

TELEMATIČKA SUČELJA

(nastavni tekst)

doc.dr.sc. Niko Jelušić

Fakultet prometnih znanosti
Sveučilište u Zagrebu

Predgovor

Ovaj nastavni tekst namijenjen je studentima Fakulteta prometnih znanosti, Sveučilišta u Zagrebu kao pomoć za svladavanje gradiva iz kolegija Telematička sučelja.

Suvremeni ITS sustavi (Inteligentni Transportni Sustavi) podrazumijevaju uporabu telematičkih sustava čije se „odluke“ temelje na podacima i informacijama iz prometnog sustava. Pri tome podaci o prometnim tokovima predstavljaju najvažnije i najpoželjnije podatke. Zadatak prikupljanja takvih podataka imaju telematička sučelja, odnosno periferni elementi inteligentnih transportnih sustava. Može se reći da su telematička sučelja „oči“ i „uši“ telematičkih sustava.

Nastavni tekst izložen je u pet poglavlja. U prvom uvodnom dijelu prezentirana je uloga telematičkih sučelja. U drugom poglavlju prezentirani su ciljevi telematičkih sustava upravljanja, dan je pregled veličina koje opisuju prometne tokove i konkretni zahtjevi raznih vrsta telematičkih sustava upravljanja prometom za podacima. U trećem poglavlju opisani su senzori koji predstavljaju osnovne gradbene elemente većine telematičkih sučelja. S time da je tekst glede fizikalnih principa ograničen na one senzore koji se danas koriste u prometu. U četvrtom poglavlju detaljno su obrađeni detektori prometnog toka, koji danas još uvijek predstavljaju glavni izvor podataka za sustave automatskog upravljanja prometom. U petom poglavlju prezentirana su pokretna osjetila odnosno vozila koja sudjeluju u prikupljanju podataka sa prometne mreže. Danas su pokretna osjetila komplementarni izvor podataka koji sve više dobiva na važnosti i pruža mogućnost razvoja i primjene naprednih ITS aplikacija.

Sadržaj

1. UVODNI DIO - ULOGA TELEMATIČKIH SUČELJA	6
2. ZAHTJEVI ITS-a ZA PODACIMA IZ PROMETNOG SUSTAVA	9
2.1 Ciljevi telematičkih sustava upravljanja i mjerljive veličine	9
2.2 Parametri prometnog toka	10
2.3 Zahtjevi upravljanja za podacima	22
2.3.1 Osnovni pojmovi upravljanja i osnovna podjela zahtijevanih podataka	22
2.3.2 Zahtjevi za podacima s obzirom na vrstu upravljanja	24
2.3.2.1 Upravljanje pojedinačnim raskrižjem	24
2.3.2.2 Upravljanje na potezu	30
2.3.2.3 Upravljanje mrežom	31
2.3.3 Dodjela prioriteta	37
2.4 Pokazatelji kvalitete usluge i učinkovitosti	39
2.4.1 Prometni parametri kao pokazatelji kvalitete usluge	39
2.4.2 Prometni parametri kao pokazatelji učinkovitosti	40
3. SENZORI	44
3.1 Statičke karakteristike senzora	45
3.2 Dinamičke karakteristike senzora	53
3.3 Ostale tehničke značajke senzora	57
3.4 Odabrani fizikalni principi senzora	58
3.4.1 Kapacitet	58
3.4.2 Indukcija	60
3.4.3 Induktivitet	62
3.4.4 Piezoelektrički efekt	63
3.4.5 Piroelektrički efekt	65
3.4.6 Hallov efekt	66
3.4.7 Fotoelektrički efekt	67
4. DETEKTORI PROMETNOG TOKA	71
4.1 Intruzivni detektori prometnog toka	71
4.1.1 Induktivna petlja	71
4.1.1.1 Princip rada i osnovne značajke induktivne petlje	71
4.1.1.2 Vrste induktivnih petlji	74
4.1.1.3 Postavljanje petlje	76
4.1.2 Magnetski detektori	77
4.1.2.1 Magnetski detektor s ispitnom zavojnicom	77
4.1.2.2 Magnetometar	78
4.1.3 Piezoelektrički detektori	81
4.2 Neintruzivni detektori prometnog toka	82

4.2.1	Pasivni infracrveni detektori	82
4.2.2	Aktivni infracrveni detektor	85
4.2.3	Radarski detektori	87
4.2.3.1	Osnovne značajke radarskih detektora	87
4.2.3.2	Doppler radar detektor s kontinuiranim odašiljačkim signalom	89
4.2.3.3	Radar detektor s frekvencijski moduliranim odašiljačkim signalom	91
4.2.4	Pasivni zvučni detektori	94
4.2.5	Ultrazvučni detektori	95
4.2.6	Videodetektori	97
4.3	Prednosti i nedostaci pojedinih detektorskih tehnologija	102
5.	POKRETNOST OSJETILA	105
5.1	Pokretna osjetila sa GNSS lociranjem	106
5.1.1	Koncept sustava prikupljanja podataka temeljen na pokretnim osjetilima sa GNSS lociranjem	106
5.1.2	Značajke FCD-a	109
5.1.2.1	FCD podaci i poruke	109
5.1.2.2	Postupci obrade FCD podataka	111
5.1.2.3	Učestalost poruka i udio FCD vozila	117
5.1.3	Primjer obrade FCD podataka – profili brzina i područje zagušenja	120
5.1.3.1	Estimacija profila brzina	121
5.1.3.2	Određivanje zagušenja u zonama	129
5.1.4	Mogućnosti FCD-a	130
5.1.5	Usporedba prednosti i nedostataka FCD –detektori prometnog toka	132
5.2	Pokretna osjetila - lociranje resursima pokretnih ćelijskih mreža	133
5.2.1	Pokretne ćelijske mreže	134
5.2.2	Lociranje pomoću resursa ćelijskih mreža	137
5.2.2.1	Lociranje zasnovano na identifikaciji ćelije	137
5.2.2.2	Lociranje zasnovano na određivanju kuta dolaska signala	138
5.2.2.3	Lociranje zasnovano na mjerenju vremena razlike dolaska signala	139
5.2.2.4	Ostale metode lociranja	139
5.2.3	CFCD -a sa Cell-ID lociranjem	140
5.2.4	Osvrt na karakteristike podataka	142
5.3	Pokretna osjetila - automatska identifikacija	144
5.3.1	Bluetooth	145
5.3.1.1	Bluetooth	145
5.3.1.2	Princip prikupljanja podataka	146
5.3.1.3	Mogućnosti	148
5.3.2	Radio-frekvencijska identifikacija	149
5.3.2.1	RFID sustav	149

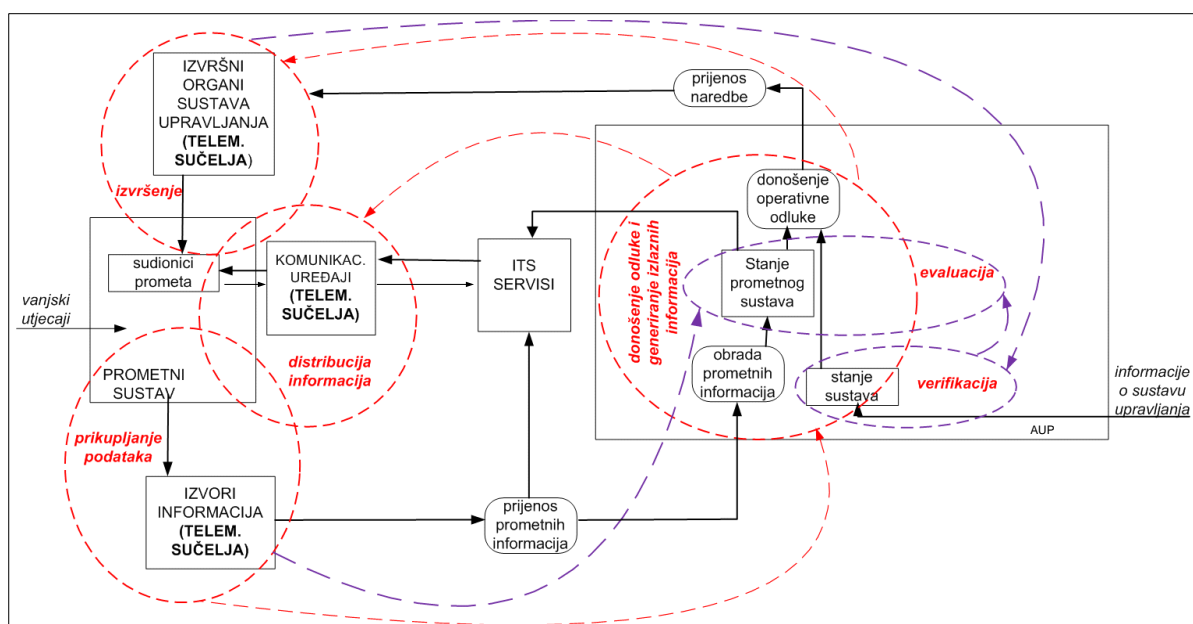
5.3.2.2	Vrste RFID uređaja	151
5.3.2.3	RFID frekvencijski pojas	152
5.3.2.4	Primjena RFID-a u prometu	153
5.3.3	Automatsko prepoznavanje registarskih tablica.....	155
5.3.3.1	ANPR sustav	155
5.3.3.2	Prepoznavanje registarskih tablica.....	156
5.3.3.3	Primjene ANPR-a u prometu	158
Literatura.....		159

1. UVODNI DIO - ULOGA TELEMATIČKIH SUČELJA

Inteligentni transportni sustavi gledano tehnološki podrazumijevaju primjenu telematičkih sustava i suvremenih pratećih tehnologija sa ciljem da se poboljša stanje u prometnom sustavu te da se unaprijede procesi u prometu i transportu. Telematički sustavi zasnovani su na primjeni automatike, informatike i telekomunikacija te su “sposobni” prikupljati i prenositi informacije, obrađivati podatke i informacije, te davati izlazne informacije ili naredbe za izvršenje. Ulogu prikupljanja podataka imaju sučelja između telematičkih sustava i prometnog sustava odnosno kraće telematička sučelja. Dakle, ovdje se pod telematičkim sučeljima smatraju periferni (terminalni) elementi telematičkih sustava svrhom prikupljanja podataka iz prometnog sustava. Periferni elementi koji daju informacije sudionicima u prometu također također spadaju u telematička sučelja.

Danas najvažniji telematički sustav ITS-a jest sustav automatskog upravljanja prometom. Osnovne funkcije takvog telematičkog sustava su:

- prikupljanje podataka iz prometnog sustava
- donošenje odluke i generiranje informacija
- verifikacija
- evaluacija.

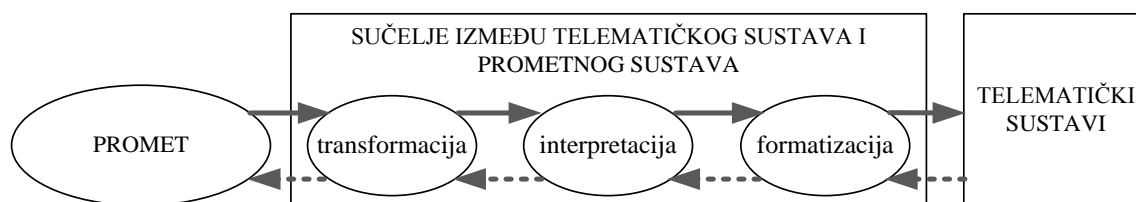


Slika 1.1 Uloga telematičkih sučelja u informacijskom lancu

Zajedno, osnovne funkcije takvog sustava čine ciklus, Slika 1.1. Osnovne funkcije naznačene su kružnicama i elipsama (isprekidane linije) dok je sam tijek označen usmjerenim isprekidanim linijama. Faze informacije u smislu njihova trenutačnog stanja ili funkcije i njihov slijed u ciklusu naznačen je punim crtama (na slici pravokutnici). Telematička sučelja izvor su prometnih podataka (informacija). Prikupljeni podaci se obrađuju, određuje se stanje u prometnom sustavu i donose operativne odluke te generiraju informacije koje se mogu proslijediti raznim ITS servisima, a potom i sudionicima u prometu. Na osnovi donesene operativne odluke daje se naredba izvršnim organima sustava upravljanja tj. telematičkim

sučeljima koja imaju funkciju davanja naredbodavnih informacija. Danas je najčešći slučaj da se kao telematička sučelja u funkciji izvora informacija nalaze detektori (senzori prometnog toka), dok naredbodavne informacije daje svjetlosna signalizacija ili promjenjivi prometni znakovi. Verifikacija i evaluacija još su dvije važne funkcije gdje telematička sučelja imaju važnu ulogu. Verifikacija provjerava i osigurava da se upravljačka naredba izvrši u skladu sa donesenom odlukom. Evaluacija daje ocjenu uspješnosti upravljanja kroz analizu skupa pokazatelja učinkovitosti, a za što su opet potrebni podaci iz prometnog sustava.

Konceptualni poopćeni model telematičkog sučelja sa aspekta procesiranja informacija sadrži procese: transformacije, interpretacije i formatizacije, Slika 1.2. Transformacija je proces pretvaranja pojava ili stanja u stvarnom prometnom okruženju u električne veličine, odnosno u električki signal. Interpretacija je zaključivanje o pojavi ili stanju na osnovi analize takvog signala. U najjednostavnijim slučajevima dovoljno je da električna veličina dobivena transformacijom (primjerice napon ili frekvencija) prijeđe neki prag i donosi se neki zaključak, dok se u složenijim slučajevima fuzijom podataka i pripadnim algoritmima ekstrahira informacija. Formatizacija je proces prilagodbe informacije za komunikacijski sustav i sam telematički sustav. Navedeni procesi u stvarnim izvedbama ne nalaze se nužno objedinjeni u jednom fizičkom uređaju. Primjerice, slučaj kada se na osnovi većeg broja osjetila koja se nalaze u prometnom sustavu želi dobiti informacija o stanju prometa na nekom području konačna interpretacija odvija se nakon integracije i agregacije podataka od svih osjetila.



Slika 1.2 Osnovne funkcije telematičkog sučelja sa aspekta procesiranja informacija

Danas su posebno značajna i aktualna sučelja u funkciji prikupljanja podataka (informacija) iz prometnog sustava, što bi na Slika 1.2 odgovaralo modelu koji sadrži samo pune ispunjene linije. Još uvijek su takvi izvori informacija pretežno “specijalizirani”, što znači da se podaci uglavnom prikupljanju za potrebe pojedinih potrošača prometnih informacija. Današnji stupanj razvoja informacijsko komunikacijskih tehnologija teoretski omogućava izravan pristup prikupljenim podacima i informacijama, te integraciju i fuziju podataka iz različitih izvora informacija. Navedeno je u svijetu aktualno kako u znanstvenim krugovima tako i u praktičnim naporima.

Informacije o stanju u prometnom sustavu mogu se prikupljati na različite načine:

- Senzori prometnog toka
- Videonadzor
- Satelitsko i avionsko snimanje
- Pokretna osjetila (vozila u prometnom toku opremljena modulima za pozicioniranje i komunikaciju)
- Identifikacijskim tehnologijama
- Dojavama specijalnih službi
- Dojavama od sudionika u prometu

- Senzori infrastrukture
- Automatske dojave o stanju infrastrukture
- Meteorološki senzori

Od navedenih izvora informacija kao telematička sučelja koja prikupljaju podatke o prometnim tokovima trenutno aktualni su senzori prometnog toka, pokretna osjetila i identifikacijske tehnologije.

Model na slici 1.2 koji bi sadržavao samo isprekidane usmjerene linije odgovarao bi telematičkim sučeljima u ulozi davanja informacija. U ovom slučaju transformacija pretežno pretvara informaciju dobivenu od telematičkog sustava u oblik razumljiv sudionicima u prometu, primjerice svjetlosna signalizacija. Sučelja u ulozi davanja mogu se podijeliti s obzirom na sadržajnost informacija:

- informacije naredbodavnog karaktera (lanterne-svjetlosna signalizacija, promjenjivi prometni znakovi, kontrola ulazno-izlaznih rampi, automatsko smanjenje brzine vozila prema naredbi telematičkog sustava),
- savjetodavno-informativnog karaktera (predputne informacije, usmjeravanje u prometu-rute, meteorološke prilike, stanje u prometnom sustavu; zagušenja, stanje na cestama; led; magla; snijeg itd.; razne vrste informacije na upit).

Od navedenih glede informacija naredbodavnog karaktera najvažnija sučelja su svjetlosna signalizacija i promjenjivi prometni znakovi. U ovom nastavnom tekstu sučelja u funkciji davanja informacija sudionicima u prometu nisu obrađena.

Za učinkovitost primjene telematičkih sustava u prometu, veoma važna su kvalitetna telematička sučelja, kako u funkciji prikupljanja informacija, tako i u funkciji davanja informacija. Razvoj i implementacija odgovarajućih sučelja zahtjeva sinergiju više struka, posebno prometno-tehnološke i elektrotehničke. Prometni stručnjak osim izvrsnog poznavanja zahtjeva ITS-a za podacima, značenja takvih podataka i njihove moguće i dodatne upotrebe treba poznavati tehnologije koje se koriste u sučeljima, te koje su njihove mogućnosti i ograničenja.

2. ZAHTJEVI ITS-a ZA PODACIMA IZ PROMETNOG SUSTAVA

2.1 Ciljevi telematičkih sustava upravljanja i mjerljive veličine

Telematičkim sustavima upravljanja u prometu nastoji se postići harmonizirano odvijanje prometa uz što manje negativne utjecaje na društvo. U tom smislu identificiraju se relevantni čimbenici kvalitete odvijanja prometa i definiraju ciljevi, kao što su:

- iskoristivost postojećih kapaciteta prometnih sustava; cilj je što bolje iskorištenje postojećih kapaciteta;
- učestalost i obujam zagušenja; cilj je smanjenje učestalosti zagušenja
- sigurnost; cilj je povećanje sigurnosti;
- buka; cilj je smanjenje buke;
- emisija ispušnih plinova; cilj je smanjenje emisije;
- i dr.

Tablica 2.1 *Veza između ciljeva upravljanja i mjerljivih veličina*

Moguće mjerljive veličine	Ciljevi
broj zaustavljanja <i>minimiziranje</i>	poboljšanje udobnosti vožnje, posebno za javni promet smanjivanje emisije ispušnih plinova i buke povećanje sigurnosti (smanjenje vjerojatnosti naleta na zaustavljeno vozilo) smanjenje potrošnje goriva
vrijeme čekanja <i>minimiziranje</i>	poboljšanje udobnosti vožnje i ušteda vremena sudionika u prometu smanjenje gubitaka u nacionalnoj ekonomiji smanjenje emisije ispušnih plinova povećanje sigurnosti (sudionici u prometu su smireniji)
vrijeme putovanja <i>minimiziranje</i>	poboljšanje točnosti kod sredstava javnog prometa smanjenje pogonskih gubitaka kod sredstava javnog prijevoza smanjenje gubitaka za nacionalnu ekonomiju
duljina reda čekanja <i>minimiziranje</i>	smanjenje emisije ispušnih plinova i buke izbjegavanje ometanja konfliktnih prometnih tokova na kraju zastoja
brzina <i>optimiranje</i>	povećanje propusne moći prometne infrastrukture povećanje sigurnosti smanjenje buke i emisije ispušnih plinova

Međutim ciljevi nisu izravno mjerljivi i kao takvi ne mogu izravno poslužiti u upravljanju. Stoga je potrebno definirati karakteristične mjerljive veličine koje opisuju prometne tokove i koje su primjenjive u upravljanju. Minimiziranjem, maksimiziranjem ili optimizacijom skupa takvih veličina nastoje se ostvariti definirani ciljevi. Tablica 2.1 prikazuje primjere veze između ciljeva i veličina koje se mogu mjeriti.

2.2 Parametri prometnog toka

Parametri prometnog toka predstavljaju osnovne mjerljive veličine koje svojim vrijednostima opisuju stanje prometnog toka. Namjena u telematičkim sustavima može biti višestruka. Mogu se koristiti kao upravljačke veličine, kao pokazatelji kvalitete usluge, kao pokazatelji učinkovitosti odnosno služiti za evaluaciju upravljanja ili primijenjenih mjera za unaprjeđenje prometnog sustava. Kao upravljačke veličine parametri prometnih tokova mogu se koristiti:

- kao izravne upravljačke veličine,
- obrada skupa vrijednosti određenog parametra prometnog toka,
- fuzija i obrada više različitih parametara s ciljem dobivanja jedne upravljačke veličine.

Mogućnost prikupljanja određenih parametara prometnog toka predstavlja temeljni zahtjev na telematička sučelja od strane telematičkih sustava upravljanja. Parametri prometnog toka definirani su u teoriji prometnog toka. Mikroskopskim i makroskopskim modelima prometnog toka, pripadnim parametrima i njihovim međusobnim relacijama također se bavi teorija prometnog toka. U ovom poglavlju dan je pregled osnovnih parametara prometnog toka za koje postoji potražnja od strane ITS-a, što ne znači da su svi i dobavljeni telematičkim sučeljima. Tablica sadrži sažeti pregled parametara prometnog toka uz odgovarajuću definiciju i pripadnu mjernu jedinicu, dok su u nastavku pojedini parametri detaljnije opisani. Prikazani su i osnovne veze između pojedinih parametara jer je moguće mjerenjem jednog parametra ili više parametara izvući zaključke o nekom koji nije direktno dostupan putem telematičkih sučelja.

Tablica 2.2 Pregled osnovnih parametara prometnog toka za potrebe ITS-a

Parametar		Definicija parametra	mjerne jedinice
Prisutnost vozila zaustavljenog	P_z	Vozilo se nalazi na određenoj prometnoj površini i miruje tijekom vremenskog intervala T	logička 0 ili 1 tijekom intervala T
Prisutnost vozila- vozilo u prolazu	P_P	Vozilo prolazi određenom prometnom površinom ili presjekom prometnice u nekom trenutku t	logička 0 ili 1 u određenom vremenskom trenutku
Duljina reda	R_q	Broj vozila koja se nalaze u redu čekanja (prilaz raskrižju, rampa i sl.)	broj vozila u redu ili duljina reda u metrima
Profil prilaznog toka	P_T	Broj vozila u skupini vozila koja se kreće i približava raskrižju	broj vozila ili duljina skupine u metrima
Intenzitet prometnog toka	q	Broj vozila koja prođu zadanim presjekom prometnice, u određenom vremenskom intervalu	$\frac{voz}{h}$
Volumen prometa	V	Ukupan broj vozila koji prođe zadanim presjekom za određeni vremenski period od t_1 do t_2	$\frac{voz}{h}$; $\frac{voz}{min}$; $\frac{voz}{dan}$
Prometni zahtjevi	Z_p	Broj vozila koja žele upotrijebiti određenu dionicu prometnice u određenom intervalu	$\frac{voz}{h}$; $\frac{voz}{min}$; $\frac{voz}{dan}$
Parametar		Definicija parametra	mjer. jed.
Interval slijedenja	h	Vrijeme proteklo između prolaska čela dva slijedna vozila	s
Razmak slijedenja	h_s	Prostorni razmak između čelnih površina slijednih vozila u prometnom toku	m

Parametar		Definicija parametra	mjerne jedinice
Propusnost	p_q	Propusnost predstavlja prijedene vozilo-kilometre za zadanu duljinu prometnice i za zadani vremenski period	$\frac{voz \cdot km}{h}$
Brzina trenutačna	v		$\frac{m}{s}$
Srednja vremenska brzina	\bar{v}_t	Aritmetička sredina trenutačnih brzina N vozila koja prolaze neki promatrani presjek unutar perioda T	$\frac{m}{s}$
Srednja prostorna brzina	\bar{v}_s	Aritmetička sredina trenutačnih brzina N vozila, koja se nalaze na promatranoj dionici d , u nekom trenutku t	$\frac{m}{s}$
Gustoća	g	Broj vozila N koja se nalaze na promatranoj duljini dionice d	$\frac{voz}{km}$
Zauzeće	O	Dio vremena koji protekne od trenutka kada čelni dio vozila prelazi početak detekcijske zone, do trenutka kada stražnji kraj napušta detekcijsku zonu (definira se za neki vremenski interval T i izražava u postocima).	(%)
Kašnjenje na dionici	t_d	Kašnjenje na dionici ili vrijeme putovanja na dionici je vrijeme potrebno da vozilo prijeđe određenu udaljenost na prometnoj mreži	s min min/km
Kašnjenje na raskrižju	t_k	Kašnjenje na križanju je vrijeme koje protekne od trenutka prilaza vozila raskrižju do trenutka napuštanja raskrižja	s min
P-O podaci prometne mreže		P-O podaci mreže opisuju kretanje vozila u smislu smjera i puta	Prikaz $P-O$ matricom (volumeni prometa)
P-O podaci raskrižja		P-O podaci raskrižja pokazuju volumene prometa po smjerovima skretanja	Prikaz $P-O$ matricom volumena prometa)
Klasifikacija dimenzije	L δ h	Duljina vozila Širina vozila Visina vozila	m Vozila su klasificirana u kategorije
Klasifikacija masa	m	Masa vozila Postoje razne vrste klasifikacija.	kg Vozila su klasificirana u kategorije
Klasifikacija funkcijska		Podjela na osobna vozila, sredstva javnog prijevoza, razne javne službe	

Intenzitet prometnog toka

Intenzitet prometnog toka (protok vozila) q definira se kao broj vozila koja prođu zadanim presjekom prometnice u određenom vremenskom intervalu. Najčešće se izražava u broju vozila po satu (voz/h). S obzirom na prostornu komponentu intenzitet se može promatrati kao intenzitet na presjeku ili intenzitet na dionici. Intenzitet na presjeku, dan je izrazom (2.1).

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

gdje je: N - broj vozila koji je prošao presjekom; T - vrijeme u satima

Intenzitet na dionici je aritmetička sredina na n promatranih presjeka za odabranu dionicu prometnice. Intenzitet na dionici, dan je izrazom (2.2).

$$q_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (2.2)$$

gdje je: n - broj promatranih presjeka; q_i - intenzitet na i -tom presjeku

Intenzitet se može definirati za jedan ili oba smjera, no kada se upotrebljava pojam intenzitet bez dodatnih napomena onda se radi o intenzitetu prometnog toka u jednom smjeru i na jednom presjeku. Intenzitet prometnog toka ovisi o vremenu i smjeru prometnice. Maksimalni intenzitet koji može podnijeti neka prometna površina (prometnica, križanje) naziva se kapacitet prometne površine.

Volumen prometa

Volumen prometnog toka V odnosi se na ukupan broj vozila koji prođe zadanim presjekom za dani vremenski period. Za razliku od intenziteta volumen se može promatrati u različitim vremenskim intervalima, primjerice: u određenom broju sekunda, minuta, sati, dana, tjedana, mjeseca ili godina. Pojam volumena upotrebljava se za stvarni ukupan broj vozila koja prođu zadani presjek u danom vremenu, dok intenzitet prometnog toka pokazuje broj vozila koja prolaze presjek u vremenskim intervalima kraćim od sata, ali se izražava u jedinici voz/h. Moglo bi se reći da je intenzitet funkcija vremena, dok je volumen broj za definirani vremenski period. Volumen u vremenskom periodu T je integral intenziteta (2.3).

$$V = \int_T q(t) dt \quad (2.3)$$

Prometni zahtjevi

Prometni zahtjevi ili ponuđeni promet jest broj vozila koja žele upotrijebiti određenu dionicu prometnice u određenom vremenu. Izražava se u broju vozila po satu (voz/h). Može se koristiti i drugi vremenski interval. Zahtjevi su u korelaciji sa dinamičkim karakteristikama prometne mreže odnosno P-O podataka. U slučaju kada zahtjevi prelaze kapacitet prometnice, pojavljuju se repovi čekanja i intenzitet je manji od zahtjeva.

Interval slijeđenja

Interval slijeđenja dvaju vozila h definira se kao proteklo vrijeme između prolaska čela dva slijedna vozila na promatranom presjeku prometnog traka, i izražava se u sekundama. Kada se

mjeri interval slijeđenja, i pri tom se koriste klasični detektori sa definiranom detekcijskom zonom, interval slijeđenja sastoji se od dva vremenska intervala: interval zauzetosti ili vrijeme u kojem vozilo zauzima detekcijski presjek i vrijeme koje proteče između prolaska stražnjeg kraja prvog vozila i čela drugog vozila. Inače, vrijeme koje proteče između prolaska stražnjeg kraja prvog vozila i čela drugog vozila, usko je povezano sa stupnjem slobode manevriranja vozila na prometnicama.

Srednja vrijednost intervala \bar{h} slijeđenja recipročna je intenzitetu prometnog toka q . Naime, ukupno vrijeme promatranja zbroj je vremenskih intervala slijeđenja, izraz (2.13)

$$T = \sum_{i=1}^n h_i \quad (2.4)$$

gdje je T - ukupno vrijeme promatranja, h_i - interval slijeđenja

Zamjenom ukupnog vremena T u izrazu (2.1) sa relacijom (2.4) dobiva se izraz (2.5)

$$q = \frac{N}{T} = \frac{N}{\sum_{i=1}^n h_i} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n h_i} = \frac{1}{\bar{h}} \quad (2.5)$$

No kako se intenzitet izražava u voz/h, a interval slijeđenja u sekundama, potrebno je dodati korekcijski faktor, izraz (2.6).

$$q = \frac{3600}{\bar{h}} \quad (2.6)$$

Ako se detekcijska zona na prometnim površinama sa prometnom signalizacijom ili naplatnim stanicama postavi na odgovarajuću lokaciju (primjerice nakon naplatnog mjesta), interval slijeđenja predstavlja vrijeme posluživanja.

Razmak slijeđenja

Razmak slijeđenja h_s je prostorni razmak između identičnih točaka (čeoone površine) slijednih vozila u prometnom toku i izražava se u metrima. Na dionici prometnice razmak slijeđenja predstavlja srednju vrijednost svih pojedinačnih razmaka slijeđenja između uzastopnih vozila. Razmak slijeđenja zbroj je duljine prednjeg vozila i razmaka između vozila. Razmak slijeđenja bitan je parametar za opisivanje interakcije među vozilima i slobode manevriranja vozila.

Propusnost

Propusnost predstavlja prijedene vozilo-kilometre za zadanu duljinu prometnice i za zadani vremenski period. Može se odrediti mjerenjem intenziteta za dionicu prometnice (ulazni i izlazni presjek) i množenjem sa duljinom dionice. Izražava se u voz-km/h. Propusnost se često koristi za opis efektivnosti prometnica i za evaluaciju operativnih zahvata u cilju poboljšanja.

Brzina

Brzina jednog vozila na nekom presjeku prometnice koja se računa kao omjer prevaljenog puta ds u infitezimalnom malom dijelu vremena dt , naziva se trenutačna brzina izraz (2.7).

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (2.7)$$

Trenutačna brzina vozila je mikroskopski pokazatelj. Dok su kao makroskopski pokazatelji prometnog toka definirane srednja vremenska brzina i srednja prostorna brzina.

Srednja vremenska brzina \bar{v}_t , prostorno je određena presjekom prometnice, a vremenski periodom promatranja. Definira se kao aritmetička sredina trenutačnih brzina vozila koja prolaze promatrani presjek unutar perioda promatranja T , izraz (2.8).

$$\bar{v}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{dx}{dt_i}}{N} = \frac{1}{N} dx \sum_{i=1}^N \frac{1}{dt_i} \quad (2.8)$$

U praktičkom smislu, izvedeni zadnji dio jednadžbe naglašava da se prilikom mjerenja u cilju dobivanja srednje vremenske brzine, mjerenje izvodi na istom presjeku prometnice tj. detekcijskom dijelu duljine dx .

Srednja prostorna brzina \bar{v}_s , prostorno je određena promatranom dionicom, a vremenski trenutkom. Srednja prostorna brzina jednaka je aritmetičkoj sredini trenutačnih brzina skupa od N vozila koja se nalaze na promatranoj dionici prometnice, u nekom trenutku t . Sukladno tome, ako je $v_i = dx_i / dt$ trenutačna brzina vozila koje se nalazi negdje na promatranoj dionici, srednja prostorna brzina dana je izrazom :

$$\bar{v}_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{dx_i}{dt}}{N} = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N dx_i}{dt} \quad (2.9)$$

Slično kao i kod relacije za srednju vremensku brzinu, krajnji izraz u jednadžbi za srednju prostornu brzinu matematičkim rječnikom naglašava kako bi se prikupljanje podataka za izračun srednje prostorne brzine trebalo obavljati istovremeno za sva vozila koja se nalaze na dionici. U literaturi se mogu pronaći i druge definicije srednje prostorne brzine, primjerice definicija srednje prostorne brzine kao omjer ukupno prijeđenog puta za skup od N vozila i ukupno potrebnog vremena da se prijeđe taj put. Pri tome duljina prijeđenih putova pojedinih vozila ne mora biti jednaka. Nadalje, prema (Lighthill and Whitham, 1955) srednja prostorna brzina može se definirati također kao omjer duljine dionice i srednjeg vremena, skupa od N vozila, potrebnog da se prijeđe ta dionica, izraz (2.10).

$$\bar{v}_s = \frac{d}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i} \quad (2.10)$$

gdje je t_i -vrijeme potrebno da i -to vozilo prijeđe dionicu d ; $t_i = d / v_i$

Uvrštavanjem t_i u relaciju (2.10) dobiva se srednja prostorna brzina kao harmonijska sredina trenutačnih brzina na nekom presjeku, što se vidi u izrazu (2.11)

$$\bar{v}_s = \frac{d}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i} = \frac{d}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{d}{v_i}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i}} \quad (2.11)$$

Prema izrazu (2.10) srednja prostorna brzina može se dobiti mjerenjem trenutačnih brzina na presjeku ako se na dionici brzina ne mijenja. Međutim ukoliko se trenutačne brzine pojedinih vozila mijenjaju uzduž dionice, dobivena srednja prostorna brzina ne odgovara pravoj vrijednosti. Wardrop (Wardrop, 1952) je izveo relaciju koja povezuje srednju prostornu i srednju vremensku brzinu, izraz (2.12).

$$\bar{v}_t = \bar{v}_s + \frac{\sigma_s^2}{\bar{v}_s} \quad (2.12)$$

gdje je σ_s^2 varijanca definirana sa $\sum g_i (v_i - \bar{v}_s)^2 / g$, gdje je g_i gustoća podtoka vozila sa brzinom v_i , g je gustoća ukupnog toka.

Gustoća

Gustoća prometnog toka g , izraz (2.13), definira se kao broj vozila N koja zauzimaju promatranu duljinu dionice prometnice d , a vremenski je određena trenutkom promatranja. Izražava se u broju vozila po kilometru, voz/km.

$$g = \frac{N}{d} \quad (2.13)$$

Mikroskopski uvid u gustoću je prije navedeni parametar razmak slijeđenja. U realnim uvjetima gustoća je funkcija vremena. Točni i nedvojbeni podaci o gustoći mogu se dobiti samo ako se promatra cijela zadana dionica prometnice. Iako je gustoća fundamentalni parametar prometnog toka, primjena u upravljanju i kontroli prometa limitirana je poteškoćama prilikom prikupljanja potrebitih podataka.

Srednja gustoća prometnog toka, unutar nekog vremenskog intervala T , aritmetička je sredina gustoća g_i dobivenih iz m promatranja.

$$\bar{g} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m g_i \quad (2.14)$$

Srednja gustoća, izraz (2.15) može izraziti i kao omjer prosječnog broja vozila u intervalu T i duljine dionice d .

$$\bar{g} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T N(t) dt}{d} \quad (2.15)$$

U praksi, prometni inženjeri gustoću izračunavaju iz jedne od osnovnih relacija prometnog toka, izraz (2.16), koja povezuje gustoću, intenzitet prometnog toka i srednju prostornu brzinu:

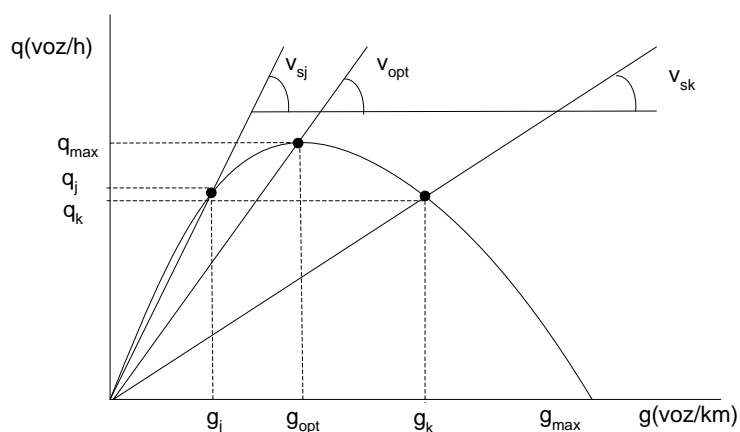
$$g = \frac{q}{\bar{v}_s} \quad (2.16)$$

Naime zamjenom intenziteta sa izrazom (2.1), i srednje prostorne brzine sa izrazom (2.11) dobije se:

$$g = \frac{q}{\bar{v}_s} = \frac{\frac{N}{T}}{\frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i}}} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N v_i^{-1} \quad (2.17)$$

Iz izraza (2.17) slijedi da se vrijednosti gustoće mogu dobiti lokalnim mjerenjem trenutnih brzina na presjeku. Međutim izraz daje točne rezultate samo u idealnim uvjetima. Rezultati drastično odstupaju od realnih vrijednosti u uvjetima zagušenja prometnog toka.

Odnos između intenziteta (protoka) i gustoće toka ima prikazan je grafom, Slika 2.1.



Slika 2.1 Graf protoka - gustoća

Vrijednost intenziteta raste sa porastom gustoće, do maksimalne moguće vrijednosti protoka q_{\max} , tj. kapaciteta prometnice. Toj vrijednosti odgovara optimalna gustoća g_{opt} . Daljnjim povećanjem gustoće dolazi do opadanja intenziteta, te u točki g_{\max} nastaje zagušenje, i intenzitet je jednak nuli. Iz dijagrama se vidi da porastom gustoće pada brzina vozila, što se sa

stanovišta vozača ili putnika manifestira kao smanjenje kvalitete usluge. Nadalje veća gustoća, znači manji razmak između vozila, čime se ograničava sloboda manevriranja vozača.

Zauzeće

Zauzeće O je parametar koji se definira kao dio vremena koji protekne od trenutka kada prednji kraj vozila prelazi početak definirane detekcijske zone pa do trenutka kada stražnji kraj napušta kraj detekcijske zone, i izražava se u postocima. Za definirani vremenski interval T , zauzeće je omjer zbroja vremenskih intervala Δt_i u kojima se vozila nalaze unutar detekcijskog područja senzora i tog vremenskog intervala T , izraz (2.18). Za svako vozilo, vrijeme provedeno unutar detekcijskog područja određeno je brzinom vozila v_i i zbrojem duljine vozila L_i sa duljinom detekcijskog područja L_D .

$$O = \frac{\sum_i (L_i + L_D) / v_i}{T} \quad (2.18)$$

Kako slijedi iz same definicije zauzeća, mjerenje se obavlja na presjeku prometnice. U praksi mjerenje parametra zauzeća spada u jednostavnije. Transformacija gornje jednadžbe, i primjena relacije (2.17). vodi na relaciju (2.19) koja povezuje zauzeće i gustoću g .

$$O = \frac{1}{T} \sum \frac{L_i}{v_i} + L_D g \quad (2.19)$$

Daljnje pojednostavljenje, ako se umjesto promjenjive duljine vozila pretpostavi da su sva vozila jednake duljine \bar{L} (srednja duljina vozila), vodi na izraz (2.20):

$$g = \frac{F \cdot O}{\bar{L} + L_D} \quad (2.20)$$

gdje je: \bar{L} srednja duljina vozila, F - korektivni faktor koji konvertira ($F=1000$; naime gustoća se izražava u voz/km dok se duljine vozila i detekcijskih zona izražavaju u metrima).

Kako je već rečeno, vrijednosti zauzeća dobivaju se mjerenjem na presjeku prometnice, a gustoća se definira na dionici prometnice. Zbog problema postavljanja funkcijske veze između tih parametara u promjenjivom realnom prometnom toku, relacijom (2.20) dobivene vrijednosti neće odgovarati stvarnim vrijednostima gustoće u urbanim sredinama. Relacija je uz upotrebu dodatnih korekcijskih faktora upotrebljiva za autoceste, dok za urbane prometnice ne daje dobre rezultate.

Kašnjenje

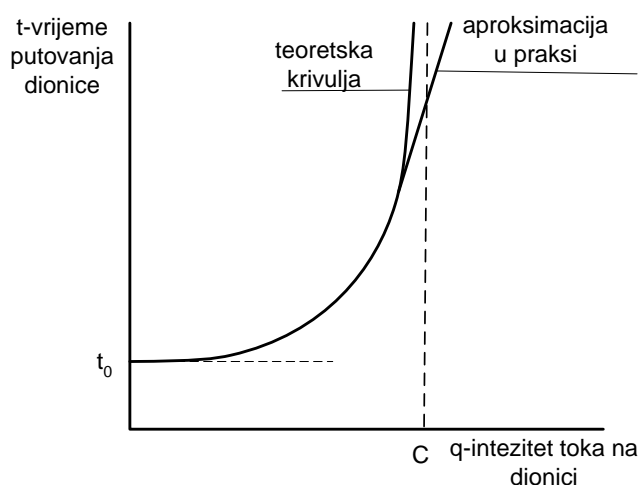
Kašnjenje na dionici

Kašnjenje na dionici ili vrijeme putovanja na dionici t_d je vrijeme potrebno da vozilo prijeđe definiranu udaljenost na prometnoj mreži. Pri tome ta dionica može sadržavati razne prometne

elemente koji ometaju odvijanje prometnog toka. Za makroskopski uvid u stanje prometne mreže bitan parametar je srednja vrijednost vremena, svih vozila promatranog prometnog toka, potrebna da se prijeđe određena dionica, izraz (2.21). Za duljinu dionice često se uzima 1 km, pa je pripadna jedinica min/km. U literaturi kašnjenje se često naziva i vrijeme putovanja.

$$\bar{t}_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{di} \quad (2.21)$$

Vrijeme kašnjenja na dionici direktno je povezano sa intenzitetom prometnog toka. Povećanjem intenziteta, povećava se i vrijeme putovanja, a kako se intenzitet približava kapacitetu dionice, povećava se i gradijent kašnjenja na dionici. Krivulja na grafu prikazanom Slika 2.2 naziva se funkcija zagušenja.



Slika 2.2 Graf funkcije zagušenja

Jedan tipičan izraz koji opisuje funkciju zagušenja dan je sa izrazom (2.22),

$$t = t_0 \left(1 + \frac{Jq}{C - q} \right) \quad (2.22)$$

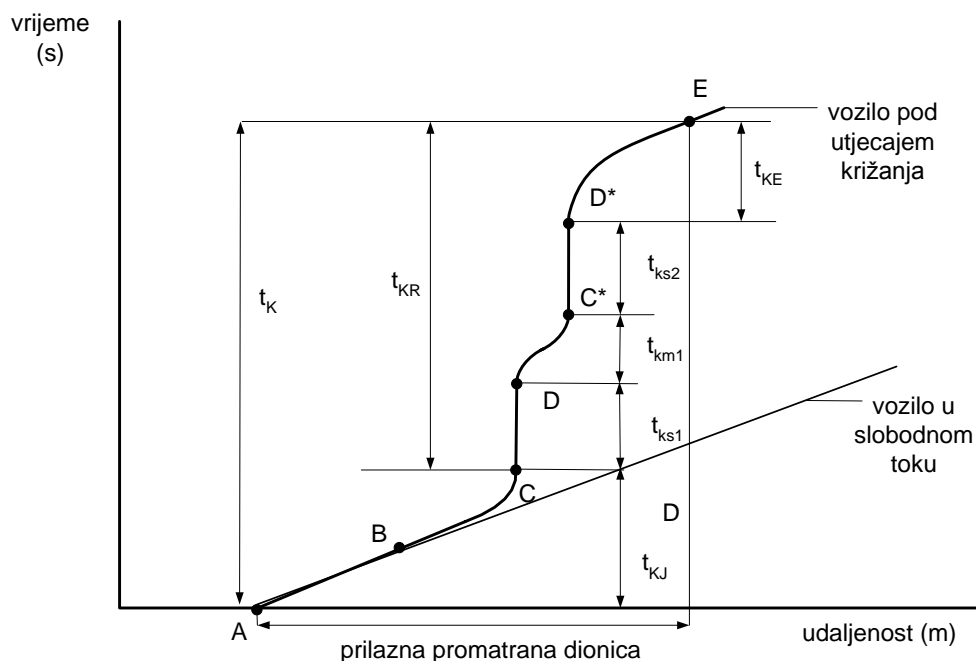
gdje je J -parametar utjecaja okoline na prometni tok, C - kapacitet prometnice, t_0 - vrijeme putovanja na dionici u uvjetima slobodnog toka, q - intenzitet prometnog toka

Za funkciju zagušenja postoji još nekoliko poluempirijskih relacija izvedenih na osnovi teorije i mjerenja. Te relacije sadrže dodatne korekcijske faktore koji uzimaju u obzir broj i utjecaj različitih prometnih elemenata koji izazivaju kašnjenja. Često se pod kašnjenjem podrazumijeva razlika vremena koje je vozilo potrebno da prijeđe dionicu i vremena za koje bi vozilo prešlo tu dionicu u uvjetima slobodnog toka bez ikakvih smetnji.

Kašnjenje na raskrižju

Kašnjenje na raskrižju odnosno vrijeme koje vozilo provede od trenutka prilaza križanju pa do trenutka napuštanja križanja sastoji se od više vremenskih intervala, koji su prikazani na slici Slika 2.3. Kašnjenje zaustavljenog vozila t_{KS} jest zbroj vremenskih intervala dok vozilo stoji

na prilazu signaliziranom križanju, suma vremena t_{ksi} . Kašnjenje u repu t_{KR} jest zbroj vremenskih intervala, u kojima se vozilo nalazi u redu. To vrijeme zbroj je suma: vremena kašnjenja zaustavljenog vozila t_{ksi} , vremena dok se kreće u redu t_{kmi} i vremena napuštanja križanja t_{KE} . Kašnjenje na raskrižju t_K je ukupno vrijeme potrebno da se prijeđe promatrana dionica i jednako je zbroju vremena pridruživanja i kašnjenja u redu. Vrijeme pridruživanja t_{KJ} sastoji se od dva vremenska intervala: intervala koji vozilo provede u slobodnom toku, od točke A do B i vremena "ulaska" u red, tj. dok se ne zaustavi u točki C.



Slika 2.3 Kašnjenje vozila na križanju

Parametri koji nisu izraženi preko vremena, ali su u uskoj vezi s kašnjenjima su: *broj zaustavljanja na prilazu raskrižju* i *duljina repa čekanja*. Prvi parametar je broj koji pokazuje koliko se puta vozilo zaustavi prilikom prilaza križanju. To je također pokazatelj kvalitete odvijanja prometa na signaliziranom križanju. Drugi parametar također je broj, a pokazuje koliko se vozila nalazi u redu čekanja u jednom traku. Kada se opisuje glavni tok prometnice, parametar duljina repa čekanja može se odnositi na broj vozila koja stoje ili se sporo kreću u koloni koja je pod neposrednim utjecajem raskrižja (kretanje iz zaustavljenog položaja svakog vozila uvjetovano je pomicanjem vodećeg vozila).

P-O podaci

Polazišno odredišni podaci (P-O) (eng. *Origin-Destination O-D*) odnose se na podatke koji opisuju izvore i ponore prometa (nastajanje i nestajanje prometa). Takvi podaci značajni su za opisivanje i predviđanje distribucije prometnih tokova u prometnoj mreži. P-O podaci imaju dimenziju intenziteta ili volumena. No za razliku od intenziteta koji je definiran na presjeku prometnice te samo za odlazni i dolazni smjer, ovi parametri su definirani za određeno geografsko područje ili točku mreže gdje se prometni tokovi sastaju (križanja). Makroskopski P-O podaci odnose se na definirano geografsko područje, dok se mikroskopski P-O podaci odnose na raskrižje.

Makroskopski P-O podaci

Makroskopski P-O podaci prezentiraju volumene prometa između definiranih prometnih područja i volumene prometa između definiranih mjesta u samim područjima. Mjesto ovdje označava geografsko područje koje može biti različite veličine ili značaja. To npr. mogu biti stambene četvrti, industrijska područja, trgovački centri, javne ustanove ili dr. P-O podaci definiraju se za određeni vremenski interval (sat, dan, mjesec ili dulji period).

P-O podaci nekog studiranog prometnog područja prezentiraju se P-O matricom. Takva matrica sadrži volumen prometa iz svakog definiranog polazišta prema svakom definiranom odredištu. Tablica 2.3 prikazuje primjer P-O matrice u kojoj se nalazi i lokalni promet određenog geografskog područja unutar kojeg također postoje polazišta i odredišta. Za određeno mjesto u mreži odnosno prometno područje u P-O matrici prikazuju se: ulazni promet, izlazni promet, tranzitni promet i lokalni promet. Ulazni promet T_u jest broj vozila koja u definiranom intervalu ulaze u neko područje. Izlazni promet T_i jest broj vozila koja u tom istom intervalu izlaze iz područja. Generirani promet T_g je razlika ulaznog i izlaznog prometa, ako je ta razlika veća od nule, a ako je razlika manja od nule radi se o nestajanju prometa T_n , izrazi (2.23).

$$T_g = T_i - T_u : (T_i - T_u) \geq 0 \quad (2.23)$$

$$T_n = T_u - T_i : (T_u - T_i) \geq 0$$

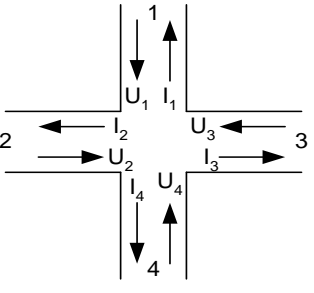
Tablica 2.3 Primjer P-O matrice za neko prometno područje

		ODREDIŠTE	
		EKSTERNO 1 M1	INTERNO 1 M2
P O L A Z I Š T E	EKSTERNO 1 . . . N ₁	Tranzitni promet	Ulazni promet
	INTERNO 1 . . N ₂	Izlazni promet	Lokalni promet

Mikroskopski P-O podaci

Mikroskopski P-O podaci definiraju se na mikro lokaciji, odnosno raskrižjima. Intenziteti odnosno volumeni prometa po smjerovima na raskrižju zapisuju se u P-O matricu. Redovi u matrici predstavljaju ulazni smjer, a stupci izlazni smjer, kako je prikazano u Tablica 2.4. Element matrice V_{ij} prezentira volumen iz smjera i u smjer j . Poželjno je identificirati kategoriju vozila. U tom slučaju matrica bi bila trodimenzionalna, a element bi nosio oznaku V_{ijk} , gdje k označava kategoriju vozila. Pojedini smjerovi ij mogu biti zabranjeni.

Tablica 2.4 Matrica volumena prometa po smjerovima na raskrižju

Ulazni smjer	Izlazni smjer				Ukupno	
	1	2	3	4		
1	V_{11}	V_{12}	V_{13}	V_{14}	VU_1	
2	V_{21}	V_{22}	V_{23}	V_{24}	VU_2	
2	V_{31}	V_{32}	V_{33}	V_{34}	VU_3	
4	V_{41}	V_{42}	V_{43}	V_{44}	VU_4	
Ukupno	VI_1	VI_2	VI_3	VI_4		

Promatrani vremenski intervali mogu biti minuta, sat ili dulji. No često se promatrani vremenski interval na signaliziranim raskrižjima, veže uz ciklus signalizacije. Broj vozila koja skreću lijevo odnosno , desno, nastavljaju ravno ili u još nekom mogućem smjeru koji postoji na raskrižju, može se izražavati i u postocima, u odnosu na ukupni broj vozila koji je prošao presjekom prilaza raskrižja.

Klasifikacija vozila

Klasifikacija prema funkciji

Klasifikacija vozila opisuje sastav prometnog toka. Pri tome se vozila mogu klasificirati prema funkciji i prema dimenzijama i masi. Klasifikacija prema funkciji odnosno prema namjeni dijeli vozila na:

- osobna vozila
- vozila javnog prijevoza
- vozila za prijevoz tereta
- vozila javnih službi (hitna pomoć, vatrogasna vozila, policija)

Klasifikacija prema dimenzijama i masi

Klasifikacija prema gabaritima vozila uzima u obzir dimenzije (širina, visina, duljina), masu i broj osovina vozila. Klasifikacija prema gabaritima vozila nije jedinstvena, već se razlikuje od države do države. U Velikoj Britaniji prema TRL-u (*Transport Research Laboratory*) razlikuje se čak 25 kategorija vozila. U SAD prema FHWA (*Federal Highway Administration*) razlikuje se 13 kategorija vozila. Propisima su određene maksimalne dimenzije vozila, koji se od države do države razlikuju. Npr., u EU najveća dopuštena duljina kamiona s prikolicom je 18,35 m (uz 2% tolerancije), a najveća visina je 4m. U Velikoj Britaniji npr. najveća visina je 4,2 m. Najveća dopuštena masa u većini EU zemalja je 44 tone, dok je npr. u Velikoj Britaniji 38 tona. Najveća dopuštena širina u gotovo svim zemljama EU je 2,5 m.

Različite kategorije vozila imaju različite brzine i sposobnosti manevriranja, a njihov utjecaj na odvijanje prometa opisuje se sa PA jedinicama ili pcu (*personal car unit*) jedinicama. U tablici Tablica 2.5 je primjer vrijednosti PA jedinica za osnovne kategorije vozila. Vrijednosti tih jedinica u literaturi se nešto razlikuju.

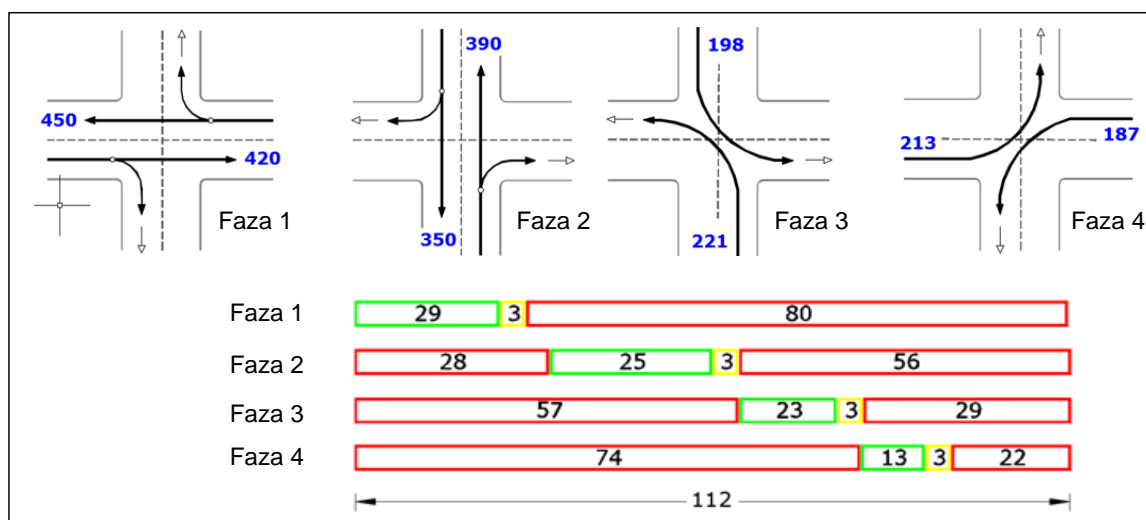
Tablica 2.5 Vrijednosti PA (pcu) jedinica

KATEGORIJA VOZILA	PA-jedinica
bicikl	0,2
motocikl	0,4
osobna vozila	1
laka teretna vozila	1,5
autobusi	2
teška teretna vozila	2-3

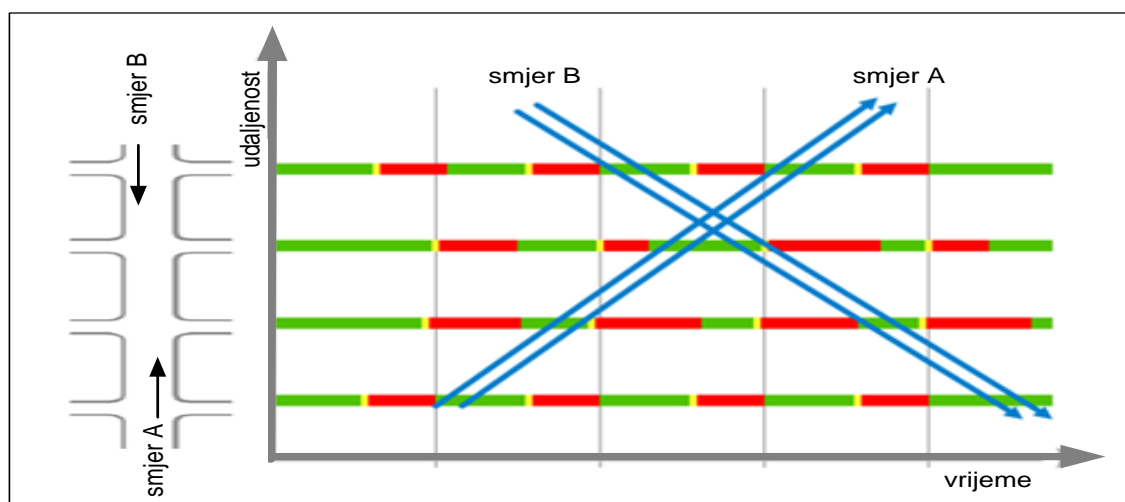
2.3 Zahtjevi upravljanja za podacima

2.3.1 Osnovni pojmovi upravljanja i osnovna podjela zahtijevanih podataka

Glavni izvršni organi telematičkih sustava upravljanja prometom su svjetlosni signalni uređaji (semafori). Svjetlosni signalni uređaj upravljačke naredbe za izmjenu svjetlosnih pojmova (crveno, žuto, zeleno) dobija od lokalnog signalnog uređaja (signalni uređaj – eng. *controller*), koji može biti pod kontrolom nadređenog signalnog uređaja. Svjetlosni pojmovi predstavljaju informacije (naredbe) sudionicima u prometu. Jednostruko trajanje izmjene svih svjetlosnih pojmova naziva se ciklus (eng. *Cycle length*). Omjer trajanja zelenog svjetlosnog pojma signalne grupe prema ciklusu naziva se razdioba zelenog (eng. *Split*), gdje je signalna grupa skup „upravljačkih naredbi“ namijenjen sudionicima u prometu koji imaju iste zahtjeve. Faza (eng. *Phase*) predstavlja dio ciklusa u kojem se daje pravo prolaza određenim smjerovima prometnih tokova. Ako signalni uređaji rade u koordiniranom režimu rada, Slika 2.5 određuje se vremenski pomak zelenog za signalne grupe od interesa u odnosu na referentnu vremensku poziciju sustava (vremenski pomak zelenog - eng. *Offset*). Zbog sigurnosti definira se i zaštitno međuvrijeme između dvije konfliktne signalne grupe koje slijede uzastopno. Na Slika 2.4 prikazan je primjer faza i signalnog plana.



Slika 2.4 Primjer faza na raskrižju i signalnog plana (nisu prikazane faze za pješake)



Slika 2.5 Koordinirani signalni planovi

Zadatak upravljanja je optimizacija vremenskih varijabli svjetlosne signalizacije (ciklus, split, offset) prema nekoj ciljnoj funkciji ili funkcijama primjerice: maksimalan protok, minimalno vrijeme čekanja, minimalna duljina repova i dr. S time da treba voditi računa o sigurnosti (zaštitno međuvrijeme). Rezultati toga mogu biti primjerice: odabir odgovarajućeg signalnog plana ili generacija novih signalnih planova, adaptivna promjena postojećih signalnih planova (mijenjanje trajanja signalnih pojmova, umetanje faza), sinkronizacija signalnih planova (koordinacija signalnih uređaja) niza raskrižja i dr.

Zahtjevi na mjerljive veličine odnosno prikupljane podatke direktno ovise o namjeravanoj primjeni. Bilo koja primjena podataka u ITS-u može biti strateške, taktičke ili planske razine. Općenito u telematičkim sustavima upravljanja postoje sve tri razine. Svaka razina drugačije koristi podatke, zahtijeva različitu specifikaciju potrebnih podataka uključujući vremenske intervale prikupljanja, raspone prikupljanja i zahtijevanu točnost podataka, a time i postavlja

različite zahtjeve na telematička sučelja. Sukladno tome, potrebni podaci mogu se podijeliti na taktičke, strategijske i povijesne podatke koji se spremaju u bazu podataka za različite potrebe.

Strategijski podaci podržavaju razinu strategijskog odlučivanja koja zahvaća veće geografsko područje (više raskrižja, dio prometne mreže, prometnu zonu). Strategijske odluke aktiviraju unaprijed razrađene upravljačke strategije koje mijenjaju stanje u čitavom sustavu, podsustavu ili više njih. Strategijski podaci prikupljanju se u intervalima trajanja 5 do 10 minuta. Tipičan primjer je odabir signalnog programa za zonu na osnovi podataka dobivenih sa nekoliko strateških lokacija. Strategijske odluke postavljaju uvjete i ograničenja unutar kojih djeluje taktičko upravljanje.

Taktički podaci služe za taktičko upravljanje gdje se odluke donose brzo s ciljem interventnog mijenjanja stanja u prometu i to na malom geografskom području (raskrižje ili cestovni segment). Stoga se taktički podaci uzimaju u kratkim vremenskim intervalima reda veličine sekunde do trajanja ciklusa. Na taktičke podatke postavlja se zahtjev velike točnosti i preciznosti prilikom mjerenja vrijednosti. Tipični primjer primjene taktičkih podataka je upravljanje pojedinačnim raskrižjem ovisno o prometu.

Povijesni podaci spremaju se u baze podataka i prikupljanju se u duljim vremenskim intervalima reda veličine godine. Načini arhiviranja su razni, a vrlo čest je slučaj da se arhiviraju agregirani u petnaestominutne intervale prema satu, danu i datumu. Izvor podataka mogu biti i strategijski i taktički podaci. Povijesni podaci služe za prometno planiranje, projektiranje, analize, za potrebe predviđanja prometnih stanja, simulacije i evaluacije.

S jedne strane s obzirom na stupanj razvoja telematički sustavi upravljanja postavljaju zahtjeve na podatke i specifikaciju podataka iz prometnog sustava koja telematička sučelja trebaju ispuniti. S druge strane razvoj i primjena naprednih strategija i taktika upravljanja limitirana je upravo mogućnostima telematičkih sučelja. Glavni zahtjevi koje postavljanju telematički sustavi su vremenska kontinuiranost prikupljanja podataka i prostorna pokrivenost prometnog sustava. Za sada ne postoji tehnologija koja bi (uz razumne troškove) omogućila stalno prikupljanje podataka iz svakog dijela prometne mreže. Stoga se kao telematička sučelja koja prikupljanju podatke za telematičke sustave upravljanja koriste detektori prometa koji imaju izvršnu vremensku kontinuiranost prikupljanja podataka iz određenog područja (točke, presjeka ili male površine) cestovne prometne mreže. To područje naziva se detekcijska zona. Drugim tehnologijama kao što su pokretna osjetila i identifikacijske tehnologije nastoji se stvoriti kompletnija i točnija slika stanja u mreži, te isto iskoristiti za upravljanje te ostale ITS-servise.

2.3.2 Zahtjevi za podacima s obzirom na vrstu upravljanja

2.3.2.1 Upravljanje pojedinačnim raskrižjem

Vremenski ustaljeno upravljanje pojedinačnim raskrižjem

Vremenski ustaljeno upravljanje pojedinačnim raskrižjem podrazumijeva unaprijed definirane signalne planove i slijed izmjene signalnih planova. Tu vrst upravljanja karakterizira fiksna

duljina ciklusa i faza te fiksni broj i slijed faza signalnog plana. Signalni planovi mijenjaju se prema unaprijed utvrđenom vremenskom planu, primjerice ovisno o dobu dana, kako bi se signalni plan prilagodio promjenama prometnog opterećenja.

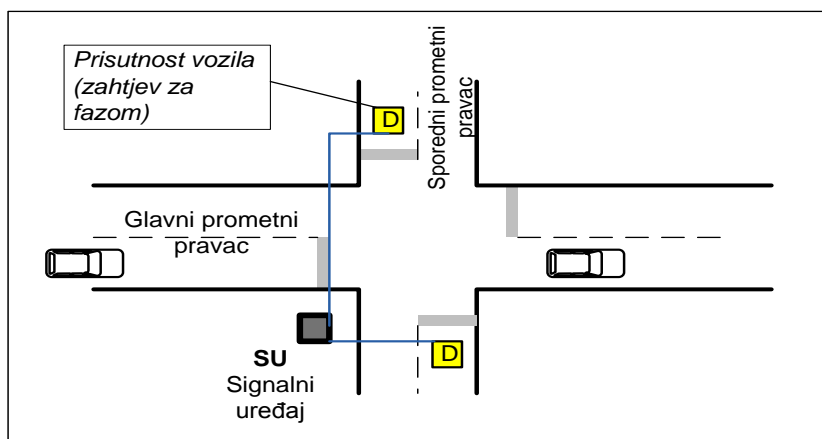
Iako upravljanje s fiksnim vremenskim planom ne podrazumijeva uporabu detektora u samom procesu upravljanja, potrebno je prikupiti podatke o prometnom opterećenju, u svrhu izradbe projekta signalnih planova. Potrebno je provesti barem brojenje u trajanju 16 sati za pojedine prilaze raskrižju, odnosno povremeno kratkotrajno brojenje tijekom definiranih skupina sati ili tijekom pojedinih sati. Vrijeme brojenja i trajanje brojenja moraju se izabrati tako da se za sve situacije koje nastupaju (vršno prometno opterećenje, srednje prometno opterećenje i slabo prometno opterećenje) dobije dovoljan broj brojčanih vrijednosti te da se može utvrditi vrijeme promjene različitih signalnih planova. Načelno, što je vrijeme brojenja prometa dulje, rezultati su kvalitetniji.

Primjena detektora pri vremenski ustaljenom upravljanju pojedinačnim raskrižjem svodi se na privremeno prikupljanje podataka o volumenu prometa na glavnom prometnom pravcu i sporednim prometnim pravcima, i to prije izradbe signalnog programa. Za tu ulogu pogodni su detektori koji se mogu premještati s jedne lokacije na drugu. Za stvaranje kvalitetnijih signalnih planova i njihova vremenskog slijeda, potrebni su mikroskopski P-O podaci (volumen prometa po svim smjerovima prometnih tokova na raskrižju). Poteškoću ovdje za većinu detektorskih tehnologija predstavlja mjerenje broja lijevih skretača i desnih skretača, ako ne postoje posebni trakovi za skretače. U tom slučaju detekcijske zone trebale bi obuhvaćati i detekcijsku zonu na prometnoj površini raskrižja, a po mogućnosti praćenja trajektorije vozila.

Upravljanje pojedinačnim raskrižjem ovisno o prometu

Trajanje signalnih pojmova pri upravljanju ovisnim o prometu je promjenjivo. Trajanje pojmova određeno je algoritmom upravljanja, a ulazne veličine su vrijednosti prometnih parametara. Time se signalni plan stalno prilagođava prometnom opterećenju. Takvo upravljanje može biti djelomično ovisno o prometu (eng. *semiactuated control*) ili potpuno ovisno o prometu (eng. *fully actuated control*). Sukladno tome detekcijske zone na kojima se prikupljanju podaci mogu se samo na nekim prilazima (primjerice samo na sporednim prilazima) ili na svim prilazima raskrižju.

Postojanje detekcijskih zona samo na sporednim prilazima pogodno je u slučaju kada je volumen prometa na sporednim prometnicama manji od 20 posto volumena na glavnoj prometnici. Primjer upravljanja u tom slučaju je da glavni smjer prometnog toka (glavni prometni pravac), koji nije pokriven detekcijskim zonama, ima stalno pravo prolaza (stalno zeleno). Sporedni smjerovi dobivaju pravo prolaza samo na zahtjev, odnosno kada se detektira vozilo na sporednoj prometnici koje zahtjeva pravo prolaza, Slika 2.6.



