajo dvakrat na sekundo, lahko tudi večkrat, vendar se potem zmanjša radij detekcijskega območja. Meritve se na ta način izvajajo ne glede na vremenske ali svetlobne pogoje (Clark, 2014).

V Sloveniji se ponekje uporabljajo mikrovalovni detektorji, ki imajo poleg Dopplerjevega radarja še ultrazvočni in infrardeči del. Na ta način je mogoča še klasifikacija vozil po kategorijah, zaznavanje kolone in zasedenosti vozišča, določitev časovnega razmaka med vozili, zaznavanje ustavljenih vozil in vozil, ki vozijo v nasprotno smer (Zorin, 2006).

#### 4.1.4 Ultrazvočni senzorji

Ultrazvočni senzorji delujejo podobno kot mikrovalovni detektorji, s pulznim ali kontinuiranim valovanjem. Pri nas se uporabljajo le prvi, ki oddajajo utripe časovne dolžine  $T_p$ . Gre za časovno dolžino od 0,02 do 2,5 ms v ponavljajočih obdobjih  $T_o$ , ki so običajno dolgo od 33 do 100 ms. Detektor pri tem meri čas, potreben, da utrip potuje do vozila in nazaj. Za čimučinkovitejšo zaznavanje je sprejemnik ponavadi nastavljen tako, da zazna le predmete, ki so od tal oddaljeni več kot pol metra. To je definirano tako, da detektor ne sprejme povratnega vala, če se ta odbije od cestne površine, saj takrat sprejemnik ne sprejema več. Cilj je namreč, da detektor sproži naslednji pulz tik za tem, ko prejme odziv od prejšnjega, saj s tem izboljša zaznavanje vozil, ki vozijo z visoko hitrostjo (Klein in Kelley, 1996).



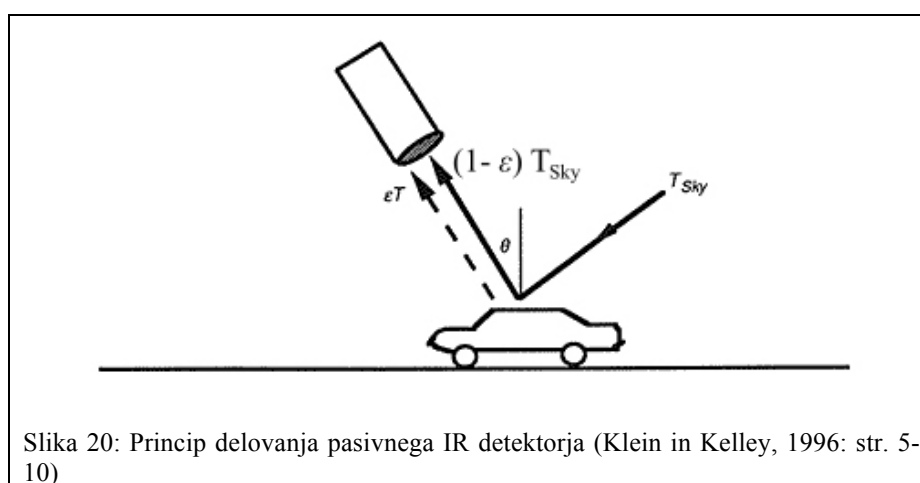
Ultrazvočni senzorji oddajajo neslišno frekvenco od 25 kHz do 50 kHz. Z njimi je možno posneti profil vozila in ga klasificirati v vnaprej določene razrede, vendar le v primeru namestitve detektorja neposredno nad voznim pasom. Poleg tega ultrazvočni detektorji merijo tudi hitrost, zasedenost in prisotnost (Parkany in Xie, 2005).

#### 4.1.5 Infrardeči senzorji

Infrardeči (IR) senzorji na slovenskih cestah dopolnjujejo Dopplerjev radar in ultrazvočni del v mikrovalovnih detektorjih podjetja Adec. Po načinu delovanja ločimo aktivne in pasivne, ki jih uporabljamo tudi v Sloveniji. Delovanje aktivnih je podobno kot pri mikrovalovnih detektorjih. V detekcijsko cono so usmerjene svetleče diode (ang. LED) ali močnejše laserske diode, ki oddajajo IR valovanje. Energija, ki se odbije od cestne površine oziroma del energije, ki se odbije od vozila v detekcijski coni, se meri na senzorju. Hitrost vozila je možno izmeriti na podlagi dveh žarkov na znani

razdalji in času, ki ga vozilo potrebuje za prehod med njima. Poleg hitrosti nam aktivni IR detektorji nudijo podatke o zasedenosti, klasifikaciji vozil po razredih in njihovi prisotnosti v detekcijski coni. Pri delovanju tovrstnih detektorjev je potrebno upoštevati, da so zelo občutljivi na vremenske razmere in lahko signal za prehod vozila sproži že senca v detekcijski coni (Hoel in sod., 2011).

Pasivni IR detektorji ne oddajajo lastne energije, temveč jo le zaznavajo iz detekcijske cone. Senzorji merijo toplotno energijo v območju spektra od 6,5 do 14  $\mu\text{m}$ , ki jo vozila pri prehodu oddajajo, ta pa se razlikuje od tiste, ki jo oddaja vozna površina.



Pri prehodu vozila senzor zazna odstopanje v kontrastu glede na vozišče, saj vsak oddaja različno temperaturo  $T_V$  in  $T_R$  in emisijo (emissivity)  $\varepsilon_V$  in  $\varepsilon_R$ . Zaznana temperatura vozila  $T_B$  se izračuna po enačbi (4.3).

$$T_B(\theta, \Phi) = \varepsilon_V T_V + (1 - \varepsilon_V) T_{Sky} \quad (4.3)$$

Pri čemer sta  $\theta$  in  $\Phi$  kota vpada žarkov,  $T_{Sky}$  pa funkcija atmosferskega in kozmičnega sevanja. Analogno lahko enačbo zapišemo še za temperaturo vozišča, ki jo senzor zazna.

$$T_B(\theta, \Phi) = \varepsilon_R T_R + (1 - \varepsilon_R) T_{Sky} \quad (4.4)$$

Z odštevanjem enačb (4.3) in (4.4) dobimo primer, ko je  $T_R$  enako  $T_V$ :

$$dT_B(\theta, \Phi) = (\varepsilon_R - \varepsilon_V)(T_R - T_{Sky}) \quad (4.5)$$

Na ta način lahko merimo prisotnost, volumen, zasedenost, pri čemer se je treba zavedati pomankljivega delovanja ob slabih svetlobnih in vremenskih pogojih (Parkany in Xie, 2005). V Sloveniji se pasivni senzorji uporabljajo v sklopu mikrovalovnih detektorjev z namenom aktiviranja ultrazvočnega merjenja oziroma v primeru energetske varčnega delovanja (*power safe*) tudi aktiviranja Dopplerjevega radarja (Zorin, 2006).

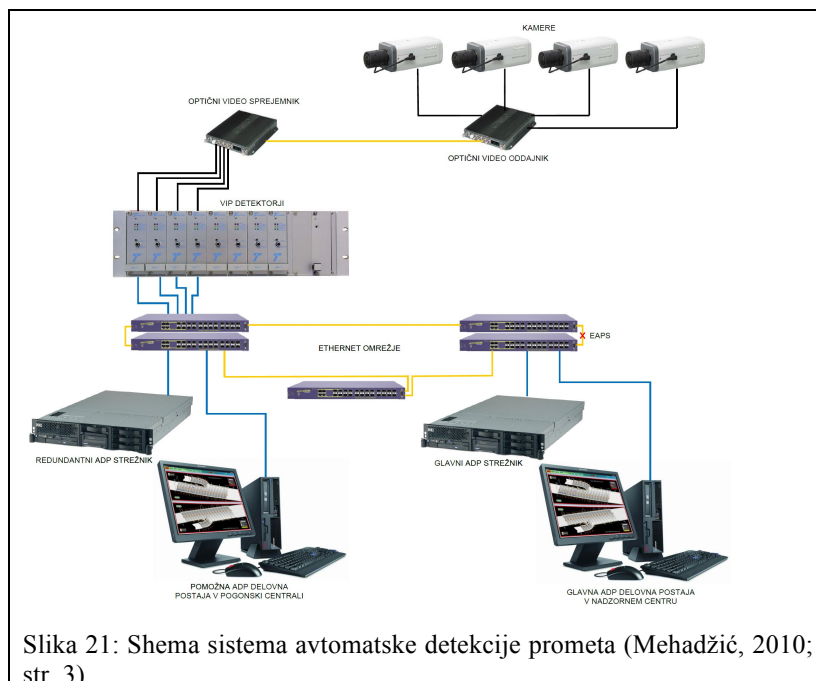
#### 4.1.6 Video detekcijski sistem

Video detekcijski sistemi spadajo med naprednejše in se jih namešča na potencialno nevarnejše odseke, kot so viadukti, predori, mostovi, avtocestni priključki in razcepi ter na mestih, kjer se spremeni prečni profil ceste (Zorin, 2006). Takšen sistem ima precej prednosti pred induktivnimi zankami in drugimi senzorji za merjenje podatkov o prometnem toku, saj lahko poleg podatkov o prometnem toku zaznajo tudi počasna oziroma ustavljena vozila znotraj detekcijskega območja.

Glede na način oziroma vrsto obdelave slike video detekcijske sisteme razdelimo na dve skupini:

- kamera in procesor sta v istem ohišju,
- kamera in procesor sta ločena.

V Sloveniji se sistem z ločenima kamero in procesorjem običajno uporabljajo v predorih, na preostalih delih ceste pa kamere, ki imajo procesor v ohišju. Pri sistemih, kjer sta kamera in procesor ločena, mora priti video signal v najvišji možni kvaliteti do procesorske kartice, kjer procesor obdela sliko. Izbira kamere je v primeru ločenega procesorja in video signala poljubna, vendar pa mora kamera zagotoviti ustrezno kakovost in format slike. Podpora formatov je odvisna od izbire ponudnika na trgu, vendar je pri vseh standard, da podpirajo vsaj PAL in NTSC format. Kakovost slike zavisi od ločljivosti, razmerja signal/šum in objektivna kamere. Z optičnimi povezavami je možno zagotoviti ustrezno kakovost slike pri razdalji do 4 km pri mnogorodnih optičnih povezavah in tudi do 40 km pri enorodnih optičnih povezavah. Ta se uporablja pri prenosu slike na večjih razdaljah, kjer se ta digitalizira in pred vhodom v procesor zopet pretvori v analogno (Starič, 2007). Pri krajših razdaljah pa se slika v analogni obliki prenaša po koaksialnih kabljih. V primeru nizke kakovosti prenešenega video signala, lahko pride do velikega števila lažnih alarmov, kar zmanjša zanesljivost tovrstne tehnologije.





Obdelava poteka v realnem času z algoritmom, ki deluje na metodi odštevanja ozadja tako, da vsako sliko primerja s privzeto. Sprememba v slikovnih točkah (piksljih) nakaže prehod vozila oziroma predmete v vidnem polju kamere. Algoritem je sposoben razlikovati med različnimi dogodki na sliki, o čemer je več napisanega v poglavju 3. o algoritmih. Procesorske kartice so vgrajene v tračniške okvirje v komunikacijskih omaricah, kjer so zaščitene pred vplivi vlage, prahu in toplote. Sposobne so analizirati video signal, ki ga tudi kodirajo za pretakanje (ang. *streaming*) po mreži. Pri današnjih sistemih je to kodiranje MPEG-4. Vsaka kartica ima na sprednji strani tudi video izhod, po katerem se signal vodi do sistema video nadzora prometa (Mehadžić, 2010). Novejše procesorske kartice so sposobne analizirati tudi digitalni video signal, kodiran v MPEG-4 ali H.264, odvisno od proizvajalca, ki ga dobijo preko IP naslovov posameznih kamer.



Slika 22: Primer štirih procesorskih kartic (Trafigon, 2014)

Kamere z vgrajenim procesorjem, potrebujejo le vmesno komunikacijsko ploščo, saj se vsa analiza zgodi že v ohišju kamere. Razdalja pri prenosu video signala je v tem primeru minimalna, zato ne pride do zmanjšanja kakovosti slike, zmanjša pa se čas za obdelavo podatkov. Vmesna komunikacijska plošča je potrebna za komunikacijo med operaterjem in kamero. Običajno imajo za prenos slike video izhod, v novejše se vgrajuje tudi priključek za omrežno povezavo (Starič, 2007). Zaradi zunanjih vplivov, kot so sonce, dež, sneg ali žled, imajo kamere pogosto senčnik, ki zmanjšuje vpliv na sprednji strani.

#### 4.1.6.1 Namestitev kamere

Namestitev kamere mora biti izvedena tako, da je željeni odsek najbolje pokrit in da v vidnem polju kamere ni pretiranih reflektivnih objektov, ki bi odsevali ali obzorja. Vpliv slednjega se sicer da zmanjšati s povečavo (ang. *zoom*), zaslonom na ohišju kamere ali pa z detektorji kontrasta. Da je vidno polje čim večje in zaznavanje čim boljše, mora biti kamera nameščena čim višje in v smeri odvijanja prometnega toka. To je pomembno zaradi razlikovanja med vozili, saj bi v primeru prenizko

nameščene kamere prišlo do njihovega prekrivanja. Zaradi gradnje premostitvenega objekta ali portala se kamere ne namešča v osi voznih pasov, ampak na drogove ob voznih pasovih. Zaznavanje mora segati preko vseh pasov in potencialnih tovornih vozil, ki vozijo po njem, zato morajo biti kamere nameščene tako visoko, da je v območju zaznavanja možno zaznati osebno vozilo tudi preko morebitnih ovir. Običajno je to nekje med 15 in 21 metri (Parkany in Xie, 2005).

Prometne podatke video detekcijski sistemi zajemajo preko virtualnih detektorjev oziroma zank, ki jih prednastavimo za vsako kamero posebej. Na ta način v realnem času pridobimo naslednje prometne podatke:

- zaznavanje posameznega vozila,
- hitrost,
- dolžino vozila in
- klasifikacijo po razredih.

Na podlagi izmerjenih podatkov se izračuna časovna zasedenost, gostota prometnega toka, pretok vozil, povprečne hitrosti (skupne in po razredih) in časovni razmak med vozili (Zorin, 2006). Algoritmi, obravnavani v poglavju 3.6.1., so zmožni tudi prepoznavanja različnih izrednih dogodkov na avtocesti (zaustavljena vozila, nasproti vozeča vozila, dim, pešci, padel tovor).

#### 4.1.7 Povzetek

Preglednica 2: Pregled merjenih količin posameznih senzorjev

Tehnologija	Klasifikacija	Prisotnost	Hitrost	Volumen	Zasedenost
Induktivne zanke	✓	✓	✓	✓	✓
Magnetni senzorji	✓	✓	✓	✓	
Mikrovalovni (Doppler)	✓		✓	✓	✓
Mikrovalovni (FMCW)	✓	✓	✓	✓	✓
Ultrazvočni senzorji	✓	✓	✓	✓	✓
Pasivni IR			✓	✓	✓
Aktivni IR	✓	✓	✓	✓	✓
Videodetekcija	✓	✓	✓	✓	✓

Zgornja preglednica ponuja hiter pregled merjenih oziroma izračunanih količin posameznih senzorjev. Izbira senzorja namreč vpliva tudi na izbiro algoritma za avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov, saj ti za svoj izračun potrebujejo različne podatke o prometnem toku. O tem je več napisano v poglavju 5.9. Izmerjene količine morajo biti za pravilno delovanje sistema predvsem natančne in zanesljive. To je doseženo s skrbno vgradnjo in umerjanjem senzorjev. Tekom življenjske dobe je

potrebno nadzorovati delovanje le-teh in jih po potrebi ponovno umeriti. Za lažjo primerjavo med senzorji so v Preglednica 3 zbrane njihove prednosti in slabosti.

Preglednica 3: Pregled prednosti in slabosti posameznih vrst senzorjev

<b>Tehnologija</b>	<b>Prednosti</b>	<b>Slabosti</b>
Induktivne zanke	<ul style="list-style-type: none"> <li>- znana, razširjena tehnologija</li> <li>- neobčutljiva na vremenske, razmere</li> <li>- ugodna cena</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ena zanka meri en pas</li> <li>- vgradnja in vzdrževanje zahteva poseg v vozišče</li> </ul>
Magnetni senzorji	<ul style="list-style-type: none"> <li>- enostavni za vgradnjo</li> <li>- neobčutljivi na vremenske razmere</li> <li>- manj občutljivi na promet kot zanke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- en senzor za en pas</li> <li>- vgradnja in vzdrževanje zahteva poseg v vozišče</li> </ul>
Mikrovalovni senzorji	<ul style="list-style-type: none"> <li>- brez posega v vozišče</li> <li>- detekcija na več pasovih obstranski vgradnji</li> <li>- neobčutljivi na vremenske razmere</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dopplerjev radar ne zazna mirujočih vozil</li> </ul>
Ultrazvočni senzorji	<ul style="list-style-type: none"> <li>- brez posega v vozišče</li> <li>- detekcija na več pasovih</li> <li>- meritve višine vozil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vremenske razmere lahko vplivajo na delovanje</li> <li>- možne motnje pri merjenju zasedenosti pri vozilih, ki vozijo z visoko hitrostjo</li> </ul>
Pasivni IR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- brez posega v vozišče</li> <li>- nizka poraba energije</li> <li>- veččonski merijo tudi hitrost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- občutljivi na vremenske razmere (močan dež, sneg, gosto meglo)</li> </ul>
Aktivni IR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- brez posega v vozišče</li> <li>- detekcija na več pasovih</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- občutljivi na vremenske razmere (gosta megla in sneg)</li> </ul>
Videodetekcija	<ul style="list-style-type: none"> <li>- brez posega v vozišče</li> <li>- detekcija večjega območja na več pasovih</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- občutljiva na vremenske razmere (megla, močan sneg, dež)</li> <li>- potrebno občasno čiščenje leč</li> <li>- visoka namestitev kamere</li> <li>- najdražja izmed naštetih senzorjev</li> </ul>

Za pravilno delovanje sistemov za avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov morajo senzorji ves čas delovati pravilno in zanesljivo. Pri načrtovanju sistemov je potrebno upoštevati tudi okolje, v katerega vgrajujemo senzorje. Preglednica 4 prikazuje delovanje senzorjev ob različnih vremenskih pogojih. Enostaven primer je videodetekcija, ki ima med vsemi najširši spekter uporabe, veliko detekcijsko polje, vendar je v primeru močnega sneženja ali goste megle povsem neuporabna.

Preglednica 4: Pregled senzorjev glede na občutljivost na vremenske razmere (Incident Detection, 2014: str. 68)

<b>Tehnologija</b>	Jasen dan	Jasna noč	Vroč dan	Rahel veter	Močan veter	Rahe l dež	Močan dež	Rahel sneg	Megla	Dim
Induktivne zanke	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Magnetni senzorji	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Mikrovalovni (Doppler)	✓	✓	✓	✓	✓				✓	
Mikrovalovni (FMCW)	✓	✓	✓	✓	✓				✓	
Ultrazvočni senzorji	✓	✓		✓		✓		✓		
Pasivni IR	✓	✓	✓	✓	✓				✓	
Aktivni IR	✓	✓	✓	✓	✓				✓	
Videodetekcija	✓	✓	✓		✓	✓				✓

## 4.2 Mobilni detektorji

Izraz mobilni detektor se nanaša na detektorje, ki so nameščeni v vozilih in imajo možnost sporočanja lokacije posameznega vozila v realnem času (floating car data). Podatki o hitrosti in lokaciji posameznih vozil se prenesejo v center za vodenje prometa preko obcestnih sprejemnikov ali neposredno po določeni frekvenci z mobilnih enot vozil. Na ta način je mogoče dobiti dovolj natančne prostorske podatke o prometnem toku, da algoritem razbere, ali se je na določenem odseku zgodil izredni dogodek. Ker je z vsakim letom vse več vozil opremljenih s tovrstnimi senzorji, podatki o prometnem toku vse bolj odražajo dejansko stanje in so tako dovolj zanesljivi, da se jih uporabi za avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov.

### 4.2.1 Avtomatsko lociranje vozila

Sistemi za avtomatsko lociranje vozila se uporabljajo za določitev položaja vozila v določenem trenutku. Med najbolj razširjene spada GPS – globalni sistem pozicioniranja (Global Positioning

Systems), ki ga vzdržuje in upravlja obrambno ministrstvo ZDA – DOD (U. S. Department of Defense). O samostojnem sistemu se je v Evropski Uniji (EU) začelo razmišljati leta 1999, ko je bil izbran koncept. Za razliko od GPS naj bi bil Galileo, ki ga razvijata EU in Evropska vesoljska agencija, primarno namenjen civilni uporabi, le po potrebi pa tudi vojaški. Sistem naj bi bil dokončan leta 2013, vendar je zaradi denarnih težav njegova izgradnja še vedno pod vprašajem.

V Rusiji so z izgradnjo svojega satelitskega navigacijskega sistema GLONASS začeli že leta 1976 v Sovjetski zvezi. Čeprav je bil sistem dokončan leta 1995, je zaradi pomanjkanja denarja za vzdrževanje takoj začel propadati. Začetek predsedovanja Vladimirja Putina je pomenilo modernizacijo sistema in hkratno promocijo za civilno uporabo. Vseh satelitov je 24, od tega so trije nadomestni. Za razliko od GPS se za prenos signala uporablja 15 različnih frekvenc, ki uporablja le eno ali dve frekvenci. Četudi so nekatere frekvence podvojene, so sateliti razporejeni tako, da se dva z isto frekvenco nikoli ne vidita med seboj. Glede na raven uporabe tudi GLONASS loči med civilnim in avtoriziranim uporabnikom. Slednjega predstavljajo ruske oborožene sile, ki za sprejem signalov uporabljajo drug kanal. Natančnost tega je zaradi tajnosti neznana, civilni uporabnik se lahko od leta 2011 zanaša na pet- do desetmetrsko natančnost (Oleynik, 2012).

Kitajska je začela graditi svoj satelitski navigacijski sistem BeiDou proti koncu osemdesetih let. Za razliko od preostalih sistemov ta uporablja le štiri satelite, ki pokrivajo le območje Kitajske in sosednje države, pozicija pa je določena na 100 m natančno. V načrtu imajo izgradnjo večjega sistema BeiDou-2 oziroma COMPASS, ki bi s 35 sateliti pokrival celotno Zemljo in nudil natančnost do 10 m ob njegovem dokončanju, predvidoma leta 2020.

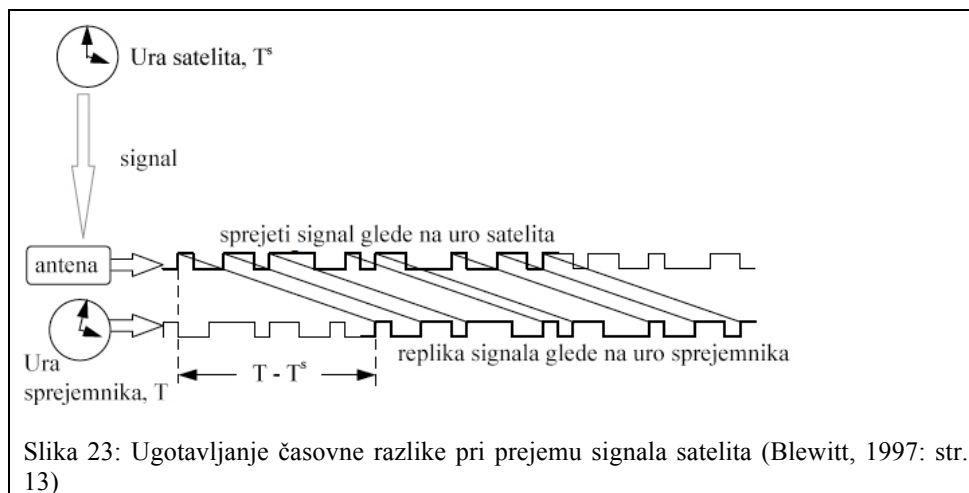
#### **4.2.2 GPS – Globalni sistem pozicioniranja**

Najbolj razširjeni med zgornjimi je gotovo ameriški GPS. V splošnem lahko sistem razdelimo na tri segmente. Prvi segment je vesoljski, ki ga sestavlja 24 delujočih in trije rezervni sateliti, ki dvakrat na dan obkrožijo Zemljo v šestih orbitalnih ravninah na višini 20.200 km. Drugi je kontrolni segment, ki ga sestavljajo glavna kontrola v Colorado Springsu v ZDA in štiri opazovalne kontrole. Njihova naloga je spremljanje delovanja satelitov, popravljanje njihovih orbit in sinhronizacija njihovih ur, ki je zelo pomembna zaradi natančnosti določanja lokacije. Tretji pa je uporabniški segment, ki se deli na dva nivoja. Osnovni nivo SPS (Standard Positioning Service) je namenjen civilni uporabi in je brezplačen. Drugi nivo PPS (Precise Positioning Service), ki je natančnejši, pa uporablja vojska ZDA.