Slika 2.6 Primjer položaja detekcijskih zona kod upravljanja djelomično ovisnog o prometu

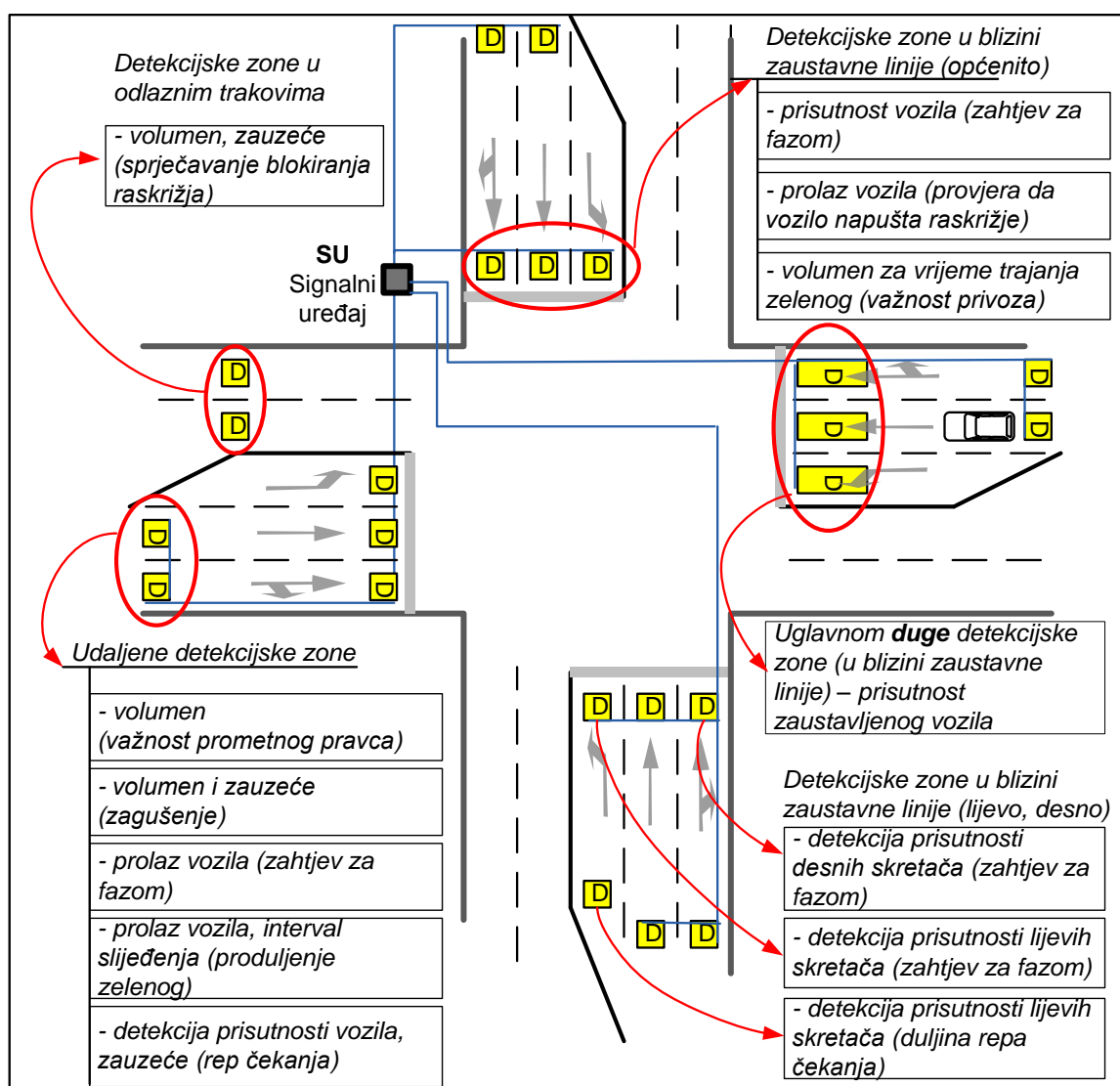
Kod upravljanja raskrižjem potpuno ovisnog o prometu detekcijske zone nalaze se na svim privozima raskrižju. Mogu postojati i u odlaznim trakovima sa raskrižja. Ovisno o vrsti upravljanja i samim značajkama raskrižja detekcijske zone mogu imati razne uloge. Odnosno na njime se mogu prikupljati različiti podaci i imati različitu ulogu u upravljanju. U Tablica 2.6 su navedeni parametri prometnog toka koji se mogu prikupljati sa detekcijskih zona, njihova moguća funkcija u upravljanju i zahtijevani položaj detekcijske zone.

Tablica 2.6 Funkcije prometnih parametara u upravljanju pojedinačnim raskrižjem i položaj detekcijskih zona

Prometni parametar	Funkcija prometnog parametra u upravljanju	Položaj detekcijske zone
detekcija vozila u prolazu, vremenska praznina (interval slijeđenja), zauzeće	pobuda za produljenje vremena propuštanja glavnoga prometnog toka	udaljenost od zaustavne linije određena je pretpostavljenom brzinom i vremenskom prazninom (intervalom slijeđenja)
volumen prometa	određivanje važnosti prometnog pravca, određivanje trajanja duljine diskretnog intervala produljenja zelenog	na mjestu slobodnog toka, dovoljno udaljeno od zaustavne linije
prisutnost vozila	najava, zahtjev za fazom sporednoga prometnog toka	ispred zaustavne linije
prisutnost vozila	sprečavanje zastoja uzrokovanog redom lijevih skretača	ispred zaustavne linije traka za skretanje lijevo, ali izvan normalnog područja zastoja; poželjna duga detekcijska zona
prisutnost, zauzeće	sprečavanje zastoja zbog blokiranja križanja konfliktnim prometnim tokom	na početku izlaznog traka s raskrižja

S obzirom na položaj (većina današnjih sustava) detekcijske zone mogu biti:

- udaljene detekcijske zone u privoznim trakovima,
- detekcijske zone u privozim trakovima u blizini zaustavne linije,
- i detekcijske zone u odlaznim trakovima u blizini raskrižja.



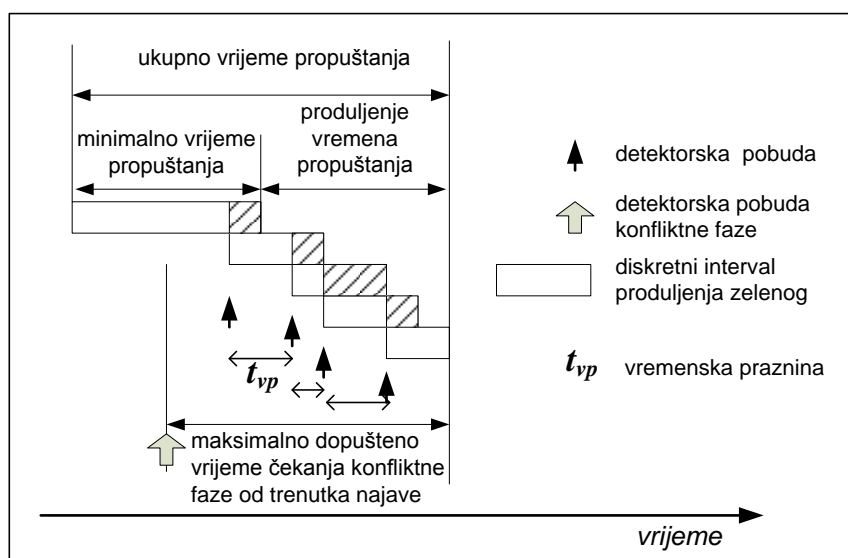
Slika 2.7 Primjer zahtijevanih prometnih parametara, njihove uloge u upravljanju i pripadnih položaja detekcijskih zona

Udaljene detekcijske zone mogu biti u funkciji određivanja važnosti prometnog pravca (podaci o volumenu), određivanje zagušenja na (volumene i zauzeće), zahtjev za fazom (prolaz vozila), produljenje zelenog tj. faze (interval slijeđenja) i detekcija da li je određeno mjesto zahvatio rep čekanja (prisutnost vozila i zauzeće). U detekcijskim zonama u privoznim trakovima u blizini zaustavne linije mogu se prikupljati podaci o prisutnosti vozila (zahtjev za fazom), prolaz vozila (provjera da li vozilo napušta raskrižje), volumen za vrijeme trajanja zelenog (važnost privoza). Ulogu također ima pozicija traka s obzirom da li je trak namijenjen za lijeve ili desne skretače. Uglavnom su detekcijske zone koje se nalaze u blizini zaustavne linije duge, kao bi se detektirala zaustavljena vozila. U detekcijskim zonama koja se nalaze u odlaznim trakovima prikupljanju se podaci o volumenu i zauzeću, kako bi se detektiralo eventualno

zagušenje i spriječilo blokiranje raskrižja. Na Slika 2.7 prikazani su mogući položaji detekcijskih zona, prometni parametri koji se mogu prikupljati i njihova uloga u upravljanju.

Kod udaljenih detekcijskih zona u privoznim trakovima tražena udaljenost od zaustavne linije također ovisi o namjeni. Za određivanje određiti važnost prometnog pravca detekcijska zona treba biti na mjestu slobodnog toka, što u urbanim sredinama znači i veliku udaljenost od zaustavne linije. Za detekciju repa čekanja, u ovom slučaju može se pomoću detekcijske zone samo ustanoviti da li je rep čekanja dostigao određeno poziciju. Ako se radio o produljenju zelenog udaljenost je određena predviđenom brzinom i pretpostavljenim intervalom slijeđenja. Udaljene detekcijske zone uglavnom su kratke.

Vrlo česta uloga detekcije vozila u udaljenoj zoni je produljenje faze (zelenog). Zahtjev za produljenjem nastaje prolaskom vozila kroz detekcijsku zonu (detektorska pobuda). Da li će se udovoljiti tom zahtjevu ovisi da li se trenutak najave (detekcije vozila) desio u odgovarajućem intervalu, koje je ograničeno minimalnim trajanjem propuštanja (minimalno zeleno) i maksimalnim vremenom propuštanja (maksimalno zeleno). Maksimalno trajanje vremena propuštanja za određenu fazu može biti određeno duljinom ciklusa i minimalnim vremenima propuštanja ostalih faza, ili je ograničeno maksimalnim dopuštenim vremenom koje protekne od početka najave konfliktne faze. Slika 2.8 prikazuje logiku produljenja vremena propuštanja na osnovi nekoliko detekcija vozila i ograničenje vremena propuštanja zbog detektorske pobude vozilom konfliktne faze.



Slika 2.8 Produljenje intervala propuštanja na osnovi detektorske pobude

Minimalno vrijeme propuštanja u relaciji je s položajem i oblikom detekcijske zone. Minimalno vrijeme propuštanja t_{zmin} treba biti barem toliko da vozila koja stoje između detekcijske zone i zaustavne linije napuste raskrižje, izraz (2.24). U slučaju da je detekcijska zona dugačaka (može se nalaziti nekoliko vozila na detekcijskoj zoni) tada i vozila sa detekcijske zone trebaju napustiti raskrižje.

$$t_{zmin} = t_{pk} + t_s \frac{d_D}{d_v} \quad (2.24)$$

gdje je: t_{zmin} – minimalno vrijeme propuštanja; t_{pk} – kašnjenje zbog pokretanja vozila (4 s); t_s – interval slijeđenja vozila (2 s); d_v – prosječna duljina vozila uvećana za razmak između vozila (6 m – 7 m); u zagrada su navedene tipične vrijednosti ; d_D – udaljenost detekcijske zone od zaustavne linije

Veličina na osnovi koje se upravlja jest vremenska praznina t_{vp} , tj. interval slijeđenja umanjen za vrijeme potrebno da vozilo napusti detekcijsku zonu. Dakle, ovdje vremenska praznina predstavlja vrijeme proteklo od završetka pobude nekog vozila do početka pobude slijednog vozila. Za potrebe odlučivanja o produljenju zelenog, postavlja se vrijednost praga vremenske praznine VP (diskretni interval produljenja zelenog). Ako pobuda nastupi prije isteka praga vremenske praznine, vrijeme propuštanja se produljuje. Prag vremenske praznine VP ovisi o udaljenosti detekcijske zone od zaustavne linije i pretpostavljene brzine vozila, izraz (2.25).

$$VP = \frac{d_D}{v} \quad (2.25)$$

gdje je: VP – prag vremenske praznine; d_D – udaljenost detekcijske zone od zaustavne linije; v – pretpostavljena brzina vozila

Produljenje zelenog treba trajati barem koliko i prag vremenske praznine. Trajanje intervala produljenja zelenog može se određivati i ovisno o volumenu prometa. Za prag vremenske praznine uzimaju se vremenski intervali trajanja od dvije sekunde do pet sekundi. Tablica 2.7 prikazuje udaljenosti detekcijske zone u ovisnosti o pretpostavljenoj brzini i vremenskoj praznini.

Tablica 2.7 Udaljenosti detekcijske zone od zaustavne linije

Pretpostavljena brzina vozila (km/h)	Udaljenost detekcijske zone od zaustavne linije	
	Vremenska praznina=2 s	Vremenska praznina =3 s
30	15 m	25 m
40	20 m	35 m
50	30 m	40 m
60	45 m	50 m
70	40 m	60 m

Kao upravljačka veličina produljenja vremena propuštanja može poslužiti i izglađeno zauzeće. U tu svrhu *sirovi* podaci o zauzeću dobiveni detektorom podvrgavaju se postupku izglađivanja. Vrijednosti iznad unaprijed određenog iznosa praga predstavljaju zahtjev za produljenjem trajanja vremena propuštanja.

Prezentirano produljenje zelenog u stvari ne stvara signalni plan već samo mijenja *split* u dozvoljenim okvirima. Stvaranje signalnog plana podrazumijeva određivanje svih varijabli

signalnog plana. Signalni planovi danas se stvaraju pomoću računalne podrške, a na osnovi vrijednosti izmjerenih parametara prometnog toka. Izračunati signalni planovi, broj im ovisi o izvedbi sustava, aktiviraju se ovisno o zadanom vremenskom planu (primjerice dobu dana) ili ovisno o prometu (primjerice detektorima izmjerenom volumenu prometa po smjerovima). Ako se signalni plan izračunava na osnovi stvarnovremenskih prometnih podataka, radi se o upravljanju s adaptivnim signalnim planovima. Jedan od poznatijih sustava računalne podrške upravljanju pojedinačnim raskrižjem jest MOVA (*Microprocessor Optimized Vehicle Actuation*). Omogućava upravljanje signaliziranim raskrižjem, koje ima do 8 faza, a razvijen je u Velikoj Britaniji. Algoritam pomoću detektorskih podataka prati i uspoređuje dvije situacije, na osnovi kojih se određuje odnos trajanja zelenog prema trajanju ciklusa (*split*). Prva se odnosi na praćenje praznjenja reda nakon isteka minimalnog vremena propuštanja, odnosno provjeru odgovara li prometni tok napuštanja raskrižja intenzitetu toka zasićenja. Druga situacija obuhvaća promatranje ostalih faza, odnosno uspoređuje se vrijeme produljenja zelenog s kašnjenjem ostalih faza. Za svaki trak prometnice na prilazu raskrižju potrebne su barem dvije detekcijske zone (udaljenija i bliža detekcijska zona).

2.3.2.2 Upravljanje na potezu

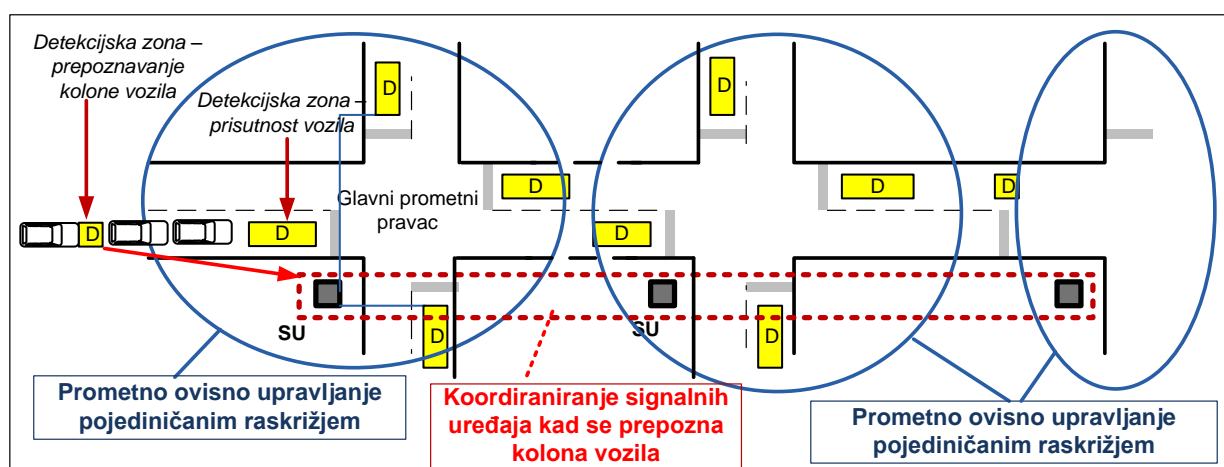
Pri upravljanju na potezu, poznatijem pod nazivom zeleni val, prepoznaju se glavni prometni pravci. Logika upravljanja koncipirana je tako da se prometnom toku na potezu omogući što bolja progresija. U uvjetima normalnoga nezagušenoga prometnog toka, sustav upravljanja nastoji prepoznati kolonu vozila i omogućiti koloni što brže napredovanje duž poteza, uz što manje zaustavljanje. Nastoji se maksimizirati kapacitet na potezu te minimizirati kašnjenje na potezu. Time se povećava ukupna propusnost sustava i smanjuje ukupno vrijeme putovanja te postižu i drugi ciljevi, primjerice, smanjenje ukupne emisije ispušnih plinova, smanjenje buke itd. Pristup upravljanja na potezu zahtijeva koordinaciju upravljanja signaliziranih raskrižja koja pripadaju potezu. U tu svrhu moraju se postaviti sljedeće vremenske varijable: duljina ciklusa, split i offset. Duljina ciklusa ista je za sva raskrižja koja pripadaju potezu. Split može varirati od raskrižja do raskrižja, ovisno o opterećenjima faza. Vrijednost *offseta* izračunava se posebno za svako raskrižje, uzimajući u obzir geometriju prometnog sustava i lokalna opterećenja. Signalni plan na potezu za sva raskrižja koja pripadaju potezu, a koji uključuje navedene vremenske varijable može se izračunavati *offline* računalnom obradom i *online* računalnom obradom.

Projektiranje signalnih planova raskrižja za upravljanje na potezu podrazumijeva razradu prostorno-vremenskog dijagrama na osnovi geometrije prometnog sustava: širina prometnica, broj trakova, međusobna udaljenost raskrižja. Prije razrade prostorno-vremenskog dijagrama potrebno je prikupiti podatke o značajkama prometnog toka: volumen prometnog toka po definiranim smjerovima, ograničenje brzine i pretpostavljene brzine za određene prometne situacije, varijacije prometnog toka. Za projektiranje signalnih planova na osnovi prikupljenih podataka također postoji računalna podrška primjerice MAXBAND, MULTIBAND, PASSER.

Upravljanje na potezu ovisno o prometu, podrazumijeva signalni plan kojemu se vremenske varijable mijenjaju ovisno o stvarnoj situaciji. Jedan od poznatijih sustava upravljanja na potezu je DARTS (*Dynamic Artery Responsive Traffic System*). DARTS sustav sastoji se od niza signalnih uređaja i svi prilazi raskrižju mogu biti pokriveni detekcijskim zonama. Svaki

signalni uređaj upravlja pojedinim raskrižjem kao pojedinačnim, i to prometno ovisno. Međutim, kada se prepozna kolona vozila, signalni uređaj dotičnog raskrižja šalje informaciju susjednom slijednom signalnom uređaju o dolazećoj koloni, u svrhu koordinacije signalnog plana, kako bi se koloni omogućila progresija duž poteza, Slika 2.9.

Ovakva vrsta upravljanja pogotovo je pogodna na prometnom području gdje postoji velik odnos volumena prometa na potezu i volumena prometa sporednih prometnica, te gdje je udaljenost križanja relativno velika (nekoliko stotina metara). Na sporednim prometnicama i trakovima za skretanje lijevo na kojima se pretpostavlja mali volumen prometa detektira se prisutnost vozila, odnosno najava vozila. Odnosno, potrebne su duge detekcijske zone neposredno uz zaustavnu liniju. Na samom potezu potrebno je detektirati kolonu vozila, kojoj se omogućuje progresija, stoga detekcijska zona mora biti dovoljno udaljena od zaustavne linije.



Slika 2.9 Primjer položaja detekcijskih zona – upravljanje na potezu

2.3.2.3 Upravljanje mrežom

Osnovne značajke upravljanja mrežom

Upravljanje mrežom može se podijeliti na upravljanje mrežom s obzirom na topologiju prometnog sustava i s obzirom na veličinu područja upravljanja. Upravljanje mrežom s obzirom na topologiju znači da se topologija signaliziranih raskrižja povezanih linkovima može promatrati kao zatvorena ili kao otvorena mreža. Prilikom izračuna signalnog plana za zatvorenu mrežu sva raskrižja moraju se uzeti u obzir. Zatvorena topologija mreže postavlja uvjete na offset, što znači da suma iznosa *offseta* po svakoj zatvorenoj petlji u mreži mora biti jednaka cjelobrojnoj sumi duljine ciklusa. Problem optimizacije u takvoj mreži je izuzetno složen. U otvorenoj mreži problem je olakšan jer nema ograničenja na offset. Tipičan primjer otvorene mreže je skup koji sadrži raskrižja nekoliko glavnih poteza i sporednih prometnica. Ovdje postoje uvjeti na duljinu ciklusa. Duljina ciklusa određena je duljinom ciklusa na

raskrižju odabranih poteza. Pri tome ne moraju biti sva raskrižja biti potpuno prometno ovisno upravljana.

Pojam široko područnog upravljanja odnosi se na upravljanje svim ili većinom signalnih uređaja na određenom području. Ako je područje veliko provodi se dekompozicija na zone, ovisno o prometnim značajkama. U zonama mogu biti primijenjene različite vrste upravljanja. Ako se radi o prometno ovisnom upravljanju operativni signalni plan može se:

- odabrati ovisno o dobu dana
- odabrati iz baze signalnih programa na osnovi dobivenih podataka o prometnoj situaciji priskrbljenih detektorima
- generirati stvarnovremenski u ovisnosti o detektorskim podacima.

Signalni planovi za mrežu izrađuju se uz pomoć programske podrške. Izračun vremenskih varijabli signalnog plana mreže može biti zasnovan na progresiji ili optimizaciji. Progresijske tehnike često uključuju dekompoziciju zatvorene mreže na skup otvorenih mreža. Optimizacijske tehnike nastoje minimizirati ili maksimizirati neku ciljnu veličinu. Jedan od najraširenijih sustava programske podrške (optimizacijskih programa) ove namjene u Europi i SAD je TRANSYT (*The Traffic Network Study Tool*). TRANSYT optimizacijski program na osnovi ulaznih parametara minimizira linearnu kombinaciju pokazatelja efikasnosti, npr. ponderiranih kašnjenja i zaustavljanja ili npr. ukupne operativne troškove. TRANSYT model predviđa disperziju kolone vozila, u ovisnosti o vremensko-prostornim koordinatama. Analitički model predviđa intenzitet prometnog toka na sljedećem slijednom raskrižju ako je poznat intenzitet na prethodnom i vrijeme putovanja na linku. Potrebna je i pretpostavka prometne situacije glede frikcije na linkovima, odnosno utjecaj parkiranja, pješačkog prometa, geometrije prometnice na disperziju kolone vozila, što se u analitičkom izrazu predstavlja faktorom disperzije kolone. TRANSYT ima modularnu strukturu, a osnovni moduli su:

- obrada ulaznih podataka
- simulacijski model
- optimizacijski model
- izlazna obrada.

Time je omogućena nadogradnja i unapređivanje modela bez mijenjanja cijelog programa. Zadnja verzija nosi oznaku 7F. Simulacijski model, upotrebljavajući makroskopski model prometnog toka, izračunava vrijednost ciljnih veličina za sustav prometnica i raskrižja. Optimizacijski model postupno mijenja vrijednosti vremenskih varijabli tj. *splita* i *offseta* s ciljem poboljšanja.

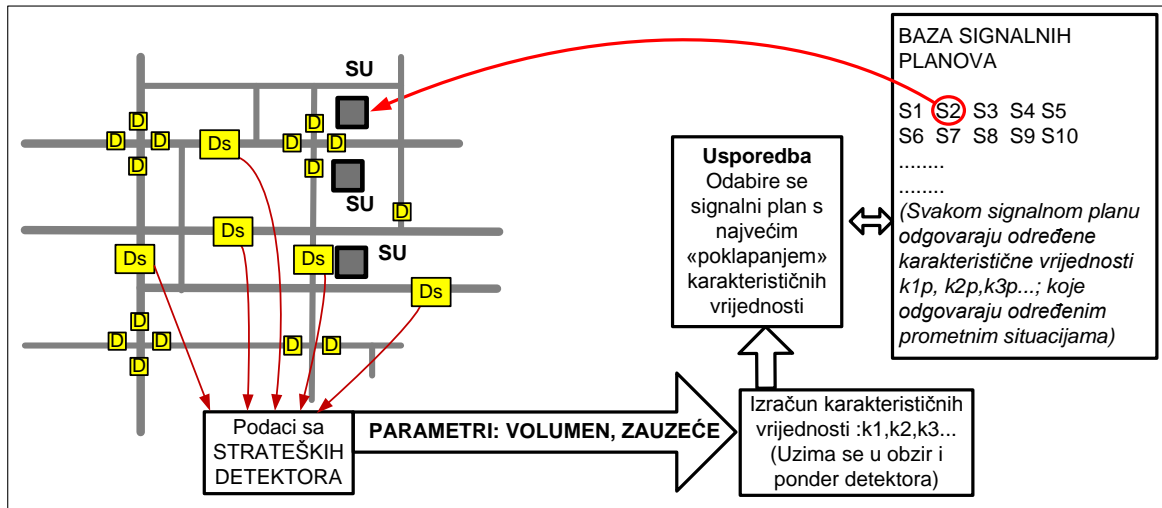
Stvarnovremeno upravljanje mrežom

Upravljanje zasnovano na odabiru signalnih planova

Tipičan primjer upravljanja zasnovanog na odabiru signalnih planova je **UTCS** (Urban Traffic Control System) sustav online upravljanja koji FHWA razvija još od 1970. godine. Sustavom upravlja centralno prometno računalo. Signalni planovi za različite prometne situacije spremljeni su u bazi signalnih planova. UTCS može raditi u više operativnih režima. U normalnom režimu rada koji odgovara uvjetima nezagušenoga prometnog toka primjenjuje se zonsko upravljanje, a signalni planovi za pojedine zone odabiru se iz baze signalnih programa.

U uvjetima zagušenja dijela mreže primjenjuje se CIC algoritam (*Critical Intersection Algoritam*). U pojedinim zonama u normalnom režimu, promjena signalnog plana može nastupiti: na osnovi prometne situacije odnosno detektorskih podataka, dobu dana ili eventualno izravnim naredbama operatera.

Svakom signalnom planu u bazi signalnih planova UTCS-a odgovara neka definirana prometna situacija. Kao operativni odabrat će se onaj plan u kojemu je odabrana prometna situacija najbližnja trenutačnoj. Trenutačni podaci o volumenu i zauzeću prikupljaju se tzv. strategijskim detektorima. Strategijski detektori nisu nužno na svakom raskrižju i svakom prilazu raskrižju. No što je veći broj detektora, kvalitetnija je slika prometne situacije, a time i odluka o izboru signalnog plana. Sirovi podaci dobiveni strategijskim detektorima se izgladuju unutar definiranih vremenskih intervala. Nadalje, svakom detektoru se dodjeljuje ponder koji upućuje na važnost prometnih parametara te prometne točke glede odluke. Komparacijska funkcija f_{cj} , izraz (2.26), uspoređuje trenutačnu realnu prometnu situaciju s unaprijed definiranim situacijama. Odabire se onaj signalni plan za koji je vrijednost komparacijske funkcije minimalna. Slika 2.10 prikazuje takav princip upravljanja.



Slika 2.10 Princip upravljanja mrežom zasnovan na odabiru signalnih planova

$$f_{cj} = \sum_{i=1}^{n_s} w_i (V_i + KO_i - R_{ji}) \quad (2.26)$$

gdje je:

f_{cj} – komparacijska funkcija

n_s – broj detektora u zoni

w_i – ponder detektora

K – ponder zauzeća

m – ukupan broj signalnih planova

j – broj signalnog plana u bazi signalnih planova

V_i – vrijednost izgladenog volumena za i -ti detektor

O_i – vrijednost izgladenog zauzeća za i -ti detektor

R_{ji} – spremljeni volumen prometa i izgladeno

zauzeće povezano s planom j , i detektorom i

Kako ne bi često i nepotrebno nastupale promjene signalnog programa, zbog promjene vrijednosti detektorskih podataka, utvrđuju se granične vrijednosti praga razlike ponderirane

komparacijske funkcije tekućega signalnog plana i komparacijske funkcije na osnovi novih vrijednosti volumena i zauzeća.

Na položaje detekcijskih zona (strateški detektori) u prometnoj mreži, s kojih se prikupljaju podaci za aktuaciju pojedinoga signalnog plana postavljaju se sljedeći zahtjevi:

- detekcijske zone ne bi smjele biti na područjima gdje vozila često mijenjaju prometni trak;
- mjerna mjesta za mjerenje volumena trebaju se nalaziti na području slobodnog protoka, izvan zaustavnih područja na prilazima raskrižju; trebaju se po mogućnosti nalaziti na rubovima promatranog područja i izvan područja pod neposrednim utjecajem svjetlosnih signala, i trebaju biti postavljena pokraj većih izvora prometa;
- detekcijske zone za utvrđivanje zauzeća trebala bi se nalaziti na dijelu ceste ugroženom od zastoja ali izvan područja na kojem se za vrijeme zatvaranja prilaza vozila moraju zaustaviti.

Kada je dio mreže u zagušenju, primjenjuje se CIC (*Critical Intersection Control*) algoritam, koji prilagođava razdiobu zelenog na kritičnim raskrižjima. Ovdje je bitno dobiti podatke koji su uvezi sa repovima čekanja. CIC zahtijeva detektore na svim prilazima raskrižju. Te detektore može se nazvati taktičkim detektorima, s time da neki od njih mogu poslužiti i kao strategijski. Ulazni podaci, koje prikupljaju detektori, za CIC mogu biti: zahtjevi pojedinih faza izraženo u broju vozila po ciklusu, brzina pražnjenja reda, izgladeni volumen i zauzeće. Trajanje zelenog se dodjeljuje proporcionalno zahtjevima faze, s time da na manje opterećenim fazama ne može biti kraće od minimalno dopuštenog vremena propuštanja. Razdioba zelenog izračunava se u svakom ciklusu, a trajanje ciklusa i offset zadržavaju se fiksnima u svrhu koordinacije sustava.

Adaptivno upravljanje mrežom

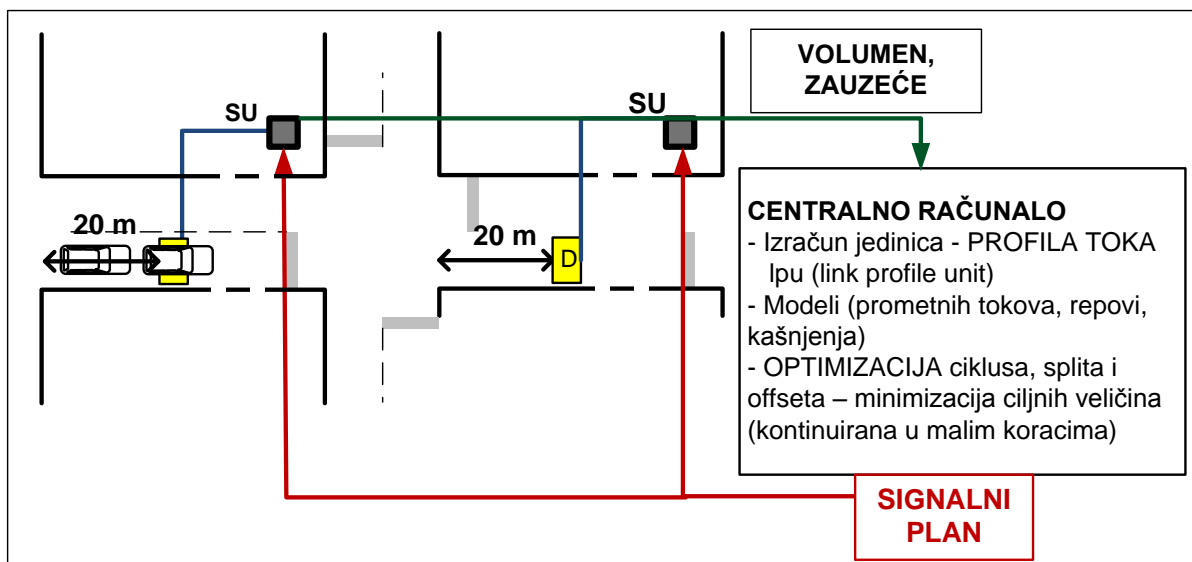
UTCS (*Urban Traffic Control System*) prve generacije karakterizira odabir signalnog plana iz baze signalnih planova. Unaprijeđeni sustav druge generacije zasniva se na prognoziranju prometnog opterećenja, primjerice FORCAST model. Treću generaciju karakteriziraju adaptivni signalni planovi, odnosno izravno (*online*) stvaranje signalnih planova prilagođenih stvarnoj prometnoj situaciji. U svijetu postoji veći broj takvih sustava, no najrašireniji su britanski SCOOT i australski SCATS. Zajedničko svima, s obzirom na praćenje prometa, je veći broj potrebnih detekcijskih područja po zoni, u odnosu na prethodnu generaciju. U daljnjem tekstu dane su opće značajke sustava s adaptivnim signalnim planovima. Izvedba pojedinih sustava razlikuje se od grada do grada. Jedan od razloga različitosti je postojeće stanje automatizacije koje se nastoji maksimalno iskoristiti, kako bi se smanjili troškovi. Nadalje postojeći sustavi se stalno nadograđuju i svakih nekoliko godina izlaze nove poboljšane verzije sa većim mogućnostima.

SCOOT

SCOOT (*Split, Cycle, and Offset Optimization Technique*) sustav koji automatski reagira na promjene prometne situacije razvio je TRRL (*The Transport and Road Research Laboratory*). SCOOT je razvijen prvenstveno za gustu urbanu mrežu prometnica. Glavni dijelovi sustava su: prometno računalo s lokalnom mrežom i terminalima, komunikacijska oprema i terenska oprema koja sadrži signalne uređaje i detektore. Prometno računalo s terenskom opremom najčešće je povezano je upredenim paricama. Prometna mreža kojom upravlja SCOOT

podijeljena je u zone, s određenim brojem čvorova tj. signaliziranih raskrižja i pješačkih prijelaza. Načelno, detekcijske zone su potrebne na svakom linku. Detekcijske zone su postavljene 15-20 metara nakon raskrižja (odlaz sa raskrižja), u smjeru prometnog toka prema sljedećem susjednom raskrižju, odnosno na početku linka u smjeru prometnog toka, Slika 2.11. Glavna karakteristika SCOOT-a glede izračuna vremenskih varijabli signalnog plana je kontinuirana optimizacija ciljnih veličina u malim vremenskim koracima. Nakon svakog koraka provjerava se da li je dolazi do poboljšanja ciljnih veličina.

Detektorima se prikupljaju podaci o volumenu i zauzeću. Postoje verzije SCOOT sustava koje mogu koristiti detekcijske zone koje su u blizini zaustavne linije. Podaci sa detektora konvertiraju se u tzv. jedinice profila toka (*lpu-link profile unit*). Za svaki link, svake četiri sekunde, na osnovi jedinica profila toka, SCOOT izračunava profil prometnog toka. Za dobivanje profila toka na sljednom raskrižju koristi se TRANSYT disperzijski model. Ako na dionici između križanja postoje značajna generacija ili nestajanje prometa, potrebne su dodatne detekcijske zone.



Slika 2.11 Detekcijske zone kod sustava SCOOT

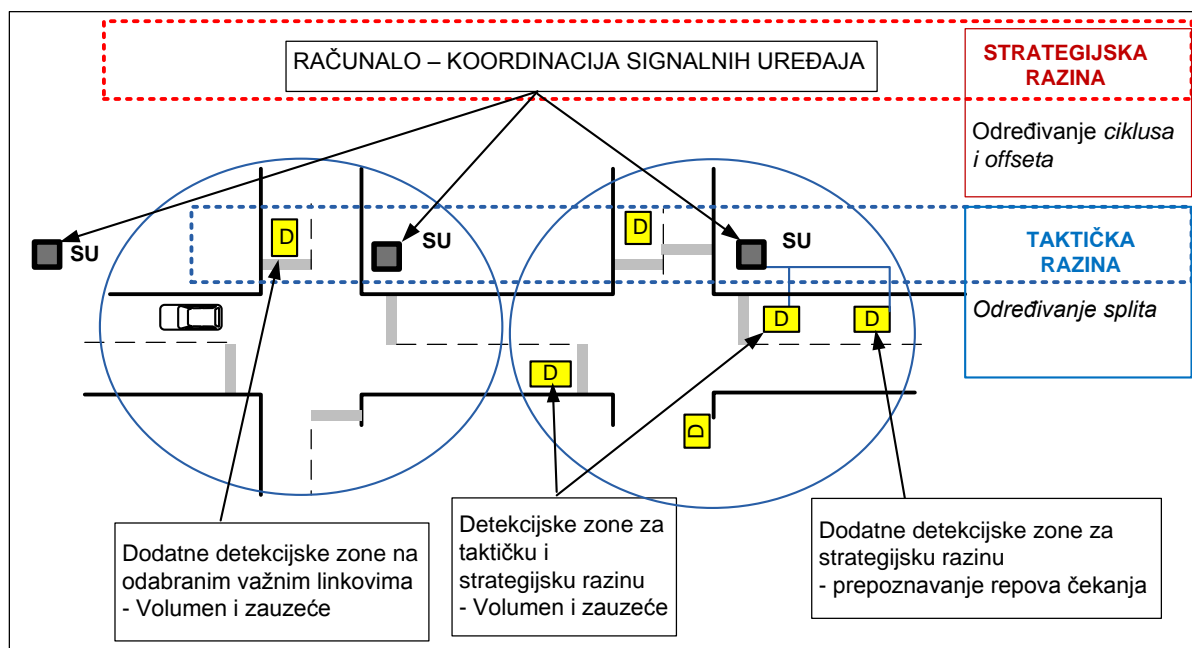
SCOOT načelno ima tri optimizacijske procedure, i to za split, offset i duljinu ciklusa. Svaka procedura izračunava utjecaj malih promjena vremenskih varijabli signalnog plana na prometno stanje u zoni. Ciljna veličina optimizacijskog procesa je najčešće suma ponderiranih kašnjenja i zaustavljanja, a izračunava se za svaki link. Kako bi se ciljna veličina minimizirala, SCOOT u malim koracima 4-16 sekundi, ovisno o proceduri i prometnim uvjetima, mijenja vrijednosti vremenskih varijabli, tj. *splita*, *offseta* i duljine *ciklusa*. Za uvjete zagušenja predviđeni su posebni modovi rada, npr. offset zagušenja ili logika spremanja redova. Ovdje se ciljna veličina zamjenjuje sprečavanjem nastajanja zastoja. Offsetom zagušenja nastoji se spriječiti blokiranje raskrižja, a logikom spremanja redova iskoristiti linkove s većim kapacitetom za spremanje redova.

SCATS

SCATS (*Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic Control System*) razvijen od RTA (*Road and Traffic Authority*) sustav je koji prilagođuje vremenske varijable signalnog plana, s ciljem

minimiziranja sveukupnih zaustavljanja i kašnjenja kada su prometni zahtjevi manji od kapaciteta sustava. Kada su zahtjevi veći pokušava se maksimizirati propusnost raskrižja i kontrolirati repove čekanja. SCATS sustav ima dvije razine upravljanja: strategijsku i taktičku. Strategijska razina postavlja granice unutar kojih funkcionira upravljanje taktičke razine.

Na strategijskoj razini računalo koordinira rad signalnih uređaja te određuje duljinu ciklusa i offset. Računalo može upravljati s više stotina podsustava ili skupina, a svaki podsustav se sastoji od desetak signalnih skupina (uređaji signaliziranog raskrižja). Variranjem duljine ciklusa u podsustavu, stupanj zasićenja (omjer volumena i kapaciteta) nastoji se održati ispod vrijednosti 0,9. Kao mjerodavna, uzima se vrijednost stupnja zasićenja na traku s najvećim prometnim opterećenjem. Koordinacija offsetom se postiže tako da se plan offseta bira iz baze planova offseta na osnovi podatka o volumenu prometnog toka po smjerovima. Taktička razina upravljanja koju fizički čine signalni uređaji i koja funkcionira pod nadzorom strategijske razine omogućuje lokalnu fleksibilnost kako bi se upravljanje prilagodilo varijacijama prometnih opterećenja na svakom raskrižju. Lokalna fleksibilnost podrazumijeva produljenja, skraćivanja ili izostavljanja faza na pojedinim raskrižjima.



Slika 2.12 Detekcijske zone kod sustava SCATS

Kod SCATS-a detektori, tj. detekcijske zone, smješteni su neposredno ispred zaustavne linije, i to u svakom traku prometnice. Mjeri se volumen i zauzeće detekcijske zone, i to za vrijeme prava prolaza dotične faze. Volumen i zauzeće oslikavaju stupanj zasićenja. Isti detektori mogu služiti za strategijsku i taktičku razinu. Dodatni detektori strategijske razine postavljaju se na glavnim linkovima te na određenoj udaljenosti od zaustavne linije kako bi se prepoznali repovi, Slika 2.12. Također na linkovima i mjestima koji su identificirani kao prometno važni postavljaju se dodatni strateški detektori.

2.3.3 Dodjela prioriteta

Dodjela prioriteta vozilima podrazumijeva posebno uvažavanje specifičnih vozila od strane telematičkih sustava upravljanja, u smislu da se takvim vozilima nastoji omogućiti što lakši (brži) prolazak prometnom mrežom. Načelno dodjela prioriteta može biti bezuvjetna ili uvjetna. Kod bezuvjetne dodjele prioriteta prolazak prioritetnom vozilu se omogućava ne vodeći posebno računa o utjecaju prioriteta na ostali prometni tok. Kod uvjetnog davanja prioriteta nastoji da taj utjecaj bude što manji. Davanje prava prolaza prioritetnim vozilima na signaliziranom raskrižju znači mijenjanje vremenskih varijabli signalnog plana na osnovi zahtjeva o prioritetu. Zahvati u signalnom planu mogu biti:

- produljenje faze – prioritetno vozilo se detektira u prilaznom toku u blizini raskrižja;
- raniji početak (ili ubacivanje) faze – za vrijeme trajanja crvenog ubacuje se kratka faza s pravom prolaska za prioritetno vozilo;
- ispuštanje faze – nekoliko faza može biti preskočeno ako je prioritetno vozilo detektirano u “jakom” toku iz smjera iz kojeg dolazi;
- kompenzacija – kako bi se raščistili repovi ostalih ne prioritetnih faza nastalih produljenjem prioritetne faze, produljuje im se trajanje zelenog u odsutnosti zahtjeva javnog prijevoza.

Tri su bitne skupine vozila s obzirom na vrstu kod kojih je davanje prioriteta od velike važnosti: vozila žurnih službi, javni prijevoz i veliko gabaritna vozila. Vozila žurnih službi (hitna pomoć, policija, vatrogasci) potrebno je prepoznati u smislu pripadnosti i da li je na zadatku hitne intervencije tj. potrebno je identificirati vozilo. Zahtjev na mjesto identifikacije ovdje nije toliko strog (nije važna pogreška reda veličine nekoliko desetaka metara prilikom određivanja pozicije takvog vozila), ali je nužna pouzdanost dostave poruke o zahtjevu za prioritetom. Žurnim službama cilj je dati bezuvjetni prioritet, a nastali repovi ne prioritetnih faza se raščišćavaju u procesu kompenzacije. Vozilima javnog prijevoza i veliko gabaritnim vozilima daje se uvjetni prioritet tj. pravo prolaza ako su ispunjeni određeni uvjeti.

Što se tiče sredstava javnog prijevoza, jednim vozilom prevozi se više desetaka putnika, dok u prosjeku na jedno osobno vozilo dolazi 1,2 putnika. Od ukupnog vremena trajanja puta, npr. autobusa, na kašnjenje zbog čekanja na signaliziranom raskrižju otpada 10-20% vremena. Davanjem prioriteta vozilima javnog prijevoza znatno se smanjuje vrijeme kašnjenja po osobi u prometnom sustavu. Na taj način prebacuje se težište s maksimiziranja protoka vozila na maksimiziranje protoka putnika. S aspekta detekcije, trakovi rezervirani za javni prijevoz omogućuju jednostavnu detekciju prioritetnih vozila, zato što bi se samo prioritetna vozila trebala nalaziti u njima. Najveći problem predstavlja nedisciplina vozača osobnih vozila. Na prometnicama gdje nema posebnih trakova za javni prijevoz, prioritetna vozila potrebno je koristiti identifikacijske tehnologije.

Vozilo javnog prijevoza potrebno je identificirati u na točno određenom mjestu (detekcijskoj zoni). Naime detekcijska zona treba biti dovoljno udaljena od raskrižja kako bi se identifikacija obavila „na vrijeme“ i vozilo propustilo kroz raskrižje bez čekanja. U obzir glede mjesta i trenutka identifikacije vozila javnog prijevoza, uzima se položaj stajališta (ispred ili iza križanja). Identifikacija „na vrijeme“ pruža i mogućnost smanjenja smetnji vozila javnog prijevoza na ostali promet. S ciljem njihova smanjenja poželjna je i odjava takvog vozila.

Opravdanost primjene upravljanja signaliziranim raskrižjem davanjem prioriteta i stupnja prioriteta javnom prijevozu ovisi o dnevnom i vršnom volumenu javnog prijevoza kojemu će se davati prednost, o volumenu javnog prijevoza na koji će davanje prioriteta nepovoljno utjecati i o utjecaju na ostali promet, uključujući pješački. Strategija davanja prioriteta implementirana je u niz gradova diljem svijeta. Primijenjeno davanje prioriteta javnom prijevozu u Sjevernoj Americi i Europi pokazuje moguće smanjenje kašnjenja autobusa na raskrižju za oko 40-67%, a ukupno vrijeme putovanja autobusa za oko 10%.

Davanje prioriteta teretnim vozilima (vozilima velikih gabarita) u tranzitnom prometu kroz urbanu sredinu smanjuje broj njihovih zaustavljanja i pokretanja vozila, a time i utjecaj na okoliš. Naime najveće smetnje prometnom toku, najveću potrošnju i emisiju ispušnih plinova takva vozila imaju upravo prilikom starta iz stajanja. Vozila velikih gabarita nije nužno identificirati, već je potrebno klasificirati po dimenzijama, broju osovina i masi. S obzirom lokaciju detekcijske zone odnosno mjesto gdje će se ustanoviti da dotično vozilo pripada veliko gabaritnim može se reći da vrijedi isti zahtjevi kao i za mjesto detekcijske zone za davanje prioriteta javnom prijevozu. U Tablica 2.8 nalazi se podjela prioritetnih vozila s obzirom na funkciju i osnovne karakteristike glede zahtijevanih podataka.

Tablica 2.8 Podjela prioritetnih vozila i osnovne karakteristike zahtijevanih podataka

Klasifikacija po funkciji	Prioritet	Zahtijevana vrsta podataka	Zahtjevi na podatke
Vozila žurnih službi	bezuvjetan	identifikacija	- velika pouzdanost
Vozila javnog prijevoza	uvjetan	identifikacija	- bitna točnost pozicije identificiranog vozila
Vozila velikih gabarita (teretna vozila)	uvjetan	klasifikacija po - dimenzijama - broju osovina - masi	- bitna točnost pozicije detektiranog vozila

Identificirati vozilo znači utvrditi točno o kojem vozilu se radi (ne samo pripadnost skupini vozila po funkciji) i upravo tom vozilu dati prioritet. Primjerice kod vozila žurnih službi mora se prepoznati da je vozilo na zadatku, a kod javnog prijevoza broj linije. Danas postoji više tehnologija koje omogućavaju identifikaciju vozila u prometnom toku:

- Uporaba posebnih (ili nadograđenih) detektora prometnog toka koji generiraju karakteristični odziv na prioritetno vozilo, pri tome je na prioritetnom vozilu montirana dodatna oprema.
- Odašiljanje bežičnih signala (svjetlosni, infracrveni, zvučni, radio) predajnikom montiranim na vozilo i prijem odgovarajućim prijemnikom.
- Radio komunikacijom kratkog dometa, gdje se veza ostvaruje između vozila i upravljačke infrastrukture (signalni uređaj).
- Radiokomunikacijom sa upravljačkim centrom uz poznati položaj vozila na mreži. Opremanje vozila sa modulima za komunikaciju (radiokomunikacija) i navigaciju tj. pozicioniranje vozila.
- Računalni vid tj. prepoznavanje vozila obradom slike.

Glede detekcije vozila velikih gabarita gdje identifikacija nije nužna za klasifikaciju su na raspolaganju detektori prometnog toka.

2.4 Pokazatelji kvalitete usluge i učinkovitosti

2.4.1 Prometni parametri kao pokazatelji kvalitete usluge

Kvaliteta usluge (eng. *LOS – Level of Service*) definirana je kao kvalitativna mjera koja odražava percepciju korisnika glede kvalitete usluge, komfora i praktičnosti (sukladno sa *FHWA - Highway Capacity Manual, HCM*). Promjenu vrijednosti određene skupine prometnih parametara sudionici u prometu izravno doživljavaju kao promjenu kvalitete usluge. Tim parametrima može se izraziti kvaliteta usluge koju nudi prometni sustav. U takve pokazatelje kvalitete usluge mogu se ubrojiti: trenutačna brzina, srednja vremenska brzina, srednja prostorna brzina, gustoća, zauzeće, kašnjenja i zaustavljanja.

Kako brzina pokazuje promjenu položaja prometnih entiteta u vremenu, *prirodni* je pokazatelj stupnja kvalitete odvijanja prometa. S makroskopskog gledišta pokazatelj je učinkovitosti upravljačkog sustava. S mikroskopskoga gledišta, odnosno brzina pojedinog vozila, izravno je povezana sa zadovoljstvom korisnika prometnog sustava, odnosno njegovim dojmom stupnja usluge. Srednja vremenska brzina upotrebljava se kao primarni pokazatelj kvalitete u dijelu prometnog sustava, ponajprije zbog toga što se ulazni podaci (trenutačne brzine na presjeku) mogu lako izmjeriti.

Prema FHWA, kvaliteta usluge za autoceste s više trakova, s obzirom na parametar gustoće podijeljena je u sedam stupnjeva, s oznakama od A do F, Tablica 2.9.

Tablica 2.9 Kvaliteta usluge za autoceste s više trakova

Stupanj usluge	Vrsta toka	Gustoća (vozila/traku-milji)	Opis stupnja usluge
A	slobodan tok	0-11	Individualni vozači neometani su od ostalih sudionika prometa. Velika sloboda izbora brzine i manevriranja u prometnom toku.
B	stabilan tok	12-18	Sloboda izbora brzine još uvijek je velika, ali postoji malo ograničenje slobode manevriranja u prometnom toku. Prisutnost ostalih sudionika počinje utjecati na ponašanje pojedinih vozača.
C	stabilan tok	19-26	Ponašanje vozača znatno je uvjetovano interakcijom s ostalim sudionicima prometnog toka. Izbor brzine ograničen je prisutnošću ostalih vozila. Manevriranje zahtijeva povećanu budnost i oprez vozača.
D	stabilan tok visoke gustoće	26-35	Brzina i sloboda manevriranja su znatno ograničeni. Vozači doživljavaju taj stupanj kao neugodnu i zamornu vožnju.

E	nestabilan zasićeni tok	35-45	Sloboda manevriranja je ekstremno ograničena. Kako je protok u blizini kapaciteta, brzina je mala, ali relativno jednolična.
F	zagušenje	45-	Formiraju se repovi.

Bitan pokazatelj kvalitete odvijanja prometa su vremenski parametri tj. kašnjenja, koja pokazuju trajanje pojedinih situacija koje se događaju u realnom prometnom toku. Mogu se izražavati apsolutno u vremenskim jedinicama ili relativno kao odnos potrebnog vremena u realnim uvjetima i teorijskog vremena koje bi bilo potrebno u uvjetima slobodnog toka. Kašnjenje izravno utječe na zadovoljstvo sudionika u prometu, stoga je *prirodan* pokazatelj kvalitete usluge. S obzirom na kašnjenje, na raskrižju FHWA postavlja šest stupnjeva usluge, Tablica 2.10.

Tablica 2.10 Kvaliteta usluge za signalizirano raskrižje

Stupanj usluge	Kašnjenje zaustavljenog vozila (sekunde)	Opis stupnja usluge
A	-5	Vrlo malo kašnjenje. Većina vozila se ne zaustavlja.
B	6-15	Dobra propusnost. Mali broj vozila se zaustavlja.
C	16-25	Još uvijek dobar dio vozila prolazi bez zaustavljanja.
D	26-40	Većina vozila čeka neko vrijeme u redu.
E	41-60	Doživljava se kao prag tolerancije od vozača.
F	60-	Neprihvatljivo za većinu vozača.

Parametri koji su uskoj vezi s kašnjenjima su: broj zaustavljanja na prilazu raskrižju i duljina repa čekanja. Prvi parametar je broj koji pokazuje koliko se puta vozilo zaustavi prilikom prilaza raskrižju. To je također pokazatelj kvalitete odvijanja prometa na signaliziranom raskrižju. Drugi parametar također je broj, a pokazuje koliko se vozila nalazi u jednom traku u repu čekanja. Kada se opisuje glavni tok prometnice, duljina repa čekanja odnosi se na broj vozila koja stoje ili se kreću u koloni i gdje je kretanje svakog vozila uvjetovano kretanjem vodećeg vozila.

2.4.2 Prometni parametri kao pokazatelji učinkovitosti

Uloga pokazatelja učinkovitosti

Ciljevi primjene ITS-a su bolje iskorištenje postojećih kapaciteta, povećanje sigurnosti, smanjenje učestalosti i obujma zagušenja, smanjenje potrošnje goriva i emisije ispušnih plinova i dr. Da bi se ostvarenje ciljeva moglo vrednovati, potrebno je raspolagati veličinama koje će biti u relaciji s ciljem i kvantitativno opisivati stupanj postizanja cilja odnosno stupanj učinkovitosti. Te kvantitativne veličine koje su pokazatelj ponašanja prometnog sustava, nazivaju se pokazatelji učinkovitosti (eng. MOE – *Measure of Effectiveness*). Osim što

prilikom definiranja moraju zadovoljiti uvjete: postojanje relacije s ciljem, mogućnost usporedbe s referentnom veličinom koja opisuje najpovoljniji ili najnepovoljniji slučaj, od ključne je važnosti mogućnost njihovog mjerenja ili izračuna iz drugih podataka. Definiranje skupa pokazatelja učinkovitosti uvelike ovisi namjeni i naravno o mogućnosti mjerenja.

Pokazatelji učinkovitosti na mikrolokacijama

Pokazatelji učinkovitosti na mikrolokacijama (segment prometnice, raskrižje) u uskoj su vezi sa mjerljivim parametrima prometnog toka. Uobičajeni MOE za evaluaciju procesa na upravljanoj signaliziranoj raskrižju su:

- kapacitet,
- odnos volumena i kapaciteta,
- kašnjenje na raskrižju i red na raskrižju (duljina reda ili broj vozila u redu).

Kapacitet je maksimalni protok vozila kroz definirani presjek prometnice u jednom satu pod danim uvjetima. Odnos volumen/kapacitet ili stupanj zasićenja prezentira koliko je dio kapaciteta iskorišten. Odnos volumen/kapacitet ispod 0,85 ukazuje da je adekvatan kapacitet dostupan, kod iznosa 1 prometni tok je nestabilan, dok kod iznosa većeg od 1 očekuju se da je potrebno nekoliko ciklusa da vozilo napusti raskrižje.

U pokazatelje učinkovitosti također pripadaju: koeficijent energetske učinkovitosti, statistički podaci o incidentnim situacijama (npr. broj nesreća, broj nezgoda i slično), zatim emisija stakleničkih i ostalih štetnih plinova. Takvi pokazatelji za mjerljive veličine prometnog toka vezani su posredno i razvijeni su modeli koji kao dio ulaznih podataka koriste vrijednosti parametara prometnog toka (primjerice: volumen, zauzeće, brzina). Primjerice model CAL3QHC izračunava emisiju i koncentraciju ispušnih plinova na raskrižju i u blizini raskrižja. Ulazni podaci za taj model su: brzina, volumen, duljina redova, kašnjenja, ali i signalni plan raskrižja.

Pokazatelji stanja prometa na mreži

Definiranje pokazatelja učinkovitosti na većem području znatno je veći problem. U današnjem prometnom sustavu nedvojbeno najveće probleme stvaraju zagušenja. Svaki korisnik prometnog sustava svjestan je kada nastane zagušenje i prepoznaje takve uvjete kao znatno smanjenje brzine, čekanja u redovima, čestog zaustavljanja i ponovnog kretanja. Unatoč tome jedinstvena definicija zagušenja ne postoji, niti univerzalni pokazatelj zagušenja. Definiranje MOE za prometnu mrežu odnosno pokazatelja zagušenja i način mjerenja (ili utvrđivanja pokazatelja) ovisi o tome kako će se zagušenje definirati i za što služi. Pokazatelji zagušenja koji se danas koriste u članicama državama OECD-a¹ (eng. *Organisation for Economic Cooperation and Development*) i ECMT² (eng. *European Conference of Ministers of Transport*) podijeljeni su u sedam grupa. U nastavku su prikazani samo izdvojeni pokazatelji koji su relaciji sa parametrima prometnih tokova, odnosno koji se mogu dobiti ili za koje postoji potencijal dobivanja obradom veličina izmjerenih telematičkim sučeljima i koji se mogu numerički izraziti.

¹ Forum od 30 država

² Tijelo koje obuhvaća 44 država članica

Dodatno vrijeme kašnjenja (ExD) ili izgubljeno putno vrijeme (eng. *lost travel time*) kakav naziv koristi TfL (eng. *Transport for London*) definira se kao prosječno povećanje vremena putovanja u uvjetima zagušenja u odnosu na prosječno vrijeme putovanja kada mreža nije zagušena, odnosno kao razlika ukupnog vremena putovanja u uvjetima zagušenja TR_{obs} i ukupnog vremena putovanja TR_{ref} kad je mreža bez zagušenja. Pripadna kašnjenja se mogu odrediti korištenjem sljedećih izraza:

$$ExD = TR_{obs} - TR_{ref} \quad (2.27)$$

$$TR_{obs} = \frac{\sum_{i \in N} f_i \cdot tt_i}{\sum_{i \in N} f_i \cdot l_i} \quad (2.28)$$

$$TR_{ref} = \frac{\sum_{i \in N} f_i \cdot tt_i^{ref}}{\sum_{i \in N} f_i \cdot l_i} \quad (2.29)$$

gdje je f_i tok na linku i , tt_i je vrijeme putovanja na linku i , tt_i^{ref} je referentno vrijeme putovanja na linku i , l_i je duljina linka i , a N je broj linkova na mreži ili dijelu promatrane mreže. Pojam nezagušene mreže obično se odnosi na uvjete kada je promet rijedak. U urbanim područjima tipična vrijednost bila bi 1,5 minuta po kilometru.

Indeks vremena putovanja u zagušenju (TTI) definira se kao omjer vremena putovanja u uvjetima zagušenja i vremena putovanja u uvjetima slobodnog toka.

$$TTI = \frac{\sum_{i \in N} VKT_i \cdot TTI_i}{\sum_{i \in N} VKT_i} = \frac{\sum_{i \in N} VKT_i \cdot \frac{tt_i}{tt_i^{ref}}}{\sum_{i \in N} VKT_i} \quad (2.30)$$

gdje je TTI indeks vremena putovanja u zagušenju, TTI_i indeks vremena putovanja na i -tom linku, tt_i je vrijeme putovanja na linku i , tt_i^{ref} je referentno vrijeme putovanja na linku te VKT_i iznos vozilo kilometara prevaljenih na linku i , odnosno:

$$VKT_T = \sum_{i \in N} f_i^T \cdot l_i \quad (2.31)$$

gdje je f_i^T tok, odnosno volumen prometa na linku i u periodu vremena T , l_i je duljinu linka i u kilometrima, N broj linkova na mreži, odnosno promatranom dijelu mreže.

Relativno smanjenje brzine (eng. *relative speed reduction*) ili koeficijent usporenja definira se za pojedine linkove i to kao relativno smanjenje brzine u odnosu na referentnu brzinu, a izražava se u postocima:

$$RSR_i = \frac{S_i^{ref} - S_i^{obs}}{S_i^{ref}} [\%] \quad (2.32)$$

gdje je RSR_i koeficijent usporenja na i -tom linku, S_i^{ref} referentna brzina, S_i^{obs} izmjerena brzina vozila na i -tom linku za vrijeme promatranog perioda (primjerice u uvjetima zagušenja).

Referentna brzina se može različito definirati. Referentnu brzinu može predstavljati brzina u uvjetima slobodnog toka, no i uvjeti slobodnog toka mogu se različito tumačiti. Tako se primjerice za referentnu brzinu može uzeti ograničenje brzine na prometnici, brzina izmjerena po noći, 85% brzine izmjerene po noći i dr.

Ponderirani prosječni relativni pad brzine (eng. *weighted average relative speed reduction*) definira se za promatrani dio mreže, a dobiva se na osnovi podataka o relativnom smanjenju brzine na linkovima:

$$RSR_{WA} = \frac{\sum_{i \in N} \sum_{k \in I} l_{i,k} \frac{S_{i,k}^{ref} - S_{i,k}}{S_{i,k}^{ref}}}{\sum_{i \in N} \sum_{k \in I} l_{i,k}} \quad (2.33)$$

gdje je RSR_{WA} ponderirani prosječni relativni koeficijent usporenja za dio promatrane mreže, $S_{i,k}^{ref}$ je referentna brzina k -tog vozila na linku i , $S_{i,k}$ je izmjerena brzina k -tog vozila na linku, $l_{i,k}$ je udaljenost na linku i prijeđena vozilom k .

Relativni pad brzine na mreži (eng. *relative network level speed reduction indicator*) je izražavanje relativnog smanjenja brzine za dio mreže preko mrežne brzine (*network speed*). Mrežna brzina predstavlja ukupnu duljinu putovanja podijeljenu s ukupnim vremenom provedenim na mreži:

$$RSR_L = \frac{(S_{NET})^{ref} - (S_{NET})^{OBS}}{(S_{NET})^{ref}} = \frac{\frac{\sum_{i \in N} \sum_{k \in I} l_{i,k}}{\sum_{i \in N} \sum_{k \in I} tt_{i,k}^{ref}} - \frac{\sum_{i \in N} \sum_{k \in I} l_{i,k}}{\sum_{i \in N} \sum_{k \in I} tt_{i,k}}}{\frac{\sum_{i \in N} \sum_{k \in I} l_{i,k}}{\sum_{i \in N} \sum_{k \in I} tt_{i,k}^{ref}}} \quad (2.34)$$

gdje je RSR_L relativni pad brzine na mreži, $(S_{NET})^{ref}$ referentna brzina na mreži, $(S_{NET})^{OBS}$ izmjerena ili procijenjena brzina na mreži.

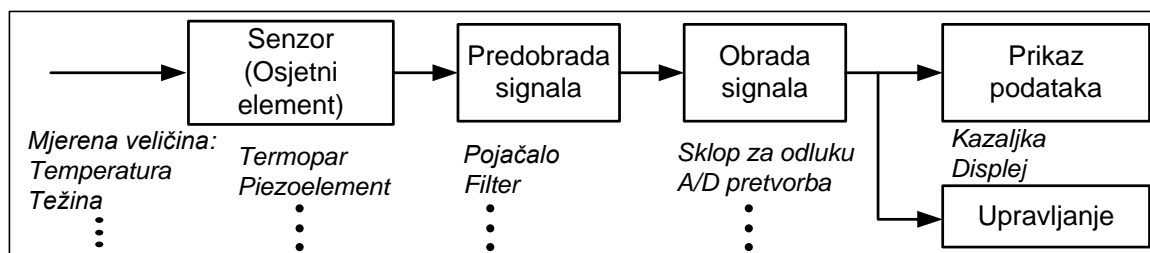
Za prezentaciju zagušenja na područjima postoje razne inačice posljednja dva navedena pokazatelja. Za pokazatelje zagušenja područja u literaturi rabe se i nazivi indikator zagušenja područja (eng. *congestion indicator for a zone*) i indeks zagušenja (eng. *congestion index*). Navedeni pokazatelji koriste se i za procjenu utjecaja emisija, povezuju se s perspektivom korisnika i dr. U praktičnoj upotrebi treba prilagoditi i odabrati pokazatelje čija relevantnost i vrijednosti su pogodni za određenu primjenu te da se mogu izračunati temeljem dostupnih podataka.

3. SENZORI

Senzori i pretvarači obavljaju funkciju transformacije u telematičkom sučelju. Uloga senzora je detektiranje ili mjerenje neke fizikalne veličine u prostoru, odnosno generiranje odziva na pobudu u obliku električnog signala na osnovu kojeg se može zaključiti o kojoj se fizikalnoj veličini radi i koji je iznos te veličine. Kod detektora prometnog toka senzorski element može biti osjetljiv na različite promjene fizikalnih veličina koje prisustvo ili prolaz vozila uzrokuje. Primjerice ako vozilo lokalno mijenja magnetsko polje zemlje, mijenja temperaturu (zrači u infracrvenom području) ili motor proizvodi zvukove odgovarajući senzor će te promjene pretvoriti u eklektični signal na osnovu kojeg će se dobiti podatak da je vozilo prošlo. Senzori su načelno dio sustava za prikupljanje podataka ili dio sustava za upravljanje.

U telematičkim sučeljima pretvarači također imaju ulogu transformacije, s time da im je zadatak pretvaranja jedne vrste energije u drugu. Za razliku od senzora koji pretvaraju bilo kakvu pobudu ili vrstu energije u električki signal, pretvarači pretvaraju bilo koju vrstu energije u bilo koju drugu vrstu energije. Primjer pretvarača je zvučnik koji pretvara električki signal u mehaničku energiju koja se zatim u vidu zvučnih valova odašilje u prostor. Takva sučelja načelno imaju ulogu u komunikaciji sa sudionicima u prometu. Fizikalni principi rada senzora i pretvarača su isti, a osnovna izvedba može im biti jednaka. Na primjer element koji pretvara zvučne valove u električni signal, a u funkciji je mjerenja pojave je zvučni senzor, a u funkciji komunikacije ima ulogu elektroakustičkog pretvarača tj. mikrofona. Kako su senzori u funkciji detekcije i mjerenja efikasnost pretvorbe energije nije posebno bitna, međutim izuzetno je bitna mogućnost uspostavljanja (definiranja) veze i odnosa između pobude i odziva senzora. Za senzore važna je linearnost odziva.

Termini koji se još rabe za senzor su: osjetilo, mjerni pretvornik, detektor. U literaturi se pod tim terminima često može podrazumijevati element koji obavlja osnovnu pretvorbu neke fizikalne veličine u električki signal ili čitav mjerni lanac koji kao izlaz ima gotovi podatak (informaciju) koji se može prezentirati ili na osnovu kojeg se može upravljati. Ovdje će se pod senzorom u užem smislu smatrati osjetni element koji je u neposrednom kontaktu sa fizikalnom veličinom (ulaz je fizikalna veličina), a izlaz je električki signal. Senzor u širem smislu bio bi mjerni podsustav, čiji izlaz je prikaz podatka ili mjerene veličine. U tom slučaju termin senzor prometnog toka odgovarao bi uvriježenom terminu detektor prometa. Senzor u užem smislu je prvi element u mjernom lancu. Mjerni lanac sadrži nekoliko procesa, Slika 3.1. Nakon osnovne pretvorbe u električki signal slijedi predobrada signala koja prilagođava signal za daljnju obradu (npr. filtriranje i pojačavanje signala). Zatim slijedi sama obrada signala koja uključuje donošenje zaključaka o čemu se radi i/ili daje iznos mjerene veličine na osnovi signala. Vrlo često obrada signala prije same odluke uključuje i konverziju analognog u digitalni signal (A/D pretvorba).



Slika 3.1 Mjerni lanac

Glavna podjela senzora je na aktivne i pasivne. Pasivni senzori direktno generiraju električki signal kao odziv na vanjsku pobudu i nije potreban poseban izvor napajanja. Aktivni senzori zahtijevaju vanjsko napajanje odnosno uzбудni signal koji senzor modulira ovisno o djelovanju vanjske pobude na sam senzor. Senzor također može biti dio aktivnog sustava u kojemu se predajnikom odašilje uzбудni signal u prostor. Senzor tada prima povratni signal nastao interakcijom uzbudnog signala i mjerene veličine, a sam senzor koji daje izlazni signal je pasivni ili aktivni.

Senzori se mogu opisati nizom značajki, koje ujedno ukazuju na moguće podjele senzora:

- materijal izrade (poluvodič, vodič, kristal, izolator, plin, organski)
- veličinu koja izaziva odziv (magnetski, električki, toplinski, akustički, elektromagnetski, mehanički pomak i dr.).
- mjerenu veličinu (prisutnost vozila, prisutnost pješaka, detektor koncentracije plina, senzor težine i dr.).
- način pretvorbe tj. fenomen pretvorbe (termoelektrični, fotoelektrički, termoelastični i dr.)
- primjenu (promet, medicina, meteorologija, industrija i dr.)
- tehničkim značajkama senzora (karakteristike senzora, točnost, stabilnost i dr.).

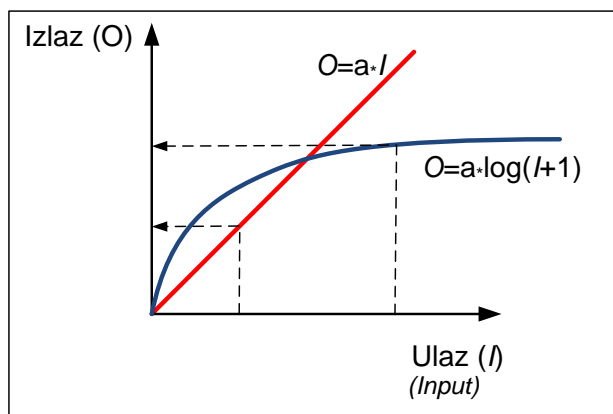
Za struke koje se ne bave razvojem senzora važne su mogućnosti primjene gotovih proizvoda te izražavanje zahtjeva na senzore. Senzori se mogu opisati nizom tehničkih značajki gdje se senzor promatra kao “crna kutija” bez ulaženja u fizikalni princip pretvorbe. Odnosno promatraju se samo odnosi ulaza i izlaza senzora u različitim uvjetima. Ipak poznavanje osnovnih principa pretvorbe korisno je, jer se određeni zaključci u upotrebljivosti i mogućnostima mogu izvesti iz tih osnovnih principa rada. Primjerice, glavni zahtjev na senzore je da budu selektivno osjetljivi, odnosno da detektiraju ili mjere samo veličinu od interesa. Poznavanjem osnovnih principa pretvorbe senzora i uvjeta u kojima će raditi mogu se izvući zaključci o upotrebljivosti i mogućim smetnjama.

3.1 Statičke karakteristike senzora

Idealna statička karakteristika

Idealna ili teoretska relacija koja opisuje ovisnost izlaza o ulaznoj pobudi naziva se idealna statička karakteristika. Takvu idealnu statičku karakteristiku opisivala bi matematička funkcija $O=f(I)$, gdje je O izlazni električki signal, a I je ulazna veličina u obliku fizikalne pobude.

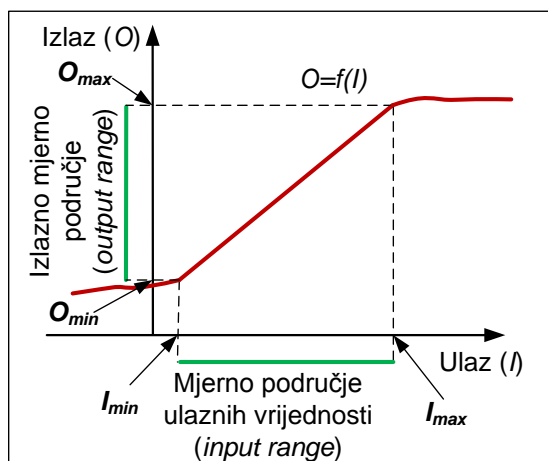
Najpoželjnija je linearna statička karakteristika. U realnom slučaju idealna statička karakteristika pokušava se aproksimirati odgovarajućom matematičkom funkcijom (primjerice logaritamskom, eksponencijalnom, polinomom i dr.). Slika 3.2 prikazuje linearnu i logaritamsku idealnu statičku karakteristiku. Karakteristika također može biti sastavljena od više dijelova, od kojih se svaki pokušava opisati odgovarajućom aproksimacijom. Idealna statička karakteristika također se može prezentirati tablicom ili grafom.



Slika 3.2 Primjeri idealnih statičkih karakteristika

Mjerno područje

Mogućnosti realnih senzora glede reagiranja na određeni iznos ulazne veličine ovise o konstrukciji senzora i inherentnim karakteristikama. Ukoliko je pobuda (ulazna veličina) prevelika ili preslaba realni senzor neće reagirati na pobudu ili će davati nesuvisle izlaze. Realni senzori mogu raditi samo u određenom mjernom području vrijednosti (*range*), za koje je ustanovljeno da posjeduje prihvatljivu korelaciju između ulaza i izlaza. Mjerno područje ulaznih vrijednosti (*input range*) određeno je minimalnom I_{min} i maksimalnom I_{max} vrijednosti ulaza za koje se na izlazu dobivaju suvisle vrijednosti izlaza. Područje ulaznih vrijednosti je od I_{min} do I_{max} . Izlazno mjerno područje (*output range*) određeno je minimalnom O_{min} i O_{max} maksimalnom vrijednosti izlaznih veličina koje su rezultat minimalne i maksimalne vrijednosti na ulazu, Slika 3.3.



Slika 3.3 Ulazno i izlazno mjerno područje

Algebarska razlika između maksimalne ulazne i minimalne ulazne vrijednosti naziva se ulazni mjerni opseg *FSI* (*span*; *input full scale*); $FSI = I_{max} - I_{min}$. Izlazni mjerni opseg algebarska je razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti izlazne veličine $FSO = O_{max} - O_{min}$.

Ako na primjer senzor može mjeriti temperaturu od -50°C do 150°C , a izlaz se kreće u granicama od 2 mV do 16 mV:

- Mjerno područje ulaznih vrijednosti (*input range*): -50°C do 150°C
- Mjerno područje izlaznih vrijednosti (*output range*): 2 mV do 16 mV
- Ulazni mjerni opseg (*input span*): $I_{max} - I_{min} = 200^{\circ}\text{C}$
- Izlazni mjerni opseg (*output span*): $O_{max} - O_{min} = 14\text{ mV}$

Osjetljivost

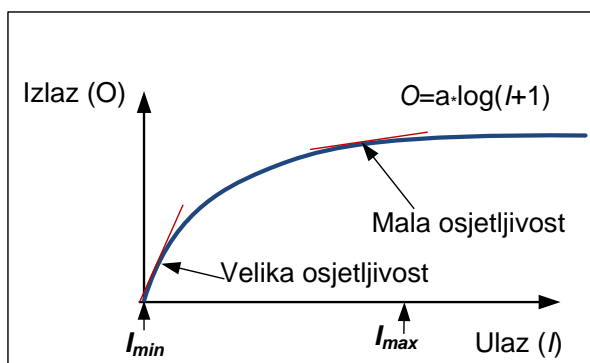
Osjetljivost senzora (*sensitivity*) opisuje kakve su promjene izlazne veličine s obzirom na promjenu ulaza. Odnosno osjetljivost s opisuje kako se mijenja nagib tangente statičke karakteristike, (3.1). Visoka osjetljivost bi značila da male promjene ulazne veličine uzrokuju velike promjene izlazne veličine.

$$s = \frac{dO(I)}{dI} \quad (3.1)$$

$$O = c + kI \quad s = \frac{dO}{dI} = k \quad (3.2)$$

$$O = \ln(I + 1) \quad s = \frac{1}{I + 1} \quad (3.3)$$

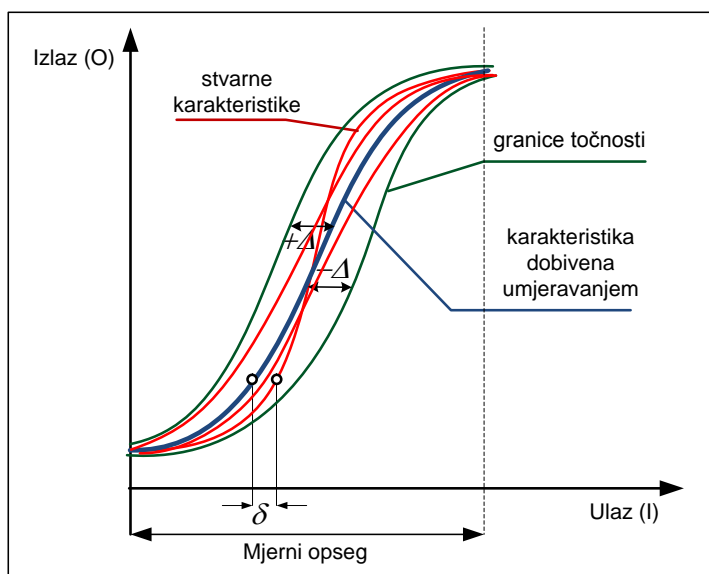
Za linearnu statičku karakteristiku osjetljivost je konstanta, tj. u cijelom mjernom području osjetljivost se ne mijenja, izraz (3.2). Za statičku karakteristiku koja je prikazana logaritamskom funkcijom osjetljivost pada sa porastom iznosa ulazne veličine, izraz (3.3). Za ulazne vrijednosti blizu donje granice mjernog područja osjetljivost je velika, dok je za ulazne vrijednosti blizu gornje granice mjernog područja osjetljivost mala, Slika 3.4.



Slika 3.4 Logaritamska statička karakteristika: područje male i velike osjetljivosti

Točnost

Točnost je stupanj podudarnosti između vrijednosti izmjerenih veličina i stvarnih vrijednosti ulaznih veličina. Temeljni pokazatelj točnosti je pogreška tj. razlika između stvarne i izmjerene vrijednosti, a nastaje zbog devijacije stvarne statičke karakteristike senzora u odnosu na idealnu karakteristiku. Pretpostavimo da smo za neki senzor napravili dva mjerenja i ustanovili dvije točke (A,B) i statičku karakteristiku aproksimirano pravcem, plava linija Slika 3.5. Da je stvarno senzor idealan (statička karakteristika odgovara plavom pravcu) na izlazu bi se pokazala vrijednost y . Međutim realna karakteristika nije pravac nego odgovara crvenoj liniji na slici. U tom slučaju ukoliko je ulazna veličina iznosa x na izlazu senzora će se prikazati vrijednost y' sukladno realnoj karakteristici. Međutim kako je pretpostavljena idealna karakteristika (pravac), zaključit će se da je ulazna veličina iznosa x' . Razlika te dvije veličine je pogreška $\delta = x - x'$. Ovdje se može postaviti pitanje zašto se senzor ne bi umjerio prema takvoj realnoj karakteristici tako da pokazuje točne vrijednosti. Međutim za istu vrstu senzora može postojati veliki broj vrlo sličnih, ali ipak nešto različitih karakteristika. Razlike u karakteristikama nastaju uslijed nesavršenosti materijala, procesa proizvodnje, dozvoljenih tolerancija prilikom izrade i dr.



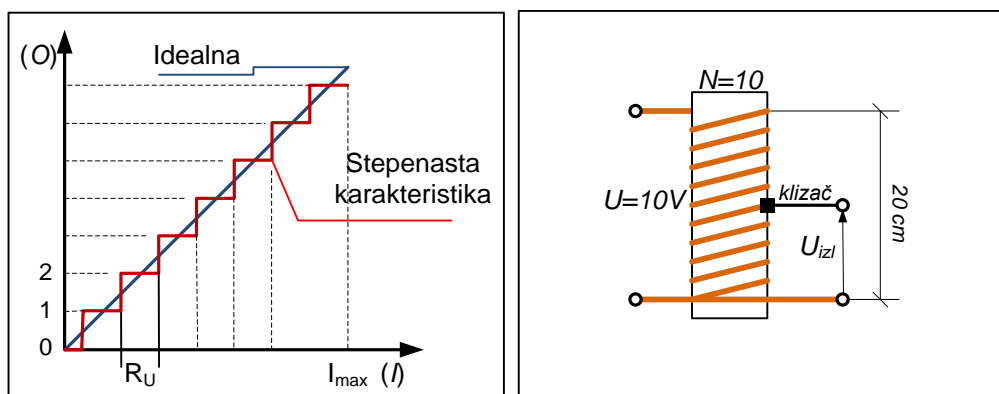
Slika 3.6 Statička karakteristika dobivena umjeravanjem

Prijenosne značajke

Na točnost senzora ima utjecaj niz prijenosnih značajki (razlučivost, nelinearnost, histereza, ponovljivost, zasićenje i zona neosjetljivosti). Proizvođači u nekim slučajevima posebno deklariraju prijenosne značajke i pogreške koje izazivaju, dok se u drugim slučajevima deklarira samo ukupna pogreška (pojas pogreške) kao rezultat svih utjecaja.

Razlučivost

Najmanja promjena ulazne veličine koju senzor može osjetiti (razlučiti) naziva se razlučivost. Takvi senzori imaju stepenastu karakteristiku, Slika 3.7 a). Za određeno područje ulaznih vrijednosti na izlazu se dobiva samo jedna vrijednost. Razlučivost se može izraziti u veličini koraka mjerene veličine R_U . Unutar tog koraka vrijednost izlaza se ne mijenja. Nadalje može se izraziti u postocima mjernog opsega $R_{UFSI} = (R_U / FSI) \cdot 100$, a kod digitalnih senzora u broju bita kodne riječi.

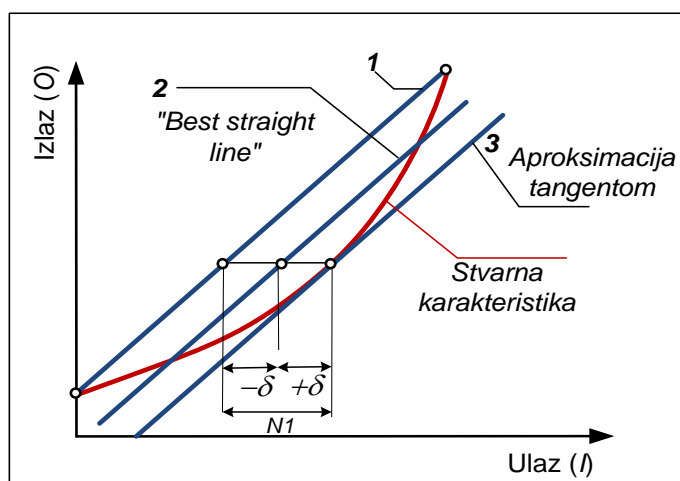


Slika 3.7 a) Razlučivost – stepenasta karakteristika b) Primjer senzora sa razlučivosti

Slika 3.7 b) prikazuje poteciometarski senzor položaja. Ukupna duljina namota je 20 cm, a broj zavoja koji su jednako udaljeni je 10. Napon na izlazu ovisi o položaju klizača. Napon na namotu je U_0 je 10 V, tako da je pad napona na svakom zavoju 1 V. Razlučivost izražena u koraku ulazne veličine $R_{Uil}=2$ cm, u koraku izlazne veličine $R_{Uizl}=1$ V, a razlučivost u postocima ulaznog raspona $R_{UFSI}=10\%$.

Nelinearnost

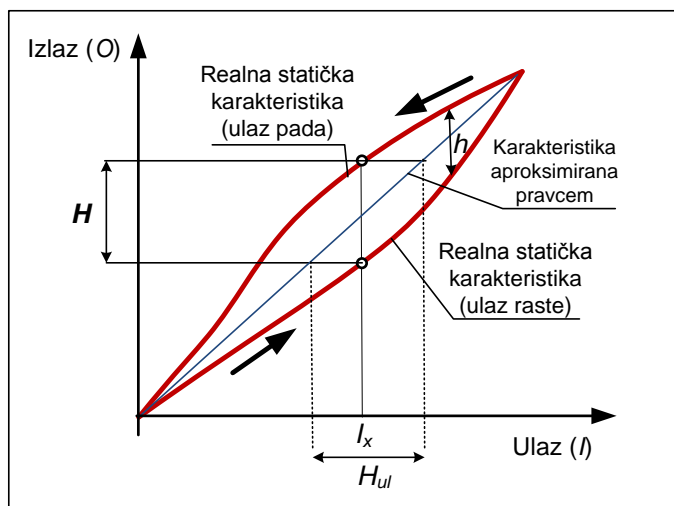
Nelinearnost odnosno pogreška nelinearnosti specificira se za senzora čija se stvarna karakteristika aproksimira pravcem. Pod tim pojmom podrazumijeva se maksimalno odstupanje stvarne karakteristike od pravca kojim se karakteristika aproksimira. Nelinearnost se može izraziti u pogrešci ulazne veličine, izlazne veličine, u postocima ulaznog ili izlaznog raspona. Aproksimacije pravcem mogu se izvesti na razne načine. Najjednostavnije je provlačenje pravca kroz krajnje točke, s time da rezultira najvećom nelinearnosti, pravac 1 Slika 3.8. Pogreška nelinearnosti za pravac 1 označena je na slici sa $N1$. Karakteristika se može se aproksimirati tangentom na stvarnu karakteristiku, pravac 3 na slici. Primjerice ako je bitno točno mjeriti područje u okolini neke točke, tangenta se povlači upravo u toj točki i dira stvarnu karakteristiku (npr. bitno je da termometar mjeri točno temperature samo u području oko 10°C). Također se može uzeti pravac koji je jednako udaljen od dva navedena pravca (*best straight line*), pravac 2 na slici.



Slika 3.8 Pogreška zbog nelinearnosti

Histereza

Krivulja koja prezentira karakteristiku nekog senzora može imati jedan oblik ako ulazna veličina raste, a drugi oblik ako ulazna veličina pada. Ako realna karakteristika ovisi o smjeru (rast ili pad) mjerene veličine tada je statička karakteristika takvog senzora petlja histereze. Za istu vrijednost mjerene veličine (ulaza) dobivaju se različiti izlazi, ovisno o tome da li mjerena veličina raste ili pada, slika . Zbog postojanja histereze iznos izlazne veličine ovisi o iznosu ulazne veličine, ali i o povijesti. Maksimalna razlika u izlaznoj veličini zbog histereze na slici označena je sa H . Sa H_{ul} označena je pogreška u ulaznoj veličini zbog histereze ako bi se za idealnu karakteristiku koristila aproksimacija pravcem. Uzrok histereze su strukturne promjene u materijalima uslijed djelovanja ulazne veličine.



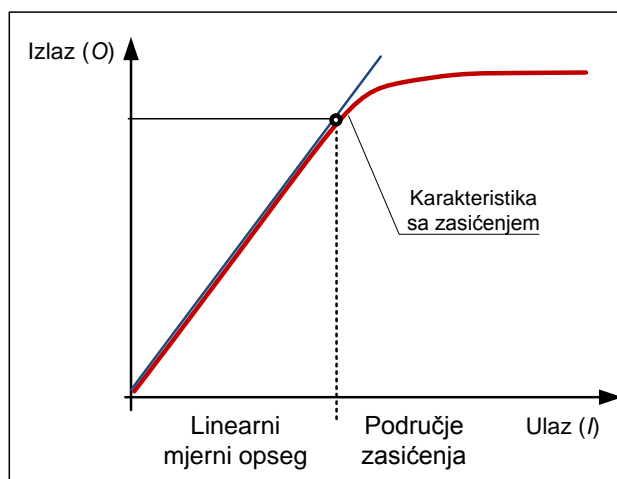
Slika 3.9 Statička karakteristika sa histerezom

Ponovljivost

Ponovljivost je svojstvo senzora da daje iste odzive na istu pobudu u nizu uzastopnih mjerenja. Međutim zbog utjecaja koji se ne mogu predvidjeti ili nisu uzeti u obzir dešava se da senzor daje različite iznose na izlazu za iste iznose na ulazu. Eksperimentalno mjerenje kojim se utvrđuje pogreška zbog ponovljivosti (neponovljivosti) uvijek se odvija samo u smjeru povećanja ulazne veličine ili samo u smjeru smanjenja ulazne veličine. Može se izraziti u maksimalnoj pogrešci ulazne veličine Δ_P , ili najčešće u postocima ulaznog mjernog opsega $\Delta_{PR} = (\Delta_P / FSI) \cdot 100$. Kod histereze uzroci pogrešaka su svojstva samog materijala, a kod ponovljivosti (neponovljivosti) uzroci su stohastičke prirode (termički šum, deformacije materijala, nepoznati utjecaj okoline i dr.).

Zasićenje

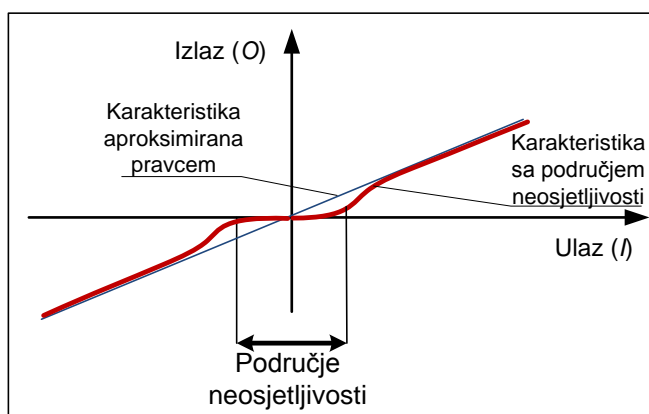
Ukoliko povećanje pobude (ulaza) na senzoru na izlazu uzrokuje vrlo mali ili nikakav porast signala senzor se nalazi u zasićenju. Slika 3.10 prikazuje statičku karakteristiku sa područjem zasićenja. Zasićenje se obično određuje gornju granicu mjernog područja, a uzrokovano je svojstvima materijala od kojeg se izrađuje senzor i konstruktivnim značajkama.



Slika 3.10 Karakteristika sa područjem zasićenja

Područje neosjetljivosti

Za razliku od zasićenja koje se nalazi na kraju mjernog područja, područje neosjetljivosti nalazi se negdje unutar mjernog područja. U području neosjetljivosti osjetljivost senzora je nula, odnosno nema promjene pobude (ulaza) ne izazivaju promjenu izlaza, Slika 3.11.



Slika 3.11 Karakteristika sa područjem neosjetljivosti

3.2 Dinamičke karakteristike senzora

Dinamičke karakteristike opisuju ponašanje senzora u ovisnosti o vremenski promjenjivom ulazu. Izlaz idealnog senzora savršeno bi pratio vremenski promjenjiv ulaz. Međutim, najčešće odziv senzora ne prati savršeno vjerno promjenjivu ulaznu veličinu, odnosno odziv (izlaz) kasni za pobudom (ulazom). Ako su promjene ulazne veličine brže od reagiranja senzora dolazi do pogrešaka, pogreške zbog dinamike. Kod prikupljanja podataka to može rezultirati u pogrešnim podacima, a u sustavima upravljanja međudjelovanje dinamičkih karakteristika senzora i dinamičkih karakteristika ostalog dijela sustava može uzrokovati oscilacije, odnosno nestabilnost sustava.

Prikaz dinamičkih karakteristika senzora radi se u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. U vremenskoj domeni prikazuje se vremensko ponašanje odziva senzora (izlaza) u ovisnosti o pobudi (ulazu), a u frekvencijskoj domeni amplitudna i fazna karakteristika prikazuju ovisnost amplitude i faze odziva (izlaza) o frekvenciji ulazne veličine.

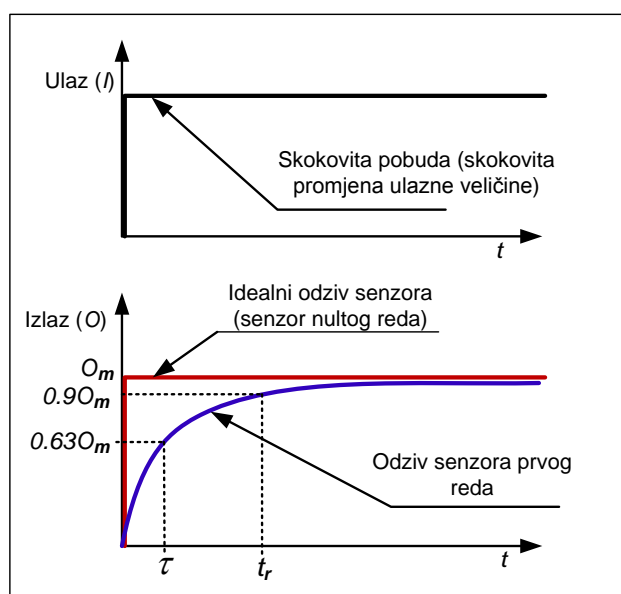
Dinamičke karakteristike senzora odnosno prikaz odziva u vremenskoj i frekvencijskoj domeni ovise o redu senzora. U praksi najveći utjecaj na red senzora imaju elementi od kojih je sastavljen. Primjerice ako senzor ima samo jedan spremnik energije (npr. samo kondenzator tj. kapacitet, ili samo zavojnicu tj. induktivitet) takav senzor je prvog reda. Senzor koji sadrži i kondenzator i zavojnicu bio bi drugog reda. Idealni senzor bio bi nultog reda i ne bi sadržavao nikakve spremnike energije, i niti jedan njegov dio ne bi uzrokovao kašnjenje odziva. Takav senzor savršeno vjerno pratio bi promjene ulaza, odziv senzora potpuno bi odgovarao pobudi, a amplitudna i frekvencijska karakteristika prikazivale bi da nema prigušenja amplitude niti faznog pomaka odziva (izlaza) kod bilo koje frekvencije ulaza. Realni senzori najčešće su prvog ili drugog reda.

Prikaz u vremenskoj domeni

Senzor prvog reda

Ponašanje senzora prvog reda u vremenskoj domeni opisano je funkcijom prvog reda. U slučaju skokovite pobude (pobuda koja sa vrijednosti nula trenutačno raste na neku vrijednost i nakon toga zadržava tu vrijednost, primjerice na vagu se naglo stavi uteg i ostavi) odziv takvog senzora bio bi dan izrazom (3.4), a graf funkcije $O(t)$ izgledao bi (3.4)

$$O(t) = O_m \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_u}} \right) \quad (3.4)$$

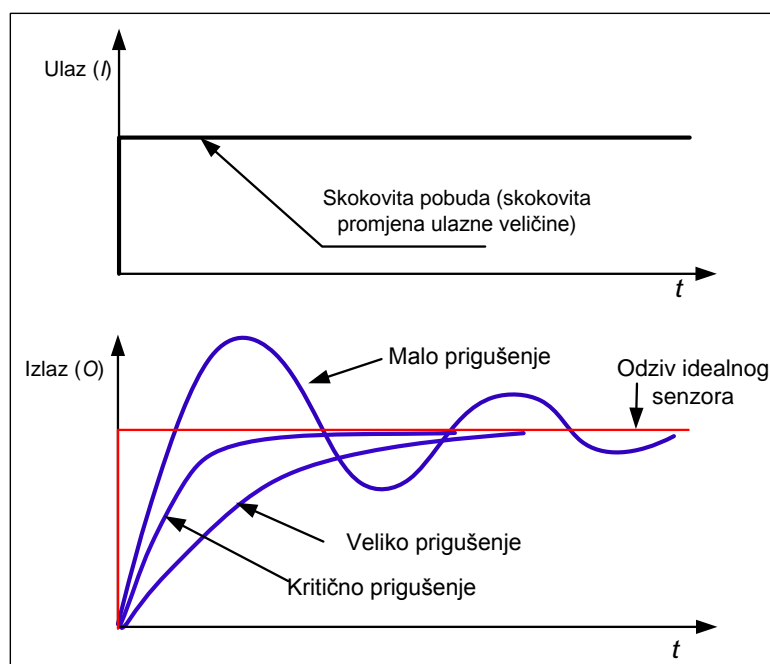


Slika 3.12 Odziv senzora prvog reda

gdje je O_m iznos odziva koji senzor postiže u stacionarnom stanju, ili iznos odziva koji bi idealni senzor postigao trenutno tj. u trenutku kad je pobuda i nastupila. Oznaka τ_u u izrazu je predstavlja mjeru inercije senzora a naziva se vremenska konstanta. Nakon vremena koje odgovara τ_u odziv senzora postiže 63,2% iznosa odziva u stacionarnom stanju (nakon $2\tau_u$ 86,5%, nakon $3\tau_u$ 95% iznosa, nakon $4\tau_u$ 98,2 %). Teoretski iznos odziva dostiže stacionarno stanje u trenutku $t=\infty$. U praksi se uzima da je stacionarno stanje postignuto nakon proteka vremena koje odgovara $5\tau_u$, što odgovara 99,3% iznosa odziva u stacionarnom stanju. Vrijeme potrebno da bi odziv senzora postigao 90% stacionarne vrijednosti naziva se vrijeme porasta, a na slici označeno je sa t_r .

Senzor drugog reda

Kako senzor drugog reda ima dva spremnika energije dolazi do oscilacija energije između tih spremnika, što se manifestira kao oscilacije električnog signala na izlazu. Odziv senzora drugog reda na skokovitu pobudu ovisan je o prigušenju. Prigušenje pokazuje koliko brzo padaju amplitude titraja. Ako je prigušenje malo senzor odgovara titranjem na vlastitoj frekvenciji. Ako je prigušenje jako neće doći do titranja, a pri tom će i rast signala odziva biti spor. Kod tzv. kritičnog prigušenja signal odziva maksimalno brzo raste, ali bez nadvišenja, što je i poželjno kod takvih senzora. Na Slika 3.13 prikazani su vremenski odzivi senzora drugog reda za različita prigušenja, .



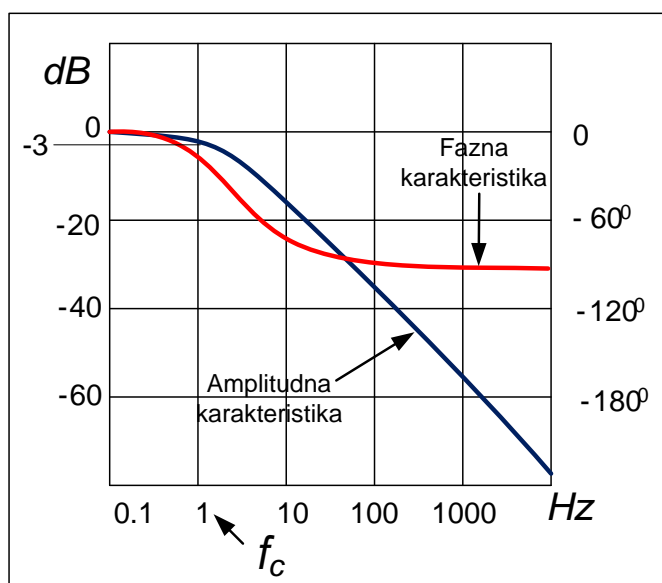
Slika 3.13 Odziv senzora drugog reda

Prikaz u frekvencijskoj domeni

Prikaz dinamičkih karakteristika senzora u frekvencijskoj domeni uključuje amplitudnu frekvencijsku i faznu frekvencijsku karakteristiku. Amplitudna frekvencijska karakteristika prikazuje ovisnost amplitude odziva o učestalosti (frekvenciji) pobude. Iz amplitudne

karakteristike očitava se koliko je prigušenje, a izraženo je uglavnom u dB (0 dB značilo bi da nema prigušenja). Primjer amplitudne karakteristike (plava linija) dan je .

Često se umjesto amplitudne karakteristike navodi samo gornja granična frekvencija, na slici označena sa f_c . Gornja granična frekvencija jest frekvencija kod koje je prigušenje amplitude – 3dB što odgovara padu napona na izlazu za oko 30% u odnosu kada bi na ulazu bila skokovita stacionarna pobuda. Smatra se da je gornja granična frekvencija najviša frekvencija pobude koju senzor može obraditi. Približna relacija koja povezuje gornju graničnu frekvenciju f_c i vremensku konstantu τ_u je $f_c \approx 0,159/\tau_u$. Kod nekih vrsta senzora potrebno je definirati i donju graničnu frekvenciju, odnosno minimalnu frekvenciju pobude koju senzor može obraditi (ako je frekvencija pobude ispod donje granične frekvencije senzor ne radi ispravno). Ako su za senzor definirane i donja i gornja granična frekvencija tada treba raditi u području između sa te dvije granične frekvencije.



Slika 3.14 Primjer amplitudne i fazne karakteristike

Fazna frekvencijska karakteristika prikazuje fazu odnosno kašnjenje odziva u ovisnosti o frekvenciji pobude, a izražava se u radijanima ili stupnjevima. Na Slika 3.14 fazna karakteristika prikazana je crvenom linijom. Fazna karakteristika posebno je važna ako je senzor dio nekog sustava upravljanja, ili se za prikupljanje podataka koristi uređaj koji informaciju “izvlači” istovremeno iz podataka od više senzora.

Primjer: Za neki senzor amplitudna karakteristika odgovara upravo prikazanoj na Slika 3.14. Ako je stacionarni odziv senzora na stacionarnu pobudu 1 V, i želi se ustanoviti koliki je iznos odziva na frekvenciji pobude od 100 Hz. Iz amplitudne karakteristike na slici pročitava se prigušenje (neka je – 35 dB). Prigušenje je definirano sa $a_p[dB]=20 \log U_f/U_{st}$ gdje je a_p prigušenje, U_f iznos odziva na frekvenciji 100 Hz, a U_{st} iznos odziva na stacionarnu pobudu. Tada je $-35dB=20 \log U_f/1V$;
 $U_f/1V=10^{-20/35}$; $U_f=0,27 V$.

3.3 Ostale tehničke značajke senzora

Stabilnost

Stabilnost (*Stability*) je svojstvo senzora da tijekom vremena ne mijenja (odnosno mijenja) karakteristike. Dvije su vrste stabilnosti (nestabilnosti): dugoročna stabilnost i kratkoročna stabilnost. Dugoročna i kratkoročna stabilnost utječu na točnost i poželjna je njihova specifikacija.

Dugoročna stabilnost odnosi se na dulje vremenske intervale reda veličine mjeseci, godine i deseci godina. Glavni utjecaj na dugoročnu stabilnost ima starenje materijala. Starenje uzrokuje nepovratne promjene u strukturi materijala, čime se mijenjanju mehanička, električka, kemijska i toplinska svojstva senzora. Posljedica je nepovratna promjena karakteristike (*long term drift*) senzora. Promjena može se očitovati kao pomak karakteristike oko nule ili izobličenje karakteristike tj. promjena osjetljivosti. Jedan od načina poboljšanja dugoročne stabilnosti je umjetno starenje materijala, što znači da se materijali ciklički izlažu ekstremnim uvjetima (grijanje, hlađenje, osvjetljavanje i dr.).

Kratkoročna stabilnost odnosi se na kraće vremenske intervale reda veličine sekunde, minute, sati i dani. Uzroci kratkoročne stabilnosti su stohastičke naravi i tu se ubrajaju svi utjecaji koji privremeno mijenjaju radne uvjete senzora: promjene temperature, vlage, elektromagnetske smetnje, promjene napona napajanja, šumovi u prilagodnim sklopovima, samozagrijavanje i dr. Posljedica takvih utjecaja uglavnom je kratkotrajni pomaci ili izobličenja karakteristike senzora (*short term drift*).

Specifikacija stabilnosti senzora uključivala bi opis kako se mijenja karakteristika (pomak, i promjena osjetljivosti) s vremenom za dugoročnu stabilnost, odnosno kakve utjecaje na karakteristiku imaju promjene radnih uvjeta za kratkoročnu stabilnost.

Primjer: Na senzor tlaka je poznato da utječe temperatura okoline. Deklarira se pojas pogreške na slijedeći način: Ukupno mjerno područje od -30 °C do 100 °C

Mjerno područje: -30 °C do 0 °C : točnost $\pm 2\%$

Mjerno područje: 0 °C do 50 °C : točnost $\pm 1\%$

Mjerno područje: 50 °C do 100 °C : točnost $\pm 3\%$

Posebno se može definirati trajnost (*Durability*) senzora, a odnosi se na vremensko razdoblje unutar kojeg se svojstva senzora ne mijenjaju bitno.

Pouzdanost

Pouzdanost po definiciji je vjerojatnost da će sustav (uređaj, element) raditi ispravno u definiranom vremenskom intervalu pod točno definiranim uvjetima. Uobičajeni pokazatelji pouzdanosti su intenzitet kvarova (*Failure rate*), MTBF (*Mean Time Between Failure*) ili srednja duljina vremenskog intervala između pojave uzastopnih kvarova, MTTF (*Mean Time to Failure*) ili srednje vrijeme do pojave prvog kvara. Kako je sam senzor samo dio uređaja ili sustava za prikupljanje podataka, njegova pouzdanost samo je jedna od komponenti za procjenu pouzdanosti istih.

Unatoč deklariranim pokazateljima pouzdanosti od strane proizvođača, u praksi je vrlo poželjan podatak o empirijskoj pouzdanosti nekog elementa, uređaja ili sustava. Empirijska pouzdanost je omjer broja uređaja koji ispravno rade i ukupnog broja uređaja u definiranom vremenu (npr. jedna godina), izraz (3.5). Empirijska pouzdanost rezultat je iskustva, odnosno praćenja rada (kvarova) određenog broja uređaja u radnim uvjetima.

$$R^*(t) = \frac{n(t)}{N_0} \quad (3.5)$$

gdje je $R^*(t)$ - empirijska pouzdanost u intervalu t za određene uređaje; $n(t)$ - broj uređaja koji nije imao kvar u tom periodu; N_0 - ukupan broj uređaja

Konstruktivne i aplikativne značajke

Postoji još niz podataka koji su bitni za uporabu senzora u praksi. Za svaki senzor specificirani su materijali od kojih je izveden, dimenzije i masa. Nadalje treba biti poznat položaj priključnica i izvedba spojeva.

Da bi senzor došao u radno stanje potrebno je neko vrijeme od trenutka uključenja do trenutka kada počinje pokazivati sa deklariranom točnošću. To vrijeme naziva se vrijeme zagrijavanja (*Warm-up time*). Poznavanje izlazne impedancije (*Output impedance*) bitno je za priključenje na elektroničke sklopove.

3.4 Odabrani fizikalni principi senzora

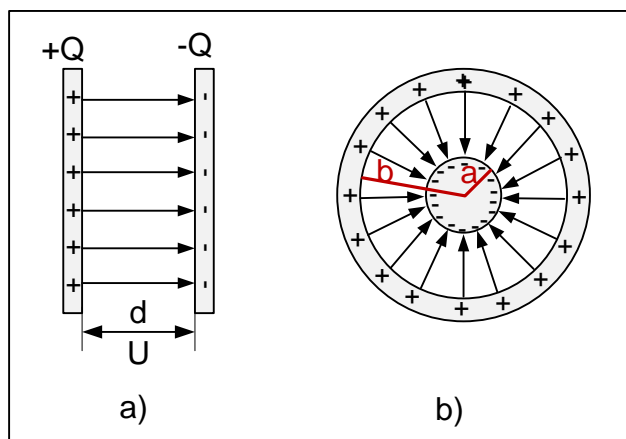
Odabrani fizikalni principi senzora koji će se prezentirati u ovom poglavlju uglavnom se odnose na one na kojima se temelji izrada detektora prometnog toka. Osnovni zadatak detektora je detekcija (prepoznavanje) vozila tj. metalnog objekta određene mase i dimenzija koji se kreće ili miruje. Mogućnosti detekcije vozila leže u slijedećem: promjene magnetskog polja, promjene električnog polja, promjene u određenim područjima spektra elektromagnetskih valova, promjene u reflektiranom spektru elektromagnetskih valova, promjene u zvučnim valovima i promjene u pritisku na podlogu.

3.4.1 Kapacitet

Sustav od dva vodljiva tijela međusobno izolirana naziva se kondenzator. Takav sustav ima svojstvo da na sebe primi određeni naboj (jedno tijelo pozitivan, a drugo tijelo negativan naboj). Između tako nabijenih tijela postoji električno polje i ukoliko se u električnom polju pojavi nekakav naboj na njega će djelovati elektrostatička sila. Omjer primljenog naboja i pri tome uspostavljenog napona naziva se kapacitet, i konstanta je za svaki kondenzator.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (3.6)$$

Kapacitet kondenzatora ovisi o konstrukciji, dimenzijama, i materijalu koji se nalazi između vodljivih tijela (dielektriku). Materijal između vodiča kondenzatora opisan je sa relativnom dielektričnom konstantom ϵ_r . Ovisno o potrebama kondenzatori mogu biti raznih oblika i dimenzija. Primjer pločastog i cilindričnog kondenzatora, Slika 3.15. Kapacitet pločastog kondenzatora može se izračunati izrazom (3.7), a kapacitet cilindričnog izrazom (3.8).



Slika 3.15 Pločasti kondenzator i cilindrični kondenzator u presjeku

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (3.7)$$

gdje je ϵ_0 dielektrična konstanta vakuma, ϵ_r dielektrična konstanta materijala, S - površina ploča kondenzatora, d -udaljenost između ploča.

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln \frac{b}{a}} \quad (3.8)$$

gdje je l duljina cilindričnog kondenzatora, a – polumjer manjeg cilindra, b -unutrašnji polumjer većeg cilindra.

Fizikalni fenomen kapaciteta odnosno povezanost iznosa kapaciteta sa njegovim dimenzijama i materijalima dielektrika čine kapacitet tj. izvedene kondenzatore vrlo upotrebljivim za izgradnju senzora. Mijenjanje bilo koje veličine (razmaka između ploča, površine ploča, dielektrika) rezultira u promjeni kapaciteta. Kada se kondenzator nalazi u strujnom krugu i mijenja mu se kapacitet to direktno izaziva promjenu električnog signala. Primjerice ako je kondenzator spojen na izvor istosmjernog napona U (električki je nabijen sa nabojem Q) i ako se jedna ploča pločastog kondenzatora pomakne, mijenja se kapacitet što za posljedicu ima primanje ili otpuštanje naboja sa kondenzatora, što se registrira kao električki signal. Iznos primljenog ili otpuštenog naboja direktno će ovisiti o iznosu za koji je razmak smanjen ili povećan, što se npr. može iskoristi za mjerenje pomaka. Za mjerenje pomaka pogodan je i cilindrični kondenzator. Prema izrazu kapacitet je direktno proporcionalan sa duljinom cilindričnog kondenzatora l , te ukoliko se izvlači središnji vodič iz vanjskog cilindra smanjuje se efektivna duljina cilindričnog kondenzatora i kapacitet se mijenja.

Nadalje kondenzator (kapacitet) se može izvesti tako da je jedna ploča tanka lagana lako pokretljiva membrana. Takva membrana izložena zvučnim valovima titra u ritmu tih valova i pomoću mijenjanja kapaciteta čiji iznos ovisi o elongaciji membrane pretvaraju se zvučni valovi u električni signal. Upravo taj efekt koristi se u zvučnim detektorima prometnog toka, gdje zvukove izaziva motor vozila ili trenje guma sa površinom prometnice.

Promjene svojstava prostora (dielektrika) između ploča kondenzatora može se iskoristiti primjerice za senzor prisutnosti vozila ili osoba. Tada su naravno gabariti takvog senzora veliki, jer se vozilo ili osoba nalaze u prostoru između ploča kondenzatora.

Ponašanje kapaciteta u krugu izmjenične struje također se može iskoristiti u svrsi izgradnje senzora. Naime, kapacitet u strujnom krugu izmjenične struje pruža kompleksni otpor (kapacitivna reaktancija), izraz (3.9).

$$\bar{X}_C = -jX_C = -j \frac{1}{2\pi f C} [\Omega] \quad (3.9)$$

gdje je X_C – kapacitivna reaktancija, f – frekvencija izmjenične struje

Promjene kapaciteta u strujnom krugu izmjenične struje također imaju direktne posljedice na električki signal, koje se manifestiraju u promjeni amplitude i faze električnog signala. U slučaju ako je kapacitet dio titrajnog kruga koji se sastoji od induktiviteta L i kapaciteta C (uz zanemarenje otpora), vlastita frekvencija titrajnog kruga dana je sa $f = 1 / 2\pi\sqrt{LC}$. Promjene kapaciteta u takvom titrajnom krugu tada će uzrokovati promjenu frekvencije signala.

3.4.2 Indukcija

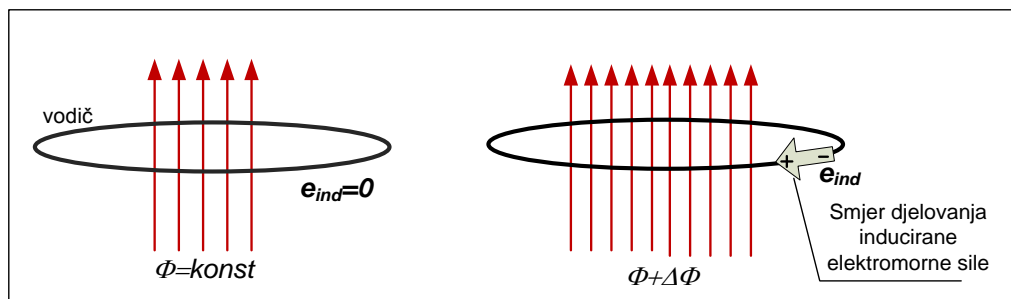
Elektromagnetska indukcija je pojava induciranja elektromotorne sile (napona) uslijed promjene magnetskog toka. Napon u vodiču može se inducirati uslijed promjene toka kroz vodič oblika petlje ili uslijed gibanja vodiča u magnetskom polju.

Prema Faradayev-Lentzovom zakonu, izraz (3.10), inducirani napon u vodiču oblika petlje proporcionalan je brzini promjene magnetskog toka. Predznak minus u izrazu ima simboličko značenje. Naime inducirana elektromotorna sila nastoji proizvesti struju takvog smjera koja se svojim učinkom protivi promjeni magnetskog toka. Ukoliko je vodič otvoren, na krajevima vodiča će se inducirati napon, a ukoliko je vodič zatvorena petlja inducirana elektromotorna sila tjera struju takvog smjera koja proizvodi magnetski tok koji se protivi promjeni. Slika 3.16 prikazuje primjer smjera djelovanja inducirane elektromotorne sile ako se magnetski tok povećava. U slučaju da se magnetski tok kroz petlju smanjuje elektromotorna sila bi imala suprotni smjer. Ako vodič ima N zavoja tada svaki zavoj doprinosi induciranoj elektromotornoj sili, izraz (3.11).

$$e_{ind} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.10)$$

$$e_{ind} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.11)$$

gdje je e_{ind} – inducirana elektromotorna sila, Φ – magnetski tok, $d\Phi/dt$ – brzina promjene magnetskog toka, N – broj zavoja vodiča.



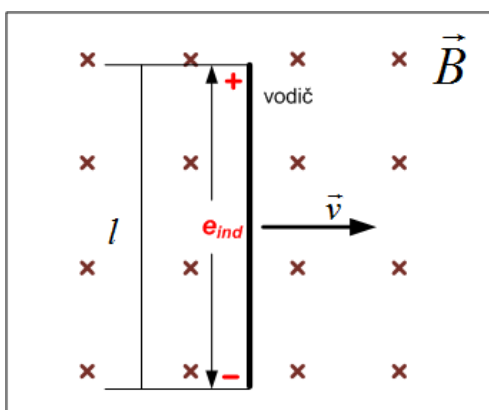
Slika 3.16 Inducirana elektromotorna sila u petlji vodiča

Elektromotorna sila se inducira i u vodiču koji se giba u magnetskom polju, Slika 3.17. Ako se primjerice ravni vodič nekom brzinom giba u magnetskom polju, u njemu će se inducirati elektromotorna sila prema izrazu (3.12), (3.13).

$$e_{ind} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} \quad (3.12)$$

$$e_{ind} = v \cdot B \cdot l \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi \quad (3.13)$$

gdje je v – brzina vodiča, B – gustoća magnetskog toka (magnetska indukcija); l – duljina vodiča; θ – kut između vektora brzine i vektora gustoće magnetskog toka; φ – kut između vodiča i vektora $(\vec{v} \times \vec{B})$. Konkretno Slika 3.17 prikazuje slučaj kada kut θ iznosi 90° , a kut φ iznosi 0° tj., slučaj kada je inducirana elektromotorna sila maksimalna. Ako je gibanje vodiča takvo da ne „siječe“ silnice magnetskog polja u njemu se ne bi inducirao napon.

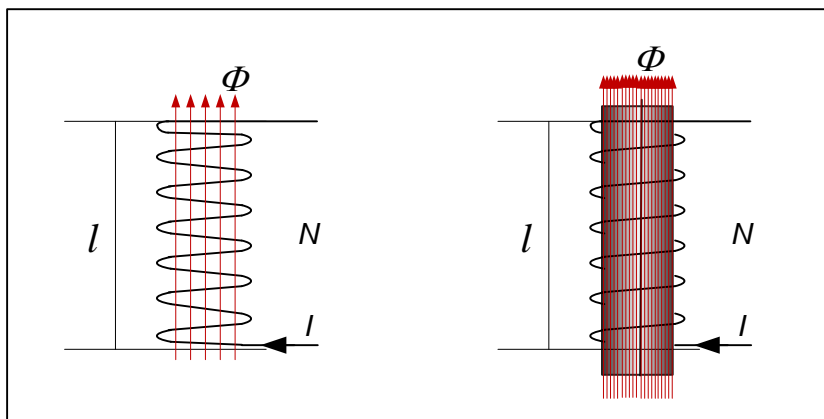


Slika 3.17 Inducirana elektromotorna sila u vodiču

Magnetsko polje za potrebe senzora može se proizvesti protjecanjem struje kroz zavojnicu ili permanentnim magnetima. Gustoća magnetskog toka ravne zavojnice (solenoida) može se odrediti prema izrazu (3.14).

$$B = \mu_0 \cdot \frac{NI}{l} \quad (3.14)$$

gdje je μ_0 permeabilnost vakuma, N -broj zavoja, I – jakost struje, l – duljina zavojnice. Magnetsko polje može se višestruko povećati (red veličine 10^6) stavljanjem jezgre od feromagnetskih materijala, kao na slici. Međutim u tom slučaju zavisnost gustoće magnetske indukcije od jakosti struje više nije linearna. Ponašanje takvih materijala opisano je krivuljom magnetiziranja, a karakteristika im je da nakon nekog iznosa struje (odnosno uzbude) takvi materijali ulaze u zasićenje.



Slika 3.18 Magnetski tok bez jezgre i s jezgrom od feromagnetskog materijala

Permanentni magneti mogu se pronaći prirodi, ali za industrijske potrebe umjetno se proizvode od feromagnetskih materijala. Posebne legure rijetke zemlje, legure kobalta i željeza, legure aluminija, nikla i dr. izlažu se izuzetno jakim magnetskim poljima i nakon prestanka izlaganja zadržavaju tzv. remanentni magnetizam. Postoje također i keramički magneti nastali sinteriranjem uz dodatke barija ili stroncija. Zemlja također proizvodi magnetsko polje, i upravo se to magnetsko polje koristi kod magnetskih detektora za detekciju vozila.

3.4.3 Induktivitet

Kao što je rečeno, zavojnica protjecana strujom stvara magnetsko polje odnosno magnetski tok. Omjer ukupnog ulančanog toka i struje koja je taj tok proizvela naziva se induktivitet, izraz (3.15)

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{I} = \frac{\Psi}{I} \quad (3.15)$$

gdje je L -induktivitet, N - broj zavoja; Φ - magnetski tok; Ψ - ulančani tok; I -jakost struje kroz zavojnicu.

Induktivitet posjeduju svi vodiči. Karakteristika induktiviteta je da ovisi samo o konstrukciji, dimenzijama i upotrijebljenim materijalima. Primjer za induktivitet ravne cilindrične zavojnice (solenoida) sa N zavoja, duljine l , polumjera r dan je izrazom (3.16).

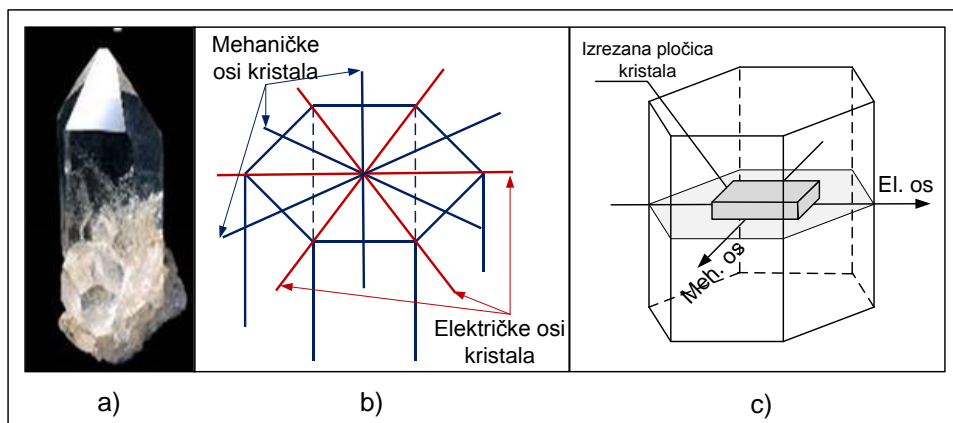
$$L = \frac{\mu \cdot N^2}{l} \cdot r^2 \pi \quad (3.16)$$

$$\bar{X}_L = jX_L = j2\pi fL \text{ [}\Omega\text{]} \quad (3.17)$$

Zavojnica induktiviteta L ima svojstvo da se u strujnom krugu izmjenične struje ponaša kao kompleksni otpor X_L (induktivna reaktancija), izraz (3.17). Ukoliko vanjska promjena utječe primjerice na pomak jezgre, mijenja se induktivitet, a time i električki signal. Kao što je već rečeno, ako se titrajni krug sastoji od induktiviteta i kapaciteta, njihovim iznosima određena je vlastita frekvencija takvog titrajnog kruga. Promjena induktiviteta u tom slučaju ima za posljedicu promjenu vlastite frekvencije. Upravo ova pojava koristi se za izgradnju induktivne petlje, danas jednog od najraširenijih detektora prometnog toka.

3.4.4 Piezoelektrički efekt

Direktni piezoelektrički efekt je pojava stvaranja električkog naboja na površini kristala uslijed deformacije izazvane vanjskom silom. Svojstvo piezoelektričnosti posjeduju više materijala, a najpoznatiji i vrlo često upotrebljavan je kvarc (silicij dioksid SiO_2 u formi pravilne kristalne strukture gdje je svaki atom silicija vezan na četiri atoma kisika). U prirodi kristali kvarca pojavljuju se u obliku heksagonskih prizmi, Slika 3.19 a).

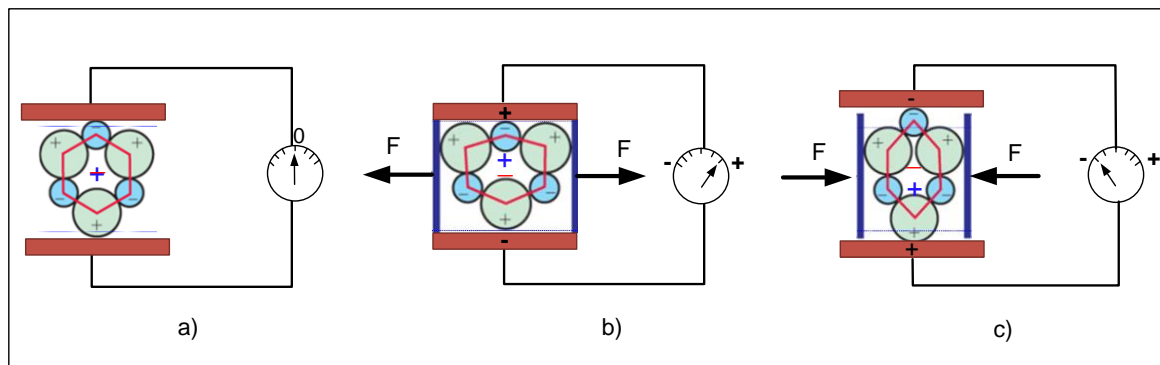


Slika 3.19 a) Kristal kvarca b) Osi kristala c) Pločica kristala

Kristal kvarca posjeduje optičku os te tri električke i tri mehaničke osi, Slika 3.19 b). Električke osi međusobno su pod kutom od 120° , a također i mehaničke osi su međusobno pod kutom od 120° . Mehanička i pripadajuća optička os su pod kutom od 90° . Iz kristala kvarca izrezuju se pločice određenih dimenzija, i sa rezovima pod određenim kutovima u odnosu na osi, Slika 3.19 b). Ukoliko se djeluje tlakom ili vlakom u smjeru mehaničke osi, između ploha koje su okomite na pripadnu električku os pojavljuje se napon.

Pojednostavljeni prikaz nastajanja napona na kristalu prikazan je na Slika 3.20. Ako na kristal ne djeluje nikakva sila nema naboja niti napona na između krajeva kristala. Ako se u smjeru osi x djeluje vlakom ili tlakom dolazi do deformacije kristala, te do pomaka naboja (polarizacije). Na slici plava oznaka $+$ i crvena $-$ označavaju centar simetrije pozitivnih iona

odnosno negativnih iona u kristalu. Na Slika 3.20 b) polarizacija je suprotna od polarizacije na Slika 3.20 c). Polarizacija cijelog kristala rezultira u akumuliranom naboju Q i naponu U .



Slika 3.20 Nastajanje napona na pločici kristala kvarca (+ Si atomi, - O atomi)

Napon na krajevima kristala ovisi o dimenzijama pločice, kutovima pod kojim je izrezana, smjeru sile u odnosu na osi, kapacitetu što ga pločica formira sa elektrodama koje drže kristal, te o piezoelektričkom koeficijentu. Primjerice za određenu pločicu kristala kvarca izrezanu pod odgovarajućim kutovima i postavljenu između elektroda napon na krajevima bi se mogao odrediti prema izrazu (3.18):

$$V = \frac{d_{11}}{C} F_x = \frac{d_{11}l}{\epsilon_0 S} F_x \quad (3.18)$$

gdje je V – napon; C – kapacitet što ga formira kristal kvarca i elektrode, d_{11} piezoelektrički koeficijent za dani smjer (inače se piezoelektrički koeficijent zadaje kao matrica 3×3 , konkretno d_{11} za kvarc iznosi $2,3 \text{ (pC/N)}$); l – debljina pločice kristala (udaljenost između elektroda između kojih se pojavljuje napon); S – površina pločice kristala, a F_x sila na pločicu u definiranom smjeru. Dakle, postoji direktna veza između sile na kristal i generiranog napona.

Osim najpoznatijeg kvarca svojstvo piezoefekta pokazuju i drugi kristali primjerice turmalin, galijum fosfat, Rochelleve soli. Piezokeramike su namjenski izrađeni sintetički keramički materijali sa izraženijim piezoeftom. Prilikom proizvodnje podvrgavaju se termičkoj i električnoj obradi (grijanje, izlaganje električnom polju, hlađenje). U ovu grupu spadaju barijum titanat, olovni cirkonat-titanat (PZT), i dr. Razvijeni su i plastični piezoelektrici, polivinilden fluorid (PVDF). Piezosenzori rabe se za mjerenje tlaka, težine, akceleracije, pomaka

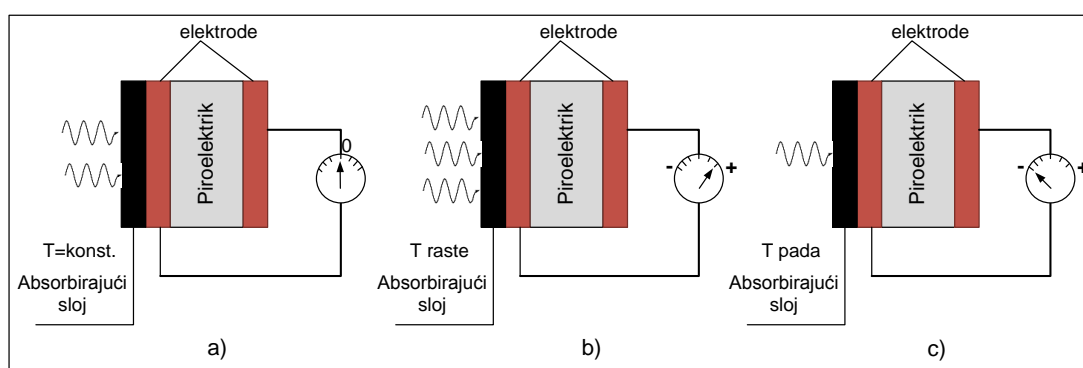
Na kratkotrajnu stabilnost piezosenzora utječu promjene temperature i vlage. Iako kristali imaju manju osjetljivost dugoročna stabilnost im je veća od umjetnih materijala. Načelno piezo senzori imaju široki mjerni opseg i dobru linearnost. Nadalje mali gabariti potrebnog materijala omogućavaju proizvodnju gotovih senzora malih dimenzija. Piezoelektrički senzori spadaju u pasivne senzore (nije potrebno napajanje za generaciju signal). Jedan od nedostataka piezosenzora je što posjeduje donju graničnu frekvenciju, tako da nije pogodan za statičko mjerenje (dugotrajno), međutim piezoelektrici izvrsno prate promjenjivu ulaznu pobudu.

Inverzni piezoelektrički efekt je pojava deformacije kristala (ili bilo kojeg drugog piezo materijala) uslijed narinutog napona na njegovim ploham. Sukladno primjeru koji pokazuje Slika 3.20, kristal će se stezati ili istežati ovisno o polaritetu narinutog napona. Ukoliko se na kristal dovede izmjenični napon pločica će vibrirati u ritmu frekvencije narinutog napona. Amplitude titraja su maksimalne kada je frekvencija narinutog napona jednaka frekvenciji mehaničke rezonancije pločice. Pločica inače može vibrirati na više načina: po debljini, po duljini, na savijanje. Ova pojava inverznog piezoelektirčnog efekta se primjerice iskorištava za generiranje ultrazvuka kod aktivnih ultrazvučnih detektora prometnog toka. Kod izvedbe ovakvih aktivnih uređaja piezoelement može biti ujedno pretvarač (generira ultrazvučni impuls vrlo kratkog trajanja) i senzor (prima reflektirani ultrazvučni signal). U tom slučaju bitno je da se osigura dovoljno prigušenje piezoelementa (piezosenzori spadaju u senzore drugog reda), kako bi piezoelement „dočekao“ reflektirani signal u „mirnom“ stanju.

3.4.5 Piroelektrički efekt

Piroelektrički efekt je pojava stvaranja naboja (napona) na površini kristala izloženog toplinskom toku. Piroelektrički efekt usko je povezan sa piezoelektričkim efektom. U stvari svi piroelektrični materijali su ujedno i piezoelektrični, iako svi piezoelektrični nisu i piroelektrični. Slično kao i kod piezoelektričnog senzora piroelektrični materijal u obliku tankih pločica ili sloja stavlja se između elektroda. Apsorbirajući sloj izložen je toplinskom toku, i ovisno o promjenama toplinskog toka temperatura mu pada ili raste, Slika 3.21.

Piroelektrički materijal i elektrode tvore kondenzator koji se pod utjecajem odnosno promjenama toplinskog toka električki nabija. Piroelektrički materijali generiraju naboj kao odziv na promjenu temperature. Ako se temperatura apsorbirajućeg sloja mijenja, mijenjaju se i svojstva takvog kondenzatora što rezultira u promjeni naboja odnosno napona. Međutim ako je piroelektrički senzor stalno izložen istom toplinskom toku, a temperatura apsorbirajućeg sloja se ne mijenja na izlazu neće biti odziva, neće se generirati naboj niti napon.



Slika 3.21 Piroelektrički efekt

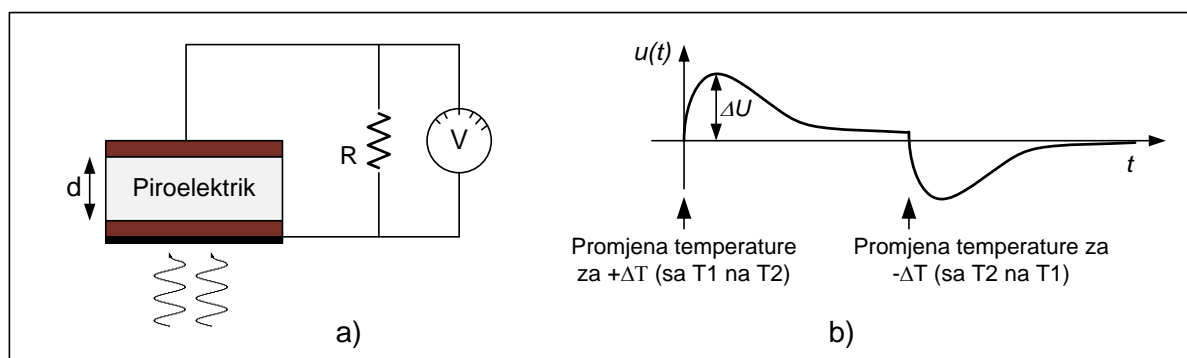
Generirani odziv rezultat je primarne i sekundarne piroelektričnosti. Primarna piroelektričnost odnosi se na direktan utjecaj toplinskog toka (promjene temperature) na pomak naboja tj. polarizaciju u dielektriku (piroelektričnom materijalu). Sekundarna piroelektričnost rezultat je piezoelekta koji se dešava zbog deformacije materijala uzrokovane zagrijavanjem materijala. Dio materijala koji se nalazi uz apsorbirajući sloj zagrijava se više i rasteže se više, negoli dio

koji se nalazi na suprotnom hladnijem kraju. To rezultira u savijanju senzora odnosno naprežanjima koji mijenjaju polarizaciju materijala, odnosno piezoeffektu.

Za neki piroelektrik ovisnost vršne vrijednosti generiranog napona u ovisnosti o promjeni temperature može se dati izrazom, (3.19). U spoju piroelektrika kao na Slika 3.22 pod a) vremenski odziv bio bi oblika kao na Slika 3.22 pod b). Napon na izlazu generira se isključivo kada nastaju promjene temperature na apsorbirajućem sloju. Ovakav odziv karakterističan je za senzor sa gornjom i donjom graničnom frekvencijom, odnosno posjeduje dvije vremenske konstante koje opisuju rast i pad signala. Porast signala je dosta brz što je i poželjno, dok je za vremensku konstantu koja opisuje pad signala poželjno da je što veća, odnosno da signal pada što sporije.

$$\Delta U = P_Q \frac{S}{C_E} \Delta T = P_Q \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{d} \Delta T \quad (3.19)$$

gdje je ΔU vršna vrijednost promjene napona uzrokovana promjenom temperature ΔT ; P_Q – piroelektrični nabojni koeficijent; S – površina piroelektrika (efektivna površina elektroda); C_E – ekvivalentni kapacitet senzora; d – debljina piroelektričkog materijala.



Slika 3.22 Odziv piroelektričnog senzora na skokovitu promjenu temperature

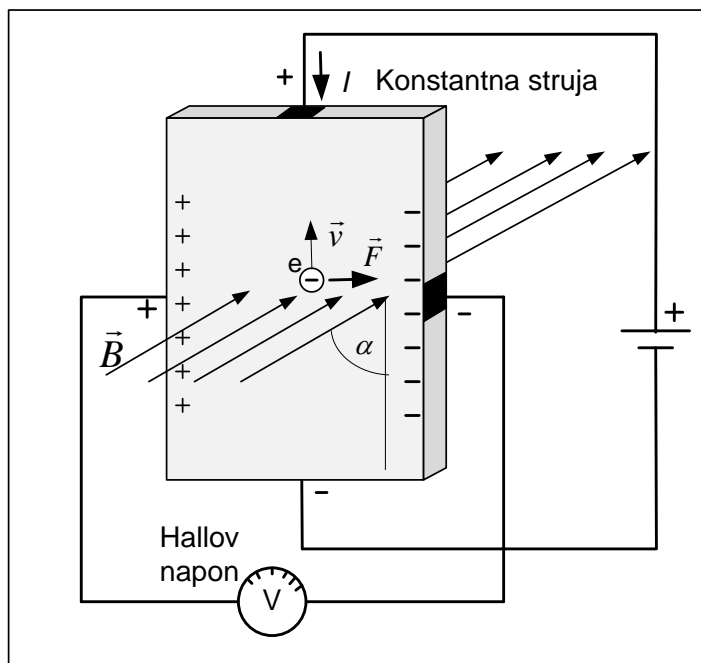
Kao piroelektrički materijali mogu se upotrijebiti kristali kao što je triglilcin sulfat (TGS), koji je vrlo učinkovit piromaterijal. Rabe se razne vrste piroelektričkih keramika, primjerice olovni titanat koji se može u vrlo tankom sloju nanositi na silicijski supstrat. Nadalje polimerni piroelektrici su također praktični jer se nanose na podlogu u obliku tankih slojeva.

3.4.6 Hallov efekt

Hallov efekt je pojava nastanka napona na bočnim rubovima vodljive trake protjecane strujom i izložene magnetskom polju. Efekt se temelji na djelovanju vanjskog magnetskog polja na naboj u gibanju. Ako se naboj giba nekom brzinom u magnetskom polju tada na njega djeluje sila koja je vektorski produkt vektora brzine pomnoženog sa iznosom naboja i vektora magnetske indukcije, izraz (3.20).

$$\vec{F} = Q\vec{v} \times \vec{B} \quad (3.20)$$

gdje je F sila na naboj u gibanju, Q je naboj, B je gustoća magnetske indukcije. U vodljivim tijelima (metalima) elektroni su pokretni nosioci naboja (naboj elektrona $e=1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}$). Smjer sile određuje se sukladno vektorskom produktu, a iznos je $F=QvB\sin\varphi$ (φ je kut između vektora brzine i vektora magnetske indukcije).



Slika 3.23 Hallov efekt

Slika 3.23 prikazuje princip senzora sa Hallovim efektom. Za primjer na slici elektroni se gibaju prema „gore“, magnetsko polje „ulazi“ u vodljivu pločicu, sukladno tome sila na elektrone djeluje prema „desno“. Naboji se tako grupiraju uz rubove pločice, te između bridova pločice nastaje napon, Hallov napon. Iznos tog napona dan je izrazom (3.21)

$$V_H = h \cdot I \cdot B \sin \alpha \quad (3.21)$$

gdje je I -jakost istosmjerne konstantne struje, B -gustoća magnetske indukcije, h – koeficijent osjetljivosti koji ovisi o materijalu pločice, geometriji pločice i temperaturi; α - kut između vodljive pločice i vektora magnetske indukcije.