Sateliti med kroženjem ves čas oddajajo navigacijska sporočila na nosilnih signalih L1 in L2. L1 ima frekvenco 1575.42 MHz in je namenjen civilni uporabi. Nosilni signal L2 pa 1227.6 MHz, ki ga lahko uporablja le vojska ZDA. Vsak satelit pri prenosu podatkov uporablja dve psevdo naključni kodiranji: kratko kodo ali C/A (coarse/acquisition) in dolgo koda ali P(Y) (precision). Obe kodi modulirata signal L1, L2 pa le P koda. Vsak satelit oddaja različne kode, ki jih sprejemniki poznajo. Vsako

navigacijsko sporočilo se prenaša 30 sekund s hitrostjo 50 bit/s. V sporočilu, velikem 1500 bitov, so podatki o efemeridah, korekcijah ure, status satelita in druga sistemska sporočila (Basnayake, 2004).

Osnovno načelo delovanja temelji na merjenju razdalj do satelita. Razdalje se merijo na podlagi časovnega zamika, ki ga signal potrebuje, da prispe od satelita do sprejemnika. Sprejemnik tudi sam ob istem času generira C/A in/ali P kodo. Generirano kodo primerja z dobljeno in jo »premika« po časovni osi in ko je zaporedje kode poravnano (Slika 23), sprejemnik ugotovi časovno razliko, na podlagi katere se izračuna razdalja do satelita. Tako dobljeno razdaljo imenujemo psevdo razdalja, saj pri njenem določanju operiramo z dvema različnima časoma. Sateliti uporabljajo atomske ure, ki so točnejše od ur v sprejemnikih, zato se že najmanjše odstopanje spremeni v nekaj 100 metrih ali več. Za ilustracijo, če je ura v sprejemniku nenatančna za 1 ms, je psevdo razdalja lahko napačna za 300 km.



Pri zelo poenostavljenem izračunu psevdo razdaljo dobimo po enačbi (4.6) .

$$P^S = (T - T^S)c \quad (4.6)$$

Kjer je:

$T$  – ura na sprejemniku, ko ta prejme signal,

$T^S$  – ura na satelitu, ko je bil signal oddan in

$c$  – hitrost svetlobe v vakuumu, ki znaša 299792458 m/s.

Da dobimo koordinate  $(x,y,z)$ , pozicijo uporabnika, je potreben sprejem z vsaj štirih satelitov. V izračunu se namreč pojavi še četrta neznanica  $t$ , ki predstavlja čas potovanja signala. V Kaplan in Hegarty (2006) si radoveden bralec lahko prebere več glede izračuna pozicije uporabnika. Na ta način je mogoče določiti pozicijo do 5 metrov natančno.

Na natančen izračun razdalje vplivajo naslednji dejavniki:

- vpliv ionosfere in troposfere,
- električni šumi sprejemnika,
- netočno predvidevanje položaja satelita,
- napake v uri satelita,
- namerne napake (motnje DOD).

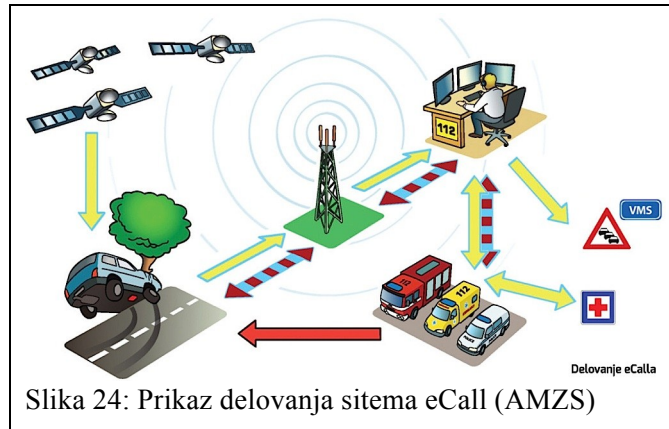
Največji del napake, približno 5 metrov, prispeva ionosfera, saj je hitrost valov v njenem območju manjša in neenakomerna (Mlakar, 2010). Za izboljšanje natančnosti je bil predstavljen diferenčni GPS, ki v računu upošteva še položaj baznih postaj na tleh in tako izboljša natančnost na do 2 metra (Kamran in sod., 2007).

Ko je vozilo pozicionirano oziroma ko so znane koordinate lokacije, enota s preračunavanjem izračuna hitrost in smer vozila, kar lahko še izboljšamo z uporabo digitalnega kompasa (Kamran in sod., 2007). Če je zadostno število vozil v prometnem toku opremljenih z GPS sprejemnikom, lahko zanesljivo identificiramo prometne spremenljivke, kot je npr. povprečna hitrost na določenem odseku, in tako opazimo anomalije ob pojavu izrednega dogodka. Tehnologija je zanimiva, ker je čedalje več vozil opremljenih z GPS sprejemnikom in prinaša koristi za tako za uporabnika kot za zaznavanje izrednih dogodkov. Slednje je lahko v uporabi le z vgradnjo komunikacijskih modulov v enote, kot so GPRS ali 3G, ki bi prenesli informacije o lokaciji in hitrosti v obdelavo v realnem času.

#### **4.2.3 eCall**

V okviru konzorcija HeERO (Harmonized eCall European Pilot) se je razvil, sedaj že standardizirani, sistem eCall, ki je okrajšava za *emergency call* – klic v sili. Ni običajen senzor, na podlagi katerega bi algoritmi zaznavali izredni dogodek, vendar je vseeno ena izmed rešitev, kako čimhitreje obvestiti pristojne službe o pojavu in lokaciji nesreče ali katerega drugega izrednega dogodka. Cilj eCalla je za razliko od ostalih algoritmov prvo obvestiti center za obveščanje, torej reševalce. Hkrati je ta rešitev tudi najbolj sistemsko podprta z zakonodajo, saj bodo morala vozila, prodana po letu 2017, imeti sistem serijsko vgrajen.

Deluje na principu senzorjev v vozilu, ki zaznajo pojemek. Tega merijo tekom časa in v kolikor pride do velikega pojemka v zelo kratkem času, se klic samodejno sproži. Sistem operaterju samodejno javi podatke o pojemkih in tudi lokacijo vozila, saj je v enoto vgrajen GPS modul. Po tem se vzpostavi govorna komunikacija, kar omogoča operaterju, da od voznika pridobi še več informacij o nesreči. V kolikor se komunikacija ne vzpostavi, jo lahko preko tipke vzpostavi tudi voznik sam.



Zanimiva težava, s katero se soočajo snovalci sistema, je kako pravilno usmerjati klice v obmejnih območjih, da je klic usmerjen v pravilno državo. Do tega lahko pride, ker se za prenos podatkov uporablja omrežje mobilnih operaterjev, ki se v obmejnih območjih prekriva.

Sistem je zlasti primeren za oddaljena oziroma redkeje poseljena območja, kjer ni očividcev nesreče ali pa te ostanejo tudi neodkriti (npr. zdrs s ceste, kjer se vozila ne vidi). V tovrstnih primerih bi sistem eCall pravočasno obvestil center za obveščanje, kjer bi lahko sprožili nadaljne korake za hitro pomoč poškodovancem.

#### 4.2.4 Avtomatska identifikacija vozila

Avtomatska identifikacija vozila ali AVI – Automatic Vehicle Identification je sistem, ki z uporabo valov kratkega dosega sporoča prisotnost vozila na določeni lokaciji ob določenem času. Sestavljata ga:

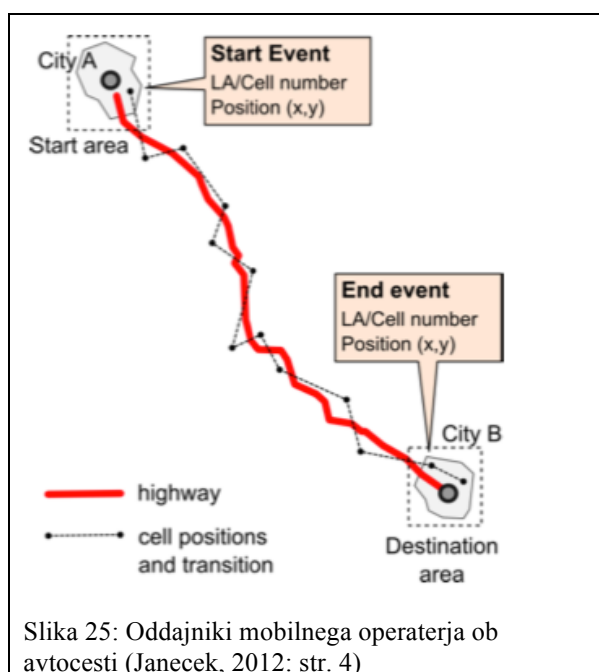
- enota v vozilu in
- obcestna enota.

Enota v vozilu je običajno manjša tablica, ki predstavlja oddajnik v sistemu. Ta tehnologija je bila prvotno uporabljena za cestninjenje, npr. ABC v Sloveniji. Na ta način se pridobijo podatki o potovalnem času vozil, kar je vodilo v razvoj novih algoritmov, predstavljenih v tretjem poglavju. V današnjem času je vse bolj v uporabi tudi bluetooth tehnologija, saj je vgrajena v čedalje več vozil, pravtako pa imajo bluetooth na napravah pogosto vključeni tudi vozniki ali sopotniki v vozilih. Pridobivanje podatkov o prometnem toku na ta način je zanesljivo v primeru, da je s tovrstnimi oddajniki opremljeno zadostno število vozil. Po mnenju Christiana Carstensa iz podjetja Blip Systems<sup>2</sup> je dovolj že okoli 12 % vozil na danem odseku, medtem ko je povprečni delež vključenih bluetooth naprav v prometnem toku okoli 20 % (Marot, 2014b).

<sup>2</sup> Dansko podjetje, ki se ukvarja z merjenjem prometnih parametrov na podlagi lastnih bluetooth anten in obdelave v realnem času – <http://www.blipsystems.com>



Položaj vozila je mogoče pridobiti tudi prek mobilnih omrežji. Janecek in drugi (2012) so v okviru projekta RoadCell s partnerjema Telekom Austria AG in cestnim operaterjem ASFiNAG izvedli študijo o nadzornem sistemu, ki bi temeljil izključno na mobilnem omrežju. Njegova prednost bi bila že obstoječa in nameščena strojna oprema, ki bi precej znižala začetne stroške spremljanja prometa na tak način. Potencialni problem takšnega sistema so: vprašanje zasebnosti in pa verjetnosti, da oddajniki vedo, da vozilo res vozi po avtocesti in ne vzporedni cesti. Problem zasebnosti lahko rešimo z anonimiziranjem, vozila pa sicer identificiramo na podlagi njihovih hitrosti in pojavnosti v oddajnikih v bližini avtocest (slika 25). Koncept temelji na spremljanju potovalnega časa, ki se začne meriti ob vstopu vozila v območje oddajnika. Sistem za določeno razdaljo izračuna predviden potovalni čas in ga primerja s časom, v katerem bi vozilo isto razdaljo prevozilo v optimalnih pogojih. Na osnovi primerjave se za več vozil hkrati izračuna odklon potovalnega časa znotraj posameznega časovnega okvira, ki je odvisen od ure dneva in prepotovane razdalje. Z ekstrapolacijo zamude, ki se jo prišteje optimalnem potovalnem času na določeni razdalji, lahko sklepamo o nevarnosti nastanka zastoja.



### 4.3 Ročno obveščanje

Najstarejši in hkrati najbolj natančno sporočanje o izrednih dogodkih je na ročni način. Četudi je v diplomski nalogi govora o avtomatskem zaznavanju izrednih dogodkov, je pošteno omeniti tudi ročno obveščanje o tovrstnih dogodkih, saj zaradi privlačnosti, neposrednosti in učinkovitosti spada med najbolj razširjene in zanesljive metode. Ta način je zaenkrat še največ v uporabi, saj ne zahteva nakupa/vgradnje dodatne tehnologije. Vozniki o izrednem dogodku obvestijo policijo, center za obveščanje ali pa neposredno prometno-informacijski center. Slednji sodelujejo v navezavi s centrom

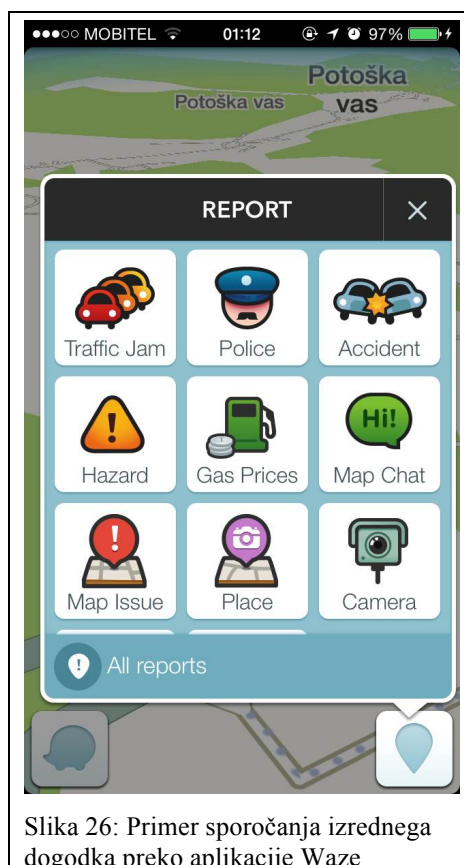
za vodenje prometa, kjer operaterji po potrditvi dogodka izpeljejo potrebne ukrepe za čimhitrejšo normaliziranje prometnega stanja (Wen in Xuhong, 2007). Tudi v Sloveniji je največ dogodkov zaznanih prav preko klicev (Marot, 2014a).

#### **4.3.1 Sistem klica v sili**

Pod ročno obveščanje spada tudi telekomunikacijski sistem klica v sili (KSA) na avtocestah, ki omogoča govorno povezavo z operaterjem v kontrolnem centru. Klicni stebrički z govorno garnituro so nameščeni na cca. 2 km vzdolž obeh voznih pasov avtocest. Ob dvigu slušalke in pritiskom na pozivno tipko govorne armature se avtomatsko vzpostavi povezava z nadzornim centrom, kjer uporabnik dobi potrebne informacije oziroma pomoč. Hkrati se operaterju prikaže na zaslonu lokacija, s katerega stebrička je klic prišel. Vsi prispeli klici se tudi avtomatsko protokolirajo z navedbo datuma ter posnamejo na trajni medij.

#### **4.3.2 Mobilne aplikacije**

V času digitalne dobe za sporočanje o pojavu izrednega dogodka ni več potrebno klicat. Po načelu »*There is an App for everything*« (Za vse obstaja aplikacija) obstajajo različne aplikacije tudi za namen zaznavanja izrednih dogodkov. Aplikacije delujejo na mobilnih platformah (pametni telefoni, tablice) in omogočajo vodenje ter kot dodatek še možnost opozarjanja drugih uporabnikov o izrednem dogodku na določenem mestu. Ko voznik vnese dogodek v sistem kot to prikazuje slika 26, aplikacija prebere položaj vozila in umesti dogodek na zemljevid, da je viden tudi drugim uporabnikom. Na ta način je mogoče kar najhitreje obvestiti ostale udeležence v prometu, saj aplikacije ponujajo tudi različne opcije za socialna omrežja.



Slika 26: Primer sporočanja izrednega dogodka preko aplikacije Waze

Z njihovim razvojem in širitvijo postajajo ta omrežja čedalje bolj aktualna tudi za prenašanje informacij voznikom, česar se zadnje čase poslužuje tudi DARS s svojim profilom na Twitterju @DARS\_SI. Telefoni namreč omogočajo potisno (ang. *Push*) funkcijo, ki vsak čivk (ang. *tweet*) prikažejo na prvi strani telefona.

## 5 ALGORITMI ZA AVTOMATSKO ZAZNAVANJE IZREDNIH DOGODKOV

Operaterji v nadzornih centrih za upravljanje avtocest so preko žive slike in shem izpostavljeni ogromni količini informacij o prometu, zato s prostim očesom težko zaznajo neobičajne dogodke, ki bi se zgodili na določeni kameri. Da bi nadomestili to človeško hibo, so raziskovalci in/ali podjetja razvila algoritme, ki omogočajo, da sistem na podlagi prometnih podatkov v realnem času sam opozori na možnost pojava izrednega dogodka. Začetek razvoja algoritmov sega v sedemdeseta leta prejšnjega stoletja, ko je bil poudarek na algoritmih, ki temeljijo na prepoznavanju vzorcev in statistiki. Poleg izboljšav teh algoritmov so se z razvojem novih tehnologij pojavili tudi novi načini pridobivanja podatkov o prometnem toku. Algoritmi se med seboj razlikujejo v načinu pridobivanja in obsegu pridobljenih informacij. Najenostavnejši in najbolj razširjeni so algoritmi, ki pridobijo podatke iz detektorjev, nameščenih v vozišču ali ob cesti. Mednje uvrščamo algoritme, ki temeljijo na:

- prepoznavanju vzorcev (*Comparative-type* ali *Pattern recognition*)
- statistični osnovi (*Statistical based*)

- teoriji katastrofe oziroma nenadnih spremembah (*Catastrophe theory*)
- umetni inteligenci (*Artificial intelligence based*)
- zaznavanju na podlagi slike (*Video Image Processing*)

Z današnjo tehnologijo so se pojavili še algoritmi, ki pridobijo podatke iz prenosnih enot (*probe-based*), torej samih vozil oziroma od udeležencev v prometu prek osebnih prenosnih naprav. Večji obseg njihove uporabe je odvisen od višine deleža tovrstnih enot v vozilih, ki je zaenkrat nizka, a že uporabna za določanje morebitnih izrednih dogodkov.

Zgornji algoritmi so v večini primerni za uporabo na avtocestah in hitrih cestah. Pri zaznavanju izrednih dogodkov v urbanih območjih pa uporaba teh algoritmov ni najboljša, saj zaradi značilnosti situacij ti ne bi ločili med ponovljivimi in neponovljivimi dogodki. Upoštevati je namreč treba tudi stranske ulice, ki so lahko izvor ali ponor vozil - povzročiteljev nezveznosti prometnega toka. To se nanaša predvsem na algoritme, ki pridobivajo podatke iz obcestne opreme (Parkany in Xie, 2005).

## 5.1 Vrednotenje algoritmov

Neposredna primerjava med algoritmi je zaradi različnega števila uporabljenih detektorjev, razmakov med njimi, geometrije, časovnih intervalov nemogoča, zato je treba opredeliti parametre, na podlagi katerih lahko ocenimo zanesljivost algoritmov (Martin in sod., 2001). Zanesljivost algoritmov se običajno meri s pomočjo naslednjih parametrov:

- stopnjo zaznavanja,
- lažnimi alarmi in
- časom za zaznavo (Hoel in sod., 2011).

V idealnem primeru ima algoritem visoko stopnjo zaznavanja, malo lažnih alarmov ter da je čas za zaznavo kar se da kratek.

### 5.1.1 Stopnja zaznavanja

Stopnja zaznavanja (ang. *Detection rate – DR*) je mera za učinkovitost algoritma in je opredeljena kot razmerje med številom izrednih dogodkov, ki jih je algoritem zaznal, in številom vseh dogodkov, ki so se zgodili v določenem časovnem obdobju. Izrazimo jo v odstotkih (Hoel in sod., 2011).

$$DR = \frac{\text{št. zaznanih izrednih dogodkov}}{\text{št. vseh izrednih dogodkov}} * 100\% \quad (5.1)$$

### 5.1.2 Stopnja lažnih detekcij

V primeru, ko algoritem zazna izredni dogodek, ki se v resnici ni zgodil, govorimo o lažni detekciji (ang. *False alarm rate – FAR*), za katero se uporablja več opredelitev (Parkany in Xie, 2005). Najbolj splošna je razmerje med številom lažnih zaznav algoritma in številom vseh zaznav algoritma v določenem časovnem intervalu, izražena v odstotkih.

$$FAR = \frac{\text{št. lažnih alarmov}}{\text{št. vseh zaznav algoritma}} * 100\% \quad (5.2)$$

Zgornji izračun se običajno uporablja v realnih primerih v nadzornih centrih. Za uporabo v študijah pa se bolj uporablja slednja varianta, katere vrednost je tudi nižja kot pri prvi varianti.

$$FAR2 = \frac{\text{št. lažnih alarmov}}{\text{št. javljenih alarmov}} * 100\% \quad (5.3)$$

Nekateri avtorji navajajo še tretjo varianto, kjer stopnja lažnih detekcij predstavlja število lažnih alarmov v časovnem intervalu.

$$FAR3 = \frac{\text{št. lažnih alarmov}}{\text{časovni interval}} \quad (5.4)$$

V enačbi (5.4) se za časovni interval upošteva obdobje ure ali dneva. Na enak način se meri tudi obremenjenost operaterjev. V vseh nadaljnjih prikazih je bila za posamezen algoritem uporabljena prva različica, in sicer enačba (5.2).

### 5.1.3 Čas zaznavanja

Cilj vpeljave avtomatskih sistemov za zaznavanje izrednih dogodkov je tudi skrajšanje časa zaznave tovrstnih dogodkov. Čas zaznavanja (ang. *Mean time to detect – MTTD*) je opredeljen kot čas, ki preteče od trenutka, ko se izredni dogodek zgodi, do trenutka, ko algoritem sproži alarm za izredni dogodek. Običajno je izražen v minutah. Ker se algoritmi izvršujejo na določen časovni interval, se za mero uporablja povprečni čas zaznavanja, ki ga izračunamo s pomočjo enačbe (5.5) (Parkany, 2005).

$$MTTD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{detekt}^i - t_{dej}^i) \quad (5.5)$$

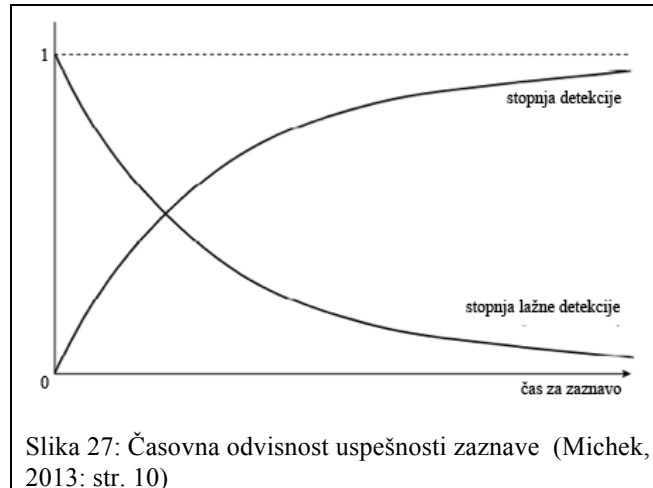
pri čemer je:

$n$  – število zaznanih izrednih dogodkov,

$t_{detekt}$  – čas, ko je algoritem sprožil alarm za izredni dogodek,

$t_{dej}$  – čas, ko se je izredni dogodek zgodil.

Pri ocenjevanju posameznih algoritmov je potrebno podati vse tri parametre, saj so ti med seboj v korelaciji. V splošnem se z zvišanjem stopnje zaznavanja zviša tudi stopnja lažnih detekcij, saj je občutljivost algoritma večja. To se lahko doseže s podaljšanjem časa zaznavanja, saj ima algoritem več časa za analizo vhodnih podatkov in je potrebno sprejemljive vrednosti za posamezne parametre določiti za vsak primer posebej (Martin in sod., 2001).



Hoel in drugi (2011) navajajo tudi indeks učinkovitosti PI (*performance index*) za primerjavo med različnimi algoritmi, lahko pa služi tudi za umerjanje le-teh na posameznih lokacijah.

$$PI = \left[ \frac{100 - DR}{100} \right]^m * FAR^n * MTTD^p \quad (5.6)$$

V enačbi (5.6) potence  $m$ ,  $n$  in  $p$  predstavljajo uteži, s katerimi uporabnik zviša ali zniža vpliv posameznega parametra pri ocenjevanju učinkovitosti algoritma.

## 5.2 Določitev pojava zastoja v Sloveniji

Del prepoznavanja izrednih dogodkov se nanaša tudi na zaznavanje zastojev, ki se v slovenskih nadzornih centrih odvija po sledečem scenariju. Za določitev pojava zastoja mora biti izpolnjen eden izmed treh pogojev (Kastelic, 2005):

- pogoj zasedenosti,
- pogoj prometnega stanja PS 4,
- zaznavanje stoječih vozil.

### 5.2.1 Pogoj zasedenosti

Ta kriterij se nanaša na zasedenost merilnega območja pod detekcijsko napravo. Da določimo pojav zastoja, mora veljati merilno mesto  $i$  za vsaj en prometni pas  $j$  veljati naslednja logična operacija (Pirc, 2008: str. 80):

$$(z(i, j) > z_d) \wedge (s_{v_{ov_p}(i)} \leq s_{v_z_d}) \quad (5.7)$$

kjer je:

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

$z_d$  – mejna vrednost zasedenosti za določitev zastoja (%)

$s_{v_{ov_p}(i)}$  – zasedenost prometnega pasu  $j$  na merilnem mestu  $i$  (km/h)

$s_{v_z_d}$  – mejna vrednosti hitrosti za določitev zastoja (km/h)

Za avtomatsko razveljavitev pojava zastoja je logična operacija podobna, le da mora zasedenost biti večja od mejne vrednosti zasedenosti za razveljavitev zastoja.