Senzori sa Hallovim efektom mogu se upotrijebiti za mjerenje magnetskog polja, pozicije, pomaka objekata, broja okretaja motora i dr. Glede veličine izvedbe mogu biti minijaturene, reda veličine nekoliko milimetara kvadratnih površine i milimetarske debljine.

3.4.7 Fotoelektrički efekt

Vanjski fotoelektrični efekt

Fotoelektrički efekt je pojava izbijanja slobodnih elektrona iz metala pod djelovanjem svjetlosti (elektromagnetskog zračenja). Fotoelektrički efekt otkrio je Hertz 1887. g, a objasnio Einstein

23 godine kasnije. Fotoelektrički efekt karakteriziraju tada zbunjujući rezultati eksperimenata. Ako se neki metal izloži svjetlosti (zračenju):

- ne postoji emisija elektrona ako je zračenje manje od neke granične frekvencije (praga), i to neovisno o intenzitetu svjetlosti (ma koliko se intenzitet povećavao)
- ako se frekvencija zračenja povećava iznad praga postoji emisija elektrona, ali broj izbijenih elektrona ne ovisi o daljnjem povećanju frekvencije već o intenzitetu svjetlosti
- povećanje frekvencije zračenja iznad praga povećava kinetičku energiju izbijenih elektrona, a intenzitet svjetlosti ne povećava kinetičku energiju fotona

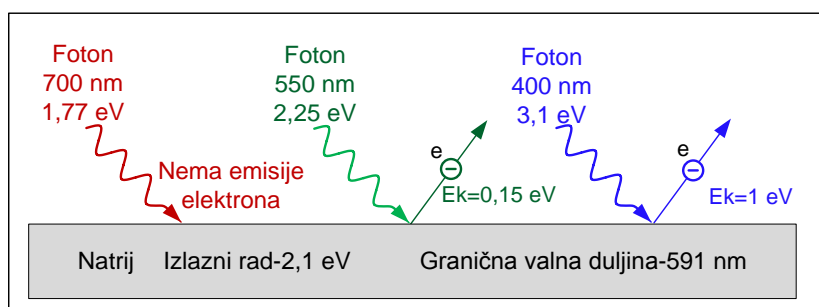
Einsteinovo teoretsko objašnjenje uključuje prikaz svjetlosti kao čestica tj. fotona. Svjetlost se sastoji od energetskih čestica (fotona) koji se brzinom svjetlosti kreću kroz prostor. Fotoni sadrže energiju E , izraz (3.22). Ukoliko upadni foton stupi u interakciju sa slobodnim elektronom u metalu, elektron apsorbira energiju samo tog jednog fotona. Da bi elektron bio izbačen iz metala treba apsorbirati energiju koja je veća od izlaznog rada metala W_i . Ukoliko je ta apsorbirana energija veća od izlaznog rada metala W , elektron će biti izbačen iz metala. Ostatak energije fotona pretvara se u kinetičku energiju elektrona, izraz (3.23).

$$E = h\nu \quad (3.22)$$

$$h\nu = W_i + E_{ke} = h\nu_g + E_{ke} \quad (3.23)$$

gdje je E – energija fotona; h – Planckova konstanta $h=6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$; ν – frekvencija svjetlosti; W_i – izlazni rad metala; ν_g – granična frekvencija kod koje dolazi do emisije elektrona; E_{ke} – kinetička energija izbačenog elektrona.

Za opisivanje svjetlosti umjesto frekvencije uglavnom se rabi valna duljina λ ; $\lambda = c/\nu$ gdje je c brzina svjetlosti $c= 299\,792\,458 \text{ m/s}$.



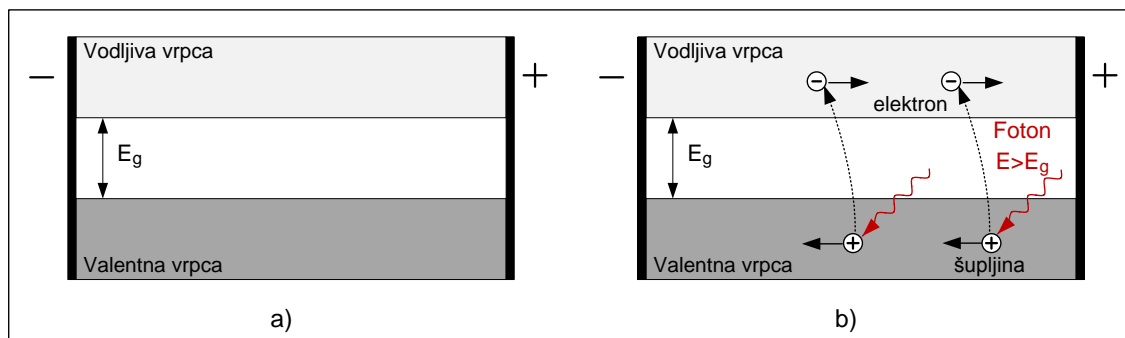
Slika 3.24 Fotoelektrički efekt

Primjer fotoelektričkog efekta za razne valne duljine na natriju dan je na Slika 3.24. Izlazni rad natrija je 2,1 eV, a pripadna granična frekvencija je $5,0712 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ što odgovara graničnoj valnoj duljini od 591 nm. Crvena svjetlost sa valnom duljinom od 700 nm i energijom fotona od 1,77 eV ne uzrokuje emisiju elektrona. Zelena svjetlost od 550 nm i energije fotona od 2,25 eV uzrokuje emisiju elektrona, a izbačeni elektroni imaju kinetičku energiju od 0,15 eV. Ljubičasta svjetlost izbija elektrone koji imaju još veću kinetičku energiju. Izlazni rad, odnosno energija vezanja elektrona za metal, ovisi o metalu. Primjerice cezij ima nizak izlazni rad od

0,7 eV (granična valna duljina je 783 nm), dok platina velik iznosa 6,3 eV (granična valna duljina je 237 nm).

Unutrašnji fotoelektrički efekt

Za izgradnju senzora važniji je unutrašnji fotoelektrički efekt. Unutrašnji fotoelektrički efekt je nastajanje pokretnih nosioca naboja u poluvodičima koji su izloženi zračenju. Unutrašnji fotoefekt u poluvodičima objašnjava se postojanjem energetskih nivoa atoma i tzv. energetskog procjepa E_g između valentne vrpce i vodljive vrpce. U valentnoj vrpci elektroni su jako vezani za atome, dok u vodljivoj vrpci mogu lako migrirati. U metalima vodljiva i valentna vrpca se preklapaju, dok su u izolatorima udaljene, odnosno energetski procjep u izolatorima je velik. U poluvodičima energetski procjep nije tako velik i ako elektron apsorbira energiju fotona, koja je veća od energetskog procjepa, prelazi u vodljivu vrpcu. Odlaskom elektrona u vodljivu vrpcu u valentnoj vrpci ostaje tzv. šupljina. Šupljina je u stvari manjak elektrona, a ponaša se kao pozitivan nosioc naboja. Dakle, osvjetljavanjem poluvodiča može doći do interakcije fotona sa elektronom i nastaje par elektron-šupljina, elektron u vodljivoj vrpci i šupljina u valentnoj vrpci, čime je zbog postojanja pokretnih nosioca naboja omogućeno protjecanje struje. Kao i kod vanjskog fotoelektričkog efekta prijelaz elektrona u vodljivu vrpcu ovisi da li je elektron apsorbirao dovoljno energije, odnosno ovisi o frekvenciji (valnoj duljini) fotona. Na Sliku 3.25 a) prikazan je poluvodič sa valentnom i vodljivom vrpcom koji nije osvjetljen, i ako je narinut neki napon na krajeve ništa se ne dešava. Ako se vodič osvjetli i ako fotoni imaju dovoljnu energiju $E > E_g$, pobuđeni elektroni prelaze u vodljivu vrpcu, te ako je narinut neki napon struja teče zbog pokretnih nosioca naboja, Slika 3.25 b). (napomena uz sliku: vodljiva i valentna vrpca te elektrode gdje je narinut napon prikazani su tako radi zornijeg prikaza, a ne zato što im je takva prostorna podjela)



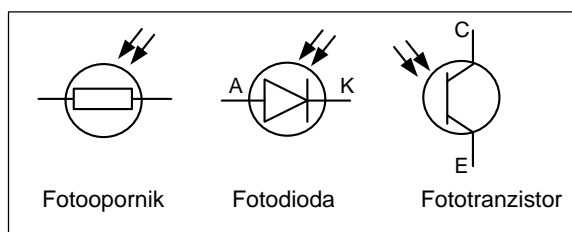
Slika 3.25 Unutrašnji fotoelektrični efekt

Svojstvo nastajanja nosioca naboja uslijed osvjetljenosti poluvodiča iskorištava se za izgradnju elemenata koji imaju promjenjivu otpornost (vodljivost) – fototpornici. Fototpornici su svjetlosno osjetljivi otpornici, čija se otpornost se smanjuje kada se intenzitet svjetlosti kojoj su izloženi povećava. Izrađuju se od tankog sloja poluvodičkog materijala kao što je silicij, selen, kadmij sulfid i dr. nanesenog na neki supstrat.

Materijali za izradu fototpornika dijele se u dvije vrste: intrinzični i ekstrinzični. Fototpornici sa intrinzičnim materijalima su čisti nedopirani materijali primjerice silicij ili germanij. Ekstrinzičnim materijalima su dodane primjese (dopanti) tj. atomi nekih elemenata koji donose

primjerice višak elektrona. Rezultat toga je stvaranje nove energetske vrpce, između valentne i vodljive vrpce intrinzičnog materijala, koja je popunjena elektronima. Elektroni u takvim vrpicama trebaju manje energije za prijelaz u vodljivu vrpcu, odnosno energetski procjep je manji. Rezultat toga je postizanje različite osjetljivosti fotodetektora za različite valne duljine zračenja, ovisno o dopantu.

Fotodiode posjeduju veću osjetljivost na zračenje nego li fotootpornici. Fotodiode su poluvodički elementi koji koriste svjetlost za kontrolu toka elektrona i šupljina preko PN spoja. Dodavanjem primjesa (dopiranjem) čistih poluvodiča nastaju P tipovi (sa viškom šupljina) ili N tipovi (sa viškom elektrona) poluvodiča. Spajanjem P-tipa i N-tipa poluvodiča nastaje dioda, kroz koju elektroni lako prelaze iz N dijela u P dio, ali ne i obrnuto. Element koji koristi kombinaciju unutrašnjeg fotoelektičnog efekta i efekta P-N spoja naziva se fotodioda. Takav element za detekciju zračenja može se koristiti na dva osnovna načina kao fotovodljiva dioda ili fotonaponska dioda. Ako je fotovodljiva dioda zaporno polarizirana i izloži se svjetlosti poteći će struja razmjerna osvijetljenosti diode. U fotonaponskom načinu rada dioda nije polarizirana, i ako se izloži svjetlosti na svojim krajevima generira napon. Slika 3.26 prikazuje simbole fotoosjetljivih poluvodičkih elemenata.



Slika 3.26 Simboli fotoosjetljivih poluvodičkih elemenata

4. DETEKTORI PROMETNOG TOKA

Za naprave koje daju podatke o prometnom toku tj. mjere parametre prometnih tokova rabe se različiti nazivi: detektor, detektor prometnog toka i brojilo prometa. Možda najispravniji naziv za takvu napravu bi bio senzor prometnog toka, jer ne samo da detektira vozila već prikuplja i mjeri čitav niz parametara prometnog toka. Međutim uvriježeno se naziva detektor pa će se taj izraz i rabiti. Detektor prometnog toka u stvari je mjerni lanac kojemu su osjetilni elementi senzori o kojima je bila riječ u prethodnom poglavlju. Detektor prometnog toka ovisno o izvedbi može sadržavati jedan senzorski element ili više senzorskih elemenata.

Dvije su osnovne vrste detektora prometnog toka s obzirom na postavljanje: intruzivni i neintruzivni. Detektori ili senzorski element intruzivnih detektora prometnog toka postavljaju se u prometnu površinu, u urezane utoke ili izbušene rupe. Iznimno se neke vrste detektora mogu postaviti na samu prometnu površinu, no onda služe samo za privremeno prikupljanje podataka. Neintruzivni detektori prometnog toka ili njihov senzorski element postavljaju se na stupove pokraj prometnice ili konzole iznad prometnice.

4.1 Intruzivni detektori prometnog toka

4.1.1 Induktivna petlja

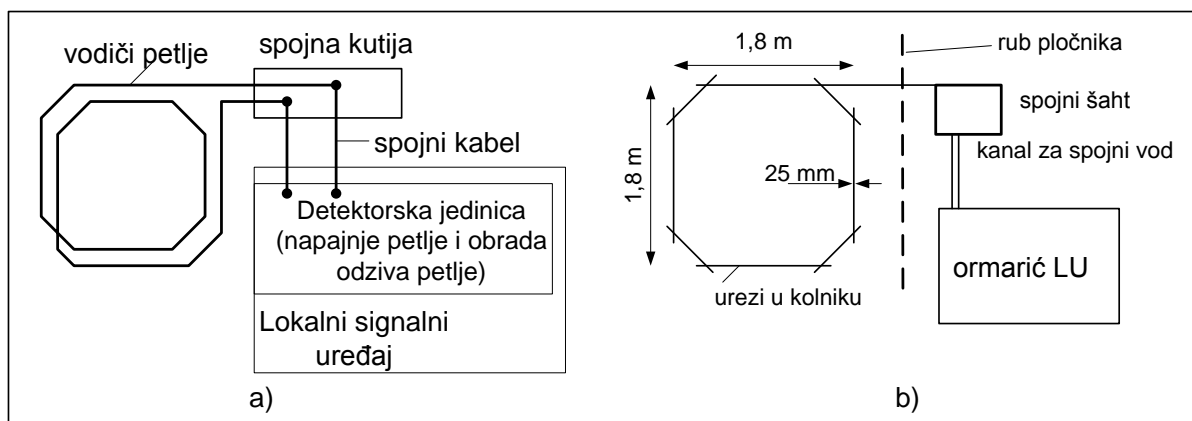
4.1.1.1 Princip rada i osnovne značajke induktivne petlje

Induktivna petlja je jedan od prvih detektora prometnog toka. Unatoč tome još uvijek je i danas najrašireniji detektor pogotovo u Europi i Sjevernoj Americi. Tome zasigurno pridonosi činjenica o konstrukcijskoj jednostavnosti senzorskog elementa i dugi *radni staž*. Osnovni elektrotehnički dijelovi detektora na osnovi induktivne petlje su, Slika 4.1 a):

- jedan ili više zavoja vodiča koji čine petlju, odnosno senzorski element
- detektorska elektronička jedinica,
- spojni kabel koji povezuje vodiče petlje s detektorskom jedinicom.

Elektrotehničke dijelove treba zaštititi od utjecaja prometa i vremenskih prilika, stoga postoji nekoliko nužnih građevinskih elemenata, Slika 4.1 b):

- utori ili kanali u kolniku gdje se postavljaju vodiči petlje i ispuna brtvilom
- spojna kutija najčešće od betona gdje se spajaju vodiči petlje sa spojnim kabelom
- ormarić gdje se smješta detektorska jedinica (ili u ormariću signalnog uređaja)
- kanal za spojni kabel koji vodi od spojne kutije do ormarića.



Slika 4.1 a) Električka shema induktivne petlje b) Građevinska skica za postavljanje induktivne petlje

Zavoji petlje, spojni vod i izolacije, električki gledano, kombinacija su otpora, induktiviteta i kapaciteta, i čine titrajni krug. Induktivitet petlje određen je permeabilitetom, brojem zavoja, površinom i visinom petlje. Uniformni magnetski tok imala bi petlja kružnog oblika, no zbog problema pri rezanju utora takvog oblika koristi se kvadratni ili pravokutni oblik. U primjeni se mogu naći i kružni oblici petlji, no to je uglavnom ograničeno na slučajeve kada se petlja već u proizvodnji integrira u *dio* kolnika. Kako se kod pravokutnog oblika vodiči petlje ne bi svijali pod pravim kutom i nasjedali na oštri rub, utor u kolniku oblika je prema Slika 4.1 b). Utjecaj oblika petlje na magnetski tok odnosno na induktivitet u jednadžbi (4.1) prikazan je faktorom oblika petlje F_o

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} F_o \quad (4.1)$$

gdje je: μ - permeabilnost

A - površina petlje

N - broj zavoja petlje

l - visina petlje

F_o - faktor utjecaja oblika petlje

Kapacitet postoji između zemlje i vodiča, a izolacija i materijal brtvila predstavljaju dielektrik. Nadalje, postoji kapacitet između samih vodiča. Induktivitet, kapacitet i otpor petlje čine titrajni krug i određuju frekvenciju rezonancije petlje.

Ukupni induktivitet, na koji osim induktiviteta petlje utječe i induktivitet spojnoga kabela, mora biti u granicama za koje je detektorska jedinica konstruirana. Detektorska jedinica napaja titrajni krug, a frekvencija se podešava u granicama od 10 kHz do 200 kHz. Kada vozilo prolazi iznad petlje koja generira magnetski tok, u željezu vozila induciraju se vrtložne struje čiji magnetski tok je suprotan smjeru magnetskog toka petlje. Rezultat je smanjenje ukupnog toka, a time i smanjenja induktiviteta. Smanjenje induktiviteta uzrokuje povećanje frekvencije, koje registrira detektorska jedinica, i generira signal detekcije. Promjene induktiviteta zbog prisutnosti vozila u odnosu na praznu petlju bitna je karakteristika petlje, koja izravno utječe na mogućnost detekcije različitih vozila, i naziva se osjetljivost petlje S_L , jednadžba (4.2).

$$S_L = \frac{L_{NV} - L_V}{L_{NV}} = \frac{\Delta L}{L_{NV}} \quad (4.2)$$

gdje je: L_{NV} - induktivitet prazne petlje (nema vozila iznad petlje)

L_V - induktivitet pune petlje (vozilo prisutno iznad petlje)

Osjetljivost raste s omjerom površine donjeg postroja vozila i površine petlje. Stoga je bitno da vozilo u trenutku prolaska što više pokriva petlju, odnosno postavljena petlja mora imati odgovarajuće dimenzije i položaj. Osjetljivost pada s kvadratom visine donjeg postroja vozila, stoga je vozila s visokim donjim postrojem npr. visoko osovinske kamione teže detektirati nego osobna vozila. Što se tiče osjetljivosti petlje za motocikle i bicikle, odnosno vozila s "vertikalnom" konstrukcijom, osjetljivost petlje načelno je mala, a najveća je kada bicikl prolazi sredinom petlje. No, kako takva vozila voze uglavnom uz rub kolnika za njihovu detekciju potrebno je koristiti posebne petlje.

Lokacija petlje i konstrukcija prometnice također imaju utjecaj na osjetljivost. Ako se osjetljivost promatra na kraju spojnoga kabela, što je ormarić detektorske jedinice udaljeniji od detektorske jedinice tj. što je spojni kabel dulji, osjetljivost je manja. Spojni kabel duljine 50 metara smanjuje osjetljivost petlje za oko 1%. Nadalje, postojanje armirane mreže u kolniku također smanjuje osjetljivost petlje. Stoga detektori na osnovi induktivne petlje iste specifikacije generiraju različite signale ovisno o lokaciji petlje i konstrukciji prometnice. Nadalje, promjene temperature i vlažnosti također mogu imati utjecaja, stoga se nakon postavljanja detektor treba podesiti.

Detektorska elektronička jedinica napaja petlju i analizira signal petlje. Kako na frekvenciju rezonancije sustava utječu i ostali faktori, npr. duljina spojnoga kabela i izolacija, to će frekvencija titranja biti određena ekvivalentnim induktivitetom i ekvivalentnim kapacitetom koji uključuje i kapacitet za podešavanje što se nalazi u detektorskoj jedinici. Ako su gubici petlje relativno mali tj. ako je faktor dobrote petlje veći od 5, frekvencija titraja f_D određena je izrazom (4.3)

$$f_D = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_D C_D}} \quad (4.3)$$

gdje je: f_D - frekvencija titraja cijelog sustava kada je petlja postavljena

L_D - ekvivalentni induktivitet koji uzima u obzir sve moguće komponente

C_D - ekvivalentni kapacitet koji uzima u obzir sve moguće komponente

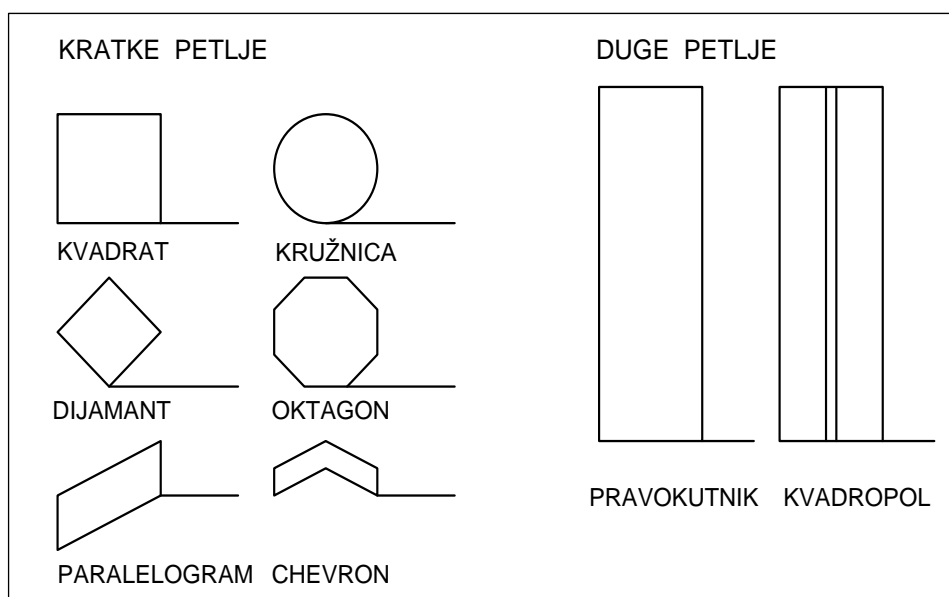
Načelno, detektorska jedinica ima postavljenu vrijednost praga, čijim prelaskom se generira signal detekcije. Prag se zadaje kao promjena frekvencije ili promjena induktiviteta. Tipične vrijednosti pragova kreću se od 0,13% do 3,2% za promjenu frekvencije ili 0,12μH do 3μH za promjenu induktiviteta. Osjetljivost detektora definira se kao najmanji omjer $\Delta L/L$ koji će prijeći prag, odnosno pobuditi detektorsku jedinicu. Stoga je detektor osjetljiviji što je manja vrijednost $\Delta L/L$ potrebna za generiranje signala detekcije. Postoji nekoliko metoda obrade signala s ciljem dobivanja signala detekcije: analiza promjene frekvencije Δf , analiza omjera

promjene frekvencije i frekvencije prazne petlje $\Delta f/f$, analiza promjene perioda ΔT , analiza omjera promjene perioda i perioda prazne petlje; $\Delta T/T$.

Prvi postupak se ne koristi u praksi jer povećanje ukupnog induktiviteta spojnog voda može toliko smanjiti osjetljivost detektora da se mogućnost detekcije gubi. Drugi i četvrti postupak pogodni su zbog toga što osjetljivost detektora ne ovisi o ukupnom induktivitetu, što omogućuje primjenu raznih duljina spojnoga kabela, promjenu radnih frekvencija, te spajanje petlji u seriju ili paralelno. Nedostatak je što se povećanjem induktiviteta produljuje vrijeme odziva, što utječe na točnost mjerenja prometnih parametara.

4.1.1.2 Vrste induktivnih petlji

Induktivne petlje imaju razne oblike, Slika 4.2. Na oblik utječe i funkcija petlje. Osnovna podjela može se napraviti na duge petlje i kratke petlje. Kratke petlje, s malom detekcijskom zonom, u funkciji su detekcije prolaska vozila. Kratkim petljama ima raznih oblika, a najčešće upotrebljavane su kvadratne petlje dimenzija 1,5x1,5 m, 1,8x1,8 m, ili 2x2 m. Na dimenzije kratke petlje utječe traženi stupanj zaštićenosti od detekcije vozila iz susjednih trakova. Naime, postavljena petlja treba biti dovoljno udaljena od susjednog traka, kako se ne bi generirao signal detekcije uzrokovan vozilom iz susjednog traka.



Slika 4.2 Primjeri raznih oblika induktivnih petlji

U uskoj vezi s funkcijom petlje je režim rada detektorske elektroničke jedinice, a to je nadalje povezano s stanjem memorije signalnoga lokalnog uređaja. Razlikuju se kontinuirani i pulsni režim rada. Kontinuirani režim rada podrazumijeva da je signal detekcije prisutan na izlazu detektorske jedinice sve dok je petlja zauzeta vozilom. Tzv. neuvjetovana memorija je pojam koji znači da signalni lokalni uređaj pamti najavu (prisutnost) vozila dok se vozilo nalazi na petlji. Odlaskom vozila briše se i najava vozila. Taj režim rada vezan je uz primjenu dugih petlji. Kod pulsnoeg režima rada detektorska jedinica (sklopovi za obradu signala petlje) generira kratki impuls tj. signal trajanja od 100 ms do 150 ms, prilikom svakog prolaska vozila. Vrijeme pamćenja (zadržavanja u memoriji) signala detekcije odnosno najave vozila

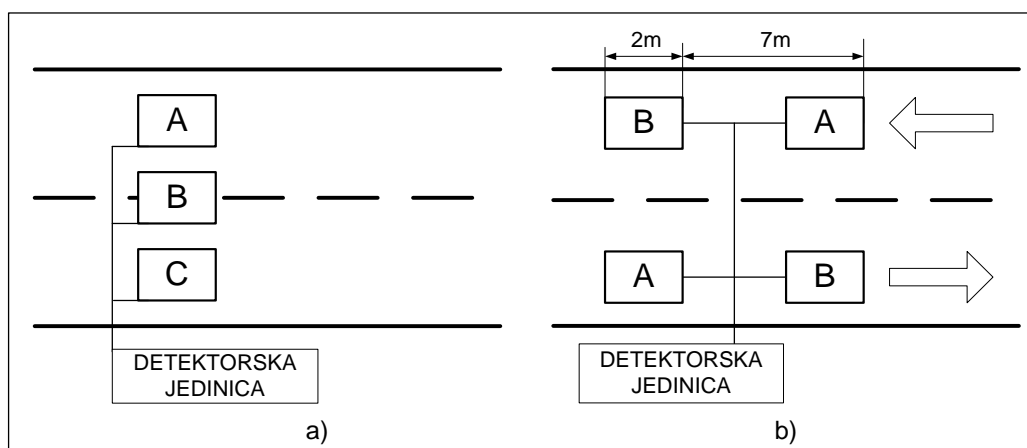
uvjetovano je logikom upravljanja. Stoga se taj način naziva uvjetovana memorija i primjenjuje se kod kratkih petlji, koje registriraju prolazak vozila.

Kratka petlja postavljena u svakom traku pogodna je za mjerenje volumena i zauzeća. Međutim na mjestima gdje su česta prestrojavanja i pretjecanja, mogu nastati značajne pogreške. Pogreške u mjerenju intenziteta, volumena i zauzeća nastaju zbog neodgovarajućeg položaja vozila u odnosu na petlju. Postavljanjem triju petlji na dva traka prema slici Slika 4.3 a), i detektorskom jedinicom s pripadnom logikom koja obrađuje kombinacije signala petlji, postiže se veća točnost prilikom mjerenja tih parametara.

Induktivnom petljom brzina se može mjeriti jednom petljom ili parom petlji tzv. "brzinskom klopkom". Pomoću jedne petlje dobiva se samo približan podatak o brzini, izraz (4.4), iz pretpostavljene duljine vozila, vremena zauzeća, i efektivne duljine detekcijske zone, koja je zbog rasipanja magnetskog toka nešto veća od same petlje

$$v = \frac{l_{pV} + l_{efd}}{t_z} \quad (4.4)$$

gdje je: v - brzina; t_z - vrijeme zauzeća petlje; l_{pV} -pretpostavljena duljina vozila
 l_{efd} - efektivna duljina detekcijske zone



Slika 4.3 a) Konfiguracija petlji za smanjenje utjecaja neodgovarajućeg položaja vozila;
 b) Konfiguracija petlji za mjerenje brzine "brzinskom klopkom"

Za mjerenje brzine "brzinskom klopkom" u trak se stavljaju dvije petlje, Slika 4.3 b) s definiranom međusobnom udaljenošću. Prilikom prolaska vozilo sukcesivno pobuđuje petlje. Detektorska jedinica registrira vrijeme proteklo između dviju pobuda. Na osnovi udaljenosti petlji i podatka o proteklom vremenu izračunava se brzina.

Namjenska suvremena detektorska jedinica induktivne petlje u mogućnosti je klasificirati vozila obradom signalnog odziva petlje. Na signalni odziv petlje utječe duljina vozila, položaj motora, konfiguracija i udaljenost donjeg postroja od petlje, i broj osovin. Dodatnom obradom sirovoga signalnog odziva standardne induktivne petlje (1.8 m x 1.8 m) moguća je klasifikacija vozila u 7 kategorija s točnošću u granicama 81%-91% (Sun, 2000). Što se tiče utjecaja oblika

petlje na mogućnost detekcije pojedinih vrsta vozila, izvješća se ponešto razlikuju. Osjetljivost različitih oblika petlji ne razlikuje se znatnije, s time da su neki oblici pogodniji za detekciju malih vozila, npr. Chevron petlja. Pri detekciji vozila s visokim donjim postrojem kudikamo veću ulogu ima broj zavoja petlje, negoli oblik. Veći broj zavoja povećava osjetljivost petlje, a time i mogućnost detekcije takvih vozila. Npr., petlja s 7 zavoja uspješno detektira visoko osovinska vozila. Postoje specijalizirani proizvodi na osnovi induktivne petlje, primjerice IVS-2000, koji imaju zadatak klasifikacije vozila u kategorije, ali se ne koriste za posebno uvažavanje prioritetnih vozila u urbanoj sredini.

Za detekciju prisutnosti vozila koriste se duge petlje s velikom detekcijskom zonom. Dugom petljom ili petljom s velikom detekcijskom zonom smatra se petlja duljine preko 6 metara. Širina petlje prilagođena je širini traka. Duga petlja pravokutnog oblika još je podložnija utjecaju vozila iz susjednih trakova, nego kratka petlja. Primjena kvadropolne petlje zbog ožičenja oblika *osmice*, koja pojačava magnetsko polje unutar petlje a slabi magnetsko polje izvan, smanjuje utjecaj vozila iz susjednih trakova. No, kvadropolna petlja zahtijeva više ureza u kolniku, što slabi površinu kolnika. Duga petlja se postavlja neposredno uz zaustavnu crtu, ili se katkada i produljuje preko zaustavne linije u raskrižje kako bi se detektiralo da je vozilo napustilo raskrižje. Duljina duge petlje određena je zahtjevima upravljanja u prometu i prometnim uvjetima.

Duga petlja može se zamijeniti nizom kratkih petlji, što donosi nekoliko prednosti. Kratke petlje zaštićenije su od utjecaja vozila iz susjednih trakova i imaju bolja svojstva glede detekcije manjih vozila. No najvažnija prednost je manja vjerojatnost kvara, zbog oštećenja, loma ili nabiranja kolnika. Kod niza kratkih petlji koje zamjenjuju dugu petlju postoji razmak koji ne bi trebao biti veći od duljine vozila, kako bi najava vozila stalno postojala. Ako je taj razmak veći, prilagođuju se vremenske varijable u programu upravljanja. Primjerice, pri produljenju vremena propuštanja na osnovi pobude (najave) vozila, potrebno je intervale produljenja propuštanja postaviti na male vrijednosti.

Detekcija duljine repa čekanja vozila može se napraviti s dvjema petljama. Jedna petlja nalazi se kod zaustavne linije, a petlja detekcije duljine repa na određenoj udaljenosti. Signal detekcije prisutnosti vozila s petlje detekcije repa značit će postojanje repa. Logikom upravljanja može se ustanoviti broj vozila u repu, ali to vrijedi samo ako rep ne prelazi dodatnu petlju. Na petlju detekcije repa postavljaju se sljedeći zahtjevi: petlja treba biti dovoljno dugačka da premosti razmak između vozila u mirovanju i kraća od najkraćeg razmaka između vozila koja se kreću. Najčešće se uzima duljina petlje detekcije od 9 m.

4.1.1.3 Postavljanje petlje

Postavljanje petlje je proces koji ima iznimnu važnost. Nepravilno i nebržno postavljanje uzrokuje kvarove detektora i/ili nepravilno funkcioniranje. Postavljanje petlje sastoji se od niza radnji: urezivanje utora u kolniku motornom pilom, polaganje vodiča petlje u utor, punjenje utora brtvilom, spajanje vodiča petlje sa spojnim kabelom, povezivanje spojnoga kabla s detektorskom jedinicom.

Prije postavljanja petlje priprema se projektna dokumentacija, koja će među ostalim, sadržavati plan postavljanja u mjerilu (utore za vodiče petlje, kanal za spojni kabel) u odnosu na

konstrukcijske elemente i oznake na prometnici. Zbog intruzivnog načina postavljanja i fizikalnog principa rada petlje treba voditi računa o nizu faktora: hidranti, šahtovi, konstrukcijska podloga kolnika, elektroenergetski kabeli, telekomunikacijski kabeli, tramvajske i željezničke tračnice.

Najveći broj kvarova detektora na osnovi induktivne petlje odnosi se na kvar same petlje ili spoj vodiča petlje sa spojnim kabelom. Vjerojatnost kvara suvremenih digitalnih samo podešavajućih detektorskih jedinica je gotovo zanemariva, u odnosu na kvar same petlje. Kvarovi se odnose na prekid vodiča ili oštećenje izolacije. Mehanizmi nastanka kvarova mogu biti različiti: kolnik loše kvalitete koji se nabire ili puca, nepropisno brtvljenje koje omogućuje ulazak vlage, loš materijal brtvila što dopušta vodičima petlje izlazak na površinu, i strani materijali u utoru kao rezultat nepažljivog čišćenja utora.

4.1.2 Magnetski detektori

Magnetski detektori su pasivni uređaji, ne stvaraju vlastito elektromagnetsko polje, već detektiraju promjene zemljinoga magnetskog polja uzrokovane prolaskom vozila. Prisutnost željeznog vozila uzrokuje magnetsku anomaliju poznatu i kao magnetska sjena vozila. Željezo vozila je feromagnetski materijal s većom permeabilnošću od zraka, te pruža i manji otpor magnetskom toku. Stoga će gustoća zemljinoga magnetskog toka biti veća u području koje zahvaća vertikalna projekcija vozila, a u okolini vozila gustoća toka bit će manja.

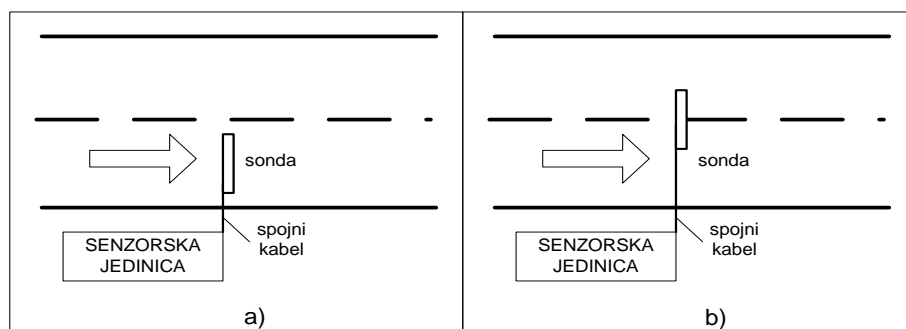
Magnetski detektor sastoji se od sonde, spojnoga kabela i detektorske elektroničke jedinice. Sonda cilindričnog oblika sadrži senzorski element koji se sastoji od nekoliko serijski spojenih zavojnica s visoko permeabilnom jezgrom. Načelno, magnetska anomalija, odnosno promjena magnetskog toka u vremenu uzrokovana vozilom inducirat će napon u zavojnici, koji će obraditi elektronička jedinica i generirati signal detekcije. S obzirom na građu sonde, princip rada i dimenzije razlikuju se dvije skupine magnetskih detektora: magnetski detektor s ispitnom zavojnicom i magnetometar.

4.1.2.1 Magnetski detektor s ispitnom zavojnicom

Sonda magnetskog detektora s ispitnom zavojnicom je cilindričnog oblika, dimenzija reda veličine 5-6 cm u promjeru i 50-60 cm duljine. Sonda se postavlja u tunel ispod površine kolnika, i to okomito na smjer prometnog toka. Za generiranje signala potrebna je neka minimalna brzina vozila 5-8 km/h. Odnosno, ne postoji mogućnost detekcije zaustavljenog vozila. Magnetski detektor s ispitnom zavojnicom ne može davati podatke o zauzeću, osim u slučaju ako se koristi više sondi i dodatna obrada signala.

Sonda se postavlja isključivo na području slobodnoga prometnog toka na dovoljnoj udaljenosti od zaustavne crte, jer ne može detektirati zaustavljeno vozilo ili sporo vozilo. Snaga impulsa koji generira zavojnica to je veća što vozilo izaziva veći i brži poremećaj magnetskih silnica, tj. što vozilo prolazi brže i bliže sondi. Za mjerenje prometa u jednom traku sonda se postavlja u sredini traka s osi sonde okomitom na smjer prometnog toka i paralelno s površinom kolnika, Slika 4.4. a). Vozila iz susjednih trakova također izazivaju manje magnetske anomalije, no namještanjem praga osjetljivosti ti slabi impulsi se zanemaruju. Jedna sonda može poslužiti za

mjerenje prometa ili upravljanje prometom i za dva traka istog smjera. U tom slučaju sonda se postavlja kao na Slika 4.4 b). Naravno, tu ne postoji mogućnost razlučivanja podataka po trakovima.



Slika 4.4 Položaji sonde magnetskog detektora s ispitnom zavojnicom

Magnetski detektori s ispitnom zavojnicom su jeftini, jednostavni i robusni uređaji koji su pogodni za uporabu gdje je površina kolnika loša i oštećena, te gdje nije preporučljivo površinu kolnika rezati ili bušiti. Najčešći način postavljanja magnetske sonde je bušenje tunela ispod prometnice. Tunnel se buši iz prostora pokraj prometnice, tako da teorijski samo postavljanje ne ometa znatno odvijanje prometnog toka. U tunnel se zatim postavlja kabelska zaštitna cijev, a u nju magnetska sonda.

Osobitu pozornost treba posvetiti spajanju i smještaju vodova. Naime, magnetska sonda generira vrlo slabe signale te prigušenje signala u spojnom vodu ili utjecaj drugih vodova mogu uzrokovati pogreške pri detekciji. Robusnost magnetske sonde, propisno izvedeno postavljanje i spajanje rezultiraju izrazito dugim radnim vijekom, koji može biti dulji od dvadeset godina.

Mikropetlja je poseban tip magnetskog detektora. Sonda mikropetlje je cilindričnog oblika oko 2 cm u promjeru i duljine oko 9 cm. Naziva se mikropetlja jer promjene magnetskog polja uzrokovane prolaskom vozila pretvara u promjene induktivnosti. Detektorska elektronička jedinica je ista kao i za induktivnu petlju. Mikropetlje, ovisno o modelu, postavljaju se u izbušene rupe u kolniku, ili u horizontalne tunele izbušene iz prostora pokraj prometnice. Najčešće se postavlja više povezanih sondi, kako bi se osigurala pokrivenost željenog područja. Obradom signala i programskom podrškom može se registrirati i zaustavljeno vozilo.

4.1.2.2 Magnetometar

Magnetometarski detektor sastoji se od magnetometarske sonde, spojnog voda i detektorske (detektorske) elektroničke jedinice. Može biti izveden i bez spojnog voda, SPVD magnetometar (*Self Powered Vehicle Detector*), a povezan je radiovezom sa signalnim uređajem.

Tipična magnetometarska sonda je valjkastog oblika dimenzija 2,5 cm u promjeru i duljine 10 cm. Postavlja se u rupu izbušenu u kolniku. Sonda sadrži jezgru, primarne zavojnice i sekundarne zavojnice tvoreći mali stabilni transformatorski element. Pobudna struja je trokutastog oblika, tako da postoji stalni signal na sekundaru. Sekundarna zavojnica protjecana je podešenom istosmjernom strujom kako bi se neutralizirao utjecaj okoline. Magnetska

anomalija izazvana vozilom uzrokovat će promjenu magnetskog polja, a time promjenu signala sekundara i generiranje signala detekcije.

Stariji jednoosni magnetometri reagiraju samo na promjenu vertikalne komponente zemljinog polja, te im osjetljivost ovisi o geografskoj širini, a u blizini ekvatora nisu upotrebljivi. Dvoosni magnetometri imaju dvije sekundarne zavojnice. Jedna detektira promjene vertikalne komponente zemljinoga magnetskog polja, a druga, postavljena pod kutom 90°, detektira promjene u horizontalnoj komponenti polja, i osjetljivost ne ovisi o geografskoj lokaciji.

Zona detekcije jedne magnetometarske sonde je "točkasta", krug promjera manjeg od 1 m. Kako magnetometar reagira na magnetsku sjenu vozila, koja otprilike odgovara projekciji vozila na površinu prometnice, dio vozila mora proći iznad sonde kako bi se generirao signal detekcije. Povećanje detekcijske zone postiže se s više sondi priključenih na jedan kanal detektorske jedinice. No tada se osjetljivost kanala dijeli na pojedine sonde. Npr., četiri sonde na jednom kanalu znače da je osjetljivost kanala nepromijenjena, ali osjetljivost svake sonde iznosi 25% osjetljivosti kanala. Broj sondi i njihov položaj ovisit će o geometriji prometnice i vrsti vozila koje se želi detektirati. Što je vozilo manje, potrebno je više sondi s manjom međusobnom udaljenošću kako bi vozilo "zahvatilo" detekcijsku zonu, te veća osjetljivost sonde što ograničuje broj sondi po kanalu. U Tablica 4.1 dane su neke preporučene vrijednosti geometrije postavljanja i broja sondi po kanalu.

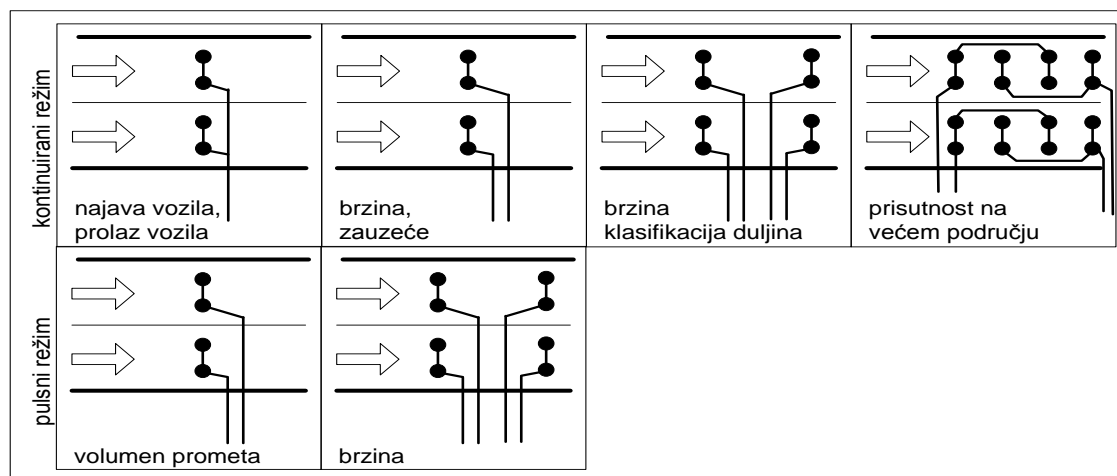
Tablica 4.1 Međusobna udaljenost magnetometarskih sondi i maksimalan broj sondi po kanalu za detekciju pojedinih kategorija vozila

Vrsta vozila	Udaljenost između sondi	Maksimalni broj sondi po kanalu
osobna vozila, autobusi	1,5 m	6
motocikli	0,9-1,2 m	3-4
bicikli	0,9 m	3

Dubina postavljanja utječe na ponašanje magnetometra. Sonda postavljena na dubini 15 cm od površine prometnice smatra se plitko postavljenom, a na dubini od 60 cm duboko postavljenom. Plitko postavljena sonda ima bolju osjetljivost, prolaz vozila generira jaki signal, međutim postoji velika vjerojatnost višestrukog brojenja jednog vozila. Duboko postavljena sonda ima manju osjetljivost, ali nema pogrešaka u brojenju prometa. Prema tome, dubina postavljanja sonde uvjetuje njenu funkciju. Plitko postavljena sonda pogodna je za vrstu upravljanja prometom pri kojemu je bitno registrirati vozilo, najava. Međutim, ako su potrebni podaci o volumenu prometa, bit će pogodnija duboka sonda, no pri tome detekcija manjih vozila nije sigurna.

Magnetometarski detektor može davati podatke o prisutnosti vozila, zauzeću, brzini, volumenu prometa. No, to podrazumijeva uporabu više detektorskih kanala i više sondi povezanih na te

kanale. Za dobivanje podataka o pojedinim parametrima, funkciju u upravljanju te režim rada, pulsni ili kontinuirani, potrebne su različite geometrije postavljanja, Slika 4.5.



Slika 4.5 Konfiguracija sonde magnetometra za mjerenje prometnih parametara

Načelno, magnetometri mogu davati iste podatke i služiti istoj funkciji kao i induktivna petlja. U pulsnom režimu rada registriraju prolaz vozila, a u kontinuiranom režimu generiraju signal izlaza dok god postoji magnetska anomalija u detekcijskoj zoni. Za razliku od petlje, a što je rezultat "točkaste" detekcijske zone, imaju bolju razlučivost glede brojenja vozila. Razlučuju vozila kojima je udaljenost slijeđenja veća od oko 1m. Međutim, određivanje pozicije vozila je manje točno, što uzrokuje i manju točnost pri mjerenju zauzeća i brzine vozila. Magnetometri se inače ne koriste za klasifikaciju iako neka testiranja pokazuju mogućnost klasifikacije po duljini vozila. Tako rezultati testiranja klasifikacije magnetometrom pokazuju postignutu točnost od 80% prilikom klasifikacije vozila u pet klasa po duljini vozila (Skabardonis et al., 2008).

Uporaba magnetometra je prikladna na mostovima, vijaduktima i kolnicima koji su u lošem stanju. Ako se postavlja na mostu ili vijaduktu, treba se postaviti na maksimalnoj mogućoj udaljenosti od masivnih čeličnih elemenata. Na pravilno funkcioniranje magnetometra može utjecati blizina cjevovoda, tramvajskih linija i vodova elektroenergetske mreže.

U odnosu na petlju, postavljanje magnetometra je jednostavnije i brže. Iako otporniji od petlje na vanjske utjecaje (habanje, pucanje i nabiranje kolnika), nije potpuno imun na te utjecaje. Čimbenici koji pri postavljanju i radu utječu na pravilan rad su: dubina postavljanja sonde, mehanička stabilnost sonde, prodor vlage u sondu i održavanje brtvila rupe i utora.

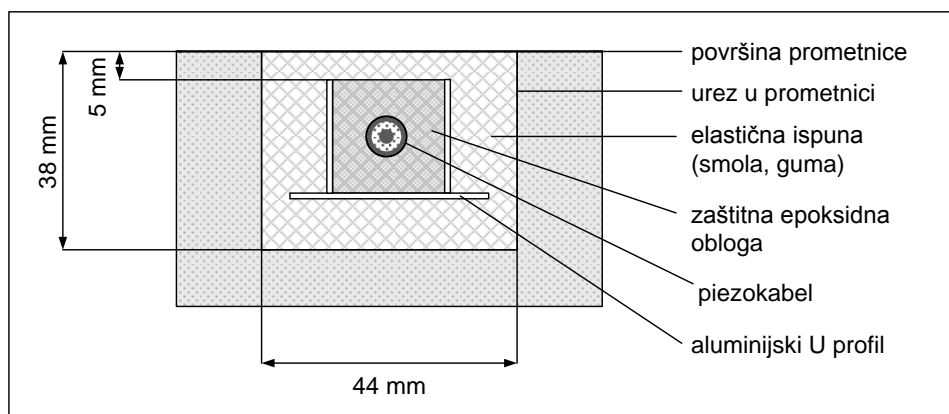
Spomenuti SPVD magnetometar karakterizira smanjeno potrebno održavanje jer nema spojnih vodova. U hermetički zatvorenom kućištu, osim magnetometrske sonde, nalazi se napajanje-baterija, elektronički modul za obradu signala sekundara te predajnik s antenom. Dimenzije kućišta su oko 10 cm u promjeru i visine 17 cm. Prema podacima proizvođača, takav tip magnetometra može funkcionirati oko 5 godina bez održavanja.

4.1.3 Piezoelektrički detektori

Piezoelektrici su materijali sa svojstvom generiranja napona na svojim ploham ako se na njih pod određenim smjerovima djeluje vlakom ili tlakom. Kao piezoelektrički materijali koriste se specijalni piezopolimeri, piezokeramike i kristali (kvarc). Kada vozilo prelazi preko detektora, piezoelektrički materijal generira napon proporcionalan sili odnosno težini vozila. Senzorski element piezoelektričnog detektora izrađuje se u obliku koaksijalnoga kabela ili nagazne površine.

Prema mogućnostima dijele se na dvije klase. Klasa I piezoelektričnih detektora detektira osovine i daje podatak o težini (težina na osovini). Klasa II piezoelektričnih detektora samo detektira prelazak osovine, stoga može klasificirati vozila samo prema broju osovina.

Piezokabel je građen kao koaksijalni kabel: ima metalnu jezgru, piezoelektrični materijal i metalni omotač. Primjer postavljenog piezokabela dan je na Slika 4.6. Aluminijski U profil (aluminijski kanal), zajedno s epoksidnom zaštitom, u funkciji je olakšavanja postavljanja (smanjenje vjerojatnosti nepravilnog postavljanja). Elastična ispuna ima zadatak zaštite i prijenosa vertikalne sile, sa što manjom horizontalnom komponentom.

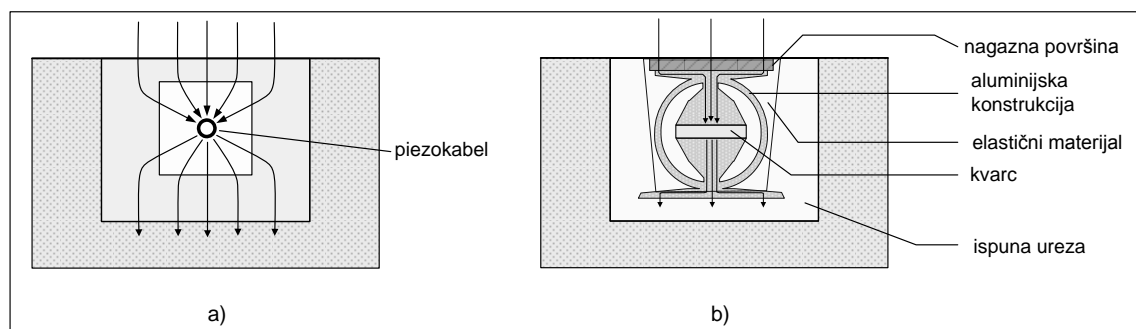


Slika 4.6 Postavljeni piezokabel u presjeku

Obični piezokabel osjetljiv je na tlak iz svih smjerova, što smanjuje točnost prilikom mjerenja težine, Slika 4.7 a). Specijalno za prometnu namjenu razvijen je LINEAS kvarcni detektor, tvrtke Kistler Instruments Corporation, Slika 4.7 b). Kvarc kao piezomaterijal ima vrlo dobra svojstva. Daje linearni izlaz, tj. ovisnost generiranog napona o težini vozila je linearna i zadržava napon na ploham pri stacionarnom tlaku. Konstrukcijom LINEAS senzorskog elementa postignuta je osjetljivost samo na vertikalnu komponentu sile, za razliku od piezokabela koji su osjetljivi i na druge smjerove sile. Nadalje, LINEAS zbog uporabe kvarca karakterizira širok mjerni raspon. Utjecaj temperature je praktički zanemariv. S aspekta trajnosti, kvarc kao piezoelektrični materijal načelno manje stari od drugih materijala i ne dolazi do zamora materijala.

Piezoelektrični detektori mogu davati podatke o intenzitetu (volumenu) prometa, klasifikaciji na osnovi brojenja osovina, o težini vozila, o brzini vozila. Mjerenje brzine zahtijeva barem dva senzorska elemenata. Piezoelektrički detektori često se koriste za dinamičko mjerenje

težine vozila u pokretu WIM (*Weigh in Motion*). Stoga se mogu primjenjivati u proceduri zabrane odnosno isključivanja iz prometa teških vozila i na urbanim prometnicama.



Slika 4.7 a) Djelovanje sile na piezokabel
b) Djelovanje sile na LINEAS – kvarcni senzor

Slično kao i kod induktivne petlje, kvaliteta prometne površine utječe na vjerojatnost kvarova i životni vijek piezodetektora. Propadanje prometne površine i pojava nabiranja mogu smanjiti točnost glade mjerenja težine. Nabiranje i neravnine na prometnoj površini prije mjesta gdje je postavljen piezosenzor uzrokuju pulsirajući pritisak guma vozila na podlogu, pa ako se piezodetektor koristi u svrsi detekcije, rezultat može biti i izostanak detekcije ili pogrešna klasifikacija prema broju osovina.

4.2 Neintruzivni detektori prometnog toka

4.2.1 Pasivni infracrveni detektori

Senzorski elementi infracrvenih detektora osjetljivi su na zračenje u infracrvenom području elektromagnetskog spektra. Sustavom optike energija zračenja usmjeruje se na osjetljiv materijal, koji primljenu energiju pretvara u električki signal. S obzirom na razlučivost, postoje neslikovni i slikovni. Neslikovni detektori imaju najviše do pet odvojenih energetskih elemenata, dok slikovni imaju dvodimenzionalno polje infracrveno osjetljivih elemenata (piksela), i stvaraju sliku u infracrvenom području.

Svaki objekt koji nije na temperaturi apsolutne nule (0 K) zrači u infracrvenom području elektromagnetskog spektra (emitira termalno zračenje). Zračena snaga objekta ovisi o temperaturi površine objekta, veličini i strukturi. Pasivni detektor reagira na promjene energije zračenja. Ulaskom vozila u detekcijsku zonu, mijenja se energija zračenja zbog promjene temperature u vidnom polju detektora, a dolazi i do promjene reflektirane energije okoline.

Otvor detektora pokriva detekcijsku zonu, koja je određena konstrukcijom optike, Slika 4.8. Zračenje prometne površine koje hvata detektor proporcionalno je prividnoj temperaturi prometne površine. Prividna temperatura prometne površine rezultat je zračenja prometnice i zračenja okoline koje se reflektira od prometnice. Prividna temperatura vozila koje se nalazi u detekcijskoj zoni također je rezultat zračenja vozila i zračenja okoline koje se reflektira od

vozila. Signal koji generira detektor bit će razmjeran razlici prividnih temperatura. Razlika prividnih temperatura prometnice i vozila dana je izrazom (4.5)

$$\Delta T_P(\theta, \phi) = (\varepsilon_P T_P - \varepsilon_V T_V) + (\varepsilon_V - \varepsilon_P) T_{OK} \quad (4.5)$$

gdje je: T_{OK} – temperatura okoline

T_P – temperatura prometnice

T_V – temperatura vozila

ΔT_P – razlika prividnih temperatura

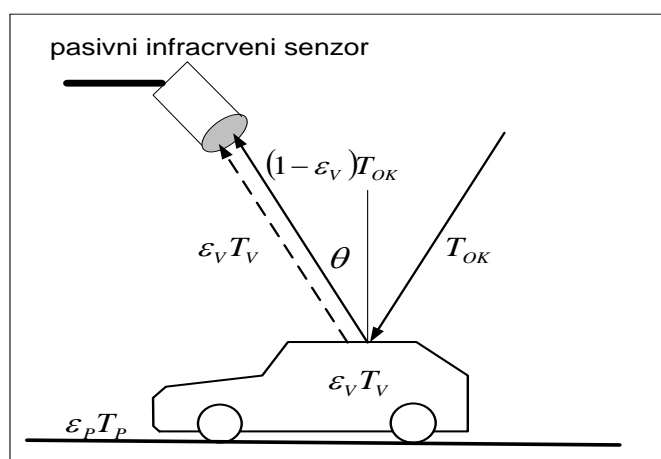
ε_P – faktor emisije prometnice

ε_V – faktor emisije vozila

θ - kut između optičke osi detektora i pravca okomitog na prometnicu, u ravnini okomitoj na prometnicu

ϕ - kut između optičke osi detektora i pravca paralelnog s prometnicom, u ravnini prometnice

U slučaju da su temperature vozila i prometne površine jednake, postoji razlika prividnih temperatura zbog različitih faktora emisije. Pojava jednakih faktora emisije za prometnu površinu i vozilo, koja bi rezultirala izostankom signala detekcije je zanemariva.



Slika 4.8 Emisija i refleksija energije vozila

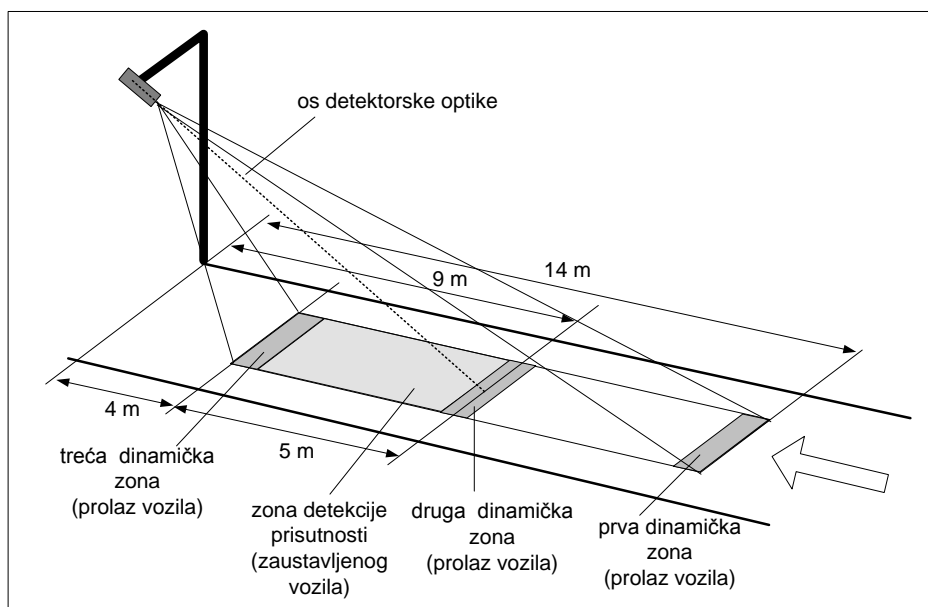
Senzorski piroelektrički element osjetljiv je na daleko infracrveno zračenje 8-14 μm . U tom području sposobnost detekcije ne ovisi o uvjetima osvjetljenja ili boji objekta. Kiša i velika vlaga uzrokuju porast temperature okoline što može rezultirati slabljenjem signala. Neželjene signale može izazvati i odbljesak sunca. Izrazito loše vrijeme, gusta magla, gusti snijeg, mogu raspršiti ili apsorbirati energiju prije nego što je uhvati otvor detektora. Za udaljenosti detektor-detekcijska zona do desetak metara³, atmosferski utjecaji ne izazivaju značajnu degradaciju svojstava.

Neslikovni pasivni infracrveni detektori mogu imati jedan ili više energetske osjetljivih elemenata. Neslikovni pasivni detektor s jednom detekcijskom zonom može detektirati prolaz i prisutnost vozila, odnosno može davati podatke o volumenu prometa i zauzeću detekcijske

³ Infracrveni senzori dometa reda veličine do deset-dvadeset metara smatraju se senzorima kratkog dometa

zone. Pasivni detektor s više energetski osjetljivih elemenata, odnosno više detekcijskih zona, uz analizu signala pojedinih, osim intenziteta i zauzeća može davati podatke o duljini vozila i brzini. Brzina se dobiva mjerenjem vremena pojedinih ulazaka u detekcijske zone uz poznate geometrije detekcijskih zona i njihovih udaljenosti. Infracrveni pasivni detektor s 4 detekcijske zone može po funkciji zamijeniti dvije induktivne petlje.

Infracrveni detektori postavljaju se iznad prometnice ili sa strane prometnice. Kao nosiva konstrukcija mogu poslužiti konzole lanterni, stupovi rasvjete, ili drugi objekti. Optimalan položaj detektora je vertikalno iznad prometnice na visini cca 5,5 m. U tablicama koje daju proizvođači nalaze se i dimenzije detekcijskih zona u ovisnosti o duljini koju tvori vertikalna projekcija položaja detektora na prometnicu, i sjecište osi optike detektora i prometnice. Postavljanjem sa strane prometnice dolazi do deformacije detekcijske zone, ali to ne znači da će doći do degradacije svojstava. S povećanjem visine i kuta, odnosno povećanjem dosega detektora, detekcijska zona se povećava i po duljini i po širini. Ako detekcijska zona zahvati susjedni trak, detektirat će se vozilo u tom traku. Stoga je domet infracrvenog ograničen zadanim konstrukcijskim karakteristikama.

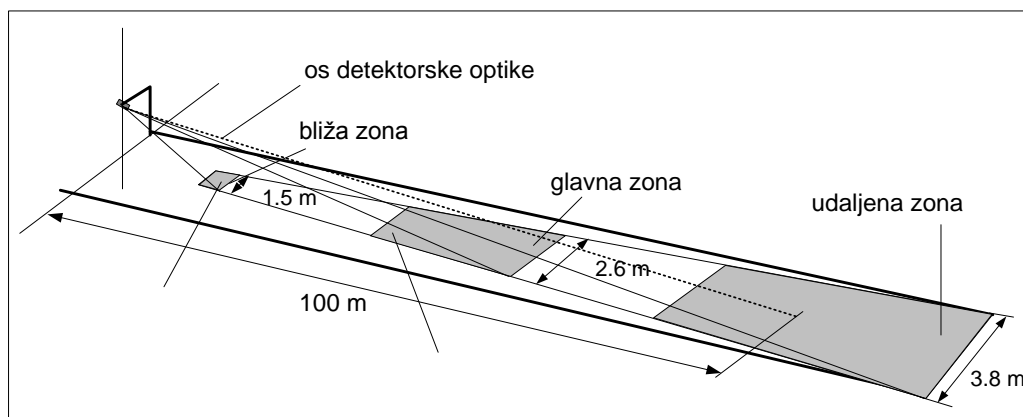


Slika 4.9 Detekcijske zone pasivnog infracrvenog detektora kratkog dometa ⁴

Proizvođači na tržištu nude specijalizirane pasivne infracrvene detektore dugog dometa i kratkog dometa. Detektori kratkog dometa, prema deklaraciji proizvođača, služe za detekciju prisutnosti u blizini zaustavne crte, za zahtjev za fazom, produljenje zelenog, brojenje. No treba napomenuti da je produljenje zelenog na osnovi detekcije vozila ovdje vrlo ograničeno zbog kratkog dometa te vrste detektora. Slika 4.9 prikazuje primjer višestrukih detekcijskih zona pasivnog infracrvenog detektora. Detektori dugog dometa imaju domet reda veličine 100 m, a mogu biti u funkciji zahtjeva za fazom, produljenja zelenog i mjerenja vremenske praznine. Najčešće detektori dugog dometa nemaju mogućnost detekcije zaustavljenog vozila. Zbog velike udaljenosti detekcijske zone kod tog detektora je izraženiji problem širenja detekcijske

⁴ Dimenzije detekcijskih zona su navedene kao primjer (tipične vrijednosti)

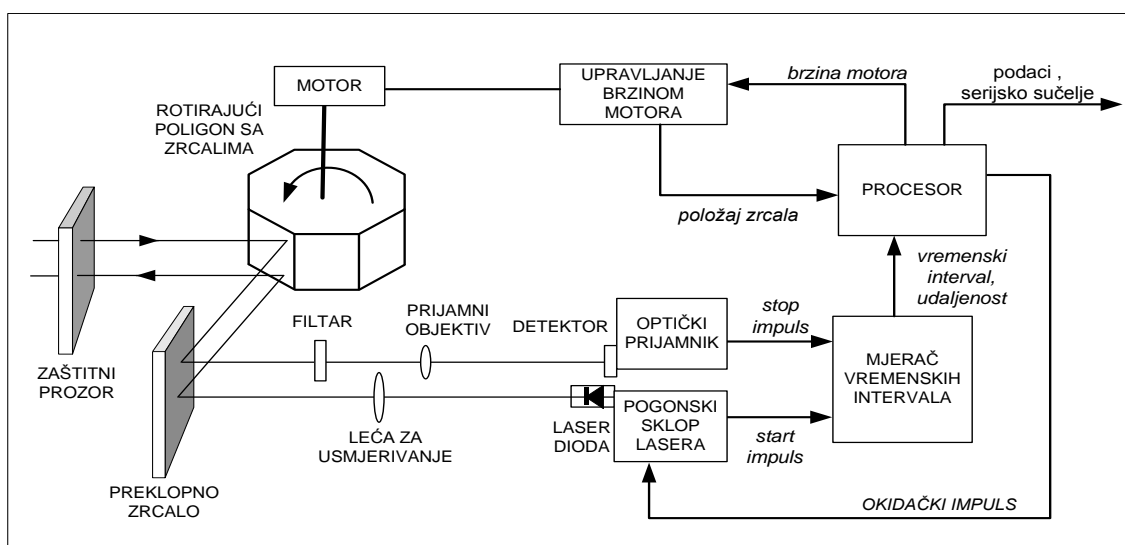
zone, Slika 4.10. Primjerice, komercijalni Siemensov PIR-Distant pri dometu oko 100 m ima širinu glavne detekcijske zone 2,6 m, a pomoćne udaljenije detekcijske zone 3,8 m. Problem zaklanjanja detekcijskih zona visokim vozilima izraženiji je kod detektora dugog dometa.



Slika 4.10 Detekcijske zone pasivnog infracrvenog detektora dugog dometa

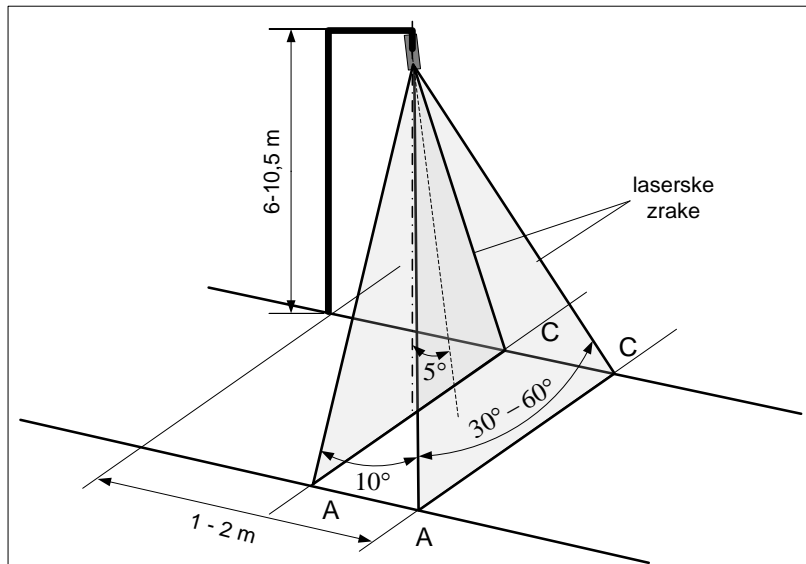
4.2.2 Aktivni infracrveni detektor

Aktivni infracrveni detektori poznati su i pod nazivom Laser Radar detektori. Aktivni infracrveni detektor sastoji se od odašiljačkog i prijemnog dijela. Odašiljački dio šalje kratke impulse elektromagnetskih valova u bliskom infracrvenom području, a prijemni dio prima reflektirane impulse. Slika 4.11 prikazuje glavne dijelove aktivnog infracrvenog detektora. Odašiljački dio se sastoji od izvora zračenja, optike i pripadne elektronike koja upravlja stvaranjem infracrvenih zraka. Elektronika odnosno generator takta šalje start impuls modulu izvora zračenja. Kao izvor zračenja može se upotrijebiti LED dioda ili LASER dioda, no uglavnom se koriste LASER diode koje zrače u bliskom infracrvenom području (valne duljine $0,85 \mu\text{m}$). Aktivni infracrveni detektori sadrže preciznu mehaniku i optiku, stoga spadaju u najskuplje detektore.



Slika 4.11 Blok-shema glavnih dijelova aktivnog infracrvenog detektora

Pomoću rotirajućeg poligona s zrcalima na stranicama postiže se linijsko skeniranje laserskom zrakom. Kako zrcala na stranicama poligona imaju različite kutove nagiba (na slici nije naznačeno) prema bazi poligona, dobivaju se dvije laserske zrake s različitim kutovima nagiba u odnosu na os detektora. Međusobni kut slijednih stranica s zrcalima na poligonu, a time i kut između laserskih zraka je do 10° . Svaka zraka periodički prati zamišljenu dužinu A-C na prometnici, čineći tako dvije detekcijske ravnine (trokuti na slici), koje određuju detekcijsku zonu, Slika 4.12.



Slika 4.12 Geometrija laserskih zraka aktivnog infracrvenog detektora

Optika prijamnog dijela detektora hvata reflektiranu i raspršenu energiju od vozila, i fokusira je na fotodetektor, koji generira električki impuls, odnosno stop-impuls. Detekcija vozila zasniva se na mjerenju vremena povrata reflektirane energije. Kraće vrijeme povrata znači prisutnost vozila u detekcijskoj zoni. Na osnovi vremenske razlike t_r , između start-impulsa i stop-impulsa može se izračunati i udaljenost objekta koji je reflektirao energiju, izraz (4.6). Na osnovi te udaljenosti može se dobiti trodimenzionalna slika vozila koje prolazi kroz detekcijsku ravninu te na taj način klasificirati vozila

$$d = \frac{ct_r}{2} \quad (4.6)$$

gdje je: d – udaljenost objekta koji je reflektirao infracrvenu zraku

c – brzina svjetlosti

t_r – vremenska razlika start-impulsa i stop-impulsa

Aktivni infracrveni detektori postavljaju se iznad prometne površine, na konzole, stupove rasvjete ili druge objekte. Preporučena visina postavljanja komercijalnih detektora je od 6 m do 9 m, a kut otklona osi detektora od vertikale (*forward tilt angle*) 0° - 40° , s time da se najčešće koristi 5° . Kut između laserskih zraka je 10° što rezultira time da se detekcijske zone komercijalnih detektora nalaze u neposrednoj blizini tlocrtna projekcije detektora. Kut između

krajnjih zraka jedne detekcijske ravnine kreće se od 30° (uporaba za jedan trak) do 60° (uporaba za maksimalno tri prometna traka).

Višestruka zraka, odnosno detekcijske ravnine omogućuju mjerenje brzine. Vrijeme ulaska u svaku detekcijsku ravninu se registrira, a uz poznatu geometriju izračunava se brzina. Suvremeni aktivni infracrveni detektori, koji generiraju trodimenzionalnu sliku objekta (vozila), omogućuju klasifikaciju u 11 kategorija vozila i koriste se za naplatu cestarine. Aktivni infracrveni detektori mogu davati sljedeće podatke: prisutnost, volumen, zauzeće, brzina vozila, klasifikacija.

Blisko infracrveno zračenje slabije prodire kroz maglu, kišu i snježne padaline od dalekog infracrvenog, pa je i to jedan od razloga što se detekcijska zona aktivnog infracrvenog nalazi u blizini detektorskog elementa.

4.2.3 Radarski detektori

4.2.3.1 Osnovne značajke radarskih detektora

Princip rada radarskih detektora zasniva se na odašiljanju radiovalova mikrovalnog područja i prijemu povratnog signala (reflektiranih radiovalova od objekata). Obradom povratnog signala, odnosno usporedbom s odaslanim signalom moguće je dobiti informacije o prisutnosti objekata, udaljenosti i brzini. Frekvencijsko područje radiovalova primjenjivo za radare je od 3 MHz do 300 GHz (40 GHz-300 GHz je eksperimentalno). Za primjenu u prometu za fiksne detektore, a s ciljem dobivanja prometnih parametara, od interesa je X frekvencijski pojas od 8 do 12 GHz. Najveći dio komercijalnih radarskih detektora ima radnu frekvenciju 10.525 GHz.

Vozilo će se detektirati ako je primljena snaga povratnog signala dovoljno velika, odnosno ako je gustoća snage povratnog signala na mjestu prijama dovoljno velika. Gustoća snage povratnog signala p_{ps} ovisi o snazi zračenja antene P_i , dobitku antene G , udaljenosti vozila R , i efektivnoj površini objekta σ (mete), izraz (4.7)

$$p_{ps} = \frac{P_i G \sigma}{16\pi^2 R^4} \quad (4.7)$$

gdje je: p_{ps} – gustoća snage povratnog signala; R – udaljenost vozila (mete); P_i – snaga privedena anteni; σ – efektivna površina mete (vozila) u m²; G – dobitak antene

Dobitak antene je parametar antene i u neposrednoj je vezi s usmjerenošću antene i dijagramom zračenja. S ciljem detekcije mete poželjna je što veća usmjerenost. Kao antene za oblikovanje radarskog snopa pogodne su horn-antene i reflektor-antene. Efektivna površina σ opisuje metu kako je *vidi* radar. Efektivna površina funkcija je brojnih čimbenika: kuta upada radarskog snopa, oblika mete, svojstava materijala mete, radne valne duljine radara. U tablici 4.3. nalaze se tipične vrijednosti veličine nekih efektivnih površina, za X-pojas, i istu udaljenost od radarskog detektora.

Tablica 4.2 Tipične vrijednosti efektivne površine

Objekt (meta)	Efektivna površina (m ²)
Osobno vozilo	100
Kombi vozilo	200
Čovjek	1

Sličan izrazu (4.7) je izraz (4.8), ali iz kojeg se vidi ovisnost primljene snage o radnoj valnoj duljini λ i površini objekta a ako se radarski snop reflektira od vozila pod pravim kutom

$$P_r = \rho \frac{P_o A^2 a}{4\pi \lambda^2 r^4} \quad (4.8)$$

gdje je: P_r - primljena snaga; λ - radna valna duljina; ρ - koeficijent refleksije vozila;
 r - udaljenost od vozila; P - snaga odašiljanja; a - površina objekta koji reflektira radarski snop; A - otvor antene;

Dobri reflektori su ravne površine s velikim iznosom dielektrične konstante, na koje radarski snop upada okomito. Smanjivanjem kuta upada radarskog snopa smanjuje se i primljena snaga povratnog signala. Upad radarskih zraka pod kutom od 45° na površinu objekta može skrenuti zrake tako da ih prijamna antena ne hvata. Što je veća površina a koja reflektira radarski snop, veća je snaga primljenog signala. Izravna posljedica je ranija detekcija velikih vozila (ako je radar usmjeren prema dolazećim vozilima).

Detekcijska zona na prometnici ovisi o položaju antene u prostoru i parametrima antene. Radarski detektor na visini h čija antena ima glavni smjer zračenja pod kutom θ u odnosu na vertikalu, širinu snopa u uzdužnom presjeku θ_{SU} , i širinu snopa u poprečnom presjeku θ_{SP} tvori na površini prometnice otisak radarskog snopa koji se može smatrati detekcijskom zonom za primjenu u prometu, Slika 4.13. Dimenzije elipsastog otiska (detekcijske zone) mogu se odrediti prema izrazima (4.9) i (4.10)

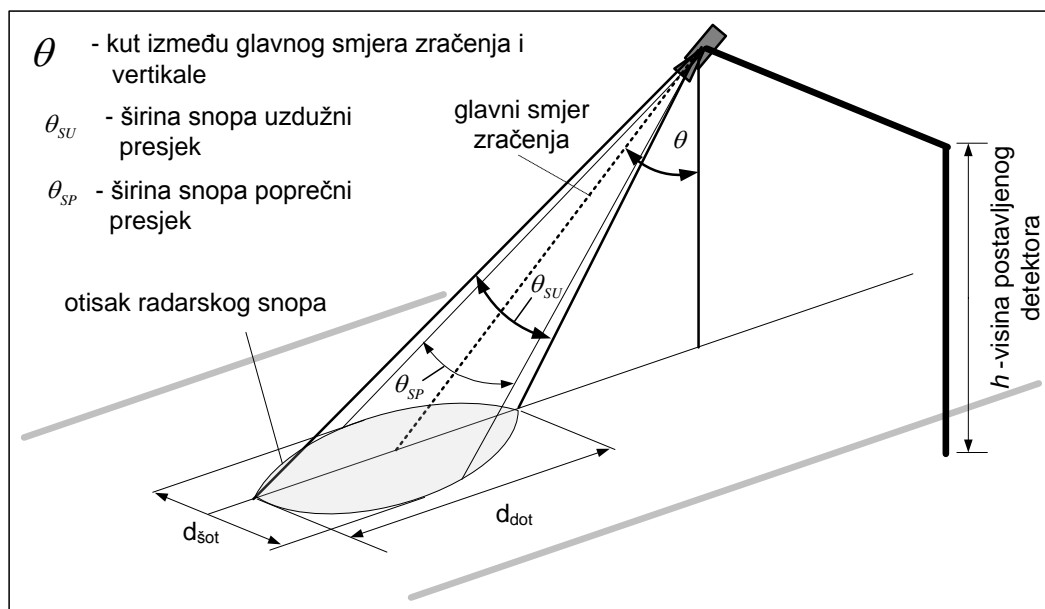
$$d_{dot} = h \left[\operatorname{tg} \left(\theta + \frac{\theta_{SU}}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\theta - \frac{\theta_{SU}}{2} \right) \right] \quad (4.9)$$

$$d_{\dot{s}ot} = \frac{2h \sin \left(\frac{\theta_{SP}}{2} \right)}{\cos \theta} \quad (4.10)$$

gdje je: d_{dot} – duljina radarskog otiska; θ - kut glavnog smjera zračenja i vertikale; $d_{\dot{s}ot}$ – širina radarskog otiska; θ_{SU} - širina snopa u uzdužnom presjeku; h - visina antene detektora θ_{SP} - širina snopa u poprečnom presjeku

Dvije su osnovne vrste radara: radar s kontinuiranim odašiljačkim signalom (*CW Doppler radar* - *Continuous Wave Doppler Radar*) i radar s frekvencijski moduliranim odašiljačkim signalom (*FMCW radar* - *Frequency Modulated Continuous Wave radar*). Radar s kontinuiranim odašiljačkim signalom u stranoj literaturi često se kratko naziva *Doppler Radar*, a radar s

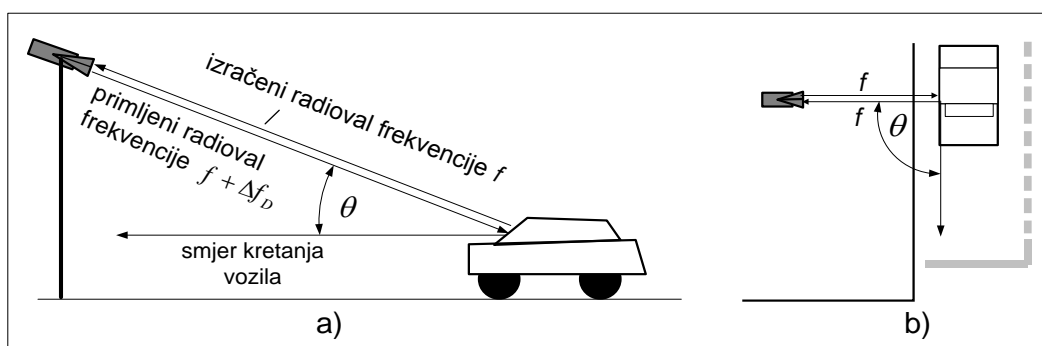
frekvencijski moduliranim odašiljačkim signalom *True-presence microwave radar*. Prednost radarskih detektora ogleda se u tome što radiovalovi X frekvencijskog pojasa radiovalova prodiru kroz kišu, maglu, snijeg. Nadalje, na točnost ne utječe osvjetljenje (noć, dan), a ni prijelazi doba dana, kao ni temperatura okoline i objekata.



Slika 4.13 Otisak radarskog snopa detektora

4.2.3.2 Doppler radar detektor s kontinuiranim odašiljačkim signalom

Doppler radar s kontinuiranim odašiljačkim signalom, predajnom antenom zrači radiovalove konstantne frekvencije, prema području u kojemu se želi detektirati vozilo. Prijamna antena prima reflektirane valove od vozila. Prema Dopplerovom efektu frekvencija primljenoga reflektiranog signala se povećava u odnosu na odašlani signal ako se vozilo približava, Slika 4.14a). Odnosno, frekvencija primljenog signala se smanji ako se vozilo udaljava. Prolaz vozila se detektira na osnovi detekcije razlike frekvencija odašiljačkog signala (radiovala) i povratnog signala. Dopplerova razlika frekvencija ovisi o položaju radarskog detektora u prostoru u odnosu na objekte koje se želi detektirati, odnosno o kutu što ga čini pravac gibanja vozila i pravac širenja radiovalova (radarskog snopa), frekvenciji odašiljačkog signala i brzini vozila.



Slika 4.14 a) Detekcija vozila radarom s kontinuiranim odašiljačkim signalom
 b) Položaj vozila i detektora kad se ne dobiva podatak o brzini

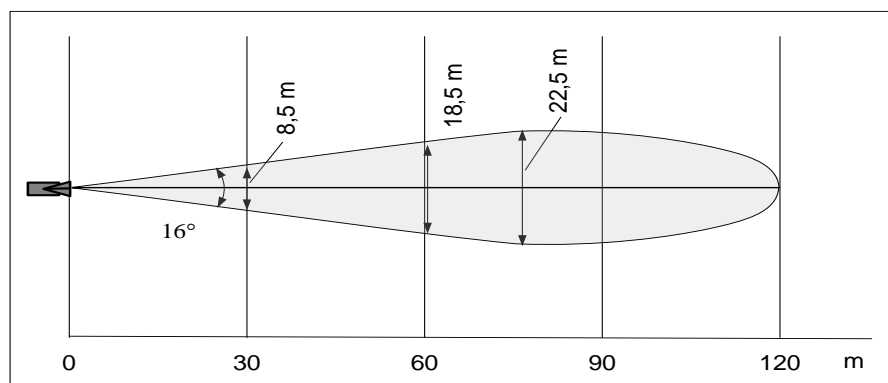
Uz fiksni položaj detektora i konstantnu radnu frekvenciju brzina se može dobiti iz izraza (4.11). Dopplerov frekvencijski pomak (razlika frekvencija povratnog i poslanog signala) veći je što je frekvencija odašiljačkog signala veća, odnosno na većim radnim frekvencijama radarski detektor je osjetljiviji.

$$\Delta f_D = 2f \cdot v_V \frac{\cos \theta}{c} \quad (4.11)$$

gdje je: Δf_D – Dopplerov frekvencijski pomak; v_V – brzina vozila; f – radna frekvencija radarskog detektora; θ – kut što ga čini pravac gibanja vozila i pravac širenja radiovalova; c – brzina radiovala

Prema izrazu (4.11), ako je kut između smjera kretanja vozila i radarskog snopa 90° , Slika 4.14 b), nema promjene frekvencije, odnosno detektor je neosjetljiv. Iako se pod tim kutom ne može odrediti brzina vozila, prolaz vozila može se detektirati. Naime, nagla pojava vozila, koje dobro reflektira radiovalove, izazvat će naglo povećanje amplitude primljenog signala. Doppler radar detektorom ne može se detektirati zaustavljeno vozilo. Za detekciju potrebna je neka minimalna brzina (5-8 km/h). Ne može se ni odrediti udaljenost od vozila.

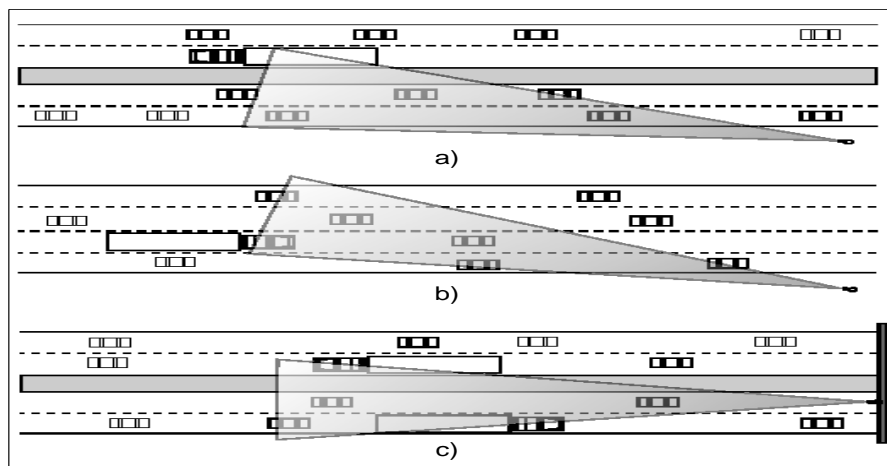
Područje detekcije radarskog detektora određeno je širinom snopa (parametar antene), visinom postavljanja i kutom nagiba detektora (kut što ga zatvara glavni smjer zračenja s vertikalom ili horizontalom). Za širinu snopa u prometnoj primjeni kutovi su reda veličine od 8° do 16° na čijim rubovima gustoća snage zračenja ne pada ispod 3dB od gustoće snage zračenja u glavnom smjeru zračenja. Primjer presjeka detekcijskog prostora dan je na Slika 4.15.



Slika 4.15 Primjer presjeka detekcijskog prostora radarskog detektora u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini

Visina postavljanja je od 4,5 m do 9 m. Za detekciju vozila na većim udaljenostima reda veličine 100 m nagib detektorske antene (kut glavnog smjera zračenja prema horizontali) je oko 5° , dok za detekciju na manjim udaljenostima kut nagiba je do 45° . Primjerice, TC26-B *Microwave Vehicle Motion Detector*, postavljen s nagibom 5° glavnog smjera zračenja prema horizontali i širinom snopa od 16° detektira osobna vozila na maksimalnoj udaljenosti 61 m uz širinu detekcijskog područja 1,75 m, a kamione (autobuse) detektira na maksimalnoj udaljenosti 122 m uz širinu detekcijske zone 2,6 m. Preporučeni položaji postavljanja i pripadne detekcijske površine za takve detektore (u cestovnom prometu možemo ih nazvati

detektori dalekog dometa) dani su na Slika 4.16. Radarski detektori imaju mogućnost određivanja smjera kretanja tako da se vozila iz suprotnog smjera (Slika 4.16 slučajevi a) i c)) mogu zanemariti. U tom slučaju velike detekcijske zone, bez selektivnosti po trakovima, mogu služiti u funkciji najave vozila, u određivanju ukupnog volumena prometa. Oblik zone i domet detekcije ovisni su o veličini vozila, i to ih čini neprikladnim za mjerenje zauzeća.



Slika 4.16 Položaji doppler radarskog detektora i detekcijska površina

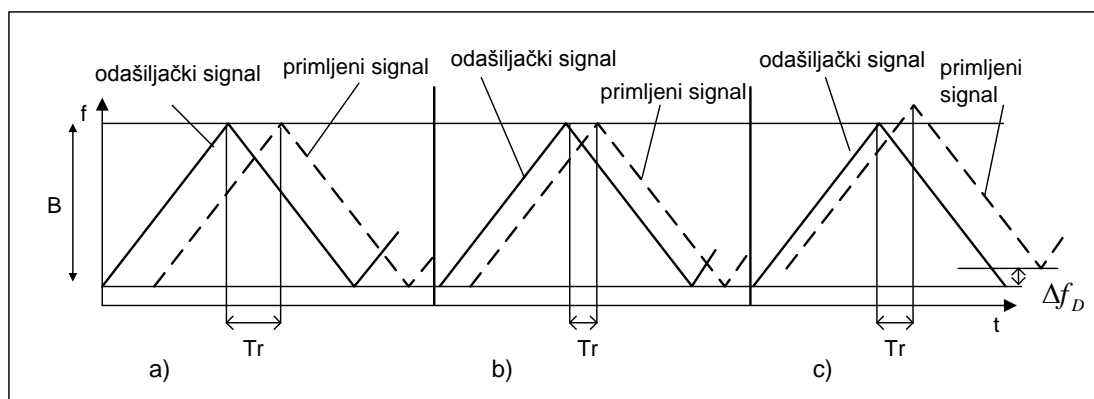
Visina postavljanja je od 4,5 m do 9 m. Za detekciju vozila na većim udaljenostima reda veličine 100 m nagib detektorske antene (kut glavnog smjera zračenja prema horizontali) je oko 5°, dok za detekciju na manjim udaljenostima kut nagiba je do 45°. Primjerice, TC26-B *Microwave Vehicle Motion Detector*, postavljen s nagibom 5° glavnog smjera zračenja prema horizontali i širinom snopa od 16° detektira osobna vozila na maksimalnoj udaljenosti 61 m uz širinu detekcijskog područja 1,75 m, a kamione (autobuse) detektira na maksimalnoj udaljenosti 122 m uz širinu detekcijske zone 2,6 m. Preporučeni položaji postavljanja i pripadne detekcijske površine za takve detektore (u cestovnom prometu možemo ih nazvati detektori dalekog dometa) dani su na Slika 4.16. Radarski detektori imaju mogućnost određivanja smjera kretanja tako da se vozila iz suprotnog smjera (Slika 4.16 slučajevi a) i c)) mogu zanemariti. U tom slučaju velike detekcijske zone, bez selektivnosti po trakovima, mogu služiti u funkciji najave vozila, u određivanju ukupnog volumena prometa. Oblik zone i domet detekcije ovisni su o veličini vozila, i to ih čini neprikladnim za mjerenje zauzeća.

4.2.3.3 Radar detektor s frekvencijski moduliranim odašiljačkim signalom

Radarski detektor s frekvencijski moduliranim odašiljačkim signalom odašilje radioval čija se frekvencija mijenja po linearnoj funkciji vremena unutar nekoga radnoga frekvencijskog pojasa B, Slika 4.17. Podatak o udaljenosti objekta od interesa koji se nalazi u detekcijskoj zoni dobiva se mjerenjem vremena proteklog od odašiljanja signala do primitka povratnog signala. Na Slika 4.17 sa Tr označeno je vrijeme između odaslanog i primljenog signala, a udaljenost se može izračunati prema izrazu (4.12).

$$d = c \frac{Tr}{2} \quad (4.12)$$

gdje je: d – udaljenost vozila od detektora; c – brzina radiovalova; T_r – vrijeme proteklo između odaslanog i primljenog signala

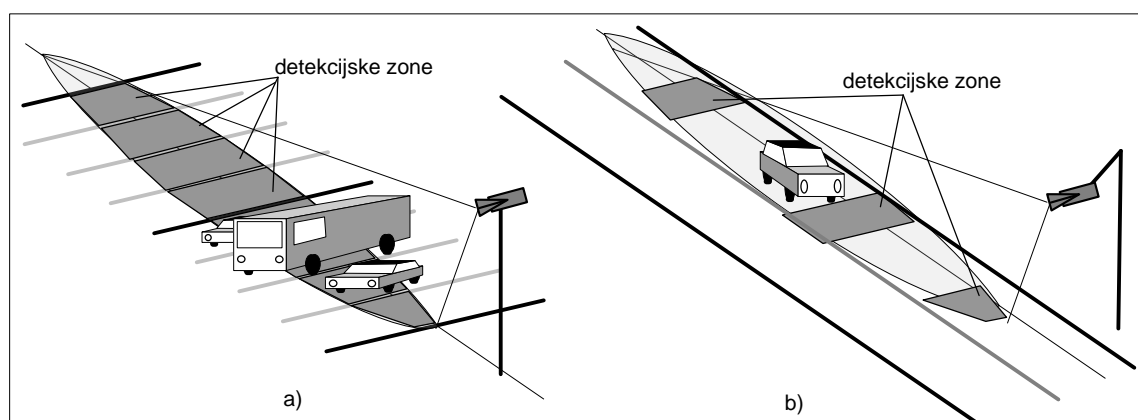


Slika 4.17 Kvalitativan prikaz frekvencije signala FMCW radara za slučajeve

- a) Prazna prometna površina
- b) Zaustavljeno vozilo u detekcijskoj zoni
- c) Vozilo u detekcijskoj zoni približava se detektoru

Kako FMCW radarski detektor mjeri udaljenost od detektora do objekta, može se dobiti i podatak o prisutnosti vozila u detekcijskoj zoni, Slika 4.17b). Brzina se može dobiti na dva načina, pomoću dopplerova frekvencijskog pomaka, Δf_D , (na Slika 4.17c)) ili pomoću nekoliko detekcijskih zona. Za drugi slučaj brzina se dobiva mjerenjem vremena potrebnog da vozilo prijeđe udaljenost između detekcijskih zona.

FMCW može formirati više detekcijskih zona. Primjerice, RTMS (*Remote Traffic Microwave Sensor*) proizvođača Electronic Integrated Systems ima mogućnost definiranja do 8 detekcijskih zona. Otisak radarskog snopa podijeljen je na 32 odsječka, a detekcijska zona formira se od jednog ili više odsječaka duljine 2 m. Domet tog detektora je 3 do 60 m, a širina detekcijske zone 2 do 7 m. RTMS ili bilo koji detektor tog tipa može se postavljati pokraj prometnice ili iznad prometnice, Slika 4.18.



Slika 4.18 Postavljanje FMCW radarskog detektora i detekcijske zone

- a) pokraj prometnice
- b) vertikalno iznad prometnice

I u jednom i u drugom slučaju postavljanja može doći do zaklanjanja „vidnog polja“ radarskog detektora, zbog visokih vozila. Za razliku od videodetektora ovdje je utjecaj zaklanjanja smanjen zbog difrakcije radiovalova. Rubovi visokih vozila ponašaju se kao sekundarni izvori radiovalova koji emitiraju u svim smjerovima. Dio energije tako se reflektira od vozila koja su zaklonjena. Prema testiranju što ga je obavilo MTO (*Ministry of Transportation Ontario*) na autocestama samo, 2% vozila nije detektirano zbog utjecaja zaklanjanja, a u slučaju postavljanja pokraj prometnice nije detektirano 50% zaklonjenih vozila.

S jednim detektorskim elementom, pri postavljanju pokraj prometnice, pokrivaju se svi trakovi. Pri postavljanju iznad prometnice, za svaki trak potreban je poseban radar. Međutim, ako je potrebna prometna informacija o repu čekanja (duljina repa čekanja), postavljanje pokraj prometnice zahtijeva također više senzorskih elemenata. Detektor postavljen iznad prometnice daje točnije podatke o brzini, brzina vozila do 15 km/h računa se na osnovi brzinske "klopke", koje tvore dvije uske detekcijske zone, definirane pri puštanju u rad i kalibraciji detektora. Iznad te brzine, za dobivanje brzine koristi se dopplerov frekvencijski pomak. Detektor postavljen pokraj prometnice računa srednju vremensku brzinu u definiranom vremenskom intervalu, na osnovi pretpostavljene duljine vozila i vremena zauzimanja detekcijske zone.

Postavljanje radarskog detektora pokraj prometnice, Slika 4.18a), karakterizira brzo i jednostavno postavljanje i lak pristup u slučaju kvara, bez zaustavljanja prometnog toka. Pri postavljanju iznad prometnice, radarski snop u istoj je ravnini s osi prometnice, Slika 4.18b), postižu se veće točnosti glede dobivanja prometnih parametara jer je utjecaj zaklanjanja manji.

S više takvih detektorskih elemenata raspoređenih uz prometnice dobiva se dobro pokrivanje područja od interesa. Uz uporabu bežičnih komunikacija (i neprekidanja prometnog toka prilikom postavljanja i održavanja), može se izgraditi fleksibilna detektorska mreža. Primjerice, EIS je razvio sustav SPIDER (*Simple Presence In-Lane Detection Event Reporting*) za potrebe detekcije vozila na većoj udaljenosti od križanja (*Mid-Block Detection*), u suvremenim adaptivnim sustavima automatskog upravljanja prometom tipa SCAT ili SCOOT. Pri tome se do 8 RTMS detektora spaja na SPIDER koncentrador koji je smješten u ormariću lokalnog uređaja. Sustav WATER (*Wide Area Traffic/Event Reporting*) temelji se na RTMS detektorima povezanim u skupine. Skupina sadržava do 50 detektora udaljenih od lokalnog uređaja grupe do 15 km. Sustav je namijenjen za ATIS (*Advanced Traveler Information Systems*), ATMS (*Advanced Traffic Management Systems*) detekciju incidenata i prikupljanje podataka o prometu (brojenje prometa po linkovima).

Općenito, FMCW radarski detektor može davati podatke o prisutnosti vozila - zaustavljeno vozilo i prolaz, o volumenu prometa, zauzeću, brzini, i ograničeno klasificirati vozila. Prema podacima koji su dostupni preko Interneta opaža se trend porasta uporabe radarskih detektora u funkciji upravljanja i prikupljanja podataka (Boston, Hong Kong, Los Angeles, Moskva, San Francisko, Peking i dr.)

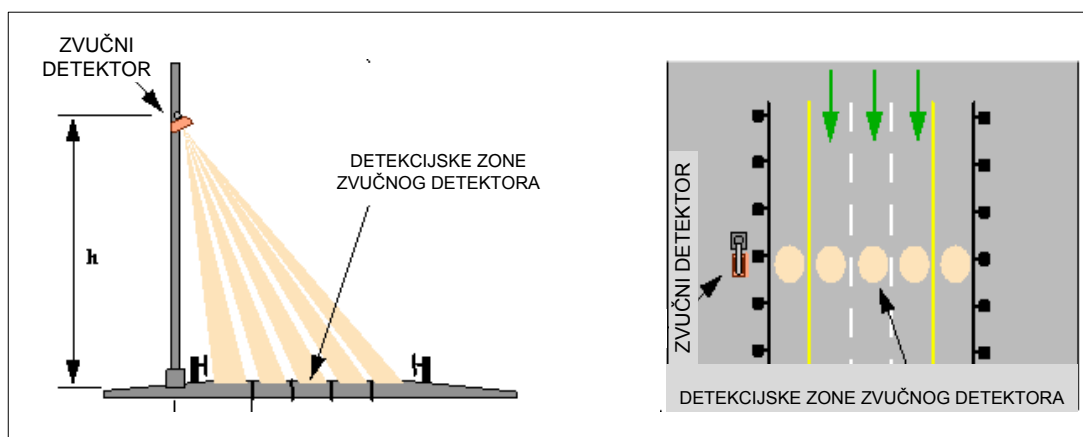
Radarski snop radarskih detektora zahvaća ljude u vozilima te se postavlja pitanje utjecaja zračenja na ljude. Odašiljačka snaga antene radara je reda veličine 10 mW. Proizvođači tvrde da je zračenje (jakost električnog polja elektromagnetskog vala) na 3 m od antene 50 puta

manje od dopuštenog⁵, koje prema kanadskim zakonima za ljude iznosi 62 V/m za frekvencije iznad 1,5 GHz, a za radno osoblje 140 V/m. Proizvođač MSSedco, u uputama za svoje proizvode, upozorava da detektor u radu može utjecati na komunikacijsku opremu te da u rezidencijalnim područjima detektor može štetno utjecati, ali nije definirano na što.

4.2.4 Pasivni zvučni detektori

Pasivni zvučni detektori koriste zvučne valove za dobivanje podataka o parametrima prometnog toka. Pasivni zvučni detektori primaju i analiziraju zvučne valove koje proizvodi prometni sustav.

Pasivni zvučni detektori hvataju zvučne valove čujnog područja generirane vozilima. Primarni izvor zvučnih valova je buka nastala trenjem guma vozila s površinom prometnice. Stoga je poželjno postavljanje pasivnih zvučnih detektora pokraj prometnice, kako bi polje mikrofona bilo usmjereno upravo na gume vozila. Pri manjim brzinama, primjerice na raskrižjima, zvučni detektori *slušaju* i zvuk koji proizvode motori. Frekvencijsko područje zvučnih valova koje prima pasivni zvučni detektor ovisi o proizvođaču, ali načelo nalazi se između 8 kHz i 15 kHz. Detektorski element sastoji se od dvodimenzionalnog polja usmjerenih mikrofona. Dimenzije i oblik detekcijske zone određuju konfiguracija polja mikrofona, parametara mikrofona i položaj polja u prostoru. Ulaskom vozila u područje detekcije dolazi do porasta gustoće snage zvučnih valova i do promjena u signalu generiranom poljem mikrofona. Algoritmi obrade signala prepoznaju promjene u signalu i generira se signal prisutnosti vozila. Pad gustoće snage zvučnih valova ispod neke granične značit će da je vozilo izašlo iz područja detekcije. Zvučni valovi koji dolaze izvan područja detekcije se prigušuju.



Slika 4.19 Primjer detekcijskih zona zvučnog detektora

Položaj polja mikrofona u odnosu na prometnicu važan je za formiranje detekcijske zone i za točnost podataka. Kako bi se dobili podaci o prometnom toku, obrađuje se vrijeme potrebno da zvučni val stigne do pojedinih mikrofonskih elemenata u polju mikrofona. Pasivni zvučni detektori postavljaju se na visinu 6 do 12 m iznad prometnice, ili pokraj prometnice na istim visinama. Zona pokrivanja pasivnog akustičkog detektora može obuhvaćati više trakova, s time

⁵ Odgovor proizvođača (EIS) na postavljeno pitanje.

da se dobivaju podaci za svaki trak posebno, Slika 4.19. Detektor postavljen iznad prometnice, primjerice tip SAS-1, u mogućnosti je pratiti promet na sedam trakova, a postavljen pokraj prometnice na pet trakova. Detekcijske zone kod nekih su tipova detektora (SAS-1) prilagodljive. Duljina zone (u smjeru prometnog toka) može se izabrati 1,8 m ili 3,6 m, a širina i broj zona je proizvoljan, s time da je maksimum za primjenu u praksi pet zona.

Pasivnim zvučnim detektorom mogu se dobiti podaci o intenzitetu (volumenu) prometnog toka, zauzeću, brzini i klasifikaciji prometnog toka. Brzina se može dobiti na dva načina, pomoću brzinske klopke, s time da onda postoji više detekcijskih zona, ili na osnovu pretpostavljene duljine vozila i izmjerenog podatka o zauzeću. Klasifikacija vozila pasivnim zvučnim detektorom je ograničena. Mogu se prepoznati osobna vozila, laka teretna vozila i teška teretna vozila. Klasifikacija vozila zasniva se na usporedbi zvukova, tj. odgovarajućih signala, koje generira vozilo u prolazu i skupa poznatih zapisa različitih kategorija vozila.

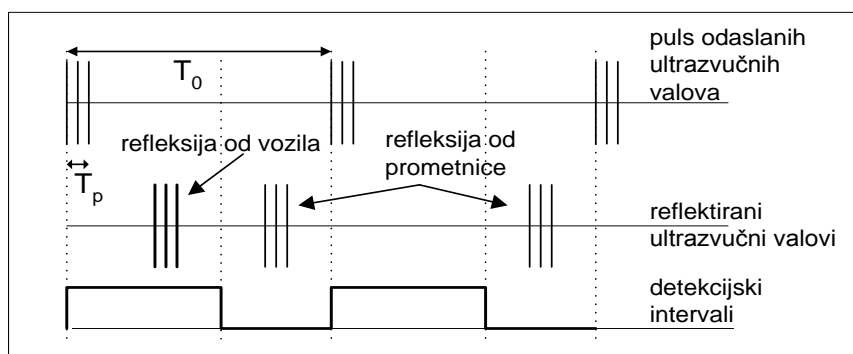
Na točnost pasivnoga zvučnog detektora utječu pojave koje djeluju na propagaciju zvučnih valova, primjerice: jak vjetar, kiša i gusti snijeg. Nadalje, vozila koja proizvode jaku buku, prolaskom susjednim trakom mogu uzrokovati pogrešne detekcije. U uvjetima velike gustoće prometnog toka i male brzine dolazi do degradacije kvalitete dobivenih podataka. Načelno nije pogodan za korištenje u urbanim sredinama.

4.2.5 Ultrazvučni detektori

Ultrazvučni detektori, odašilju zvučne valove frekvencija između 25 kHz i 50 kHz, odnosno ultrazvuk. Ultrazvučni valovi reflektiraju se od objekta koji se nalazi u detekcijskoj zoni, hvataju i analiziraju detektorom. Postoje pulsni ultrazvučni detektori i detektori s kontinuiranim odašiljačkim ultrazvučnim valom.

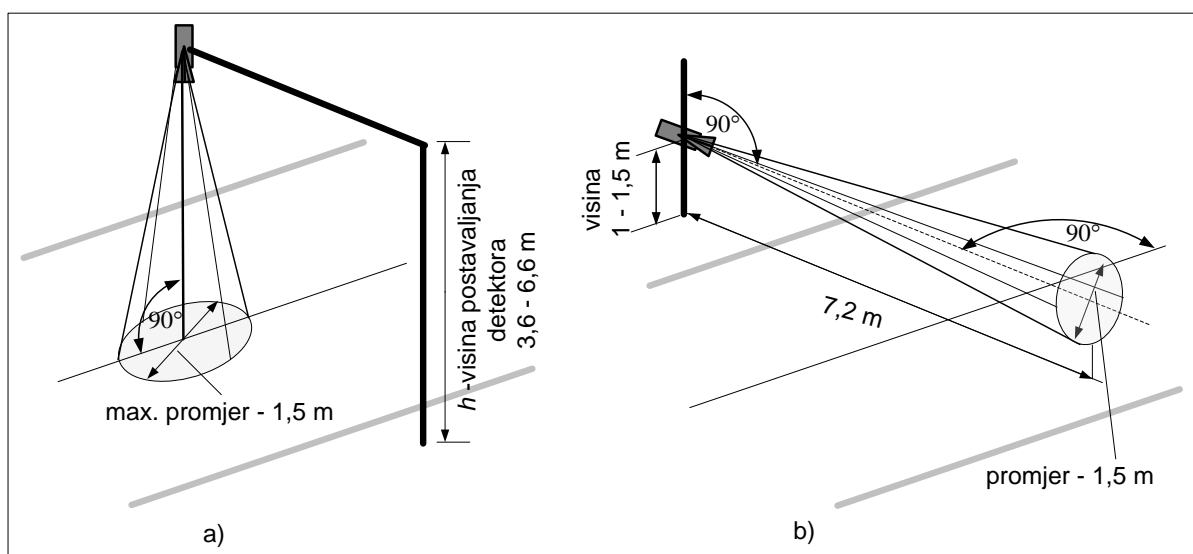
Detektori s kontinuiranim odašiljačkim ultrazvučnim valom služe uglavnom za mjerenje brzine. Mjerenje brzine temelji se na Dopplerovu efektu. Primjenjuju se za mjerenje brzine na autocestama, dok za urbanu sredinu s gustim prometom, velikim brojem zaustavljanja i čekanja u repu nisu pogodni.

Pulsni ultrazvučni detektori emitiraju kratke sekvencije ultrazvučnog vala trajanja T_P od 0,02 ms do 2,5 ms s vremenskim razmakom T_0 od 33 ms do 170 ms, Slika 4.20. S ciljem detekcije vozila u detekcijskoj zoni mjeri se vrijeme potrebno ultrazvučnom valu da prijeđe put detektor - detekcijska zona - detektor. Ultrazvučnom valu koji se reflektira od vozila potrebno je kraće vrijeme da prevali navedeni put, nego ako se reflektira od prometnice. Stoga primljena sekvencija ultrazvučnog vala unutar detekcijskog intervala znači da se vozilo nalazi u detekcijskoj zoni. Primljeni ultrazvučni val pretvara se u električki signal i analizira u detektorskoj jedinici (elektronika), koja se nalazi u istom kućištu ili smještena u signalnom uređaju. Detekcijski intervali su prilagodljivi, i najčešće se podešavaju tako da se detektira objekt koji je viši od 0,5 m (0,5 m iznad prometne površine).



Slika 4.20 Princip rada ultrazvučnog detektora

Ultrazvučni detektori postavljaju se iznad prometnice ili pokraj prometnice. Na Slika 4.21 prikazani su načini postavljanja. Pri postavljanju iznad prometne površine os detektora (smjer odašiljanja ultrazvučnih valova) mora biti okomita na prometnicu, Slika 4.21b). Detekcijski prostor je stožastog oblika, a *otisak* ultrazvučnog snopa je kružnica. Postavljanje pokraj prometnice znači da je detektor na visini 1-1,5 metara, s osi detektora koja je okomita na smjer prometnog toka, Slika 4.21b). Također os detektora paralelna je s prometnom površinom. Iako detekcijski prostor može zahvaćati dva traka, takva primjena nije pogodna, ponajprije zbog pojave zaklanjanja i poteškoća pri razlučivanju pripadnosti pojedinog vozila traku.



Slika 4.21 Postavljanje ultrazvučnog detektora
a) iznad prometnice
b) pokraj prometnice

Ultrazvučni detektori mogu davati podatke o intenzitetu prometnog toka (volumenu), prisutnosti vozila, zauzeću, klasifikaciji, brzini. Brzina se dobiva brzinskom klopkom, ovdje odašiljanjem dvaju ultrazvučnih valova pod različitim kutovima s ciljem dobivanja dviju detekcijskih zona. Mjerenjem vremena koje je vozilu potrebno da prijeđe udaljenost između dviju detekcijskih zona dobiva se brzina. Na točnost dobivenih podataka ultrazvučnih detektora mogu utjecati promjene temperature i jaka strujanja zraka zbog vjetrova ili prolaska velikih vozila.

4.2.6 Videodetektor

Značajke videodetektora i obrada slike

Uobičajeni naziv za videodetektor odnosno sustav za snimanje i obradu slike, kojim se dobivaju podaci o parametrima prometnog toka, je VIP (*Video Image Processor*) ili VIVDS (*Video Imaging Vehicle Detection System*). Videodetektor se sastoji od jedne ili više kamera, mikroprocesora za obradu slike te programa za interpretaciju slike i izvlačenje podataka o parametrima prometnog toka. Profesionalne kamere za uporabu u sustavima upravljanja imaju robusna kućišta kako bi odolijevale vremenskim prilikama. Mikroprocesor i ostale elektroničke komponente za obradu slike nalaze se u kućištu kamere ili u nosivom okviru koji se umeće u ormarić signalnog uređaja.

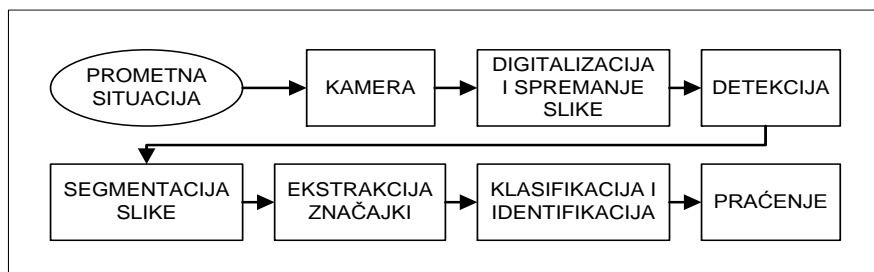
Videozapis koji snima kamera sastoji se od niza slika ili okvira (*frame*). Detekcija vozila koja je osnova za dobivanje ostalih podataka o parametrima prometnog toka temelji se na detekciji promjene u skupini ili skupinama piksela (elemenata slike) između slijednih okvira. Npr. na crno-bijeloj slici, vozilo koje prolazi uzrokuje promjenu razine sivog u skupini piksela. Obradom slike u boji, što je i karakteristika novijih videodetektora, postiže se bolje prepoznavanje objekata od interesa. U uvjetima slabije vidljivosti zbog loših vremenskih prilika i pri razlikovanju vozila od sjena ta prednost pogotovo dolazi do izražaja.

Postoji nekoliko pristupa obradbi slike i ekstrakciji prometnih podataka: Tripline, CLT (*Closed Loop Tracking*) i DAT (*Data Association Tracking*). Tripline pristup dopušta korisniku definiranje konačnog broja linearnih geometrijskih detekcijskih zona (npr. linije i pravokutnici) u kojima se detektira vozilo. Podaci o brzini mogu se dobiti na osnovi mjerenja vremena i poznate udaljenosti između detekcijskih zona. Referentni okvir, odnosno referentno stanje piksela predstavlja prazna prometna površina. S ciljem detekcije vozila slijedni okviri uspoređuju se s referentnim i traže promjene u stanju piksela. Pri tome mogu se nastojati identificirati rubovi pojave, koja može predstavljati vozilo, ili se slika dijeli na polje kvadrata, i ti kvadrati odnosno promjene na kvadratima pokazuju položaj vozila. Prednost tog načina je relativna jednostavnost i robusnost postupka, a nedostatak što se ne može pratiti trajektorija vozila, čime izostaju podaci poput mijenjanja traka, mikroskopski P-O podaci.

CLT je proširenje Tripline postupka koje omogućuje detekciju vozila na većoj prometnoj površini. CLT postupkom vozilo se prati sve dok se nalazi u vidnom polju kamere. Za provjeru (validaciju) detekcije koriste se višestruke detekcije. Kontinuirano se prate promjene u pikselima koje uzrokuje vozilo, a detekcija se provjerava stalnim ponavljanjem provjere stanja piksela koje je iniciralo početnu detekciju. Nakon dokazane detekcije, vozilo se broji (uzima u obzir), a njegova brzina kontinuirano se ažurira pomoću algoritma praćenja. Takvim pristupom mogu se dobiti dodatni podaci o trajektoriji vozila, poput promjene prometnog traka, skretanja u zabranjeni smjer i dr.

Data Association Tracking pristup omogućuje dobivanje podataka o vremenu boravka na dionici, P-O podatke (unutar vidnog polja kamere). Vozilo se identificira izdvajanjem jedinstvene povezane skupine piksela. Ta karakteristična skupina piksela izdvaja se analizom gradijenta osvjetljenja i morfologije. Analizom gradijenta utvrđuju se rubovi pojave, a

analizom morfologije se dobiva kombinacija svojstava i dimenzija koja karakterizira pojavu. Tako definirana skupina piksela prati se u nizu slijednih okvira dok ne izađe iz vidnog polja kamere. Povezivanjem više kamera moguće bi bilo dobiti i podatke o vremenu putovanja na dionicama te P-O podatke za područje pokriveno kamerama.



Slika 4.22 Glavni postupci u obradi slike (na osnovi originala (Klein, 2001))

Glavni postupci obrade slike s ciljem izvlačenja prometnih podataka i praćenja vozila prikazani su na Slika 4.22. Nakon digitalizacije i spremanja, serijom algoritama izvlače se prostorne i vremenske značajke vozila u detekcijskim zonama. Prilikom obrade slike postoji više pragova, kojima se ograničavaju i odjeljuju podaci te ih se prosljeđuje dalje u algoritam. Broj detektiranih vozila tijekom obrade se ne ograničuje strogo (odluka o detektiranom vozilu nije stroga) budući da se uklanjanjem podataka gubi moguća informacija. Stoga se u ranim fazama obrade dopuštaju pogreške koje će biti ispravljene algoritmima klasifikacije, identifikacije i praćenja.

Segmentacija dijeli sliku u manja područja, najčešće područje koje ima vjerojatnost prisutnosti individualnog vozila, gdje će se značajke bolje prepoznati. Skup značajki koje su karakteristične za vozilo unaprijed je definiran. Procesom ekstrakcije ispituju se pikseli u potrazi za tim značajkama (karakteristikama piksela). Kad je dovoljan skup značajki prepoznat, vozilo se proglašava prisutnim i računaju se prometni parametri.

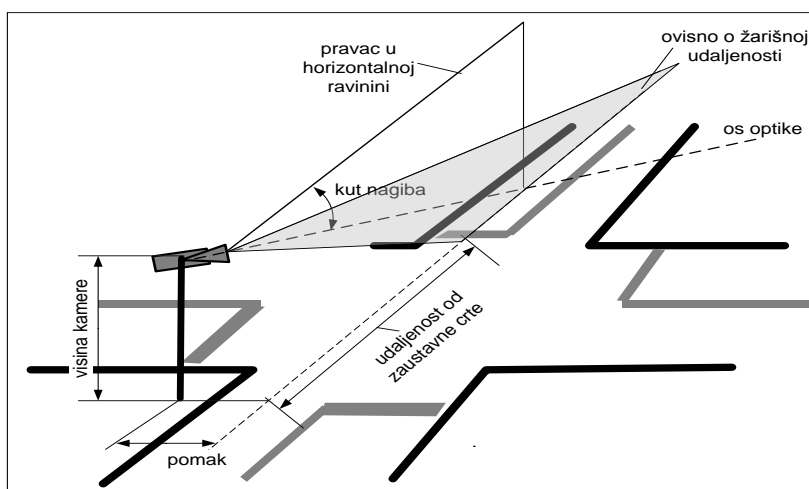
Za prepoznavanje značajki koriste se i neuronske mreže, posebno u postupcima klasifikacije i identifikacije. Detektori s mogućnošću praćenja upotrebljavaju tehnike na principu Kalmanovog filtra za ažuriranje pozicije i računanje brzine. Poznavanjem vremenskih i prostornih koordinata dobiva se trajektorija vozila, a na osnovi nje mogu se dobiti lokalni prometni parametri.

Na degradaciju svojstava videodetektora, odnosno točnost dobivenih podataka utječe više pojava: sjene, promjena osvjetljenja, refleksija, loše vremenske prilike, njihanje ili pomaci kamere zbog vjetrova ili nekoga drugog uzroka. Kako su te pojave neizbježne ali i očekivane, razvijaju se dodatni algoritmi u obradbi slike koji smanjuju utjecaj tih pojava, primjerice: algoritam stabilizacije slike, algoritam koji uzima u obzir određivanje položaja sunca, algoritam eliminacije noćne refleksije, detekcija gubitka kontrasta, prilagodba detekcije dobu dana. Treba napomenuti da se algoritmi neprekidno unapređuju i stvaraju novi tako da se performanse videodetektora stalno poboljšavaju glede točnosti u navedenim uvjetima.

Vidno polje kamere i utjecaji

Kamere se postavljaju iznad ili pokraj prometnice. Kao nosiva konstrukcija služe konzole, stupovi, ili objekti koji se nalaze iznad ili pokraj prometnice. Nakon postavljanja kamere kalibracijom videodetektora usklađuje se više međuzavisnih elemenata. Potrebno je uskladiti više parametara položaja i kalibracije vidnog polja, Slika 4.23: visina kamere, pomak kamere u odnosu na os prometnog toka, udaljenost od zaustavne crte, kut nagiba kamere (osi optike) prema horizontalnoj ravnini, žarišna udaljenost. Stoga pomak iz kalibriranog položaja uzrokuje smanjenje točnosti.

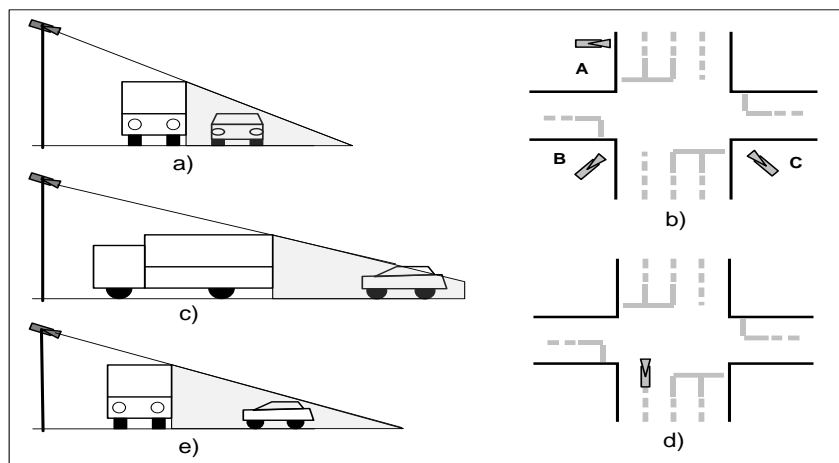
Položaj i kalibracija vidnog polja kamere značajno utječu na točnost detekcije vozila. Idealni položaj kamere za primjenu na raskrižjima trebao bi omogućiti da se svi prilazni trakovi dolaznog prometa nalaze u vidnom polju kamere, uključujući i zaustavnu crtu te da ne dolazi do zaklanjanja vidnog polja objektima u prostoru i vozilima koja su dio prometnog toka. Zbog ograničenja mogućnosti postavljanja, kao i karakteristika prometnog toka, zaklanjanje vidnog polja redovito se događa. Na Slika 4.24 prikazani su primjeri zaklanjanja. Zaklanjanje vozila u susjednom traku, Slika 4.24 a), događa se u slučajevima kad se kamera nalazi u položajima na raskrižju prema slici Slika 4.24 b). Proizvođači uglavnom preporučaju položaj kamere prema Slika 4.24 d). U tom slučaju zaklanjanje vozila i propuštena detekcija događaju se u istom traku. Ako se pri tome *vidi* samo dio zaklonjenog vozila, Slika 4.24.c), a videodetektor klasificira vozila prema duljini, dobit će se podatak o prisutnosti jednog vrlo dugog vozila, umjesto podatak o prisutnosti dvaju vozila.



Slika 4.23 Parametri postavljanja i kalibracije videodetektora

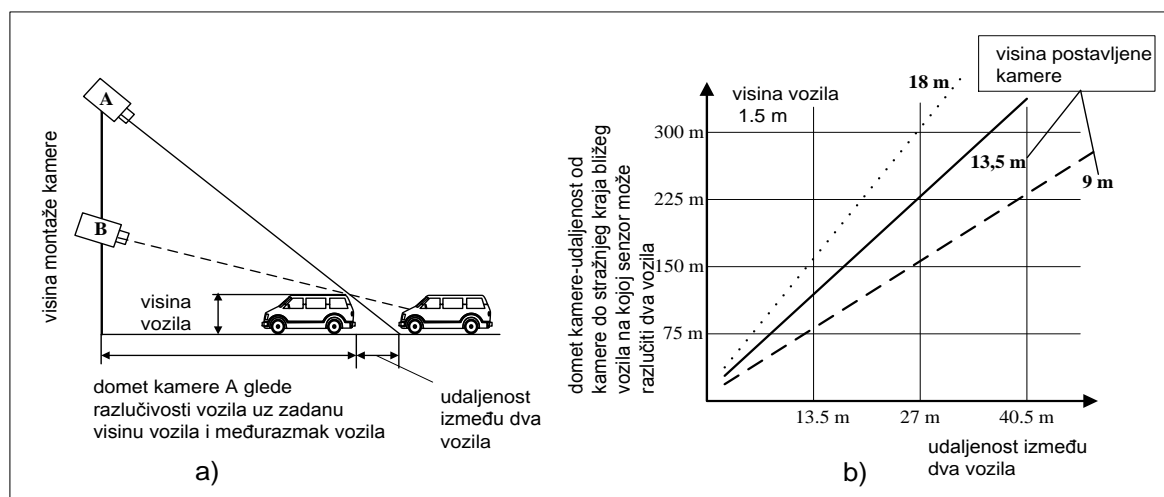
S aspekta upravljanja, zaklanjanje vozila u susjednom traku je nepovoljnije od zaklanjanja vozila u istom traku. Naime, zaklanjanjem susjednog traka može doći do gubitka detekcije prisutnosti zaustavljenog vozila (primjerice prisutnost vozila u traku za skretanje lijevo u funkciji zahtjeva za fazom), do netočnog mjerenja volumena prometa i zauzeća u funkciji upravljanja. U svim položajima kamere, osim u položaju označenom s A na Slika 4.24 b), može doći i do zaklanjanja vozila vozilima poprečnog prometnog traka, Slika 4.24 e). Detektirano vozilo iz poprečnog smjera može biti *shvaćeno* kao prisutnost vozila u detekcijskoj zoni smjera

promatranja, stoga postoje algoritmi koji prepoznaju smjer vozila i detekcije vozila iz poprečnog smjera odbacuju.



Slika 4.24 Zaklanjanje vidnog polja kamere

Poželjno je da je kamera postavljena što više (oko 15 m). Što je kamera više, bolja je razlučivost i podaci su točniji. Postavljanje kamere pokraj prometnice smanjuje performanse videodetektora. Za nižu visinu (9 m) ne preporuča se postavljanje pokraj prometnice. Domet videodetektora, udaljenost na kojoj videodetektor može razlučiti dva slijedna vozila, u prvom redu ovisi o visini postavljanja, Slika 4.25.a), ali i sastavu i stanju prometnog toka. Na Slika 4.25 b) prikazan je graf ovisnosti dometa razlučivosti, o udaljenosti između vozila (parametar razmak slijeđenja), za fiksnu visinu vozila i za različite visine postavljene kamere.



Slika 4.25 a) Domet razlučivosti videodetektora
b) Graf dometa razlučivosti (na osnovi originala (Klein, 2001))

Načelno se uzima da je domet razlučivosti deset puta veći od visine postavljene kamere, međutim to vrijedi samo za pretpostavljeni razmak između vozila i tok od samo jedne vrste vozila. Konfiguracija prometnice i okoline te vremenske prilike mogu taj domet smanjiti. No najveći utjecaj na smanjenje dometa ima stanje i sastav prometnog toka. Pri zagušenju

međusobna udaljenost vozila je manja što smanjuje razlučivost, a zbog visokih vozila u stvarnom prometnom toku razlučivost se također smanjuje.

Kut nagiba pravca optike detektorskog elementa s horizontalnom ravninom određuje zonu obuhvata vidnog polja, i time mogućnost smještanja detekcijskih zona na prometnoj površini. Fino podešavanje nagiba u funkciji je kalibracije. Mali nagibi kamere, osobito ako je kamera usmjerena prema istoku ili zapadu, mogu rezultirati hvatanjem velikog sjaja sunca u zoru i pri zalasku sunca, a time i pogrešnim detekcijama. Povećanjem nagiba i sjenilima na kamerama taj se utjecaj smanjuje. Uz manje žarišne daljine, vidno polje je veće, ali se uz veće žarišne daljine vozilo lakše detektira (vozilo je u vidnom polju veće).

Na točnost videodetektora utječu osvjetljenje, svjetla i razni objekti. Videodetektori danju koriste algoritme koji prepoznaju rubove (konture) i sjene vozila, a noću svjetla vozila i pripadnu refleksiju od prometne površine. Noću, svjetla semafora, reklamna svjetla i razni odbljesci mogu uzrokovati pogrešne detekcije. Zračni vodovi napajanja ili zračni telekomunikacijski vodovi, pogotovo ako se njišu zbog vjetrova, i ako se na njima uhvati snijeg ili inje, također mogu uzrokovati pogreške.

Vidno polje kamere, ovisno o zahtjevu AUP-a, može služiti i za promatranje odlaznog prometa. S aspekta mogućnosti detekcije praćenje odlaznog prometa ima nekoliko prednosti. Noću nema zaslijepljenja od glavnih svjetala, osim ako vidno polje kamere zahvaća i vozila iz suprotnog smjera. Analizom stanja stražnjih svjetala mogu se dobiti dodatne informacije, npr. kočenje i skretanje. Početna detekcija vozila za potrebe dobivanja trajektorije vozila je olakšana budući da se vozilo prvi put detektira kad je najbliže kameri. Smanjen je utjecaj zaklanjanja vidnog polja zbog visokih vozila.

Primjena i mogućnosti videodetektora

Od svih detektora, videodetektori imaju najveće mogućnosti glede prikupljanja podataka o prometnim parametrima: prisutnost vozila, zauzeće, brzina, klasifikacija vozila, gustoća za dionicu koja je u vidnom polju kamere, vrijeme puta, duljina repa čekanja, P-O podaci. U primjeni, glede broja i položaja detekcijskih zona videodetektor može zamijeniti više induktivnih petlji. Komercijalno opravdano postavljanje videodetektora umjesto induktivnih petlji opravdano je u sljedećim slučajevima:

- kao privremeni detektorski sustav za vrijeme rekonstrukcije prometne infrastrukture
- kao stalni detektorski sustav kada je životni vijek induktivne petlje kratak zbog loše kvalitete prometne površine, ili prometnu površinu brzo uništavaju teška vozila
- ako će se rekonstrukcija raskrižja obavljati u naredne tri godine
- ako detekcijske zone trebaju obuhvaćati površinu dulju od cca 25 m
- ako zamjenjuje dvije do tri induktivne petlje u funkciji upravljanja.

Videodetektor za raskrižja imaju više detektorskih elemenata (kamera) priključenih na jednu detektorsku jedinicu. Pregled specifikacija nekih komercijalnih proizvođača (*Autoscope-Image sensing system*, *Iteris-Vantage*, *VideoTrak-Peek Traffic*, *Traficon-Traficon*, *Sitraffic-Siemens*) pokazuje da proizvodi imaju:

- maksimalan broj kamera priključenih na detektorsku jedinicu od 6 do 8

- maksimalan broj detekcijskih zona po kameri od 24 do 32
- maksimalan broj detekcijskih zona po procesoru od 24 do 256
- maksimalan broj detektorskih izlaza (za detektorsku logiku, signalni uređaj) po detektorskoj jedinici (procesoru) od 24 do 32.

Postavljen u blizini zaustavne crte na raskrižju, videodetektor je pogodan za detekciju prisutnosti vozila (primjerice zamjenjuje dugu petlju). Detekcijska zona može biti po volji duga 6-20 m. Udaljene detekcijske zone mogu biti udaljene i 100 m. Međutim, neka iskustva i istraživanja pokazuju znatna odstupanja točnosti u tim udaljenim zonama, pogotovo glede mjerenja volumena prometa i zauzeća što bi se koristili u funkciji upravljanja (*volume density operation*). S ciljem dobivanja točnijih parametara unutar detekcijskih zona razvijen je algoritam za udaljene detekcijske zone (*Advance Detector Algorithm*), koji povećava osjetljivost detekcijskih zona što se nalaze pri vrhu (gornjoj trećini) prikaza (slike). Za povećanje točnosti koriste se i algoritmi koji detekcijske zone (dobivene parametre detekcijskih zona) povezuju Boolovom algebram (*Boolean Detector Modifier*), što naročito povećava točnost detekcije pri mogućem djelomičnom zaklanjanju detekcijske zone. U nekim slučajevima, povećanju točnosti detekcije pridonosi i algoritam određivanja smjera vozila (*Directional Detector*).

4.3 Prednosti i nedostaci pojedinih detektorskih tehnologija

Načelno glavna prednost neintruzivnih detektora je što nisu potrebni radovi na samoj prometnici, ne oštećuje se prometna površina i potrebno je kraće vrijeme za postavljanje. Prednost intruzivnih je relativno mali utjecaj okoline (vremenskih prilika) na točnost. No svaka pojedina detektorska tehnologija posjeduje inherentne prednosti i nedostatke. Tablica 4.3 prikazuje glavne prednosti i nedostatke pojedinih detektorskih tehnologija

Tablica 4.3 Prednosti i nedostaci detektorskih tehnologija

Detektorska tehnologija	Prednosti	Nedostaci
Induktivna petlja	<ul style="list-style-type: none"> - Jedna od najtočnijih detektorskih tehnologija za osnovne prometne parametre - Dobro poznata tehnologija s velikim postojećim iskustvom - Niska cijena po jedinici detektora - Velike mogućnosti glede prilagodbe oblika i veličine detekcijske zone - Detekcijska zona dobro definirana - Loši uvjeti prometne okoline (vremenske prilike i osvjetljenje) ne utječu na petlju 	<ul style="list-style-type: none"> - Pouzdanost i raspoloživost ovisna o stanju prometne površine (učestali kvarovi na prometnoj površini loše kvalitete) - Nije pogodna za uporabu na prometnoj infrastrukturi koja sadrži željezo (mostovi, nadvožnjaci, armiranobetonske konstrukcije) - Nužno zatvaranje prometnog traka pri postavljanju ili popravljaju kvarova - Opremanje raskrižja induktivnom petljom zahtijeva veći broj detektorskih petlji - Postavljanje zahtijeva rezanje prometne površine - Zahtijeva redovito održavanje - Mala točnost mjerenja brzine jednim detektorom

Detektorska tehnologija	Prednosti	Nedostaci
Magnetski ispitna zavojnica	<ul style="list-style-type: none"> - Brže i jednostavnije postavljanje s manjim utjecajem na prometni tok od induktivne petlje - Jednostavnost, robusnost i dugovječnost - Niska cijena 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne može detektirati zaustavljeno vozilo - Skroman skup podataka koje može dobavljati - Mala detekcijska zona - Slabi detekcijski signali koje generira
Magnetometar	<ul style="list-style-type: none"> - Nije podložan vremenskim utjecajima - Otporniji od petlje na stanje prometne površine - Moguća uporaba na prometnoj infrastrukturi koja sadrži željezo - Postojeći tipovi omogućuju bežičnu vezu 	<ul style="list-style-type: none"> - Mala detekcijska zona jednoga detektorskog elementa - Neprikladan za aplikacije gdje je potrebno pokrivanje veće prometne površine - Osjetljivost ovisna o dubini postavljanja, a time i točnosti (moguće prebrojavanje za plitko postavljene sonde, izostanak detekcije za duboko postavljene sonde) - Postavljanje zahtijeva bušenje ili rezanje prometnice, ali je utjecaj na odvijanje prometnog toka manji nego kod petlje
Pasivni infracrveni	<ul style="list-style-type: none"> - Jedan detektor može imati više detekcijskih zona u jednom traku - Vrlo mali utjecaj vremenskih prilika na detektore kratkog dometa - Moguća detekcija na udaljenostima 100 m od detektorskog elementa (detektori dugog dometa) 	<ul style="list-style-type: none"> - Magla, smog, snijeg i kiša utječu na točnost detektora dugog dometa - Deformacija udaljenih detekcijskih zona i izražena pojava zaklanjanja kod detektora dugog dometa
Aktivni infracrveni	<ul style="list-style-type: none"> - Vrlo točno mjerenje brzine, određivanje pozicije vozila i klasifikacija vozila 	<ul style="list-style-type: none"> - Magla, gusti snijeg, mokar kolnik utječu na točnost (manje otporan na vremenske prilike od pasivnog infracrvenog detektora) - Detekcijska zona nalazi se neposredno ispod detektora (linijskog oblika) - Potrebna precizna izradba, sadrži elektroniku i preciznu mehaniku - Visoka cijena
Videodetektor	<ul style="list-style-type: none"> - Mogućnost integracije detekcije vozila (i ostalih prometnih parametara) i nadzora prometa - Veliko područje pokrivanja - Prilagodljivost veličine i oblika detekcijskih zona - Emulacija više induktivnih petlji - Velik skup dobavljivih podataka 	<ul style="list-style-type: none"> - Točnost detektora podložna nizu utjecaja: loše vremenske prilike (kiša, magla, snijeg, vjetar), pojava zaklanjanja vidnog polja, promjena osvjetljenja i zaslepljenje - Prljanje objektiva kamere (prašina, smog, inje), potrebno čišćenje - Svojstva detektora ovisna o položaju kamere - Zahtjevna kalibracija
Radarski detektor	<ul style="list-style-type: none"> - Loše vremenske prilike nemaju utjecaja - Moguće mjerenje brzine - Pokrivanje više trakova, ili više detekcijskih zona u jednom traku (FMCW) - Brzo i jednostavno postavljanje - Postavljanje pokraj prometnice ne ometa prometni tok 	<ul style="list-style-type: none"> - CW radarski detektor ne može detektirati zaustavljeno vozilo - Izražena pojava zaklanjanja (detektor postavljen pokraj prometnice) - Oblik detekcijske zone određen je konstruktivnim značajkama i položajem detektora - CW detektori neprikladni za mjerenje zauzeća

Detektorska tehnologija	Prednosti	Nedostaci
Pasivni zvučni detektori	<ul style="list-style-type: none"> - Pokrivanje više trakova (više detekcijskih zona) - Brzo i jednostavno postavljanje - Prilagodljive detekcijske zone - Postavljanje pokraj prometnice, ne ometa se prometni tok 	<ul style="list-style-type: none"> - Slaba klasifikacija vozila - Na točnost detektora mogu utjecati jak vjetar, kiša, gusti snijeg, ali i hladnoća - Vrlo bučna vozila u susjednom traku mogu izazvati pogrešnu detekciju - Neki tipovi neprikladni za veliku gustoću prometnog toka (repovi na raskrižjima)
Ultrazvučni detektori	<ul style="list-style-type: none"> - Brzo i jednostavno postavljanje - Moguće pokrivanje više trakova, ali nije selektivno (postavljen pokraj prometnice) - Pulsni ultrazvučni imaju mogućnost mjerenja zauzeća i klasifikaciju (samo u nekoliko kategorija) - Visoka točnost mjerenja volumena - Mali zahtjevi na održavanje 	<ul style="list-style-type: none"> - Detekcijska zona isključivo kružnog oblika i okomita na os detektora - Na točnost utječu promjene temperature i jaka strujanja zraka - Na točnost utječe stanje prometnog toka - Mala točnost pri mjerenju zauzeća pri većim brzinama vozila (neki tipovi) - Za svaku detekcijsku zonu poseban detektor (postavljanje iznad prometnice)
Piezodetektori	<ul style="list-style-type: none"> - Mjerenje težine i broja osovina 	<ul style="list-style-type: none"> - Točnost mjerenja volumena ovisna o sastavu prometnog toka - Kvaliteta prometne površine utječe na vjerojatnost kvarova i točnost podataka - Postavljanje zahtijeva rezanje prometne površine i zaustavljanje prometnog toka

5. POKRETNOST OSJETILA

Osnovna ideja pokretnih osjetila je da vozila koje se kreću po prometnoj mreži i sastavni su dio prometnog toka prikupljaju i šalju podatke. Vrlo često korišten termin za pokretno osjetilo je vozilo (*eng. Probe Vehicle*). Nužan zahtjev koji treba biti ispunjen kod pokretnih osjetila je poznavanje pozicije vozila u određenim vremenskim trenucima. Glede toga načelno se sustav sa pokretnim osjetilima može ostvariti na tri načina:

- Identifikacijom vozila u određenim točkama mreže
- Lociranjem vozila resursima čelijskih mreža
- Lociranjem vozila GNSS modulom u vozilu

Prvi način je poznat pod kraticom AVI (*eng. Automatic Vehicle Identification*), dok su druga dva poznata pod kraticom AVL (*eng. Automatic Vehicle Location*). AVI u stvari identificira vozilo u fiksnim točkama mreže, a izvor podataka je vozilo koje se kreće i koje može biti identificirano na različitim točkama mreže te predati podatke o tome što se desilo između tih fiksnih točaka. Najučestaliji termin u anglosaksonskoj znanstvenoj i stručnoj literaturi pod kojim se podrazumijeva prikupljanje podataka i AVL (tj. lociranje vozila resursima čelijskih mreža ili GNSS modulom jest FCD (*eng. Floating Car Data*)).