Posamezne vrednosti zgornjih parametrov je potrebno prilagoditi, izhodiščne vrednosti pa so predstavljene v preglednici ZZ

Preglednica 5: Mejne vrednosti za pogoj zasedenosti pri določevanju pojava zastoja (Pirc, 2008: str. 81)

Tip	Vrednost
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

### 5.2.2 Pogoj prometnega stanja

Na določenem merilnem mestu mora biti doseženo prometno stanje PS 4, ki predstavlja zgoščeno prometno stanje. V skrajnem primeru lahko vrednost hitrosti in pretoka dosežeta vrednost nič.

Za določitev prometnega stanja se uporablja preverjanje prognostične stopnje hitrosti in prognostične stopnje gostote. Pri tem se uporablja prognozirana povprečna hitrost vseh vozil v prometnem toku ter prognozirana gostota prometnega toka na merilnem mestu (Pirc, 2005: str. 73):

$$PS = f(V_{ST}, G_{ST}) \quad (5.8)$$

kjer je:

$PS$  – stopnja prometnega stanja,

$V_{ST}$  – prognostična stopnja hitrosti,

$G_{ST}$  – prognostična stopnja gostote.

Na podlagi tega ločimo pet prometnih stanj:

- PS 0 – Stabilno prometno stanje, kjer je gostota prometa majhna in lahko posamezna vozila neodvisno od drugih menjajo pasove.
- PS 1 – Pogojno stabilno prometno stanje, kjer sta hitrost vozil in sposobnost manevriranja omejena s povečanim številom vozil.
- PS 2 – Nestabilno prometno stanje, kjer se stanje prometnega toka približuje nestabilnemu toku z omejenimi hitrostmi in majhno možnostjo manevriranja.
- PS 3 – Nasičeno prometno stanje, kjer je stanje prometnega toka nestabilno zaradi vožnje v koloni, kjer je velika gostota prometa in kjer je pretok vozil enak prepustnosti, zaradi česar so možni zastoji. Maksimalni pretok je enak kapaciteti.

- PS 4 – Zgoščeno prometno stanje, kjer je prometni tok omejen s hitrostmi, ki so manjše od kritičnih, pretok posameznih vozil pa se giblje od nič do vrednosti, ki je manjša od prepustnosti.

Navedena prometna stanja so povezana z nivoji uslug, ki opisujejo kvaliteto odvijanja prometnega toka in jih razvrstimo v nivoje od A do F. Ti so prikazani v poglavju 2.4.2.

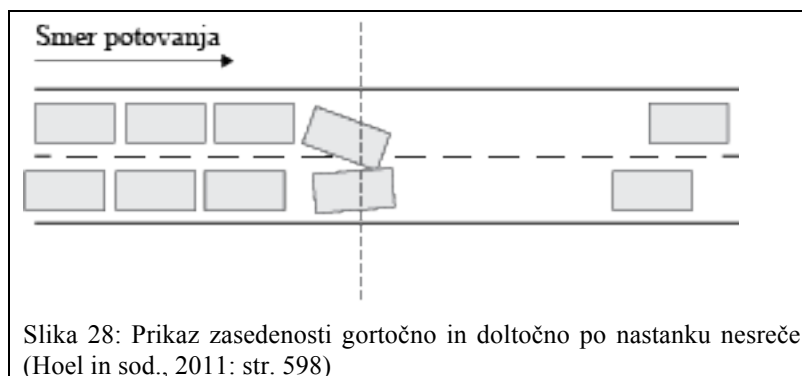
Za določitev stopnje prometnega stanja se v cikličnih časovnih intervalih ene minute preverja prognozirana skupna hitrost vozil in prognozirana gostota prometnega stanja za posamezno merilno mesto. Na podlagi česar se za vsako minuto določi stopnja prometnega stanja za posamezno merilno mesto v prometnem toku. Pojav zastoja je ustavljen, ko je stopnja prometnega stanja manjša od PS 4.

### 5.2.3 Zaznavanje stoječih vozil

Pojav zastoja se določi na podlagi podatkov s senzorjev, ki zbirajo prometne podatke. Nekateri izmed njih so sposobni zaznati tudi stoječe vozilo v merilnem območju, kar se uporablja v tem primeru. V ta namen so najbolj uporabni videodetekcijski sistemi, saj uporabljajo linijske detektorje in s tem pokrivajo malo večje območje kot npr. mikrovalovni detektorji. Obe tehnologiji sta širše opisani v poglavju 4. Pojav zastoja je razveljavljen, ko merilniki hkrati ne zaznajo več kolone vozil in ko je zastoj razveljavljen tudi po ostalih kriterijih (Pirc, 2008).

### 5.3 Primerjalni tip algoritmov

Primerjalni tip algoritmov oziroma algoritmi s prepoznavanjem vzorcev spadajo med najbolj razširjene pri avtomatskem zaznavanju izrednih dogodkov. Delujejo ob predpostavki, da nesreča povzroči povečanje zasedenosti detektorjev gortočno in hkrati zmanjšanje zasedenosti detektorjev doltočno, kar prikazuje slika 28 (Hoel in sod., 2011).



Princip delovanja primerjalnih algoritmov temelji na primerjanju izmerjenih vrednosti prometnih karakteristik z vnaprej določenimi mejnimi vrednostmi, s katerimi opisujemo razmere običajnega



prometnega toka. V kolikor izmerjeni vrednosti presežejo mejne vrednosti oziroma zaznajo, da je prometni tok neobičajen, algoritem najavi pojav izrednega dogodka. Za pravilno delovanje je treba mejne vrednosti določiti za vsako območje posebej, kar je lahko časovno potratno, zlasti ob dejstvu, da mora biti za uspešnost algoritma izvedeno zelo natančno.

### 5.3.1 Kalifornijski algoritem

Kalifornijski algoritem je eden izmed prvih algoritmov za avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov in pogosto služi kot osnova za primerjavo (Hoel in sod., 2011). Kot prvi je bil implementiran v Los Angelesu leta 1971. Drugo ime zanj je tudi ang. *Traffic Services Corporation – TSC algoritem 2*, ki je kasneje služil kot osnova za deset novih algoritmov, od katerih sta najbolj učinkovita TSC 7 in TSC 8.

Algoritem za svoje delovanje potrebuje podatek o zasedenosti dveh sosednjih detektorjev, ki sta običajno induktivni zanki ali katera izmed drugih tehnologij iz drugega poglavja za merjenje zasedenosti. Izredni dogodek se zazna na podlagi treh primerjalnih testov, pri katerih je potrebno vnaprej določiti mejne vrednosti. Te so določene za vsak primer posebej na podlagi empiričnih podatkov. Koraki za zaznavo dogodka si sledijo v naslednjem zaporedju:

- Razlika v zasedenosti med detektorjem v smeri proti toku in detektorjem v smeri toka se primerja z mejno vrednostjo  $T_1$ . Če je vrednost presežena, algoritem nadaljuje na naslednji korak.

$$P_1(i) = (OCC_i - OCC_{i+1}) \quad (5.9)$$

- Kvocient med razliko v zasedenosti v smeri proti toku in v smeri toka ter zasedenostjo v nasprotni smeri toka se primerja z mejno vrednostjo  $T_2$ . Če je vrednost presežena, algoritem nadaljuje na tretjo primerjavo.

$$P_2(i) = \frac{(OCC_i - OCC_{i+1})}{OCC_i} \quad (5.10)$$

- Kvocient med razliko zasedenosti v smeri proti toku in v smeri toka ter zasedenostjo v smeri toka se primerja z mejno vrednostjo  $T_3$ . Če je tudi primerjava s to vrednostjo presežena, algoritem nakaže možnost izrednega dogodka in ponovi drugi korak. V kolikor je vrednost ponovno presežena, algoritem sproži alarm za možen dogodek.

$$P_3(i) = \frac{(OCC_i - OCC_{i+1})}{OCC_{i+1}} \quad (5.11)$$

Stanje izrednega dogodka je sproženo toliko časa, dokler kvocient v drugem koraku ne pade pod mejno vrednost  $T_2$ .

Princip delovanja je preprost in kot vhodni podatek zahteva le zasedenost. Največja pomanjkljivost algoritma je natančno umerjanje mejnih vrednosti, saj je od njih odvisna stopnja zaznavanja in tudi stopnja lažnih zaznav (Hoel in sod., 2011).

### 5.3.2 Algoritem TSC 7, 8

Algoritem TSC 7 je osnovan na kalifornijskem algoritmu z namenom znižanja stopnje lažnih detekcij, ki nastanejo predvsem pri ponavljajočih se zastojih v zgoščenem prometu. Da bi to lahko dosegli, algoritem obdeluje podatke o prometnem toku določeno časovno obdobje, preden sproži alarm za incident.

Od osnovnega algoritma se razlikuje po tretjem koraku, saj primerja zasedenost detektorja v smeri toka v času  $t$  in času  $t+1$ . Na ta način se izogne napačnemu zaznavanju, ki je posledica zaviranja posameznih vozil oziroma udarnih valov v prometnem toku.

$$P_3(t, i) = OCC(i + 1, t) - OCC(i + 1, t + 1) \quad (5.12)$$

Algoritem na ta način zazna naslednja stanja v prometnem toku:

- 0 ... brez incidentov,
- 1 ... možnost incidenta,
- 2 ... incident zaznan,
- 3 ... incident se nadaljuje.

Poleg TSC 7 poznamo še kompleksnejši TSC 8, ki je hkrati tudi učinkovitejši. Načelo delovanja temelji na identifikaciji udarnih valov, ki potujejo v nasprotni smeri toka in povzročajo trenutne zaustavitve vozil. S tem se identificirajo običajni zastoji, ki bi sicer povzročili lažni alarm. Algoritem razdeli prometni tok na devet različnih prometnih stanj, pri čemer je za uspešno zaznavo incidentov potrebno umeriti pet mejnih vrednosti (Martin in sod. 2001).

## 5.4 Algoritmi s statistično osnovo

Za odkrivanje incidentov se uporabljajo tudi algoritmi, ki temeljijo na statističnih meritvah. Princip delovanja je v računanju statističnih razlik med izmerjenimi in napovedanimi vrednostmi. Prvi algoritem tega tipa je razvil inštitut Texas Transportation Institute (TTI) leta 1974 in se imenuje SND (*Standard normal deviate*) (Parkany in Xie, 2005). Algoritem se zanaša na prometne podatke iz preteklosti, prebere srednjo vrednost in standardni odklon za različne časovne intervale z določenimi mejnimi vrednostmi, pri katerih algoritem javi incident. Te so definirane s številom SND, ki predstavlja število odstopanj od srednje vrednosti zasedenosti oziroma merjene spremenljivke. To naredi na podlagi povprečja enominutne zasedenosti in v kolikor te segajo preko mejnih vrednosti,

algoritem zazna incident. Po Subramaniamu (Parkany in Xie, 2005) je uspešnost zaznave izrednega dogodka 92 % s povprečnim časom 1,1 minute.

#### 5.4.1 *Bayesovski algoritem*

Avtorja Levin in Krause sta predlagali tip algoritma, ki se zanaša na Bayesovsko statistiko, od tod tudi ime (Parkany, 2005). Podobno kot kalifornijski algoritem, tudi Bayesovski za svoje delovanje potrebuje prometne podatke o relativni zasedenosti. Bayesov teorem predpostavlja, da je mogoče določiti frekvenčne porazdelitve zasedenosti vozišča v smeri proti in v smeri s tokom v pogojih prostega toka in toka v trenutku nastanka incidenta. Za pravilno delovanje algoritma potrebuje podatke iz preteklosti za oba tipa prometnih tokov. V ta namen je potrebno vzpostaviti naslednje tri baze podatkov (Michek, 2013: str. 18):

- zasedenost in volumen pri pogojih incidenta,
- zasedenost in volumen pri normalnih pogojih,
- arhivski podatki o tipu, lokaciji in razsežnosti incidentov.

V splošnem lahko izračunamo verjetnost izrednega dogodka po enačbi (5.13) (Diamantopolus, 2013).

$$P_{INCIDENT} = \frac{N_{INCIDENT}}{N_{DETEKTOR} * t} \quad (5.13)$$

kjer je:

$N_{INCIDENT}$  – povprečno število izrednih dogodkov na opazovanem odseku,

$N_{DETEKTOR}$  – število senzorjev na opazovanem odseku,

$t$  – opazovani časovni interval v minutah.

Po raziskavi Martina in ostalih (2001) se prav Bayesovski statistični algoritmi obnesejo najboljše, saj dosegajo zavidljivo, kar 100 % stopnjo detekcije brez lažnih alarmov. Do istih rezultatov so prišli tudi drugi avtorji. V tem primeru lahko potrdimo teorijo, da dlje kot algoritem zaznava izredni dogodek, natančnejši je. Bayesovski algoritem namreč s povprečnim časom zaznave 3,9 minut sodi med počasnejše algoritme.

#### 5.4.2 *ARIMA in HIOCC*

Med najuspešnejše algoritme pri zaznavanju incidentov se uvršča tudi algoritem ARIMA, ki je okrajšava za angleški izraz *Auto-Regressive Integrated Moving Average* – avtoregresivna integrirana drseča sredina. Natančneje, spada med algoritme, ki delujejo na podlagi časovnih serij, saj predvideva, da se prometni tok odvíja po določenih vzorcih. Prvič sta ga predstavila Box in Jenkins leta 1990. Koncept delovanja temelji na kratkoročni napovedi zasedenosti na podlagi treh časovnih intervalov z določitvijo 95 % intervala zaupanja. V realnem času algoritem primerja izmerjene vrednosti z

napovedanimi in v kolikor te niso znotraj intervala, algoritem sproži alarm za incident. Stopnja zaznavanja je pri zelo kratkem času zaznavanja (manj kot minuta) pri več raziskavah vselej znašala 100 %, kar kaže na visoko uspešnost algoritma.

Med tovrstne algoritme, ki temeljijo na avtoregresivnem integriranem drsečem povprečju, spada tudi HIOCC – *High Occupancy* algoritem, ki so ga prvič predstavili Collins in ostali (1979). Kot že samo ime pove, išče odseke, kjer pride do visoke zasedenosti detektorjev. Algoritem ovrednoti zasedenost na določenem detektorju za vsako sekundo v vrednostmi od 0 do 10, pri čemer 0 pomeni, da detektor ni zaseden, in 10, da je zaseden celo sekundo. Vrednosti o zasedenosti algoritem namreč odčita vsako desetinko sekunde, jih nato primerja z vnaprej nastavljenimi mejnimi pogoji in ob njihovem prekoračenju sproži alarm. Običajno je pogoj, da algoritem ovrednoti dve zaporedni sekundi z vrednostjo 10 (Martin in sod., 2001), za razliko od drugih pa je sposoben tudi sam javiti konec dogodka. V ta namen izračuna vrednosti zasedenosti za zadnjih 5 minut pred pojavom dogodka in jih v realnem času primerja z izmerjenimi. Ko izmerjene vrednosti padejo pod izračunane, algoritem prekine alarm. Slabosti tega algoritma sta dolg čas za zaznavo (5–10 minut) in razmeroma visoka stopnja lažnih alarmov, ki znaša do 30 %. HIOCC algoritem se je po Martinu in sodelavcih (2001) najbolje izkazal v gostem prometnem toku.

#### 5.4.3 Algoritem z dvojno eksponentno izravnavo

Algoritem z dvojno eksponentno izravnavo (angl. *Double Exponential Smoothing - DES*) sicer uvrščamo med druge izravnalne algoritme, vendar jih lahko zaradi uporabe vzorcev v prometu štejemo tudi v skupino statističnih algoritmov. Izravnavo oziroma glajenje se uporablja z namenom odstranitve šumov v prometnem toku in ponavljajočih se prometnih konic, ki drugače povzročajo lažne zaznave. Glajenje je matematični pristop za izračun ponderiranega povprečja določene prometne spremenljivke in se izračuna po enačbah 3.14 in 3.15 (Martin in sod., 2001). Avtor Cook (1974) je že na začetku ugotovil, da sta volumen in zasedenost najbolj zanesljivi spremenljivki za uporabo algoritma.

$$S_1 = SFS \cdot x(t) + (1 - SFS) \cdot S_1(t - 1) \quad (5.14)$$

$$S_2 = SFD \cdot S(t) + (1 - SFD) \cdot S_2(t - 1) \quad (5.15)$$

kjer je:

$SFS$  in  $SFD$  - izravnalni konstanti za ponderiranje preteklih podatkov,

$S_1$  - prvi niz izravnanih podatkov in

$S_2$  - drugi niz izravnanih podatkov.

S pomočjo obeh nizov se določi sledilni signal (*tracking signal*), na podlagi katerega se algoritem odloči glede alarma za incident. Ta se izračuna kot vsota vseh odstopanj med predvideno in dejansko

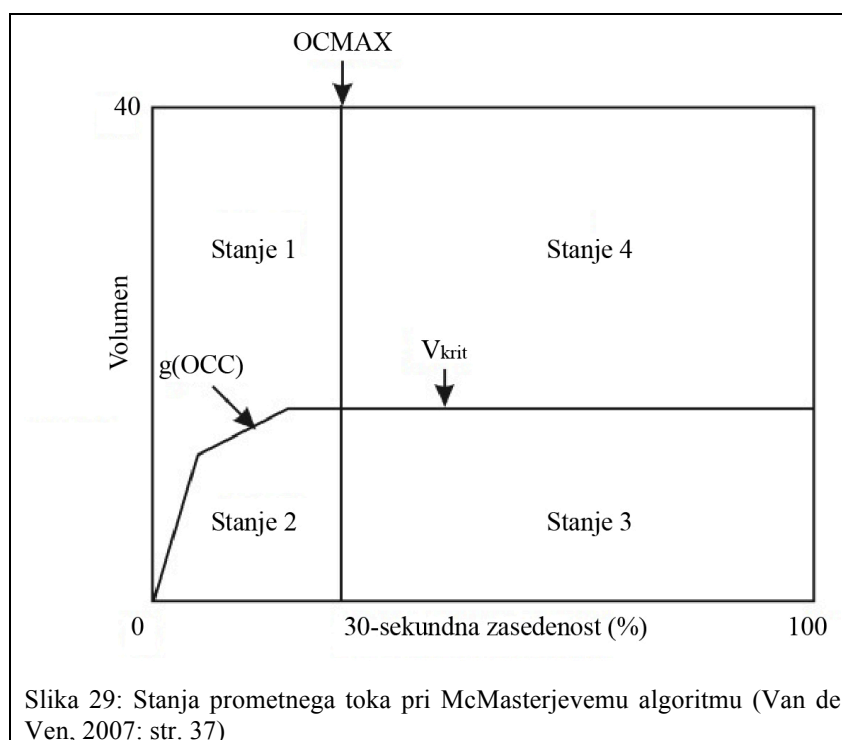
vrednostjo določene prometne spremenljivke in znaša v primeru normalnega prometnega toka 0. Vrednosti, različne od nič, pa nakazujejo na možnost pojava izrednega dogodka. Za zanesljivo delovanje je potrebno algoritem umeriti in določiti mejne vrednosti, nad katero ta javi incident.

## 5.5 Teorija katastrofe

Kot pove že samo ime, algoritmi temeljijo na nenadnih spremembah posameznih spremenljivk prometnega toka, medtem ko se ostale spremenljivke bistveno ne spremenijo. Za zaznavanje incidentov se opazujejo zasedenost, pretok in hitrost prometnega toka. Ko algoritem zazna padec, na primer hitrosti, pri čemer se zasedenost in pretok ne spremenita, algoritem predvidi, da obstaja velika verjetnost, da se je zgodil incident. Predpostavka izhaja iz razmišljanja, da nesreče ponavadi povzročijo nenaden nastanek zastoja s takojšnjim znižanjem hitrosti, v nasprotju z običajnimi zastoji, kjer se ta znižuje postopoma. Algoritem bolje razlikuje vrste zastojev tudi zaradi opazovanja več spremenljivk hkrati in primerjanja preteklih vrednosti za običajne zastoje.

### 5.5.1 McMasterjev algoritem

S tovrstnim tipom algoritmom so se najprej začeli ukvarjati v raziskovalni skupini za promet kanadske univerze McMaster univerzi, od koder izhaja tudi ime algoritma. Sestavljen je iz dveh delov: v prvem delu algoritem glede na vrednosti pretoka in zasedenosti razvrsti prometni tok v enega izmed štirih prednastavljenih stanj, v drugem koraku pa se odloči, ali je zastoj povzročil incident ali ne.



Slika 29: Stanja prometnega toka pri McMasterjevemu algoritmu (Van de Ven, 2007: str. 37)

Ordinata predstavlja spremenljivko volumen, ki predstavlja število vozil v 30 sekundah, na abscisi pa zasedenost. Za pravilno delovanje na posameznem odseku je potrebno meje stanj umeriti glede na karakteristike ceste.  $V_{krit}$  je minimalni volumen praznjenja, ki je za posamezen primer različen in se določi glede na predhodne podatke nezgod in zastojev. Linija  $g(OCC)$  se nanaša na stopnjo izkoriščenosti in jo izračunamo po enačbi 3.16.

$$g(OCC) = k * f(OCC) \quad (5.16)$$

Kjer je:

$k$  – vrednost med 0 in 1

$f(OCC)$  – intenziteta, ki jo dobimo iz enačbe 3.17.

$$f(OCC) = b * OCC^a \quad (5.17)$$

Vrednosti  $a$  in  $b$  sta parametra, odvisna od lokacije odseka. Da dobimo štiri različna stanja, je potrebno določiti še  $OCMAX$ , ki predstavljata maksimalno zasedenost v trenutku, ko zastoja še ni.

Slika 26 prikazuje naslednja stanja:

- Stanje 1: Ni zastoja.
- Stanje 2: Stanje zastoja, ko volumen še ne doseže kritične vrednosti, zasedenost je še nižja od  $OCMAX$ .
- Stanje 3: Zastoj se nadaljuje, zasedenost je večja, medtem ko volumen še ni dosegel kritične vrednosti.
- Stanje 4: Prometno stanje, ko je zasedenost višja od  $OCMAX$  in volumen pravtako preseže kritičnega.

V kolikor zastoj obstaja, v drugi fazi algoritem zazna, ali je ta posledica incidenta ali je zgolj običajna ponavljajoča se kolona na dani lokaciji. To stori s poizvedbo o stanju prometnega toka na naslednjem  $i+1$  detektorju v smeri toka. Algoritem naznani incident, če se tudi na tem detektorju pojavi vsaj stanje 2 (Van de Ven, 2007). V primerjavi z drugimi se je McMasterjev algoritem izkazal za enega izmed najuspešnejših, saj je v preizkusu zaznal med 70 in 85 % vseh nezgod pri manj kot 1 % stopnji lažnih zaznav (Carvel in sod., 1997).

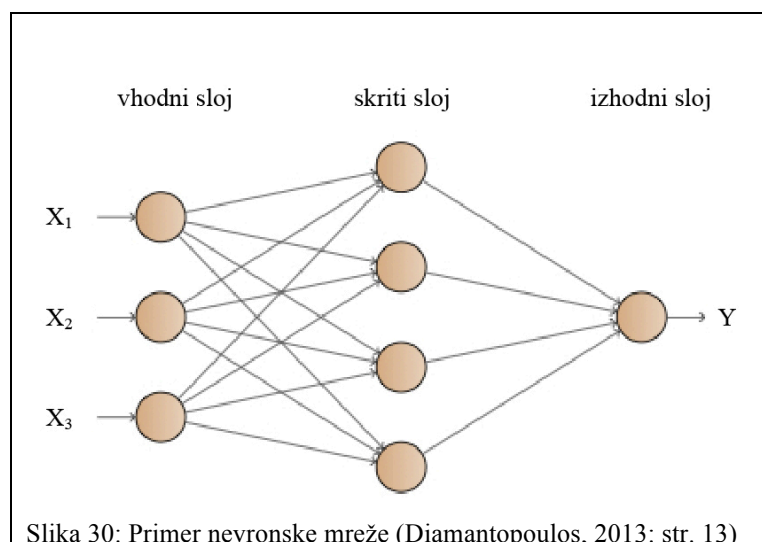
## 5.6 Umetna inteligenca

Umetna inteligenca (UI) je področje informatike z interdisciplinarnim značajem. Njen cilj je razvoj naprav, ki posnemajo človeško razmišljanje. Tudi pri zaznavanju izrednih dogodkov se srečujemo z algoritmi, ki uporabljajo umetno inteligenco. Eden izmed načinov zaznavanja temelji na nizu postopkov, pri drugem tipu pa je algoritem sposoben sam razbrati in se naučiti vzorce, pri katerih pride do incidenta. Dosedaj sta se najbolj razvila dva pristopa, in sicer nevronske mreže in fuzijska logika, ki sta opisana v nadaljevanju.