Najperspektivnija tehnologija glede prikupljanja podataka o stanju prometne mreže je ona gdje se pozicija vozila određuje pomoću GNSS sustava. Stoga se danas pod pojmom FCD-a uglavnom podrazumijeva upravo korištenje GNSS-a tj. pokretno osjetilo opremljeno modulom za satelitsku navigaciju i lociranje te modulom za komunikaciju. Danas je FCD komplementarni izvor vrijednih podataka i postaje najvažnija tehnologija prikupljanja podataka inteligentnih transportnih sustava.

Ukoliko pokretno osjetilo nije vozilo već “pametni” telefon tada je vrlo česti naziv FPD (*eng. Floating Phone Data*). FPD također za lociranje koristi GNSS modul koji se nalazi u “pametnom” telefonu. U biti FPD se odnosi na pojam gdje se podaci prikupljaju putem “pametnih” telefona neovisno o tome kako se ustanovljava pozicija telefona (GNSS lociranjem ili lociranjem uz pomoć celularnih mreža. Zbog nekih nedostataka lociranja putem celularnih mreža razvoj takvog načina je stagnirao, što ne znači da nema i perspektivu. Kako danas gotovo svaki “pametni” telefon sadrži modul za lociranje termin FPD uglavnom se odnosi na način gdje “pametni” telefoni šalju GNSS podatke. Ako se za lociranje vozila koriste resursi čelijskih mreža uobičajena kratica je CFCD (*eng. Cellular Floating Car Data*)).

Za razliku od FCD-a gdje u prikupljanju podataka sudjeluju “namjenska” vozila (taksi, distribucija roba, javni prijevoz, službena vozila i dr.) kod FPD-a u prikupljanju podataka sudjeluju “slučajni” korisnici usluge celularne mreže koji uz svoju suglasnost (ili bez suglasnosti) dijele podatke o svojoj poziciji i kretanju. Pri tome se algoritmima obrade podataka ustanovljava kojim modom transporta se korisnik koristi.

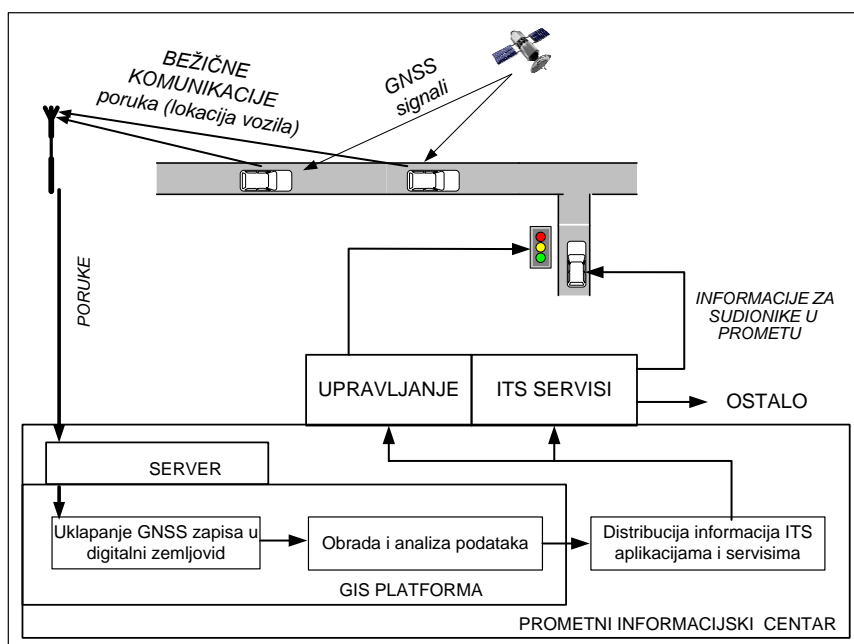
5.1 Pokretna osjetila sa GNSS lociranjem

U osnovnoj izvedbi sustava prikupljanja podataka pokretno osjetilo tj. vozilo opremljeno je samo modulom koji omogućava lociranje vozila i modulom za komunikaciju. Podatke koje prikuplja takvo vozilo, odnosno odgovarajuća oprema šalju se u centralno mjesto za obradu podataka. Umjesto izraza pokretna osjetila sa GNSS lociranjem u daljnjem tekstu vrlo često će se koristiti kratica FCD zbog kratkoće zapisa i zato što se uobičajeno koristi u literaturi.

Kao pokretna osjetila najčešće se koriste vozila koja su dio neke flote vozila, primjerice taksi službe, vozila JGP-a i vozila za distribuciju roba jer su takva vozila već opremljena dodatnim OBU uređajem (eng. *On Board Unit*) koji sadrži navigacijski i komunikacijski modul, a služi za stalno praćenje vozila i komunikaciju sa centrom. U više gradova u svijetu u takvom načinu prikupljanja podataka sudjeluju taksi službe, pa se onda naziva i „Taxi-FCD“.

5.1.1 Koncept sustava prikupljanja podataka temeljen na pokretnim osjetilima sa GNSS lociranjem

Sustav za prikupljanje podataka temeljen na pokretnim osjetilima tj. FCD sustav temelji se na više podsustava različitih tehnologija. Slika 5.1 prikazuje konceptualni prikaz i uključene tehnologije na kojima počiva FCD sustav. Osnovne podatke o prostornoj i vremenskoj poziciji vozila generira GNSS modul. Komunikacijski modul u vozilu putem bežične komunikacijske mreže šalje poruke u centar za obradu podataka. Za obradu i prezentaciju lokacijski baziranih informacija nužan je GIS (*Geografski Informacijski Sustav*) sa pripadnim prometnim slojem (digitalnim zemljovidom prometne mreže). Informacije o stanju prometne mreže mogu biti iskorištene za razne namjene: upravljanje, informiranje sudionika u prometu, logističke potrebe i dr.



Slika 5.1 Konceptualni prikaz sustava: prikupljanje podataka pokretnim osjetilima sa GNSS lociranjem

Sustavi satelitskog pozicioniranja i navigacije

GNSS (eng. *Global Navigation Satellite System*) je kratica za Globalni navigacijski satelitski sustav, koji uključuje više satelitskih sustava, a treba pružiti interoperabilnost i kompatibilnost sustava. Tri satelitska sustava koji čine GNSS su američki GPS (eng. *Global Positioning System*), ruski GLONASS (rus. *ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система*) i europski Galileo. Najpoznatiji je američki sustav GPS. Operativan je i ruski GLONASS dok se puna funkcionalnost sustava Galileo sustava očekuje krajem ovog desetljeća

Zajedničko svim sustavima je da se sastoje od orbitalno-satelitskog, kontrolno-zemaljskog i korisničko-prijemnog segmenta. Za mjerenje udaljenosti koriste se radio signali male snage koji se odašilju sa satelita. U signalu koji prima prijemnik sadržani su kodirani podaci o vremenu slanja, na osnovu kojih prijemnik izračunava udaljenost do vidljivih satelita. Na osnovi izračunate udaljenosti od barem tri satelita metodom trilateracije izračunava se pozicija prijemnika.

GNSS sustav osigurava korisnicima globalnu pokrivenost, kontinuiranu uslugu o trodimenzionalnoj poziciji, brzini te mogućnost sinkronizacije korisnika putem sistemskog UTC (*Universal Time Coordinated*) vremena. Sustav Galileo je kompatibilan sa GPS sustavom što je omogućilo povećanje točnosti pozicioniranja. Uređaji za lociranje su danas lako dostupni i jeftini. Sastoje se od antene, prijemnika koji dizajniranog za prijem, dekodiranje i obradu koda (signala) satelita koji sadrži potrebne podatke za određivanje udaljenosti od satelita i izračun pozicije (koordinata). Danas najzastupljenije tehnologije *chipseta* (*skup integriranih sklopova za obradu signala satelita*) su MTK i SiRF. Korištenje GPS sustava i GLONASS-a za lociranje jednim uređajem podrazumijeva korištenje ili zasebnih *chipset-a* ili novih chipseta kao što je SirfStar V ili MTK 3333 koji simultano obrađuju signale i time dodatno povećavaju točnost pozicioniranja.

Za sustave sa pokretnim osjetilima od važnosti je i razvoj mreže stacionarnih zemaljskih referentnih postaja za korekciju pogrešaka pri izračunavanju pozicije, a koja znatno povećava točnost pozicioniranja pokretnih osjetila. U Hrvatskoj je Državna geodetska uprava uspostavila nacionalnu mrežu stanica nazvanu CROPOS (*CROatian POSitioning System*) koja se sastoji od 30 referentnih GNSS postaja na međusobnoj udaljenosti od 70 km. Umreženi sustav referentnih GNSS postaja omogućuje neprekidna mjerenja koja se obrađuju u kontrolnom centru. Na raspolaganju su inače tri vrste servisa (usluga) koji se međusobno razlikuju po metodi rješenja, načinu prijenosa podataka, točnosti i formatu podataka. Najznačajniji za sustave s pokretnim osjetilima je servis DSP (*Diferencijalni servis pozicioniranja*) koji radi u stvarnom vremenu s točnošću od 0,5 m. Namijenjen je za primjenu u geoinformacijskim sustavima, navigaciji, upravljanju prometom, zaštiti okoliša, poljoprivredi i šumarstvu.

Bežične komunikacijske tehnologije

Za dostavu podataka od pokretnih osjetila do centralnog mjesta prikupljanja podataka nužne su komunikacijske tehnologije koje omogućavaju mobilnost. Kako FCD podrazumijeva prijenos podataka s bilo koje točke u prometnoj mreži do centra za prijem i obradu FCD podataka aktualne su ćelijske mobilne mreže poput GSM-a (*Global System for Mobile*

Communications) (sa unaprjeđenjima GPRS (*General Packet Radio Service*), EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*)) te novije generacije UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) (sa nadogradnjom HSPA (*Evolved High-Speed Packet Access*) tehnologijom)) i zadnje generacije LTE (*Long Term Evolution*). Prostorna pokrivenost UMTS-om, a posebice LTE-om za sada još nije potpuna.

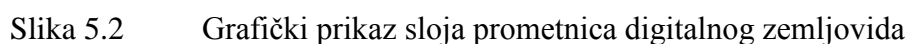
Primjenu u FCD sustavu mogu naći i komunikacijske tehnologije kratkog dometa, kao što su Wi-Fi (*Wireless-Fidelity*, IEEE 802.11), Bluetooth (IEEE 802.15.1), ZigBee (IEEE 802.15.4). Njihova primjena prvenstveno se odnosi na proširenje mogućnosti prikupljanja podataka, u smislu da FCD vozilo ne komunicira samo sa centrom već i komunicira i sa vozilima koja se nalaze u blizini nekom od komunikacijskih tehnologija kratkog dometa. Primjerice jedno FCD vozilo prikuplja i podatke od vozila koja se nalaze u blizini (ta vozila nemaju direktnu vezu sa centrom). Prikupljene podatke FCD vozilo dostavlja u centar za obradu podatka.

Od posebnog interesa za uspješnu primjenu komunikacijskih tehnologija u prometu što naravno uključuje i FCD je standardizacija telekomunikacijskih tehnologija za ITS. ITU-T (*ITU Telecommunication Standardization Sector*) jedan je od tri sektora ITU-a (*International Telecommunication Union*) koji se sastoji od niza studijskih grupa. Grupa SG16 unutar tog sektora bavi se standardizacijom bežičnih komunikacija između vozila (V2V - *Vehicle to vehicle*) i između vozila i infrastrukture (V2I - *Vehicle to Infrastructure*), odnosno definira komunikacijsku platformu za ITS (*Vehicle gateway platform for telecommunication / ITS*). ISO (*International Organization for Standardization*) kroz niz radnih grupa razvija ISO/TC204 standard za globalnu integraciju i interoperabilnost telekomunikacijskih tehnologija u ITS okruženju. Vizija prema IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) je globalno standardizirana mreža koja omogućava komunikaciju između vozila, te između vozila i pristupnih točki. U tom smislu bavi se razvojem standarda IEEE 802.11 i njegovih inačica i nadopuna. Bitna je izmjena podataka između vozila, koja se kreću većim brzinama, u licenciranom radiofrekvencijskom pojasu za ITS aplikacije (5,85 GHz - 5,925 GHz). U Europi organizacije za standardizaciju CEN (*European Committee for Standardization*), CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*) i ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) bave se standardizacijom prometne telematike, a najvažniji u tom području je Tehnički komitet TC 278 (*TC 278 - Road transport and traffic Telematics*).

Geografski informacijski sustav

Geografski Informacijski Sustav (GIS) omogućava obradu prostornih podataka, informacija i atributa vezanih prostor. GIS je u stvari pojam za tehnologiju koja objedinjava različite računarske resurse, programsku podršku, podatke, informacije i znanja u jedan sustav koji omogućava proučavanje i uporabu prostornih podataka i informacija. GIS sadrži prostorno orijentiranu bazu podataka sa skupom „alata“ koji omogućavaju manipulaciju tim podacima u smislu pohranjivanja, integriranja, ažuriranja, ispitivanja, analiziranja, prikazivanja, vizualizacije podataka i informacija prostornog karaktera. Model stvarnog svijeta prezentira se objektima (točkama, linijama, poligonima) između kojih postoje odnosi i veze, te su i povezani u logičke grupe. Takva baza sadrži geometriju, prostorni referentni sustav, attribute i pravila ponašanja podataka. Za modeliranje stvarnog svijeta koriste se i spremaju podaci u

Nužno za FCD je mogućnost interaktivnog rada sa slojem koji sadrži prometnu mrežu (digitalni zemljovid sa prometnicama). Odnosno, mogućnost pohrane, prikaza i manipulacije podataka kako onih koji opisuju samu prometnu mrežu tako i FCD podataka. Postojanje kvalitetnog digitalnog zemljovida osnovni je preduvjet za primjenu FCD-a sa svrhom prikupljanja podataka. Prometnice na digitalnom zemljovidu uobičajeno se sastoje od niza linkova (link - objekt koji odgovara jednom segmentu prometnice). Svaki link ima svoj identifikacijski broj, geografskim koordinatama definiran početak i kraj. Svakom linku može se pridružiti niz atributnih podataka kao što je: smjer linka (smjer prometa), kategorija prometnice, ograničenje brzine i dr. Primjer digitalnog zemljovida tvrtke „Mireo“ dan je na, Slika 5.2.



5.1.2.1 FCD podaci i poruke

Vremenska oznaka određuje položaj pokretnog osjetila u vremenu, i sadrži UTC (*Universal Time Coordinated*) vrijeme. UTC vrijeme u sustavu GNSS-a je prihvaćeno kao kompromisno rješenje između dvije vrste vremenskih skala: univerzalne zasnovane na rotaciji Zemlje i vremenskom etalonu atomskih satova. UTC vrijeme predstavlja vrijeme određeno atomskim satovima kojem se prema potrebi dodaje ili oduzima prijestupna sekunda. Time se osigurava da maksimalna razlika između UTC i astronomske UT1 (*Universal Time*) vremena uvijek

bude manja od jedne sekunde. Od 1. siječnja 1972. godine UTC je formalna vremenska skala, a prijestupna sekunda mu se dodaje ili oduzima u ponoć 30. lipnja ili 31. prosinca.

Za bilježenje i razmjenu podataka GNSS tehnologije koristi se dogovoreni postupak ili protokol. Protokol uključuje sintaksu i semantiku informacije, te pravila za razmjenu informacija definirana formatom podataka. Zapisi dobiveni GNSS tehnologijom mogu biti u različitim formatima, a najčešći su NMEA (*National Marine Electronics Association*) i GPX (*GPS Exchange Format*). Svaki format se razlikuje po tome što različito interpretira mjerenja, te zbog toga svaki format ima različitu primjenu. Za razmjenu su u primjeni dva protokola, RTCM i NMEA0183. NMEA0183 protokol je uspostavila američka Državna pomorska udruga za elektroniku. NMEA0183 format koristi ASCII način kodiranja znakova koji je temeljen na engleskoj abecedi. Podaci među uređajima se razmjenjuju u obliku NMEA rečenica (eng. *sentence*) koje se sastoje od tipa poruke, sadržaja i kontrolnog zbroja (eng. *checksum*), a svaka rečenica počinje ključnom riječi. Ključna riječ se sastoji od znaka '\$', slova 'G' i 'P' te tri slova koja definiraju format. Primjerice: \$GPGGA – *Global Positioning System Fix Data*, \$GPGLL – *Geographic Position, Latitude/Longitude*; \$GPZDA – *Time & Date*; \$GPZFO – *UTC & Time from Origin Waypoint* itd. Ukupno postoji 54 tipa NMEA rečenica. Nakon ključne riječi slijedi niz vrijednosti odvojenih zarezima. Primjer NMEA rečenica zabilježenih navigacijskim uređajem u 5 sekundi, Slika 5.3.

```
$GPGGA,131001.000,4520.2591,N,01605.3077,E,1,10,0.8,124.3,M,42.0,M,,0000*58
$GPGSA,A,3,27,05,15,26,08,28,17,09,18,07,,,1.4,0.8,1.1*3C
$GPRMC,131001.000,A,4520.2591,N,01605.3077,E,0.34,73.79,190511,,*3C
$GPGGA,131002.000,4520.2590,N,01605.3069,E,1,10,0.8,125.0,M,42.0,M,,0000*57
$GPGSA,A,3,27,05,15,26,08,28,17,09,18,07,,,1.4,0.8,1.1*3C
$GPRMC,131002.000,A,4520.2590,N,01605.3069,E,2.18,232.22,190511,,*04
$GPGGA,131003.000,4520.2584,N,01605.3062,E,1,09,0.9,124.6,M,42.0,M,,0000*56
$GPGSA,A,3,27,05,15,26,08,28,17,09,18,,,1.5,0.9,1.2*38
$GPGSV,3,1,10,26,88,342,35,28,63,072,40,15,45,304,39,08,32,067,35*75
$GPGSV,3,2,10,27,31,274,34,05,26,204,37,17,17,134,23,09,11,268,23*78
$GPGSV,3,3,10,18,06,326,22,07,06,078,23*7F
$GPRMC,131003.000,A,4520.2584,N,01605.3062,E,4.06,205.78,190511,,*09
$GPGGA,131004.000,4520.2577,N,01605.3054,E,1,10,0.8,124.9,M,42.0,M,,0000*5E
$GPGSA,A,3,27,05,15,26,08,28,17,09,18,07,,,1.4,0.8,1.1*3C
$GPRMC,131004.000,A,4520.2577,N,01605.3054,E,3.25,200.31,190511,,*09
$GPGGA,131005.000,4520.2569,N,01605.3047,E,1,10,0.8,124.9,M,42.0,M,,0000*52
$GPGSA,A,3,27,05,15,26,08,28,17,09,18,07,,,1.4,0.8,1.1*3C
$GPRMC,131005.000,A,4520.2569,N,01605.3047,E,3.46,207.46,190511,,*07
```

Slika 5.3 Primjer NMEA rečenice

GPX (eng. *GPS Exchange Format*) je XML podatkovni format. XML (eng. *EXtensible Markup Language*) je način označavanja podataka (programski jezik) koji koristi lako shvatljive oznake. GPX omogućava zapis, razmjenu GPS podataka između aplikacija i uređaja. Primjer zapisa u GPX formatu i tablica značenja oznaka,

<pre> <?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1" standalone="yes"?> <?xml-stylesheet type="text/xsl" href="details.xsl"?> <trk> <trkseg> <trkpt lat="45.785343170166016" lon="15.949441909790039"> <ele>204.0</ele> <time>2016-06-01T23:36:38Z</time> <desc>Vlaga=41</desc> <cmt>Neki komentar</cmt> <extensions></extensions> </trkpt> <trkpt lat="45.7855224609375" lon="15.949471473693848"> <ele>114.5</ele> <time>2016-06-01T23:43:17Z</time> <desc>Vlaga=42</desc> <cmt></cmt> <extensions></extensions> </trkpt> <trkpt lat="45.786136627197266" lon="15.950296401977539"> <ele>172.0</ele> <time>2016-06-01T23:69:45Z</time> <desc>Vlaga=43</desc> <cmt></cmt> </trkpt> </trkseg> </trk> </gpx> </pre>	<table> <tr> <th>Oznake</th><th>Opis</th></tr> <tr> <td>gpx</td><td>osnovni, korijenski element</td></tr> <tr> <td>trk</td><td>osnovni element za stazu</td></tr> <tr> <td>trkseg</td><td>element koji predstavlja dio staze, segment</td></tr> <tr> <td>trkpt</td><td>element koji predstavlja jednu točku staze</td></tr> <tr> <td>lat</td><td>geografska širina točke u stupnjevima [-90,90]</td></tr> <tr> <td>lon</td><td>geografska dužina točke [-180,180]</td></tr> <tr> <td>ele</td><td>nadmorska visina točke izražena u metrima</td></tr> <tr> <td>time</td><td>vrijeme kad je točka zabilježena</td></tr> <tr> <td>desc</td><td>opis točke, može sadržavati bilo kakav tekst</td></tr> <tr> <td>cmt</td><td>komentar točke, može sadržavati bilo kakav tekst</td></tr> <tr> <td>extensions</td><td>označava posebne elemente za proširenje standarda željenim karakteristikama</td></tr> </table>	Oznake	Opis	gpx	osnovni, korijenski element	trk	osnovni element za stazu	trkseg	element koji predstavlja dio staze, segment	trkpt	element koji predstavlja jednu točku staze	lat	geografska širina točke u stupnjevima [-90,90]	lon	geografska dužina točke [-180,180]	ele	nadmorska visina točke izražena u metrima	time	vrijeme kad je točka zabilježena	desc	opis točke, može sadržavati bilo kakav tekst	cmt	komentar točke, može sadržavati bilo kakav tekst	extensions	označava posebne elemente za proširenje standarda željenim karakteristikama
Oznake	Opis																								
gpx	osnovni, korijenski element																								
trk	osnovni element za stazu																								
trkseg	element koji predstavlja dio staze, segment																								
trkpt	element koji predstavlja jednu točku staze																								
lat	geografska širina točke u stupnjevima [-90,90]																								
lon	geografska dužina točke [-180,180]																								
ele	nadmorska visina točke izražena u metrima																								
time	vrijeme kad je točka zabilježena																								
desc	opis točke, može sadržavati bilo kakav tekst																								
cmt	komentar točke, može sadržavati bilo kakav tekst																								
extensions	označava posebne elemente za proširenje standarda željenim karakteristikama																								

Od interesa za FCD su naravno podaci koji se mogu iskoristiti i koji su po mogućnosti već uklopljeni u digitalni zemljovid. FCD poruka najčešće sadržava:

- ID vozila
- vremensku oznaku
- koordinate (geografsku širinu i dužinu)
- oznaku vožnje ili stajanja
- trenutnu brzinu
- smjer kretanja u odnosu na sjever

Ovisno o mogućnostima postojećeg sustava koji se namjerava iskoristiti za FCD, namjeni i troškovima slanja poruka poruke mogu biti slijedećih struktura:

- ID vozila, prostorna i vremenska pozicija, trenutna brzina, smjer prema sjeveru, ostali podaci
- ID vozila, trag vozila (niz zabilježenih prostornih i vremenskih pozicija koji prezentira trajektoriju vozila)
- ID vozila, vrijeme putovanja i prosječna brzina na određenim segmentima mreže (podaci obrađeni u opremi vozila)

5.1.2.2 Postupci obrade FCD podataka

Za razliku od detektora prometnog toka gdje su već i neobrađeni podaci (parametri prometnog toka) iskoristivi i imaju značaj, FCD sirovi podatak ne govori gotovo ništa. Značenje FCD podataka iskoristivo je tek nakon obrade podataka. Ovisno o namjeni obrada FCD podataka može se izvršavati nad povijesnim podacima ili stvarnovremeno. U slučaju povijesnih podataka koji se prikupljanju mjesecima i godinama nastaje ogromna količina podataka (*eng. Big Data*). Ako se obrađuju stvarnovremeni podaci za utvrđivanje stvarnovremenog stanja prometne mreže, podaci se agregiraju u definiranim vremenskim intervalima (npr. 1 min, 5 min, 10 min),

a zatim obrađuju. Naravno količina podataka ovisi o udjelu FCD vozila i frekvenciji poruka, ali rezultat je opet velika količina podataka koju treba obraditi u dostupnom vremenu. Prikladan pristup velikim količinama podataka je dubinska analiza (*eng. Data Mining*). Dubinska analiza je proces otkrivanja znanja iz velikih količina podataka s krajnjim ciljem pronalaženja korisnih, razumljivih, ispravnih, novih te netrivialnih obrazaca i uzoraka. Dubinska analiza je multidisciplinarni i više stupanjski proces koji koristi metode iz statistike, vizualizacije, strojnog učenja, prepoznavanja uzoraka, baza podataka i umjetne inteligencije. Prije postupka same dubinske analize nužno je preprocesiranje podataka u smislu integracije podataka, čišćenja podataka (*eng. data cleaning*) i uklapanja u digitalnu kartu (*eng. Map-matching*). Nakon toga slijede postupci dubinske analize gdje su izgladivanje i klasteriranje za FCD najvažniji postupci.

Integracija podataka

Integracija podataka podrazumijeva spajanje podataka iz različitih izvora (u ovome slučaju od različitih FCD vozila, ili iz različitih FCD baza podataka) u jedinstvenu bazu podataka. Koncept integracije osigurava početnu kvalitetu podataka u smislu točnosti sintakse i semantike podataka, odnosno osigurava da podaci u bazi budu iste strukture, formata i značenja. Primjerice GNSS zapisi mogu biti u različitim formatima (gpx., csv., i dr.) ili primjerice na mjestu zapisa brzine umjesto km/h nalazi se zapis mp/h itd.

Čišćenje podataka

Čišćenje podataka jest postupak u kojem se odbacuju nepotpuni, nekonzistentni i nevjerodostojni podaci te ustanovljava da li podaci nedostaju. Čišćenje podataka može se obavljati više puta. Na samom početku obrade mogu se odbaciti poruke koje su nepotpune odnosno kojima zbog nekog razloga nedostaju osnovni podaci (ID vozila, pozicija, vremenska oznaka i dr.). Čišćenje se može odvijati i paralelno sa uklapanjem u digitalnu kartu i/ili nakon uklapanja u digitalni zemljovid. Uglavnom čišćenje podrazumijeva tretiranje podataka kako bi se smanjio utjecaj

- podataka koji su nepotpuni
- nekonzistentnih podataka (duplikati podataka, kontradiktorni podaci, podaci sa šumom tj. pogreške u mjerenju)
- podaci sa vrijednostima koji upućuju na anomalije i/ili prelaze očekivane vrijednosti (*eng. outliers*)

Kod tretiranja podataka *outliers* treba biti posebno oprezan jer anomalije u vrijednostima podataka za koje se pretpostavlja da je pogreška ili izoliran slučaj kojemu je uzrok nepoznat može u stvari koristan podatak koji govori o ponašanju sustava.

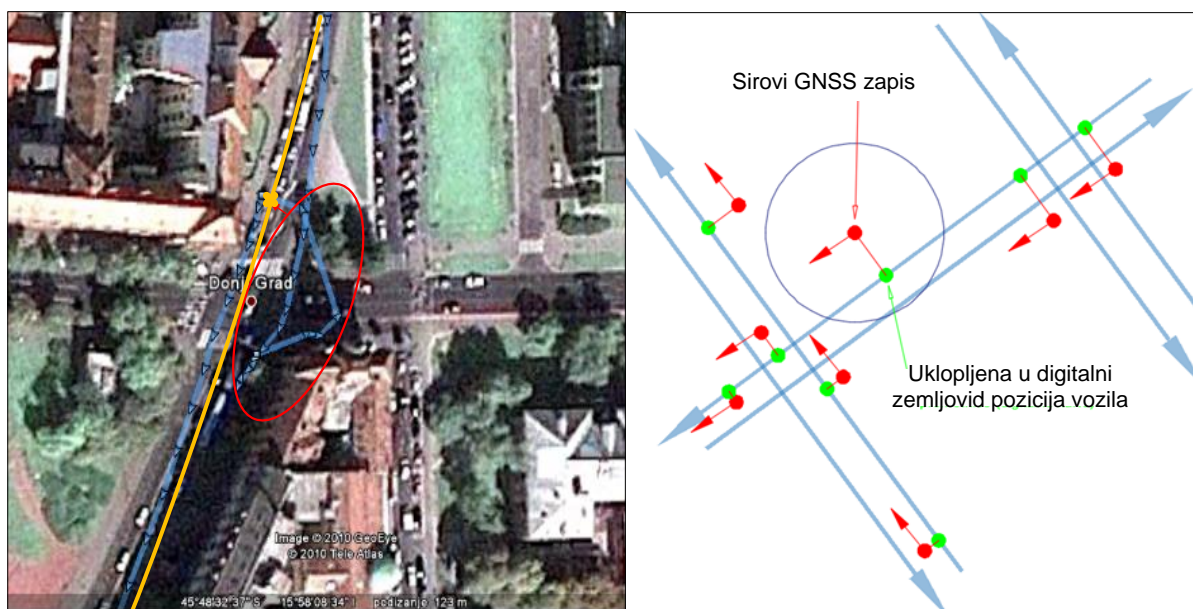
Uklapanje u digitalni zemljovid

Nesavršenost GNSS sustava i promjene uvjeta propagacije satelitskog signala rezultira u pogreškama u izračunatim pozicijama (lokaciji) vozila. Posebno velike pogreške dešavaju se u urbanim sredinama i kad vozilo stoji. Slika 5.4 a) prikazuje pogreške pozicioniranja zaustavljenog vozila (uokvirene crvenom linijom) (narančasti križić je ispravljena pozicija

vozila, narančasta linija je ispravljeni trag vozila). Uklapanje u digitalnu kartu (engl. *Map-matching*) je postupak koji na osnovu izračunatih pozicija vozila (sirovi GNSS zapisi) pridružuje vozilu poziciju koja odgovara položaju na prometnici, Slika 5.4 b). Uklapanje u digitalni zemljovid povećava točnost pozicioniranja i omogućava daljnju obradu FCD podataka.

Uklapanje u digitalni zemljovid ostvaruje se algoritmom koji povezuje GNSS zapise (tragove) s vektorskim zapisom prometnica. Algoritmom se vozilu dodjeljuje vjerojatnija pozicija koja se nalazi na prometnici. Postoji više vrsta metoda tj. odgovarajućih algoritama: geometrijski algoritmi, topološki algoritmi i probabilistički i napredni.

Geometrijski algoritmi upotrebljavaju geometrijske informacije o cestovnoj mreži. Postoji više vrsta a najpoznatije su: uklapanje točke na točku (*eng. point to point*), uklapanje točke na krivulju (*eng. point to curve*) i uklapanje krivulje na krivulju (*eng. curve to curve*). U GIS-u topologija se odnosi na relacije između entiteta (točke, linije, poligoni). Relacije se definiraju susjedstvo (poligoni), povezivost (linije) i okruženje (točke i poligoni). To omogućava postavljanje dodatnih kriterija. Primjerice ako je smjer trajektorije (traga) okomit ili suprotan najbližoj liniji (koja odgovara prometnici) neće se izvršiti uklapanje na tu liniju. Probabilistički algoritmi zahtijevaju definiranje eliptičkih ili pravokutnih područja pouzdanosti oko pozicije definirane sirovim GNSS zapisom, odnosno područja gdje postoji vjerojatnost da se vozilo nalazi. Ako se području pouzdanosti nalazi više cestovnih segmenata, tada se koristeći kriterije smjera, povezivosti, bliskosti određuje najvjerojatnija pripadnost cestovnom segmentu. Pojam napredni *map matching* algoritmi odnosi se na sofisticirane algoritme koji se baziraju na Kalmanovom filteru, Demspster-Shafer teoriji dokaza, neizrazitoj logici i dr.



Slika 5.4 a) Pogreške pozicioniranja b) Uklapanje u digitalni zemljovid

Zaključivanje o putu

Kako se FCD podaci vrlo često prikupljaju u okvirima postojećih mogućnosti (npr. sustava za praćenje vozila) dešava se da je učestalost slanja poruka niska, što znači da vozilo može proći nekoliko segmenata prometnice (između raskrižja) između slanja poruke (između pozicija sa kojih šalje poruke). Posljedica male učestalosti slanja poruka tada je neizvjesnost poznavanja stvarnog puta kojim je vozilo prošlo, kao, te problem raspodjele vremena putovanja na pretpostavljenim linkovima koji sačinjavaju taj put.

Problem je složeniji nego li kod uobičajene navigacije. Kod uobičajene navigacije pozicija vozila se stalno prati te je poznata trajektorija vozila. Međutim ako se šalju poruke o pozicijama vozila zabilježene su samo dvije pozicije, a put između nije poznat. U slučaju sirovih podataka, prvo treba ustanoviti na kojem linku i mjestu na linku je točna pozicija vozila tj. potrebno je izvršiti uklapanje u digitalni zemljovid, što predstavlja problem ako se zabilježena pozicija vozila nalazi u blizini više linkova (npr. raskrižje).. U tom slučaju pomaže ako se u poruci nalazi i podatak o smjeru kretanja vozila (može pomoći i podataka o brzini vozila). A zatim je potrebno i rekonstruirati mogući put između te dvije pozicije odnosno donijeti zaključak kojim linkovima je vozilo prošlo (*eng. Path Inference*). Na primjeru, Slika 5.5, nalazi se više mogućih putova vozila između dvije pozicije. Dulji putevi koji ne zadovoljavaju realne uvjete se odbacuju, odnosno eliminiraju se zbog ograničene brzine vozila (pretpostavljene ili iz podataka o brzini vozila). Najjednostavniji način određivanja puta (niza linkova) kojim je prošlo vozilo je rješavanje problema određivanje najkraćeg puta (*Shortest path*) između dvije točke mreže (grafa), uvažavajući pri tome smjerove linkova (bridova grafa).

Slijedeći problem je određivanje vremena putovanja (ili brzine) na linkovima koji su dio puta, odnosno koliki dio od ukupnog vremena puta između dvije točke dodijeliti svakom linku kojim je vozilo prošlo. Najjednostavniji način je dodjela vremena proporcionalno duljini linka. Nadalje pozicije na kojima je zabilježena poruka uglavnom se ne nalaze se na kraju ili početku linka, te i to treba uzeti u obzir.



Slika 5.5 Uz zaključivanje o putu

Izглаđivanje podataka

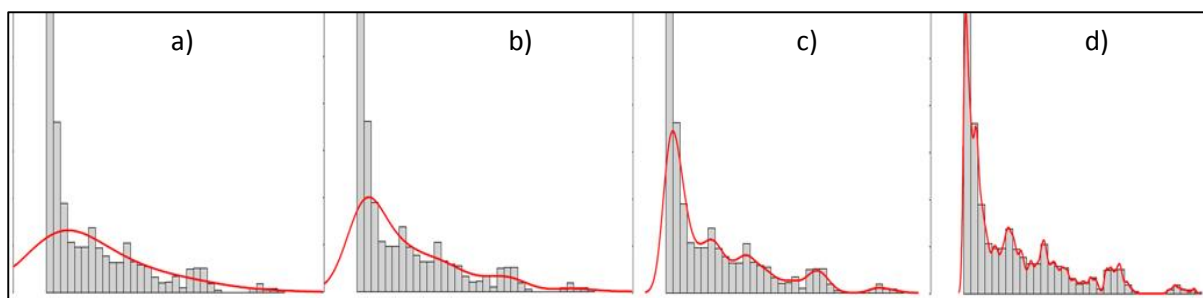
Izглаđivanje (*eng. Smoothing*) podataka služi za uklanjanje šuma u nizovima podataka i ekstrakciju stvarnih uzoraka i trendova. Naime prilikom mjerenja (primjerice mjerenje brzine na određenom linku tijekom dana) nastaju slučajne fluktuacije mjerenih vrijednosti. Uzrok tih fluktuacija su pogreške mjerenja ili jednostavno nešto različite brzine vozila. Te slučajne fluktuacije nastoje se izглаđivanjem ukloniti i odgovarajućom funkcijom prezentirati ponašanje podataka (primjerice kako se mijenja brzina na linku tijekom dana). Često se za izглаđivanje upotrebljava i termin filtriranje podataka. Odabir metode tj. odgovarajućeg filtera izглаđivanja (algoritma) od velikog je značaja za konačne rezultate. Izbor metode izглаđivanja ponajviše ovisi o karakteristikama samih podataka i zaključcima koji se žele izvući iz podataka.

Postupkom izглаđivanja određuje se aproksimacijska funkcija koja opisuje podatke (tj. njihove vrijednosti). Podaci se mogu izглаđivati običnim regresijama (linearna, eksponencijalna, logaritamska i dr.) odnosno parametarskim regresijskim metodama gdje se na osnovi skupa podataka utvrđuju vrijednosti fiksnog broja parametara, čime je tada i određena regresijska funkcija.

Pogodne metode izглаđivanja za FCD su ne-parametarske regresijske metode. Termin ne-parametarske metode znači da se podaci prezentiraju funkcijom (krivuljom) koja se ne može izraziti jednadžbom (formulom) koja sadrži fiksni broj parametara. Odnosno prostor parametara je funkcija sa beskonačnom dimenzionalnosti. Od raznih tehnika izглаđivanja vrlo često se koriste:

- *Kernel* izглаđivanje tj. lokalno ponderirano usrednjavanje (*eng. Kernel Smoothing*); *Kernel* (hrv. jezgra) se inače odnosi na funkciju koja se koristi prilikom određivanja sredine skupa susjednih točaka, i tom funkcijom su ponderirane točke (podatci). *Kernel* funkcija može biti konstanta, trokutasta, gausova i dr.
- Izглаđivanje *splajnovima* (*eng. Smoothing Splines*); *Splajn* se odnosi na numeričku funkciju koja je po dijelovima definirana polinomom k -tog stupnja, a na mjestima spojeva tih dijelova (čvorovima) je kontinuirana i vrlo glatka.

Rezultati tih izглаđivanja mogu biti gotovo isti. *Kernel* izглаđivanje i izглаđivanje *splajnovima* imaju parametre za podešavanje izглаđivanja. Vrijednosti tih parametara određuju stupanj izглаđivanja. To omogućava istraživanje ponašanja podataka i prilagodbu estimirane funkcije podacima. Pravilnim odabirom parametara podešavanja nastoje se otkriti bitne značajke podatka, uz izbjegavanje anomalija koje ne odražavaju stvarnu prirodu podataka. Takvim ne-parametarskim regresijama mogu se otkriti značajke podataka koje možda parametarskim regresijama nisu moguće. Ukoliko parametri podešavanja nisu dobro odabrani događa se preizглаđivanje (ne otkrivaju se bitna svojstva) ili podizглаđivanje (na estimiranu krivulju jako djeluju i usamljene anomalije). Slika 5.6 prikazuje pod a) preizглаđeni podaci d) podizглаđeni podaci. Crvena linija na slikama prikazuje estimiranu funkciju tj. aproksimacijsku funkciju koja opisuje podatke (npr. kako se mijenja brzina na linku u vremenu).



Slika 5.6 Stupanj izgladenosti podataka a) preizgladeni podaci d) podizgladeni podaci

Grupiranje

Grupiranje je jedan od najvažnijih postupaka kod obrade FCD podataka.. Cilj grupiranja je reduciranje količine podataka, odnosno što grupirati podatke u što manji broj grupa čiji reprezentanti zadržavaju što više informacije izvornih podataka. Procesom grupiranja ili klasteriranja (*eng. Clustering*) podaci se svrstavaju (rašćlanjaju) u grupe (klaster) na takav način da podaci u jednom klasteru imaju veliku sličnost po određenom definiranom svojstvu (ili svojstvima), a različitost prema tom istom svojstvu (svojstvima) u odnosu na podatke u nekom drugom klasteru. Rezultat klasteriranja su grupe podataka sa zajedničkim ili sličnim svojstvima. Primjerice ako su podaci predstavljeni uzorcima (kao vektori ili kao više-dimenzijske točke) sličnost može biti definirana kao Euklidska udaljenost uzoraka. U tom slučaju unutar pojedinog klastera nalaze se uzorci (podaci) koji su međusobno blizu.

Inače postoje dvije osnovne vrste grupiranja: hijerarhijsko grupiranje i particijsko grupiranje. Hijerarhijsko grupiranje zasniva se na hijerarhijskom ustanovljavanju veza (ili prekidanju) između podataka temeljem funkcije udaljenosti, a prezentira se strukturom stabla „dendogramom“. Od značaja za FCD je particijsko grupiranje koje je pogodno za velike skupove podataka za koje nije potreban i za koje je problem odrediti dendogram. Particijsko grupiranje dijeli podatke u zasebne samostalne grupe. Od više vrsta particijskih grupiranja s obzirom na karakteristike FCD podataka (količina i sadržaj poruka) od interesa su algoritmi particijskog grupiranja zasnovanog na sredinama primjerice **k**-means (algoritam **k**-srednjih vrijednosti⁶), g-means, k-medoids ili algoritmi koji se zasnivaju na gustoći podataka primjerice DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) koji okuplja u grupu podatke koji su blizu (velika gustoća podataka) dok *outliere* ostavlja izolirane u području male gustoće podataka (svojstva podatka), odnosno robustan je glede *outliersa*.

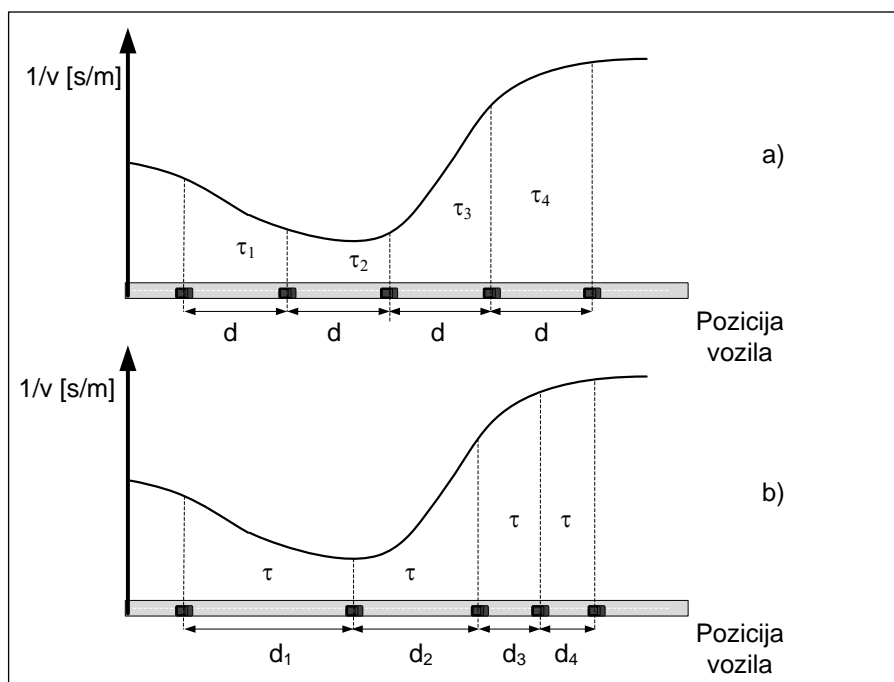
⁶ vidi detaljnije za k-means u primjeru obrade FCD podataka

5.1.2.3 Učestalost poruka i udio FCD vozila

Udio FCD vozila u ukupnom broju vozila u prometnom toku i učestalost slanja poruka glavni su faktori koji određuju kvalitetu FCD podataka. Što je udio FCD vozila veći i što je učestalost poruka veća to se točnije može odrediti stanje prometa.

Protokoli slanja poruka

Vremenski trenutak i lokacija gdje FCD vozilo šalje poruku određeni su protokolom. S obzirom na to razlikuju se dvije osnovne vrste protokola: učestalost poruka je vremenski određena i učestalost poruka je prostorno određena. Kod vremenski određenog slanja poruka poruke se šalju u trenucima koji su definirani vremenskim intervalom odnosno periodom između poruka (npr. 1 minuta). Kod prostorno određenog slanja poruka poruke se šalju nakon što vozilo prijeđe definiranu udaljenost d (npr. 500 m), Slika 5.7 a). Za potrebe prikupljanja prometnih podataka i određivanja stanja prometne mreže, naravno bila bi poželjna fleksibilna učestalost slanja podataka. Primjerice, veća učestalost slanja podataka kada vozilo kreće iz stajanja, zaustavlja se i mijenja brzinu omogućavalo bi točniji uvid u stanje prometa na raskrižjima i dijelova linkova. Međutim danas je FCD u stvari nadogradnja na postojeće sustave praćenja različitih flota vozila, tako da je za sada uglavnom dostupan jedan od dva osnovna protokola i moguće je fiksno povećavati odnosno smanjivati učestalost slanja poruka (vremenski period ili udaljenost).



Slika 5.7 Protokoli učestalosti slanja poruka a) prostorno određene poruke
b) vremenski određene poruke

Vremenski određeno slanje poruka ima za posljedicu da je gustoća pozicija sa kojih se šalje poruka veća na dijelu prometne mreže gdje je brzina manja, dok je kod prostornog određenog slanja poruka prostorna gustoća pozicija sa kojih se šalje poruka neovisna o brzini. Kako je detekcija zagušenja poželjna i važna informacija o stanju mreže, vremenski određena učestalost ima prednost jer je u takvim slučajevima moguć detaljniji uvid u stanje i ponašanje zagušenja, Slika 5.7 b). Na x osi prikazane su pozicije vozila, a na y osi je vrijeme potrebno da vozilo prijeđe jediničnu udaljenost, odnosno recipročna vrijednost brzine. Vremenski interval između poruka je označen sa τ . Tom vremenskom intervalu odgovara površina ispod krivulje na slici. Na slici pod b) ta površina je jednaka u prikazanim odsječcima.

Razlika između vremenski određenog i prostorno određenog slanja poruka prilikom izračuna vremena putovanja (i brzina) na linkovima je usporediva sa određivanjem i uporabom srednje vremenske brzine i srednje prostorne brzine iz detektorskih podataka. Poznato je da je za izračun vremena putovanja iz detektorskih podataka (mjerenje brzine detektorom) sa fiksne lokacije na prometnici prikladna srednja prostorna brzina koja se dobiva kao harmonijska sredina trenutačnih brzina. Kako su očito vremenski intervali između izmjerenih brzina različiti kod mjerenja detektorom, a pozicija je fiksna to znači da su poruke (podaci) određeni prostorno ako se napravi usporedba sa FCD. Stoga kod FCD-a sa prostorno određenim porukama (podaci o brzinama na fiksnim udaljenostima) uporaba harmonijske sredine promatranih brzina predstavlja objektivan i konzistentan estimator srednjeg vremena putovanja. Za razliku od toga kod FCD-a sa vremenski određenim porukama (podaci o brzinama u fiksnim intervalima) uporaba harmonijske sredine za estimaciju srednjeg vremena putovanja precjenjuje srednje vrijeme putovanja. Često je slučaj da se prilikom prikupljanja podataka dešava da različiti sustavi (primjerice različite taksi službe) koriste različite protokole (prostorno određene poruke i vremenski određene poruke), što tada stvara probleme prilikom obrade podataka.

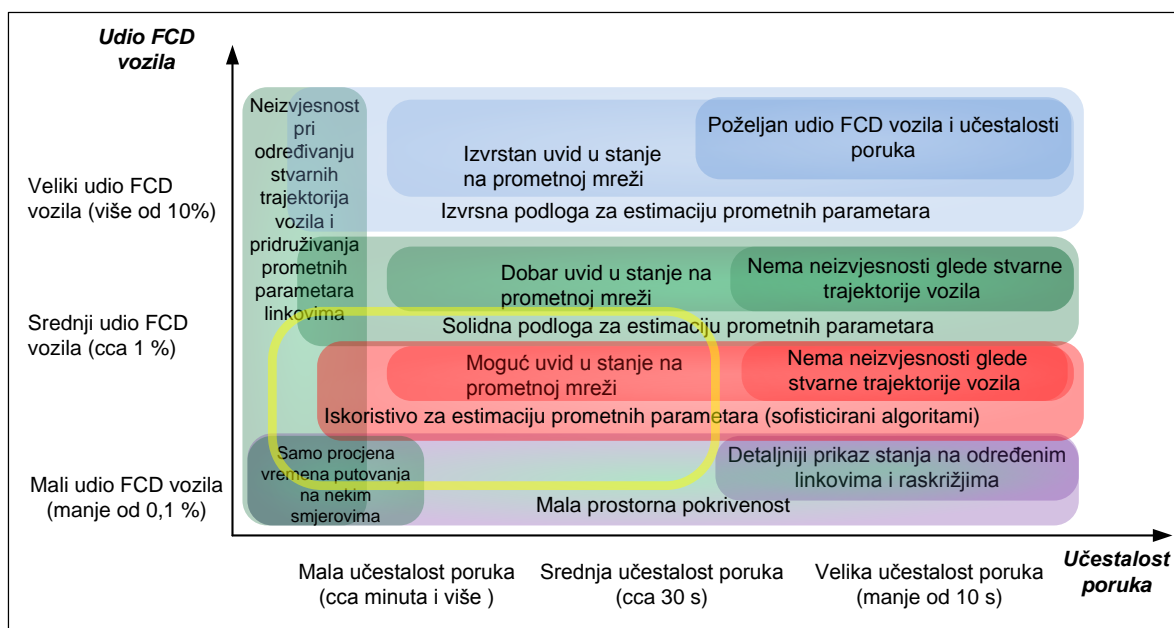
Udio FCD vozila

Što je udio FCD vozila veći i što je učestalost poruka veća to je određivanje stanja mreže (estimacija prometnih parametara) točnije. Što se tiče potrebnog udjela FCD vozila u ukupnom toku izvješća sa raznih projekata i tvrdnje autora raznih članaka se razlikuju. Podaci se uglavnom temelje na eksperimentima sa dostupnim brojem FCD vozila (fiksni udio u eksperimentu) i na raznim simulacijama. Ustanovljavanje potrebnog minimalnog udjela vozila (odnosno odnosa udjela vozila i odgovarajuće točnosti ekstrahiranih informacija) za određene namjene predmet je istraživanja. Mogu se naći podaci gdje se sugerira da za nadzor prometa (u kontekstu određivanja stanja prometnog toka) na autocestama minimalni udio vozila između 1% i 5 % daje dobre rezultate, dok minimalni udio u urbanim sredinama treba biti između 2% i 10%. Glede potrebne učestalosti poruka postoje procjene da se ovisno o stanju prometnog toka poruke trebaju slati u intervalima koji nisu duži od 20 s do 60 s za autoceste, te 10 s od 120 s u urbanoj mreži arterijskih prometnica. Glede upravljanja signaliziranim raskrižjima (ili kao velika pomoć za upravljanje) procjene minimalnog potrebnog udjela kreću se od 20-30%. Primjerice rezultati nekih istraživanja (Vanhouwaert et al., 2012),(Goodall et al., 2012) minimalnih zahtjeva na FCD glede praćenja stanja prometnog toka dani su u Tablica 5.1.

Tablica 5.1 Minimalni zahtjevi na FCD glede udjela FCD vozila i učestalosti poruka

Vrsta prometnice	Stanje toka	Udio FCD vozila	Učestalost poruka (sekunde)
Praćenje stanja prometnog toka (nadzor i informacije)			
Autocesta	Slobodni tok	0.5%	20
Autocesta	Srednje zagušenje	0.5%	60
Autocesta	Veliko zagušenje	0.5%	20
Autocesta	Incident	1%	20
Urbane arterije	Slobodni tok	10%	1
Urbane arterije	Srednje zagušenje	5%	10
Urbane arterije	Veliko zagušenje	1%	30
Urbane arterije	Incident	5%	120
Upravljanje			
Upravljanje signaliziranim raskrižjima	Repovi (duljina, kašnjenje)	20%-30%	10-30

Na Slika 5.8 prikazana su načelne mogućnosti FCD tehnologije s obzirom na moguće kombinacije udjela FCD vozila i učestalosti poruka. Treba napomenuti da podaci na slici samo približno odražava mogućnosti FCD-a glede udjela FCD vozila i učestalosti poruka. Kako je FCD trenutno vrlo aktualan predmet istraživanja, mogu se pronaći različita izvješća, tvrdnje i pretpostavke o potrebnoj učestalosti poruka i udjelu FCD vozila. U lijevom donjem kutu je najlošiji slučaj sa učestalostima poruka od minute i više te malim udjelom FCD vozila. Temeljem takvih podataka vrlo je teško odrediti stanje prometne mreže. Moguće je procijeniti vremena putovanja za određene smjerove u mreži. Idealan slučaj bi bio da je udio FCD vozila veći od 5%, uz poruke učestalosti cca 10 s. Može se reći da današnji iskoristivi (ostvareni ili ostvarivi “sutra”) sustavi za FCD imaju relativno mali do srednji udio FCD vozila, uz malu do srednju učestalost poruka (cca 30 s do 3 min). Sukladno slici to bi bilo odgovaralo području uokvirenom žutom linijom. Problemi sa takvim podacima su slijedeći: sirovi podaci različitih formata zbog različitih izvora, sirovi podaci zahtijevaju predobradu kako bi se prilagodili prometnim aplikacijama, potrebna je kvalitetna i jedinstvena GIS podloga, kako je učestalost uglavnom niska potrebna je sofisticirana predobrada i obrada podataka, relativno mali udio FCD vozila ne omogućava potpuno pokrivanje mreže, uglavnom se u porukama nalaze samo osnovni podaci, i privatnost izvora podataka mora biti osigurana. Unatoč tome mogu se ekstrahirati vrlo korisne i upotrebljive informacije o stanju prometne mreže, pogotovu kada se kombiniraju i povijesni FCD podaci.

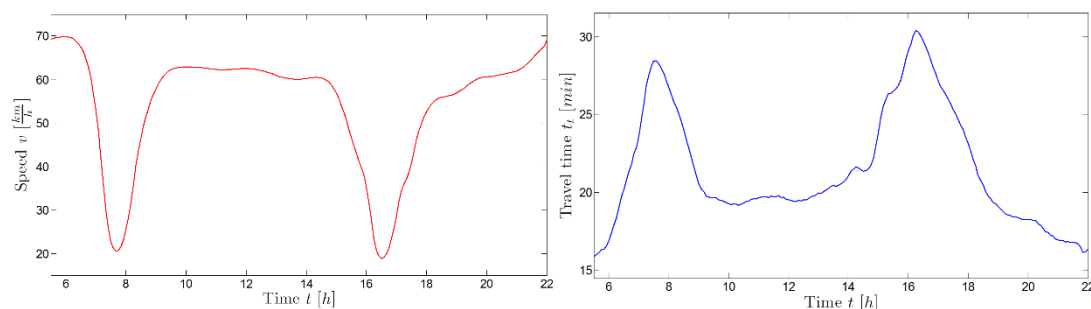


Slika 5.8 Utjecaj odnosa učestalosti poruka i udjela FCD vozila na kvalitetu informacija

5.1.3 Primjer obrade FCD podataka – profili brzina i područje zagušenja

U ovom poglavlju prikazani su glavni koraci obrade FCD podataka u cilju dobivanja profila brzina i određivanja područja zagušenja. Ovaj način obrade FCD podataka primijenjen je u okviru projekta SORDITO (Sustav za Optimizaciju Ruta u Dinamičkom Transportnom Okruženju) provedenog na Fakultetu prometnih znanosti, i u suradnji sa tvrtkom Mireo.

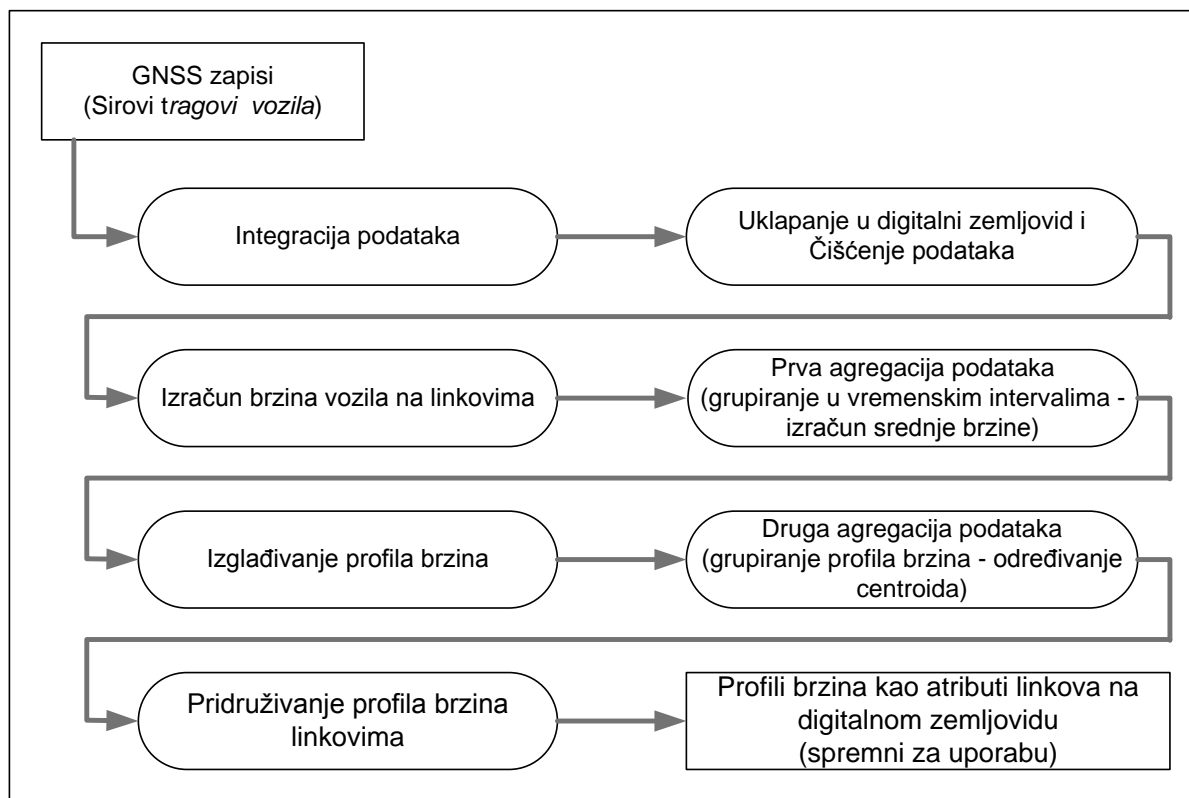
Profil brzine linka (*eng. link speed profile*) pokazuje vremensku ovisnost brzine na linku tijekom definiranog perioda, Slika 5.9 a). Definirani period najčešće je jedan dan. S time da za svaki dan u tjednu može postajati drugi profil brzine. Slijedeća podjela može biti na mjesec ili godišnja doba. Primjerice: profil brzine linka za odgovarajući mjesec u godini i dan u tjednu prikazuje kako se brzina na linku mijenja tog dana. Odgovarajuće vrijeme putovanja (vrijeme kašnjenja linka) za isti link prikazano je na Slika 5.9 b). Poznavanje profila brzina linkova omogućava predviđanje vremena putovanja na rutama prometne mreže (tj. na putu koji se sastoji od niza linkova). Poznavanje profila brzina također je temelj za određivanje područja rekurentnih zagušenja.



Slika 5.9 a) Profil brzine linka b) Vrijeme putovanja na linku

5.1.3.1 Estimacija profila brzina

Slijed postupaka obrade FCD podataka sa ciljem dobivanja profila brzina prikazan je na Slika 5.10. Rezultat obrade je profil brzine za svaki link na definiranom području cestovne prometne mreže.



Slika 5.10 Slijed postupaka za estimaciju profila brzina

Podaci koji su korišteni za obradu prikupljeni su tijekom 5 godina od otprilike 4900 različitih vozila (osobna vozila, službena vozila, dostavna vozila, taksi vozila) na području RH. Zahvaljujući velikoj učestalosti poruka, protokol slanja poruka bio je prostorno određen (svakih 100 m), nije bilo problema sa zaključivanjem o putu. Nakon integracije podataka u bazu obavljeno je uklapanje u digitalnu kartu i čišćenje podataka što je rezultiralo bazom od $6.55 \cdot 10^9$ GNSS odnosno cca. pola terabyta podataka. Čišćenje podataka uključivalo je: uklanjanje nepotpunih podataka i *outliera* što uključuje i sljedeće slučajeve:

- vozilo miruje, odnosno isključeno je iz prometnog toka, a razlog vjerojatno nije stajanje u redu čekanja ili zastoj na prometnici
- vozilo se giba znatno većom brzinom od dopuštene
- podaci koji ne sadrže ispravljenu geografsku širinu i duljinu.

Primjer FCD poruka (zapisa) u bazi podataka koji se sastoji od 64 Byta dan je Slika 5.11 i sadrži servisne informacije i sljedeće bitne podatke:

- ID vozila (u tablici nije prikazan)
- trenutak uzorka GPS signala u UTC formatu
- geografsku širinu i dužinu

- oznaku vožnje ili stajanja
- ispravljenu geografsku širinu i dužinu (pridruženu prometnici tj. uklopljeno u digitalni zemljovid)
- trenutnu brzinu
- očitani smjer vožnje u odnosu na sjever
- udaljenost koju je vozilo prošlo u odnosu na prethodni zapis GPS signala.

type	GPS time (local)	frac utc	file offset	world_x (lon)	world_y (lat)	speed	course	is highway	filter info	matched distance				
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:07:15	0	19972	15.99687695503	45.81426887280	5	222	<input type="checkbox"/>	NoFilterData	0				
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:08:14	0	20036	15.99687695503	45.81426887280	5	222	<input type="checkbox"/>	NoFilterData	0				
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:08:39	0	20100	15.99678441882	45.81144591124	11	210	<input type="checkbox"/>	Unfiltered	303				
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:08:43	0	20164	15.99633112549	45.81148043806	29	210	<input type="checkbox"/>	Unfiltered (matched to prev)	22				
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:08:52	0	20228	15.99513888359	45.81109069402	44	210	<input type="checkbox"/>	Unfiltered	139				
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:09:01	0	20292	15.99416658282	45.81052140696	34	210	<input type="checkbox"/>	Unfiltered (matched to prev)	88				
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:09:15	0	20356	15.99344506859	45.80988106892	32	212	<input type="checkbox"/>	Unfiltered (matched to prev)	117				
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:09:26	0	20420	15.992688569088	45.80917715597	30	206	<input type="checkbox"/>	Unfiltered (matched to prev)	97				
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:09:59	0	20484	15.99196046590	45.80833955342	28	206	<input type="checkbox"/>	Unfiltered (matched to prev)	112				
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:10:10	0	20548	15.99178880453	45.807405649115	44	174	<input type="checkbox"/>	Unfiltered (matched to prev)	118				
Options														
type	GPS time (local)	matched world_x (lon)	matched world_y (lat)	matched speed	matched course	reason	satellites	gps status	mode	odometer	privacyMode	uStatus	analogStatus	delta
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:07:15					69	3	1	1	860879	0	425269395456	1963116300	0
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:08:14					47	3	1	0	860879	0	425268871168	1979895004	0
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:08:39	15.996837194157	45.8117459745506	11	210	33	6	3	0	860879	0	425268871168	1963116288	0
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:08:43	15.9963834285736	45.8116917576241	29	210	36	6	3	0	860880	0	425268871168	1979893248	0
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:08:52	15.995267748191	45.8106906045488	44	210	36	6	3	0	860881	0	425268871168	1979894272	0
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:09:01	15.9941719473408	45.8105223417613	34	210	36	6	3	0	860882	0	425268871168	1963116300	0
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:09:15	15.9929902010345	45.8100773777182	32	212	36	6	3	0	860883	0	425268871168	1963116288	0
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:09:26	15.99230915308	45.8093257917236	30	206	36	6	3	0	860884	0	425268871168	1963116288	0
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:09:59	15.9916158020496	45.8084423847719	28	206	36	5	3	0	860885	0	425268871168	1996670720	0
*** Cellocator (24)	23.1.2012. 21:10:10	15.9916309029621	45.8073906919613	44	174	36	6	3	0	860886	0	425201762560	1979895004	0

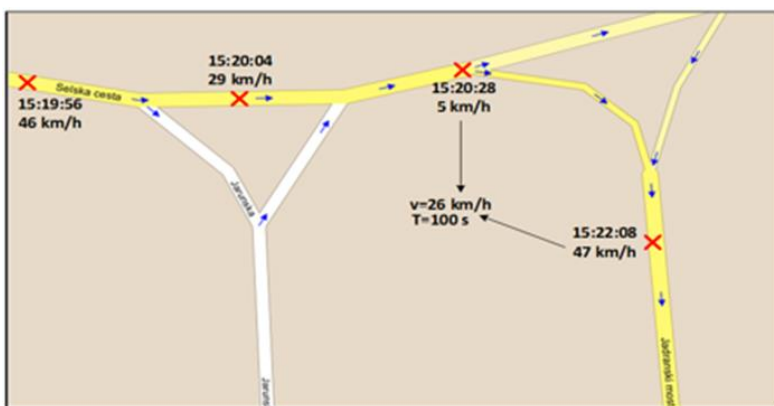
Slika 5.11 Primjer strukture FCD poruke (isti broj retka u gornjoj tablici i isti broj retka u donjoj tablici sačinjavaju jednu poruku)

Izračun brzina vozila na linkovima

GNSS zapisi sadrže trenutne brzine vozila. Slika 5.12 prikazuje primjer pozicija, vremenske trenutke i trenutne brzine koje pripadaju tragu vozila (trag vozila - kronološki niz GNSS zapisa koji odgovara jednom vozilu). Primjerice, vozilo je u trenutku 15:20:28 imalo brzinu $v = 5$ km/h, u trenutku 15:22:08 (nakon prijeđenih približno 100 m) očitana GPS brzina je 47 km/h. Ukoliko se za izračun brzine na linku koriste takve trenutne brzine vozila korištenje izraza (5.1) za prosječnu brzinu daje brzinu na tom dijelu linka od 26 km/h.

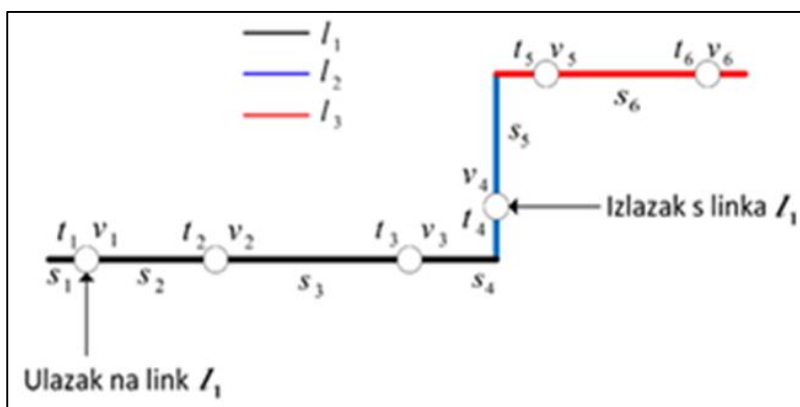
$$v_{li} = \frac{\sum_{k=1}^n v_k}{n} \quad (5.1)$$

gdje je v_{li} brzina i -tog vozila na promatranoj dionici i određenom vremenskom periodu, v_k brzina vozila na k -toj poziciji promatrane dionice, n broj pozicija na kojima je zabilježena trenutna brzina.



Slika 5.12 Prikaz pozicija, vremenskih trenutaka i trenutačnih brzina GNSS zapisa

Međutim, ovakav pristup ne uzima u obzir brzinu vozila između zabilježenih pozicija, niti stanje prometa između tih pozicija. Stoga ovaj način nije prikladan za izračun, odnosno trenutačne brzine koje se nalaze u zapisu traga vozila nisu od koristi za izračun brzine na linku.



Slika 5.13 Prilog objašnjenju izračuna brzina na linku

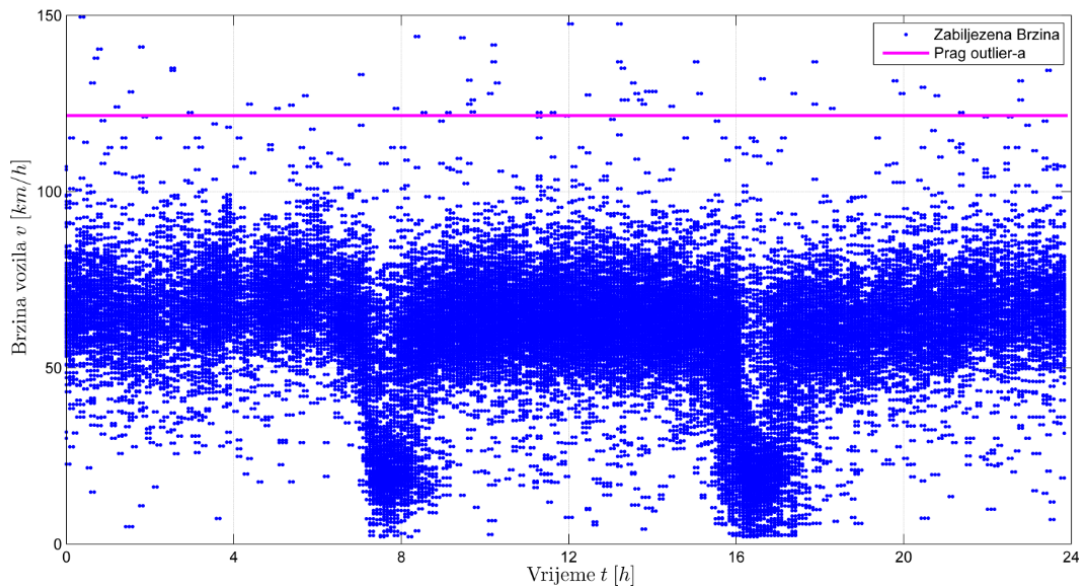
Da bi se dobio točniji izračun brzine na linku, u modelu izračuna potrebno je uzeti u obzir vrijeme potrebno da vozilo prijeđe udaljenost između dvije zabilježene pozicije i odgovarajuću duljinu segmenta prometnice sukladnu digitalnoj karti. Kako se izračun brzine radi za linkove, osnova pristupa je u tome da se odredi vrijeme proteklo od trenutka pojavljivanja na promatranom linku do trenutka pojavljivanja na sljedećem linku. Na slici Slika 5.13 prikazan je primjer putanje vozila po linkovima te pozicije na kojima postoji GNSS zapis (označeno kružićima). Model izračuna brzine na linku bilježi prvo pojavljivanje GPS signala na linku, te se sumiraju udaljenosti sve do zapisa GNSS signala u trenutku na sljedećem linku, odnosno prijeđeni putovi na slici označeni sa s_2 , s_3 , s_4 , s_5 i s_6 koji odgovaraju vremenskim intervalima t_1-t_2 , t_2-t_3 i t_3-t_4 . Izračun brzina na linku da je izrazom (5.2).

$$v_{l_i} = \frac{\sum_{k=2}^n \frac{s_k}{t_k - t_{k-1}}}{n} \quad (5.2)$$

gdje je v_{l_i} brzina vozila na i -tom linku, s_k prijeđeni put koji odgovara duljini segmenta prometnice na digitalnoj karti između vremenskih trenutaka $t_k - t_{k-1}$, a n broj odsječaka puta koji se dobiva iz broja zabilježenih GPS zapisa između vremenskih trenutaka $t_k - t_{k-1}$.

Ovakvim izračunom, za iste uvjete kao na Slika 5.12, brzina na segmentu prometnice određenom pozicijom u trenutku 15:20:28 i pozicijom u trenutku 15:22:08 odgovara vrijednosti 3,6 km/h, za razliku od 26 km/h koji daje izračun preko trenutačnih brzina vozila. Predloženi izračun brzina na linkovima uzima u obzir da se padovi brzina upravo događaju na kraju linka (prije raskrižja). Ovakav način izračuna moguć je ako je učestalost poruka (GNSS zapisa) dovoljno velika, što je ovdje i bio slučaj.

Zatim se sve izračunate brzine za određeni link pridružuju linku na digitalnoj karti uz odgovarajuću vremensku oznaku. Na Slika 5.14 prikazana je grafička prezentacija primjera izračunatih brzina (plave točke), konkretno za Jadranski most. Dakle, svaka plava točka predstavlja izračunatu brzinu od jednog vozila na tom linku u određenom vremenskom trenutku. Ljubičasta linija predstavlja prag iznad kojeg se podaci o brzini izbacuju, jer je pretpostavka da se tada radi s podacima koji su izvan valjanog područja (*outliers*).



Slika 5.14 Izračunate brzine svih vozila za jedan link za jedan dan (prikupljeni podaci tijekom više godina)

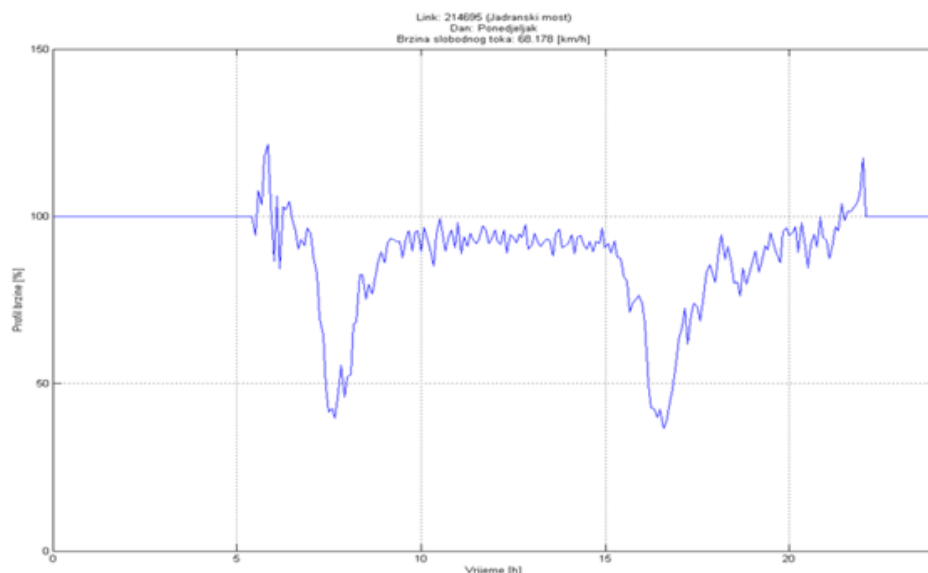
Izračun neizgladenog profila brzina

Slijedeći korak je jednostavna agregacija podataka u definirane vremenske intervale (odabrani su 5 minutni vremenski intervali) za svaki link i izračun pripadne srednje brzine u tom intervalu korištenjem harmonijske sredine.

$$\bar{v}_{l_{ip}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{v_{l_{ip}}}} \quad (5.3)$$

gdje je $\bar{v}_{l_{ip}}$ prosječna brzina na linku l_i u p -tom vremenskom intervalu, $v_{l_{ip}}$ brzina vozila na i -tom linku u p -tom vremenskom intervalu, p redni broj intervala u kojem se računa prosječna brzina vozila, k broj izračunatih brzina $\bar{v}_{l_{ip}}$ unutar p -tog vremenskog intervala.

Rezultat tog postupka je sirovi neizglađeni profil brzine pridružen svakom linku digitalnog zemljovida. Primjer neizglađenog profila brzine dan je Slika 5.15, konkretno profil se odnosi na Jadranski most, dan ponedjeljak. Brzine prikazane grafom dane su u relativnom odnosu na brzinu slobodnog toka, a konkretno za Jadranski most iznosi 68 km/h.



Slika 5.15 Primjer neizglađenog profila brzina

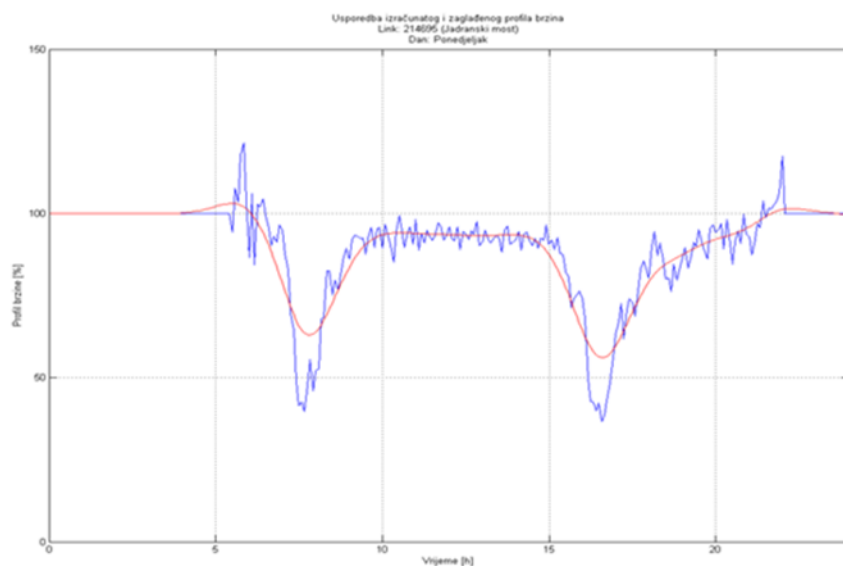
Izglađivanje profila brzina

Za izgladivanje neizglađenog profila brzina odabran je kubični *splajn* (inače je kubični *splajn* jedna od vrlo često korištenih tehnika izgladivanja). Kao što je napomenuto podaci (ovdje brzine vozila u ovisnosti o vremenu), odnosno dijelovi aproksimacijske krivulje zamjenjuju se polinomom 3 reda ali tako da je na spojevima polinoma krivulja vrlo glatka. Izgladivanje kubičnim *splajnovima* minimizira funkciju.

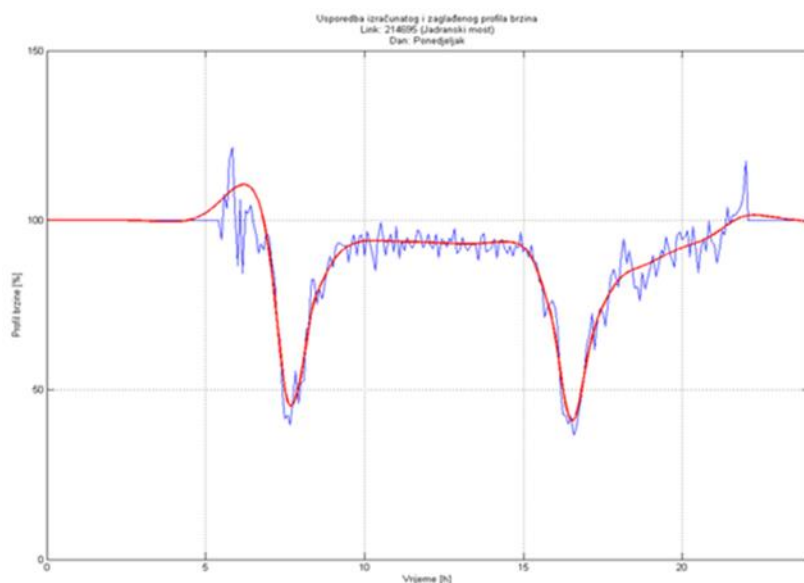
$$p \sum_{j=1}^n w(j) |y(j) - f(x(j))|^2 + (1 - p) \int_{x_1}^{x_n} \left| \frac{\delta^2 f(t)}{\delta t^2} \right|^2 dt \quad (5.4)$$

gdje je x vektor diskretnih vremenskih intervala, y vektor vrijednosti profila brzine, n je broj diskretnih vremenskih intervala. Kubični zaglađeni splajn f na intervalu $x(j)$ je aproksimacija brzine $y(j)$. Izraz $|y(j) - f(x(j))|$ predstavlja pogrešku između profila brzine i zaglađenog profila vremenskom intervalu. Koeficijent p je koeficijent izgladivanja koji se podešava između vrijednosti 0 i 1 (p je u vezi sa brojem dijelova od kojih se aproksimacijska funkcija sastoji; vrijednost p direktno je povezana sa mogućim preizgladivanjem i podizgladivanjem). Vektor w označava težine u vektoru pogreške, koji omogućava da se postave težine na željeno slijeđenje zadane krivulje u određenim intervalima. Veličine p i w su parametri izgladivanja o kojima ovisi konačni oblik aproksimacijske funkcije (profila brzine) Bez podešavanja parametara izgladivanja w a uz parametar p kojemu vrijednost odgovara vrijednosti koja se uzima za jednoliko distribuirane podatke dobije se rezultat kao na Slika 5.16. Podešavanjem

parametara izgladivanja w (w – težina) aproksimacijska krivulja (profil brzine) dodatno se prilagođava podacima, Slika 5.17.



Slika 5.16 Rezultat izgladivanja bez podešavanja težina (parametar izgladivanja)



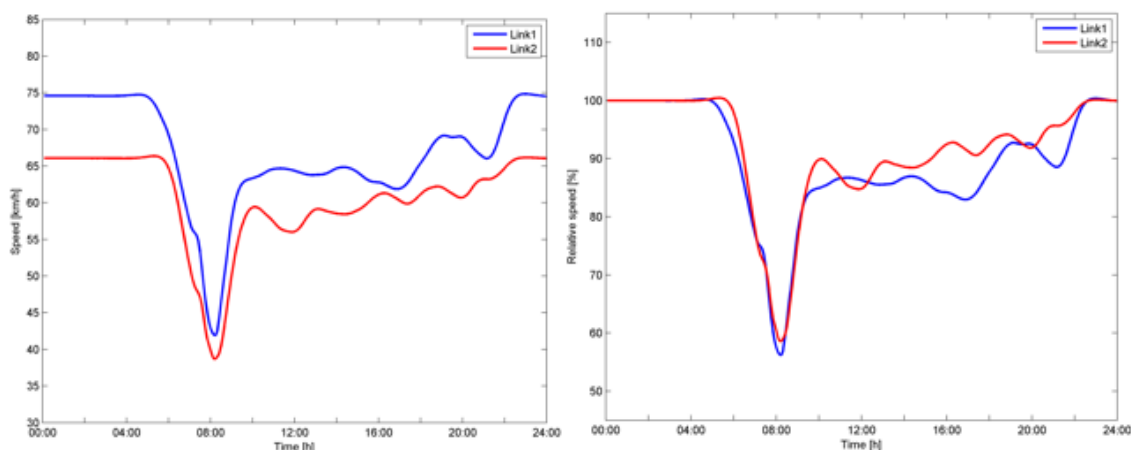
Slika 5.17 Rezultat izgladivanja uz podešene težine

Profili relativnih brzina

Profili relativnih brzina (dalje će se nazivati samo profili brzina) omogućavaju uspoređivanje ponašanja linkova (usporedba na linkovima) s različitim apsolutnim brzinama, odnosno linkova koji imaju pridružene različite referentne brzine koje se smatraju slobodnim tokom (primjerice ograničenje brzine, noćna brzina ili dr.). Naime jedan od atributa svakog linka digitalnog zemljovida je pridružena referentna brzina. Ovdje je to tzv. noćna brzina dobivena kao prosječna brzina tijekom noći, kad nema prometnog opterećenja.

Relativna brzina je omjer apsolutne brzine i definirane referentne brzine na linku, izraz (5.5). Relativna brzina izravno pokazuje koliko je usporenje na pojedinom linku u odnosu na referentnu brzinu.

$$\bar{v}_{rlip} = \frac{\bar{v}_{lip}}{v_{refli}} \quad (5.5)$$



Slika 5.18 Usporedba profila brzina dva linka a) sa apsolutnim brzinama b) sa relativnim brzinama

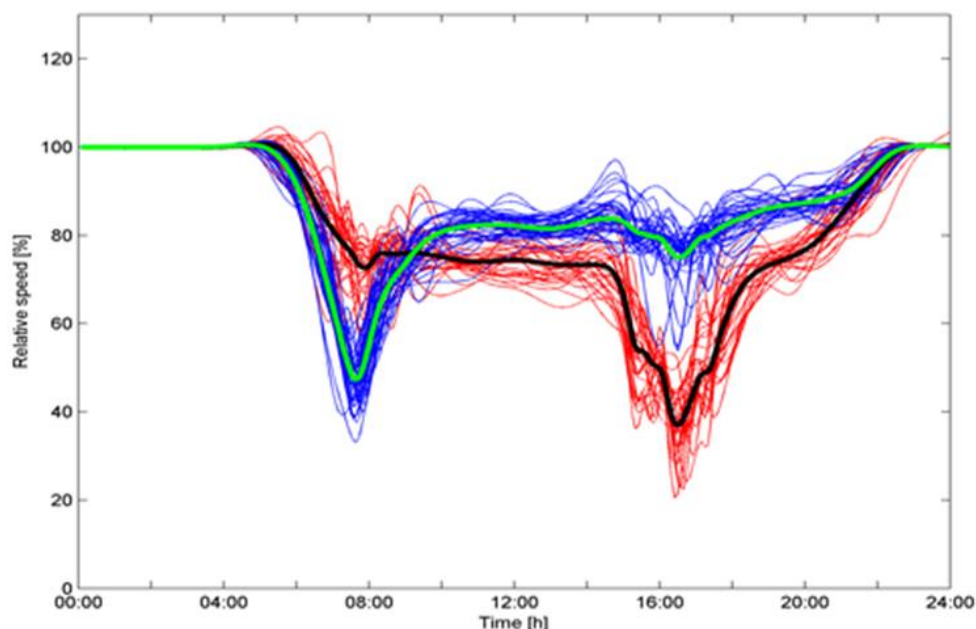
Grupiranje profila brzina

Digitalni zemljovid RH korišten kao podloga sadrži cca 450 000 linkova. Svakom linku (konkretno) pridružuje se 7 profila brzina (sedam dana u tjednu). Kad se uzmu u obzir i sezone (ljetno, zima) to rezultira u ogromnom broju mogućih profila brzina. Za praktičnu uporabu to znači predugo vrijeme procesiranja, stoga je potrebno smanjiti mogući broj profila brzina što se radi postupkom klasteriranja (grupiranja).

Za grupiranje je odabran *k-means* algoritam, kojeg karakterizira jednostavnost i brzina izvođenja. *K-means* algoritmom stvara se *k* grupa (broj *k* se unaprijed zadaje) koji pokušava ostvariti što veću udaljenost između grupa, a što manju udaljenost između podataka (točaka) iste grupe. Svaka grupa ima svoj centroid ili središte grupe. *K-means* je iterativni algoritam sa sljedećim koracima:

- odabir broja *k* (broj grupa)
- inicijalno postavljanje *k* centroida (ovdje *k* profila brzina)
- ponavljanje
 - pridruživanje podatka (ovdje profila brzine) najbližem centroidu tj. dodavanje podatka u grupu tog centroida
 - izračun novog centroida grupe
- dok se ne postigne kriterij završetka tj. zadovoljen uvjet konvergencije (npr. minimum ponovnog pridruživanja podataka (profila brzine) novom centroidu)

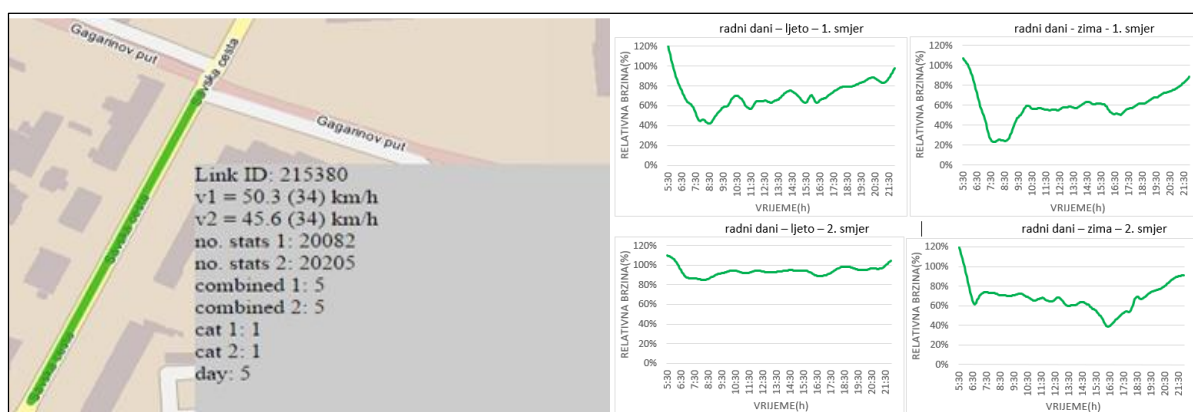
Rezultat ovakvog postupka je k grupa koje sadrže slične profile brzina. Centroid grupe jest profil brzine koji predstavlja grupu. Slika 5.19 grafički prikazuje rezultat grupiranja na primjeru dvije grupe. Zelena krivulja je centroid grupe plavih profila brzina, a crna krivulja je centroid grupe crvenih profila brzina.



Slika 5.19 Primjer rezultata grupiranja na primjeru dvije grupe profila brzina i pripadni centroidi

U koliko će grupa grupirati profili brzina odnosno koliko će centroida postojati ovisi prvenstveno o namjeni i dostupnoj računarskoj moći za ITS aplikacije. Razuman broj centroida (profila brzina) za RH kreće se između 256 i 4096.

Profili brzina pridružuju se linkovima te postaju još jedan atribut digitalnog zemljovida, Slika 5.20. Vrijeme putovanja na linku ovisno o vremenu može se jednostavno izračunati iz poznatog profila (relativnih), referentne brzine i duljine linka.



Slika 5.20 Grafički prikaz profila brzina kao atributa digitalnog zemljovida

5.1.3.2 Određivanje zagušenja u zonama

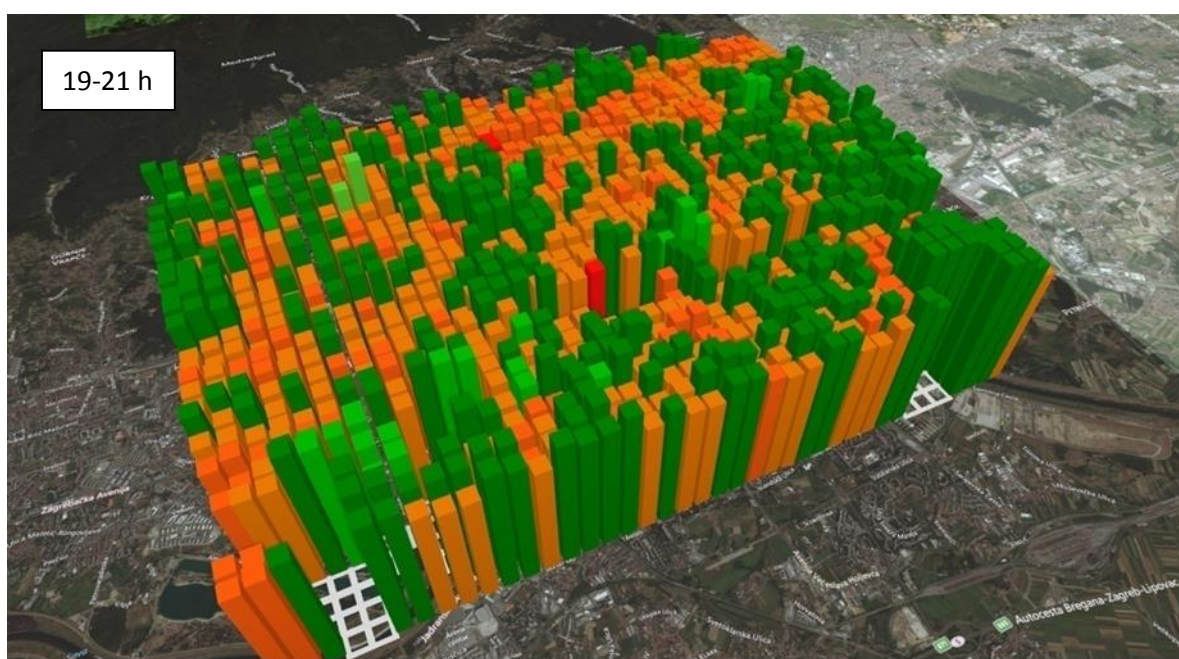
Za sada unificirani pristup određivanju zona u kojima se određuje zagušenje ne postoji. Veliki broj istraživača definira zone koristeći princip “zdravog razuma”. Pod ovime se smatra da se uglavnom koriste definirane postojeće zone koje se temelje na administrativnim granicama (tj. granicama gradskih četvrti ili zone određene temeljem statističkih podataka (popis stanovništva, demografski podaci, podaci o namjeni i dr.). Poznajući navike stanovništva nekog područja, u vidu njihovih dnevnih migracija (odlaska na posao, školu, trgovinu, kući i dr.) i vremenu početka putovanja, moguće je provesti zoniranje područja ovisno o broju putovanja iz/u neke zone. Međutim, osnovni preduvjet za primjenu ovakvog pristupa jest provedeno istraživanje modalne razdiobe putovanja na većem uzorku. Korištenjem podataka o modalnoj razdiobi putovanja, GIS alata te proračunom OD matrica moguće je detektirati područja s većim brojem putovanja te procjenjivati zone zagušenja. Bitna uloga određivanja zona zagušenja i procjene stupnja zagušenja je u prometnom planiranju.

Poznavanje profila brzina omogućava određivanje zona rekurentnih zagušenja i izračun koeficijenata zagušenja u tim zonama. Najjednostavniji pristup određivanju zona u kojima se određuje zagušenje i izračunu koeficijenata zagušenja je da se odabrano područje na digitalnom zemljovidu podijeli na kvadratne zone veličine primjerice (200m x 200m, 500m x 500m, 1000mx1000m), a zatim se za svaku zonu izračuna koeficijent zagušenja prema izrazu

$$c_{zona}^v = \frac{\sum_{r \in [zona]} \left(L_r \frac{\bar{v}_{r,link,p}}{\bar{v}_{r,free}} \right)}{\sum_{r \in [zona]} L_r} \quad (5.6)$$

gdje je c_{zona}^v koeficijent zagušenja zone v , r broj linkova u promatranoj zoni, a L_r duljina pojedinog linka. $\bar{v}_{r,link,p}$ srednja prostorna brzina na linku r u promatranom periodu p . dobije se iz pripadnog profila brzina za r -ti link kao harmonijska sredina postojećih brzina unutar perioda p . $\bar{v}_{r,free}$ je referentna brzina u uvjetima slobodnog toka (noćna brzina), a u digitalnom zemljovidu je zapisana kao pripadni atribut r -tog linka.

Rezultat izračuna koeficijenta zagušenja za određeno područje je matrica $m \times n$ gdje je vrijednost elementa matrice predstavlja iznos koeficijenta zagušenja odgovarajuće zone. Primjer rezultata izračuna koeficijenata zagušenja za grad Zagreb dan je grafičkim primjerom, Slika 5.21. Svakoј visini stupca (i boji) odgovara iznos koeficijenta zagušenja crvena-veliko zagušenje, svijetlo zelena-nema zagušenja)



Slika 5.21 Grafički prikaz koeficijena zagušenja u zonama grada Zagreba

5.1.4 Mogućnosti FCD-a

Kao što je već rečeno osnovni FCD podrazumijeva slanje poruka koje sadrže: ID vozila, vremensku i prostornu poziciju, trenutnu brzinu, smjer u odnosu na sjever. Temeljem tih podataka mogu se estimirati sljedeće osnovne veličine:

- vrijeme putovanja i brzina između dvije točke na mreži
- vrijeme putovanja i brzina vozila na linkovima (segmentu prometnice)
- stanja prometne mreže (stupanj zagušenja)

Ukoliko su učestalost poruka i udio vozila dovoljno veliki moguće je:

- detektirati stvarnovremena zagušenja i incidentne situacije
- estimirati duljine repova čekanja i kašnjenja na raskrižjima
- doprinijeti određivanju P-O matrica mreže

Upotrebom povijesnih FCD podataka (FCD podaci prikupljeni tijekom više mjeseci ili godina) moguće je odrediti:

- profile brzina na linkovima; profili brzina omogućavaju predviđanje vremena putovanja na mreži
- mikroskopska i makroskopska rekurentna zagušenja

Poznavanje povijesnih FCD podataka, odnosno ekstrahiranih informacija (profila brzina) i stvarnovremenih FCD podataka dodatno unaprjeđuje mogućnosti glede: detekcije zagušenja i incidentnih situacija, kratkoročnog i dugoročnog predviđanja putovanja na mreži i određivanja stanja prometne mreže.

FCD načinom prikupljanja ne može se (za sada) direktno mjeriti volumen vozila, zauzeće, prisutnost što su današnji temeljni prometni parametri za upravljanje prometom, ali i razna statistička izvješća. Međutim razvijaju se razni eksperimentalni modeli čiji ulazni podaci su FCD podaci, a izlazni podaci su prometni parametri (npr. kašnjenje na raskrižju, duljina repa čekanja i dr.), a koji su upotrebljivi za sustave automatskog i na taktičkoj razini. Procjene potrebnog udjela FCD vozila tada su veće (cca 30%).

Osim osnovnih informacija skup prikupljenih podataka može se proširiti postojećim senzorima u vozilu i dodatnim senzorima uključujući i računalni vid. Takav način prikupljanja podataka naziva se XFCD (*eng. EXtended Floating Car Data*) Dodatni podaci koji se mogu bilježiti su primjerice uključivanje brisača, temperatura, svjetla, longitudinalna i lateralna akceleracija, uključivanje ABS-a (*eng. Anti –Lock Bracking System*), TCS-a (*eng. Traction Contol System*). Primjerice podaci o uključivanju brisača, svjetala te temperature indikatori su za detekciju vremenskih prilika na prometnici. Djelovanje ABS i TCS upućuje na stanje prometnice. Podaci o longitudinalnoj akceleracije/deceleracije upućuje na mogućnost incidenta. Lateralna akeleracija može upućivati na opasne zavoje i predstavljati informaciju za sustav upozoravanja sudionika u prometu (kao i longitudinalna deceleracija). Postoji još niz mogućnosti iskorištenja podataka koje se mogu dobiti od pripadnog (serijski ugrađenog) računala vozila, dodatno montiranih senzora i dodatno montiranih kamera (računalnog vida). Primjerice XFCD može dati kvalitetne podatke sa velikog područja o onečišćenju zraka. Naravno najveći problem predstavlja obrada podataka i ekstrahiranje informacija.

Moguća iskoristivost sustava koji prikuplja i obrađuje FCD i FPD podatke je vrlo velika:

- Za baze prometnih podataka, prometno planiranje i analize: identifikacija mjesta rekurentnih zagušenja, O-D matrice, analiza učinkovitosti infrastrukture prometne mreže (stajališta, segmenti prometnica i dr.), analiza modova transporta (npr. javni prijevoz), ispravak pogreški ili dodavanje prometnica na digitalnim zemljovidima, modele potrošnje goriva i onečišćenja zraka
- Za upravljanje u prometu: nadzor i upravljanje prometnim tokovima, optimizacija prometne infrastrukture, analiza učinkovitosti
- Za informacijske servise: informacije o stanju u prometu, posebno vrijedni obrađeni podaci za upravljanje flotama vozila i dr.

U prometnom planiranju i statistikama za određivanje O-D matrica, pogotovo ako se koriste pokretna osjetila sa lociranjem pomoću celularnih mreža. Naime za makroskopske O-D matrice bitna su polazišta i odredišta a detalji puta nisu toliko bitni, stoga netočni ali jeftini način prikupljanja podataka temeljen na pozicioniranju pomoću celularnih mreža („prekapčanje“) može generirati golemu količinu iskoristivih podataka. Ispravak pogreški ili dodavanje prometnica na digitalnim zemljovidima.

Obrađeni FCD podaci korisni su u upravljanju za detekciju i smanjenje zagušenja. Naime FCD može biti vrlo koristan za stvarnovremeno prilagođavanje (kalibraciju) prometnih modela. Model ponašanja prometne mreže koji se zasniva na povijesnim podacima, osvježava se stvarnovremenim FCD podacima i podacima sa detektora prometnog toka. Takva kombinacija podataka uz naravno razvijeni sofisticirani model koji omogućava fuziju podataka, pruža mogućnost kratkoročnog predviđanja (cca do 30 min) stanja prometne mreže, a time i upotrebljivost u sustavima upravljanja na strateškoj razini. Može unaprijediti upravljanje u incidentnim situacijama. U svijetu se provode, pogotovo u većim svjetskim gradovima, projekti kako bi se iskoristili FCD podaci. Za upravljanje na taktičkoj razini, kao što je prije rečeno potreban je veći udio FCD vozila (cca 20-30%) uz veliku učestalost poruka (cca 30-10 s).

Trenutačno su aktualni i vrlo iskoristivi profili brzina koji se mogu dobiti iz povijesnih FCD podataka. Temeljem dobivenih profila brzina mogu se predviđati vremena putovanja na linkovima ovisno o vremenu, te estimirati trajanje ruta. Stoga su profili brzina te razvijena programska podrška na GIS platformi koja omogućava određivanje trajanja ruta ovisno o vremenu dragocjeni logističkim tvrtkama koje se bave distribucijom i prikupljanjem roba.

Informacije o vremenu putovanja određenim rutama, predložene rute i njihovo trajanje te najkraće vremenske rute između točaka mreže razni davaoci usluga već nude. Takve usluge dostupne su slobodno putem internet stranica. Usluge sa detaljnijim informacijama koje mogu iskoristiti logističke firme, primjerice rutiranje flote vozila, komercijalno su orijentirane.

5.1.5 Usporedba prednosti i nedostataka FCD –detektori prometnog toka

Najčešće osnovna svrha vozila koja imaju ulogu pokretnih osjetila tj. FCD vozila nije prikupljanje prometnih podataka, tako da struktura poruka, učestalost poruka ali i sam udio FCD vozila nije namjenski određen za određivanje stanja prometne mreže. Međutim FCD pruža ogroman potencijal prikupljanja „jeftinih“ prometnih podataka u odnosu na klasične detektorske tehnologije. Stoga neki autori znanstvenih i stručnih radova FCD vozila nazivaju i oportunističkim detektorima. Slijedeće karakteristike čine FCD poželjnim načinom prikupljanja podataka:

- vrlo mali instalacijski troškovi osnovne opreme i održavanja (koriste se već postojeći sustavi pozicioniranja i slanja podataka; održavanje je sastavni dio postojećeg održavanja)
- velika prostorna pokrivenost (i vremenska ali ne iste lokacije)
- redundancija (s obzirom na velik mogući broj osjetila, kvarovi na jednom ili nekoliko ne utječu bitno na skup prikupljenih podataka)

U Tablica 5.2 navedeni su glavni prednosti i nedostaci FCD i detektora prometnog toka

Tablica 5.2 Usporedba FCD – detektori prometnog toka

	Prednosti	Nedostaci
Detektori prometnog toka	<p>Veliko postojeće iskustvo</p> <p>Velika točnost podataka (parametara prometnog toka: volumen, zauzeće, brzina na presjeku)</p> <p>Postoji potencijal i za daljnji razvoj (pogotovo računalni vid)</p> <p>Nema pogreške pozicije vozila, ali samo u fiksnim točkama na mreži</p> <p>Stalna vremenska pokrivenost, ali na određenom manjem području (presjeku)</p>	<p>Veliki troškovi uređaja, postavljanja i održavanja</p> <p>Ograničeno (vrlo malo) prostorno pokrivanje</p> <p>Vrlo mala točnost u određivanju vremena putovanja i prostorne brzine</p> <p>Na većinu tehnologija (osim intruzivnih i radarskih) utječu vremenske prilike (utjecaj na točnost)</p> <p>Na većinu tehnologija utječe velika gustoća prometa (utjecaj na točnost)</p>
FCD	<p>Veliko prostorno pokrivanje</p> <p>Mogućnost određivanja stanja čitave prometne mreže</p> <p>Niski troškovi (nema ulaganja u infrastrukturu i niski operativni troškovi) ukoliko se podrazumijeva korištenje postojećih flota vozila opremljenih modulima za lociranje</p> <p>Vrlo vrijedni i kvalitetni podaci (uz dovoljan udio FCD vozila, učestalost slanja poruka)</p> <p>Posebno pogodni za prikupljanje podataka u urbanim područjima</p> <p>Nema utjecaja vremenskih prilika</p> <p>Redundancija (ispad jednog pokretnog osjetila ne utječe bitno na kvalitetu rezultata)</p>	<p>Zahtjevana obrada podataka</p> <p>U fazi je istraživanja i razvoja (nisu poznati ili nisu riješeni razni problemi glede uvođenja, obrade podataka i dr.)</p> <p>Pitanje zaštite privatnosti</p> <p>Troškovi prijenosa poruka mogu biti veliki (telekomunikacijski troškovi)</p> <p>Zahtjeva usklađivanje raznih interesnih skupina (administrativna tijela, upravljanje i nadzor prometa, znanstvenici i stručnjaci, taksi i druge službe i dr.)</p>

5.2 Pokretna osjetila - lociranje resursima pokretnih ćelijskih mreža

Prikupljanje podataka koje uključuje lociranje vozila na cestovnoj mreži uz pomoć lociranja resursima pokretnih ćelijskih mreža poznato je i pod engleskim nazivima *Floating Cellular Data* i *Cellular Floating Car Data-CFCD*. Kao što je rečeno, kratica FPD se također može odnositi na ovakav način prikupljanja podataka, mada se pod FPD-om češće smatra “pametni” telefon sa GNSS modulom koji šalje poruke o poziciji. Lociranje mobilnih stanica odnosno praćenje mobilnih stanica u ćelijskoj mreži u stvari je sastavni i nužni dio usluge ćelijske mreže.

Naime da bi se omogućila mobilnost korisnika potrebno je da mobilni sustav „poznaje“ o kojoj mobilnoj stanici se radi (identifikacija) i gdje se mobilna stanica nalazi (lokacija). Samo lociranje za potrebe komunikacija u ćelijskoj mreži je grubo, dovoljno je ustanoviti da li se mobilna stanica nalazi u ćeliji. Postoji više tehnika lociranja kojima se može povećati točnost. Kako je osnovna namjena ćelijskih mreža komunikacija, dodatna oprema koja povećava točnost iziskuje i dodatna ulaganja. Za razliku od FCD-a kod CFCD-a svaka mobilna stanica na mreži može sudjelovati u prikupljanju podataka. Uzevši u obzir udio korisnika sa mobilnim telefonima očito je da skup podataka može vrlo brzo postati golem, pogotovo u urbanim područjima. Kao i kod FCD-a kod CFCD-a temeljna informacija upotrebljiva za određivanje stanja prometa je vrijeme putovanja između pozicija na kojima je locirana mobilna stanica. Izazovi koji danas karakteriziraju CFCD su:

- Povećanje točnosti lociranja uz što manja ulaganja
- Uklapanje sirovih podataka o lokaciji u digitalni zemljovid
- Obrada goleme količine sirovih podataka
- Prikupljanje podataka bez kompromitiranja privatnosti (zaštita privatnosti)

5.2.1 Pokretne ćelijske mreže

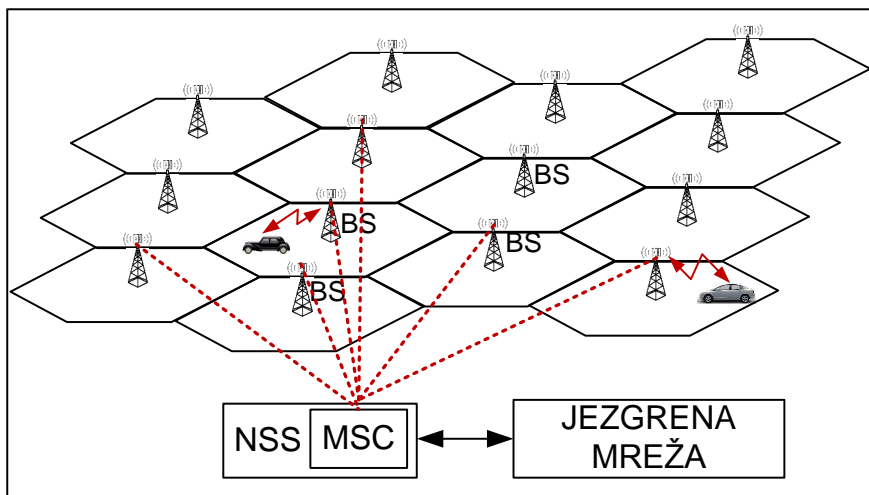
Pokretni ćelijski sustavi koriste veliki broj primopredajnika male snage kako bi pokrilo određeno geografsko područje i omogućili mobilnost velikom broju korisnika. Danas se širom svijeta za digitalne ćelijske sustave komunikacija koristi GSM (*eng. Global System for Mobile Communication*) standard odnosno tehnološke generacije ćelijskih mreža koje vuku korijene od GSM-a. Standardi za digitalne ćelijske komunikacije stalno se razvijaju, a odgovarajući izvedeni telekomunikacijski sustavi pružaju sve veći kapacitet i raznovrsnost telekomunikacijskih usluga. Bitna unaprjeđenja GSM –a tj. digitalnih pokretnih ćelijskih sustava (odgovarajući standardi) nazivaju se generacijama. U Tablica 5.3 dani su nazivi generacija u razvoju standarda digitalnih ćelijskih sustava.

Tablica 5.3 Generacije pokretnih ćelijskih mreža

Generacija	Naziv
2G	GSM (<i>Global System for Mobile Communication</i>)
2,5G	GPRS (<i>General Packet Radio Service</i>)
2,75G	EDGE (<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>)
3G	UMTS (<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>)
3,5G	HSPA (<i>High Speed Packet Access</i>)
3,75G	HSOPA (<i>High Speed OFDM -Orthogonal Frequency Division Multiplexing-Packet Access</i>)
3,9G	LTE (<i>Long Term Evolution</i>)
4G	LTE Advanced (<i>Long Term Evolution Advanced</i>)

Ćelijska mreža sadrži slijedeće glavne podsustave: Podsustav baznih stanica (*eng. Base Station Subsystem*), Podsustav za komutaciju i mrežu (*eng. NSS - Network and Switching Subsystem*),

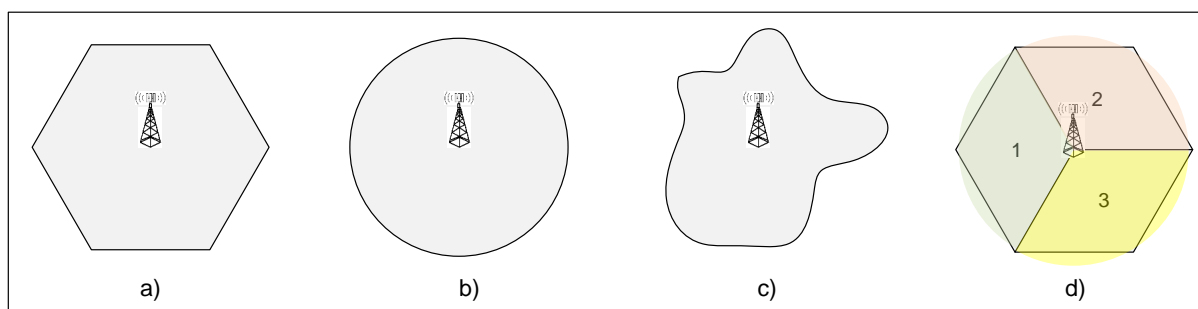
Podsustav za potporu i održavanje (eng. *Operations support system – OSS*). Glavni dio NSS-a je mobilna centrala (MSC – *Mobile Switching Center*) koji omogućava komutaciju (prospajanje veza, usmjeravanje informacijskih tokova) između mobilnih korisnika i korisnika dugih fiksnih ili mobilnih mreža. Osim toga NSS omogućava koordinaciju baznih stanica, sadrži baze podataka HLR (eng. *Home Location Register*) i VLR (eng. *Visitor Location Register*). HLR je velika baza podataka u kojoj su stalno spremljeni podaci o pretplatnicima, uključujući trenutnu lokaciju mobilne stanice (mobilnog telefona). VLR je privremena baza podataka koja sadrži dio informacija (podataka) koji se nalaze u HLR, odnosno sadrži iste podatke kao i HLR, ali za one korisnike koji se trenutno nalaze u lokalnom području određenog broja baznih stanica.



Slika 5.22 Skica pokretnog ćelijskog sustava

Bazna stanica sadrži radijski primo-predajni dio za uspostavljanje radio veze sa korisnicima i upravljački dio namijenjen za podešavanje i upravljanje parametrima komunikacije kao i za komunikaciju sa centralom. Svaka bazna stanica pokriva određeno geografsko područje koje se naziva ćelija, Slika 5.22. Bazna stanica omogućava vezu između korisnika (mobilne stanice - MS) i centrale mobilne mreže (MSC). Nekoliko baznih primopredajnih stanica (eng. *Base Transceiver Station*) radi pod kontrolom BSC-a (eng. *Base Station Controller*) koji je spojen na MSC (*na slici nije prikazano*) ili iste funkcije obavlja MSC. BSC upravlja sa dodjelom radiokanala, administrira frekvencijski spektar, te obrađuje podatke koji se odnose na mjerenje snage i signala od mobilnih stanica. Mobilne stanice odnosno terminalni uređaji pripadaju korisnicima. U svakoj mobilnoj stanici nalazi se SIM (*Subscriber Identity Module*) modul (kartica) pomoću koje sustav identificira mobilnu stanicu. HLR i VLR omogućavaju upravljanje mobilnošću i zapisuju lokacijske informacije mobilne stanice.

Ćelija je osnovna geografska jedinica ćelijske mreže i odnosi se na područje koje je pokriveno radiosignalom pripadne bazne stanice. U prikazu ćelijske mreže to se područje prikazuje šesterokutnim modelom Slika 5.23 a), a rabi se zbog pogodnog prikaza. S obzirom da ćeliju određuje pokrivanje radio signalom odnosno domet je određen padom snage signala, idealni oblik ćelije bio bi krug Slika 5.23 b). No kako na radio signal djeluje niz utjecaja ćelija je nepravilnog oblika. Na radio signal može djelovati konfiguracija terena, prisutnost građevina i uvjeti propagacije signala. Mogući oblik ćelije stvarne ćelije prikazan je na Slika 5.23 c).



Slika 5.23 Oblik ćelije a) Šesterokutni model b) Idealni oblik c) Mogući stvarni oblik d) Sektorizacija ćelije u manje ćelije

U pokretnom ćelijskom sustavu čim je mobilna stanica uključena obavlja se lociranje i dodjela internacionalnog pokretnog pretplatničkog identiteta (*International Mobile Subscriber Identity* IMSI). Ako je neaktivna (uključena u pripremnom stanju ali nema telefonskog poziva niti prijenosa podataka – *idle mode*) obavlja se normalno ažuriranje lokacije čim mobilna stanica prijeđe u drugu ćeliju ili grupu ćelija LA (eng. *Location Area*). Sustav također obavlja periodičko ažuriranje lokacije mobilne stanice, ako stanica ne mijenja ćeliju nakon isteka definiranog vremenskog perioda. Ako je mobilna stanica aktivna (telefonski poziv ili prijenos podatka) i prelazi granice ćelije izvršava se prekapčanje (eng. *Handover*) tj. proces prijenosa aktivnog telefonskog poziva ili prijenosa transfera podataka iz jedne ćelije u drugu (sa jedne bazne stanice na drugu) bez prekida sesije, i pod kontrolom mobilne centrale. Lokacijske informacije o mobilnoj stanici kad je u neaktivnom stanju (*idle mode*) su rjeđe i siromašnije nego li kad je mobilna stanica aktivna (razgovor, prijenos podataka).

Od značaja za lociranje vozila, odnosno mobilne stanice je prostorna raspodjela baznih stanica odnosno gustoća ćelija i njihova veličina. Veličina ćelija ovisi o pretpostavljenom (procijenjenom) broju korisnika i okolišu. Što su ćelije manje povećava se kapacitet (veći broj korisnika ili više prometa na istom području), povećani broj prekapčanja i manja potrošnja mobilnih stanica jer su manje snage potrebne za manje ćelije. Postoji pet vrsta ćelija s obzirom na veličinu u GSM mreži:

- Makro ćelije, gdje se antene nalaze na antenskim stupovima ili na vrhovima visokih građevina za pokrivanje ruralnih i prigradskih područja. Uobičajena veličina (radijus) je od 1 do 30 km. Najveći radijus prema GSM specifikaciji za praktičnu uporabu je 35 km;
- Mikro ćelije, za urbana područja veličine su od 200 m do 2000 m;
- Piko ćelije, koje pokrivaju malu površinu reda veličine (radijus) od 4 m do 200 m;
- Femto ćelije, za povezivanje interesne skupine korisnika u cilju povezivanja računske mreže;
- Selektivne ćelije, ćelije koje ne pokrivaju puni kut od 360°, već neki manji kut kako bi se pokrile “rupe” u pokrivanju mreže ili npr. na ulazima u tunelima
- Kišobran ćelije, pokrivaju područje više manjih ćelija kako bi se kod korisnika koji se brzo kreću izbjeglo učestalo prekapčanje između manjih ćelija

Treba napomenuti da se u urbanim područjima gdje je gustoća korisnika i telekomunikacijski promet velik ćelija sektorizira, odnosno područje jedne ćelije dijeli se na tri manje sektorske ćelije gdje su granice manjih ćelija određene kutom od 120° , Slika 5.23 d).

5.2.2 Lociranje pomoću resursa ćelijskih mreža

Lociranje vozila (tj. mobilnih stanica) u ćelijskim mrežama ostvaruje se uporabom postojećih resursa ili njihovom hardverskom i softverskom nadgradnjom. Prednost je što tada nije potreban poseban sustav za lociranje vozila. Također se lociranje u celularnim mrežama može izvesti na način da sva potrebna mjerenja obavlja „mreža“ (eng. *Network-based*), bez ikakvog posebnog sudjelovanja (ili nadgradnje) samih mobilnih stanica. Za razliku od toga GNSS sustav podrazumijeva da se u GNSS modulu (mobilnoj stanici) izračunava pozicija korisnika (eng. *Mobile-based*). Sa aspekta prikupljanja podataka iz prometnog sustava *Network-based* je privlačniji način zbog velikog postojećeg mobilnih stanica kojima nije potrebna nadgradnja niti dodatna komunikacija osim postojeće. Međutim u slučaju velikih zahtjeva za točnost pozicioniranja i zahtjevne obrade podataka, troškovi nadgradnje sustava mogu uvelike umanjiti privlačnost takvog načina uporabe lociranja za prikupljanje podataka iz prometnog sustava. Mobilna stanica u ćelijskoj mreži također može sudjelovati u postupku određivanja svoje pozicije u smislu da određene podatke šalje baznoj stanici (eng. *mobile-assisted-network-based* ili kraće *mobile-based*).

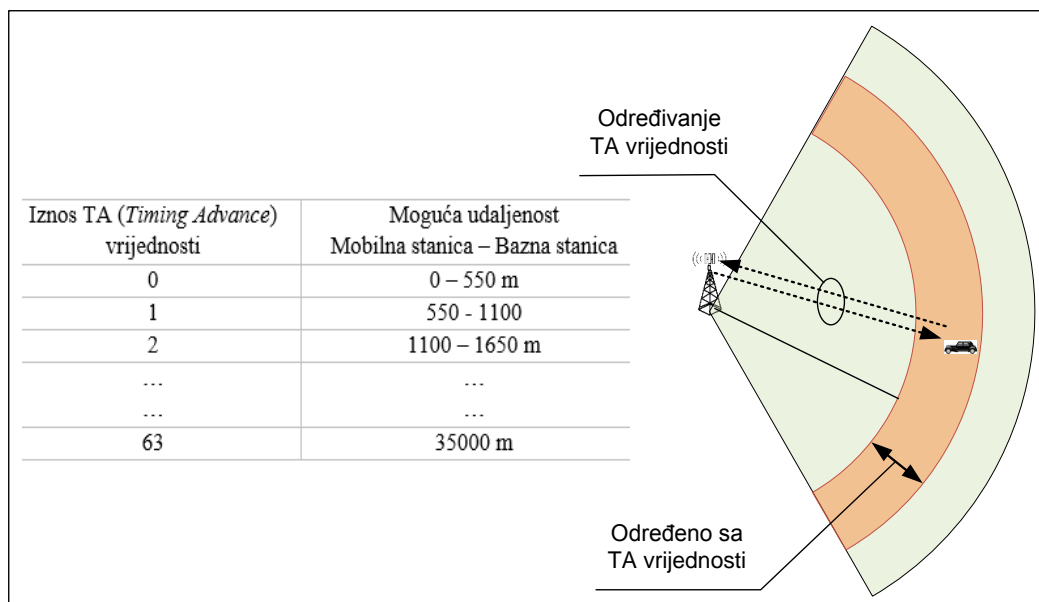
5.2.2.1 Lociranje zasnovano na identifikaciji ćelije

Lociranje zasnovano na identifikaciji ćelije (eng. *Cell-IDentification*) je najjednostavnija metoda lociranja u ćelijskoj mreži. Koordinate bazne stanice i područje ćelije su poznati. Bazna stanica sadrži podatke o mobilnoj stanici koja se nalazi u pripadnoj ćeliji, te je velika vjerojatnost da se i nalazi u području ćelije. Dakle moguća je gruba ocjena pozicije mobilne stanice.

Lociranje zasnovano na identifikaciji ćelije podrazumijeva gotovo nikakve modifikacije u infrastrukturi ćelijske mreže osim u smislu obrade i zapisa podataka. Time su troškovi izuzetno mali. Nedostatak je što točnost lociranja ovisi o veličini ćelije tako da je u gradskim pogreška reda veličine od nekoliko desetaka metara pa do kilometra, u prigradskim od nekoliko kilometara do desetak kilometara dok u ruralnim je i preko desetak kilometara.

Za potrebe usklađivanja komunikacije između bazne stanice i mobilnih stanica ćelijski sustav koristi i jednu kontrolnu vremensku varijablu koja se naziva TA (eng. *Timing Advance*). Zbog konačne brzine radiovalova dolazi do kašnjenja signala, koje se može izmjeriti na osnovi poslanog signala od bazne stanice i primljenog od mobilnih stanica. Za udaljenije mobilne stanice kašnjenje signala bit će veće. Neke vrijednosti TA i pripadne granice udaljenosti dane su u tablici koja se nalazi na Slika 5.24. Rezolucija udaljenosti određena sa promjenom TA vrijednosti je 550 m. TA vrijednost nula znači da je mobilna stanica udaljena do 550 m od bazne stanice, TA vrijednost jedan znači da se mobilna stanica nalazi negdje u kružnom pojasu određenom manjim polumjerom iznosa 550 m i većim polumjerom iznosa 1100 m. Najveća vrijednost TA je 63 što odgovara 35 km. TA se može koristiti za grubu ocjenu brzine mobilne stanice, što je primjerice potrebno kod postojanja kišobran ćelije. Za mobilnu stanicu koja se

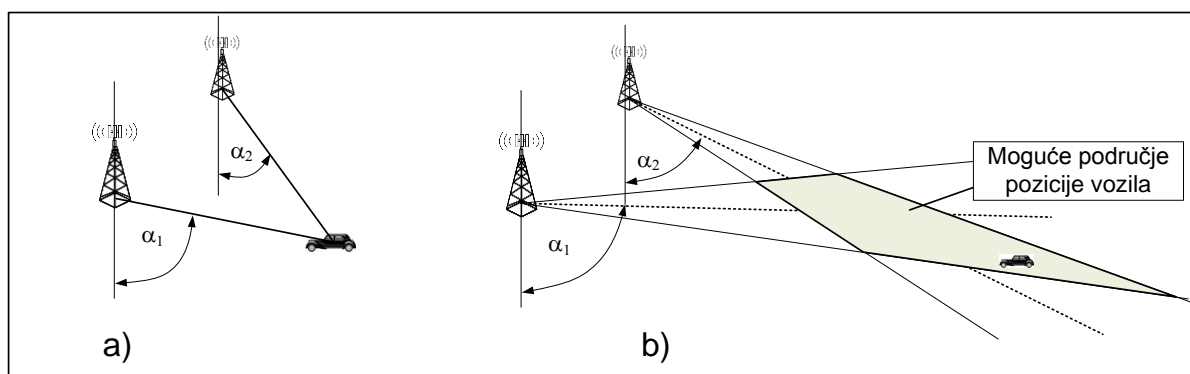
brzo giba umjesto da se vrši učestalo prekapčanje između ćelija, koristit će se kišobran ćelija. Korištenje TA vrijednosti omogućava povećanje točnosti lociranja mobilne stanice unutar ćelije, Slika 5.24. Za ovakav način lociranja rabi se naziv *Cell-ID + TA (Cell Identification with Time Advance)*



Slika 5.24 Lociranje Cell-ID+TA (*Cell Identification with Time Advance value*)

5.2.2.2 Lociranje zasnovano na određivanju kuta dolaska signala

Lociranje zasnovano na određivanju kuta dolaska signala (eng. *Angle of Arrival AoA*) podrazumijeva da bazne stanice imaju posebne antene (antenski niz), pomoću kojih se može odrediti (izmjeriti) kut dolaznog signala mobilne stanice. Izmjernim kutom dolaznog signala u baznoj stanici i same bazne stanice određen je pravac na kojem se nalazi mobilna stanica. Teoretski dovoljne su dvije bazne stanice za određivanje pozicije mobilne stanice (mobilna stanica nalazi se na presjeku dva pravca), Slika 5.25 a). Međutim izmjereni kut je samo približan stvarnom kutu zbog greške samog antenskog niza, zbog prepreka na putu tako da signal može stići i pod nekim drugim kutom ili stiže višestruki signal. Rezultat toga je područje u kojem se vozilo vjerojatno nalazi, Slika 5.25 b). Bolja točnost postiže se sa tri bazne stanice.

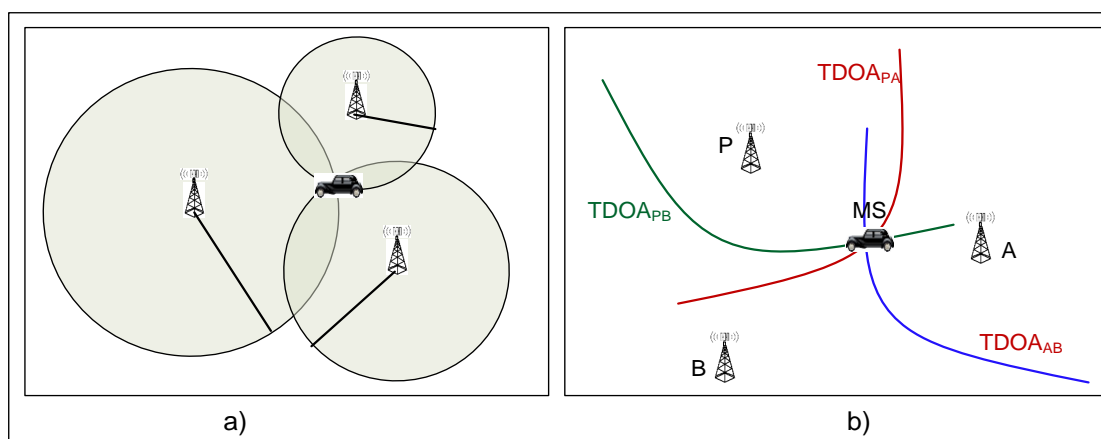


Slika 5.25 Lociranje zasnovano na određivanju kuta dolaska signala

5.2.2.3 Lociranje zasnovano na mjerenju vremena razlike dolaska signala

Lociranje zasnovano na mjerenju vremena razlike dolaska signala (*eng. Time Difference of Arrival - TDOA*) znači da se mjeri razlika vremena u dolasku signala poslanog mobilnom stanicom do bazne stanice u čijoj se ćeliji nalazi i dolasku signala u susjedne bazne stanice (proteklo vrijeme od prijema MS signala u primarnoj baznoj stanici do prijema MS signala u sekundarnim baznim stanicama). Princip određivanja pozicije mobilne stanice određuje se lateracijom, odnosno određivanjem pozicije na osnovi poznatih udaljenosti od poznatih točaka.

Ako prijemnik može izmjeriti vrijeme koje je radio signalu potrebno da stigne od predajnika, tada se na osnovi izmjerenog vremena i brzine elektromagnetskog vala može izračunati udaljenost predajnik-prijemnik. U tom slučaju kružnom lateracijom se određuje pozicija prijemnika. Za jednoznačno utvrđivanje pozicije potrebna su tri predajnika (kružnice u 2D), Slika 5.26 a). Taj princip određivanja pozicije (u 3D) koriste GNSS sustavi.



Slika 5.26 Lociranje a) kružnom lateracijom b) hiperbolnom lateracijom

U ćelijskim mrežama za određivanje položaja može se koristiti hiperbolna lateracija, Slika 5.26 b). Naime, kad se izmjeri vrijeme razlike dolaska signala (TDOA) u primarnu baznu stanicu i jednu sekundarnu baznu tada se mobilna stanica nalazi negdje na hiperboli. Odnosno razlika vremena $TDOA_{PA}$ dolaska signala između primarne bazne stanice **P** i neke sekundarne bazne stanice **A** definira hiperbolnu funkciju. Sve točke koje leže na toj hiperbolnoj krivulju imaju jednaku razliku udaljenosti između **P** i **A** (*udaljenost MS-P minus udaljenost MS-A je konstanta za sve točke na hiperboli*). Kako bi se odredila pozicija potrebna je još jedna sekundarna bazna stanica **B**. Sjecište tih hiperbola određuje poziciju mobilne stanice **MS**. Zbog moguće greške prilikom određivanja udaljenosti na osnovi izmjerenih razlika vremena, hiperbolna krivulja nije linija već traka, a njihovo presjecište je područje.

5.2.2.4 Ostale metode lociranja

Lociranje zasnovano na naprednom promatranju vremenske razlike dolaska signala (*eng. Enhanced Observed Time Difference – EOTD* ili *Downlink Time Difference of Arrival DL-TDoA*) također koristi princip određivanja pozicije hiperbolnom lateracijom. Međutim potrebna obrada signala i izračun obavlja se u samoj mobilnoj stanici, što za posljedicu ima da mobilna stanica treba biti opremljena dodatnim softverom i hardverom.

Tablica 5.4 Usporedba metoda lociranja resursima ćelijskih mreža glede točnosti i potrebne nadgradnje

Metoda lociranja	Približne točnosti		Zahtjevi na nadogradnju
	Gradsko područje	Ruralno područje	
Cell - ID	50-1000 m	10 km	Vrlo niski troškovi, samo softver. Poboljšanje točnosti uz TA, također niski troškovi.
<i>TDOA</i>	40-50 m	50 - 120 m	Srednji troškovi. Nadogradnja hardvera i softvera na strani mreže. Samo softvera na strani mobilne stanice.
<i>Signal Strength</i>	50 – 550 m	250m-35 km	Softver na strani mreže.
EOTD	50 - 300 m	50 – 150 m	Visoki troškovi. Hardver i softver na strani mreži i na strani mobilne stanice.
A-GPS	10 – 150 m	10 – 40 m	Nadogradnja hardverom i softverom na strani mreže i na strani mobilne stanice.

Lociranje se može izvršiti mjerenjem snage signala (eng. *Signal Strength*). Snaga primljenog signala u mobilnu stanicu je inače važna informacija za odlučivanje o prekapčanju i druge optimizacijske i administracijske svrhe. Stoga mobilne stanice mogu istovremeno mjeriti snagu signala od nekoliko baznih stanica, i te podatke slati u baznu stanicu. Na osnovi izmjerene snage signala od tri bazne stanice, definiraju se tri kružnice čiji polumjer (bazna stanica je u centru kružnice) ovisi o izmjerenoj snazi signala. Međutim u urbanim područjima uslijed nejednolikog pada snage signala u ovisnosti o udaljenosti zbog refleksija signala i zasjenjena ovakva metoda ne daje točne rezultate. Povećanje točnosti može se postići korištenjem karte snage signala (eng. *Signal Strength Map*) koju inače operateri izrađuju za svaku baznu stanicu.

Najtočnije lociranje ostvaruje se podrškom GNSS sustava, odnosno u literaturi se često naziva A-GPS (eng. *Assisted GPS*). Takav način osim visoke točnosti omogućava lociranje i u zatvorenim prostorima. A-GPS uključuje dodatnu komunikaciju sa baznom stanicom (odnosno sa odgovarajućim modulom sustava koji se bavi lociranjem mobilnih stanica i stvaranjem pripadne baze podataka. Usporedba metoda lociranja resursima ćelijskih mreža glede točnosti i potrebne nadgradnje prikazana je u Tablica 5.4.

5.2.3 CFCD -a sa Cell-ID lociranjem

Kao i kod FCD-a osnovni podaci koji se dobivaju FPD-om su pozicija vozila (mobilne stanice) na cestovnoj mreži i vremenska oznaka. Stoga je i princip prikupljanja i slijed glavnih postupaka obrade *CFCD* podataka isti kao i kod FCD-a. Međutim za razliku od FCD-a ćelijske mreže i nisu namijenjene za točno lociranje, već za komunikaciju. Stoga je sama obrada podataka u cilju prikupljanja podataka za prometnu uporabu zahtjevnija, uz dodatne algoritme obrade podataka, a uz manju točnost. Veća točnost lociranja znači i veća ulaganja u hardver i softver. Od navedenih metoda lociranja pomoću resursa ćelijskih mreža jedino metoda koja se zasniva na identifikaciji ćelije ne zahtjeva značajnu nadogradnju hardvera i softvera. Stoga je

danas što se tiče *CFCD* -a u funkciji prikupljanja podataka za prometnu uporabu ovakav način lociranja sa aspekta potrebnih ulaganja najprivlačniji.

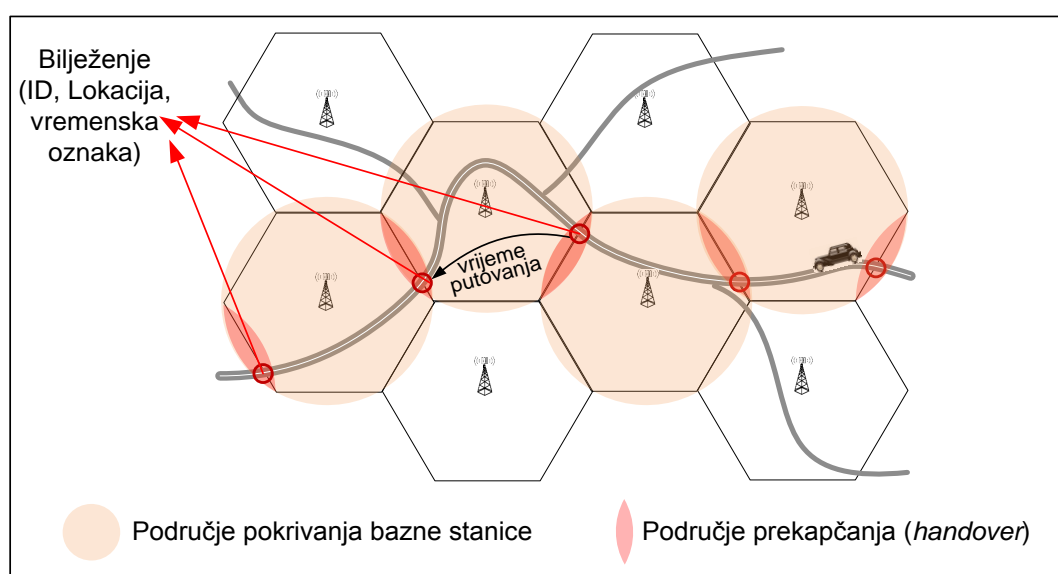
Kada se mobilna stanica kreće po mreži, i prelazi iz ćelije u ćeliju dešava se prekapčanje (handover). Korištenje Cell-ID načina lociranja za *CFCD* u osnovnoj varijanti podrazumijeva praćenje (bilježenje):

- identifikacijske oznake mobilne stanice,
- lokacija područja prekapčanja,
- vrijeme prekapčanja

Uzimajući u obzir događaj prekapčanja i područje prekapčanja moguće je odrediti mogući put mobilne stanice kroz ćelijsku mrežu. Preklapanjem tih informacija sa slojem prometnica digitalnog zemljovida, analizom se može odrediti mogući put vozila kroz cestovnu mrežu.

Prilikom svakog prekapčanja ustanovljava se približna pozicija mobilne stanice. Točnost lociranja vozila prilikom prekapčanja je veća nego li u slučaju lociranja mobilne stanice unutar ćelije. (područje gdje se vrši prekapčanje manje je negoli područje ćelije). Slika 5.27 prikazuje idealizirani prikaz ćelijske mreže i područja prekapčanja za neku trajektoriju vozila (mobilne stanice). Kao što je rečeno osnovni podaci *CFCD* -a uz Cell-ID način lociranja su prostorna pozicija i vremenska oznaka. Temeljem toga može se izračunati vrijeme putovanja između zabilježenih pozicija i srednja brzina između tih pozicija. Estimacija vremena putovanja uglavnom uključuje slijedeće glavne korake:

- Priprema lokacijskih podataka (integracija)
- Čišćenje podataka (npr. ostaju podaci koji se pretpostavlja da su mobilne stanice u vozilima)
- Uklapanje u sloj prometnica digitalnog zemljovida
- Određivanje mogućih ruta (zaključivanje o putu)
- Izračun vremena putovanja



Slika 5.27 Princip *CFCD Cell-ID* (Područja prekapčanja)

U stvarnosti područje prekapčanja je nepravilnog oblika, odnosno za realne primjene potrebno je modeliranjem i mjerenjem odrediti moguće oblike i veličine područja prekapčanja, a zatim i vjerojatnost prekapčanja unutar tog područja. Međusobno područja prekapčanja mogu dosta varirati u veličini, reda veličine od nekoliko desetaka metara pa do kilometra.