### 5.6.1 Nevronske mreže

Nevronske mreže predstavljajo procesno strukturo, ki simulira delovanje možganov. Za zaznavanje incidentov se največ uporablja večslojne mreže (ang. *MultiLayer Neural Networks*). Te gradi več posameznih elementov – perceptronov, med seboj povezanih na horizontalni ravni, kot prikazuje Slika 30. V tem primeru podatek potuje le v eni smeri, zato tovrstne mreže imenujemo tudi »*feedforward*«  
mreže. Procesni elementi sprejmejo več ponderiranih vhodnih podatkov za obdelavo, lahko pa jih tudi pošljejo v nadaljnjo procesiranje. Ponderiranje se izvede med umerjanjem algoritma glede na njegovo uspešnost zaznave incidenta. Večslojne mreže običajno sestavljajo tri plasti (Martin in sod., 2001):

- vhodna plast,
- skrita plast in
- izhodna plast.



Namen vhodne plasti je zajetje podatkov o prometnem toku, kot so volumen, zasedenost ali hitrost, z nizom detektorjev vzdolž prometnega toka. V srednji, skriti plasti se izvede procesno delo, kjer se pridobljeni podatki obdelajo. Rezultat algoritma je viden v izhodni plasti, ko ta javi stanje o pojavu incidenta. Kot ostale algoritme, je tudi tega potrebno umeriti, vendar na nekoliko drugačen način. S preizkušanjem je potrebno algoritmu sporočiti, ali njegov izhodni podatek ustreza dejanskemu stanju na prometni mreži ali ne, ta pa se na podlagi te informacije sam pouči o pravilni zaznavi zastoja, ki je nastal zaradi incidenta.

Parkany in Xie (2005) navajata, da imajo algoritmi na podlagi nevronskih mrež kar 97 % stopnjo zaznave z zelo nizko stopnjo lažnih alarmov, ki znaša 0,21 %. Povprečen čas za zaznavo je v raziskavi znašal 2,83 minut, s čimer algoritmov ne moremo uvrstiti med najhitrejše, so pa zelo zanesljivi.

Poleg večslojnih mrež se uporabljajo še verjetnostne nevronske mreže (ang. *Probabilistic Neural Networks*). Te imajo v vmesnem skritem sloju še vzorčno plast (ang. *Pattern layer*) in plast seštevanja (ang. *Summation Layer*). Prvi vsebuje podatke o vzorcih prometnega toka za različna stanja, drugi pa združi vse podatke v dva nevronske plasti, ki predstavljata stanje brez in z incidentom. Na ta način je mogoče v zaznavo vključiti še predhodno verjetnost dogoditve incidenta in cestne razmere (Parkany, 2005). Na podlagi obeh vmesnih slojev se potem izhodni sloj odloči o dejanskem stanju. Ta algoritem se je v primerjavi z večslojnim obnesel slabše v stopnji zaznavanja in lažnih zaznav, zato se tudi manj uporablja (Diamantopoulos, 2013).

### 5.6.2 Mehka logika

Algoritem mehke logike (ang. *Fuzzy Logic*) se uporablja tam, kjer so podatki o prometnem toku netočni ali nenatančni. Za razliko od ostalih algoritmov ne uporablja točno določenih mejnih vrednosti, temveč javi odstotek verjetnosti, da je prišlo do incidenta. To naredi na podlagi vnaprej predpisanega sklopa pravil, ki se izvršijo po koncu naslednjih procesov (Diamantopoulos, 2013):

- črpanje podatkov,
- glajenje podatkov,
- uporaba podatkov na setu pravil.

V fazi črpanja algoritem z detektorjev pridobi podatke o prometnem toku (zasedenost, volumen ali hitrost). Pomemben korak, ki se razlikuje od drugih algoritmov, je glajenje podatkov, kjer algoritem točne kvantitativne vrednosti nadomesti z drugimi vrednostmi, na primer hitrost 50 km/h opiše s 70 % najvišje hitrosti. V zadnjem koraku algoritem verificira izhodne podatke glede na vhodne in na podlagi tega poda verjetnost dogoditve incidenta.

Četudi se algoritem po Xiaorongu in ostalih (2007) z vidika stopnje lažnih detekcij in povprečnega časa za detekcijo obnese bolje kot nevronske mreže, se največkrat uporablja kot dopolnilo k nevronskim mrežam in ostalim algoritmom zaradi sposobnosti obdelave pomanjkljivih podatkov, ki so pri prometnem toku razmeroma pogosti (Diamantopoulos, 2014; Martin in sod., 2011).

### 5.7 Zaznavanje na podlagi slike

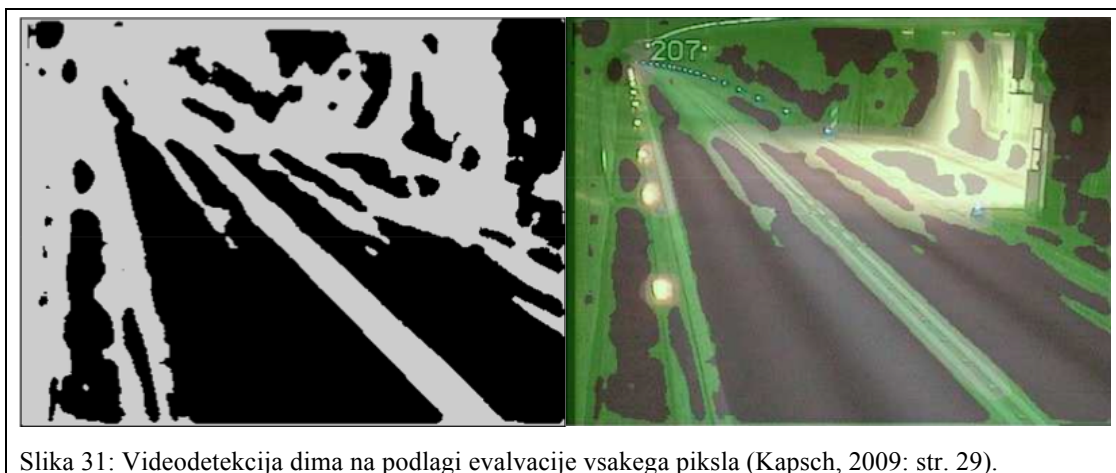
Avtomatsko zaznavanje incidentov se na podlagi slike izvrši na dva načina (Rijavec 2000):

- neposredno z odkrivanjem stoječih vozil in
- posredno preko sprememb v hitrosti.

Algoritmi so sposobni v le nekaj sekundah zaznati padel tovor, ustavljeno vozilo, pešca ali zgolj kolono. Hitro odkrivanje in pravočasno alarmiranje je ključnega pomena pri povečanju varnosti v prometu, saj se s tem zmanjša možnost za nastanek sekundarnih nesreč, ki v 50 % primerov nastanejo v prvih 10 minutah po primarni nesreči.



Zaradi delovanja algoritma za obdelavo slike je v zelo kratkem času mogoče zaznati tudi dim (požar), kar se uporablja predvsem v predorih – Slika 31. Ti so sicer opremljeni še s kablom, ki je občutljiv na toploto, vendar je videodetekcija veliko hitrejša.



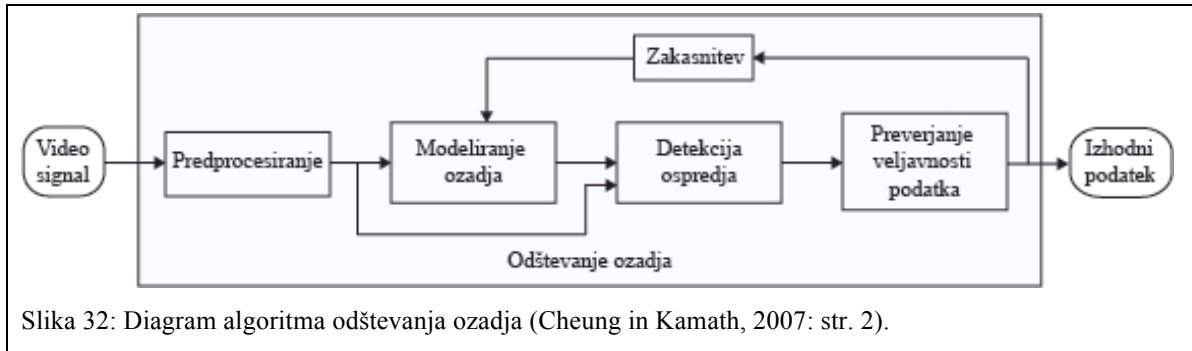
Slika 31: Videodetekcija dima na podlagi evalvacije vsakega piksla (Kapsch, 2009: str. 29).

V Sloveniji je vgrajenih kar nekaj videodetekcijskih sistemov podjetja Autoscope in Traficon, ki so se izkazali za uporabne že ob mnogih primerih voženj v nasprotno stran, pa tudi pri odpadanju ometa. Sistem je v primeru šentviškega predora leta 2010 že v desetih sekundah zaznal dogodek in z alarmom ustrezno opozoril operaterja na osrednjem zaslonu v nadzornem centru.

### 5.7.1 Algoritem za obdelavo slike

V sklopu videodetekcijskih sistemov delujejo algoritmi, ki na sliki prepoznajo vozila, predmete in različne dogodke. Princip delovanja algoritmov temelji na metodi odštevanja ozadja, ki primerja vsako slikovno točko osnovne referenčne slike s tekočo sliko iz kamere. Točke, ki se občutno razlikujejo glede na osnovno sliko, se določijo kot premikajoči se predmeti, ki jih algoritem spremlja. Na primer kamere Autoscope v dobrih svetlobnih pogojih primerjajo 12 slik na sekundo, v slabih (nočnih) pa 6 slik na sekundo, kar je posledica večje obremenitve procesorja (Starič, 2010).

Kljub temu da na trgu obstaja veliko algoritmov z odštevanjem ozadja, večina uporablja štiri korake - predprocesiranje, modeliranje ozadja, zaznavanje ospredja in preverjanje veljavnosti podatkov iz enega ali več senzorjev hkrati.



Predprocesiranje je skupek preprostih procesov za obdelavo slik, v katerem se spremeni surovi vhodni signal v format, ki se analizira v nadaljnjih korakih.

Modeliranje ozadja je postopek, kjer se z zajemom video slike pripravi referenčno sliko za primerjanje s tekočo. Ta korak je še posebej zahteven, saj mora vozila in predmete razločiti pod vsakršnimi vremenskimi in svetlobnimi vplivi. V splošnem poznamo dve tehniki modeliranja ozadja – rekurzivno in nerekurzivno. Pri slednji algoritem modelira predvideno ozadje na podlagi slik, ki si jih zapomni za določen, pravkar pretekel časovni interval (več deset sekund). Prednost tovrstnih algoritmov je v visoki prilagodljivosti, saj so neodvisni od dogodkov na sliki, ki so se zgodili izven časovnega intervala, za katerega si algoritem zapomni sliko. Pomanjkljivost je, da za takšno delovanje potrebujejo veliko spomina, četudi se slike shranjujejo pri krajšem vzorčevalnem času slike. Pri rekurzivni tehniki pa algoritmi modelirajo oziroma nadgrajujejo ozadje pri vsakem osveževanju slike. Za tovrstno delovanje ne potrebujejo veliko spomina, vendar se lahko pri napačnem modeliranju ozadja posamezna napaka ponavlja dlje časa. Večina obojih algoritmov ima pomanjkljivost, da ne primerjajo vrednosti med sosednjimi slikovnimi točkami (Cheung in Kamath, 2007).

V fazi zaznavanja ospredja algoritem primerja tekočo sliko z ozadjem in zazna slikovne točke, ki se občutno razlikujejo od ozadja. To stori s pomočjo funkcij intenzitete svetilnosti slikovne točke  $I_t(x,y)$  in ocene slikovne točke iz ozadja  $B_t(x,y)$  ter vnaprej postavljene mejne vrednosti  $T$ . Tako velja:

$$|I_t(x,y) - B_t(x,y)| > T \quad (5.18)$$

Mejna vrednost se običajno določi eksperimentalno. Za poudarjanje kontrasta pri temnejših predelih slik (na primer sencah) pa se pogosto uporablja tudi relativna razlika (Cheung in Kamath, 2007).

$$\frac{|I_t(x,y) - B_t(x,y)|}{B_t(x,y)} > T_c \quad (5.19)$$

Zadnji korak pri algoritmu odštevanja ozadja je preverjanje veljavnosti podatka, kjer se na podlagi podatkov izven modela ozadja izloči slikovne točke, ki ne odražajo premikajočih se predmetov. To je potrebno zaradi pomanjkljivosti algoritmov. V tem koraku se predvidi, da morajo biti premikajoči se predmeti večji od določene velikosti, s čimer se izloči osamljene slikovne točke. Problem meglene

slike nastane, ko imamo vozila, ki se premikajo hitreje, kot se prilagaja ozadje. V tem primeru se uporablja več modelov ozadji, ki imajo različno stopnjo prilagajanja (Cheung in Kamath, 2007).

### **5.7.2 Virtualni detektorji**

Virtualne detektorje pri videodetekcijskih sistemih uporabljamo za pridobivanje prometnih količin in zaznavanje raznoraznih dogodkov v prometu. Pri tovrstnih sistemih poznamo (Starič, 2007):

- avtomatski števec,
- detektor prisotnosti vozila,
- detektor hitrosti vozila,
- tunelski linijski detektor (TLD),
- zunanji linijski detektor,
- detektor kontrasta,
- funkcijski detektor,
- detektorska postaja,
- detektor dogodkov in
- naslovni detektor.

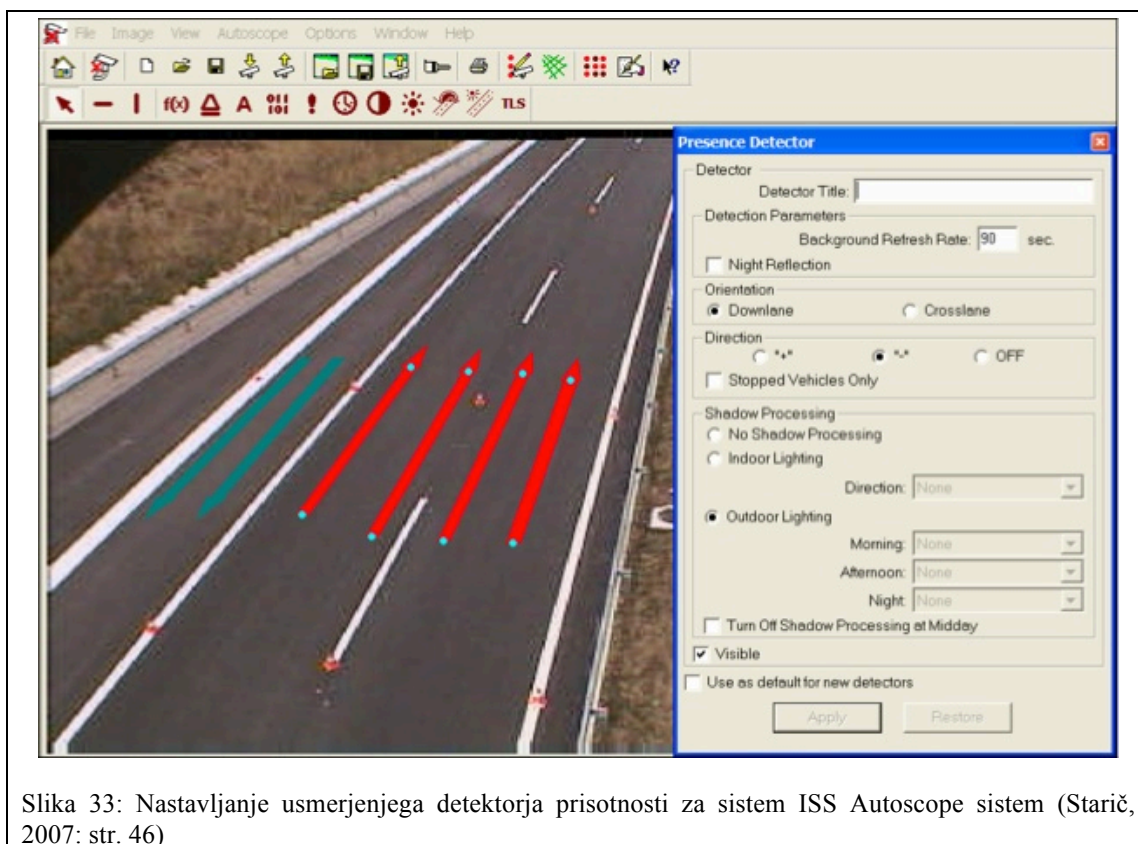
Slednji spadajo med sekundarne detektorje, ki analizirajo in povezujejo podatke osnovnih detektorjev. Naslovni detektorji so namenjeni prikazovanju informacij v video sliki. Čeprav se danes za zaznavanje izrednih dogodkov v večini uporabljajo tunelski linijski in zunanji linijski detektorji, so v nadaljevanju na kratko predstavljeni tudi ostali.

#### **5.7.2.1 Detektor dogodkov**

Podjetje ISS kot eno vodilnih na področju slikovnega procesiranja za zaznavanje izrednih dogodkov ponuja algoritem AIDA (*Autoscope Incident Detection Algorithm*). Običajno se uporablja na odprtih cestah in avtocestah. Algoritem obdeluje podatke, ki mu jih posredujeta detektorja hitrosti in avtomatskih števcov. Nesreča ali drug izredni dogodek vplivata na prometni tok tako, da se zmanjša hitrost vozil v protitočni smeri od mesta nastanka nesreče. To je v teoriji prometnega toka opisano kot pojav »udarnega vala«, ki ga detektor dogodkov išče v smeri vidnega polja kamere. Ko detektor zazna, da se je hitrost vozil zmanjšala, preveri, kolikšen je bil pojemek oziroma kako hitro je kolona nastajala, ter po potrebi sproži alarm. V izogib lažnim alarmom se v sistem vnese še urnik, ki detektorju pove, kdaj lahko na posameznih odsekih pričakuje urne konice.

### 5.7.2.2 Detektor prisotnosti vozil

Detektor predstavlja preprostejšo obliko detektorja incidentov in se uporablja za zaznavanje prisotnosti vozila v detektorski coni na odprtih cestah in avtocestah, pogosto pa tudi za določanje zavijalcev v križiščih. Ker ga opredelimo v ravni liniji vzdolž voznega pasu, detektorska cona zajema večino vidnega polja kamere. Za zaznavanje izrednih dogodkov ga namestimo na odstavni pas ali bankino, kjer se sproži po določenem času zasedenosti, ponavadi po treh sekundah. Prav tako ga je v nastavitvah možno usmeriti, da zazna le vozila, ki vozijo v smeri prometnega toka ali nasprotni smeri prometnega toka, lahko pa vozila zazna tudi neodvisno od smeri.



Slika 33: Nastavljanje usmerjenjega detektorja prisotnosti za sistem ISS Autoscope sistem (Starič, 2007: str. 46)

### 5.7.2.3 Detektor hitrosti vozil

Detektor hitrosti vozil se lahko uporablja samostojno ali v sklopu detektorja dogodkov. Pri zaznavanju incidentov ima posredno vlogo, saj detektor incidentov potrebuje podatke, ki jih procesira (Rijavec 2000). Določimo ga kot virtualno štirikotno zanko, ki ji sledi avtomatski števec, to je gledano v smeri vožnje. Zanka mora biti postavljena vzporedno s smerjo vožnje, njena velikost je določena avtomatsko. Na ta način je možno pridobiti informacijo o hitrosti vozil, zasedenosti, dolžini vozil in glede na to tudi klasifikacijo v vnaprej določene razrede.

Hitrost se v območju zanke izmeri večkrat. V kolikor katera izmed izmerjenih vrednosti močno odstopa, jo izloči, nato pa izračuna aritmetično sredino in poda izmerjeno hitrost vozila. Pri višjih

vozilih je zaradi krajšega časa nahajanja v zanki možno odstopanje hitrosti, ki se delno kompenzira s faktorjem umerjanja hitrosti pri nastavitvah detektorja (Starič, 2007).

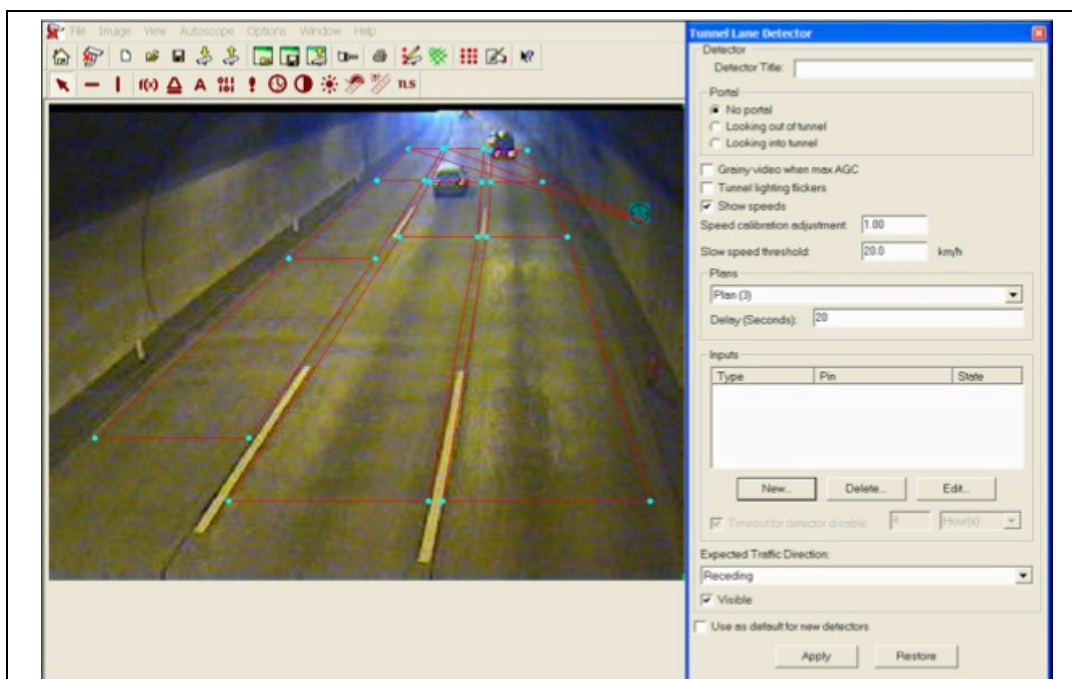
#### 5.7.2.4 Tunelski linijski detektor

Predori predstavljajo ene izmed najbolj nevarnih območij na avtocestah, zato so v celoti pokriti s kamerami. Če je v tunelu krivina, se kamero vedno namesti na njen zunanji del. S tunelskimi linijskimi detektorji je mogoče zaznati zaustavljeno vozilo, počasi vozeče vozilo in vozilo, ki vozi v nasprotni smeri (Starič, 2007).

Z željo po čim višji stopnji zaznavanja izrednih dogodkov se za vsak vozni pas nastavi več virtualnih detektorjev, ki pokrivajo večino vidnega polja kamere. Najbližje kameri je virtualna zanka največja, saj je na tem mestu tudi natančnost zaznavanja največja. Zato se tu izvaja zaznavanje vožnje v nasprotno smer. Ko detektor to zazna, se sproži alarm, ki ostane vklopljen vse do takrat, dokler ne zazna vozila, ki pelje v pravo smer.

Detektor je sposoben meriti tudi hitrost vozil in s tem zaznati, ali je vozilo počasno ali ne. To zaznavanje se odvija na delu, ki je bližje kameri. V kolikor detektor zazna počasno vozilo, se vklopi alarm. Mejno hitrost za vklop alarma se ročno določi v nastavitvah detektorja.

Detektor je sposoben zaznati tudi zaustavljeno vozilo, in sicer ko je vozilo zaustavljeno za določen časovni interval. Nastavitev časovnega intervala mora biti vselej optimizirana, saj velik interval pomeni nižjo stopnjo lažnih alarmov, a hkrati tudi daljši čas za detekcijo (Starič, 2007).



Slika 34: Tunelski linijski detektorji za sistem ISS Autoscope sistem (Starič, 2007: str.52)

Kamere so sicer v predorih sposobne zaznati tudi požar (dim) hitreje kot pa optični kabel, ki je v ta namen pritrjen na strop predora.

#### **5.7.2.5 Zunanji linijski detektorji**

Tako kot tunelski linijski detektorji so tudi zunanji sposobni zaznati zaustavljeno vozilo, počasi vozeče vozilo ali v nasprotni smeri vozeče vozilo. Za razliko od tunelskih se pri zunanjih ta stanja spremljajo na celotni dolžini detektorja. Zaradi različnih svetlobnih pogojevpreko dneva je potrebno pri vgradnji kamere vnesti zemljepisno širino in višino, da algoritem prepozna čas dneva in noči.

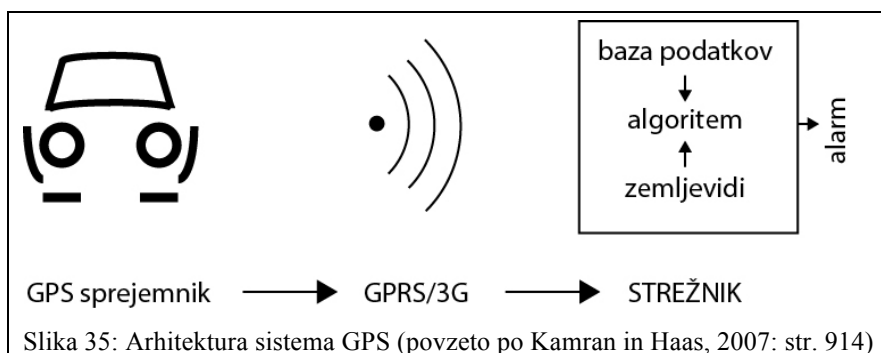
Z merjenjem hitrosti detektor zazna počasi vozeče vozilo. Pri tem se sproži alarm, ki je vklopljen še 30 s od zadnjega vozila, ki je vozil s hitrostjo, nižjo od prednastavljene za počasi vozeče vozilo. Izklopi se tudi, če detektor zazna vozilo, ki vozi s hitrostjo za 15 km/h večjo od nastavljene (Starič, 2007). Da ne pride do lažnih detekcij, se pri nastavitvah lahko vnese tudi čas jutranjih in popoldanskih konic, ko se pričakuje zgoščeni promet. To se izvede z zadrževanjem alarma za določen časovni interval.

#### **5.7.2.6 Funkcijski detektorji**

Funkcijski detektorji omogočajo povezavo in interpretiranje osnovnih detektorjev, ki generirajo ON ali OFF signal. Logične operacije v ozadju skrbijo, da funkcijski detektor generira svoj izhod ON, ko je zadoščeno določenim pogojem, ki se jih prednastavi v sistemu. Uporablja se lahko na križiščih ali pa na odprti cesti. Eden izmed načinov je tudi povezava na detektor dogodkov, da ta ob določenem zaporedju javi alarm.

### **5.8 Algoritmi s podatki z mobilnih detektorjev**

To so algoritmi, ki uporabljajo točkovni podatek o lokaciji posameznih vozil v prometnem toku in se zanašajo na podatke naprav za pozicioniranje vozil, na primer GPS. Kamran in Haas (2007) predlagata dvofazni model, ki učinkovito zazna posledice izrednega dogodka, ki se kaže v zastoju. Algoritem se v prvi fazi osredotoči na širše območje, v drugi pa na manjše - kritično območje. To je pomembno z vidika obdelave podatkov, saj je cilj algoritmov za zaznavo izrednih dogodkov, da v kar se da kratkem času zaznajo motnjo v prometnem toku. Avtorja sta predpostavila, da so vsa vozila opremljena z GPS sprejemniki, ki ves čas pošiljajo podatke o lokaciji na strežnik, ki te podatke obdeluje.

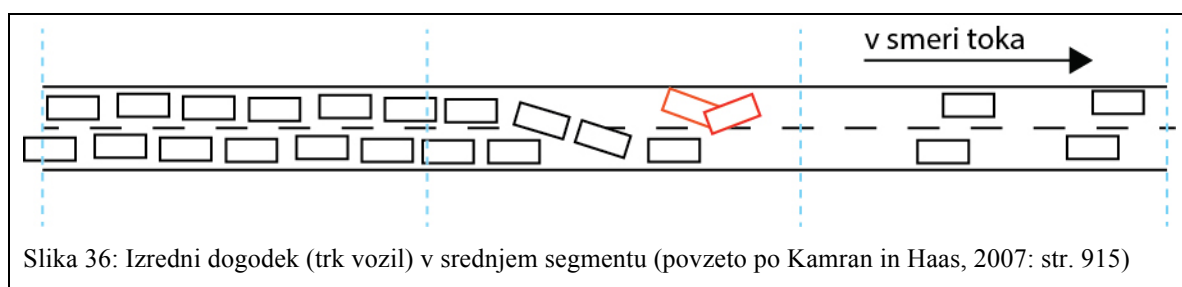


V prvi fazi se zaradi učinkovitejše analize odsek ceste razdeli na več krajših segmentov, katerih dolžina je odvisna od kategorije ceste. Vsak segment je v sistemu opisan s koordinatami, kjer je tudi opredeljena smer s in proti toku. Na podlagi teh podatkov sistem zazna, v katerem segmentu in v kateri smeri se giblje vozilo. V naslednjem zaporedju se nato izvedejo naslednji izračuni:

- izračun povprečne hitrosti vseh vozil za vsako smer za posamezni segment;
- primerjava izračunane vrednosti s prednastavljeno vrednostjo za podobne pogoje (znano je, da se običajna povprečna hitrost razlikuje glede na vremensko stanje, uro v dnevu, dan v tednu in druge dejavnike);
- izbor segmenta, kjer izračunana vrednost najbolj odstopa od prednastavljene;
- primerjava povprečnih hitrosti sosednjih segmentov z izbranim segmentom;

v kolikor je povprečna hitrost v naslednjem segmentu precej višja od identificiranega, potem je zelo verjetno, da je v tem prišlo do izrednega dogodka.

S prepoznano razliko v povprečni hitrosti je algoritem že zaznal motnjo v prometnem toku. Zaznal je tudi segment, kje naj bi se to zgodilo. Ob dinamičnem segmentiranju lahko algoritem dani segment še nadalje razdeli na podsegmente. Tu se zgoraj navedeni koraki zopet ponovijo, da se zazna del z najnižjo hitrostjo. Pri primerjavi sosednjih podsegmentov je možno razločiti tudi, ali se je zgodil izredni dogodek ali gre zgolj za ponavljajoči se zastoj, kot je na primer prometna konica. Algoritem to razloči glede na vrednosti povprečne hitrosti v sosednjih podsegmentih. V kolikor je vrednost v naslednjem podsegmentu višja od identificiranega in je prešteti tudi manj vozil, se je v označenem zgodil izredni dogodek (slika 14). V kolikor pa so vrednosti približno enake, je govora o splošnem zastoj (Kamran in Haas, 2007).





V prvi fazi sicer po mnenju avtorjev algoritem lahko zamenja splošen zastoj za izredni dogodek, vendar ga druga faza, kjer se algoritem osredotoči na podatke posameznih vozil znotraj identificiranega podsegmenta, zavrne ali potrdi. Postopek zopet poteka v korakih, in sicer se začne z identifikacijo vozila, ki:

- vozi mnogo počasneje od povprečne hitrosti na tem odseku,
- je popolnoma ustavljeno in
- vozi v nasprotno smer prometnega toka.

V drugem koraku se analizirajo še naslednji podatki z GPS sprejemnikov:

- primerjava povprečne hitrosti vseh vozil znotraj segmenta z merodajno vrednostjo,
- opazovanje pojemka hitrosti posameznih vozil (v kolikor je vozilo v kratkem času izgubilo hitrost).
- opazovanje oddaljenost med vozili, kjer je mogoče zaznati trčenje.

Po petminutnem premoru algoritem znova preveri stanje in če se ni nič spremenilo, sproži alarm in sporoči natančno lokacijo izrednega dogodka. Ta korak je bistven za razlikovanje med trenutnim zastojem in nastankom incidenta, saj bi se v primeru trenutnega zastoja vozila najverjetneje že premaknila. Na ta način je možno zaznati ne samo zastoj kot posledico izrednega dogodka, temveč tudi trčenja (naletno in bočno) ter okvaro vozila oziroma trčenje v objekt. Ti scenariji so mogoči v teoriji ob neprekinjenem prenosu podatkov z GPS sprejemnika in izredni točnosti pri lociranju vozil (Kamran in Haas, 2007).

Ob natančnih GPS meritvah je tovrsten sistem možno uporabljati tudi na mestnih cestah, vendar je potrebno v algoritem vnesti vse podatke o križiščih in tudi semafornih programih. Tako algoritem »ve«, kje lahko pričakuje trenutni zastoj oziroma pojemek hitrosti vozil (rdeča luč, krožišče, prehod za pešce ...).

### **5.8.1 TRANSMIT**

TRANSMIT je komercialno ime za algoritem podjetja Transcom, ki je bil zasnovan za državi New York in New Jersey. Deluje na podlagi podatkov o potovalnih časih vozil, opremljenih z elektronsko tablico, ki komunicirajo z obcestnimi antenami, med seboj oddaljenimi na različnih razdaljah, vendar največ 3,5 km. Elektronske tablice so opremljene z ID številkami, zato lahko takoj, ko pride vozilo v doseg antene, ta izračuna potovalni čas.

Algoritem zazna pojav incidenta na podlagi podaljšanih potovalnih časov tako, da mora določeno število zaporednih vozil imeti daljši potovalni čas kot vozila ob istem času na istem odseku v



preteklosti. Za podporo algoritmu skrbi arhiv podatkov o potovalnih časih za petnajstminutne intervale. Tako algoritem vsakih 15 minut preverja, ali je prišlo do incidenta. V kolikor se incident ne zgodi dva zaporedna intervala, se novi podatki o potovalnih časih zgladijo in združijo z že obstoječimi v arhivu (Marshall in Batz, 1994).

Za vsako detekcijsko cono je potrebno določiti mejno vrednost za različne ure v dnevu, pri kateri algoritem javi alarm. To izračunamo po enačbi (5.20).

$$TH_i = HT_i + MSD \cdot HSD_i \quad (5.20)$$

Kjer je:

$HT_i$  – povprečni potovalni čas  $i$ -tega intervala v preteklosti,

$HSD$  – standardni odklon potovalnega časa iz preteklosti,

$MSD$  – množitelj za standardni odklon.

Algoritem vključuje tudi vozila, ki zapustijo hitro cesto pred naslednjo anteno. V nasprotnem primeru bi sistem zaznal neskončno dolge potovalne čase in tako javil preveliko število incidentov. Za  $j$  vozilo v časovnem intervalu  $i$  se izračuna verjetnost lažnega alarma  $P(FA_{i,j})$  po enačbi (5.21).

$$P(FA_{i,j}) = P(E_i) + P(NE_i) \cdot P(LT_i) \quad (5.21)$$

Prvi člen  $P(E_i)$  predstavlja verjetnost, da je vozilo zapustilo odsek, še preden je prispelo v območje naslednje antene. Drugi člen pa predstavlja produkt verjetnosti, da vozilo ni zapustilo odseka -  $P(NE_i)$ , ter verjetnosti, da potovalni čas vozila ni daljši zaradi pojava incidenta -  $P(LT_i)$ . Po izračunu verjetnosti lažnega zaznavanja za vsa vozila je možno določiti še verjetnost pojava izrednega dogodka v časovnem intervalu  $i$  po enačbi (5.22).

$$P(IN_i) = 1 - \prod_{j=1}^n P(FA_{i,j}) \quad (5.22)$$

Algoritem se primerjavi s preostalimi po mnenju Parkanyja in Xie (2005) obnese dobro, vendar se njegova učinkovitost razlikuje od mesta namestitve.

### 5.8.2 Waterloo

Mobilni detektorji v vozilih posredujejo podatke o potovalnih časih posameznih vozil. Če je vozil, opremljenih z detektorji, dovolj, so podatki o prometnem toku dovolj natančni, da jih lahko uporabimo kot vhodne podatke za algoritem za zaznavanje izrednih dogodkov. Hellinga in Knapp (2000) sta predlagala tri tipe algoritmov:

- algoritem meje zaupanja (ang. *Confidence Limit Algorithm*),
- algoritem z mejo hitrosti in zaupanja (ang. *Speed and Confidence Limit Algorithm*),
- algoritem dvostranske meje zaupanja (ang. *Dual Confidence Limit Algorithm*)

Vsi temeljijo na predpostavki, da se potovalni čas na določenem odseku spremeni hitreje kot posledica zmanjšanja kapacitete (na primer zaprt vozni pas zaradi izrednega dogodka) kot pa posledica višjega povpraševanja (Hellings in Knapp, 2000). Ko se incident zgodi, se potovalni čas običajno podaljša, kar se odraža tudi v statističnih spremenljivkah – povprečju in varianci potovalnega časa, ki jih algoritem označi in primerja glede na stanje pred dogodkom. Meja zaupanja je določena na podlagi predhodnih dvajsetsekundnih časovnih intervalov, tako imenovanega »primerjalnega okna«. Upoštevana je predpostavka, da so potovalni čas posameznikov opisani z lognormalno porazdelitvijo. Za časovni interval  $i$ , ki sledi zadnjemu primerjalnemu intervalu, izračunamo povprečje in varianco po enačbah (5.23) in (5.24) (Parkany, 2005).

$$\mu_1 = \ln(\bar{t}_i) - 0,5\sigma_i^2 \quad (5.23)$$

$$\sigma_i^2 = \ln\left(1 + \frac{var_i}{\bar{t}_i^2}\right) \quad (5.24)$$

Kjer je:

$\bar{t}_i$  – povprečje potovalnega časa za primerjalni časovni interval,

$var_i$  – varianca potovalnega časa za primerjalni časovni interval,

Vsi tipi algoritmov so navzgor omejeni z mejno vrednostjo, ki se za časovni interval  $i$  izračuna po enačbi (5.25).

$$UL_i = e^{(\mu_i + z\sigma_i)} \quad (5.25)$$

kjer je:

$z$  – stopnja zaupanja.

Pri prvem algoritmu se upošteva le zgornja meja zaupanja. Za časovno okno se izračuna povprečni potovalni čas, ki se primerja z mejno vrednostjo in v kolikor je ta presežena, algoritem javi, da je prišlo do incidenta pri določeni stopnji zaupanja ( $z$ ). Da alarm ni sprožen prehitro, se lahko nastavi število zaporednih intervalov, pri katerih algoritem primerja vrednosti.

Drugi algoritem je nadgradnja prvega, saj upošteva še hitrost vozil, ki jo lahko pridobimo tudi z mikrovalovnimi detektorji, video detekcijskimi kamerami ali zankami in se ne nanaša le na vozila, ki so opremljena s tehnologijo za komuniciranje z obcestno opremo, kjer algoritem dobi podatke o potovalnih časih. V primeru incidenta bodo imela vozila v smeri prometnega toka po točki incidenta višjo hitrost kot pred njim. V ta namen algoritem preveri še hitrost vozil v smeri prometnega toka pri določeni stopnji zaupanja. Če ta preseže vrednosti hitrosti iz primerjalnega okna, algoritem javi alarm za incident.

Zadnji algoritem z dvema stopnjama zaupanja se je oblikoval iz potrebe po zmanjšanju lažnih zaznav. Razlog za lažne alarme je, da primerjalno okno vedno vključuje zadnjih  $N$  intervalov, ne glede na to, ali je povprečni potovalni čas za trenutni interval statistično del primerjalnega okna (Hellinga in Knapp, 2000). Tako sta avtorja (2000) poleg meje zaupanja za časovno okno uvedla še mejo za alarm, ki iz primerjalnega okna izključi povprečne potovalne čase, ki presežejo prvo mejno vrednost. To lahko razložimo na sledeč način: ko je povprečni čas intervala večji kot mejna vrednost časovnega okna, se predpostavi, da ta čas pripada drugi populaciji in se tako primerjalno okno ohrani tudi pri primerjavi naslednjega intervala. Dinamika se ohranja, dokler povprečni potovalni čas ne preseže mejne vrednosti za alarm. Na ta način se doseže nižja stopnja lažnih alarmov, kar sta dokazala tudi Hellinga in Knapp (2000).

Tovrstni algoritmi potrebuje podatke le 10 % vozil v prometnem toku na določenem odseku, s katerimi so sposobni določiti pojav incidenta v času, primerljivem z ostalimi algoritmi. Pri simulaciji so Waterloo algoritmi potrebovali le 18 sekund, da so zaznali incident, s čimer so bili najhitrejši med algoritmi, ki uporabljajo točkovne podatke vozil. Kot zanimivost je spodaj podana preglednica o Waterloo algoritmih in njihovi uspešnosti zaznave glede na opremljenost vozil s sprejemniki v prometnem toku.

Preglednica 6: Primerjava Waterloo algoritmov glede na stopnjo opremljenosti vozil z oddajniki (Hellinga in Knapp, 1999: str. 24)

	Opremljenost (%)	Stopnja zaznavanja (%)	Povprečni čas za zaznavo (min)	Stopnja lažnih detekcij (%)
<b>Algoritem meje zaupanja</b>	1	16	9,3	0,08
	5	28	4,94	0,13
	10	30	3,37	0,13
	25	25	2,99	0,19
	50	28	2,27	0,17
	100	29	2,44	0,19
<b>Algoritem z mejo hitrosti in zaupanja</b>	1	43	7,12	0,18
	5	43	5,89	0,15
	10	51	4,82	0,18
	25	51	4,01	0,19
	50	48	4,07	0,2
	100	39	2,94	0,13
<b>Algoritem z dvojno mejo zaupanja</b>	1	24	8,7	0,19
	5	28	4,48	0,16
	10	32	4,14	0,17
	25	27	3,08	0,15
	50	30	2,93	0,2
	100	32	3,25	0,15

## 5.9 Pregled algoritmov

V zgornjih poglavjih smo videli, da različni tipi algoritmov zahtevajo različne vhodne podatke. Za lažji pregled so v preglednici 8 zbrani algoritmi glede na prometno količino, ki jo potrebuje za določitev incidenta. Na podlagi tega se lahko lažje odločimo za izbiro senzorja, ki ga potrebujemo za določen algoritem, hkrati pa do določene mere prepoznamo tudi zahtevnost algoritma.

Preglednica 7: Pregled algoritmov (Deniz in Celikoglu, 1999: str. 4)

Algoritem	Zasedenost	Volumen	Hitrost
Kalifornijski	✓		
TSC 7, 8	✓		
SND	✓	✓	
Bayesovski	✓		
ARIMA	✓	✓	
HIOCC	✓		
Dvojna eksponentna izravnava	✓	✓	
McMasterjev	✓	✓	✓*
Nevronske mreže	✓	✓	✓
Mehka logika	✓	✓	✓

\* opcijski parameter

## 6 UPRAVIČENOST VPELJAVE SISTEMA ZA AVTOMATSKO ZAZNAVANJE IZREDNIH DOGODKOV

V Sloveniji uporabljamo za zaznavanje nesreč in drugih izrednih dogodkov video detekcijo, kombinirane mikrovalovne detektorje, delno tudi znančne detektorje in ročno obveščanje. Videodetekcija je sicer zelo učinkovita, saj zazna vsak neobičajen dogodek, ki se zgodi v vidnem polju kamere. Težava se pojavi zaradi njene visoke cene, ki ne omogoča, da bi to rešitev uporabili na celotnem omrežju avtoceste, ampak so namesto tega z njo pokriti le najbolj kritični odseki – razcepi, viadukti in predori. Drugje na avtocestnem omrežju operaterji nadzorujejo promet preko CCTV (*close-circuit TV*) kamer, ki same niso sposobne razbrati dogajanja na sliki, v pomoč pa so jim tudi točkovni mikrovalovni in znančni detektorji. Ker je teh kamer veliko, tudi operater ni sposoben razbrati dogajanja na vseh kamerah tako dobro kot sistem z video detekcijo, kar podaljša čas za zaznavo in s tem tudi ukrepanje ob izrednem dogodku. V Sloveniji delujejo tudi sistemi izmenjave informacij prek t.i. socialnih omrežij z uporabno osebnih prenosnih naprav, vendar ocenjujemo, da ta še niso razširjena v tolikšni meri, da bi bila dovolj hitra in zanesljiva.

V tujini so sistemi za avtomatsko zaznavanje dogodkov v uporabi pogostejše. Za ZDA so podatki na voljo ločeno po mestih, saj ima vsak izmed njih svoj sistem. Kot primer, v mestu San Antonio v zvezni državi Texas 40 % vseh nesreč zaznajo s pomočjo algoritmov, ostale pa preko ročnega obveščanja in CCTV kamer. Predvsem za ZDA obstaja mnogo primerjalnih študij, s katerimi so

avtorji preizkušali delovanje algoritmov v računalniškem programu (*off-line*) ali na obstoječi cestni mreži (*on-line*), ki pa zaradi neenakih značilnosti omrežja nima idealnih testnih pogojev. Slednje predstavlja pomankljivost pri primerjavi, saj se raznolikost cestne mreže pozna pri delovanju algoritma. Pomankljivost poročil je tudi v tem, da ne temeljijo na isti bazi podatkov in ne vsebujejo primerjave istih algoritmov, zato je potrebno izvesti še primerjavo med študijami. V našem primeru so zgoraj navedeni osnovni algoritmi, razviti že v 20. stoletju, ki jih obravnava tudi največ raziskav. V nadaljevanju smo kritično presodili nekatere izmed študij, iz katerih bomo za potrebe diplomske naloge privzeli srednji čas za zaznavo izrednega dogodka. Ob tem se je treba zavedati, da je na ta način možno zaznati le izredne dogodke, ki vplivajo na značilnosti prometnega toka. Velja poudariti, da dejanska praktična primerjava uspešnosti delovanja algoritmov v sklopu diplome ni bila izvedena.

### 6.1 Določitev srednjega časa za zaznavo incidenta

Balke (1993) se je pri vrednotenju algoritmov zanašal na podatke o zmogljivosti, ki temeljijo tako na teoriji kot dejanskih primerih. V sklopu raziskave je obiskal sedem nadzornih centrov v ZDA in Kanadi, da bi pridobil informacije s terena o dejanski uporabi algoritmov pri zaznavanju incidentov. V nekaterih mestih sistemih so jih zaradi visoke stopnje lažnih alarmov, ki jo je povzročila slaba kalibracija, opustili. Od štirih centrov, ki uporabljajo algoritem, kar trije uporabljajo modificirano verzijo kalifornijskega algoritma in le eden McMasterjev algoritem. V nadaljevanju raziskave poda avtor vrednosti o stopnji zaznave, stopnji lažne zaznave in povprečnem času za zaznavo, ki so bile pridobljene v simulaciji. V preglednici so prikazani le tisti algoritmi, ki so navedeni tudi v tem delu.

Preglednica 8: Primerjava uspešnosti algoritmov (Balke, 1993: str. 71)

Algoritem	Stopnja zaznavanja (%)	Povprečni čas zaznavanja (min)	Stopnja lažnih detekcij (%)	Časovni interval za izračun (s)	Časovni interval za posodobitev (s)
Kalifornijski	82	0,85	1,73	60	20, 30 ali 60
TSC 7	67	2,91	0,134	60	20, 30 ali 60
TSC 8	68	3,04	0,177	60	20, 30 ali 60
SND	92	1,1	1,3	180 ali 300	60
Bayesovski	100	3,9	0	60	20
ARIMA	100	0,4	1,5	20	20
McMasterjev	68	2,2	0,0018	30	30

Po pregledu opazimo, da imajo ravno največkrat uporabljeni algoritmi razmeroma dolg čas zaznavanja. Daljši čas pri modificiranem kalifornijskem algoritmu izhaja iz testa »obstojnosti« incidenta, saj ta zahteva, da so mejne vrednosti, predno javi alarm, določen čas presežene. Uspešnost

je na ta način razvidna tudi iz nizke stopnje lažnih detekcij. Čas za zaznavo je v določeni meri povezan s časovnim intervalom, ki ga algoritem uporablja za osveževanje vrednosti prometnih spremenljivk. Večina jih za povprečno vrednost dane prometne spremenljivke uporablja 60-sekundni interval, ki ga posodablja z novimi podatki v isti ali manjši časovni enoti (20 ali 30 sekund za modificirani kalifornijski algoritem).

Blake (1993) je algoritme ovrednotil tudi z vidika kompleksnosti in zahtevnosti integracije v obstoječ sistem za nadzor in vodenje prometa. Podatki veljajo za nadzorni center v zvezni državi Texas – TxDOT, vendar so dovolj ilustrativni, da dobimo predstavo o zahtevnosti algoritmov.

Preglednica 9: Stopnja kompleksnosti algoritma in zahtevnost integracije v obstoječ SNVP (Balke, 1993: str. 76)

<b>Algoritem</b>	<b>Stopnja kompleksnosti</b>	<b>Zahtevnost integracije</b>
Kalifornijski	Nizka	Enostavna
TSC 7	Srednja	Enostavna
TSC 8	Srednja	Enostavna
SND	Nizka	Enostavna
Bayesovski	Visoka	Zmerna
ARIMA	Visoka	Težka
HIOCC	Nizka	Težka
McMasterjev	Srednja	Zmerna

Kompleksnost je pomembna z vidika operaterjev, ki sprejemajo ukrepe na podlagi odločitev algoritma, zato je potrebno, da razumejo njihovo delovanje. Avtor v zaključku predlaga uporabo bodisi modificiranega kalifornijskega bodisi McMasterjevega algoritma, saj imata oba preprosto logiko in je njuna vgradnja, kot kaže primer nadzornega centra v Texasu, enostavna. Podobno je tudi v naših centrih za nadzor in upravljanje prometa, saj oba algoritma za izračun potrebujeata le osnovne prometne spremenljivke, ki jih pridobimo s pomočjo induktivnih zank ali mikrovalovnih detektorjev, ki se pri nas že uporabljajo v ta namen.

Subramaniam (Parkany in Xie, 2005) je leta 1991 pravtako ovrednotil algoritme glede na osnovo delovanja, kot so razvrščeni v tretjem poglavju diplomske naloge. Vhodne podatke je pridobil s pomočjo induktivnih zank in video detekcije, vendar ni jasno ob kakšnih predpostavkah, zato je vrednosti potrebno upoštevati z razmislekom.

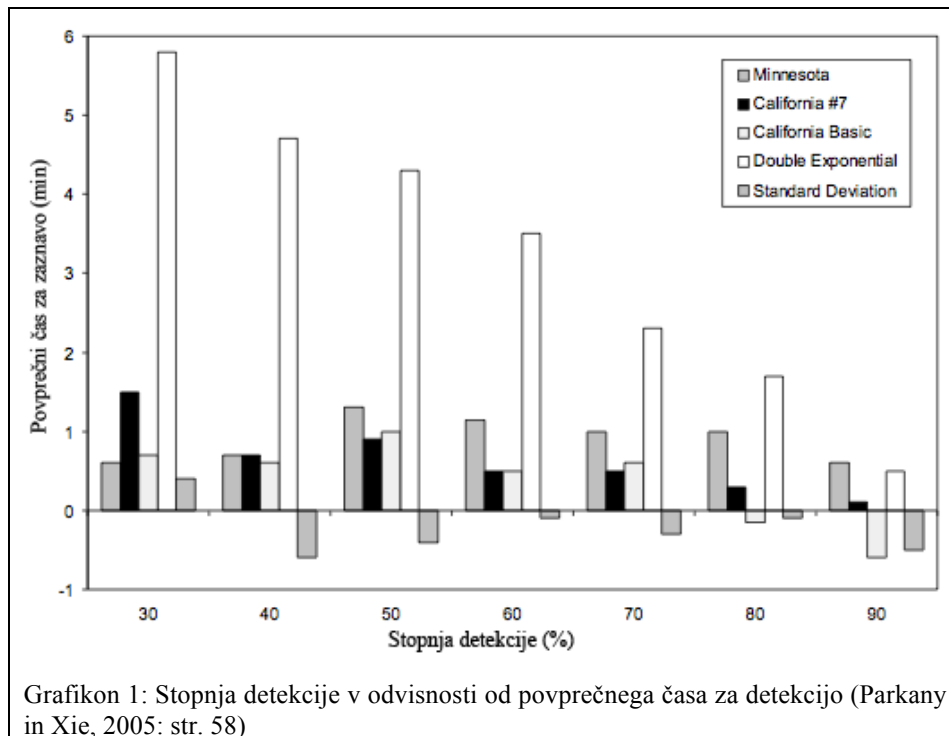
Preglednica 10: Primerjava uspešnosti algoritmov (Parkany in Xie, 2005: str. 56)

<b>Algoritem</b>	<b>Stopnja zaznavanja (%)</b>	<b>Povprečni čas zaznavanja (min)</b>	<b>Stopnja lažnih detekcij (%)</b>
TSC 7	67	2,91	0,13
SND	92	2,55	1,3
Bayesovski	100	3,9	0
ARIMA	100	0,39	1,4-2,6
DES	82	5,05	0,28
HIOCC	96	-	-
McMasterjev	100	1,5	0,04
Videodetekcija*	90	0,33	Ena na tri ure

\* Uporabljen je bil sistem INVAID-TRISTAR

Vrednosti so za nekatere algoritme iste kot pri Balku, saj sta za nekatere algoritme oba črpala iz istih podatkov. Veliko razliko v stopnji zaznavanja opazimo pri McMasterjevemu algoritmu, ki pa ima na drugi strani višjo stopnjo lažnih zaznav. To razmerje nastavimo pri umerjanju, ko je potrebno sprejeti kompromis.

Stephanedes in ostali (Parkany in Xie, 2005) so poleg ovrednotenja obstoječih algoritmov predlagali Minnesota algoritem, ki se uporablja za območje Minneapolisa, a v diplomu sicer ni predstavljen. Vrednotenje so opravili na dejanskih podatkih za meddržavno cesto I-35 v Minneapolisu v ameriški zvezni državi Minnesota. Med merjenjem uspešnosti so ugotovili, da imajo obstoječi algoritmi določene pomankljivosti, in sicer da so podatki nezanesljivi zaradi možnega nezanesljivega delovanja zank in nezmožnosti ločevanja običajnih zastojev od zastojev, ki so posledica nesreč. Slednje se lahko dogaja, vendar ga je z natančnim umerjanjem možno še zmanjšati.



Negativne vrednosti povprečnega časa zaznavanja predstavljajo primere, ko je operater opazil nesrečo, še predno je nanjo opozoril algoritem; sicer imata tako osnovni kot modificirani kalifornijski algoritem visoko stopnjo zaznavanja pri nizkem povprečnem času za zaznavo. Avtorji so opazili, da se modificirani kalifornijski algoritem najboljše obnese tudi v primeru stopnje lažnih alarmov.

Martin in ostali (2001) so uporabili podoben pristop pri ocenjevanju uspešnosti algoritmov. Pri večini algoritmov so dobili iste vrednosti kot ostali avtorji, izstopa le algoritem z dvojnimi eksponentnim glajenjem. Ta je bil v njegovem primeru uporabljen v Torontu, kjer je dosegel 92 % stopnjo zaznave, povprečni čas za zaznavo 0,7 minute ter 1,87 % stopnjo lažnih zaznav, ki je razmeroma visoka. Avtorji predvidevajo, da bi se ta znižala, v kolikor bi nastavili nižje mejne vrednosti v algoritmu, kar bi vplivalo tudi na ostala merila za uspešnost. V sklepu, zanimivo, kot primaren sistem za zaznavo incidentov predlagajo ročno obveščanje, to je klice v center za obveščanje ali policijo oziroma v center za nadzor in vodenje prometa ali prometno-informacijski center. To predlagajo zlasti za odseke z nizkim volumnom, kjer bi algoritem potreboval predolgo časa, da bi zaznal nastajanje zastoja.

Deniz in Celikoglu (2012) sta algoritme ovrednotila na nekoliko drugačen način kot ostali. S simulacijo v programu VISSIM sta za različne prometne tokove preizkušala uspešnost zaznavanja algoritmov v odvisnosti od mesta nesreče glede na položaj detektorjev. Primerjala sta modificirani kalifornijski algoritem TSC 7, APID in DES, kjer sta ugotovila, da se pri nižjih volumnih slednji tudi najboljše obnese. Skupno vsem je še to, da se obnesejo najboljše, če se nesreča zgodi tik za merilnikom prometa. V kolikor se zgodi tik pred njim, nezgode ni zaznal nobeden izmed algoritmov. V njihovem primeru so bila detektorska mesta med seboj oddaljena 1,5 km. Michek (2013), pravtako tudi Feitsma



(2014), za optimalno delovanje priporočajo razmak med detektorskimi mesti v dolžini okoli 500 m. Deniz in Celikoglu (2012) ne izpostavljata nobenega algoritma, vendar skleneta, da je stopnja zaznavanja močno odvisna od mesta izrednega dogodka glede na položaj detektorjev na danem odseku.

Van de Ven (2007) je primerjala McMasterjev algoritem z dvema, ki se trenutno uporabljata na Nizozemskem, Presikhaaf in »detektorjem zapore« (*de Blokkadedetector*) ter lastnim, ki ga je razvila v sklopu dizertacije. Računalniški preizkus s programom MoniGraph je pokazal, da je McMasterjev algoritem v zelo kratkem času zaznal vse incidente, vendar je hkrati javil tudi visoko število lažnih alarmov, kar 14 na dan, kar ga za praktično uporabo naredi manj zanimivega. V zaključku avtorica ugotavlja, da je do tega prišlo zaradi poenostavitve pri umerjanju mejnih vrednosti in vidi tu priložnost za izboljšavo.

Ob upoštevanju vidika enostavnosti vgradnje, kompleksnosti logike, časa za zaznavanje in stopnje zaznavanja se na podlagi raziskav odločimo za kalifornijski ali McMasterjev algoritem, pri čemer upoštevamo naslednja dva časa za zaznavanje za nadaljni izračun:

- kalifornijski: 0,85 minute in
- McMasterjev: 1,5 minute.

## 6.2 Opis izrednega dogodka

Da bi lažje prikazali pomembnost vpeljave algoritmov, si bomo v nadaljevanju pogledali izreden dogodek, ki se je zgodil 23. septembra 2014 na viaduktu Petelinjek v smeri Ljubljane. Tega dne se je na viaduktu Petelinjek na voznem pasu v smeri Ljubljane vnelo tovorno vozilo, ki je prevažalo osebna vozila. Tovornjak je zaprl celo cesto, kjer je voznik sam pričel gasiti vozilo, po prihodu intervencije pa so mu pomagali še gasilci. Do izrednega dogodka je prišlo cca. 1 km za predorom Podmilj v jutranjih urah, ko je s smeri Trojan proti Ljubljani veliko prometa zaradi dnevnih migracij na delo. Območje, ki je pod nadzorom regionalnega nadzornega centra Vransko, je z vidika upravljanja prometa zahtevno, saj avtocesta na odseku Vransko – Blagovica poteka večinoma po viaduktih in skozi predore Ločica, Jasovnik, Trojane in Podmilj. Temu primerno je bilo tudi upravljanje ob izrednem dogodku, ki je vključevalo zaprtje posameznih predorov in usmerjanje voznikov na izvoza Vransko in Trojane.

## 6.3 Analiza prometnih obvestil

Območje, na katerem se je zgodila prometna nesreča, je zaradi svojih značilnosti gosto opremljeno s portali spremenljive inofrmativne–prometne signalizacije, kakor tudi s spremenljivimi prometnimi znaki. Na portalu SPIS so nameščeni mikrovalovni detektorji kot merilniki prometa, pomemben člen, ki predstavlja osnovno delovanje SNVP. »Portal« oziroma merilniki tik pred mestom izrednega dogodka niso delovali, pravtako so bile oslabiljene tudi kamere. Razlog nedelovanja je v nedavnem

udaru strele v bližini. Zaradi tega bomo predstavili sporočila na portalih, ki so bila pred predorom Podmilj, kjer ni bilo več mogoče zaviti z avtoceste na vzporedno regionalno cesto. V kronološki pregled smo vključili tudi vmesni čas, ko je služba za zaščito in reševanje oziroma Center za obveščanje (CO, številka 112) prejela obvestilo o dogodku na avtocesti. Čas zaznave dogodka je namreč za temo diplomske naloge najpomembnejši podatek.

Preglednica 11: Kronologija dogodkov ob pojavu izrednega dogodka z dne 23.9.2014 na štajerski avtocesti

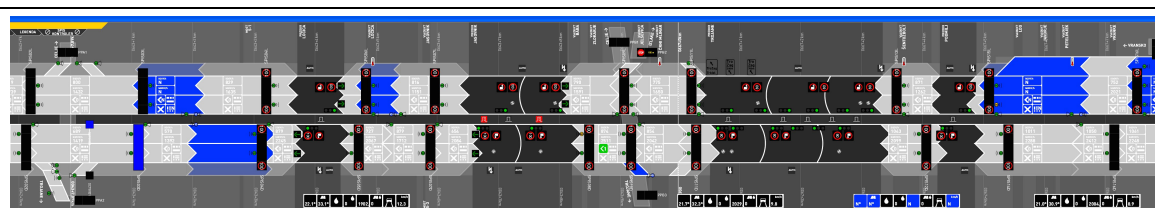
<b>Kdo in kaj?</b>	<b>Čas (23.9.2014)</b>	<b>Dogodki</b>
Vozilo	07:43:00	Vnetje tovornega vozila na začetku viadukta Petelinjek.
Uprava RS za zaščito in reševanje	07:43:00	Klic mimovozečih vozil na 112.
Regionalni nadzorni center Vransko - Dars	07:50:00	V regionalnem nadzornem centru prejmejo klic o pojavu izrednega dogodka.
Regionalni nadzorni center Vransko - Dars	07:52:10	Prvo obvestilo na predhodnih portalih SPIS o zmanjšanju hitrosti na 80 km/h
Regionalni nadzorni center Vransko - Dars	07:54:30	Obvestilo o prometni nesreči in preusmerjanje voznikov na izvoz Trojane
@DARS_SI (Twitter)	12:38:00	KONEC dogodka (A1 Maribor – Ljubljana: izredni dogodek – zaprt vozni pas)

Iz navedenega lahko ugotovimo, da je zaznavanje dogodka s strani upravljalca trajalo še dodatnih sedem minut in dve minuti, da so operatorji ukrepali in namestili prve ukrepe za zmanjšanje hitrosti z namenom preprečitve naleta. Voznike, ki so prišli iz predora Jasovnik, so še po dodatnih dveh minutah začeli usmerjati na izvoz Trojane. Cel izredni dogodek je trajal vse do 12:38:00, ko so odstranili vse posledice incidenta, vendar se je prometni tok normaliziral že bistveno prej, zato v nadaljevanju obravnavamo krajši časovni interval. Problem, ki ga opazimo, je v zelo dolgem času izmenjave informacij in obveščanja operaterjev v nadzornih centrih (CO in RNC Vransko). Vozniki so namreč bolj seznanjeni s številko 112, ki jo ob tovrstnem dogodku praviloma vedno pokličejo. Zanja je zadolžena Uprava Republike Slovenije za zaščito in reševanje, ki pa ni povezana z nadzornimi centri za upravljanje avtocest ali prometno-informacijskim centrom. Pravtako oba vodita svoj spletni portal za obveščanje javnosti. Prva ima aplikacijo SPIN – <http://spin.sos112.si>, na katerem obvešča javnost o naravnih, prometnih nesrečah, onesnaženjih, najdbah idr., druga pa portal Promet – [www.promet.si](http://www.promet.si), kjer obveščajo javnost o raznovrstnih dogodkih na cestah. Težava je v tem, da portala nista povezana in tako ne pride do več kot potrebne izmenjave informacij.

Glede na to, da je največ nesreč zaznanih s klici v regionalne nadzorne centre (Marot, 2014), bi povezanost omenjenih služb pozitivno prispevala k zaznavanju in tako k zmanjševanju posledicam izrednih dogodkov.

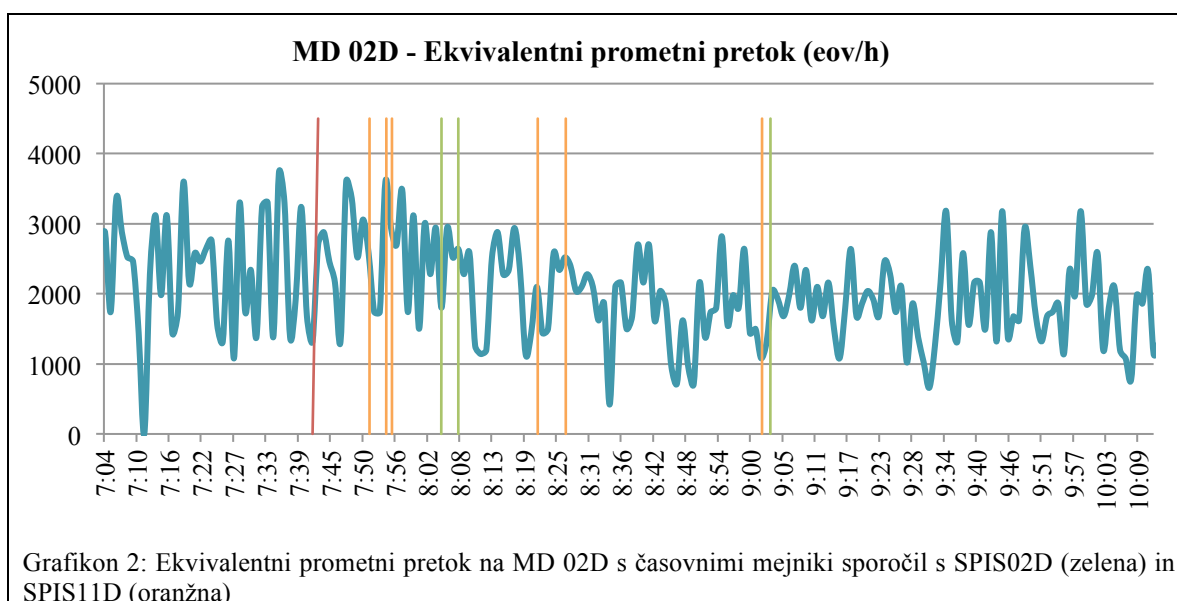
## 6.4 Analiza prometnih podatkov

Prometne podatke smo pridobili s treh merilnih mest – mikrovalovnih detektorjev. Vsi so pritrjeni na posamezni portal nad voziščem avtoceste, po en nad vsakim pasom. Za izračun ekvivalentnega pretoka so vrednosti za vozni in prehitevalni pas seštete. V skupni povprečni hitrosti so upoštevane hitrosti za osebna in tovorna vozila, ki predstavljajo povprečne vrednosti za oba pasova. Pred izvozom Vransko je merilno mesto MD 02D, kjer imajo vozniki že možnost izbire alternativne poti po regionalni cesti. Za uvozom Trojane je merilno MD 12D, kjer vozniki nimajo več možnosti izbire poti. Prvo merilno mesto, MD 16D, ki se nahaja po mestu izrednega dogodka, je locirano na koncu viadukta Petelinjek.



Slika 37: Prikaz merilnih mest na sistemu Scada

### 6.4.1 Merilno mesto MD 02D

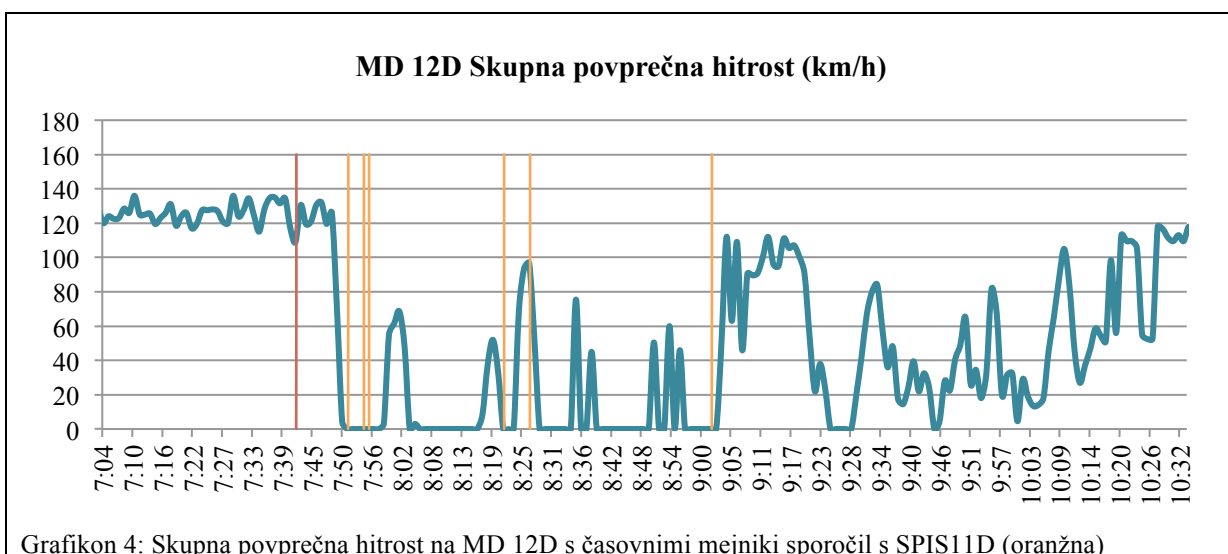
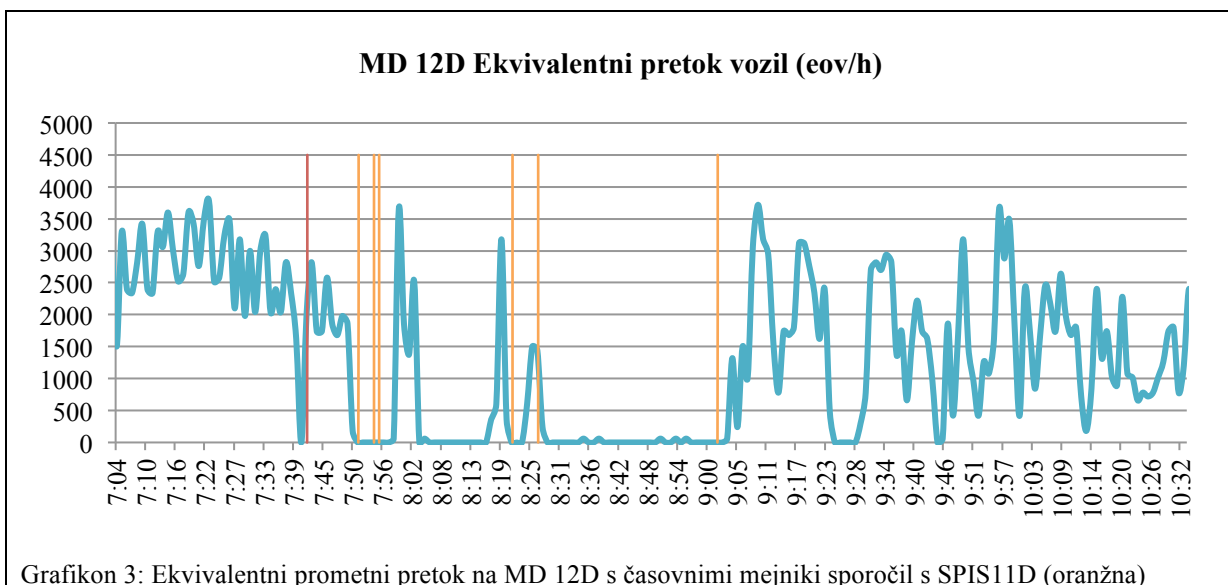


Preglednica 12: Pregled sporočil s portala SPIS02D

Portal	Čas	Sporočilo
SPIS02D	23.9.2014 08:05:50	Prometna nesreča, uporabite izvoz, omejitev hitrosti 60 km/h
SPIS02D	23.9.2014 08:08:00	Priporočamo/Uporabite izvoz Vransko: zastoj, omejitev hitrosti 100 km/h
SPIS02D	23.9.2014 09:03:40	Prazno sporočilo

Portal SPIS, kjer sta mikrovalovna detektorja nameščena, se nahaja tik pred izvozom Vransko in je drugi za cestninsko postajo Vransko v smeri Ljubljane. Merilno mesto je od mesta nesreče oddaljeno slabih 16 km, zato ne pričakujemo bistvenega vpliva na pretok. Do 08:05:50, ko se je pojavilo prvo sporočilo na SPIS, je pretok znašal 2408 eov/h, po tem pa je padel na 1905 eov/h. Ob 09:03:40 je še dodatno padel, kar je najverjetneje posledice kasnejše ure, ko migrira manj ljudi. To se potrdi tudi s tem, ko po objavi zadnjega obvestila ob 09:03:40 pretok še dodatno pade na 1806 eov/h. Merilno mesto smo obravnavali z namenom, da vidimo, kolikšno je prometno povpraševanje iz smeri Celja proti Ljubljani.

#### 6.4.2 Merilno mesto MD 12D



Preglednica 13: Pregled sporočil s portala SPIS11D

Portal	Čas	Sporočilo
SPIS11D	23.9.2014 07:52:10	Vozite previdno, omejitev hitrosti 80 km/h
SPIS11D	23.9.2014 07:55:30	Predor zaprt, dva pasova
SPIS11D	23.9.2014 07:56:50	Intervencija
SPIS11D	23.9.2014 08:22:40	Vozite previdno, omejitev hitrosti 80 km/h
SPIS11D	23.9.2014 08:27:10	Predor zaprt, dva pasova
SPIS11D	23.9.2014 09:02:00	Vozite previdno, omejitev hitrosti 80 km/h
SPIS11D	23.9.2014 09:02:20	Prometna nesreča, preusmeritev na prehitevalni pas čez 5 km, omejitev hitrosti 80 km/h
SPIS11D	23.9.2014 10:28:50	Zastoj čez 4 km, omejitev hitrosti 80 km/h
SPIS11D	23.9.2014 10:56:20	Prepoved prehitevanja tovornih vozil, omejitev hitrosti 100 km/h

Prometni tok, ki pride do merilnega mesta MD 12D, je odvisen od stanja na predhodnih portalih, zato pri sporočilih obravnavamo predhodni portal SPIS11D, po katerem se vozniki ne morejo več odločiti za izvoz Trojane in tako izbrati alternativno pot.

#### 1. Stanje prometnega toka do dogodka incidenta ob 07:43:00

Merilno mesto MD 12D se nahaja za uvozom Trojane in pred predorom Podmilj. Zaradi krajše razdalje do mesta izrednega dogodka in zahtevnosti vodenja prometa pri predorih v prometnem toku pred pojavom ni opaziti posebnosti. Do sem znaša povprečna vrednost pretoka 2499 eov/h, skupna povprečna hitrost pa 126 km/h, kar je razvidno iz grafikonov 3 in 4.

#### 2. Stanje prometnega toka med 07:43:00 in prvim sporočilom ob 7:52:10

Najbolj opazen je padec pretoka in skupne povprečne hitrosti pred prvim sporočilom na portalu SPIS11D, ki voznike omejuje s hitrostjo 80 km/h. Do sem znaša pretok 2499 eov/h, potem pa strmo pade na 0 eov/h, saj se predor Podmilj zaradi zastoja ob 7:50:00 zapre, kar je razvidno iz sporočil s portala SPIS12D, in s tem ne dopušča več vožnje mimo mesta dogodka. Skladno s tem pade tudi skupna povprečna hitrost na 0 km/h. Na spremembo v prometnem toku operaterje opozorijo tudi delujoči merilniki. Do manjšega znižanja pretoka bi prišlo, v kolikor bi bili vozniki že na predhodnih portalih obveščenih o oviri na njihovi poti. Vozniki tako zaradi pomanjkanja informacij niso mogli že prej prilagoditi hitrosti ali izbrati alternativnih poti.

#### 3. Stanje prometnega toka med 07:52:10 in drugim/tretjim sporočilom ob 07:55:30 ter 07:56:50

Z namenom izpraznjenja operater zapre predor Trojane, vendar ga potem spet odpre za intervencijo. Sporočilo intervencija nakazuje voznikom umik na rob cestišča, da je mogoč neoviran prehod intervencijskega vozila. V tem času sta tako pretok kot hitrost enaka vrednosti 0.

#### 4. Stanje prometnega toka med 07:56:50 in četrtem sporočilom ob 08:22:40

V vmesnem času hitrost in pretok mestoma narasteta, kar kaže na prehod več vozil preko portala. Vzorec takšnih povečanj izhaja iz zapiranja predhodnih predorov na trasi, pa tudi predora Podmilj, ki se nahaja po merilnem mestu MD 12D. Cilj operaterjev je namreč izprazniti predore, saj so to najbolj nevarna mesta na cestah. Povprečna hitrost vozil, ki mestoma prečkajo merilnik, je 46 km/h, pretok pa 1740 eov/h, kar kaže na zelo zgoščen prometni tok.

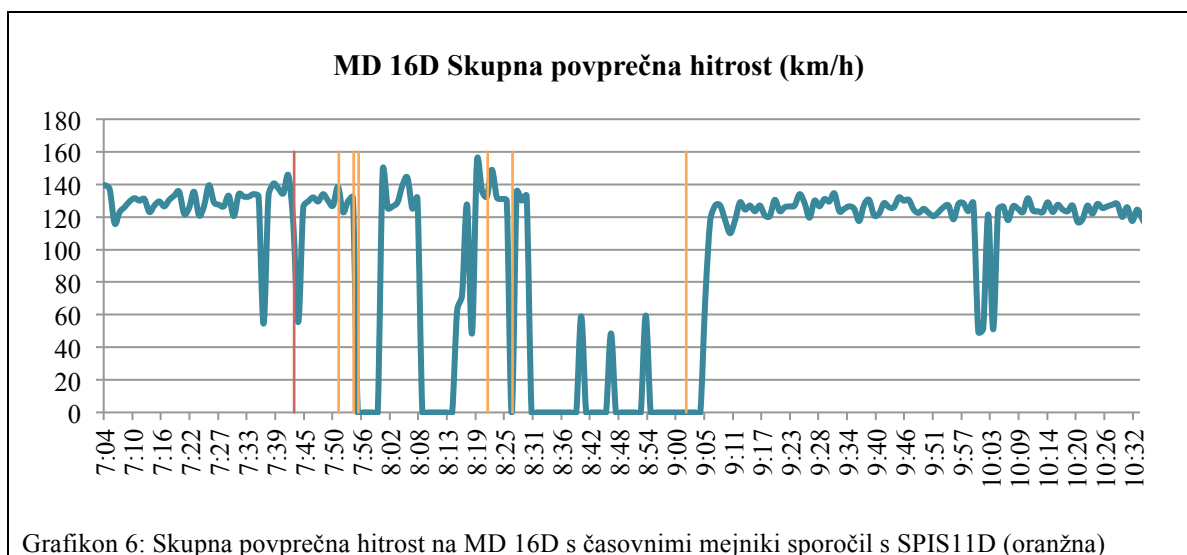
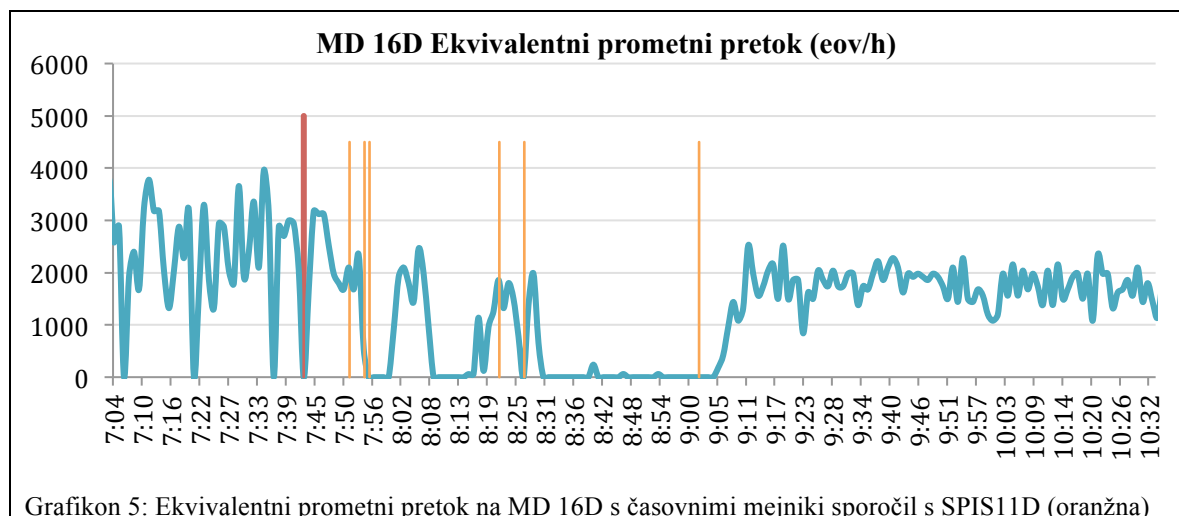
#### 5. Stanje prometnega toka med 08:22:40 in petim sporočilom ob 08:27:10

Ob povišanem pretoku operater ob 08:22:40 namesti na portal SPIS11D sporočilo z omejitvijo hitrosti 80 km/h. Tokrat so tudi hitrosti višje. Vozniki omejitve ne spoštujejo in hitrosti segajo vse do 100 km/h. Kmalu zatem se kolona vozil zopet nabere v predora Trojane in Podmilj, zato ju operator skladno s pogoji vodenja zapre.

#### 6. Stanje prometnega toka med 08:27:10 in šestim sporočilom ob 09:02:20 in kasneje

V vmesnem času do 09:02:00, ko je predor zaprt, sta pretok in hitrost enaka 0 z izjemo treh vozil, ki so detektor prečkala pri bistveno višji hitrosti. V tem času je prišlo tudi do sekundarne nesreče, in sicer ob 08:50:00 na izvozu Trojane. Ob 09:23:00 pretok zopet pade, saj operater zapre predor Podmilj, medtem ko predhodni predori ostanejo odprti. To je razvidno tudi iz podatkov o hitrosti, ki pred 09:23:00 padajo in po 09:29:00 naraščajo, ko operater ponovno odpre predor Podmilj. Kasneje tako Podmilj kot ostali predori niso več zaprti, se pa odvija zgoščen prometni tok vse do 10:30:00, kar je razvidno iz grafikona 4 o skupni povprečni hitrosti. Po podatki PIC-a je zastoj trajal vse do 10:56:00. Kljub temu, da pretok po deseti uri v povprečju znaša 1526 eov/h, je hitrost še vseeno razmeroma nizka in zelo niha. Sicer ne pride do ustavitvev, vendar vzorec močno spominja na ustavi & spelji vožnjo (ang. Stop and Go).

### 6.4.3 Merilno mesto MD 16D



Merilno mesto MD 16 se nahaja cca. 1,5 km za mestom izrednega dogodka. Ker obvestila s portala SPIS16D niso več relevantna za voznike v zastoju, so na grafu prikazani časovni mejniki s SPIS11D.

#### 1. Stanje prometnega toka do dogodka incidenta ob 07:43:00

Po podatkih Službe za zaščito in reševanje je do izrednega dogodka prišlo okoli 07:43:00, kjer vidimo tudi padec v pretoku in hitrosti. Podobno dogajanje opazimo že nekaj minut prej, vendar zaradi nedelovanja kamer na tem področju ne moremo preveriti ali se je incident zgodil že ob 07:37:00. Do sem je pretok znašal 2447 eov/h. Povprečna hitrost na tem delu znaša 129 km/h, iz česar lahko izračunamo, da vozilo od mesta nesreče do merilnega mesta potrebuje približno 45 sekund, kar lahko upoštevamo kot zamik.

## 2. Stanje prometnega toka med 07:43:00 in prvim sporočilom ob 7:52:10

Vozila, ki so se izognila tovornjaku, vozijo s praktično enako hitrostjo naprej. V tem času pade le pretok na 1680 eov/h.

## 3. Stanje prometnega toka med 07:52:10 in drugim/tretjim sporočilom ob 07:55:30 ter 07:56:50

Zaradi zapore ceste tovornjaka pretok začne povsem upadati. To se zgodi tudi zaradi reagiranja operaterjev, ki so zaprli predora Trojane in Podmilj. Upad pritoka je lepo viden iz grafikona 7, kjer je prikazana primerjava z merilnim mestom MD 12D. V času od začetka upravljanja z izrednim dogodkom 07:52:10 in do odprtja prehitevalnega pasu avtoceste ob 09:02:20 si krivulji lepo sledita z nekaj minutnim zamikom, ki ustreza razdalji med merilnikoma 12D in 16D in upoštevanju nižjih hitrosti.

## 4. Stanje prometnega toka med 07:56:50 in četrtem sporočilom ob 08:22:40

V tem času pretok mestoma naraste, kar kaže na prehod večih vozil mimo ovire. Uradno sta oba pasova še vedno zaprta, vendar je prostora med oviro cestno varnostno ograjo dovolj, da gredo vozila mimo. Povprečni pretok vozil, ki uspejo priti mimo, znaša 1402 eov/h, skupna povprečna hitrost pa 119 km/h.

## 5. Stanje prometnega toka med 08:22:40 in petim sporočilom ob 08:27:10

Prometni tok je v tem časovnem intervalu nestanovitno tako kot na detektorju MD 12D. Hitrosti so sicer višje, kar je posledice dejstva, da vozila pospešujejo nazaj k hitrosti prostega toka. Pretok v tem delu znaša 1345 eov/h, vključno z vozili, ki gredo preko predora še pred njegovim zaprtjem.

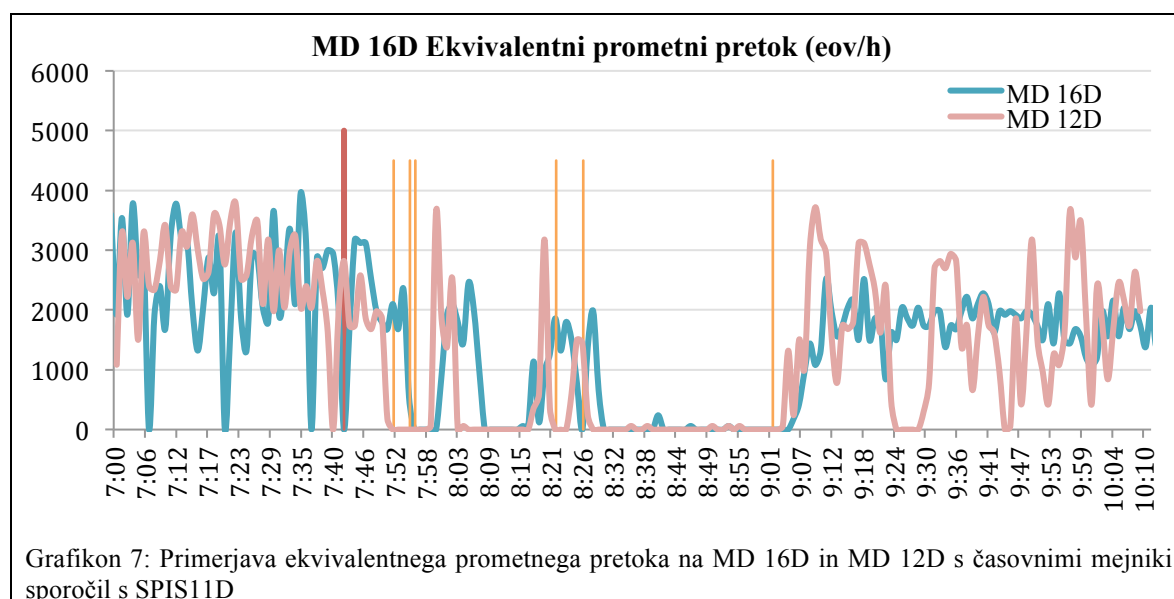
## 6. Stanje prometnega toka med 08:27:10 in šestim sporočilom ob 09:02:20 in kasneje

Ob 08:27:10 operater zapre predor, tri minute kasneje pa upade tudi stopnja prehodov na detektorju MD 16D, saj pred mestom nesreče ni več vozil, ki bi lahko nadaljevala vožnjo. V tem času Darsova vzdrževalna služba odstranjuje posledice in vzpostavi odprtje prehitevalnega pasu mimo mesta incidenta ob 09:02:20. Takrat po mestu nezgode v smeri prometnega toka ta normalizira, pretok znaša 1862 eov/h, povprečna hitrost pa 121 km/h.

V primerjavi z merilnikom MD 12D vidimo odstopanja v času po zadnjem odprtju predora ob 09:02:20. Razlog je v ozkem grlu (en odprt pas) na mestu incidenta, ki ni sposoben zadovoljevati



stopnje prihodov, zato še vedno prihaja do zastojev. To je razvidno tudi iz sporočil na portalu SPIS11D, ki opozarja na zastoj vse do 10:56:20.



## 6.5 Izračun zamud

Uporaba determinističnega modela čakalne vrste, ki je grafično predstavljena in opisana v poglavju 3.1, je osnova za oceno zamude vozil za primer brez in z uporabo algoritma. Z namenom nazornejšega prikaza in enostavnejšega izračuna predpostavljamo, da:

- imamo v času incidenta dve stopnji prihodov, in sicer pred in po zaznavi dogodka;
- imamo tri stopnje odhodov, in sicer do zaprtja predora Trojane, med zaprtjem predora in po odprtju prehitevalnega pasu mimo ovire, ko se zastoj začne prazniti.

Čeprav smo se za okvirne podatke o trajanju nezgode in pretokih zanašali na dejansko prometno nesrečo, gre za ilustrativni izračun upravičenosti uporabe algoritmov za zaznavanje izrednih dogodkov. Vseh parametrov zaradi metode ni mogoče vnesti v izračun. Za točen izračun razlik v zamudah bi bilo namreč potrebno simulacijo narediti z računalniškim programom, kot je Vissim. Obseg takšne simulacije presega okvir diplomske naloge, bi bilo pa smotno, da se opravi v okviru potencialne raziskave na področju zaznavanja izrednih dogodkov.

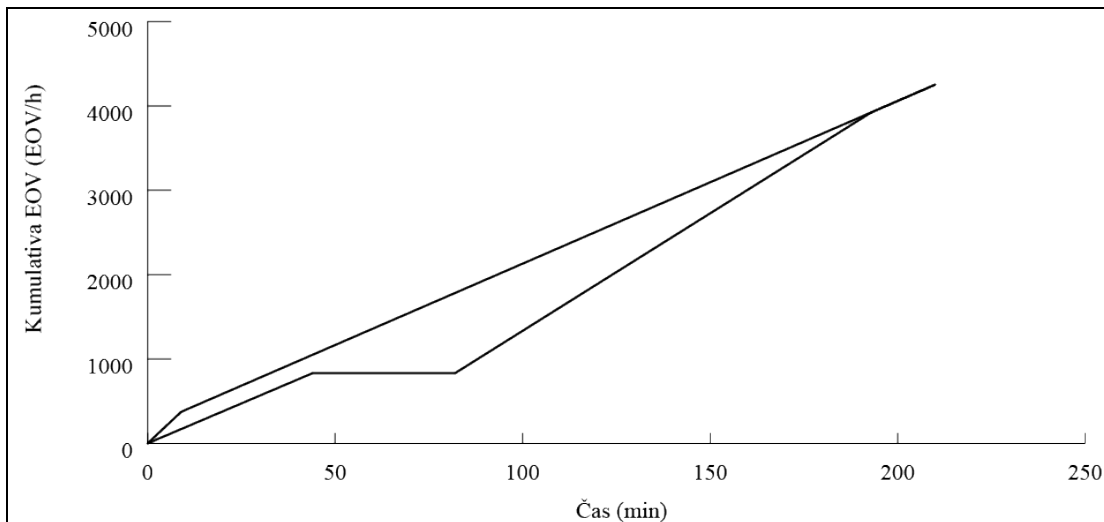
V primeru nesreče na štajerski avtocesti je ta čas znašal 9 minut, ko je operater preko SPIS portalov opozoril voznike na obstoječo nevarnost pred njimi. Ta čas bomo primerjali z 0,85 minute, kolikor potrebuje kalifornijski algoritem, da na podlagi podatkov senzorjev zazna incident. Pri tem se je potrebno zavedati, da je bil ta čas pridobljen iz računalniške simulacije.

### 6.5.1 Brez uporabe algoritma za avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov

Ko obravnavamo podatke brez uporabe algoritma, razdelimo stopnjo prihodov na dva dela, in sicer na del pred zaznavo dogodka s strani operaterjev in na del za tem. Zaradi sporočil na portalih, ki priporočajo uporabo izvozov Vransko in Trojane, povpraševanje na AC v smeri incidenta pade. Pred 07:52:00 uporabimo stopnjo prihodov 2499 eov/h, ki jo dobimo z merilnika MD 12D, v drugem pa 1157 eov/h, saj so vozniki o incidentu že obveščeni in uporabijo alternativno pot. Stopnja je prilagojena dolžini trajanja zastoja, ki po Darsovih informacijah postopoma traja vse do 10:56:00. Stopnjo odhodov dobimo s števca MD 16D, in sicer za tri časovne intervale. Od pojave incidenta do 08:27:00, ko se na odseku za pol ure zapre najdaljši predor z imenom Trojane. Od 09:05:00, ko vozniki po odprtju prehitevalnega pasu dosežejo števec MD 16D, do 10:56:00, ko PIC naznani konec dogodka zastoje. Parametri, ki so bili uporabljeni za izris diagrama na sliki 38, so podani v preglednici 14.

Preglednica 14: Prihodi in odhodi za primer brez algoritma

Časovni interval	Prihodi (eov/h)	Odhodi (eov/h)
$t < 9 \text{ min}$	2499	1135
$9 \text{ min} < t < 44 \text{ min}$	1157	1135
$44 \text{ min} < t < 82 \text{ min}$	1157	0
$82 \text{ min} < t < 193 \text{ min}$	1157	1671



Grafikon 8: Kumulativna prihodov in odhodov v odvisnosti od časa za primer brez algoritma

Zgornji graf zelo nazorno prikaže čakalne dobe vozil, ki so ob določenem času prišla v zastoje. Najdlje je čakal tisti, ki je prišel na rep kolone približno 45 minut po začetku incidenta, saj je moral za nadaljevanje poti počakati do odprtja predora. Na grafu je vidna tudi najdaljša kolona, in sicer v 82. minuti od začetka incidenta, tik preden je bil predor zopet odprt. Površina med prihodi in odhodi

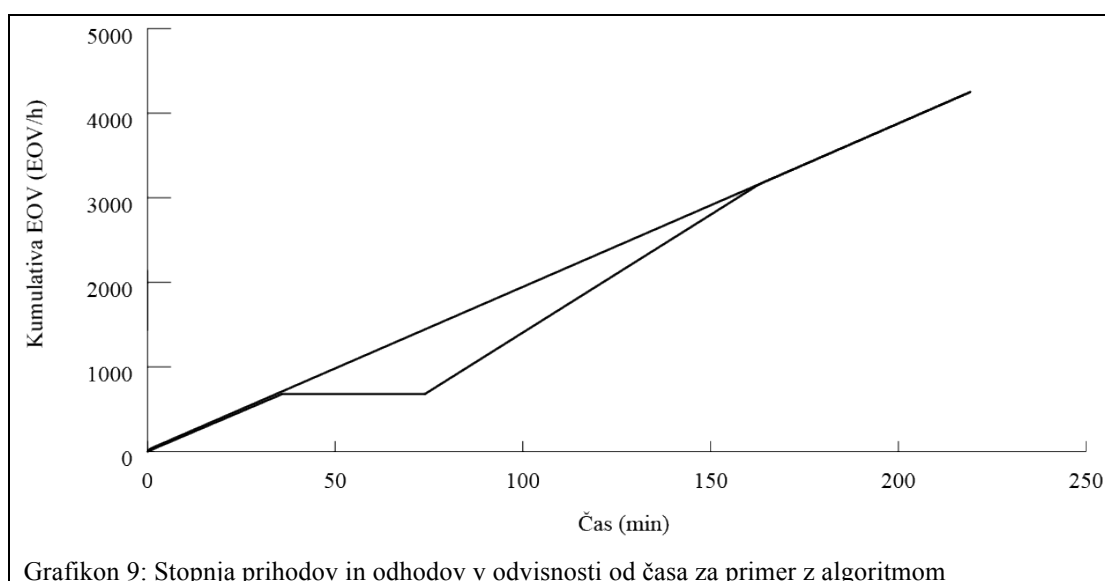
prikazuje zamude vseh vozil, ki jih potrebujemo za nadaljnji izračun. V zgornjem primeru tako zamude vseh vozil znašajo 1374,8 ur.

### 6.5.2 Z uporabo kalifornijskega algoritma za avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov

V tem primeru bomo predpostavili, da je algoritem zaznal dogodek v času 0,85 minut, kar je več kot 8 minut hitreje glede na primer nesreče na viaduktu Petelinjek. Ostale parametre bomo zaradi primerjave ohranili, saj primerjamo le čas zaznave incidenta. Predpostavimo še, da vozniki reagirajo enako, kot so v dejanskem primeru, vendar zaradi zgodnejše informacije o zastoju ukrepajo hitreje.

Preglednica 15: Prihodi in odhodi za primer brez algoritma

Časovni interval	Prihodi (eov/h)	Odhodi (eov/h)
$t < 0,85 \text{ min}$	2499	1135
$0,85 \text{ min} < t < 35,85 \text{ min}$	1157	1135
$35,85 \text{ min} < t < 73,85 \text{ min}$	1157	0
$73,85 \text{ min} < t < 163 \text{ min}$	1157	1671

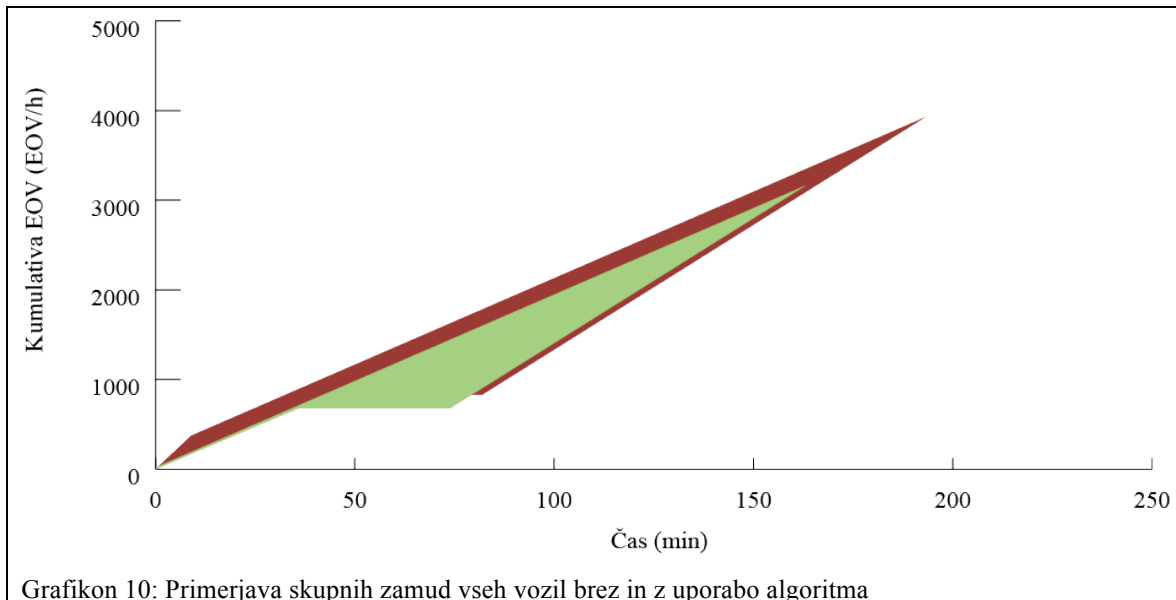


Opazimo, da zaradi hitrega reagiranja operaterja komajda nastane zastoj. Ta se sicer poveča v času, ko vzdrževalna služba ureja odprtje enega pasu mimo ovire in je predor Trojane zaprt, vendar vseeno v manjšem obsegu kot v prvem primeru.

Z uporabo kalifornijskega algoritma znaša čas zaznave 0,85 minut, skupna zamuda vseh vozil pa 873,3 ure.

### 6.5.3 Primerjava

Posledice hitrega zaznavanja se vidi v 36 % znižanju skupne zamude vseh vozil. To je vidno tudi iz časa trajanja zastoja, saj ta v slednjem primeru traja 163 minut, medtem ko je v dejanskem primeru znašala 30 minut več, torej skupaj 193 minut.



Kljub temu, da je primerjava zgolj teoretična, saj razmere v prometnem toku niso tako konstantne, kot jih prikazuje graf na sliki 40, vseeno vidimo prednost hitrega zaznavanja incidenta. Na grafu se ta kaže v zmanjšanju zamud vseh vozil, ima pa tudi druge posredne učinke kot so zmanjšanje možnosti nastanka sekundarnih nesreč, znižanja porabe goriva in manjšega znižanja udobnosti potovanja.

## 6.6 Izračun prihrankov pri vrednosti izgubljenega časa

Da bi lažje upravičili vpeljavo sistema za avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov, je potrebno zastoje ovrednotiti. V našem primeru se bomo osredotočili le na vrednost izgubljenega časa, saj ta predstavlja 90 % ekonomskih stroškov zastojev. Med ostalih 10 % štejemo še dodatne stroške za gorivo, dodatno obrabo vozila in neudobnost potnikov v pogojih zastoja, nezanesljivost in ostalo (Maibach in sod., 2008).

Za vrednotenje časa je bilo v preteklosti na območju Evrope in izven nje narejenih že mnogo raziskav, pretežno za manjša območja, saj dobimo s študijo na lokalni ravni najbolj točne rezultate. To izhaja iz metode, saj se vrednost ponavadi določa na podlagi podatkov o povprečnem dohodku. V Sloveniji sta bili v sklopu Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani narejeni dve študiji, in sicer razvojno-raziskovalna naloga »Vrednost časa za vse udeležence v prometu« (Žura in sod., 2007) in

magistrska naloga Roka Marsetiča (2008) z naslovom »Modeliranje vpliva cestnine na izbiro poti v cestni mreži«. Marsetič (2008) je za izračun vrednosti časa uporabil anketo izraženih preferenc, v kateri je bilo 1600 anketirancev soočenih s predhodno pripravljeno situacijo, pri kateri so se morali z določeno stopnjo gotovosti ali verjetnostjo opredeliti za vožnjo po cestninjeni cesti. Na ta način je mogoče z majhnim vzorcem doseči statistično dokaj zanesljivo oceno.

Vrednost časa se obravnava za različne kategorije, saj ni mogoče enačiti niti vrednosti različnih vrst vozil, niti namenov potovanj. Običajno se ta obravnava za vrsto vozila, namen potovanja, delovni ali nedelovni čas, izbiro prometnega sredstva in dolžino potovanja. Rezultati so bili v tem primeru razdeljeni glede na vrsto vozila in namen potovanja. Odstotek anketiranih kaže, da se večina potovanj izvede v prostem času in so ocenjena z nižjo vrednostjo kot tista, ki se izvedejo v službenem času. Najvišjo vrednost imajo tovorna vozila, pri katerih je v primeru zamud utrpna tudi največja finančna škoda.

Marsetič (2008) je opravil analizo na podlagi lognormalne porazdelitve vrednosti. Rezultati so prikazani v preglednici 16, kjer je vrednost časa ločena za vrsto vozila in namen potovanja.

Preglednica 16: Vrednost časa za posamezno vrsto vozila in namen potovanja in delež anketiranih na AC (Marsetič, 2008: str. 55, 61.)

Vrsta vozila	Namen potovanja	Vrednost časa (€/h)	Delež anketiranih (%)
Osebna vozila	Dom–šola	6,28	9
Osebna vozila	Dom–služba	6,33	18
Osebna vozila	Trgovina	7,7	11
Osebna vozila	Službena pot	7,77	4
Osebna vozila	Ostalo	7,74	27
Osebna vozila	Tuja	8	20
Lahka tovorna vozila	Prevoz	17,36	4
Težka tovorna vozila	Prevoz	23,73	7

Skupno vrednost časa za vse udeležence v prometu izračunamo po enačbi 6.1.

$$VOT_{sk} = \sum \left( \frac{VOT_n \cdot D}{100} \right) = 8,91 \text{ €/h} \quad (6.1)$$

kjer je:

$VOT_{sk}$ — skupna vrednost časa za vse udeležence v evrih na uro,

$VOT_n$ — vrednost časa za posamezno vrsto vozila in tip potovanja v evrih na uro in

$D$  — delež anketiranih na AC.

Na podlagi zgornje vrednosti smo ocenili vrednost izgubljenega časa, ki je zmnožek zamude in skupne vrednosti časa. To smo storili za primer z in brez uporabe algoritma za obravnavani izredni dogodek.

Preglednica 17: Primerjava prihranka pri vrednosti izgubljenega časa

	<b>Zamuda (h)</b>	<b>Vrednost izgubljenega časa (€)</b>	<b>Prihranek (€)</b>
<b>Brez algoritmom</b>	1374,8	12.249,468	–
<b>Z algoritmom</b>	873,3	7.781,103	4468,4 (36,5 %)

Največji delež potovanj se zgodi v prostem času, kjer so na izgubi pozamezniki, ki v primeru vpeljave sistema za avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov skupno tudi največ prihranijo. Bolj problematična so službena potovanja, katerih delež je sicer majhen, vendar predstavljajo izgubljene produktivne ure zaposlenih za podjetja. Večji problem se pojavi še pri tovornih vozilih za prevoz blaga. Pri zamudah zaradi izrednih dogodkov tako pride do zamud pri dostavi, kar v logistični verigi povzroči nadaljnjo škodo. Zaradi tega je z gospodarskega vidika vsak ukrep, ki vodi k zmanjšanju zamud, dobrodošel.

## 7 SKLEP IN UGOTOVITVE

Namen dela je bil širše predstaviti koncept in pomembnost avtomatskega zaznavanja izrednih dogodkov, ki temelji na zaznavi zastojev oziroma motenj v prometnem toku zaradi incidentov. Tako tovrstni algoritmi ne pridejo v poštev na odsekih, kjer je promet zelo redek, saj bi bil čas za zaznavo enostavno prevelik, da bi vpeljavo algoritmov ahko upravičili. Večina algoritmov deluje na način, da se na podlagi prometnih podatkov senzorjev (pretok, hitrost, zasedenost) opredelijo mejne vrednosti, ki predstavljajo normalen prometni tok. Ko so vrednosti v realnem času presežene, ponavadi algoritem javi nastanek izrednega dogodka. Da je zaznava kar se da uspešna, je algoritem potrebno umeriti za vsak odsek posebej. Se je pa potrebno zavedati, da z algoritmom ni mogoče preprečiti primarnih izrednih dogodkov, je pa možno zmanjšati njihove posledice.

Podrobneje smo predstavili tudi koncept delovanja videodetekcije, saj je ta na območju Slovenije poleg mikrovalovnih detektorjev in induktivnih zank zaenkrat edina, ki se namensko uporablja za avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov. Na kratko je predstavljena še najbolj razširjena metoda zaznavanja izrednih dogodkov, in sicer ročno preko telefonskega klica ali s sodobnejšo rešitvijo preko aplikacije za pametni telefon oziroma tablico. Na tem mestu bi rad bralca spodbudil k uporabi tovrstnih aplikacij, saj pravočasna in točna informacija o izrednem dogodku voznika opozori na obstoječo nevarnost, ko ima morda še čas za uporabo alternativnih poti.

Po pregledu tuje literature smo ugotovili, da je z vidika časa zaznavanja in preprostosti vgradnje najbolj primeren kalifornijski algoritem, ki za delovanje potrebuje le podatek o zasedenosti detektorjev, ki pa jih obstoječi mikrovalovni detektorji na avtocestah v Sloveniji že merijo. Na podlagi analize izrednega dogodka smo ugotavljali, za koliko se zmanjšajo zamude vseh vozil, če algoritem

zazna izredni dogodek. Pozitivni učinki hitrega zaznavanja incidenta so se pokazali v 36,5 % prihranku skupnih zamud vseh vozil in 15 % skrajšanju časa trajanja zastoja.

Čeprav je učinkovitost algoritma dokazana v več študijah, vseeno predlagamo vrednotenje različnih algoritmov z računalniško simulacijo na podlagi podatkov nesreč na danem odseku slovenske avtoceste. Za vzpostavitev delovanja bi bilo potrebno v sistem vključiti vsaj še obstoječe zanke na avtocestah in hitrih cestah, ki sedaj merijo prometne obremenitve v sklopu sistema Traffic Agent in so izvzete iz sistema za nadzor in vodenje prometa. Razdalja med merilnimi mesti na avtocestah in hitrih cestah je po trenutnih priporočilih dva kilometra, za kar bi bilo na naših cestah potrebno vgraditi še dodatne merilnike. Praksa v tujini pa priporoča zgostitev na 500 m. Za preizkus sistema so pri nas zanimivi predvsem ljubljanski obroč, kraki avtocest okoli Ljubljane, ki se dnevno srečujejo z velikim številom vozil, hkrati pa pride tudi do pojava ponavljajočih zastojev zaradi jutranjih/popoldanskih konic, ki jih je potrebno pri umerjanju algoritma upoštevati. Za določitev smotrnosti izvedbe tovrstnega sistema se vseeno priporoča predhodna izdelava analize stroškov in koristi, kjer se pretehtajo vsi eksterni stroški prometa in investicija v nakup, vgradnjo in vzdrževanje senzorjev. Za začetek se glede na rezultate analize priporoča nemotena izmenjava informacij med centrom za obveščanje, regionalnimi nadzornimi centri ter prometno-informacijskim centrom. Navsezadnje ima center za obveščanje odprt kanal za obveščanje preko spleta (ang. *RSS feed*), kjer so zainteresirani nemudoma obveščeni o pojavu dogodka. Obveščanje o izrednih prek aplikacij na osebnih napravah je trenutno v zagonu, zato bi bil mogoč nadaljni ukrep v nadzornih centrih tudi spremljanje tovrstnih aplikacij ali izvedba ustreznega obveščanja ob dodajanju novih dogodkov na danem območju. Ob dejstvu, da se na leto zgodi še mnogo podobnih izrednih dogodkov, je vgradnja tovrstnih sistemov še kako pomembna, kar je pokazal tudi izračun, saj je prišlo do občutnega zmanjšanja zamud vozil in skrajšanja časa trajanja dogodka.

**VIRI**

Balke, K. N. 1993. An evaluation of existing incident detection algorithms. Research Report. Texas, Texas Transportation Institute.

<http://tti.tamu.edu/documents/1232-20.pdf> (Pridobljeno 23. 9. 2014.)

Basnayake, C. 2004. Automated Traffic Incident Detection Using GPS Based Transit Probe Vehicles. Doktorska dizertacija. University of Calgary, Faculty of Graduate Studies, Department of Geomatics Engineering (samozaložba C. Basnayake): 28 f.

[http://www.ucalgary.ca/engo\\_webdocs/GL/04.20196.CBasnayake.pdf](http://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/GL/04.20196.CBasnayake.pdf) (Pridobljeno 30. 9. 2014.)

Blewitt, G. 1997. Basics of the GPS Technique: Observation Equations. V: Johnson, B. (ur.). Geodetic Applications of GPS. Newcastle. Nordic Geodetic Commission: 13 str.

<http://www.nbmng.unr.edu/staff/pdfs/Blewitt%20Basics%20of%20gps.pdf> (Pridobljeno 30. 9. 2014.)

Carvell Jr., J.D., Balke, K., Ullman, J., Fitzpatrick, K., Nowlin, L., Brehmer, C. 1997. Freeway Management Handbook. Virginia, Federal Highway Administration, Department of Transportation: str. 8–20.

[www.library.unt.edu/gpo/OTA/pubs/fmh/mastoccd.pdf](http://www.library.unt.edu/gpo/OTA/pubs/fmh/mastoccd.pdf) (Pridobljeno 30. 9. 2014.)

Cheung Sen-Ching, S., Kamath, C. 2007. Robust techniques for background subtraction in urban traffic video. Livermore, Centre for Applied Scientific Computing: str. 2–6.

<http://computation.llnl.gov/casc/sapphire/pubs/UCRL-CONF-200706.pdf> (Pridobljeno 30. 9. 2014.)

Chung, E., Rosalion, N. 1999. Effective incident detection and management on freeways. Končno poročilo. Vermont South, ARRB Transport Research Ltd: 3 str.

[http://www.arrb.com.au/admin/file/content13/c6/ARR%20327%20Effective%20incident%20detection\\_1273103160951.pdf](http://www.arrb.com.au/admin/file/content13/c6/ARR%20327%20Effective%20incident%20detection_1273103160951.pdf) (Pridobljeno 30. 9. 2014.)

Clark M. S. 2014. Radar Automatic Incident Detection in Tunnels. Wantage, Navtech Radar Ltd.: 2 str.

[http://www.tekna.no/ikbViewer/Content/821185/\(06\)%20Stephen%20M%20Clark\\_Radar%20as%20incident%20detection\\_ClearWay.pdf](http://www.tekna.no/ikbViewer/Content/821185/(06)%20Stephen%20M%20Clark_Radar%20as%20incident%20detection_ClearWay.pdf) (Pridobljeno 16. 4. 2014.)

Clearview Traffic Group. M100 Wireless Vehicle Detection System. 2014.

<http://www.clearviewtraffic.com/clearview-traffic/products-golden-river/art/44/m100-wireless-vehicle-detection-system.htm> (Pridobljeno 22. 9. 2014.)

Collins, J.F., Hopkins, C. M., Martin, J.A. 1979. Automatic Incident Detection: TRRL algorithms HIOCC and PATREG. Tehnično poročilo. Crowthorne, Transport and Road Research Laboratory: 13 str.

Deniz, O., Celikoglu, H.B. 2011. Overview to some existing incident detection algorithms: a comparative evaluation. Amsterdam ; Istanbul, Elsevier: 4 str.

<http://akademi.itu.edu.tr/denizon/DosyaGetir/78701/EWGT2012.pdf> (Pridobljeno 15. 5. 2014.)



Diamantopoulos, T. 2013. Analysis of the State-of-the-Art for Traffic Incident Detection: str. 12–14. <http://www.ecompass-project.eu/sites/default/files/ECOMPASS-TR-039.pdf> (Pridobljeno 10. 8. 2014.)

HCM 2000, Highway Capacity Manual. Washington, D.C., Transportation Research Board, National Research Council.  
[snavarro.files.wordpress.com/2008/08/highway\\_capacity\\_manual.pdf](http://snavarro.files.wordpress.com/2008/08/highway_capacity_manual.pdf) (Pridobljeno 30. 9. 2014.)

Hellinga, B., Knapp, G. 1999. Automatic Vehicle Identification Based Freeway Incident Detection. Raziskovalno poročilo. Waterloo, University of Waterloo, Department of Civil Engineering: str. 2, 5, 7, 8, 9, 24.

Hoel A. L., Garber J. N., Sadek W. A. 2011. Transportation Infrastructure Engineering A Multimodal Integration, SI Edition. Stamford, Cengage Learning: 595 str.

Incident Detection. 2004.  
<http://www.artechhouse.com/uploads/public/documents/chapters/oz-ch04.pdf> (Pridobljeno 16. 9. 2014.)

Janecek, A., Valerio, D., Ruehrup, S., Hummel, K.A., Hlavacs, H., Ricciato, F., Rainer, B., Müllner, W. 2012. Incident detection from cellular network signalling. No. EU-00571. V: Proceedings of the 19th World Congress on Intelligent Transport Systems in Vienna, 22–26 October 2012: 1 str.

Jaušovec, A. 2006. Induktivna zanka za štetje prometa. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.  
[http://zvonko.fgg.uni-lj.si/seminarji/ABCcestnina/INDUKTIVNA\\_ZANKA.pdf](http://zvonko.fgg.uni-lj.si/seminarji/ABCcestnina/INDUKTIVNA_ZANKA.pdf) (Pridobljeno 8. 7. 2013.)

Kamran, S., Black, J.V., Haas, O.C.L. 2007. A multilevel traffic incidents detection approach: Identifying traffic patterns and vehicle behaviours using real-time GPS data. V: Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Turkey, 13–15 June 2007: p. 912–917.

Kaplan, E.D., Hegarty, C.J. 2006. Understanding GPS, Principles and Application. Second Edition. Norwood, Artech House.  
[http://dl.amobbs.com/bbs\\_upload782111/files\\_33/ourdev\\_584835O21W59.pdf](http://dl.amobbs.com/bbs_upload782111/files_33/ourdev_584835O21W59.pdf) (Pridobljeno 30. 9. 2014.)

Kastelic, T. 2005. Center za nadzor in vodenje prometa na AC odseku Klanec-Srmin. Elektrotehniški vestnik 72: 153–158.

Kerner, B.S., Klenov, S.L., Brakemeier, A. 2009. Effect of Ad-Hoc Vehicular Network on Traffic Flow: Simulations in the Context of Three-Phase Traffic Theory: 4 str. <http://arxiv.org/abs/0910.0381> (Pridobljeno 3. 3. 2014.)

Kerner, B.S. 2009. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. Berlin, Springer: 12 str.

Klein A. L., Kelley R. M. 1996. Detection technology for IVHS. Volume I. Končno poročilo. Virginia, Federal Highway Administration, Department of Transportation: str. 5-7, 5-10.

[http://ntl.bts.gov/lib/jpodocs/repts\\_te/6184.pdf](http://ntl.bts.gov/lib/jpodocs/repts_te/6184.pdf) (Pridobljeno 17. 4. 2014.)

Maher, T. 2006. Osnove teorije prometnega toka in kapaciteta prometnih objektov. Učno gradivo. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 12 str.

Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., idr. 2008. Handbook on estimation of external costs in the transport sector. Delft, CE Delft: 23 str.

[http://ec.europa.eu/transport/themes/sustainable/.../2008\\_costs\\_handbook.pdf](http://ec.europa.eu/transport/themes/sustainable/.../2008_costs_handbook.pdf) (Pridobljeno 30. 9. 2014.)

Marot, J. 2014a. Pogovor z operaterjema o zaznavanju v Darsovem regionalnem nadzornem centru na. Osebna komunikacija. (1. 10. 2014.)

Marot, J. 2014b. Pogovor z g. Carstensom o možnosti uporabe bluetooth tehnologije za zaznavanje izrednih dogodkov. Osebna komunikacija. (26. 3. 2014.)

Marsetič, R. 2008. Modeliranje vpliva cestnine na izbiro poti v cestni mreži. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba R. Marsetič): str. 55, 61.

Marshall, K.R., Batz, T. 1994. TRANSMIT. TRANSCOM's System for Managing Incidents and Traffic.

<http://www.ite.org/Membersonly/annualmeeting/1994/AJA94F38.pdf> (Pridobljeno 11. 9. 2014.)

Martin, T.P., Perrin, J., Hansen, B., Kump, R., Moore, D. 2001. Incident detection algorithm evaluation. Utah. Utah Department of Transportation: str. 11, 15, 20, 21, 26.

[http://pdf.aminer.org/000/265/858/shoulder\\_detection\\_using\\_greld\\_threshold\\_method.pdf](http://pdf.aminer.org/000/265/858/shoulder_detection_using_greld_threshold_method.pdf) (Pridobljeno 30. 6. 2014.)

Mehadžič, A. 2010. Sistem avtomatske detekcije prometa v predorih in povezava z ostalimi sistemi nadzora in vodenja prometa na slovenskih avtocestah. V: Premrov, M. (ur.). 10. Slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, 20. – 22. oktobra 2010: p. 1116–1124.

Michek, J. 2013. Automatic Incident Detection: str. 10, 18.

<http://k612.fd.cvut.cz/vyuka/arr/admin/data/files/others/2013-8-chap-8-automatic-incident-detection-ver1-0.pdf> (Pridobljeno 15. 8. 2014.)

Mlakar, P. 2010. Globalni navigacijski satelitski sistemi. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko (samozaložba P. Mlakar): str. 14, 25–29.

Oleynik, E. 2012. GLONASS Status and Modernization.

<http://www.oosa.unvienna.org/pdf/sap/2012/un-latvia/ppt/1-2.pdf> (Pridobljeno 8. 5. 2014.)

The Basics of Loop Vehicle Detection. 2013.

<http://www.marshproducts.com/pdf/Inductive%20Loop%20Write%20up.pdf> (Pridobljeno 13. 12. 2013.)

Parkany, E., Xie, C. 2005. Complete Review of Incident Detection Algorithms & Their Deployment. What Works and What Doesn't. Amherst, University of Massachusetts, Transportation Center: str. 10, 13, 14, 21, 22, 23, 62,

[http://www.netc.uconn.edu/pdf/netcr37\\_00-7.pdf](http://www.netc.uconn.edu/pdf/netcr37_00-7.pdf) (Pridobljeno 12. 3. 2013.)

Rehborn, H., Klenov, S.L., Palmer, J. 2011. An empirical study of common traffic congestion features based on traffic data measured in the USA, the UK and Germany. V: Dawson, K.A. (ur.), Indekeu, J.O. (ur.), Stanley, H.E. (ur.), idr. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 390, 23–24: 4466–4485.

doi: 10.1016/j.physa.2011.07.004

Rijavec, R. 2000. Inteligentna video detekcija v cestnem prometu. Magistrska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba R. Rijavec): str. 6, 23, 48.

Xiaorong, S., Hai, Z., Yaozu, F., Chao, X. 2007. Fuzzy learning classifier system and its application research in automatic traffic incident detection. V: 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications in Harbin, 23–25 May, 2007: p. 769–772.

Schönhof, M., Helbing, D. 2009. Criticism of three-phase traffic theory. *Transportation Research Part B* 43/7: 784–797.

doi:10.1016/j.trb.2009.02.004

Starič, M. 2007. Koncipiranje video detekcijskega sistema pri nadzoru in vodenju prometa na cestah. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Starič): str. 2, 26, 44–60.

Umetna inteligenca. 2014.

[http://student.pfmb.uni-mb.si/~jpetric/projekt-expert/umetna\\_inteligenca.html](http://student.pfmb.uni-mb.si/~jpetric/projekt-expert/umetna_inteligenca.html) (Pridobljeno 8. 9. 2014)

Van de Ven, L.R.W. 2007. Automatische Incident Detectie met behulp van Meetlusgegevens. Vergelijkingsstudie. Delft, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek, Transport & Planning, Dynamisch verkeersmanagement: 37 str.

Verstraete, N., Versavel, J. 2007. Improving road and tunnel safety via incident management: Implementing a video image processing system. Paper No. 2007. V: Proceedings of the 14th World Congress on Intelligent Transport Systems in Beijing, October 9–13, 2007.

Wen, H., Xuhong, L. 2007. Motorist-initiated Highway Incident Detection Method Based on Wireless Positioning Technology. Paper No. 4172. V: Proceedings of the 14th World Congress on Intelligent Transport Systems in Beijing, October 9–13, 2007: 2 str.

Zorin, U. 2006. Enovit nadzor in vodenje prometa na slovenskih avtocestah – stičišče inteligentnih transportnih sistemov. V: 8. Slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, 25.–27. oktobra 2006: p. 250–258.

[www.drc.si/Portals/1/Referati/T2-Zorin.pdf](http://www.drc.si/Portals/1/Referati/T2-Zorin.pdf) (Pridobljeno 30. 9. 2014.)

Zorin, U. 2010. Spremenljiva prometno informativna signalizacija. Ljubljana, Dars d.d: 2 str.

[http://www.dars.si/Dokumenti/O\\_avtocestah/Prometne\\_obremenitve/Analiza\\_obstojeжих\\_AC\\_96.aspx](http://www.dars.si/Dokumenti/O_avtocestah/Prometne_obremenitve/Analiza_obstojeжих_AC_96.aspx)  
(Pridobljeno 3. 12. 2013.)

Žura, M., Maher, T., Rijavec, R., Strah, B., Kostanjšek, J., Marsetič, R., Logar, D. 2005. Slovenska ITS arhitektura – modul ceste: SITSA-C: aktualni razvoj inteligentnih transportnih sistemov in storitev. Raziskovalno poročilo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Prometnotehniški inštitut: str. 71–74.

Žura, M., Maher, T., Srdič, A., Rijavec, R., Marsetič, R. 2007. Vrednost časa za vse udeležence v prometu. Razvojno-raziskovalna naloga. Ljubljana. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Prometnotehniški inštitut: 42 str.