Zbog mogućih velikih područja prekapčanja, uklapanje stvarne pozicije prekapčanja u digitalni zemljovid je veliki problem. Nešto slično problemu zaključivanja o putu kod FCD-a. S time da je ovdje problem daleko izraženiji. Jednostavni algoritmi uklapanja u digitalnu kartu upitni su za upotrebu. Naime moguća pogreška uklapanja direktno ovisi o veličini područja prekapčanja (primjerice kilometar), a unutar kojeg se može nalaziti nekoliko prometnica. Posebno je zahtjevan problem paralelnih prometnica koje se nalaze u istoj ćeliji (vozila prilikom ulaska u ćeliju dolaze iz iste ćelije, a prilikom izlaska izlaze u istu ćeliju). Naime zbog velike pogreške ne može se zaključiti kojom prometnicom je vozilo prošlo, te je pitanje kojim prometnicama treba pridružiti izračunato vrijeme između prekapčanja. Eventualno se može na osnovi poznatog profila brzina ili atributa prometnica (ograničenje brzine, postojanje raskrižja na jednoj) pretpostaviti kojom prometnicom je vozilo prošlo. Ako su prometnice sličnih karakteristika ne može se razlikovati s koje prometnice dolaze podaci. Treba naglasiti da je spomenuta problematika predmet istraživanja, te da se algoritmi stalno unaprjeđuju. U nekim izvješćima navode se podaci da je točnost algoritama zaključivanja o putu, temeljem CFCD (Cell-ID) podataka, reda veličine 95% za prometnice koje bi odgovarale autocestama i državnim cestama, do je točnost algoritama za urbana središta oko 85%.

5.2.4 Osvrt na karakteristike podataka

Većina projekata u svijetu glede istraživanja i primjene CFCD odnosi se na estimaciju vremena putovanja ili brzine na segmentima (i rutama) cestovne prometne mreže. S obzirom na velik udio mobilnih stanica u populaciji, te da se gotovo u svakom vozilu nalazi jedna ili više mobilnih stanica CFCD način prikupljanja podatka ima izuzetno velik potencijal i za određivanje O-D (*Origin – Destination*) matrica i uzoraka putovanja. Iako je sam način prikupljanja podataka relativno jeftin, određivanje karakteristika podataka, vjerodostojnog skupa podataka i obrada podataka zahtjeva značajne napore.

Karakteristike sirovih podataka

U velikoj količini potencijalno dostupnih CFCD podataka potrebno je poznavanje na koji način su generirani sirovi podaci, koje su karakteristike skupova podataka i razlike među njima. Eksploatacija goleme količine podataka bez kvalitetno odrađenog pred-procesiranja podatka i dubinske analize (*Data Mining*) može rezultirati u nevjerodostojnosti rezultata. To naravno uključuje poznavanje primijenjene metode lociranja i pripadajuće točnosti, ali i ostalih karakteristika načina prikupljanja. Primjerice, CFCD podaci mogu biti rezultat lociranja aktivnih mobilnih stanica (telefonski poziv ili prijenos podataka) i/ili lociranja mobilnih stanica u pripremnom stanju (*idle mode*). Odabir samo jedne vrste jako mijenja količinu podataka. Odabir obje vrste znači da podaci nisu istih karakteristika. CFCD podaci koji su rezultat lociranja aktivnih mobilnih stanica su znatno točniji od podataka koji su rezultat lociranja mobilnih stanica koje se nalaze samo u pripremnom stanju. Naime dok je mobilna stanica u aktivnom stanju signal koji prima mreža je jači, a time je točnost lociranja veća.

Glede vjerodostojnosti CFCD podataka utjecaj ima i područje s kojeg se podaci prikupljaju. Ako se podaci prikupljanju sa prometnica izvan gradova (čelije pokrivaju uglavnom segment prometnica; autoputa, obilaznice, državne ceste i dr.) velika je vjerojatnost da većina mobilnih stanica se nalazi u vozilima. U gradskom području mobilne stanice nalaze se osim u vozilima, i kod pješaka, biciklista ili u objektima. Stoga je potrebno čišćenje i filtriranje podataka naprednim algoritmima.

Za određivanje parametara prometnog toka (vrijeme putovanja i brzina) u obzir bi trebalo uzimati samo jednu mobilnu stanicu po vozilu. Inače za grubu procjenu mobilnih stanica s obzirom na vrstu vozila moglo bi se uzeti:

- 1-2 mobilne stanice po osobnom vozilu,
- 2-3 mobilne stanice po službenom ili komercijalnom vozilu,
- 20-40 mobilnih stanica po vozilu javnog gradskog prijevoza.

Ako se CFCD podaci prikupljaju primjerice prekapčanjem (*Cell-ID*) od strane jednog telekom operatera i područje gdje se vrši prekapčanje je malo, mogu se donekle filtrirati višestruki zapisi (višestruke mobilne stanice). Međutim u slučaju više operatora, sa različitim područjima gdje se vrši prekapčanje, zadatak filtriranja je izuzetno težak. Nadalje ako je područje prekapčanja relativno veliko, promet je gust i to sa kratkim intervalom slijeđenja tada se opet ne može razlikovati da li se radi većem broju mobilnih stanica u npr. autobusu ili se radi o koloni vozila sa jednom ili više mobilnih stanica po vozilu. Naravno u slučaju ako se žele utvrditi obrasci putovanja stanovništva tada (primjerice za planiranje javnog gradskog prijevoza) tada se u obzir uzimaju podaci od svih mobilnih stanica.

Tehnologija obrade CFCD podatka uključivši i FPD podatke (te fuziju sa FCD podacima) je trenutačno u stanju intenzivnog razvoja, s time da još nije dostignut stupanj široke i pouzdane primjene.

Zaštita privatnosti podataka

Prilikom korištenja pokretnih komunikacija, sustav među ostalim generira podatke o korisniku, lokaciji, vremenu i korištenoj usluzi. Podaci se akumuliraju i spremaju za tehničke i tehnološke potrebe. Takvi podaci su visokovrijedni i za znanstvena istraživanja, ali i za komercijalnu uporabu (nadzor prometa, upravljanje prometom, prometno planiranje, lokacijski bazirane usluge i dr.). U takvim slučajevima korisnici koji generiraju podatke nisu niti svjesni gdje se podatci koriste i tko ih koristi, da li su postali dovoljno anonimni (postojanje veze lokacijskih podataka i identifikacije korisnika).

U cilju zaštite osobnih podataka u EU je doneseno niz direktiva uključujući naravno i elektroničke komunikacije. Pravila u EU o zadržavanju podataka dobivenih ili obrađenih u vezi s pružanjem javno dostupnih elektroničkih komunikacijskih usluga ili javnih komunikacijskih mreža dana su direktivom 2006/24/EZ EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA. U direktivi se navodi „Takvi se podaci moraju izbrisati ili moraju postati anonimni onda kada više nisu potrebni u svrhu prijenosa komunikacije. To se ne odnosi na podatke koji su nužni u svrhu obrade ili naplate međupovezivanja. Na temelju pristanka, određeni se podaci mogu također obrađivati u svrhu oglašavanja te za pružanje usluga s dodanom vrijednosti.“

Za telekom operatere (i/ili treće zainteresirane strane) tako ostaje izbor da korisnici pristanu dijeliti svoje lokacijske podatke ili da ih učini anonimnima. Kako je doživljaj privatnih korisnika da su takvi podaci izrazito privatne prirode i njihovo dijeljenje zadiranje u privatni život ostaje jedino način da se takvi podatci učine anonimnima. CFCD podatci (lokacijski podaci, kretanje po mreži) ne bi smjeli biti povezivi sa identitetom korisnika koji je te podatke generirao. Pitanje privatnosti i zaštite lokacijskih podataka predmet je diskusija i istraživanja, i jedna od glavnih prepreka za puno iskorištenje CFCD-a.

Kako bi se iskoristile pune mogućnosti CFCD-a, ali i FPD-a više treba postojati konsenzus više interesnih strana: sami korisnici mobilnih komunikacija, administrativna tijela javne vlasti, telekom operateri, znanstvenici i stručnjaci te javne i privatne tvrtke koje će eksploatirati takve podatke. Uporaba CFCD-a zahtjeva usku suradnju telekom operatera zbog potrebne instalacije softvera (i hardvera), te se postavlja pitanje financiranja i vlasništva nad podacima. Administrativna tijela javne vlasti imaju važnu ulogu u stimuliranju razvoja i implementaciji FPD-a i CFCD-a. Posebno se to odnosi za javno korisne ITS aplikacije kao što je upravljanje u prometu, prometno planiranje te ostale aktivnosti vezane za promet i transport. FPD i CFCD podaci su također visokovrijedni podaci za druga područja istraživanja i primjene primjerice socijalno ekonomske. Iako postojeća regulativa daje okvire za zaštitu privatnosti to ne uklanja zabrinutost da će se podaci namijenjeni za ostvarivanje prometnih ciljeva koristiti pod drukčijim okolnostima i za druge svrhe. Administrativna tijela trebaju sudjelovati u regulativi privatnosti, vlasništvu podataka, standardizaciji te regulativi vezanoj za eksploataciju podataka.

5.3 Pokretna osjetila - automatska identifikacija

Automatska identifikacija vozila (*eng. Automated Vehicle Identification – AVI*) uključuje tehnologije kojima se vozilo može identificirati ili prepoznati na nekoj kontrolnoj točki mreže te se može utvrditi „privremeni“ ili „stalni“ identitet. Pri tome se identifikacija može temeljiti na detekciji dodijeljenog identifikatora, prepoznavanju značajki ili uspostavljenoj komunikaciji između opreme vozila i opreme fiksne infrastrukture.

Sa stajališta prikupljanja podataka, u cilju određivanja parametara prometnog toka i stanja mreže, nije bitna identifikacija vozila u smislu „pravog“ identiteta (identitet korisnika, vrsta vozila, zašto vozilo služi, tko je u vozilu i dr.), već je bitno ustanoviti da se isto vozilo pojavilo na različitim kontrolnim točkama mreže. Odnosno identificirati vozilo u nekoj kontrolnoj točki mreže, te ponovo identificirati (re-identificirati) na nekoj drugoj kontrolnoj točki. U stvari vozilo ima neki „privremeni“ identitet. Takva identifikacija i re-identifikacija omogućava direktan izračun putovanja između kontrolnih točaka.

Neke ITS aplikacije zahtijevaju utvrđivanje „pravog“ identiteta vozila, gdje je izuzetno bitno nedvosmisleno zaključiti o kakvom vozilu se radi. Primjerice davanje prioriteta vozilima žurnih službi i davanje prioriteta javnom prijevozu, gdje vozila imaju „stalni“ identitet.

5.3.1 Bluetooth

5.3.1.1 Bluetooth

Bluetooth je telekomunikacijski standard za razmjenu podataka između elektroničkih uređaja radikomunikacijom kratkog dometa. Blue veza podrazumijeva da povezani uređaji posjeduju primo-predajnike. Bluetooth bežična tehnologija danas se nalazi u gotovo svim današnjim računalima, mobilnim telefonima, radiouređajima u vozilima, navigacijskim uređajima, slušalicama, perifernoj opremi računala i dr. Namjera razvoja Bluetooth tehnologije (koja se i dalje razvija) je da odgovarajući uređaji budu niske cijene, malih dimenzija, male potrošnje energije, jednostavni za rukovanje, pouzdani i sigurni uz laku i brzu povezivost kako bi se omogućila mobilnost i široka dostupnost.

Bluetooth tehnologija koristi jedan od ISM (eng. *Industrial, Scientific and Medical*) nelicenciranih pojaseva radio spektra. ISM su slobodni pojasevi radijskih frekvencija za industrijsku, znanstvenu i medicinsku uporabu. Za rad uređaja u ISM pojasu nije potrebna posebna dozvola nadležnog tijela, niti plaćanje koncesije s tim da postoji ograničenje snage emitiranog signala. Konkretno Bluetooth u ISM pojasu (2.4 GHz – 2.5 GHz) koristi frekvencijski raspon od 2.402 do 2.483 GHz. To područje podijeljeno je na 79 kanala (i pripadnih frekvencija) sa razmakom od 1 MHz. Bluetooth uređaji koriste tehniku zvanu skokovita promjena frekvencije (eng. *frequency hopping*). Predajnik i prijemnik razmjenjuju paket podataka na jednoj frekvenciji, a zatim se skokovito prelazi na drugu frekvenciju kako bi se razmijenio slijedeći paket podataka. Proces se ponavlja dok se ne pošalju svi podaci. Bluetooth slučajno skokovito mijenja frekvencije do 1600 puta u sekundi. Korištenjem ove tehnike Bluetooth postiže visoku otpornost na moguće interferencije zbog prisustva drugih uređaja koji rade u ISM pojasu.

Postoje tri klase Bluetooth uređaja s obzirom na definiranu maksimalnu izlaznu snagu, a time i domet, Tablica 5.5. Neki uređaji (moduli) mogu raditi samo u jednom modu rada, tj. u pripadnoj klasi, dok kod drugih postoji mogućnost promjene snage odašiljanja. Novija verzija Bluetooth Smart napravljena za *Internet of Things* ima vrlo nisku potrošnju energije pa je također poznata pod nazivom *Bluetooth Low Energy* - BLE.

Tablica 5.5 Približni dometi Bluetooth uređaja

	Maksimalna izlazna snaga (dBm)	Maksimalna izlazna snaga (W)	Približni maksimalni domet
Klasa 1	20 dBm	100 mW	100 m
Klasa 2	4 dBm	2.5 mW	20 m
Klasa 3	0 dBm	1 mW	10 m
BLE	10 dBm	10 mW	50-100 m

Uspostava veze između Bluetooth uređaja definirana je protokolima. Bluetooth uređaji automatski detektiraju druge Bluetooth uređaje u blizini i povezuju se s njima. Postoji više načina povezivanja Bluetooth uređaja. Povezivanje samo dva Bluetooth uređaja (*point to*

point), gdje je jedan uređaj nadređeni (*master*) a drugi podređeni (*slave*). Više Bluetooth uređaja mogu formirati ad-hoc minijaturnu računarsku mrežu. kojoj se mogu pridruživati drugi uređaji ili isto tako uređaji mogu napuštati tu mrežu. Jedan od uređaja (*master*) dobiva funkciju upravljanja takvom mrežom, koja se naziva *piconet*. Ako u mreži postoji više *mastera* koji su također povezani i dijele informacije onda se takva mreža naziva *scatternet*.

5.3.1.2 Princip prikupljanja podataka

Osnovni sustav za prikupljanje podataka pomoću Bluetooth tehnologije sastoji se od Bluetooth detektora, *host* računala za prihvatanje i obradu podataka i komunikacije. Bluetooth detektor je uređaj koji se postavlja na stupove pokraj prometnice, detektira Bluetooth uređaje koji prolaze, sprema podatke i šalje ih dalje. Bluetooth detektor sadržava slijedeće funkcijske dijelove:

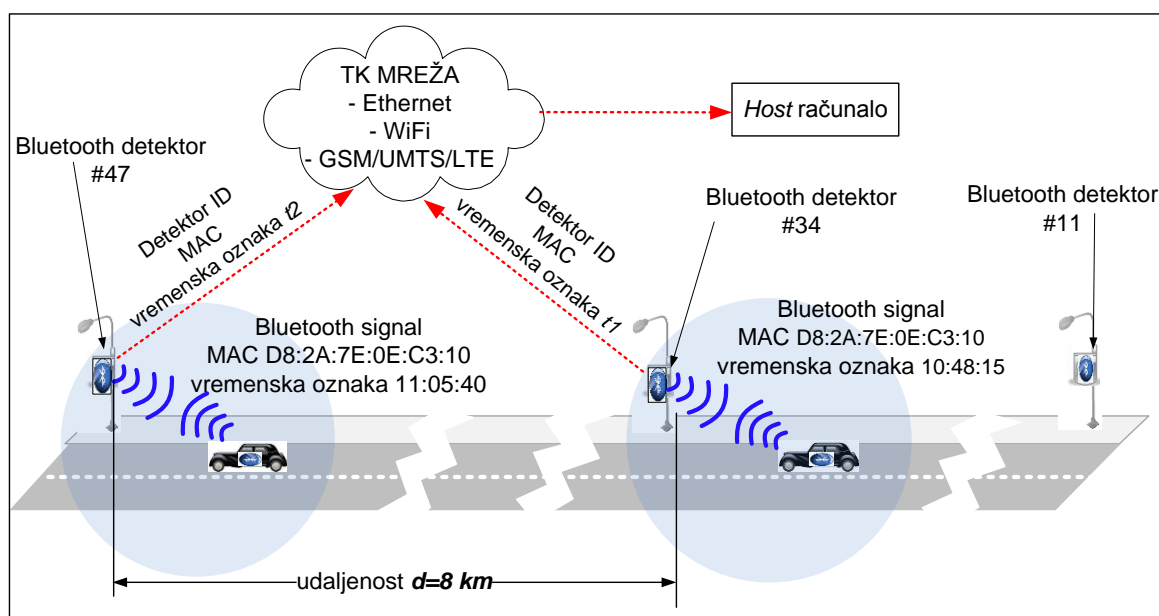
- Bluetooth primopredajnik koji šalje informacije prema Bluetooth uređajima i prima informacije od njih
- Antenu koja može takve izvedbe da se povećanju detekcijske sposobnosti i domet detekcije, ili da se zona pokrivanja Bluetooth detektora ograniči na manje područje od interesa
- Računalo koje procesira informacije, gdje primjerice mogu biti uključeni postupci čišćenja dupliciranih podataka ili procedure za povećanje zaštite privatnosti
- Izvor napajanja ili priključak za napajanje
- Kućište i opremu za montažu

Bluetooth detektori stalno skeniraju okolni prostor u potrazi za aktivnim Bluetooth uređajima. Svaki Bluetooth uređaj (koji se nalazi u pripremnom stanju za odgovor) odgovorit će na upit detektora sa jedinstvenom MAC (eng. *Media Access Control*) adresom i sinkronizacijskom informacijom. MAC adresa je jedinstvena 48-bitna identifikacijska oznaka, dodijeljena od proizvođača. Ukoliko se Bluetooth uređaj putem MAC adrese identificira na dvije kontrolne točke gdje se nalaze Bluetooth detektori, uz poznatu udaljenost između kontrolnih točki i vremenske oznake može se pretpostaviti vrijeme putovanja i brzina.

Osim MAC adrese i vremenske oznake u zapisu Blue detektora nalazi se i naziv Blue uređaja (oznaka ID Tablica 5.6), tip uređaja CoD (*Class of Device*), zabilježena razina snage koja se izražava indikatorom RSSI (eng. *Received Signal Strength Indicator*). CoD podaci sadrže informaciju o kakvom uređaju se radi (pametni telefon, slušalica, računalo, LAN), što donekle može pomoći u određivanju o da li se radi o vozilima ili pješacima. Vrijednost indikatora RSSI u dBm izmjerena Blue detektorom (apsolutna razina snage primljenog signala u odnosu na referentnu vrijednost od 1mW) u relaciji je sa udaljenosti Blue uređaja od Blue detektora. Što je udaljenost veća signal je slabiji i vrijednost RSSI pada. Prema tablici uređaj u donjem retku (RSSI=-85dBm) trebao bi biti udaljeniji od uređaja u gornjem retku (RSSI=-75dBm). Izračun udaljenosti između detektora i uređaja koji se detektira na osnovi RSSI vrijednosti nije jednostavan i ovisi o više faktora: klasi uređaja, gdje se uređaj nalazi, utjecaju okoline. U zapisu se može nalaziti i oznaka proizvođača uređaja.

Tablica 5.6 Primjer zapisa Bluetooth detektora

DB ID	Timestamp	MAC	ID	RSSI	CoD
45400	2012-05-16 16:18:12	00:26:7E:5F:3C:18	myCar	-72	Handsfree
78005	2012-04-20 12:59:27	D8:2A:7E:0E:C3:10	Tropic	-85	Smartphone



Slika 5.28 Bluetooth u funkciji prikupljanja podataka – vrijeme putovanja

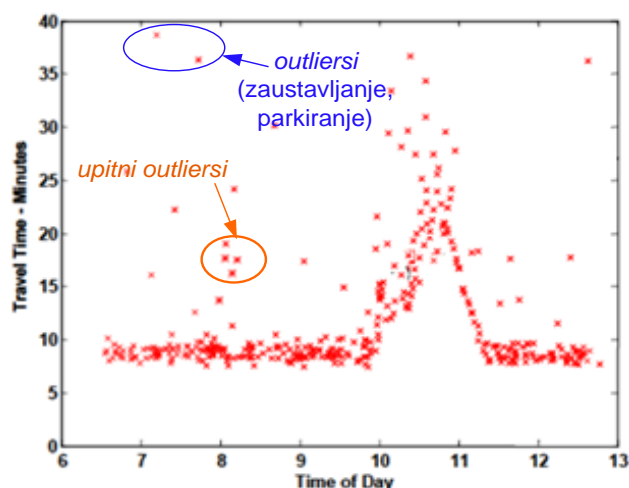
Podaci sa Bluetooth detektora dostavljaju se putem komunikacijske mreže na *host* računalo. Sama komunikacija i povezanost Bluetooth detektora može biti izvedena na više načina. Svaki Bluetooth detektor samostalno šalje podatke na *host* računalo ili primjerice samo je jedan Bluetooth detektor u grupi detektora povezan na TK mrežu i prosljeđuje podatke od drugih s kojima je povezan nekom bežičnom tehnologijom kraćeg dometa (npr. ZigBee). Na *host* računalu spremaju se i obrađuju MAC adrese i vremenske pozicije od svih Bluetooth detektora.

Princip određivanja vremena putovanja sukladno Slika 5.28. pomoću Bluetooth sadrži sljedeće:

- Bluetooth detektor #34, MAC adresa uređaja D8:2A:7E:0E:C3:10, vremenska oznaka 10:48:15 (MAC adresa- šest parova heksadecimalnih brojeva)
- Bluetooth detektor #47, MAC adresa uređaja D8:2A:7E:0E:C3:10, vremenska oznaka 11:05:40
- Poznata udaljenost između Bluetooth detektora #34 i #46
- Izračun vremena putovanja

Primjer izračunatih vremena putovanja između dva Bluetooth detektora prikazano je na Slika 5.29. Jedan križić je pripadno vrijeme jednog detektiranog Bluetooth uređaja. Podaci na Slika 5.29 su sirovi podaci o vremenima putovanja. Takve podatke potrebno je očistiti. Karakteristike podataka slične su FCD podacima, te je i obrada podataka u smislu dobivanja parametara (primjerice profila brzina) slična. Što podrazumijeva agregaciju podataka u vremenskim intervalima, usrednjavanje, izgladivanje podatka. S tom razlikom da su Bluetooth detektori fiksno postavljeni, te se razlikuje postupak uklapanja u digitalnu kartu. Kod Bluetooth

detektora postoji moguća pogreška određivanja pozicije vozila koja je ovisna o zoni pokrivanja Bluetooth detektora. Što je zona pokrivanja veća, veća je i pogreška. Nakon obrade podatka za određenu rutu (ili linkove) mogu se odrediti prosječna vremena putovanja u ovisnosti o dobu dana. Uz poznate povijesne podatke usporedbom trenutnog vremena putovanja može se zaključivati kakvo je trenutno stanje prometnog toka.



Slika 5.29 Primjer izračunatih vremena putovanja na segmentu prometnice (slika na osnovi originala (Young, 2012))

U urbanoj sredini vozila (tj. vozači) često voze „nepredvidljivim“ rutama između dvije točke na mreži (ako su dovoljno udaljene) bilo zbog privatnih ili službenih poslova. Zatim često je parkiranje, i zatim nastavak puta. Primjerice na Slika 5.29 podaci zaokruženi plavom linijom su vjerojatni *outliersi* zbog kratkotrajnog parkiranja, ili korištenja zaobilaznog puta. Ukoliko se vrijeme puta između tih točaka računa kao vremenska razlika jasno je da se dobivaju netočni rezultati. *Outliere* se teško očistiti iz Bluetooth podataka, ako nemaju znatno odstupanje. Uzrok podataka zaokruženih narančastom linijom može biti stvarno privremeno povećanje zagušenja. Isto vrijedi i za ostale načine prikupljanja podataka putem identifikacije vozila. Slijedeći problem u urbanoj sredini je višestruka detekcija Bluetooth uređaja koji se nalaze u istom vozilu, a posebno vozilima javnog prijevoza. Ovakvi *outliersi* mogu se prilično očistiti.

5.3.1.3 Mogućnosti

Načelno Bluetooth tehnologijom mogu se dobiti slijedeći podaci:

- Prilično točno vrijeme putovanja i srednja brzina na segmentima prometnice
- O-D (*Origin – Destination*) podaci

Korištenjem Bluetooth ne mogu se dobiti:

- Točni podaci o volumenima prometa i podaci o zauzeću
- Podaci o zastoju u smislu brzog otkrivanja

Prednosti Bluetooth tehnologije za prikupljanje podataka nalaze se u velikoj rasprostranjenosti uređaja (udjelu), velikoj vjerojatnosti da će Bluetooth uređaj biti detektiran Bluetooth detektorom i relativno niskoj cijeni potrebnog hardvera. Primjerice Bluetooth je jeftinija

tehnologija za primjenu od FCD-a (odnosi se na slučaj kad bi vozila trebalo opremiti opremom za FCD).

Detekcija MAC adrese i njena reidentifikacija na mreži pruža mogućnost određivanja raznih vrsta O-D podataka. Od mikroskopskih O-D podataka na raskrižju, zatim na koridorima, dijelovima mreže do velikih područja gradova. Naravno to podrazumijeva odgovarajući broj i razmještaj Bluetooth detektora. Iako je sam princip identifikacije i reidentifikacije za određivanje vremena putovanja i O-D matrice isti, dobivanje O-D podataka zahtjeva drukčiju (i zahtjevniju) obradu i prilagodbu obrade konkretnoj vrsti O-D podataka, kao i prilagodbu konkretnom slučaju.

Kao i kod ćelijskih mreža osnovna namjena Bluetooth tehnologije je naravno komunikacija, tako da Bluetooth također predstavlja mogući komplementarni izvor podataka o prometnim tokovima. Prednost Bluetooth tehnologije u odnosu na CFCD je što je Bluetooth anonimna tehnologija glede identifikacije uređaja u smislu povezivanja MAC adrese i identiteta korisnika. Treba napomenuti da se ta anonimnost odnosi na bilježenje MAC adrese. Međutim kao i druge današnje komunikacijske tehnologije postoji određena ranjivost. Iako Bluetooth tehnologija u cilju sigurnosti sadrži tajne ključeve za autentifikaciju i tajne ključeve za enkripciju, to ne znači da je i apsolutno sigurna u smislu ometanja, pristupa osjetljivim podacima i preuzimanja nadzora nad uređajem.

Nedostaci Bluetooth su već spomenuti problemi sa čišćenjem podataka (višestruke detekcije). Nadalje, kako Bluetooth detektor ima područje pokrivanja reda veličine od nekoliko desetaka metara pa do 100m (osim ako antene nisu ciljano usmjerene na manje područje) dešavat će detekcije svih uređaja u tom području. Problem što se ne može razlikovati gdje se Bluetooth uređaj nalazi (kod pješaka, biciklista ili u vozilu). Nadalje i lociranje ima relativno veliku pogrešku, ovisnu o veličini zone pokrivanja detektora. Ovi utjecaji na točnost na otvorenim cestama van urbanog područja su manji.

5.3.2 Radio-frekvencijska identifikacija

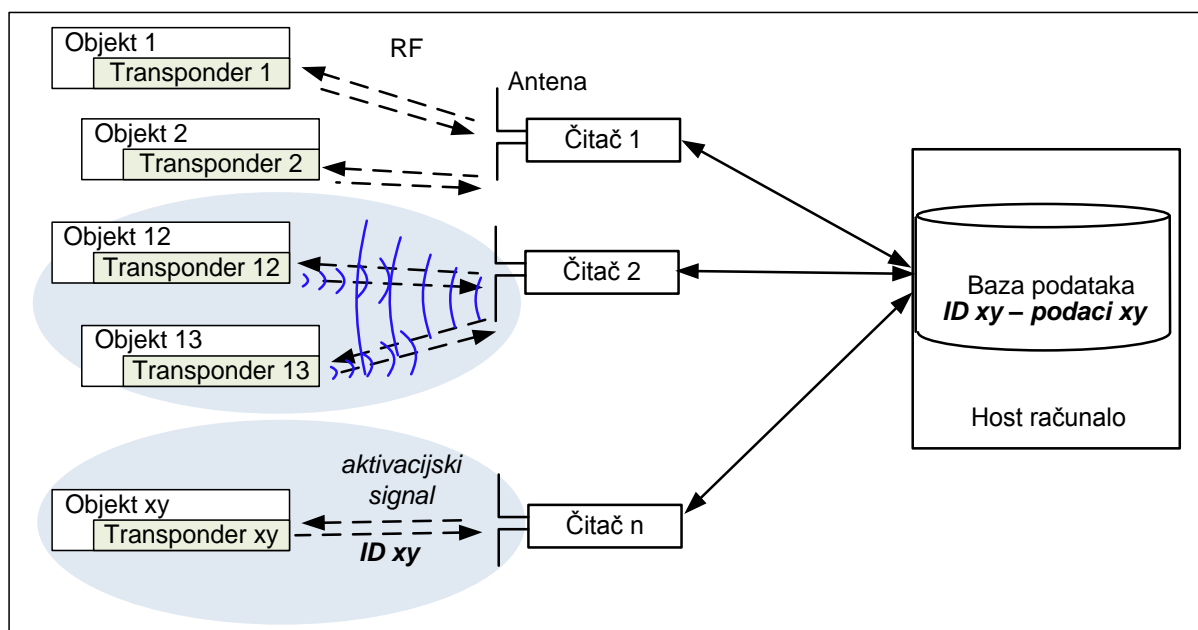
5.3.2.1 RFID sustav

Akronim RFID (*eng. Radio Frequency Identification*) odnosi se na tehnologiju koja u procesu automatske identifikacije objekata koristi radiovalove za prijenos informacije. Pri tome je fizičkom objektu koji je predmet automatske identifikacije dodijeljen identifikator prema nekom standardu. Takva tehnologija omogućava prikupljanje podataka sa velikog broja pokretnih objekata u cilju praćenja, brojanja i sortiranja objekata već prema potrebama određene aplikacije. Danas je primjena RFID tehnologije vrlo raširena u raznim područjima: logistika, sigurnosne potrebe, kontrole pristupa, prometu (naplata cestarine), praćenju životinja i dr.

Osnovne komponente RFID sustava koje omogućavaju identifikaciju su čitač (*eng. reader*) i transponder (*eng. transponder*). Nositelj podataka (tj. identifikacijske informacije i drugih

zapisanih podataka) je transponder. Transponder je primopredajnik s automatskom predajom signala tj. radio-frekvencijski odzivnik. Postavlja se na objekte koji se žele (trebaju) identificirati. Komunikacija se obavlja radiovalovima male snage tako da je i domet uspostave veze između čitača i transpondera relativno mali.

Ako se transponder nađe u dometu čitača, obavlja se razmjena podataka odnosno identifikacijski podaci zapisani na transponderu prenijet će se u čitač. Antena čitača emitira radio signal sa ciljem aktiviranja transpondera te čitanja i eventualnog zapisivanja podataka u memoriju transpondera. Područje pokrivanja radio signalom čitača ovisi o izvedbi antene, zračevoj snazi signala i radnoj frekvenciji. Kada se RFID transponder nađe u elektromagnetskoj zoni čitača, transponder će primiti aktivacijski signal i odgovoriti sa svojim identifikacijskim kodom (i sa ostalim podacima ako postoje), Slika 5.30.



Slika 5.30 RFID sustav

Osnovna konfiguracija RFID sustava sadrži čitače i transpondere kao periferne dijelove sustava i RFID bazu podataka, slika xx. U RFID bazi podataka svakom identifikatoru transpondera (očitanu identifikacijski podaci transpondera) mogu biti pridruženi razni dodatni podaci koji opisuju pripadni fizički objekt (naziv objekta ili proizvoda, cijena, podaci o praćenju objekta, vrijeme očitavanja i dr.).

Čitač se sastoji od antene, primopredajnika i mikroprocesorskog uređaja koji upravlja komunikacijom, obrađuje podatke i prosljeđuje podatke *host* računalu. Najčešći je slučaj da čitač inicira komunikaciju sa transponderom. Ovisno o vrsti RFID sustava složenost komunikacije može biti vrlo jednostavna u smislu detekcije identifikatora jednog usamljenog transpondera do korištenja vrlo složenih protokola komunikacije. U slučaju postojanja većeg broja transpondera u dometu čitača moraju se izvršavati anti-kolizijski protokoli, koji omogućavaju čitaču brzu slijednu komunikaciju sa velikim brojem transpondera. Izvedbe čitača glede procesiranja podataka također mogu biti različite. Primjerice samo prosljeđuje podatke host računalu ili ima i mogućnost lokalne obrade i spremanja podataka. Za čitač se još rabe engleski nazivi *base station* (bazna stanica), *interrogator* (ispitivač), *initiator* (inicijator).

Transponder sadrži radio primopredajnik, antenu i mikročip za spremanje podataka i upravljanje i pri tome sve složeno u kompaktnoj izvedbi. S obzirom na fizičku izvedbu transponderi mogu biti različitih izvedbi i dimenzija. Transponderi u robusnim kućištima veličine od nekoliko cm^3 do nekoliko dm^3 za dugotrajni rad u teškim uvjetima, transponderi u obliku etiketa, transponderi u obliku naljepnica i minijaturni transponderi manji od mm^3 . Za transponder rabe se i drugi engleski nazivi *tag* ili *label* (oznaka), *data carrier* (nosač podataka), *identifier* (identifikator).

5.3.2.2 Vrste RFID uređaja

Prema vrsti napajanja transponderi se dijele na:

- pasivne,
- aktivne i
- i djelomično aktivne.

Pasivni transponderi ne sadrže vlastito napajanje, već za napajanje prilikom komunikacije iskoriste primljenu energiju radiovalova čitača. Izostanak potrebe za izvorom napajanja omogućava izvedbe transpondera izuzetno malih dimenzija. Nedostatak je što je domet komunikacije transponder-čitač ograničen na nekoliko metara. Pasivni transponderi su načelno najmanjih dimenzija i najniže cijene.

Aktivni transponderi sadrže vlastito napajanje za napajanje mikročipa i emitiranje radio signala. Time je omogućen i veći domet komunikacije čitač-transponder, reda veličine do stotinu metara. Autonomija rada aktivnih transpondera sa baterijom zbog male potrošnje energije je velika, reda veličine i do desetak godina. Naravno ovisno o tome kolika je učestalost komunikacije.

Djelomično aktivni transponderi sadrže napajanje za mikročip, ali se za odašiljanje signala antenom koristi energija primljena od radiovala čitača.

Glede mogućnosti zapisivanja podataka (programiranja) također postoji više vrsta transpondera. Transponderi koji imaju zapisan jedinstveni identifikator koji se ne može mijenjati. Transponderi koji omogućavaju jednostruko zapisivanje podataka koji ostaju trajno zapisani. Transponderi koji omogućavaju višestruko programiranje, zapisivanje i mijenjanje zapisa. Takvim transponderima primjerice mogu se dodati senzori koji prikupljanju podatke koje čitač povremeno očitava.

Standardizacijom RFID tehnologije bavi se više organizacija, a najutjecajnija u razvoju industrijskih podržanih standarda je EPCglobal. EPCglobal dijeli RFID uređaje UHF i HF područja, (trenutačno ima najveću ekspanziju) s obzirom na klase u šest klasa, Tablica 5.7, i s obzirom na generacije u dvije generacije. Druga generacija uređaja ima veći memorijski kapacitet transpondera te kvalitetnije čitače.

Tablica 5.7 Klase RFID uređaja

Klasa	Opis
Klasa 0	UHF, predprogramirani transponderi, moguće samo čitanje
Klasa 1	UHF ili HF, pasivni transponderi, programiranje moguće samo jednom
Klasa 2	Pasivni transponderi, programiranje moguće samo jednom
Klasa 3	Pasivni transponderi, polu aktivni i aktivni, moguće višestruko programiranje, (mogućnost zapisivanja sa dodatnih senzora)
Klasa 4	Aktivni transponderi sa integriranim primopredajnicima kojima mogu komunicirati sa drugim transponderima i čitačima
Klasa 5	Čitači - mogućnosti klase 4 uz dodatne funkcionalnosti: napajanje drugih transpondera i komunikacija sa raznim drugim uređajima

5.3.2.3 RFID frekvencijski pojas

Za komunikaciju čitača i transpondera RFID tehnologija koristi ISM frekvencijske pojaseve i to niske frekvencije NF, visoke frekvencije HF, ultra visoke frekvencije UHF i mikrovalno područje. U Tablica 5.8 prikazani su uobičajene frekvencije za RFID, te približni dometi. Domet ovisi o vrsti transpondera, tako da pasivni imaju manji domet, veći poluaktivni a najveći aktivni.

Tablica 5.8 RFID - Frekvencijski pojasevi

	NF	HF	UHF	Mikrovalno
Uobičajene frekvencije za RFID	125<135 kHz	13,56 MHz	860-930 Mhz	2,45 GHz
Vrsta transpondera	Uglavnom pasivni	Uglavnom pasivni	Aktivni, pasivni i poluaktivni	Aktivni, pasivni i poluaktivni
Približan tipičan domet	0,5 m	1 m	4-5 m	1 m

Tipične aplikacije RFID transpondera u NF području su kontrola pristupa, označavanje životinja, zaštitu vozila (blokiranje paljenja motora vozila). Zbog nešto većih potrebnih dimenzija antena NF transponderi ustupaju mjesto transponderima koji rade na višim frekvencijama. RFID transponderi u HF području su danas vrlo rašireni: kontrola pristupa, elektroničko plaćanje, identifikacija objekata itd. Među brojnim aplikacijama RFID-a u UHF području je i elektronička naplata cestarine gdje se uobičajeno koriste poluaktivni transponderi. Transponderi koji rade u mikrovalnom području također se mogu koristiti za elektroničku naplatu cestarine, stvarnovremeno lociranje i praćenje raznih objekata.

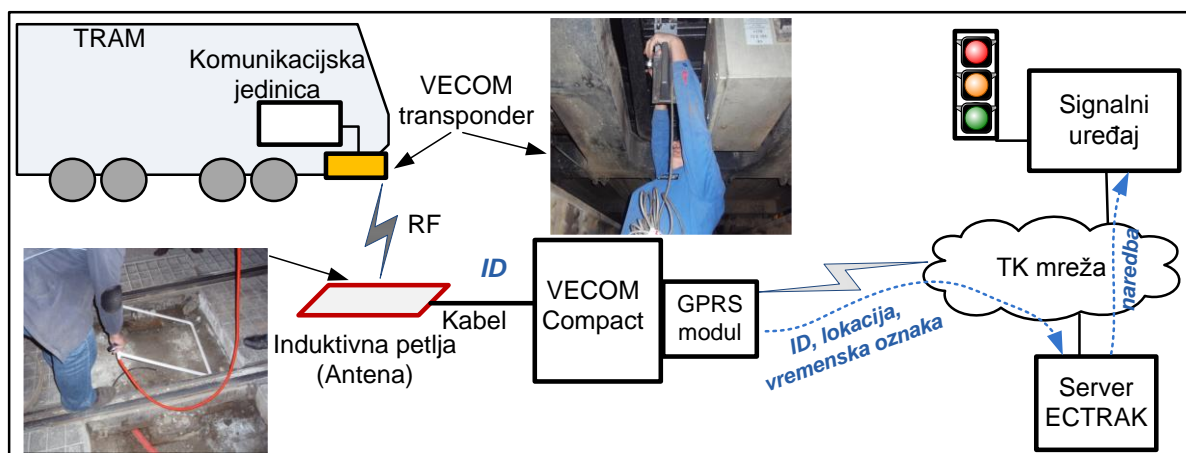
Dizajn RFID sustava ovisi radnoj frekvenciji. Radna frekvencija je vezi sa slijedećim značajkama:

- Brzina prijenosa podataka i mogućnost istovremenog praćenja više transpondera - što je frekvencija veća je i brzina prijenosa podataka između čitača i transpondera;
- Mogućnost čitanja u blizini metalnih i mokrih površina – što je frekvencija veća to metalne i mokre površine više ometaju komunikaciju;
- Gabaritima transpondera – što su frekvencije više to transponderi mogu biti manjih dimenzija;
- Potrošnji energije – što je radna frekvencija viša, veća je potrošnja energije.

5.3.2.4 Primjena RFID-a u prometu

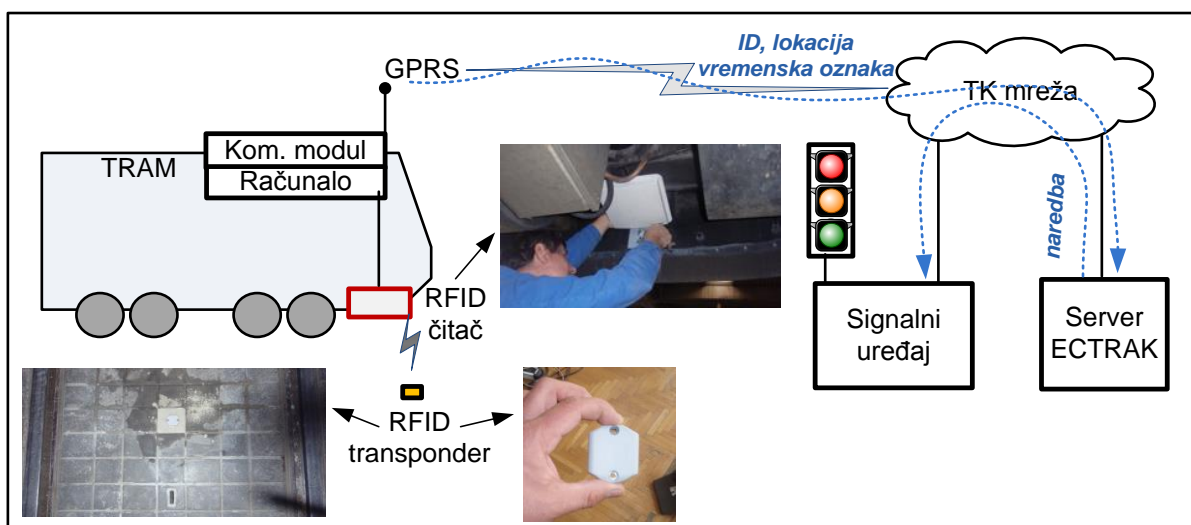
Za prikupljanje podataka o vremenu putovanja i brzini na mreži RFID tehnologija može se koristiti na isti način kao Bluetooth. Iz poznatih podataka o udaljenosti između čitača i vremenskih oznaka koje dodjeljuje čitač izračuna se vrijeme putovanja po segmentima prometnice. Točnost RFID-a za određivanje vremena putovanja u urbanoj sredini ovisi o vrsti RFID-a, a načelno bi zbog manjeg dometa bila veća nego kod Bluetooth-a. Prednost je veća točnost detekcije jer se nedvosmisleno prema identifikatoru može utvrditi o kakvom vozilu se radi. Nedostatak je što vozila treba opremiti transponderima i postaviti čitače, te je upitna ekonomska opravdanost ovakvog načina prikupljanja podataka. Kako je ipak cijena pasivnih tagova niska s tendencijom i daljnjeg snižavanja cijene, potencijali iskorištenja takve tehnologije za određivanje O-D matrica postoje. Prepreku ovakvom načinu može opet predstavljati pitanje zaštite privatnosti ako bi se transponder primjerice serijski ugrađivao u sva vozila.

Kao što je već rečeno komercijalni RFID proizvodi koriste se za razne namjene povezane sa prometom kao što je elektronička naplata cestarine, praćenje roba u transportu, u karticama za naplatu javnog prijevoza, blokiranje pokretanja motora i dr. Jedna od postojećih primjena RFID-a u prometu je i dodjela prioriteta. Primjer je komercijalni proizvod naziva VECOM (*VEHicle COMmunication*) tvrtke Peek Traffic danas Imtech, Slika 5.31. Ovaj proizvod ne koristi standardne čitače, transpondere niti kodove za identifikaciju ali je princip rada gotovo isti. VECOM transponder montira se na prednjem dijelu podvozja tramvaja, a antena se postavlja između tračnica ispod površine kolnika. Kada se transponder nađe iznad petlje, ID kod vozila se putem RF veze (transponder – antena) prosljeđuje uređaju koji se naziva VECOM Compact smještenom pokraj prometnice (u kućištu signalnog uređaja), Slika 5.31. Zahtjev za dodjelom faze prioritarnom vozilu prosljeđuje se ECTRAK serveru (sustav za upravljanje prometom). Ukoliko je dodjela faze moguća, naredba za dodjelom faze (ili produljenjem faze ili ranijim početkom) šalje se lokalnom signalnom uređaju. Prednost VECOM-a je robusnost, otpornost na atmosferske utjecaje (snijeg, poledicu) i visoka točnost detekcije. Nedostatak je zahtjevno postavljanje petlje (antene) te postavljanje podzemnog kabela do čitača.



Slika 5.31 RFID komercijalni proizvod za dodjelu prioriteta

Eksperimentalni RFID sustav za davanje prioriteta u okviru projekta CIVITAS napravljen je na Fakultetu prometnih znanosti u suradnji sa ZET-om i tvrtkom Mareton. Sustav koristi standardne čitače i transpondere niske cijene. Za razliku od uobičajenih konfiguracija ovdje je je čitač montiran na podvozje tramvaja, a transponder je ugrađen u betonsku ploču koja se nalazi između tračnica, Slika 5.32. Konkretno je odabran RFID čitač i transponder koji rade u UHF području. Odabrani transponder ima mogućnost programiranja tj. dodatnih zapisa, što u ovakvoj konfiguraciji pruža mogućnost zapisa točne pozicije na transponder. To nadalje omogućava da se lokacija vozila na tom mjestu utvrdi sa centimetarskom točnošću.



Slika 5.32 RFID eksperimentalni sustav za dodjelu prioriteta

Tijekom projekta izvršen je niz testiranja više transpondera. Primjerice testiranje na točnost očitavanja u prisustvu vode, Tablica 5.9. Naime prisustvo vode (vlažnog snijega) nepovoljno djeluje na komunikaciju u UHF području. Za davanje prioriteta bitno je i da se komunikacija čitač-transponder obavi u raspoloživom vremenu dok su čitač-transponder u međusobnom dometu. To raspoloživo vrijeme ovisit će o brzini vozila. Što je brzina vozila veća kraće je raspoloživo vrijeme za obavljanje komunikacije (za očitavanje identifikatora transpondera). Tablica 5.10 prikazuje primjer testiranja različitih transpondera u ovisnosti o brzini tramvaja,

s time da su u tablici su navedene samo zadnje tri znamenke EPC (*Electronic Product Code*) koda.

Tablica 5.9 Primjer: Učestalosti točnosti očitavanja u prisustvu stupca vode

TAG type	Manufacturer	Water gauge	EPC code	Accurate reading	Unsuccessful reading
TAG100	HKRFID	5cm	1BC630003005FB63AC1F3681EC88A0B3	11	89
TAG-EX100	HKRFID	5cm	ECE73000DB00FB63AC1F3841EC880004	13	87
HARSH 150W	PREMO Group	10cm	D33C300030080A130A0A0A1235050001	73	27
MAX SQ-D	Omni-ID	10cm	8FEF3400BBBABBBA04000103021C	98	2
DURA 1500	Omni-ID	10cm	C5763400EA2A3A4A0000000000000001	98	2
DURA 3000	Omni-ID	10cm	83EC3000201108038401090001020001	100	0

Tablica 5.10 Primjer: Uspješnost detekcije transpondera u ovisnosti o brzini vozila

TAG	Manufacturer	5 km/h	10 km/h	15 km/h	20 km/h	25 km/h	30 km/h	35 km/h
TAG100	HKRFID	A0B3	A0B3	-	-	-	-	-
TAG-EX100	HKRFID	0004	0004	0004	-	-	-	-
HARSH 150W	PREMO Group	0001	0001	0001	0001	0001	0001	-
MAX SQ-D	Omni-ID	021C	021C	021C	021C	021C	021C	021C
DURA 1500	Omni-ID	0001	0001	0001	0001	0001	0001	0001
DURA 3000	Omni-ID	0001	0001	0001	0001	0001	0001	0001

Prednost ovakvog sustava za davanje prioriteta je niska cijena zbog standardnih lako dobavljivih komponenti, kao i manji broj potrebnih čitača koji su za nekoliko redova veličine skuplji od transpondera.

5.3.3 Automatsko prepoznavanje registarskih tablica

Za sustav prepoznavanja registarskih tablica korištenjem računalnog vida uobičajeno se koriste akronimi ANPR (eng. *Automatic Number Plate Recognition System*), NPR (*Number Plate Recognition*) i LPR (*License Plate Recognition*). U poglavlju 5.2.6. bili su prezentirani osnovni princip, značajke i mogućnosti videodetektora u ulozi detektora prometnog toka. Mogućnost identifikacije vozila na temelju prepoznavanja registarskih tablica pruža dodatne mogućnosti korištenja u ITS-u.

5.3.3.1 ANPR sustav

Tehnološki gledano ANPR uključuje tri bitna dijela: tehnologije za dobivanje kvalitetne slike, obradu slike (računalni vid) tj. pripadnu programsku podršku i manipulaciju podacima kako bi se omogućila uporaba informacija za razne aplikacije. Za izvedbu ANPR sustava potrebni su sljedeći elementi:

- Davač poticaja (*trigger*)
- Kamera
- Dodatno osvjetljenje
- *Frame grabber* kartica
- Računalo s programskom podrškom
- Baza podataka

Davač poticaja daje naredbu za okidanje kamere tj. hvatanje slika. Davač poticaja može biti izveden kao dodatni detektor prometnog toka. Kad se vozilo nađe u detekcijskoj zoni detektor šalje signal za hvatanje slika. Ili može biti izveden softverski tj. ista kamera ima funkciju videodetektora.

Kamere za ANPR zatvorene su u robusnim kućištima otpornim na vremenske prilike, i opremljene dodatnim sjenilom. Specifikacije kamere koje se tiču optike (leće, žarišna daljina, auto fokus) ovise o namjeravanom dometu kamere i području pokrivanja. Općenito se dometi kamera kreću od cca 4-7 m kao primjer kraćih dometa pa do 17-24 m kao primjer dužih dometa. Velik utjecaj na ukupnu točnost sustava ima pravilno postavljanje kamere u prostoru (visina postavljanja, kutovi). Brzina okidanja kamere može ovisiti o aplikaciji. Primjerice za aplikacije gdje se vozilo sporo kreće cca 20 km/h dovoljne brzine okidanja su između 5 i 10 fps (*frame per second*), za brža vozila iznad 30 km/h brzina okidanja treba biti veća 15-60 fps. Ako brzina okidanja nije dovoljna (prebrzo vozilo), dobit će zamućena slika.

Optički osjetljiv element kamere najčešće je CCD (*Charge Coupled Device*), a izvodi se tako da je osjetljiv na blisko infracrveno područje. Optika kamere sadrži optičke filtere koji propuštaju blisko infracrveno IR područje, a ograničavaju vidljivi dio spektra. Time je postignuto da je slika koju fotoosjetljivi element prima uvijek približno istih karakteristika neovisno o stvarnim uvjetima osvjetljenja (dan, noć, zasljepljenje sunčevom svjetlosti, refleksije, blještavilo farova i dr). Kvaliteti slike doprinosi i svojstvo retro-refleksije samih registarskih tablica. Što znači da se osvjetljavanjem tablice snopom IR svjetlosti, svjetlost ne rasipa već vraća u istom smjeru.

Dodatno osvjetljenje izvodi se infracrvenim (IR) osvjetljivačem, i to najčešće kao polje LED dioda koje emitiraju svjetlost u bliskom infracrvenom području (valna duljina 850 nm). Dodatna prednost je što je blisko infracrveno područje nevidljivo za ljudsko oko.

Frame grabber kartica je sučelje između kamere i računala. Elektronički uređaj koji iz analognog ili digitalnog videosignala „hvata“, sprema i prosljeđuje video okvire u digitalnom obliku prikladnom za daljnju računalnu obradu. Kod analognog signala ima ulogu i digitalizacije signala.

Računalo sa odgovarajućom programskom podrškom upravlja sustavom, izvodi programe za prepoznavanje registarskih tablica, arhiviranje podataka i slika. U bazu podataka spremaju se podaci o prepoznatim registarskim tablicama. Baza podataka također ovisno o vrsti aplikacije omogućava dodatne informacije povezane sa registarskim tablicama.

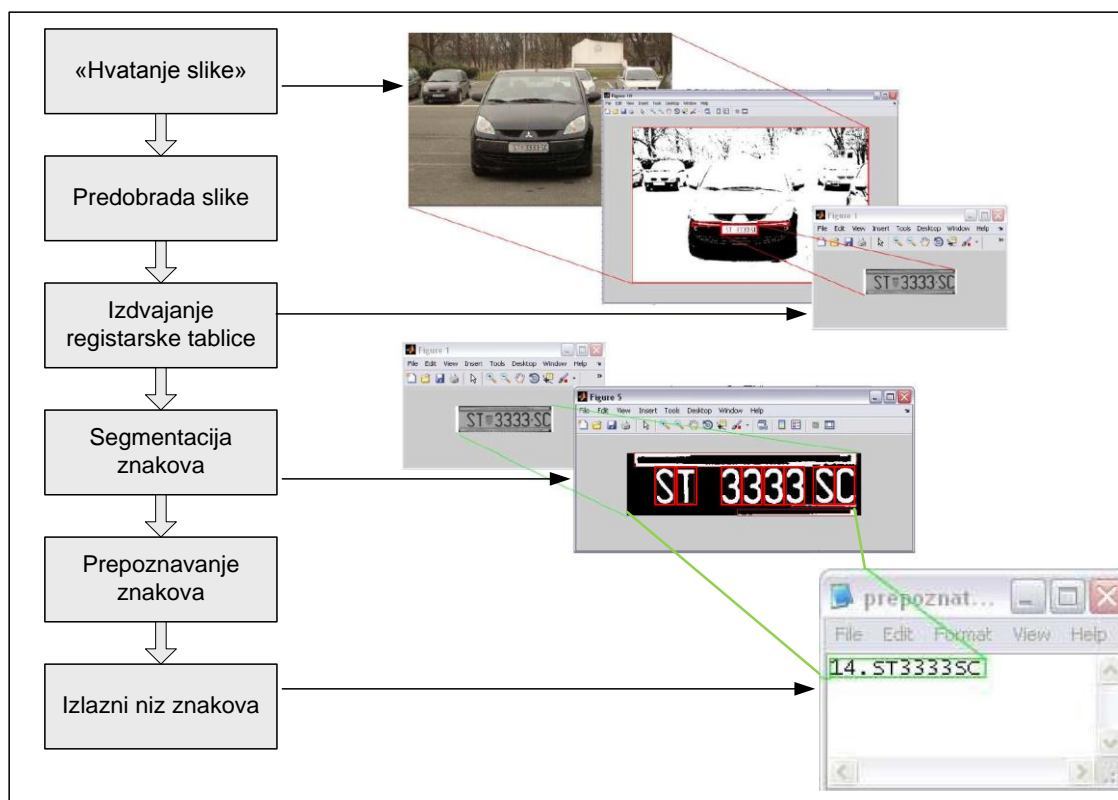
Izvedbe ANPR sustava mogu uključivati tzv. *All-in one* uređaje gdje je u jednom uređaju integrirana kamera, dodatno osvjetljenje, *frame grabber* i procesorska jedinica sa programom za prepoznavanje tablica, tako da se centralnom računalu šalju samo podaci o prepoznatoj registarskoj tablici.

5.3.3.2 Prepoznavanje registarskih tablica

Programska podrška za obradu slike „pametni“ je dio sustava i počiva na sofisticiranim algoritmima, koji se i dalje razvijaju. Načelno se proces ekstrakcije informacije o registarskoj

tablici može rastaviti na niz slijednih postupaka. Mogući slijed postupaka ANPR-a za prepoznavanje slike prikazan je Slika 5.33. Prvi korak je hvatanje slike na kojoj bi se trebala nalaziti registarska tablica. To predstavlja zahtjevan zadatak jer u realnom vremenu treba uzeti sliku vozila koje se kreće i to tako da se uhvati po mogućnosti cijelo vozilo i naravno tablica.

Predobradom slike nastoji se smanjiti utjecaj šumova, smanjiti zauzimanje memorije i ubrzati daljnje procesiranje uz zadržavanje bitnih značajki slike (sačuvati korisna informacija). Predobrada najčešće uključuje pretvorbu slike u sivu sliku (nijanse sive), a može uključivati izgladivanje slike i izoštravanje.



Slika 5.33 Prepoznavanje registarskih tablica - koraci

Izdvajanjem registarske tablice nastoji se pronaći registarska tablica na slici, odnosno treba se dobiti slika koja sadrži samo registarsku tablicu. Uključuje obradu slike i traženje registarske tablice. Prilikom obrade slike koriste se i postupci koji se kao što su binarizacija (pretvaranje slike čistu crno ili bijelo sliku), razni algoritmi detekcije rubova, Houghova transformacija (detekcija linija i drugih oblika), detekcija točki i područja koje se razlikuju po svjetlini u odnosu na okolinu (*blob detection*) i dr. Prilikom traženja registarske tablice na slici koriste se poznate značajke tablica kao što su: tablice imaju pravokutni oblik, omjer širine i visine tablice je približno poznat, tablice imaju tamne znakove na svijetloj bijeloj pozadini, tablice imaju određen udio bijele boje u odnosu na crnu, svi znakovi su približno jednake veličine. Prije slijedećeg koraka tj. segmentacije znakova potrebna je dodatna obrada u smislu normalizacije kontrasta između alfanumeričkih znakova i pozadine, normalizacije veličine tablice, ispravljanja deformacije zbog položaja tablice na slici.

Segmentacijom znakova registarska tablica rastavlja se u niz manjih područja, a u svakom bi se trebao nalaziti jedan znak. Za obavljanje ovog postupka također postoji na raspolaganju niz metoda. Najjednostavnija je utvrđivanje bijelih stupaca bez crnih točaka (piksela), koji tada predstavljaju granice između znakova. Zadnji postupak, a koji se ponavlja za svaki segmentirani znak je prepoznavanje znakova sa ciljem pretvorbe slike u edukabilni tekst primjerice ASCII kod (*American Standard Code for Information Interchange*). Za prepoznavanje znakova koriste razne metode kao što su umjetne neuronske mreže, prepoznavanje uzoraka, OCR (*Optical Character Recognition*) i dr.

5.3.3.3 Primjene ANPR-a u prometu

Komercijalni ANPR sustavi postoje i koriste se već desetke godina. Danas se ANPR koristi u nizu aplikacija:

- Rukovođenju (*management*) parkirališta
- Sankcioniranje prometnih prekršaja (prolazak kroz crveno, nepropisno parkiranje, vožnja zabranjenim trakom i dr.)
- Otkrivanje ukradenih vozila
- Naplata cestarine
- Kontrola pristupa i prolaza (granični prijelazi, štićene zone, aerodromi i dr.)

Identifikacijom vozila pomoću ANPR-a na kontrolnoj točki i reidentifikacijom na drugim kontrolnim točkama može se odrediti vrijeme putovanja. Sama obrada podataka u cilju dobivanja raspodjele vremena putovanja slična je kao i kod drugih identifikacijskih tehnologija.

Točnost ANPR sustava prema tvrdnjama proizvođača kreće se između 95% i 98% i to za registarske pločice tablice raznih formata, veličina i položaja. Treba napomenuti da su to pouzdani namjenski sustavi (npr. naplata cestarine) koji omogućavaju stvarnovremene podatke. Korištenje postojećih kamera za nadzor prometa (uz potrebnu nadogradnju) za prepoznavanje tablica, u cilju dobivanja podataka o prometnim tokovima, rezultirat će svakako u manjoj točnosti. Zbog cijene potrebne opreme, korištenje ANPR-a za dobivanje prometnih podataka ima ekonomskog smisla ako se koriste postojeći sustavi, ili nadogradnja sustava postojećih kamera za nadzor prometa. Ali postavljanje ANPR-a sa glavnim ciljem dobivanja podataka o prometnim tokovima nije ekonomski opravdano.

Literatura

(Lighthill and Whitham, 1955) (Wardrop, 1952)(Cerovac, 2001) (Gerlough, D. L., Huber, M. J., 1975) (Gerlough and Huber 1975) (National Research Council (U.S), 2010)(Akcelic, 1991)(Klein, 2001)(Taylor et al., 1996)(Županović, 2002)(Elefteriadou, 2014)(“Smjernice za prometnu svjetlosnu signalizaciju na cestama,” 2001) (Button and Hensher, 2001)(OECD and Transport, 2007)(Bucak and Zorić, 2002) (Fraden, 2010)(Sinclair, 2001)(Pallàs-Areny, 1992)(Webster, 1998)(Klein et al., 2006)(Peek Traffic, 1999)(Sun, 2000)(Skabardonis et al., 2008)(Haoui et al., 2008)(Martin et al., 2003)(Jardal, 2004)(Mimbela and Klein, 2000)(Leduc, 2008)(Drane and Rizos, 1998)(Ide et al., 2012)(Westgate et al., 2013)(Zheng and Van Zuylen, 2013)(Jenelius and Koutsopoulos, 2015)(Erdelic et al., 2015)(Vanhauwaert et al., 2012)(Goodall et al., 2012) (Trevisani and Vitaletti, n.d.)(Shem-Tov, 2015) (Chen et al., 2016)(Steenbruggen et al., 2011)(Ehmke et al., 2012) (Rechert et al., 2011)(Young, 2012)(Li et al., 2011)(Sintonen, 2012)(Weis, 2007)(Zhang and Tentzeris, 2011)(Patel et al., 2013)(Bhardwaj and Mahajan, 2015)

Akcelic, R., 1991. Travel time functions for transport planning purposes: Davidson's function, its time-dependent form and an alternative travel time function. *Aust. Road Res.* 21 49–59.

Bhardwaj, D., Mahajan, S., 2015. Review Paper on Automated Number Plate Recognition Techniques. *Int. J. Emerg. Res. Manag. & Technology* 4, 319–324.

Bucak, T., Zorić, I., 2002. Zrakoplovni instrumenti i prikaznici. *Fakultet prometnih znanosti*.

Button, K.J., Hensher, D.A. (Eds.), 2001. *Handbook of Transport Systems and Traffic Control*. Emerald Group Publishing Limited.

Cerovac, V., 2001. *Tehnika i sigurnost prometa*. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb.

Chen, C., Ma, J., Susilo, Y., Liu, Y., Wang, M., 2016. The promises of big data and small data for travel behavior (aka human mobility) analysis. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 68, 285–299.

Drane, C.R., Rizos, C., 1998. *Positioning systems in intelligent transportation systems*, Artech House ITS series. Artech House.

Ehmke, J.F., Meisel, S., Mattfeld, D.C., 2012. Floating car based travel times for city logistics. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 21, 338–352.

Elefteriadou, L., 2014. *An Introduction to Traffic Flow Theory*, Springer Optimization and Its Applications. Springer New York, New York, NY.

Erdelic, T., Vrbancic, S., Rozic, L., 2015. A model of speed profiles for urban road networks using G-means clustering, in: *2015 38th International Convention MIPRO*, pp. 1081–1086.

Fraden, J., 2010. *Handbook of Modern Sensors*. Springer New York, New York, NY.

Gerlough, D. L., Huber, M. J., 1975. *Traffic Flow Theory: A Monograph*. Transportation Research Board, Washington.

Goodall, N., Smith, B.L., Park, B. (Brian), 2012. Microscopic Estimation of Freeway Vehicle Positions Using Mobile Sensors, in: *TRB 91st Annual Meeting*.

Haoui, A., Kavalier, R., Varaiya, P., 2008. Wireless magnetic sensors for traffic surveillance. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 16, 294–306.

- Ide, C., Niehoefer, B., Knaup, T., Weber, D., Wietfeld, C., Habel, L., Schreckenberg, M., 2012. Efficient Floating Car Data Transmission via LTE for Travel Time Estimation of Vehicles, in: 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). IEEE, Quebec, pp. 1–5.
- Jardal, J., 2004. Development of Simulation Tool for Automotive Radar Applications. Linköping University.
- Jenelius, E., Koutsopoulos, H.N., 2015. Probe vehicle data sampled by time or space: Consistent travel time allocation and estimation. *Transp. Res. Part B Methodol.* 71, 120–137.
- Klein, L.A., 2001. Sensor technologies and data requirements for ITS. Artech House.
- Klein, L.A., Mills, M.K., Gibson, D.R.P., 2006. Traffic Detector Handbook: Third Edition - Volume II.
- Leduc, G., 2008. Road Traffic Data: Collection Methods and Applications -. JRC Tech. Notes.
- Li, J., Van Zuylen, H., Liu, C., Lu, S., 2011. Monitoring travel times in an urban network using video, GPS and Bluetooth. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 20, 630–637.
- Lighthill, M.J., Whitham, G.B., 1955. On Kinematic Waves. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 229, 317–345.
- Martin, P.T., Feng, Y., Wang, X., 2003. Detector Technology Evaluation. North Dakota State University
- Mimbela, L.E.Y., Klein, L.A., 2000. Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems. The Vehicle Detector Clearinghouse
- National Research Council (U.S), 2010. HCM 2010 : Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- OECD, Transport, E.C. of M. of, 2007. Managing Urban Traffic Congestion. OECD Publishing.
- Pallàs-Areny, R., 1992. Sensors and Signal Conditioning. Wiley.
- Patel, C., Shah, D., Patel, A., 2013. Automatic Number Plate Recognition System (ANPR): A Survey. *Int. J. Comput. Appl.* 69, 21–33.
- Peek Traffic, 1999. System Installation Guide - Peek Sensors.
- Rechert, K., Meier, K., Greschbach, B., Wehrle, D., von Suchodoletz, D., 2011. Assessing Location Privacy in Mobile Communication Networks. *Inf. Secur.* 7001, 309–324.
- Shem-Tov, S.B. & I.B., 2015. Investigation of travel patterns using passive cellular phone data. *J. Locat. Based Serv.* Taylor Fr. Online.
- Sinclair, I.R., 2001. Sensors and transducers. Newnes.
- Sintonen, H., 2012. Bluetooth Based Travel Time Estimation. Finnish Transport Agency, Liikennevirasto
- Skabardonis, A., Varaiya, P.P., Petty, K., 2008. Measuring Recurrent and Non-recurrent Traffic Congestion. Univ. Calif. Transp. Cent.
- Ministarstvo pomorstva, prometa i veza, Hrvatske ceste, 2001. Smjernice za prometnu

- svjetlosnu signalizaciju na cestama,
- Steenbruggen, J., Borzacchiello, M.T., Nijkamp, P., Scholten, H., 2011. Mobile phone data from GSM networks for traffic parameter and urban spatial pattern assessment: a review of applications and opportunities. *GeoJournal* 78, 223–243.
- Sun, C., 2000. An Investigation in the Use of Inductive Loop Signatures for Vehicle Classification, PATH Research Report.
- Taylor, M.A.P. (Michael A.P., Bonsall, P.W. (Peter W., Young, W. (William), 1996. Understanding traffic systems : data, analysis, and presentation. Avebury Technical.
- Trevisani, E., Vitaletti, A., 2004. Cell-ID Location Technique, Limits and Benefits: An Experimental Study, in: Sixth IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. IEEE, pp. 51–60.
- Vanhauwaert, E., Vandenberghe, W., Demeester, P., Moerman, I., Verbrugge, S., 2012. Feasibility of expanding traffic monitoring systems with floating car data technology. *IET Intell. Transp. Syst.* 6, 347–354.
- Wardrop, J.G., 1952. Some theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proc. Institution Civ. Eng.* 1, 325–362.
- Webster, J.G., 1998. The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, Electrical Engineering Handbook. Taylor & Francis.
- Weis, S.A., 2007. RFID (Radio Frequency Identification): Principles and Applications, in: Bidgoli, H. (Ed.), Handbook of Computer Networks. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, pp. 974–984.
- Westgate, B.S., Woodard, D.B., Matteson, D.S., Henderson, S.G., 2013. Travel time estimation for ambulances using Bayesian data augmentation. *Ann. Appl. Stat.* 7, 1139–1161.
- Young, S.E., 2012. Bluetooth Traffic Detectors for Use as Permanently Installed Travel Time Instrument, State Highway Administration Research Report Project number SP909B4D.
- Zhang, X., Tentzeris, M., 2011. Applications of Fast-Moving RFID Tags in High-speed Railway Systems. *Int. J. Eng. Bus. Manag.* 3., 27–31.
- Zheng, F., Van Zuylen, H., 2013. Urban link travel time estimation based on sparse probe vehicle data. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 31, 145–157.
- Županović, I., 2002. Tehnologija cestovnog prijevoza. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb.