

**UNIVERZITET U BEOGRADU**  
**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Dejan S. Misović**

**INTELIGENTNI SISTEM ZA UPRAVLJANJE  
SAOBRAĆAJEM BAZIRAN NA PRIMENI  
FAZI LOGIKE**

**doktorska disertacija**

**Beograd, 2019.**

**UNIVERSITY OF BELGRADE**  
**SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING**

**Dejan S. Misović**

**INTELLIGENT SYSTEM FOR TRAFFIC  
MANAGEMENT BASED ON THE  
APPLICATION OF FUZZY LOGIC**

**Doctoral Dissertation**

**Belgrade, 2019**

**Mentor:**

dr Željko Đurović, redovni profesor  
Katedra za signale i sisteme,  
Elektrotehnički fakultet,  
Univerzitet u Beogradu

**Članovi komisije:**

dr Aleksandar Rakić, vanredni profesor  
Katedra za signale i sisteme,  
Elektrotehnički fakultet,  
Univerzitet u Beogradu

dr Saša Milić, viši naučni saradnik  
Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd

dr Milica Kalić, redovni profesor  
Saobraćajni fakultet,  
Univerzitet u Beogradu

dr Goran Kvaščev, vanredni profesor  
Katedra za signale i sisteme,  
Elektrotehnički fakultet,  
Univerzitet u Beogradu

Datum odbrane:

---

## *Izjave zahvalnosti*

Želim najiskrenije da se zahvalim svom mentoru, prof. dr Željku Đuroviću na kontinuiranom učestvovanju, dragocenim savetima i podršci tokom izrade doktorske disertacije.

Posebno se zahvaljujem dr Saši Miliću, na usmeravanju i podsticaju kako pre upisivanja doktorskih studija, tako i nakon upisivanja istih. Njegovi predlozi i zapažanja su u dobroj meri doprineli da ova disertacija bude napisana u ovakvom obliku.

Želeo bih da napomenem da bez razumevanja i ogromnog strpljenja članova porodice ova disertacija verovatno nikada ne bi bila napisana.



*Ђеркама Неви и Лени, сину Душану и супрузи Јадранки*

# INTELIGENTNI SISTEM ZA UPRAVLJANJE SAOBRAĆAJEM BAZIRAN NA PRIMENI FAZI LOGIKE

## Rezime

Saobraćaj je nesumnjivo jedna od najstarijih oblasti razvoja ljudskog društva. Pored toga što je saobraćaj jedna od najstarijih oblasti, on je i jedna od tehnoloških oblasti koje se ubrzano razvijaju. Posledice razvojne ekspanzije saobraćaja su porast broja saobraćajnih sredstava, saobraćajnih puteva, gustine saobraćajnog protoka i td. Saobraćaj je privredna grana u kojoj je većina procesa stohastičke prirode. Čovek je odavnina pokušavao da, uvođenjem pisanih ili nepisanih pravila ponašanja, a kasnije i zakona, uredi ponašanje svih učesnika u saobraćaju, kako bi njegovu stihijsku i nepredvidivu prirodu uredio i ukrotio. Međutim, bez obzira na to, subjektivna procena, ekspertska odluka, nedostatak vremena ili informacija, nedostatak iskustva ili brzopletost, neprilagođenost ponašanja i dalje ostaju značajni elementi u svakodnevnoj praksi koja se sreće u saobraćaju. Stoga se fazi logika čini izuzetno zahvalnom metodologijom koja može biti iskorišćena za projektovanje inteligentnih sistema sa ciljem regulisanja ili povećanja bezbednosti ili efikasnosti saobraćajnih procesa. U ovoj disertaciji su prikazana dva takva sistema od kojih je jedan vezan za rečni saobraćaj, konkretno regulisanje rada brodskih prevodnica, a drugi za izbegavanje konfliktnih situacija u drumskom saobraćaju. Detaljno je opisan algoritam za detekciju plovila koji se koristi u daljinskom on-line nadzornom sistemu za lasersko praćenje rečnog saobraćaja u brodskoj prevodnici. Ovaj sistem obezbeđuje striktno otkrivanje položaja broda kako bi se sprečilo manipulisanje vratima brodske prevodnice dok je plovilo u zoni vrata. Implementirani algoritam vrši detekciju plovila u vidnom polju laserskih skenera. Algoritam detekcije je razvijen u modularnom obliku i sadrži brojne funkcionalne delove zasnovane na prepoznavanju oblika: deo za prepoznavanje smetnji, deo za prepoznavanje površine vode sa plutajućom prljavštinom, deo za prepoznavanje smetnji prouzrokovanih preletom jedne ptice ili jata ptica, deo za prepoznavanje smetnji prouzrokovanih meteorološkim uslovima, deo za prepoznavanje visokih talasa i deo za prepoznavanje plovila. U cilju validacije valjanosti izabranih parametara i njihove eventualne korekcije na osnovu validacionih rezultata, prikazani su fazi-logički sistemi koji su predviđeni da vrše validaciju prepoznatog plovila, validaciju prepoznatog objekta tipa „plutajuća horizontalna linija“ i validaciju prepoznatog objekta tipa „krug“. Pored validacionih fazi-logičkih sistema prikazan je i fazi-logički kontroler koji upravlja svim fazama pokretanja, zaustavljanja i zatvaranja (gornjih i donjih) vrata brodske prevodnice i upravlja punjenjem/praznjenjem komore brodske prevodnice. Ovaj kontroler je projektovan sa ciljem uvođenja zaštitnih sigurnosnih uslova pri zadavanju komandi kako operator ne bi mogao da zada pogrešnu komandu. Drumski saobraćaj je najstariji i najmasovniji, kako sa aspekta prevoza robe, tako i putnika. Sa aspekta uredenosti, drumski saobraćaj predstavlja najzahtevniju saobraćajnu granu. Iz tog razloga, regulisanje i upravljanje procesima u okviru drumskog saobraćaja nameće se kao neminovnost. U cilju povećanja uredenosti drumskog saobraćaja ova disertacija se bavi problematikom izbegavanje konfliktnih situacija na saobraćajnim lokacijama bez svetlosne signalizacije tipa raskrsnica i kružni tok. Prikazan je inteligentni sistem za izbegavanje konfliktnih situacija u saobraćaju čijom primenom se prvenstveno ostvaruje veća bezbednost učesnika, a posledično smanjuju zastoji izazvani sudarima i time povećala prohodnost saobraćajnih lokacija. Ovaj sistem je zamišljen kao dopuna postojećem sistemu čija je

prvenstvena uloga u upravljanju saobraćajem u cilju povećanja saobraćajnog protoka u okviru saobraćajnih sinhronizacionih zona (grupa usklađenih raskrsnica sa svetlosnom signalizacijom). S obzirom na činjenicu da su saobraćajni procesi dosta složeni i da zavise od mnoštva faktora koji se ponašaju kao slučajne veličine, saobraćajne procese je dosta teško prikazati egzaktnim modelima. Imajući to u vidu i uvažavajući činjenicu da su fazi-skupovi i fazi-logika alat koji dobro operiše sa neodređenostima, kao jezgro sistema za izbegavanje konfliktnih situacija izabrani su fazi-ekspertski sistem bazirani na tip-1 i tip-2 fazi-skupovima. Opisan je tip-2 fazi-logički sistem koji služi za određivanje veličine *sposobnost reagovanja vozila* kojom se definiše trenutna sposobnost vozila da adekvatno reaguje na eventualne kritične situacije. U formiranju veličine *sposobnost reagovanja vozila* uključeni su mnogi faktori poput ambijentalnih uslova (temperatura, prisustvo padavina i trenutna vidljivost), faktori vezani za sposobnost vozača (godište i refleks vozača) i faktori vezani za sposobnost vozila (stanje pneumatika i stanje kočionog sistema). Opisan je i tip-1 fazi-logički sistem koji određuje *nivo opasnosti* kretanja vozila u odnosu na pojedinačnu konfliktnu zonu. Ovaj fazi-logički sistem, pored veličine *sposobnost reagovanja vozila*, koristi još dve fazi-lingvističke promenljive *brzina vozila* i *rastojanje od konflikta*. Na osnovu svih vrednosti nivoa opasnosti kretanja vozila, definisanih u odnosu na pojedinaču konfliktnu zonu, formira se veličina *ukupan nivo opasnosti* kretanja vozila. Vrednost ukupnog nivoa opasnosti se koristi za formiranje obaveštenja vozilima pomoću kojih se teži izbegavanju konfliktnih situacija. Pored fazi-ekspertskeg sistema, kao centralnog dela ove disertacije, opisan je i celokupan koncept i ostali elementi inteligentnog sistema za izbegavanje konfliktnih situacija u saobraćaju. Definisani su pojam saobraćajne lokacije i njeni elementi (look-up tabela putanje, konfliktne tačke putanje, konfliktne zone dva vozila i td). Definisani su kritični vremenski intervali, algoritam procene verovatnoće sudara dva vozila i određivanje preporučene brzine kretanja vozila prilikom ulaska u saobraćajnu lokaciju. Za potrebe verifikacije rada sistema razvijen je simulacioni model saobraćajne lokacije. Prikazana su dva tipa generisanja vozila pseudo-slučajnim generatorom i unapred definisanom sekvencom. Prikazan je algoritam usporavanja vozila, algoritam detektovanja konflikta i izbegnutog konflikta. Prikazom rezultata simulacija pokazano je da inteligentni sistem, razmatran u ovoj disertaciji, uspešno ostvaruje izbegavanje konfliktnih situacija. Posmatranjem eksperimentalnih rezultata dobijenih analizom realne situacije na kružnom toku snimljene WEB kamerom pokazano je da formirana veličina *ukupan nivo opasnosti* predstavlja dobar indikator na osnovu koga podsistem za obaveštavanje može da generiše valjane poruke.

**Ključne reči:** algoritam detekcije, prepoznavanje oblika, izbegavanje konfliktnih situacija, inteligentni sistem, fazi-ekspertski sistem, konfliktna zona, simulacioni model.

**Naučna oblast:** Elektrotehnika i računarstvo

**Uža naučna oblast:** Upravljanje sistemima i obrada signala

**UDK broj:** 621.3

# INTELLIGENT SYSTEM FOR TRAFFIC MANAGEMENT BASED ON THE APPLICATION OF FUZZY LOGIC

## Abstract

Traffic is undoubtedly one of the oldest areas of human society development. In addition to that, traffic is one of the technological areas that are developing rapidly. The consequences of the expansion of traffic areas increase in the number of traffic means, traffic routes, traffic flows and so on. Traffic is an economic branch in which almost all processes are stochastic in nature. Man was trying to regulate the behavior of all traffic participants by introducing written or unwritten rules of conduct, and later laws, in order to edit and tame his natural and unpredictable nature. However, regardless, subjective assessment, expert judgment, lack of time or information, lack of experience or hastyness, misconduct behavior remains important elements in everyday practice encountered in traffic. Therefore, the fuzzy logic seems to be an extremely grateful methodology that can be used for designing intelligent systems with the aim of regulating or increasing the safety or efficiency of traffic processes. In this thesis, two such systems are presented, one of which is related to river traffic, specifically the regulation of the operation of ship lock, and the other for the avoidance of conflict situations in road traffic. This dissertation describes the vessel detection algorithm used in the on-line laser monitoring system in the ship lock. The system ensures strict detection of the ship's position in order to prevent manipulation of the ship's lock doors while the vessel is in the door zone. The implemented algorithm performs detection of vessels in the field of laser scanner. The detection algorithm is developed in a modular form and contains a number of functional parts based on shape recognition: a part for detecting interference, a part for identifying the water surface with floating dirt, a part for detecting interference caused by a bird flock or bird flock, parts for detecting interference caused by meteorological conditions, works for identifying high waves and identifying vessels. In order to validate the validity of the selected parameters and their possible corrections based on the validation results, the fuzzy-logical systems that are designed to validate the recognized vessel, the validation of the recognized object type "floating horizontal line" and the validation of the recognized object type "circle" are shown. In addition to the validation fuzzy-logical systems, a fuzzy-logic controller which manages all stages of starting, stopping and closing the (upper and lower) doors of the ship's lock, also controls the filling/discharging of the chamber. This controller has been designed to introduce security control functions so that the operator can not set the wrong command. Road traffic is the oldest and most massive, both from the aspect of transportation of goods, as well as passengers. From the aspect of regulation, road traffic represents the most demanding traffic branch. For this reason, the regulation and management of road traffic processes imposes itself as inevitability. In order to increase the regulation of road traffic, this dissertation deals with the problem of avoiding conflict situations at traffic locations without light signaling of intersection and roundabout type. An intelligent system for avoiding conflict situations in traffic is presented, with the application of which primarily enhances the safety of participants, and consequently reduces congestion caused by crashes, thereby increasing the passage of traffic locations. This system is conceived as a complement to the existing system whose primary role is in traffic management in order to increase the traffic flow within traffic synchronization zones (group of harmonized intersections with light signalization). Given the fact that traffic processes are rather complex and dependent on a variety of factors that act as

random variables, it is difficult to present traffic processes with exact models. With this in mind, and taking into account the fact that fuzzy-sets and fuzzy-logic tools work well with uncertainties, as the core of the system for avoiding conflict situations, the fuzzy-expert system based on type-1 and type-2 fuzzy-sets is selected. A type-2 fuzzy-logic system is described that serves to determine the value of the *vehicle's ability to react*, which defines the current ability of the vehicle to respond adequately to possible critical situations. The *vehicle's ability to react*, involves many factors such as ambient conditions (temperature, presence of precipitation and instant visibility), factors related to the driver's ability (driver's age and reflex) and vehicle-related factors (tire condition and condition of the braking system). The type-1 fuzzy-logical system is also described, which determines the *level of danger* of vehicle movement relative to the individual conflict zone. This fuzzy-logic system, in addition to the value of the *vehicle's ability to react*, uses two additional fuzzy-linguistic variable *vehicle speeds* and a *distance from the conflict*. Based on these calculations, the value called the *total level of danger* of vehicle movement is formed. The value *total level of danger* is used to generate vehicle notifications that try to avoid conflict situations. In addition to the fuzzy-expert system, as the central part of this dissertation, the entire concept and other elements of the intelligent system for avoiding conflict situations in traffic are described. The concept of a traffic location and its elements (path's look-up path table, path's conflicting points, conflict zones of two vehicles, etc.) is defined. Critical time intervals, algorithm for estimating collision probability of two vehicles and determining the recommended speed of vehicle movement when entering the traffic location are defined. A simulation model of a traffic location has been developed for the purpose of verifying the operation of the system. Two types of vehicle generation are presented by a pseudo-random generator and a predefined sequence. The vehicle deceleration algorithm, conflict detection algorithm and escaped conflict are presented. By showing the results of the simulation, it has been shown that the intelligent system, considered in this dissertation, successfully achieves the avoidance of conflict situations. By observing the experimental results obtained by analyzing the real situation on the roundabout recorded by the WEB camera, it was shown that the formed value, *total level of danger*, is a good indicator on the basis of which notification subsystem can generate valid messages.

**Keywords:** detection algorithm, pattern recognition, avoiding conflict situations, intelligent system, fuzzy-expert system, conflict zone, simulation model.

**Scientific area:** Electrical and Computer Engineering

**Specific scientific area:** System control and Signal Processing

**UDC number:** 621.3

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. ULOGA INTELIGENTNIH SISTEMA U IZBEGAVANJU KONFLIKTNIH SITUACIJA U SAOBRAĆAJU.....	6
2.1. VAZDUŠNI SAOBRAĆAJ.....	8
2.2. VODENI SAOBRAĆAJ.....	16
2.3. ŽELEZNIČKI SAOBRAĆAJ.....	19
2.4. DRUMSKI SAOBRAĆAJ .....	22
2.4.1. <i>Određivanje pozicije i brzine vozila</i> .....	45
2.4.1.1. Primena induktivnih petlji ili magnetno rezistivnih senzora.....	45
2.4.1.2. Primena 2D laserskih skenera .....	47
2.4.1.3. Obrada video signala.....	48
3. FAZI EKSPERTSKI SISTEMI.....	50
3.1. FAZI SKUPOVI .....	51
3.1.1. <i>Osnovne operacije</i> .....	54
3.1.2. <i>Tip-m fazi skupovi</i> .....	56
3.2. FAZI RELACIJE.....	57
3.3. LINGVISTIČKE PROMENLJIVE .....	58
3.4. FAZI-LOGIČKI SISTEMI.....	60
3.4.1. <i>Tip-1 fazi-logički sistemi (T1-FLS)</i> .....	60
3.4.1.1. Ulazni i izlazni vektor .....	61
3.4.1.2. Fazifikator .....	63
3.4.1.3. Baza fazi pravila.....	63
3.4.1.4. Mašina za odlučivanje.....	64
3.4.1.5. Defazifikator .....	73
3.4.2. <i>Tip-2 fazi-logički sistemi (T2-FLS)</i> .....	75
3.4.2.1. Fazifikator .....	79
3.4.2.2. Baza fazi pravila.....	80
3.4.2.3. Mašina za odlučivanje.....	80
3.4.2.4. Reduktor tipa.....	81
3.4.2.5. Defazifikator .....	82
4. INTELIGENTNI SISTEM ZA IZBEGAVANJE KONFLIKTNIH SITUACIJA U SAOBRAĆAJU.....	83
4.1. STRUKTURA INTELIGENTNOG SISTEMA ZA IZBEGAVANJE KONFLIKTNIH SITUACIJA .....	85
4.1.1. <i>Saobraćajna lokacija</i> .....	86
4.1.1.1. Look-Up tabela putanje.....	87
4.1.1.2. Konfliktne tačke putanje .....	88

4.1.1.3. Konfliktne zone dva vozila .....	89
4.1.2. Centralni kontroler.....	90
4.1.2.1. Proračun kritičnog vremenskog intervala.....	91
4.1.2.2. Procena verovatnoće sudara dva vozila.....	92
4.1.2.3. Određivanje preporučene brzine za izbegavanje konflikata.....	93
4.1.2.4. Korigovanje brzine vozila u ulaznoj deonici.....	95
4.1.2.5. Realizacija.....	96
4.1.3. Senzorski podsistem.....	97
4.1.3.1. Određivanje pozicije i brzine vozila.....	98
4.1.3.2. Određivanje stanja ambijenta.....	99
4.1.4. Podsistem za obaveštavanje .....	101
4.2. FAZI-EKSPERTSKI SISTEM ZA ODREĐIVANJE SPOSOBNOSTI REAGOVANJA VOZILA (SRV) .....	102
4.2.1. Određivanje stanja ambijenta (SA) .....	105
4.2.2. Određivanje sposobnosti vozača (SV) .....	107
4.2.3. Određivanje sposobnosti vozila (SVozila).....	108
4.3. FAZI-EKSPERTSKI SISTEM ZA ODREĐIVANJE UKUPNOG NIVOA OPASNOSTI KRETANJA VOZILA (TDL).....	109
4.3.1. Nivo opasnosti (DL) .....	110
4.3.2. Trenutna brzina (CS).....	111
4.3.3. Rastojanje do konflikta (DTC).....	111
4.3.4. Analiza osetljivosti.....	113
4.3.5. Upotreba TDL .....	116
5. SIMULACIONI MODEL SAOBRAĆAJNE LOKACIJE.....	118
5.1. ELEMENTI MODELA .....	118
5.1.1. Generisanje vozila .....	118
5.1.2. Usporavanje vozila.....	119
5.1.3. Poligon .....	121
5.1.4. Položaj vozila .....	122
5.1.5. Konflikt i izbegnuti konflikt.....	123
5.2. SIMULACIONA APLIKACIJA .....	124
5.3. REZULTATI SIMULACIJA .....	129
5.3.1. Srednja brzina vozila u ulaznoj deonici .....	129
5.3.1.1. Raskrsnica .....	129
5.3.1.2. Kružni tok.....	134
5.3.2. Korigovanje brzine vozila u ulaznoj deonici .....	139
5.3.2.1. Raskrsnica .....	139
5.3.2.2. Kružni tok.....	146
5.3.3. Uticaj vrednosti SRV .....	153
5.3.3.1. Raskrsnica .....	153
5.3.3.2. Kružni tok.....	157
5.3.4. Izbegnuti konflikt .....	162
5.3.5. Zagušena saobraćajna lokacija.....	165

5.4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI .....	166
6. INTELIGENTNI SISTEM ZA UPRAVLJANJE SAOBRAĆAJEM BRODSKE PREVODNICE .....	173
6.1. UVOD .....	174
6.2. PREGLED LASERSKIH I VIZUELNIH SISTEMA .....	176
6.3. KONCEPT MONITORING SISTEMA.....	177
6.3.1.1. Tehničko rešenje upravljanja vratima brodske prevodnice .....	179
6.4. PROCESIRANJE PRIMLJENIH PODATAKA .....	181
6.4.1. Strategija proračuna RSSI signala .....	183
6.4.2. Filteriranje globalnog polja (GF) .....	184
6.4.3. Startno polje za odlučivanje (SDF) .....	185
6.5. DETEKCIONI ALGORITAM PLOVILA.....	186
6.5.1. Strategija donošenja odluka .....	186
6.5.2. Detekcija oblika tipa "krug" i oblika tipa "plutajuća horizontalna linija" .	187
6.5.2.1. Detekcija objekta tipa "krug" .....	189
6.5.2.2. Detekcija objekta tipa "plutajuća horizontalna linija" (FHL) .....	190
6.6. REZULTATI .....	193
6.6.1. Detekcija plovila.....	194
6.6.2. Detekcija dozvoljenih oblika koji ne utiču na rad vrata brodske prevodnice	195
6.7. UNAPREĐENJE SISTEMA PRIMENOM FAZI-LOGIKE .....	197
6.7.1. Fazi-logički sistem za validaciju prepoznatog plovila .....	197
6.7.2. Fazi-logički sistem za validaciju prepoznatog objekta tipa FHL.....	200
6.7.3. Fazi-logički sistem za validaciju prepoznatog objekta tipa „krug“ .....	203
6.7.4. Fazi-logički kontroler za upravljanje vratima brodske prevodnice .....	204
7. ZAKLJUČAK .....	207
8. LITERATURA .....	210



## 1. UVOD

Saobraćaj je nesumnjivo najstarija grana na drvetu razvoja ljudskog društva. Počev od potraga za plodnim zemljištem, preko migracija uslovljenih ratovima i prirodnim katastrofama, pa do današnjih putovanja na udaljene turističke destinacije, saobraćaj je, kroz sve epohe, svoju jedinstvenu ulogu samo unapređivao i razvijao. Ako se prethodno rečenom dodaju težnje modernog čoveka da približi različite kulture udaljenih lokacija na Zemlji, ali i da osvoja svemir, onda je saobraćaj nesumnjivo jedna od tehnoloških grana koja se najbrže razvija.

Saobraćaj je industrijska grana koja se paralelno razvija sa nekoliko drugih grana i vrlo često je ona pokazatelj njihove razvijenosti. Tipičan primer za rečeno su vojna industrija, industrija proizvoda široke potrošnje, energetski sektor, svemirska istraživanja i dr.

Mnoge naučne i istraživačke oblasti su direktno ili indirektno povezane sa saobraćajem [1]. Nezahvalno je te oblasti nabrajati prema značaju ili prioritetu, ali se sa sigurnošću mogu navesti neke nove multidisciplinarnе oblasti koje su od nedavno prisutne, kako u procesima merenja i sakupljanja podataka, tako u procesima njihove obrade zaključaka sa skoro zajedničkim, odnosno jedinstvenim ciljevima pravilnog upravljanja, kontrole i donošenja ispravnih i blagovremenih zaključaka: Asset Management (AM), Project Management (PM), Risk Management (RM), Risk Analysis, Risk Assessment, Operational Excellence, Life Cycle Management i td.

Posledice razvojne ekspanzije saobraćaju su porast broja saobraćajnih sredstava, saobraćajnih puteva i gustine saobraćajnog protoka. Naravno da su posledice daleko složenije od prethodno navedenog. Ako se u obzir uzmu socijalni i ekonomski aspekti, onda se može govoriti o raznim društvenim fenomenima, kao što su broj zaposlenih radnika, turističke sezone, berze nafte i gasa, uloga osiguravajućih društava i dr.

Drumski saobraćaj je najstariji i najmasovniji, kako sa aspekta prevoza robe, tako i putnika. Sa aspekta uređenosti, drumski saobraćaj predstavlja najzahtevniju saobraćajnu granu.

S obzirom na složenost saobraćajne problematike i njen društveni značaj, ova disertacija je pokušala da ostane u jednom uskom okviru koji se odnosi na dve karakteristične problematike u procesu regulisanja saobraćaja. Disertacija pruža svoj doprinos praćenju, upravljanju i kontroli drumskog i rečnog saobraćaja u cilju izbegavanja konfliktnih situacija. Detaljno su prikazana dva takva sistema od kojih je jedan vezan za rečni saobraćaj, konkretno regulisanje rada brodskih prevodnica, a drugi za izbegavanje konfliktnih situacija u drumskom saobraćaju.

Dominantne oblasti od interesa za ovu disertaciju su izbegavanje konfliktnih situacija u saobraćaju sa akcentima na praćenje pozicije plovnog objekta u zoni vrata brodske prevodnice i regulaciju drumskog saobraćaja na raskrscima. Razvoj inteligentnih sistema za automatsko izbegavanje konfliktnih situacija se razvija uporedo sa razvojem nekoliko grana tehnike i nauke. Dobar primer za rečeno je razvoj pametnih vozila bez vozača koja su u stanju da reše veliki broj nepredviđenih situacija pomoću, sa jedne strane programskih rešenja i modernih algoritama upravljanja, a sa druge strane pomoću sofisticiranih hardverskih rešenja, upravljačkih elektronskih sklopova modernih "pametnih" senzora. Ne treba smetnuti sa uma da na upravljanje jednog takvog vozila utiče i veliki broj telekomunikacionih i mernih sistema koji se nalaze, kako u samom vozilu, tako i van njega, bez kojih ovo vozilo ne bi bilo u stanju da obavlja sve predviđene funkcije (GPS - Global Positioning System, pomoćni merni uređaji i sistemi za daljinski nadzor i sl.). Kada se ova tematika suzi na problem više vozila na velikim raskrscima sa velikom gustinom saobraćaja, stiče se prava slika o složenosti i dimenzijama problematike kojom se disertacija bavi.

Tehničke sisteme, koji su razvijeni da samostalno donose odluke, prepoznaju potencijalne konfliktnе situacije i vrše automatsku kontrolu i upravljanje složenim tehnološkim procesima, često nazivamo inteligentnim sistemima (IS). U disertaciji ćemo ovaj pojam usvojiti kao odgovarajući za većinu složenih sistema koji su razvijeni i implementirani sa ciljem da vrše automatsku regulaciju i kontrolu saobraćaja.

U današnje vreme nije jednostavno definisati opšti pristup u istraživanju ove oblasti s obzirom kako na kompleksnost i raznovrsnost saobraćaja sa jedne strane, tako i zbog velike raznovrsnosti i složenosti primenjenih mernih algoritama, detekcionih algoritama, algoritama prepoznavanja, načina nadgledanja (monitoringa) i td. Zbog toga, inteligentne sisteme za upravljanje saobraćajem možemo, ili bolje rečeno, treba podeliti prema: vrsti saobraćaja, vrsti korišćenih senzora, mestu postavljanja senzora, načinu komunikacije, primenjenim detekcionim algoritmima, primenjenim algoritmima obrade podataka, primenjenim algoritmima odlučivanja (ekspertize), načinu obaveštavanja, načinu reagovanja u konfliktnim situacijama i td.

Kada se saobraćajna problematika suzi na drumski saobraćaj, onda se može govoriti o sledećim problemima koji su direktno ili indirektno povezani sa upravljanjem u saobraćaju: saobraćajne gužve, organizacija javnog prevoza, saobraćajni zastoji i zakrčenje, alternativni saobraćajni pravci, projektovanje putnih ruta, GPS navigacija i td.

Oblast regulacije saobraćaja je jedna velika složena, kako tehnička, tako i naučna oblast, kojom se danas bavi veliki broj inženjera i naučnika iz različitih oblasti. Saobraćajni inženjeri imaju ulogu da opišu saobraćajne fenomene i da definišu tehničke zahteve na osnovu kojih potom veliki broj inžinjera iz nekoliko tehničkih oblasti (elektronike, automatike, programiranja i dr.) razvija inteligentne tehničke sisteme koji treba da budu u stanju da samostalno (bez operatera) vrše regulaciju saobraćaja u cilju podizanja njegove efikasnosti, pouzdanosti i sigurnosti. Izbegavanje konfliktnih situacija je zajednički imenitelj razvoja svih ovih sistema i on je podjednako važan za sve vrste saobraćaja. Često se iskustva i rešenja ovakvih sistema iz jedne saobraćajne grane uspešno koriste i uz neke modifikacije primenjuju u drugoj grani.

Kroz celokupan razvoj ljudskog društva stalna težnja čoveka je bila da pomeri granice svog saznanja kako bi što bolje upoznao svet u kome živi. U velikoj meri ta saznanja koristio je za olakšavanje svakodnevnog života praveći naprave i mašine koje su zamenjivale svakodnevni ljudski rad. Vremenom je čovek uvideo da za složenije poslove je potrebno da automati i mašine imaju određene karakteristike ljudskog ponašanja. Tako je čovek počeo u automate i mašine da ubacuje elemente inteligentnog rasuđivanja, tj. veštačku inteligenciju [2]. Osnovna uloga veštačke inteligencije je da kreira ekspertske sisteme (ES) i da implementira inteligentno ljudsko ponašanje u automate i mašine. ES predstavljaju istaknutu oblast primene veštačke inteligencije i realizuju se u obliku kompjuterskih aplikacija razvijenim sa ciljem rešavanja složenih problema u određenoj oblasti zasnovanih na posebnoj (ekspertske) vrsti ljudske inteligencije i stručnosti [3].

Pored ostalih algoritama i metoda izračunavanja, primena ES omogućava sistemima da vrše proračune, donose zaključke, prepoznaju odnose i analogije, uče iz iskustva, uzimaju i smeštaju vrednosti (podatke, parametre, merenja, zaključke i td.) u memorijska skladišta, rešavaju probleme, shvataju složene ideje, koriste tačno prirodan jezik, klasifikuju (objekte, situacije i td.), generalizuju, prilagođavaju novonastalim situacijama i td. Ovakvi sistemi se podrazumevaju pod terminom inteligentnih sistema (IS) [4].

Razvoj inteligentnih sistema podrazumeva sveobuhvatan i multidisciplinarn pristup u svim njihovim fazama zamisli i projektovanja. Često se može videti da IS novije generacije koriste veliki broj pametnih senzora, multiprocesorske upravljačke sisteme, veliki broj interfejsa i komunikacionih protokola, brze AD konvertore, posebne sklopove za galvansku izolaciju i dr., kako bi ispunili postavljene zahteve kao što su otpornost na elektromagnetske smetnje, vibracije, vlagu, velike promene temperature, atmosferska pražnjenja i sl. Pored hardverske složenosti, ove sisteme inteligentnim čine upravo upravljački algoritmi zasnovani na modernim teorijama prepoznavanja oblika, fazi logike, neuralnih mreža, modelovanja konačnim elementima i td. Nezaobilazno je da se u nekoj od faza razvoja IS-a potvrdi ispravnost usvojene koncepcije. To podrazumeva niz složenih simulacija očekivanih pojava i analizu ponašanja usvojenih (i nečesto samo za uske potrebe razvijenih) algoritma upravljanja i odlučivanja. Za sve prethodno navedeno je neophodna upotreba složenih simulacionih programskih i matematičkih alata. Upravo je jedno poglavlje disertacije posvećeno ovoj problematici.

Uloga IS za upravljanje druskim i vodenim saobraćajem prevashodno se odnosi na poboljšanje bezbednosti učesnika, povećanje prohodnosti i kapacitet postojeće saobraćajne

infrastrukture [5], izbegavanje konfliktnih situacija i td. Razvoj saobraćaja, posmatran kroz inteligentne sisteme upravljanja, tekao je u više pravaca kroz uvođenje novih mernih metoda, komunikacionih sistema, detekcionih algoritama, metoda obrade, metoda ocena bezbednosti i td.

Današnja istraživanja, koja se odnose na inteligentne sisteme za upravljanje saobraćajem, se odvijaju u nekoliko karakterističnih pravaca: sistemi za pametno praćenje (smart tracking) plovila i vozila, sistemi za obaveštavanje u cilju izbegavanja konflikata, vozila sa mogućnošću optimalnog reagovanja u konfliktnim situacijama, potpuno automatizovana vozila, i td.

Razvoj modernih algoritma je prvi i osnovni korak u razvoju IS sistema. Saobraćajna problematika je često univerzalna, pa nam to daje mogućnost da neka rešenja implementirana u IS jednog tipa saobraćaja primenimo u IS drugog tipa saobraćaja. Tako, na primer, sistem za prevođenje brodova kroz brodske prevodnice [6] na sličan način može da se primeni u detekciji i selekciji teretnih kamiona na ulascima u tunele [7].

S obzirom na činjenicu da je tehnološki i informatički napredak ljudskog društva u poslednjim decenijama vrlo ubrzan, kao posledica toga nastao je novi concept organizovanja ljudskih naselja u takozvane "pametne gradove" (Smart Cities) [8]. U tako koncipiranim naseljima posebnu ulogu imaju inteligentni sistemi primenjeni u mnoge sfere svakodnevnog ljudskog delovanja. Posebnu ulogu u koncipiranju pametnih gradova imaju IS primenjeni u saobraćajnim procesima čime se povećava sigurnost učesnika i obim saobraćaja bez stvaranja gužvi i zastoja.

Inteligentni sistemi za upravljanje u saobraćaju predstavljaju važan deo pametnih gradova i prvenstveno se koriste za smanjenje i potpuno uklanjanje zakrčenosti u saobraćaju. Naime, učesnici u saobraćaju moraju znati unapred koliko im je vremena potrebno da sa jednog mesta stignu na neko drugo mesto u gradu kako bi pravilno mogli planirati svoje aktivnosti. Pored toga javne službe, poput hitne pomoći, moraju imati prohodnost kako bi na vreme obavili intervencije.

Do današnjih dana, u saobraćajnim sistemima za kontrolu saobraćajne signalizacije na raskrscima, prevladuje kontrola koja se bazira na fiksnim intervalima trajanja zelenog i crvenog signala. Na ovaj način se pokušava upravljati saobraćajnim procesom na osnovu posmatranja ponašanja saobraćaja u predthodnom, dovoljno dugom vremenskom intervalu, koje kao rezultat daje dužine intervala trajanja crvenog i zelenog signala. Ovakav pristup nema dinamiku, a samim tim ni mogućnost da na što bolji način odgovori na trenutna dešavanja u saobraćajnom procesu. Zbog toga moguća su gomilanja vozila ili povećan broj pešaka koji čekaju na prelaz na pojedinim raskrscima. Pored ove direktno vidljive loše, postoji i indirektna ekološka posledica koja se ogleda u povećanom zagađenju izduvnim gasovima od strane vozila koja nepotrebno čekaju na prolaz kroz zakrčene raskrsnice.

Jedan od predloga za primenu IS za unapređenje saobraćaja u pametnim gradovima, kojim bi se prvazišli nedostaci upravljanja svetlosnom signalizacijom na raskrscima fiksnim intervalima trajanja crvenog i zelenog signala prikazan je u [9]. S obzirom na činjenicu da su moderne senzorske tehnologije i informaciono-komunikacione tehnike (ICT, Information and Communication Technologies) uznapredovale i postale dostupne za široku upotrebu, one se mogu koristiti za detekciju neuobičajenih stanja u saobraćajnom procesu, kao što je povećani broj vozila u nekoj traci ili povećani broj pešaka koji čekaju na dozvolu za prelazak puta. U pomenutom radu, za detekciju broja vozila u pojedinim saobraćajnim trakama se koriste vizualni senzori i uporedni metod kojim se trenutni oblik upoređuje sa oblikom koji je dobijen u slučaju prazne trake. Potom se trenutne vrednosti gustine saobraćaja, kao ulazne veličine, procesiraju adaptivnim algoritmom čime se kao rezultat dobijaju vrednosti trajanja signalizacionih signala.

Za razliku od predloga koji je opisan u [9], u kome se tretira pojedinačna raskrsnica, kao sveobuhvatnije rešenje za tretiranje saobraćajnog procesa u pametnim gradovima moguća je primena metode opisane u [5]. U radu se tretira problematika posmatranja nekoliko raskrscica u okviru sinhronizacije saobraćajne zone. Na osnovu merenja protoka vozila kroz raskrsnice i na njihovim prilazima određuju se gustine saobraćaja. Trenutne vrednosti gustina saobraćaja se procesiraju od strane fazi-logičkog kontrolera, sa više ulaza i više izlaza (MIMO, Multiple Input Multiple Output), koji kao izlazne veličine daje vremena trajanja signalizacionih signala (crveni i zeleni signal) za svaku od raskrscica. Opisani fazi-logički kontroler odlučivanje vrši na osnovu

fazi-logičkih pravila koja teže da smanje gužve i zakrčenja u celokupnoj saobraćajnoj zoni što je više moguće.

Pored pristupa u kome se tretira više raskrsnica kao jedinstven sistem u kome saobraćaj reguliše fazi-logički kontroler uvažavajući podatke sa svih raskrsnica, moguć je i pristup posmatranja pojedinačne raskrsnice. Neretko, ovakav pojednostavljeni pristup može dati dovoljno dobre rezultate u kome fazi-logički kontroler upravlja trajanjima dve ili više signalnih faza samo na osnovu podataka sa jedne raskrsnice. Tako u slučaju dve signalne faze [10], fazi-logički kontroler zaključivanje vrši na osnovu analiziranja trenutnog stanja saobraćaja. Fazi-logički kontroler određuje intenzitet saobraćaja u svakoj od signalnih faza na osnovu saobraćajnog protoka i dužine kolone vozila u svakoj saobraćajnoj traci. Na osnovu određenog intenziteta saobraćaja u svakoj od faza, fazi-logički kontroler donosi odluku da li treba skratiti ili produžiti trajanje tretirane signalne faze.

S obzirom na činjenicu da se broj učesnika u saobraćaju neprestano povećava, pogotovo u urbanim sredinama, unapređenje praćenja i upravljanja saobraćajnim procesima se nameće kao imperativ. Iz tog razloga, kao doprinos tome, ova disertacija se bavi razmatranjem problematike izbegavanja konfliktnih situacija u drumskom saobraćaju. Naime, u disertaciji će biti prikazan inteligentni sistem za izbegavanje konfliktnih situacija u saobraćaju čijom primenom bi se prvenstveno ostvarila veća bezbednost učesnika, a posledično smanjili zastoji izazvani sudarima i time povećala prohodnost saobraćajnih lokacija. Ovaj sistem je zamišljen kao dopuna postojećem sistemu, opisanom u [5], čija je prvenstvena uloga u upravljanju saobraćajem u cilju povećanja saobraćajnog protoka u okviru saobraćajnih sinhronizacionih zona (grupa usklađenih raskrsnica sa svetlosnom signalizacijom). Na taj način koncipiran je integralni sistem, opisan u četvrtom poglavlju, kojim se postojeće rešenje nadograđuje i time ostvaruje poboljšanje saobraćajnog protoka kroz saobraćajnu zonu.

S obzirom na činjenicu da su saobraćajni procesi dosta složeni i da zavise od mnoštva faktora koji se ponašaju kao slučajne veličine, saobraćajne procese je dosta teško prikazati egzaktnim modelima. Imajući to u vidu i uvažavajući činjenicu da su fazi-skupovi i fazi-logika alat koji dobro operiše sa neodređenostima, kao jezgro sistema za izbegavanje konfliktnih situacija nameće se fazi ekspertski sistem.

U drugom poglavlju prikazan je pregled nekih od koncepata i konkretnih realizacija sistema za izbegavanje konfliktnih situacija. Prikazani su koncepti i rešenja primenjeni u vazдушnom, vodenom, železničkom i drumskom saobraćaju.

U trećem poglavlju prikazani su teorijski osnovi i koncepti koji se koriste pri realizaciji fazi ekspertskih sistema. Prikazani su fazi skupovi i osnovne operacije nad njima. Opisane su fazi relacije i operacije nad njima. Definisane su lingvističke promenljive. Prikazana je koncepcija tip-1 i tip-2 fazi-logičkih sistema.

Četvrto poglavlje predstavlja centralno mesto ove disertacije. U njemu je prikazan koncept integralnog sistema za upravljanjem saobraćajem. Ukratko je opisano postojeće rešenje iz [5] i određeno je mesto inteligentnog sistema za izbegavanje konfliktnih situacija u okviru integralnog sistema. Detaljno je opisan koncept i elementi inteligentnog sistema za izbegavanje konfliktnih situacija u saobraćaju. Definisani su pojam saobraćajne lokacije i njeni elementi kao što su look-up tabela putanje, konfliktna tačka putanje, konfliktna zona dva vozila i td. Naznačena je i opštost koncepta, po pitanju oblika saobraćajne lokacije, definisanjem saobraćajnih lokacija tipa raskrsnica i kružni tok. Detaljno su opisani delovi sistema kao što su senzorski podsistem, centralni kontroler i podsistem za obaveštavanje. U okviru podpoglavlja vezanog za senzorski podsistem, opisano je na koji način se određuju položaj i brzina vozila, mere veličine koje određuju stanje ambijenta i koje informacije se preuzimaju iz vozila da bi se odredila sposobnost reagovanja vozila, u slučaju postojanja mogućnosti V2I (Vehicle To Infrastructure) kooperativne komunikacije u okviru vozila. U okviru podpoglavlja vezanog za centralni kontroler opisano je samo jezgro sistema. Definisani su procesi izvršavanja koji su nosioci realizacije samog algoritma. Definisani su sposobnost reagovanja vozila (SRV), kritični vremenski intervali, algoritam procene verovatnoće sudara dva vozila, određivanje preporučene brzine kretanja, algoritam korigovanja

brzine u ulaznoj deonici i algoritam procene opasnosti kretanja zasnovan na primeni fazi ekspertskog sistema. U okviru podpoglavlja vezanog za podsistem za obaveštavanje definisani su nizovi obaveštajnih panela i prikazan je algoritam za formiranje obaveštajnih poruka.

U petom poglavlju definisan je simulacioni model saobraćajne lokacije. Prikazana su dva tipa generisanja vozila pseudo-slučajnim generatorom i unapred definisanom sekvencom. Prikazan je algoritam usporavanja vozila, algoritam detektovanja konflikta i izbegnutog konflikta. Prikazana je realizacija simulacione aplikacije. U drugom delu poglavlja prikazani su rezultati simulacija koje su vršene pomoću simulacione aplikacije. Simulacije su vršene prema definisanim scenarijima. Scenarii su tako određeni da na najbolji način istaknu pojedine aspekte ponašanja sistema za izbegavanje konflikata. Na kraju poglavlja prikazani su eksperimentalnih rezultata dobijeni analizom realne situacije na kružnom toku snimljene WEB kamerom kojima je pokazano da formirana veličina *ukupan nivo opasnosti* predstavlja dobar indikator na osnovu koga podsistem za obaveštavanje može da generiše valjane poruke.

U šestom poglavlju prikazan je sistem za regulisanje rada brodske prevodnice. Opisan je algoritam za detekciju plovila koji se koristi u daljinskom on-line nadzornom sistemu za lasersko praćenje saobraćaja u brodskoj prevodnici. Opisan je sistem koji obezbeđuje striktno otkrivanje položaja broda kako bi se sprečilo manipulisanje vratima brodske prevodnice dok je plovilo u zoni vrata. Opisan je implementirani algoritam koji vrši detekciju plovila u vidnom polju laserskih skenera. Opisan je algoritam detekcije razvijen u modularnom obliku koji sadrži brojne funkcionalne delove zasnovane na prepoznavanju oblika: deo za prepoznavanje smetnji, deo za prepoznavanje površine vode sa plutajućom prljavštinom, delom za prepoznavanje smetnji prouzrokovanih preletom jedne ptice ili jata ptica, dela za prepoznavanje smetnji prouzrokovanih meteorološkim uslovima, dela za prepoznavanje visokih talasa i dela za prepoznavanje plovila. Prikazani su fazi-logički sistemi koji su predviđeni da vrše validaciju prepoznatog plovila, validaciju prepoznatog objekta tipa „plutajuća horizontalna linija“ i validaciju prepoznatog objekta tipa „krug“. Prikazan je i fazi-logički kontroler koji upravlja svim fazama pokretanja, zaustavljanja i zatvaranja (gornjih i donjih) vrata brodske prevodnice i upravlja punjenjem/praznjenjem komore brodske prevodnice.

U sedmom poglavlju razmatrani su rezultati simulacija sa aspekta svrsishodnosti i efikasnosti sistema za izbegavanje konfliktnih situacija. Data su zapažanja i smernice za dalja istraživanja u ovoj tematici.

U osmom poglavlju dat je spisak literature koja je citirana ili korišćena u procesu izrade ove disertacije.

## 2. ULOGA INTELIGENTNIH SISTEMA U IZBEGAVANJU KONFLIKTNIH SITUACIJA U SAOBRAĆAJU

Ispitivanje, predviđanje i izbegavanje konfliktnih situacija se primenjuje u većoj ili manjoj meri u svim vidovima saobraćaja. Ponajviše se odmaklo u vazдушnom saobraćaju u kome IS za izbegavanje konfliktnih situacija TCAS (Traffic alert and Collision-Avoidance System) imaju najveću primenu. TCAS sistemi se dinamično razvijaju i vremenom su doživeli modifikacije tako da trenutno postoje i primenjuju se u praksi TCAS četvrte generacije. Takođe, primena ovih sistema je velika i u drumskom saobraćaju s obzirom na njegovu veliku rasprostranjenost. Primena u železničkom, rečnom i morskome saobraćaju je takođe vrlo prisutna, ali u manjoj meri nego u vazдушnom i drumskom saobraćaju.

Jedna od najmlađih oblasti saobraćaja je oblast tzv. inteligentnih transportnih sistema (ITS). Ova oblast saobraćaja pokazuje tendenciju najbržeg razvoja, i prateći i istovremeno podstičući razvoj nekoliko drugih tehničkih i naučnih oblasti: laserska tehnika, merna tehnika i senzori, složeni sistemi daljinskog nadzora, telekomunikacije, satelitski sistemi pozicioniranja GPS, programski alati, mikrokontroleri, automatski sistemi i dr. Ova oblast svakim danom postavlja i razvija nove koncepte kako za poboljšano detektovanje i praćenje, tako i za automatsko odlučivanje. Iako postoje različiti pristupi i algoritmi za prepoznavanje i donošenje odluka, nijedan od konceptata ne smatra situaciju konflikta holističnom situacijom koja obuhvata definisana krajnja stanja i putanje prema njima.

Kooperativna vožnja je pojam koji se rodio u oblasti ITS-a i predstavlja neku vrstu saradnje među učesnicima u saobraćaju. Ova saradnja se pre svega odnosi na automatsku saradnju između različitih sistema i različitih učesnika u saobraćaju, sa ciljem povećanja sigurnosti i efikasnosti saobraćajnog procesa. Ovakav pristup u novije vreme podrazumeva delimičnu ili trajnu kontrolu nad vozilima u kritičnim saobraćajnim situacijama. Jedan od modernijih pristupa se odnosi na praktičnu realizaciju V2V (Vehicle To Vehicle) algoritama. Razvoj kooperativnih algoritama za planiranje manevara (izbegavanja, preticanja, zaustavljanja, praćenja...) samih vozila u odnosu na druge učesnike je jedan od današnjih trendova razvoja [11].

Razvoji prvih upravljačkih algoritama se kretao u smeru previđanja potencijalnih konfliktnih situacija sa ciljem definisanja (i realizacije) beskonfliktnih situacija. U tom smislu su razvijani složeni tehnički komunikacioni sistemi u pokušaju da se skrate njihova transportna kašnjenja paketa informacija, kao i skraćivanja vremena odziva samih izvršnih elemenata.

Zbog velike heterogenosti saobraćaja po pitanju: tipa (vazdušni, drumski, vodeni i železnički), sredine u kojoj se odvija (npr. za drumski saobraćaj gradska, prigradska i ruralna sredina), gustine (npr. za vazdušni saobraćaj neuporedivo je veća gustina u blizini aerodroma u odnosu na slobodan vazdušni prostor), vrste primenjene komunikacije, domenu primene, vrsti primenjenih senzora, mestu postavljanja senzora, vrsti primenjenih algoritama i td. dosta je teško izvršiti jasnu kategorizaciju IS za izbegavanje konfliktnih situacija u saobraćaju.

Primena IS za izbegavanje konfliktnih situacija može biti krajnje raznolika, ali se mogu primetiti osnovni domeni primene: prikupljanje podataka (na osnovu kojih se mogu vršiti *offline* analize), obrada podataka u realnom vremenu na osnovu kojih se vrši obaveštavanje učesnika o eventualnim konfliktnim situacijama, predlaganje aktivnosti učesnicima u saobraćaju u cilju izbegavanja konfliktnih situacija i automatsko preduzimanje akcija (manevrisanje) u cilju izbegavanja konfliktnih situacija.

Da bi se u IS za izbegavanje konfliktnih situacija donosili zaključci, generisala obaveštenja i proračunavali adekvatni manevri potrebno je imati podatke o trenutnom statusu učesnika u saobraćaju. Do ovih podataka se dolazi upotrebom raznih vrsta senzora koji prvenstveno daju podatke o položaju, brzini, ubrzanju i pravcu kretanja učesnika u saobraćaju. Najčešći slučaj je primena GPS prijemnika koji se nalazi u samom saobraćajnom učesniku koji generiše informaciju o položaju, brzini i pravcu kretanja.

Podaci o trenutnom statusu učesnika u saobraćaju distribuiraju se preko komunikacionog sistema. Kao i po drugim pitanjima, i u slučaju primenjivanih komunikacionih sistema IS za izbegavanje konfliktnih situacija teško je izvršiti jasnu klasifikaciju. Ipak, prema strukturi komunikacionog sistema moguće je prepoznati sisteme kod kojih: učesnici međusobno komuniciraju (npr. V2V), učesnici komuniciraju sa centralom koja se nalazi kao deo saobraćajne infrastrukture (npr. V2I, Vehicle To Infrastructure) i status učesnika u saobraćaju se određuje posredno pomoću senzora koji su deo infrastrukture (npr. kamera postavljena iznad puta, nekolicina detektora prisutnosti vozila postavljenih na raskrsnici ili USN (Ubiquitous Sensor Network) mreža postavljena na raskrsnici).

Sobraćaj svih vidova predstavlja saobraćajnu granu u kojoj učestvuje veliki broj ljudi i prevoznih sredstava. Pored toga svakodnevno se obavlja veliki broj avionskih letova, prevoženja putnika autobusima, vozovima, tramvajima i drugim prevoznim sredstvima, dopremanje velike količine materijalnih dobara korišćenjem kamiona, teretnih vozova, teretnih brodova i drugih teretnih prevoznih sredstava. Sve ovo čini saobraćaj vrlo intenzivnom privrednom granom.

Kao posledica tolike intenzivnosti saobraćaja neophodno vodi ka pojavi velikog broja incidentnih situacija. Istraživanja incidentnih situacija, u više oblasti pa među njima i u saobraćaju, pokazala su dosta zabrinjavajuće podatke o katastrofama izazvanih prirodnim događajima i tehničkim otkazima [12]. Kao posledice javljaju se veliki broj povreda i izgubljenih života, oštećenja materijalnih dobara i zagađenja životne okoline. Važnost prepoznavanja i prevazilaženja incidentnih situacija dovela je čak do formiranja ustanova koja se bave ovom problematikom na institucionalnom nivou. Sve ovo jasno ukazuje na neophodnost praćenja, analiziranja i predupređivanja incidentnih situacija kako u drugim oblastima ljudskog društva tako i u saobraćaju.

Značaj istraživanja saobraćajnih nezgoda je vrlo velik. Istraživanja se neprestano vrše i proširuju novim metodama. U početku su određivane samo statističke informacije o nezgodama, da bi se vremenom krenulo u dubinske analize [13] podataka o nezgodama. Kao rezultat takvih analiza dobijaju se preporuke za prevazilaženje incidentnih situacija u saobraćaju. Pored preporuka, kao rezultat istraživanja dobijaju se zadovoljavajuća objašnjenja i valjani modeli pojave incidentnih situacija koji se mogu koristiti u budućim analizama. Pristupanje dubinskoj analizi podataka o nezgodama vodi do zaključaka koji su bitni za više nivoa poimanja saobraćaja kao što su buduća dizajniranja vozila i puteva, prevazilaženje problema nedostataka u regulaciji saobraćaja, dodatna obuka vozača za adekvatno ponašanje u vanrednim i opasnijim situacijama nego obično, kao što su magla, jaka kiša i td.

Značaj istraživanja saobraćajnih nezgoda u vazдушnom saobraćaju je vrlo velik. U prilog ovoj tvrdnji ide i činjenica da je u Velikoj Britaniji osnovana institucija AAIB (Air Accidents Investigation Branch) po čijem modelu su osnovana slična tela za proučavanje incidentnih situacija u drugim vrstama saobraćaja [14].

Multidisciplinarna grupa za analizu nezgoda na putevima [15], [16] osnovana je u Danskoj sa ciljem analiziranja čeonih sudara, sudara prilikom skretanja u levo, kamionskih nesreća i nesreća sa jednim vozilom. Kolekcija raspoloživih podataka uključuje policijske izveštaje nakon nezgoda, ali i istraživanja koja su vršili članovi grupe mesta nezgoda, vozila koja su u učestvovala u nezgodama kao i intervju učesnika, svedoka i očevidaca nezgoda. Sprovedenim analizama grupa je došla do zaključka da su čeonu sudari prvenstveno prouzrokovani prevelikom brzinom i vožnjom u alkoholisanom stanju. U slučaju sudara prilikom skretanja u levo glavni faktor je pogrešna procena raspoloživog vremena potrebnog za skretanje. U slučaju kamionskih sudara kao glavni faktor se nameće prekoračenje brzine koje se javlja kao rezultat nedovoljnog praćenja saobraćajnih znakova. U slučaju nesreća kao glavni faktor se pojavljuje nevezivanje zaštitnim pojasom. Multidisciplinarni pristup obezbeđuje prilično precizne procene faktora koji su doveli do sudara i nesreće. Metoda zahteva puno resursa, što je ograničavajući faktor za broj nesreća koje se analiziraju na ovaj način. Međutim, postupak je pogodan za analizu čestih nezgoda ili veoma teških oblika nesreća.

Ispitivanje i izbegavanje konfliktnih situacija se primenjuje u većoj ili manjoj meri u svim vidovima saobraćaja. Dosta se odmaklo u vazдушnom saobraćaju u kome TCAS sistemi imaju najveću primenu i koji su vremenom doživljavali modifikacije u cilju unapređenja (postoje sistemi četvrte generacije). Takođe, primena ovih sistema je velika i u putnom saobraćaju s obzirom na njegovu veliku rasprostranjenost. Primena u šinskom, rečnom i morskome saobraćaju je nešto manjeg stepena u odnosu na vazdušni i drumski saobraćaj.

Svaka od primena ima svoje specifičnosti koje se ogledaju u: domenu primene sistema, vrsti komunikacija za prenos podataka, vrsti senzora koji su primenjeni, poziciji senzora u okviru sistema i td.

Domen primene sistema može biti:

- samo prikupljanje podataka (na osnovu kojih se kasnije mogu vršiti analize),
- prikupljanje podataka i obrada podataka na osnovu kojih se u realnom vremenu obavestavaju učesnici u saobraćaju o eventualnim problematičnim situacijama,
- prikupljanje i obrada podataka i predlaganje akcija kojima bi se izbegle konfliktno situacije i
- prikupljanje i obrada podataka i automatsko preduzimanje akcija (manevrisanje) u cilju izbegavanja konfliktnih situacija.

U TCAS sistemima da bi se donosili zaključci, generisala obavestjenja i proračunavali adekvatni manevri potrebno je imati podatke o trenutnom statusu učesnika u saobraćaju. Do ovih podataka se dolazi upotrebom raznih vrsta senzora koji prvenstveno daju podatke o položaju, brzini, ubrzanju i pravcu kretanja učesnika u saobraćaju. Najčešći slučaj je primena GPS prijemnika koji se nalazi u samom saobraćajnom učesniku (avionu, automobilu, brodu, tramvaju, vozu i td.) koji daje informaciju o položaju, brzini i pravcu kretanja, a te podatke sa ostalim učesnicima deli tako što pakete podataka šalje preko komunikacione infrastrukture samoga sistema. Druga varijanta za dobijanje informacija o statusu učesnika u saobraćaju je postavljanje senzora (npr. kamera) ili senzorskih mreža (npr. detektori prisutnosti vozila) u okviru saobraćajne infrastrukture.

Što se tiče komunikacionog sistema i prenosa podataka najčešće se koriste bežične komunikacije. U okviru sistema mogu komunicirati međusobno učesnici u saobraćaju (npr. V2V), učesnik u saobraćaju i centralni servis (npr. V2I), senzorska mreža i centralni servis (USN) i td.

## **2.1. Vazdušni saobraćaj**

Vazdušni saobraćaj predstavlja najmlađu saobraćajnu granu sa najvećom brzinom razvoja. Želje čoveka da osvoji, nebo i svemir sa jedne strane, ali i vojne potrebe sa druge strane, su doprinele brzom razvoju modernih inteligentnih sistema za izbegavanje konfliktnih situacija (gust saobraćaj iznad velikih aerodroma, prepoznavanje prijateljskih letilica u ratu, svemirski programi...). Metodologije rada ovih sistem se oslanjaju na složene algoritme razvijene sa ciljem izbegavanja konfliktnih situacija.

Tokom godina, vazdušni saobraćaj je u neprestanom porastu. Razvoj modernih sistema za upravljanje saobraćajem omogućio je taj porast održavajući neophodan nivo sigurnosti. Uprkos naprednoj tehnici primenjenoj u sistemima za upravljanje vazдушnim saobraćajem (ATC, Air Traffic Control), bilo je slučajeva pogrešnih odluka bilo zbog ljudske greške ili zbog greške tehnike. Svaka pogrešna odluka mogla bi rezultovati povećanjem rizika od sudara u vazduhu. Iz tog razloga, od 1950. godine sistemi za izbegavanje konfliktnih situacija u vazдушnom saobraćaju (ACAS, Airborne Collision Avoidance Systems) se proučavaju i razvijaju kao najbolje sredstvo za smanjenje rizika od sudara u vazduhu [17].



1955. godine John S. Morrel predložio je da se u algoritmima za izbegavanje konflikata u vazдушnom saobraćaju radije koristi vreme u odnosu na razdaljinu do mesta konflikta CPA (Closest Point of Approach) [18]. Danas se ACAS sistemi zasnivaju na tom konceptu.

Tokom kasnih šesdesetih i ranih sedamdesetih godina dvadesetog veka, nekoliko proizvođača je razvilo prototipne sisteme za izbegavanje konfliktnih situacija u vazдушnom saobraćaju. Iako su ovi sistemi funkcionisali propisno tokom probnog perioda, zaključeno je da bi ipak ovi sistemi primenjeni u redovnom avionskom saobraćaju generisali dosta veliki broj lažnih alarma u terminalnim oblastima oko aerodroma u kojima je velika gustina saobraćaja. Ovaj problem bi ugrožavao poverenje u sisteme sa letačkom posadom.

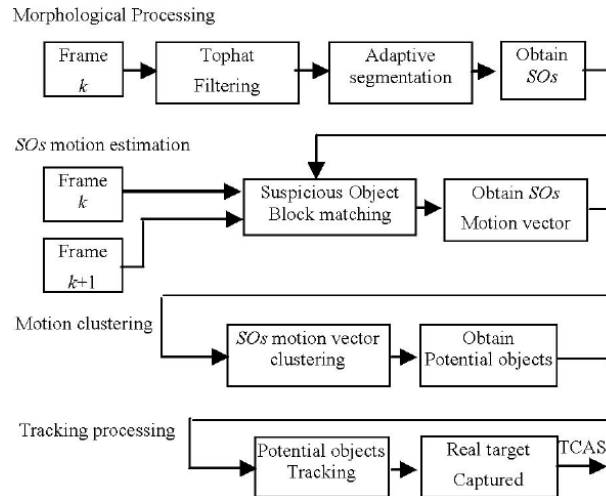
Godine 1978. dogodio se sudar između lakog aviona i putničkog aviona iznad San Diega, California, što je podstaklo Federalnu avijatičarsku administraciju (FAA, Federal Aviation Administration) Sjedinjenih američkih država da, tri godine kasnije, pokrene razvoj Sistema za obaveštavanje i izbegavanje konfliktnih situacija u saobraćaju TCAS. Godine 1986. sudar između lakog aviona i putničkog aviona iznad Cerritos, California rezultovao je izglasavanje zakona po kome se zahteva da pojedine kategorije američkih i inostranih aviona budu opremljene sa TCAS II sistemom prilikom leta u vazдушnom prostoru Sjedinjenih američkih država [17].

Od 1980. godine, paralelno sa razvojem TCAS Sistema, Internacionalna civilna avijatičarska organizacija (ICAO, International Civil Aviation Organization) razvila je standard za sisteme za izbegavanje konfliktnih situacija u vazduhu (ACAS, Airborne Collision Avoidance Systems) [18].

TCAS sistem se nalazi u avionu sa namenom detekcije potencijalnog konflikta i predlaganja rešenja. Njegov zadatak je da monitoriše vazdušni saobraćaj u okolini aviona i obaveštava pilota o stanju u okolini. U slučaju potencijalnog konflikta TCAS upućuje pilota na koji način da izbegne konflikt.

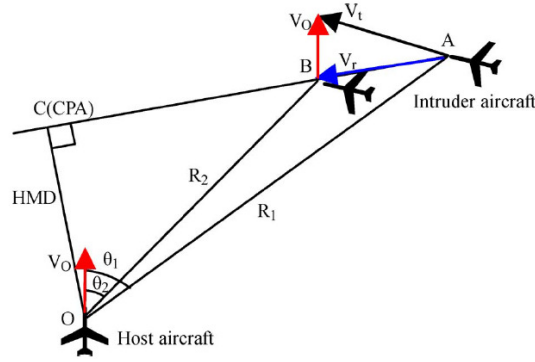
Zbog velike dinamike u razvoju vazdušnog saobraćaja i povećanja broja učesnika, standardni sistemi za izbegavanje konflikata u vazдушnom saobraćaju TCAS se stalno unapređuju i modifikuju. Pored unapređenja i modifikacija, pojavljuju se i dopunski sistemi pomoću kojih se podiže efikasnost postojećih TCAS. U radu [19] predložen je dodatni sistem za izbegavanje konflikata u vazдушnom saobraćaju OACAS (Optical Aerial Conflict Alarm System). Sistem OACAS se može koristiti kao rezerva ili zamena sistemu RCAS (Radar Collision Avoidance System). OACAS sistem prati potencijalno rizične objekte u vazduhu i predviđa eventualni vazdušni konflikt na osnovu niza video frejmova. Predviđanje eventualnog vazdušnog konflikta vrši se analizom kretanja i morfološkim procesiranjem.

Blok dijagram primenjenog algoritma u sistemu OACAS prikazan je na Sl. 2.1. Snimanjem vazdušnog prostora dobija se on-line niz video frejmova. Iz pojedinačnih frejmova, primenom morfološkog procesiranja, određuju se sumnjivi objekti (SOs). Nakon toga analiziraju se dva uzastopna frejma i određuju vektori pomeranja sumnjivih objekata. Na osnovu pravca i intenziteta vektora pomeranja sumnjivih objekata, primenom klasterizacije, određuju se potencijalni objekti (POs) koji eventualno mogu da izazovu konflikt. Praćenjem trajektorija potencijalnih objekata, ukoliko se ustanovi da može doći do sudara sa nekim drugim objektom, šalje se alarm sistemu TCAS nakon čega on obaveštava pilota o potencijalnom konfliktu.



Sl. 2.1 - Blok dijagram algoritma primenjenog u sistemu OACAS [19]

Ubrzani razvoj tehnologije, elektronike i informatike, ali i potrebe regulisanja i što veće bezbednosti neprestano rastućeg vazdušnog saobraćaja rezultovali su pojavom još tri generacije TCAS sistema nakon pojave prvog TCAS sistema. Sistemi druge generacije (TCAS II) daju savete posadi aviona RA (Resolution Advisory) kako da vertikalnim manevrima izbegnu konflikte. Sistemi četvrte generacije (TCAS IV) daju poboljšane savete koji mogu sadržati manevre u vertikalnoj i/ili horizontalnoj ravni. Sposobnost sistema TCAS IV da generiše kvalitativno bolje savete od sistema druge generacije zasniva se na raspolaganju informacija o globalnoj poziciji aviona koji bi eventualno mogli da učestvuju u konfliktu. Naime, svaki avion je opremljen GPS prijemnikom pomoću koga određuje svoju globalnu poziciju. Svaki od aviona periodično emituje poruku u kojoj je sadržana njegova trenutna globalna pozicija ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast). U radu [20] proučavan je TCAS IV, zasnovan na GPS i ADS-B, u kome su opisane dve vrste horizontalnog manevrisanja u cilju izbegavanja konflikta: promena brzine bez promene pravca letenja i promena pravca letenja bez promene brzine. Posmatrani avion periodično dobija podatke od najbližeg aviona (potencijalnog uljeza i generatora konfliktne situacije). Poruke se periodično šalju od strane aviona uljeza preko ADS-B sistema. Poruke sadrže informaciju o trenutnoj globalnoj poziciji, brzini i pravcu kretanja aviona uljeza koje on dobija od svog GPS prijemnika. Na osnovu informacija od uljeza (globalna pozicija, brzina i pravac kretanja) i sopstvenih informacija (sopstvena globalna pozicija, brzina i pravac kretanja koje avion dobija od sopstvenog GPS prijemnika) periodično se vrše proračuni na osnovu modela sa Sl. 2.2. Proračunava se horizontalno rastojanje (HMD, Horizontal Miss Distance) od potencijalne tačke konflikta (CPA) prema (2.1) i vreme do potencijalnog konflikta  $t_{HMD}$  prema (2.2). Takođe, proračunava se i vertikalno rastojanje (VMD, Vertical Miss Distance) od potencijalne tačke konflikta kao razlike vertikalnih položaja objekta i uljeza (2.3).



Sl. 2.2 – Detekcija konflikta u horizontalnoj ravni [20]

$$HMD = \frac{R_1 R_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)}} \quad (2.1)$$

$$t_{HMD} = \frac{\sqrt{R_2^2 - HMD^2}}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)}} = \frac{R_2 (R_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) - R_2)}{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2.2)$$

$$VMD = Z_o - Z_i \quad (2.3)$$

U slučaju da je horizontalno i/ili vertikalno rastojanje manje od minimalno dozvoljenog horizontalnog  $HMD_{min}$  i/ili vertikalnog  $VMD_{min}$ , (čije vrednosti su definisane propisima), opisani TCAS IV sistem pristupa formiranju sugestija (horizontalna i/ili vertikalna RA) čijom bi primenom eventualni konflikt bio izbegnut.

Primenom strategije izbegavanja konflikta kojom se *ne menja pravac i menja brzina* aviona, ustanovljava se da trenutna brzina aviona  $V_o$  se nalazi u opsegu konfliktnih brzina (2.4):

$$V_o \in [V_o^1, V_o^2] \quad (2.4)$$

Stoga se horizontalna RA svodi na preporuku usporenja (2.5) ili ubrzanja (2.6):

$$V_o^{safe} < V_o^1 \quad (2.5)$$

$$V_o^{safe} > V_o^2 \quad (2.6)$$

Primenom strategije izbegavanja konflikta kojom se *menja pravac i ne menja brzina* aviona, ustanovljava se da trenutni ugao pravca kretanja aviona  $\varphi_o$  se nalazi u opsegu konfliktnih uglova pravca kretanja (2.7):

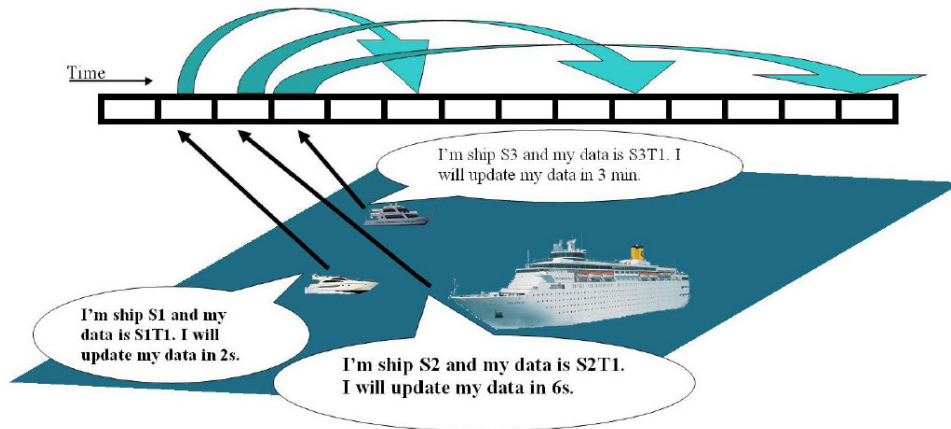
$$\varphi_o \in [\varphi_o^1, \varphi_o^2] \quad (2.7)$$

Stoga se horizontalna RA svodi na preporuku skretanja ulevo (2.8) ili udesno (2.9):

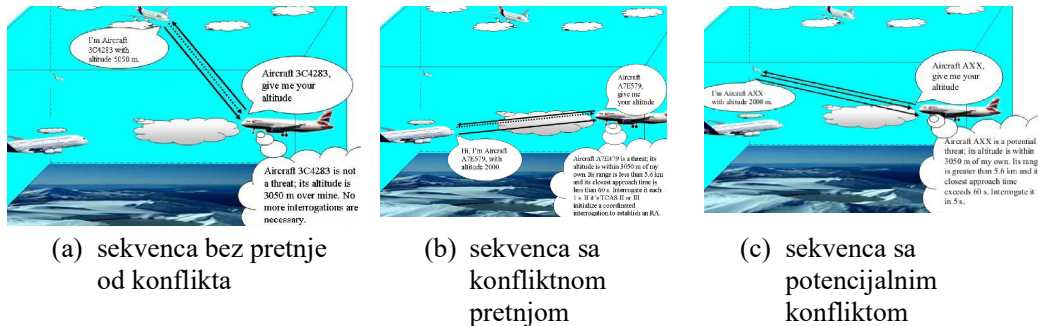
$$\varphi_o^{safe} < \varphi_o^1 \quad (2.8)$$

$$\varphi_o^{safe} > \varphi_o^2 \quad (2.9)$$

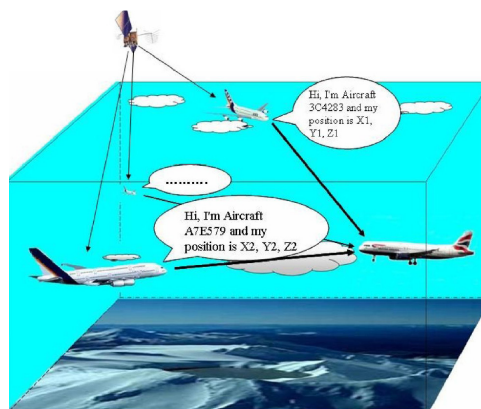
U radu [21] prikazano je poređenje sistema za izbegavanje konfliktnih situacija u vazdušnom (TCAS/ADS-B), pomorskom AIS (Automatic Identification System) i putnom saobraćaju C2C (Car-2-Car) sa komunikacionog stanovišta i ispitana je mogućnost njihove primene u sistemima za izbegavanje konfliktnih situacija u okviru šinskog saobraćaja RCAS (Railway Collision Avoidance System). Opisane su strategije nadgledanja u okviru morskog (Sl. 2.3), vazdušnog (Sl. 2.4) i putnog (Sl. 2.5) saobraćaja.



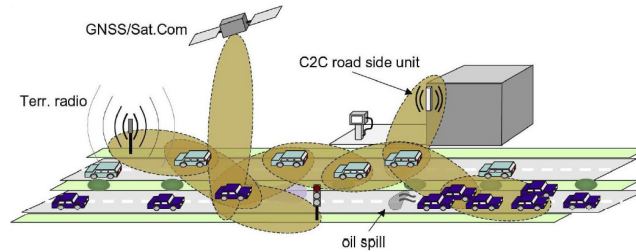
Sl. 2.3 – Strategija nadgledanja u okviru AIS [21]



Sl. 2.4 – Strategija nadgledanja u okviru TCAS [21]



Sl. 2.5 – Strategija nadgledanja u okviru ADS-B [21]

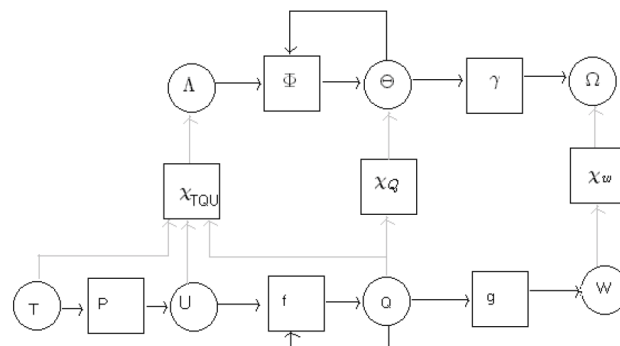


Sl. 2.6 – Strategija nadgledanja u okviru C2C [21]

U radu se zaključuje da jedino u slučaju prevelike dužine poruka i prevelike gustine učesnika u saobraćaju **broadcast** komunikacija bi imala prednost u odnosu na **point-to-point** komunikaciju. U slučaju RCAS sistema koji bi komunicirali u VHF opsegu, primena relativno malih predajnih snaga bi imala smisla za učestanost slanja poruka koja je reda veličine kao kod TCAS/ADS-B sistema.

U radu [22] razmatran je TCAS primenjen u vazdušnom saobraćaju koji daje rešenje u obliku horizontalnog manevra. Do manevra sistem dolazi primenom simboličkog rezonovanja.

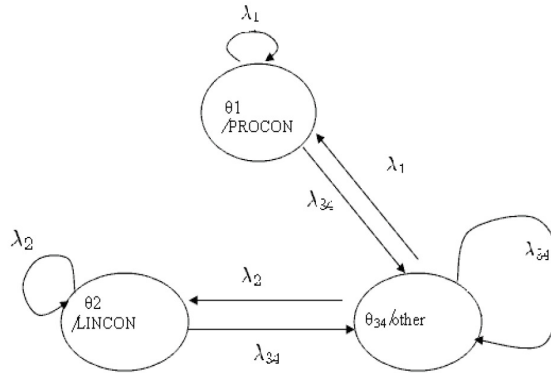
U sistemu je primenjen  $Q^2$  pristup ( $Q^2$  approach) koji se svodi na preslikavanje kvantitativnih veličina dinamičkog sistema (GDS, General Dynamic System) u simboličke kvalitativne veličine njemu pridruženog kvalitativnog sistema (QDS, *Qualitative Dynamic System*) Sl. 2.7.



Sl. 2.7 –  $Q^2$  model dinamičkog sistema [22]

Preslikavanje se vrši kvantizacijom, koja ne mora biti linearna, a kao rezultat se dobija deljenje prostora GDS na hiperboksove. Prelazak granice hiperboksa, od strana kvalitativne veličina dinamičkog sistema, predstavlja **kvalitativni događaj**.

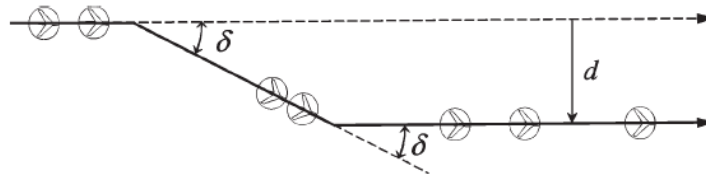
QDS predstavlja kvalitativnu apstrakciju GDS. QDS je u stvari mašinu stanja (finite-state automaton structure), tj. Moore-ove mašine (Sl. 2.8).



Sl. 2.8 – Primer Moore-ove mašine kojom se predstavlja QDS [22]

Kao rezultat kvantizacije neminovno se pojavljuje greška u proračunu optimalne strategije (manevra) za izbegavanje konfliktne situacije. Međutim, ovaj gubitak je neznatan u poređenju sa dobitkom koji se ogleda u smanjenju vremena potrebnom za proračun manevra. Vreme potrebno za proračun manevra primenom  $Q^2$  pristupa je za dva reda veličine manje u odnosu na vreme potrebno za proračun manevra direktnom primenom GDS.

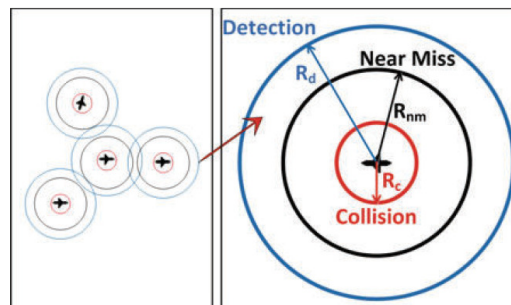
U radu [23] opisan je opšti okvir za proučavanje rešenja za izbegavanje konflikata za slučajeve ukrštanja putanja aviona u planarnom vazдушnom prostoru. Problem rešavanja konflikata se razlaže u niz podproblema, gde svaki uključuje ukrštanja samo dva aviona. Strategija za ostvarenje dekompozicije problema je bočno pomeranje aviona (Sl. 2.9) tako da se oni ukrštaju u parovima, a kao rezultat nema preklapanja konfliktnih zona (Sl. 2.10). Konfliktna zona je definisana kao kružna oblast koja je centrirana na raskrsnici puteva aviona, što omogućava avionu u potpunosti rešavanje konflikta u okviru konfliktne zone bez lutanja van nje. Optimizacija problema je formulisana tako da minimizira bočne pomeraje toka aviona. Iako je ovaj optimizacioni problem teško rešiv zbog svoje nekonveksne prirode, ipak u slučaju tri aviona rešenje je u zatvorenoj formi (Sl. 2.11).



Sl. 2.9 – Bočno pomeranje aviona [23]



zbog velikih poteškoća u zadržavanju potrebnog razmaka između aviona kada je njihova gustina pojavljivanja veoma visoka. Rešavanje konflikata igra važnu ulogu u eliminisanju konflikata u vazдушnom prostoru (Sl. 2.12). Jedan od pristupa predložen je u radu [25] u kome je predstavljena višenamenska metodologija za rešavanje konflikta u vazduhoplovu na osnovu primene teorije igara koja razmatra smanjenje konflikata i ekonomske gubitke. Prvo se avionima, potencijalno uključenim u sukobe, dodeljuju drugačiji statusi zasnovani na specijalno kreiranom mehanizmu prioritarnog rangiranja. Nakon toga, vrši se izbor najpogodnije strategije iz skupa od pet raspoloživih strategija za podešavanje brzine vazduhoplova uzimajući u obzir preference drugih vazduhoplova. Na kraju, uveden je kriterijum za određivanje brzine vazduhoplova, zasnovan na potrebnom vremenu dolaska (RTA - Required Time Arrival), kako bi celokupan sistem mogao da postigne zajednički prihvatljiv kompromis. Rezultati simulacije u tri klasična scenarija pokazuju da ovakav pristup ima jaku prilagodljivost i robusnost u rešavanju problema konflikta.



Sl. 2.12 – Zona detekcije, minimalna zona izbegavanja sudara i zona sigurnog sudara vazduhoplova [25]

Opisani sistemi i razmatrana problematika vezana za vazdušni saobraćaj u dosta slučajeva podrazumeva odlučivanje i donošenje odluka na osnovu trenutnih vrednosti nekih veličina i činjenica da li su one iznad ili ispod nekog praga. Drugim rečima, u ovakvim sistemima dve bliske situacije mogu proizvesti potpuno različite odluke. Ovakvu situaciju primena inteligentnih sistema baziranih na fazi-logici mogla bi da ublaži i kvalitativno podigne na viši nivo u velikom broju slučajeva.

## 2.2. Vodeni saobraćaj

Vodeni saobraćaj predstavlja značajnu granu saobraćaja koja se neprestano razvija kako u smislu pojavljivanja boljih i modernijih plovila sa boljim osobina, tako i u smislu poboljšanja postojećih i primeni novih prapatnih sistema koji vrše praćenje plovila, njihovo obaveštavanje i povećanje bezbednosti njihove plovidbe.

Povećavanje bezbednosti plovidbe plovnih objekata obezbeđuju i sistemi koji sprečavaju neželjene bliske kontakte plovila sa infrastrukturom plovnih puteva. Ovakvi sistemi se zasnivaju na detekciji plovnih objekata ili predmeta na plovnom putu.

Prvi laserski monitoring i vizuelni sistemi, dinamički modeli i detekcioni algoritmi prepreka i pokretnih objekata u saobraćaju su uvedeni pre više od 20 godina [26], [27], [28], [29].

Brojni monitoring sistemi, bazirani na RADAR (RADio Detection And Ranging), LIDAR (LIght Detection And Ranging) i LADAR (LASer Detection And Ranging) sistemima, koriste se za detekciju brodova i čamaca na moru, rekama, lukama i prevodnicama [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36].



Moderni vizuelni sistemi koriste napredne detekcione algoritme kako bi detektovali, identifikovali, pratili plovilo i predvideli njegovu putanju u realnom vremenu. Kako bi olakšali praćenje, oni imaju inteligentne algoritme za obradu informacija kao što su dužina, visina, tip plovila, geografska širina, geografska dužina, brzina, pravac kretanja i vreme. Stereovizija se može koristiti za detekciju vozila [37]. Međutim, pozicioniranje i procena širine su mnogo manje precizni u odnosu na sisteme zasnovane na laserskim skenerima (netačnost značajno raste sa povećanjem rastojanja stereo senzora). Ipak, ovakvi sistemi se primenjuju u slučaju razumnih rastojanja od objekta, kada jedan snimak može sadržati više plovila.

Osnovni princip stereovizije je taj da projekcija tačke 3D objekta ima jedinstveni par slika od dve kamere koje posmatraju istu scenu iz različitih uglova. 3D merenja dobijena stereo vizijskim sistemom i različitost leve i desne slike omogućavaju proračun udaljenosti objekta. Različitost slika opada kako se udaljenost povećava, upoređena sa osnovnom dužinom ili razdaljinom između kamera [37]. Sve te činjenice stereo vizuelne sisteme čine nedovoljnim za primenu u brodskim prevodnicama. Slično stereo vizuelnim sistemima, 3D LADAR detekcioni sistemi su nedovoljni za bliske ili male distance u brodskim prevodnicama iz razloga što su projektovani za detekciju objekata na velikim razdaljinama (npr. detakcija objekata u vazduhu [38]). Takođe, postoji i opseg vojnih 3D LADAR sistema (npr. Jigsaw LADAR senzorska tehnologija [39]) za detekciju objekata koji su kompleksni i zbog visoke cene teže primenljivi.

Novo prednosti koje daju laserski skeneri pružaju mogućnosti primene novih pristupa i rešenja za detekciju plovnih objekata. Laserski skeneri omogućavaju santimetarsko pozicioniranje i procenu širine i dubine, u slučaju da je strana objekta vidljiva [40]. Monitoring sistem zasnovan na laserskim skenerima i adekvatan algoritam mogu se koristiti za detekciju pozicije plovila u blizini vrata brodske prevodnice i za analizu saobraćajnog protoka. Laser skener tehnologija je korisna u širokom opsegu aplikacija [41], [42] [43]. Osnovna prednost laserskih skenera leži u širokoj skali vidljivih uglova i velikom rasponu distanci od nekoliko metara do nekoliko stotina metara.

Laserski skeneri koriste laserski zrak usmeravan rotacionim ogledalom. Zrak se širi u horizontalnoj ravni do prepreke koja ga reflektuje. Vreme do pojave reflektovanog talasa određuje distancu, dok intenzitet reflektovanog talasa daje informaciju o emisivnosti posmatrane tačke. Merenja vezana za svaku tačku se pamte kako bi formirala celokupnu sliku polja posmatranja. Skeneri koriste pulsni ili fazni metod. Pulsni metod se zasniva na merenju vremena od trenutka emitovanja impulsa do trenutka pojave reflektovanog talasa. Fazni metod se zasniva na merenju faznog pomaka između emitovanog i reflektovanog talasa od objekta.

Velika potreba za energijom u modernom svetu doprinela je izgradnji velikog broja električnih centrala. Veliki procenat elektrana otpada na hidro centrale. Izgradnja hidro centrala povlači za sobom izgradnju brana koje rečne tokove fizički prekida i onemogućava plovidbu kroz njih. U takvim slučajevima, u cilju obezbeđenja mogućnosti plovidbe, na branama se realizuju i brodske prevodnice. U okviru brodskih prevodnica postoje jedna ili više komora koje su odvojene vratima. Višegodišnja iskustva vezana za saobraćaj koji se odvija kroz brodske prevodnice su pokazala da postoji znatna opasnost od neželjenog kontakta (udara) između plovila i vrata brodske prevodnice. Uvažavajući ovu činjenicu problematika kojom se pokušava izbegavanje ovakvih konfliktnih situacija postala je dosta aktuelna. Kao rezultat tretiranja ove problematike nastao je i sistem koji služi za izbegavanje konfliktnih situacija između plovnih objekata i vrata brodske prevodnice [6].

Razvojem monitoring sistema ostvareno je automatizovano daljinsko nadgledanje saobraćaja plovnih objekata svih tipova kroz brodsku prevodnicu. Osnovni cilj monitoring sistema je prevencija od potencijalnog oštećenja plovnih objekata prilikom manipulacije vratima brodske prevodnice (od strane kapetana brodske prevodnice) kada se plovni objekat nalazi u opasnoj zoni (zoni u blizini vrata brodske prevodnice). Koncept sistema za daljinsko nadgledanje brodske prevodnice je razvijen sa ciljem da zadovolji sve aspekte monitoringa vodenog saobraćaja kroz brodsku prevodnicu: monitoring svih vrata brodske prevodnice, punjenje i pražnjenje komora, manipulaciju vratima, vreme dolaska i prolaska plovila kroz ravan posmatranja skenera, arhiviranje događaja, štampanje izveštaja o događajima, monitoring ciklusa prolaska plovila,

monitoring pojave smetnji koje algoritam isključuje iz razmatranja tretirajući ih kao neželjene objekte i td. [6]. Sistem je razvijen na bazi primene laserskih skenera koji predstavljaju kombinaciju predajnog i prijemnog elementa koji su smešteni u jedinstveno kućište, čime su realizovani kao kompaktni merni uređaji. Kod svakih vrata postavljena su dva skenera ispred i iza vrata. Za svaki skener definisanisana je vertikalna ravan posmatranja i u skladu sa dimenzijama poprečnog preseka prevodnice i minimalnog nivoa vode definisana je zona posmatranja.

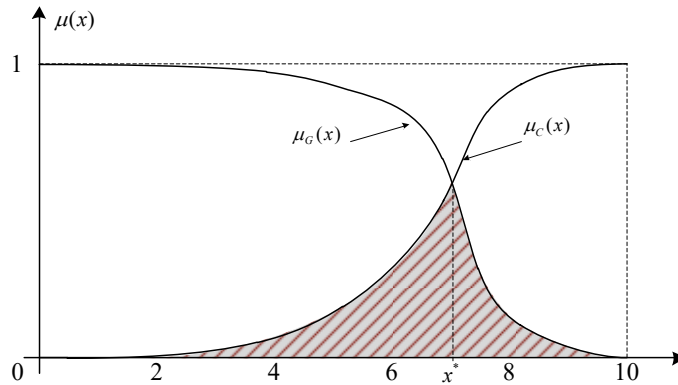
Delovi monitoring sistema za svaka vrata su: dva IR laserska skenera i kontroler sa ulazno-izlaznim modulom. Centralni deo monitoring sistema je industrijski PC računar sa kontrolom dodira (touch panel). Centralna aplikacija se izvršava na industrijskom računaru i prvenstveno njena uloga je da preko Ethernet mreže komunicira sa skenerima i kontrolerima. Na osnovu očitanih podataka sa skenera, centralna aplikacija vrši njihovu obradu u skladu sa detekcionim algoritmom. Kao rezultat obrade podataka, centralna aplikacija donosi zaključak da li je povređena zona posmatranja nekog od senzora od strane nekog plovnog objekta. U slučaju povrede zone posmatranja (tj. prisustva plovnog objekta), centralna aplikacija šalje odgovarajućem kontroleru komandu kojom se zabranjuje manipulisanje vratima. Detekcioni algoritam je formiran tako da prepoznaje situacije kada se u zoni posmatranja nađu tzv. „lažni“ plovni objekti (prouzrokovani pojavom zaprljane površine vode, dimom brodskih motora, kapljica kiše, ledenica grada, proletom jata ptica i td.) i da u tim situacijama ne sprečava manipulisanje vratima. Takođe, centralna aplikacija ima ulogu da merne podatke i ključne događaje i alarme smešta u bazu podataka, vizuelno prikazuje podatke i omogućava interakciju sa korisnicima.

Akvizicija merenja, obrada podataka i odgovorajuće upravljanje brodom prevodnicom predstavlja odličan primer inteligentnog sistema koji se može realizovati korišćenjem fazi logike kao metodološkog okvira. Između ostalog, jedan takav „živi“ sistem koji je isprojektovan i koji je već godinama u funkciji, pri čemu je autor ove disertacije bio deo projektantskog tima, se može smatrati značajnim doprinosom ove doktorske disertacije. Zbog toga je posebno poglavlje (6. poglavlje), posvećeno ovom problemu. Dodatni kvalitet u razvoju ovog sistema se ogleda u činjenici da nisu prihvaćena standardna rešenja za smetnje, koje nudi sofisticirani smart senzor (laserski skener SICK LMS 511), već je razvijeno nekoliko algoritama na bazi detekcije kvara i analizu potencijalnih smetnji iz sirovih informacija iz skenera. Paralelno sa razvojem ovih algoritama vršeno je fazi modelovanje i razvijen je fazi kontroler čiji algoritam radi paralelno sa prethodno pomenutim u cilju podizanja pouzdanosti.

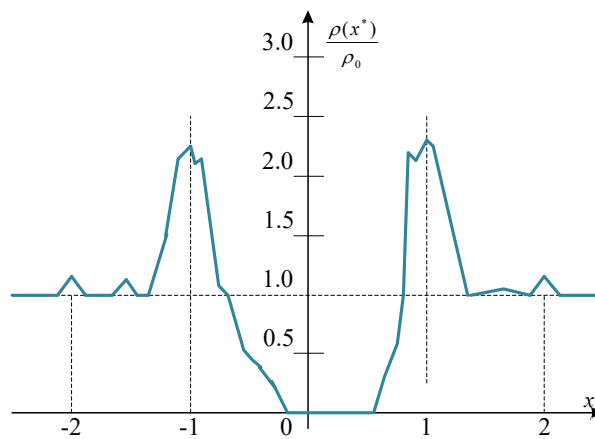
U mnogim slučajevima pa tako i u saobraćajnim procesima uloga ljudskog faktora (eksperta) je često nezamenljiva. U slučajevima kada se ekspertsko znanje čoveka može koristiti za donošenje automatizovanih odluka može se govoriti o ekspertskom sistemu. Kao prirodan način opisivanja znanja eksperta matematičkim modelom nameće se fazi logika, a time i fazi logički ekspertski sistemi kao okvir za donošenje automatizovanih odluka. Iz tog razloga, za formiranje automatizovanog odlučivanja, korišćena su iskustva kapetana i mornara kada su donosili odluke u cilju izbegavanja konfliktnih situacija na otvorenom moru. Na taj način je formiran ekspertski sistem za izbegavanje konfliktnih situacija na otvorenom moru [44]. Pojednostavljeno gledano odlučivanje eksperata u ovom slučaju se svodilo na želju da distanca od eventualnog mesta konflikta (DCPA, Distance to the Closest Point of Approach) bude dovoljno velika kako bi se izbegao sudar, ali ne prevelika kako se ne bi previše menjao kurs plovidbe. Posmatrani sistem donosi odluke na osnovu zahteva:

- **G:** *DCPA što veće to bolje*, kako bi se što sigurnije mimoišla dva plovila i
- **C:** *Promena DCPA što manja to bolje*, kako bi se izbegle prevelike promene kursa plovidbe čime bi se uštedeli i vreme i utrošeno gorivo za izbegavanje konflikta.

Ekspertska znanja kapetana i mornara sadržana su fazi skupovima G i C (Sl. 2.13) na osnovu kojih ekspertski sistem donosi odluke [44]. Na osnovu simuliranih 100 hiljada susreta sa manevarisanjem prikazana je raspodela DCPA (Sl. 2.14).



Sl. 2.13 – Fazi skupovi na osnovu kojih se donosi odluka o manevru [44]

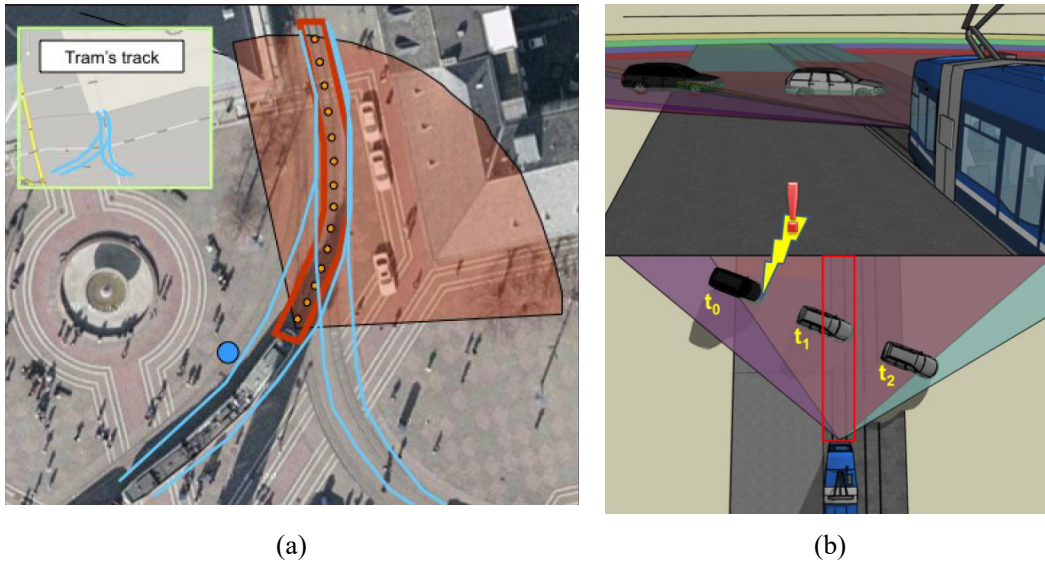


Sl. 2.14 – Raspodela DCPA (rezultat simulacije) [44]

Opisani sistemi i razmatrana problematika vezana za rečni saobraćaj upućuje na zaključak da primena inteligentnih sistema baziranih na fazi-logici u oblasti rečnog saobraćaja je smisljena i odgovarajuća u velikom broju slučajeva.

### 2.3. *Železnički saobraćaj*

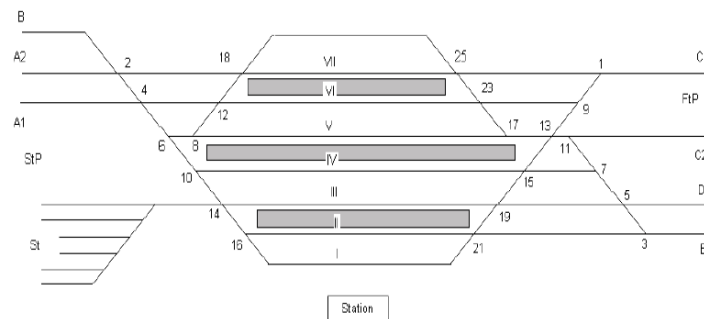
U radu [45] prikazan je TCAS primenjen u tramvajskom saobraćaju zasnovan na upotrebi laserskih skenera prvenstveno namenjenih za primenu u automobilskoj industriji (Ibeo Automotive). U tramvajskom vozilu se nalazi laserski skener koji snima teren ispred vozila (Sl. 2.15a). Na osnovu trenutnog snimka terena i predefinisanih digitalnih mapa, sistem donosi zaključak o eventualnoj konfliktnoj situaciji (Sl. 2.15b).



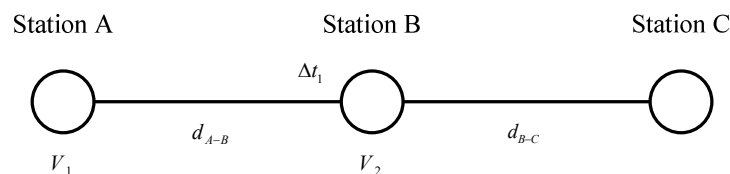
Sl. 2.15 – Primena laserskih skenera u TCAS za tramvajski saobraćaj [45]

U radu [46] prikazan je opis kompleksnog izbegavanja konfliktnih situacija u železničkom saobraćaju zasnovanog na fazi signaturama.

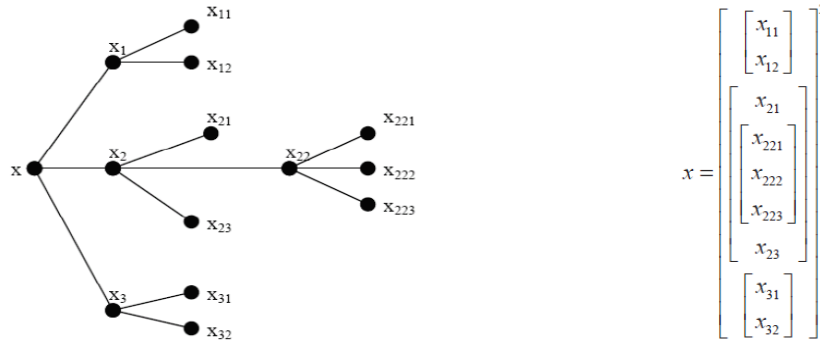
Železnički saobraćajni sistem i njegovi odgovarajući podsistemi, posebno stanica i upravljanje rasporedom, su izuzetno veliki i kompleksni sistemi koji sadrže mnoštvo kompleksnih strukturiranih podataka. Teorijsko i unapred planirano kontrolisanje saobraćaja se definiše za idealizovane situacije, ali realan život često pravi situacije koje odstupaju od idealnih. Kompleksnost saobraćajne konfliktno situacije uključuje neodređene uslove i nejasne informacije. Klasične metode ne mogu da rade ispravno pod ovim neodređenim uslovima. U ovom radu predložen je novi pristup za opisivanje ove složene konfliktno situacije koristeći fazi signaturu za prepoznavanje i opisivanje saobraćajnog konflikta u hijerarhijski strukturiranom maniru.



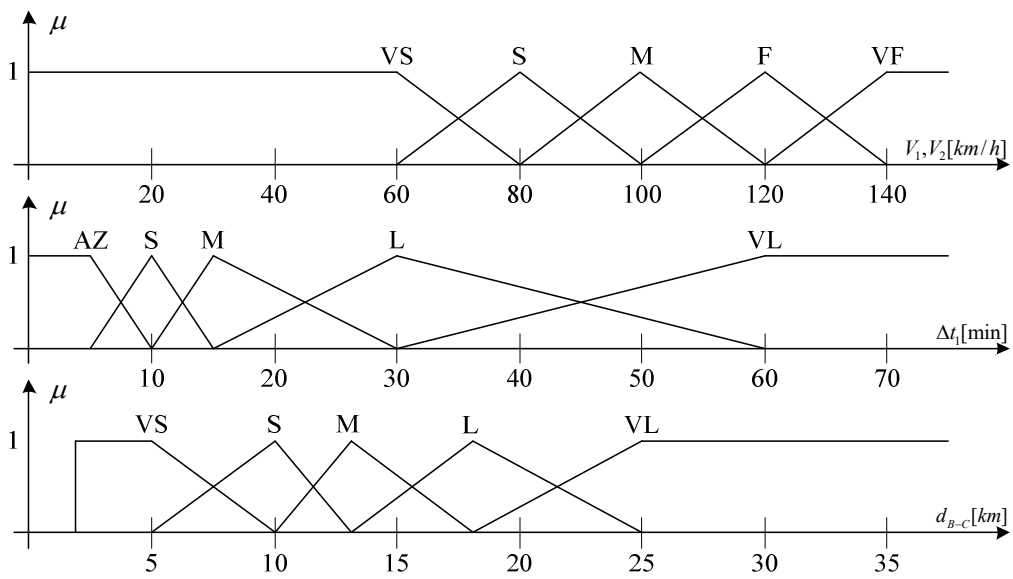
Sl. 2.16 – Stanica sa 8 traka [46]



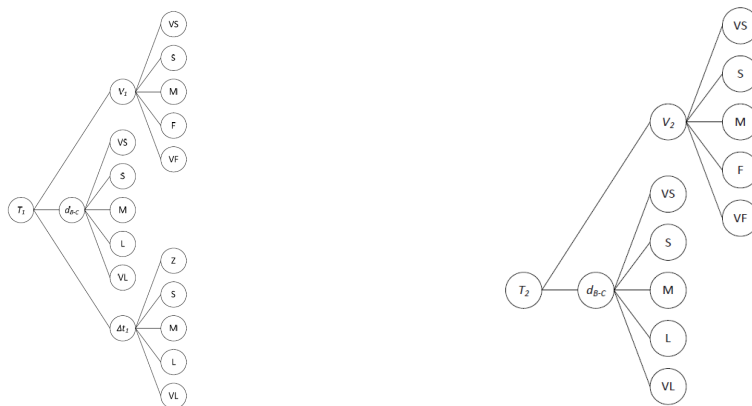
Sl. 2.17 – Pod-mreža sa tri stanice [46]



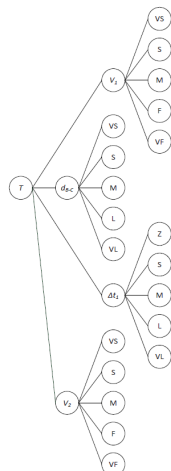
Sl. 2.18 – Primer strukture fazi signature [46]



Sl. 2.19 – Particije fazi promenljivih  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $\Delta t_1$ ,  $d_{B-C}$  [46]



Sl. 2.20 – Fazi signature prvog i drugog voza [46]



Sl. 2.21 – Fazi signature objedinjenog voza [46]

Ovakvom postavkom sistem za odlučivanje ima mnogo manje fazi pravila nego pri klasičnom pristupu. Ovo za posledicu ima znatno skraćanje potrebnog vremena za proračun.

Opisani sistemi i razmatrana problematika vezana za železnički saobraćaj u dosta slučajeva podrazumeva odlučivanje i donošenje odluka na osnovu trenutnih vrednosti nekih veličina i činjenica da li su one iznad ili ispod nekog praga. Drugim rečima, u ovakvim sistemima dve bliske situacije mogu proizvesti potpuno različite odluke. Ovakvu situaciju primena inteligentnih sistema baziranih na fazi-logici mogla bi da ublaži i kvalitativno podigne na viši nivo u velikom broju slučajeva.

#### 2.4. *Drumski saobraćaj*

Disertacija se u užem smislu bavi realizacijom inteligentnog sistema za upravljanje saobraćajem u kome se prvenstveno teži izbegavanju konfliktnih situacija. Izbegavanjem konfliktnih situacija obezbeđuje se povećanje bezbednosti svih učesnika u saobraćaju kao primarni cilj, ali i pored toga se povećava i efikasnost saobraćajnog procesa u smislu njegovog odvijanja sa što manje zastoja i gužvi.

Koncept saobraćajnih konflikata su prvi izložili Perkins i Harris još daleke 1968. godine [47] kao alternativu sirovim (često zastrašujućim) podacima o sudaranjima. Njihov cilj bio je definisanje saobraćajnih događaja ili incidentata koji se često pojavljuju i povezani su sa sudaranjima, a mogu se izdvojeno analitički posmatrati.

Postoji veliki broj pristupa analizi saobraćajnih problema koji se odnose na drumski saobraćaj. S obzirom na današnji nivo nauke i tehnike, realtivno lako je obraditi veliki broj podatka. Ono što jeste problem jesu izvori podataka i činjenica, kao i načini i uslovi pod kojima su oni dobijeni. Priličan broj metoda složene analize incidentnih situacija, koje se događaju u drumskom saobraćaju, su multidisciplinarne prirode. Međutim i takav pristup treba u sebi da sadrži neke okvire kako bi rezultati analiza bili relevantni. Npr. analiza drumskog saobraćaja može da bude sužena na pojedinu kategoriju incidentata kao npr analiza koja je sprovedena od stručnog tima Danske i koja je uzela u obzir samo situacije koje se odnose na direktne (čeoone) sudare, incidente u koje su uključeni pojedinačna vozila, incidentne koji su se dešavali prilikom skretanja ulevo i incidentne u koje su uključeni kamioni [48]. Multidisciplinarnost se u ovom istraživanju ogledala u tome da se pored tehničkih parametara (uslovi vožnje, brzina, uslovi puta i sl.) u obzir uzimale izjave učesnika i svedoka incidentata. Za razliku od svojih danskih kolega, sasvim drugačiji pristup

u istraživanju incidenata u drumskom saobraćaju su imali stručni timovi iz Finske [49]. Oni su za glavni parametar u selekciji incidenata u drumskom saobraćaju uzimali samo incidentne sa smrtnim ishodom. Istraživanja finskih stručnjaka su obavljena za potrebe osiguravajućih kompanija, a u saradnji sa nadležnim organima zaduženim za drumski saobraćaj. Upravo ovakav pristup, u kome se preklapaju interesi različitih organizacija i struktura, ukazuje na značaj problema i pitanja koja se bave direktno ili posredno, incidentnim situacijama u drumskom saobraćaju.

Heterogenost saobraćaja stvara probleme koji se ogledaju u smanjenim brzinama, kašnjenjima i čak nezgodama u raskrsnicama. Razlog tome je što veliki broj različitih tipova vozila koristi iste puteve. Ova raznolikost tipova vozila koja učestvuju u saobraćaju je najviše izražena u raskrsnicama koje se nalaze u zonama u kojima se spajaju urbane i ruralne oblasti. U cilju unapređenja bezbedonosnih uslova u raskrsnicama, sve veći broj saobraćajnih bezbedonosnih dijagnoza i ocena su preduzete od strane različitih organizacija [50]. Proces poboljšanja generalno uključuju tri faze:

- procena bezbedonosnog uslova i dijagnostikovanje nedostatka bezbednosti na posmatranoj saobraćajnoj lokaciji,
- predlog i primena mera za poboljšanje i
- procena efikasnosti preduzetih bezbednosnih mera.

Može se primetiti da faza 1. i faza 3. uključuju ocenu saobraćajne bezbednosti. Generalno ocena ili evaluacija bezbednosti saobraćaja u raskrsnicama se može obaviti na dva načina:

- direktno (posmatranjem ponašanja saobraćajnih učesnika u raskrsnici i beleženjem incidentnih situacija) i
- indirektno (najčešće korišćenjem saobraćajnih konfliktnih tehnika kao dobre zamene u slučajevima kada nema dovoljno o podataka o realnim incidentima).

Saobraćajne konfliktna tehnika (TCT, Traffic Conflict Technique) mogu biti dobra zamena u slučajevima kada nema dovoljno podataka o nezgodama na osnovu kojih bi se mogli oceniti bezbednosni uslovi na saobraćajnoj lokaciji [50]. TCT su inicijalno razvijene 1967. godine u formi skupa definicija i procedura za posmatranje saobraćajnih konflikata u raskrsnicama. Perkins i Harris su 1968. godine identifikovali konfliktna šablone povezane sa odgovarajućim tipovima nezgoda. Spicer je 1971. godine definisao ozbiljan konflikt kao situaciju kada vozilo iznenada brzo smanjuje svoju brzinu ili menja saobraćajnu traku kako bi izbeglo sudar. William je 1972. godine ocenio saobraćajnu konfliktnu tehniku razvijenu od strane laboratorije kompanije General Motors u saradnji sa odeljenjima za auto-puteve država Washington, Ohio i Virginia. Spicer je 1972. godine ispitao varijacije nezgoda i konflikata, i primetio veliku korelaciju među njima. U vezi saobraćajnih konflikata, dalja istraživanja preduzeo je Spicer 1973. godine posmatrajući šest raskrsnica pri čemu je zaključio da je indikativno da ozbiljan konflikt i frekvencija nezgoda sa povredama na različitim raskrsnicama su bili u pozitivnoj vezi.

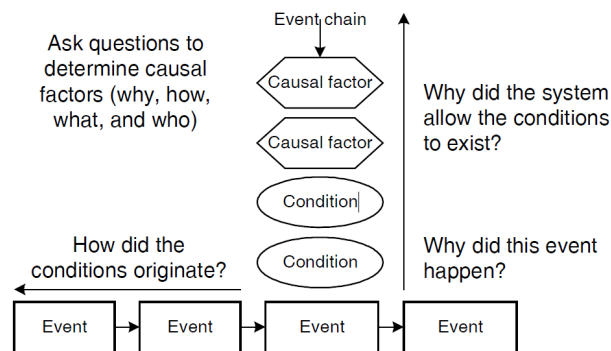
Hyden je 1975. godine predstavio uporedni izveštaj o nezgodama, uključujući i povrede, sa posmatranim ozbiljnim konfliktima na 50 raskrsnica i našao je korelaciju između konflikata i nezgoda zasnovanu na parametrima poput brzine. Cooper i Ferguson su 1976. godine razvili simulacioni model za procenu konflikta u T-raskrsnici.

Subjektivna zapažanja saobraćajnih konflikata i procene njihove ozbiljnosti su sprovedene, na različite načine, u različitim zemljama. Malaterre je 1979. godine, na osnovu studija iz pet različitih zemalja, pokazao da postoji značajan nivo saglasnosti u identifikaciji konflikata. Međutim, ne postoji saglasnost u definicijama klasa ozbiljnosti. Glauz 1980. godine sprovodi opsežno istraživanje nad konfliktima (koji su u skladu sa standardnim definicijama), prefinjenim metodama prikupljanja podataka i njihovim primenama u cilju procene broja nezgoda u raskrsnicama. Migletz je 1985. godine demonstrirao primenu saobraćajnih konflikata u proceni budućih saobraćajnih nezgoda. Uputstva koja su napisali Parker 1988. godine i Zegger 1989. godine obezbeđuju detalje

za sprovođenje studija o saobraćajnim konfliktima. Crowe 1990. godine veoma veliku srednju vrednost broja konflikata na trojnim nesignaliziranim raskrsnicama [51], [52].

Većina ranijih istraživanja je pokazala da podaci o saobraćajnim konfliktima se mogu efikasno iskoristiti za predikciju budućih saobraćajnih nezgoda. U radovima [53], [54], [55], [56], [57], [58] su prikazane metode procene bezbednosti na osnovu primena saobraćajnih konfliktnih tehnika (TCT).

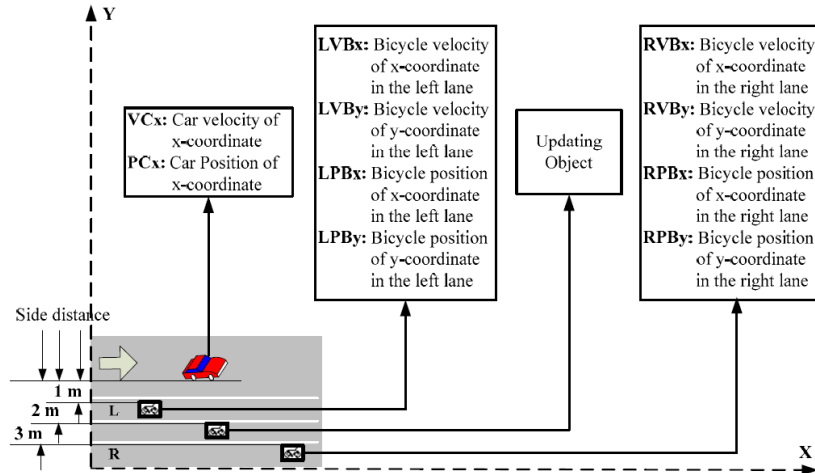
Poslednjih nekoliko decenija se intenzivno razvijaju metode koje se bave ispitivanjem incidentnih situacija. Svaka od tih metoda ima različite oblasti primene i različite prednosti i mane, zato se one često kombinuju da bi se potisli njihovi nedostaci, a naglasile njihove prednosti. Na Sl. 2.22 [1] je prikazan dijagram toka događaja i analize uzročnih faktora. Analiza događaja i uzročnih faktora zahteva deduktivnu analizu kako bi se utvrdilo koji su događaji doveli do nesreće [59], [24]. Danas postoje mnoge metode i tehnike koje se primenjuju u procesu analize incidenata.



Sl. 2.22 - Dijagram toka događaja i analize uzročnih faktora [59]

Pitanje velikog broja parametra i njihove selekcije, odnosno rangiranja, je posebno važno sa aspekta praktične realizacije upravljačkih i nadzornih sistem koji se koriste u saobraćaju. Da bi se uspešno obavila rangiranja izmerenih parametara i dodeljvanje prioriteta njima prema datim okolnostima (koje se takođe menjaju u vremenu), često je neophodno vršiti simulacije i modelovati različite saobraćajne situacije sa različitim učesnicima u saobraćaju. Dobra ilustracija složenosti problematike vezane za broj i izbor parametara se može videti kroz primer konflikta između vozila i bicikla [60]. U ovom modelu su uzete u obzir dve ključne situacije: trenje usled usporavanja vozila i naglo zaustavljanje vozila. U uslovima niskog intenziteta saobraćaja prevladavaju konfliktne situacije koje se mogu modelovati preko trenja, međutim, u situacijama intenzivnog saobraćaja prevladavaju slučajevi naglog kočenja. Poseban problem predstavljaju situacije kada saobraćaj iz niskog intenziteta prelazi u tzv. “gust” saobraćaj (saobraćaj visokog intenziteta) Da bi se dobili odgovori na takav problem, obično je potreban određeni model simulacije jer obično ne možemo da posmatramo i zabeležimo sve moguće konfliktne scenarije. Korišćen je model kod koga je prostor posmatranja u obliku mreže ćelija koje mogu biti u jednom od konačnog broja stanja (CA - Cellular Automaton). Na Sl. 2.23 dat je zbirni prikaz velikog broja promenljivih i parametara koji učestvuju u formiranju modela koji opisuje pomenute situacije.

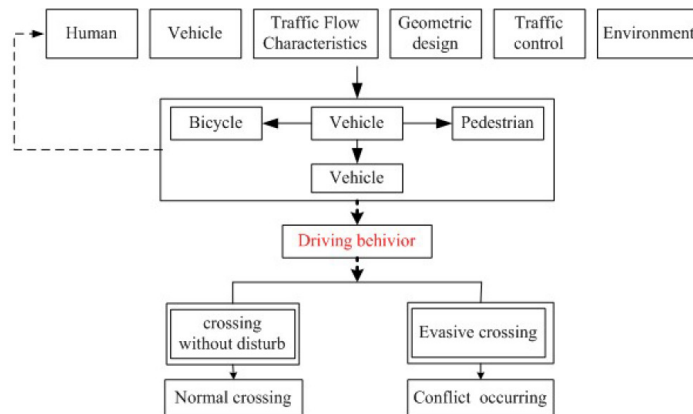




Sl. 2.23 – Zbirni prikaz promenljivih i parametara korišćenih u CA modelu [60]

Problemi drumskog saobraćaja na autoputevima se posebno razmatraju iz mnogo aspekata. S obzirom na veće brzine na autoputevima, broj fatalnih ishoda u incidentnim situacijama, između dva ili više vozila, je veći. Među brojnim modelima i pristupima, nalaze se i modeli koji treba da realno predstave mesta uključenja i isključenja na autoputevima [61], zatim mesta i deonice na kojima se sužava autoput (smanjuje se broj saobraćajnih traka jednog smera) ili širi (povećava se broj saobraćajnih traka jednog smera) [62], jer su to mesta koje su prepoznata kao rizična. Danas su razvijeno brojni programski paketi koji simuliraju razne saobraćajne situacije, uključujući i prethodno pomenute.

Moderni sistemi daljinskog nadzora, praćenja i odlučivanja, poslednje generacije, u sebi sve češće sadrže i posebne algoritma koji analiziraju ponašanja učesnika u saobraćaju. Ovi algoritmi su počeli da se razvijau pre desetak godina, ali su razvojem hardverskih mogućnosti današnjih sistema, posebno dobili na značaju jer ih je moguće uspešno implementirati i praktično primeniti. Na Sl. 2.24 je prikazan blok dijagram koji ilustruje tok dešavanja konfliktne situacije [63].



Sl. 2.24 - Blok dijagram toka dešavanja konfliktne situacije [63]

Dijagram sa slike veoma dobro ukazuje da je ponašanje pojedinih učesnika u saobraćaju od ključne važnosti za estimaciju saobraćajne situacije. Različite osobine i temperamenti vozača, različito okruženje u kojem voze, kao i različite karakteristike vozila kojim upravljaju za posledicu imaju različite rezultate praćenja, obrade i različite zaključke koji se dobijaju od nadzornih sistema.

U zavisnosti od primenjenih algoritama, mogu se dobiti različite izlazne funkcije na osnovu kojih se mogu doneti različiti zaključci za jednu te istu situaciju. Upravo prethodno rečeno daje za pravo da se nastavi sa razvojem algoritama koji u obzir uzimaju ponašanje različitih, ali i veoma sličnih učesnika u saobraćaju. Kao rezultat primene ovih algoritama, očekuju se poboljšanja u donošenju zaključaka koji se mogu uspešno primeniti, kako u automatskim vozilima bez vozača, tako i u poluautonomnim sistemima koji vozačima sugerišu buduće aktivnosti i radnje u toku vožnje.

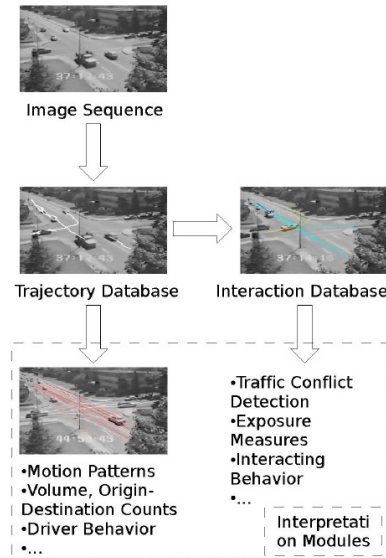
Već je pomenuto da su prvi monitoring sistemi, bazirani na obradi slike i video nadzoru primenjivani u avio saobraćaju. Međutim, danas nema raskrsnice u većim urbano razvijenim gradovima koje nisu pokrivene video nadzorom i sistemima za praćenje i regulisanje saobraćaja putem kamera i samostalnih sistem snimanja, analize, odlučivanja i upozoravanja. Razvoj sistema za automatsku analizu i procenu sigurnosti baziranih na obradi slike se intenzivno odvija poslednjih desetak godina. Ovakva razvojna klima je stvorena razvojem snažnih višejezgarnih procesora i paralelnog procesiranja čime su postignute velike brzine obrada podataka. Sadašnje brzine obrade slika omogućavaju automatsko donošenje odluka na bazi rezultata tih obrada i implementiranih složenih algoritama, čime se postiže, sa aspekta saobraćajnih događaja, "istovremeno" generisanje alarma, slanje upozorenja i sl. drugih korisnih akcija koje značajno podižu sigurnost i pouzdanost saobraćaja. Većina primenjenih algoritama za obradu podataka i donošenje odluka je bazirana, pored ostalog, na izračunavanju verovatnoća i predviđanju potencijalnih incidentnih situacija. Uprkos potencijalnim prednostima automatske analize sigurnosti saobraćaja zasnovane na video senzorima, postojeća ograničenja u ovakvom pristupu direktno utiču na bezbednost na putevima, odnosno, uprkos značajnom napretku u razvoju senzora i algoritama, moderni monitoring sistemi nisu dostigli nivo apsolutne samostalnosti u pojedinim situacijama kao što su npr. velike saobraćajne gužve na raskrsnicama, kvarovi signalizacije i gužve prouzrokovane tim kvarovima i sl. Monitoring sistemi se tradicionalno oslanjaju na dva nivoa modula [64]:

- video module za detekciju učesnika u saobraćaju i praćenje njegovog kretanja i
- interpretacione module za detekciju konfliktnih i incidentnih situacija.

Novina i unapređenje ovog pristupa se postiže:

- uvođenjem baza podataka koje čuvaju podatke o putanjama kretanja koji se dobijaju iz video modula i
- uvođenjem baza podataka sa podacima koji su dobijeni kao rezultat obrade primenjenog algoritma koji, preko velikog broja merenih i praćenih parametara (rastojanje između vozila, pojedinačne brzine i dr.) računa verovatnoću sudara i druge indikatore potencijalnih opasnosti.

Ovakav pristup zahteva uvođenje neuralnih mreža i njihovu sposobnost da monitoring sistemi sami uče na osnovu velikog broja snimljenih i obrađenih situacija. Na Sl. 2.25 prikazan je blok dijagram modularnog vizuelnog sistema za analizu bezbednosti puteva [64].



Sl. 2.25 – Prikaz modularnog vizuelnog sistema za analizu bezbednosti puteva [64]

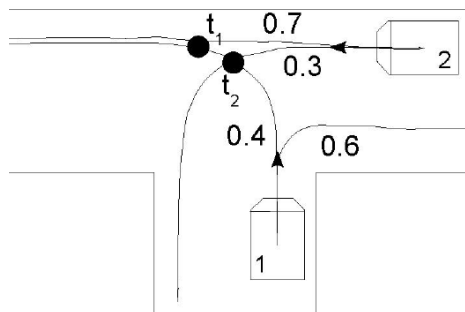
U radu [64] opisan je metod računanja verovatnoće sudara u okviru automatizovanih sistema za ispitivanje sigurnosti zasnovanih na vizuelnim senzorima. Sistem je implementiran za procesiranje video podataka, detektovanje i praćenje vozila po trakama i analizu njihovih interakcija. Oblici kretanja su potrebni za predikciju pokreta vozila i računanje njihove verovatnoće sudara sa drugim vozilima.

Ako se posmatraju učesnici u saobraćaju  $A_1$  i  $A_2$  tada se do procene verovatnoće njihovog sudara [65] može doći primenom izraza:

$$P(\text{Collision}(A_1, A_2) | Q_{1,t \leq t_0}, Q_{2,t \leq t_0}) = \sum_{i,j} P(H_i | Q_{1,t \leq t_0}) \cdot P(H_j | Q_{2,t \leq t_0}) \cdot e^{-\frac{\Delta_{i,j}^2}{2\sigma^2}} \quad (2.10)$$

gde su  $Q_1$  i  $Q_2$  trajektorije koje su učesnici prešli do trenutka posmatranja  $t_0$ ,  $H_i$  i  $H_j$  su moguće trajektorije kretanja nakon trenutka posmatranja i  $\Delta_{i,j}$  vreme do sudara dva vozila ukoliko se kreću putanjama  $H_i$  i  $H_j$ .

Na Sl. 2.26 prikazan je primer T raskrsnice. Posmatranjem je utvrđeno za vozilo  $A_1$  da je verovatnoća skretanja udesno 0.6 i ulevo 0.4, a za vozilo  $A_2$  verovatnoća skretanja ulevo iznosi 0.3 i kretanja pravo iznosi 0.7. Tada je procena verovatnoće sudara data u izrazu (2.11). Mogu se primetiti dve moguće tačke sudara u trenucima  $t_1$  i  $t_2$ .



Sl. 2.26 – Primer T raskrsnice [64]

$$P = 0.4 \cdot 0.7 \cdot e^{-\frac{(t_1 - t_0)^2}{2\sigma^2}} + 0.4 \cdot 0.3 \cdot e^{-\frac{(t_2 - t_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.11)$$

Inkrementalni algoritam za prepoznavanje prototipova trajektorija kao oblika kretanja prikazan je na Sl. 2.27 i svodi se na određivanje sličnosti sa objektima tipa LCSS (Longest Common Sub-Sequence). Ulazni parametri algoritma su skup trajektorija  $Q = \{Q_i\}$ , dozvoljena udaljenost podudaranja  $\varepsilon$  i maksimum LCSS udaljenosti podudaranja dve trajektorije  $\delta \in [0,1]$ , dok je izlazni rezultat skup prototipova traektorija  $P = \{P_i\}$ .

```

for all  $Q_i$  from  $Q$ 
{
  for all  $P_j$  from  $P$ 
  {
    Compute  $DLCSS_\varepsilon(Q_i, P_j)$ ;
    If  $DLCSS_\varepsilon(Q_i, P_j) < \delta$  and ( $P_j$  shorter than  $Q_i$ )
    {
       $P_j$  is removed from  $P$ ;
    }
    If  $Q_i$  didn't match any prototype or  $Q_i$  matched at least one shorter prototype
    {
       $Q_i$  is added to  $P$ ;
    }
  }
}

```

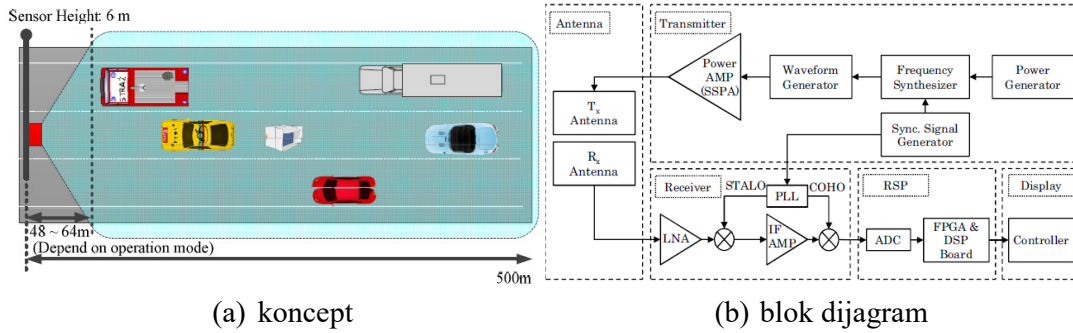
Sl. 2.27 – Inkrementalni algoritam za prepoznavanje prototipova trajektorija [64]

Jezgro ovog sistema je implementirano pomoću besplatne biblioteke za kompjutersku vizuelizaciju OpenCV (Open Source Computer Vision Library) [66]. Biblioteka OpenCV poseduje interfejsa za jezike C++, C, Python i Java, podržava platforme Windows, Linux, Mac OS, iOS i Android.

Pored primene vizuelnih senzora i sistema u cilju nadgledanja drumskog saobraćaja i sprečavanja incidentnih situacija koriste se i drugi sistemi zasnovani na drugim vrstama senzora. U [67] opisan RWR (Road Watch Radar) sistem koji se zasniva na primeni impulsnih dopplerovih radara. Koncept RWR sistema i funkcionalni blok dijagram prikazani su na Sl. 2.28. Rastojanje vozila i/ili nepokretnih objekata na putu se određuje emitovanjem impulsa i merenjem vremena nakon koga se pojavljuje reflektovani talas. Nakon prijema reflektovanog talas (impulsa) vrši se njegova digitalna obrada prema blok dijagramu prikazanom na Sl. 2.29. Kao rezultat digitalne obrade signala dobija se razdvajanje detekcija:

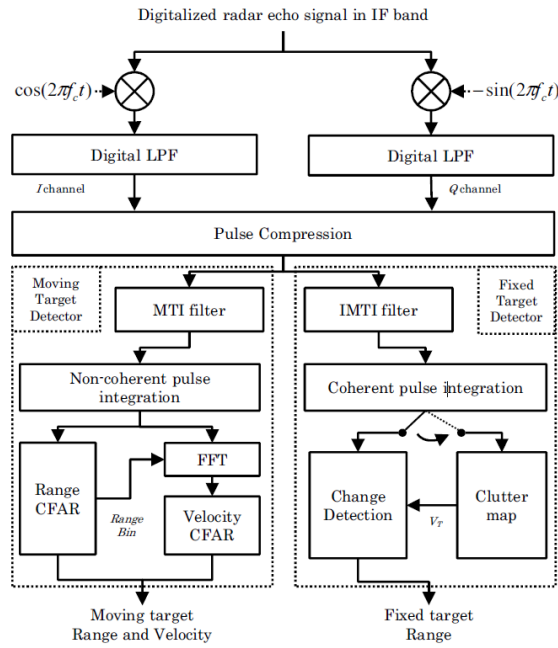
- pokretnih vozila sa njihovim pozicijama i brzinama i
- nepokretni (fiksni) objekti sa njihovim pozicijama.

Detekcija pokretnih vozila se obavlja primenom MTI (Moving Target Indicator) filtriranja, a nepokretni (fiksni) objekti primenom IMTI (Inverse MTI) filtriranjem.



(a) koncept (b) blok dijagram

Sl. 2.28 – RWR sistem [67]

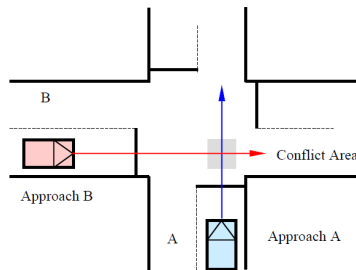


Sl. 2.29 – Digitalna obrada eho signala [67]

Detekcija pokretnih i nepokretnih objekata primenom RWR sistema na putevima (posebno na autoputevima) može biti od koristi u monitoringu i analizi saobraćaja, ali i u povećavanju bezbednosti i izbegavanju konflikata prikazivanjem obaveštenja o opasnosti od prebrze vožnje i/ili pojavi nepokretnih/sporopokretnih prepreka na putu.

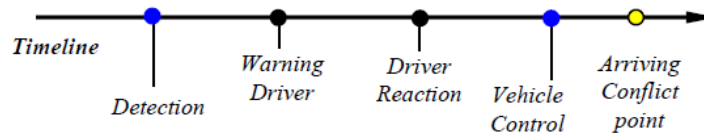
Tokom prethodne dve dekade u sistemima za izbegavanje konfliktnih situacija na raskrscima korišćeni su razni senzori, bežične komunikacije i razvijane su mnoge metode obrade u cilju prepoznavanja eventualnog CPC (Crossing Path Collisions) događaja. Na osnovu prepoznavanja CPC događaja predlagani su načini asistencija vozačima (poput obaveštenja na komandnoj tabli vozača) u cilju potpune eliminacije određenih tipova sudara ili smanjenja njihovih događanja na minimum. U radu [68] prikazan je pristup za procenu rizika i formiranje strategije obaveštavanja, u okviru TCAS primenjenog na raskrscima, zasnovan na teoriji verovatnoće. Takođe, opisan je realizovani simulator (pomoću programskog alata VisSim [69]) pomoću koga je obavljena verifikacija prikazanog pristupa.

Verovatnoća CPC događaja (Sl. 2.30) računa se sa pretpostavkom kretanja vozila konstantnom brzinom čija je vrednost slučajna promenljiva uniformne raspodele.

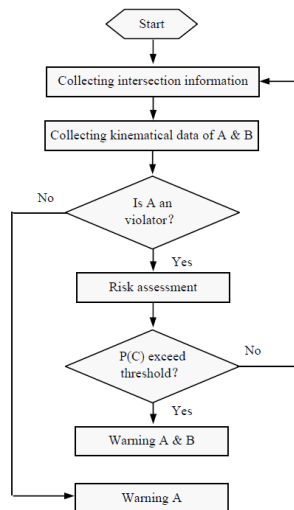


Sl. 2.30 – CPC događaj [68]

Kada verovatnoća CPC događaja pređe granicu sistem prikazuje obaveštenje vozaču/vozačima. Nakon obaveštenja odvija se niz događaja (Sl. 2.31) kojima se izbegava sudar. Algoritam obaveštavanja prikazan je na Sl. 2.32.



Sl. 2.31 – Niz događaja kojima se izbegava sudar [68]



Sl. 2.32 – Algoritam obaveštavanja [68]

Zbog vrlo brzog razvoja tehnoloških procesa izrade senzora i elektronskih komponenata može se pretpostaviti da će u skorijoj budućnosti većina vozila biti opremljena GPS prijemnicima, raznim senzorima kao što su radar, lidar, kamera, žiroskop i td. Pomoću ovih senzora (npr. preko CAN - Controller Area Network magistrale) vozila će imati na jednom mestu očitane podatke o poziciji, brzini, ubrzanju, pritisku kočnice i td. Pored prisustva velikog broja raznih tipova senzora može se predvideti da će vozila biti opremljena komunikacionim modulima, poput DSRC (Dedicated Short-Range Communication) radio modula, koji će omogućavati komunikaciju sa drugim vozilima u blizini, ali i sa uređajima koji pripadaju okolnoj putnoj infrastrukturi. U radu [70] prikazana je hibridna arhitektura sa uzajamnim dejstvom centralizovane koordinacije i distribuirane slobode preuzimanja aktivnosti. U analizama pretpostavlja se da se sistem realizuje sa

pametnim vozilima na pametnim putevima i raskrsnicama na kojima nema svetlosne signalizacije i stop znakova. Preciznim i opširnim matematičkim formalizmom razmatran je način izbegavanja konfliktnih situacija u kolovoznoj traci, a potom je razmatran i način izbegavanja konfliktnih situacija u raskrsnici. Na taj način je predložen hibridni sistem koji primenjuje jednu strategiju kada se vozila kreću kolovoznom trakom (između raskrsnica), a kada se vozila nađu u raskrsnici tada se primenjuje druga strategija.

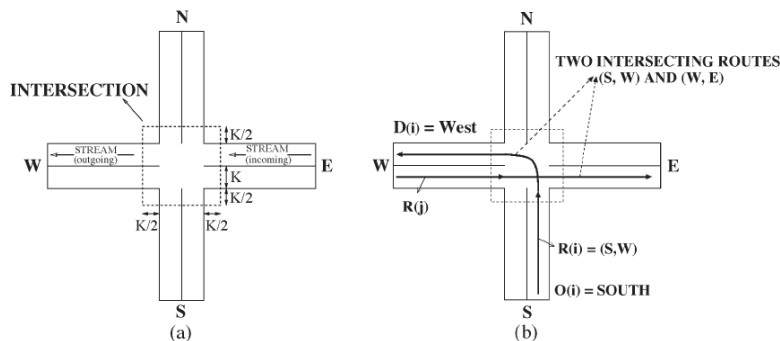
U cilju izbegavanje konfliktnih situacija u kolovoznoj traci predložena je strategija izbegavanja konflikta u slučaju ograničenja mogućeg ubrzanja vozila, a da se pritom ne naruši bezbednost. U ovom delu hibridnog sistema podrazumeva se da vozila komuniciraju međusobno ne koristeći okolnu-fiksnu saobraćajnu infrastrukturu. Posebno je razmatrana robusnost strategije u odnosu na pojave džitera pri očitavanju senzora, kašnjenja u očitavanju senzora, kašnjenju u zadavanju komandi aktuatorima, gubitku pojedinih paketa pri komunikaciji i šumu merenja.

U cilju izbegavanja konfliktnih situacija u raskrsnicama predložena je strategija koja predviđa izvršenje niza operacija prikazanih na Sl. 2.33. U ovom delu hibridnog sistema podrazumeva se da vozila komuniciraju sa centralnim kontrolerom. Na Sl. 2.34 prikazana je definicija zone raskrsnice i rute kretanja.

Prolazak vozila kroz raskrsnicu se obavlja u nekoliko faza. Pri približavanju vozila raskrsnici, vozilo se obraća centralnom kontroleru sa svojom namerom prolaska kroz raskrsnicu. Na osnovu tog zahteva i trenutne situacije na raskrsnici, kontroler određuje vremenski interval (time slot) koji dodeljuje vozilu. Nakon toga vozilo koriguje svoje kretanje kako bi prošlo kroz raskrsnicu u dodeljenom vremenskom intervalu.

STAGE	EVENT
1	Car enters the system.
2a	Car requests a slot when it is within communication range of the scheduler.
2b	Centralized scheduler allocates a time slot as per Definition 6.
3	If car is sufficiently far away from the intersection, it only maintains single lane collision avoidance. It ensures safety w.r.t the car immediately in front, even if the car in front executes maximum braking.
4	If it is close enough to the intersection, car checks if it can cross the intersection within its time slot while maintaining collision avoidance with potential downstream cars.
5a	If the car cannot cross the intersection while conforming to its time slot, it prepares to come to a stop at the intersection.
5b	A car that has missed its time slot is allocated a new time slot, as per the reallocation policy in Definition 7. Go to Stage 4.
6	Once the car exits the intersection, it maintains single lane collision avoidance

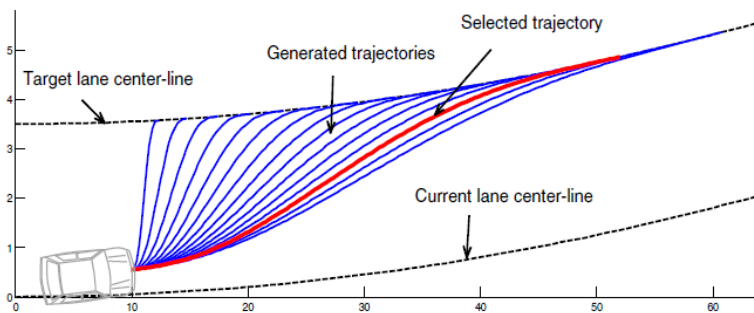
Sl. 2.33 – Operacije u okviru inteligentne raskrsnice [70]



Sl. 2.34 – Definicija raskrsnice i njenih ruta [70]

U radu [71] prikazan je metod procene rizika u okviru CAS (Collision Avoidance Systems) primenjenog u putničkom saobraćaju. Metod se zasniva na predikciji stanja saobraćaja u okolini vozila u bliskoj budućnosti. Metod vrši propagaciju poznate kovarijanske matrice greške trenutne pozicije vozila razmatrajući lokalnu aproksimaciju prediktovane trajektorije. Ovo omogućava procenu rizika za ostvarenje konfliktne situacije vozila sa razmatranim objektom. Za razliku od metoda gde se računaju TTC (Time To Collision) ili CPA, ovde se vrši procena verovatnoće sudara.

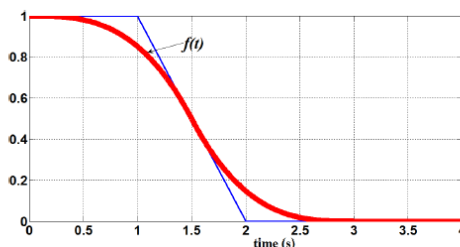
Za predikciju trajektorije se koristi dva modela MRM (Maneuver Recognition Module) i CYRA (Constant Yaw Rate and Acceleration). Procena zasnovana na MRM modelu bira onu trajektoriju koja je optimalna sa stanovišta kriterijumske funkcije koja minimizuje oštra skretanja i nagla bočna ubrzanja koja znatno utiču na komfor putnika (Sl. 2.35). Sa druge strane, procena zasnovana na CYRA modelu se bazira na pretpostavci da će se vozilo kretati konstantnim tangencijalnim i ugaonim ubrzanjima.



Sl. 2.35 – MRM procena trajektorije [71]

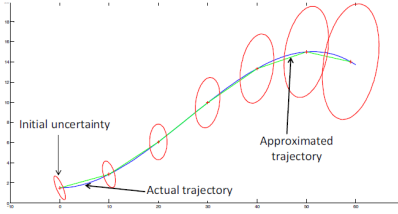
Do finalne predikcije trajektorije dolazi se kombinovanjem dve prediktovane trajektorije pri čemu se u početku forsira procena bazirana na CYRA modelu dok na kraju se forsira procena bazirana na MRM modelu. Primenom kombinacione funkcije (Sl. 2.36), finalna predikcija trajektorije se može izraziti sa:

$$T_{fin}(t) = f(t) \cdot T_{CYRA}(t) + (1 - f(t)) \cdot T_{MRM}(t) \quad (2.12)$$



Sl. 2.36 – Kombinaciona funkcija finalne procene trajektorije [71]





Sl. 2.37 – Propagacija inicijalne nesigurnosti duž trajektorije [71]

Na prediktovanoj trajektoriji vrši propagacija inicijalne nesigurnosti (Sl. 2.37). Procena verovatnoće rizika od eventualnog sudara određuje se primenom algoritma:

1.	Za svaki objekat u saobraćaju (uključujući i samo vozilo) izvrši se propagacija početne neodređenosti duž prediktovane trajektorije.
2.	Za svaki naredni trenutak odabiranja, računa se verovatnoća sudara vozila sa objektima u okolini. (Generiše se više slučajnih pozicija vozila i objekata. Tada se verovatnoća sudara procenjuje kao odnos broja sudara i ukupnog broja generisanih pozicija)
3.	Za svaki objekat se, kao izlazna veličina, definiše vremenska sekvenca procenjenih verovatnoća sudara.

U radu [72] prikazan je pristup za redukovanje potrebnog vremena za predviđanje eventualnog sudara. Naime, umesto korišćenja kinetičkih modela za proračun kretanja učesnika u saobraćaju, u ovom pristupu se posmatra konačan broj mogućih scenarija i **provera nastanka eventualnog sudara se svodi na upite iz look-up table**.

Kvantizacija se vrši po prostoru u kome se računa kretanje vozila, po poziciji vozila, po orijentaciji vozila i na kraju se oblici vozila kvantizuju svođenjem na najbliže odgovarajuće pravougaonike. Nakon izvršene kvantizacije, definišu se ulazne i izlazne veličine, potom se formira look-up tabela (Sl. 2.38).

---

**Algorithm 1** CONSTRUCT-LOOKUP-TABLE
 

---

**Input:**  $W_e, L_e, W_o, L_o$  : dimensions of both rectangles

**Output:**  $table[N_{\bar{X}}, N_{\bar{Y}}, N_{\Theta_e}, N_{\Theta_o}]$  : lookup table

```

1:  $ego \leftarrow \text{RECTANGLE}(W_e, L_e)$ 
2:  $other \leftarrow \text{RECTANGLE}(W_o, L_o)$ 
3: for all  $(i, j, k, l) \in N_{\bar{X}} \times N_{\bar{Y}} \times N_{\Theta_e} \times N_{\Theta_o}$  do
4:    $ego.\text{UPDATE\_AND\_ENLARGE}(0, 0, k)$ 
5:    $other.\text{UPDATE\_AND\_ENLARGE}(i, j, l)$ 
6:    $table[i_j, i_k, i_l, i_m] \leftarrow \text{MEASURE\_PEN}(ego, other)$ 
7: end for

```

---

Sl. 2.38 – Formiranje look-up table [72]

U radu je izvršena evaluacija opisanog metoda prema algoritmu prikazanom na Sl. 2.39. Ovaj algoritam je upoređivan sa algoritmom zasnovanom na *Teoremi o razdvajanju osa* (Separating Axis Theorem, [73]) kod koga su samo zamenjene linije 3, 4 i 5 sa odgovarajućim. Vreme izvršavanja mereno je čitanjem trenutne vrednosti vremena hardverskog časovnika korišćenjem WINDOWS' API QUERY PERFORMANCE COUNTER (QPC) koji ima rezoluciju 333 ns i vreme pristupa 30 ns. Oba algoritma su implementirana u jeziku C++ i kompajlirana pomoću MICROSOFT VISUAL C++ 2013 (optimizacioni nivo O2). Pokazalo se da je algoritam opisan u ovom radu oko 10-ak puta brži od algoritma zasnovanog na Teoremi o razdvajanju osa.

**Algorithm 3** MEASURING PROPOSED APPROACH

---

```

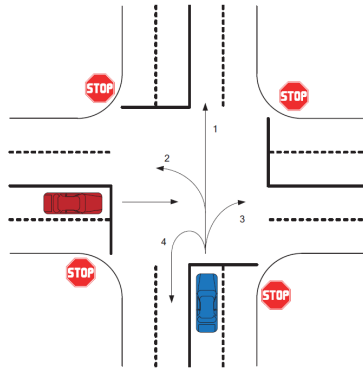
1:  $start \leftarrow GET\_CURRENT\_TIME()$ 
2: for all  $trial \in test$  do
3:    $(x, y) \leftarrow FIND\_RELATIVE\_POS(trial)$ 
4:    $(i, j, k, l) \leftarrow COMPUTE\_INDICES(x, y, \theta_e, \theta_o)$ 
5:    $dist \leftarrow table[i, j, k, l]$ 
6:    $status \leftarrow (dist = 0)$ 
7: end for
8:  $end \leftarrow GET\_CURRENT\_TIME()$ 
9:  $elapsed \leftarrow (end - start) / N_{trial}$ 

```

---

Sl. 2.39 – Evaluacioni algoritam [72]

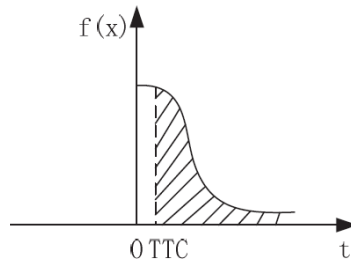
U sistemima čiji je cilj da se izbegnu konfliktna situacije i sudari u saobraćaju od koristi mogu biti informacije o verovatnoći nastanka konflikta u slučaju odvijanja pojedinih scenarija. Tako u radu [74] prikazan je metod za proračunavanje verovatnoće sudara dva vozila u raskrsnici. Pozicije vozila, njihova brzina i namera kretanja se koriste za određivanje mogućeg mesta sudara, a potom i verovatnoće sudara. Za verifikaciju sistema korišćen je eksperimentalni poligon sa optičkim detektorom pokreta u kolovoznoj traci, za prenos podataka upotrebljen je V2V komunikacioni sistem.



Sl. 2.40 – Četiri moguće namere kretanja (pravo, levo, desno, okret nazad) [74]

Vrednost pozicije i brzine vozila dobijaju od GPS prijemnika, a informacija o nameri kretanja se dobija na osnovu statusa pokazivača pravca (migavca). U raskrsnici su moguća četiri kretanja (pravo, levo, desno, okret nazad) (Sl. 2.40). Ova četiri kretanja se predstavljaju linearnom, kvadratnom, eksponencijalnom i logaritamskom (respektivno) funkcijom. Do prediktovane trajektorije se dolazi fitovanjem podataka primenom metode najmanjih kvadrata. Kada se došlo do prediktovanih trajektorija, u njihovim preseccima se nalaze potencijalne tačke sudara. Tada se na osnovu brzina dolazi do vremena  $TTC$  oba vozila. Ako je  $\Delta TTC = TTC_1 - TTC_2 \approx 0$  onda je sudar izvestan. U tom slučaju verovatnoća sudara je veća ukoliko je  $TTC_1$  manje. Uz pretpostavku da je raspodela slučajne promenljive  $TTC$  normalna (Sl. 2.41), do procene verovatnoće sudara se dolazi prema:

$$P(TTC) = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{TTC} e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt & \Delta T = 0 \\ 0 & \Delta T \neq 0 \end{cases} \quad (2.13)$$



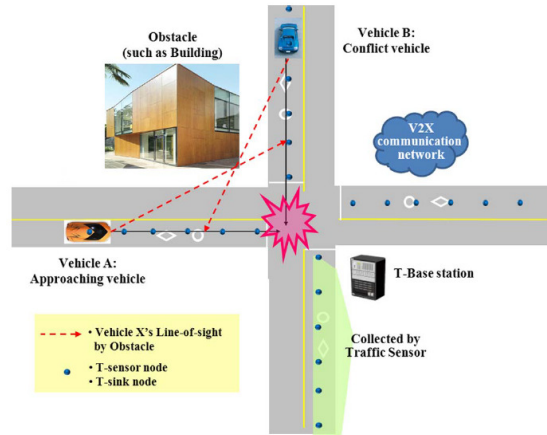
Sl. 2.41 – Računanje verovatnoće sudara [74]

Veliki broj incidentnih situacija u drumskom saobraćaju događa se na raskrsnicama. U kontekstu inteligentnih transportnih sistema rešenja koja mogu pomoći u smanjenju broja i ozbiljnosti ovih situacija grubo se mogu podeliti u dve grupe: infrastrukturna rešenja i napredna rešenja za podršku vozačima ADAS (Advanced Driver Assistance Systems). U oba pristupa potrebno je sagledati relevantne učesnike u potencijalno incidentnim situacijama, proceniti ozbiljnost nastale situacije i u skladu sa tim obavestiti vozače o potrebnim akcijama ili autonomno intervenisati u slučaju vozila sa autonomnom kontrolom.

Infrastrukturna rešenja se tipično zasnivaju na sensorima koji se nalaze u blizini raskrsnica. Senzori vrše detekciju dolazećih vozila i u slučaju da se proceni da postoji opasnost od sudara sistem generiše svetlosne znake upozorenja vozačima. Prednost infrastrukturnih rešenja se ogleda u tome što mogu šire i kompletnije da sagledaju situaciju na raskrsnici i u skladu sa tim da donesu odluku koje vozilo treba da prođe, a koje da se zaustavi. Međutim, direktno vođenje vozila primenom ovakvih rešenja nije moguće osim ako vozila nemaju tu funkcionalnost. Stoga se može pretpostaviti da će u budućnosti ADAS rešenja imati sve veću primenu u cilju smanjenja broja i ozbiljnosti incidentnih situacija. Pored ADAS rešenja kao što su rešenja zasnovana na prepoznavanju crvenog svetla ili stop znaka, postoje i ADAS rešenja za ublažavanje sudara CM (Collision Mitigation).

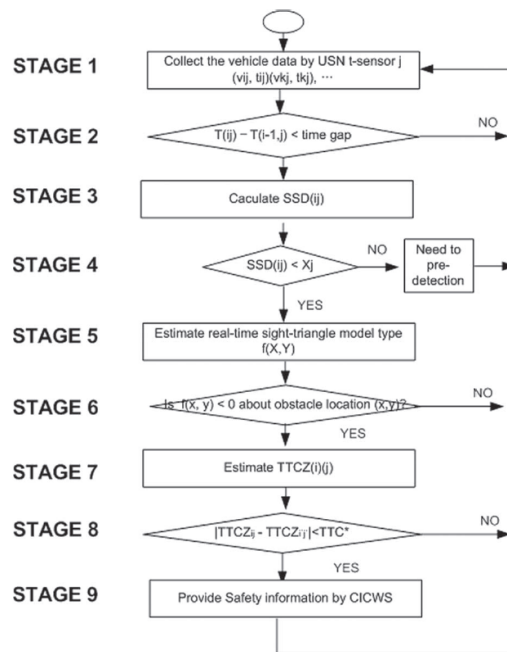
U radu [75] razmatrani su CM sistemi koji se fokusiraju na izbegavanje ili ublažavanje sudara u zadnji deo vozila u unakrsnom saobraćaju. Simulacijama su ispitane performanse sistema kada dva vozila se ukrštaju na različitim brzinama i razdaljinama putem stohastičkih dinamičkih simulacija. Pokazano je da primena CM sistema značajno povećava bezbednost saobraćaja na raskrsnicama bez obzira što se radi o nekooperativnom rešenju koje upravlja pojedinačnim vozilom.

U radu [76] je opisan kooperativni sistem za obaveštavanje u cilju izbegavanja konfliktnih situacija na raskrsnicama CICWS (Cooperative Intersection Collision Warning System). Sistem koristi fiksne saobraćajne senzore kako bi prikupio informacije o vozilima koja učestvuju u saobraćaju koji se odvija na raskrsnici i u njenoj blizini. CICWS sistem je naročito koristan na raskrsnicama kod kojih je vidljivost smanjena zbog objekata iz okoline. Takođe, ovaj sistem je koristan kod raskrsnica kod kojih nema ni svetlosne signalizacije niti znaka STOP kada vozači nemaju tendenciju zaustavljanja. Podatke o lokaciji vozila, brzini i vremenu sistem dobija na osnovu USN senzorske mreže, a podaci se prenose preko V2V i V2I komunikacionim sistemom. Za obaveštavanje o opasnosti i ranoj opasnosti predviđeno je da vozila budu opremljena sa OBU (On Board Units), ruterima i pametnim telefonima (Smart Phones).

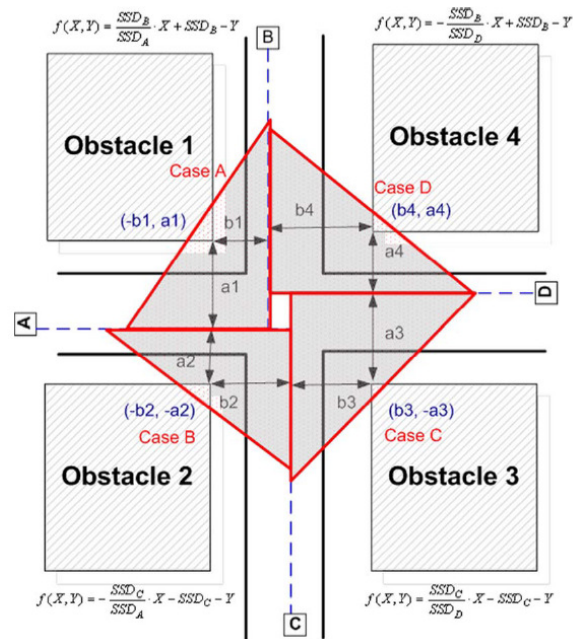


Sl. 2.42 – CICWS ideja i koncept servisa [76]

U algoritmu se razmatraju pojmovi linija vidljivosti LOS (Line-Of-Sight), konfliktna zona CZ (Conflict Zone), TTCZ (TTC Zone) i bezbedna distanca zaustavljanja SSD (Safe Stopping Distance). Na Sl. 2.43 prikazan je dijagram toka CICWS algoritma.



Sl. 2.43 - Dijagram toka CICWS algoritma [76]

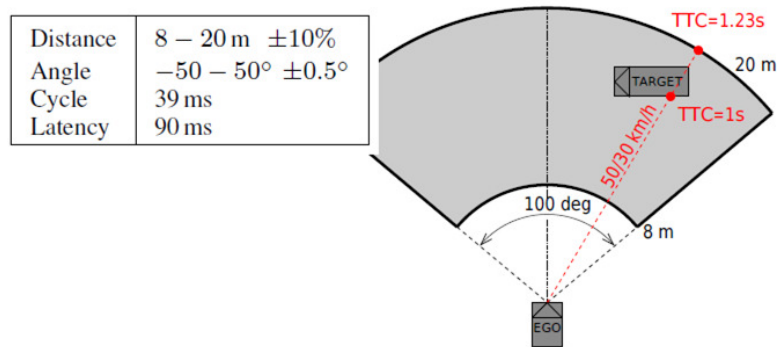


Sl. 2.44 – Primer CICWS sistema primenjenog na nesignaliziranoj raskrsnici sa 4 prepreke [76]

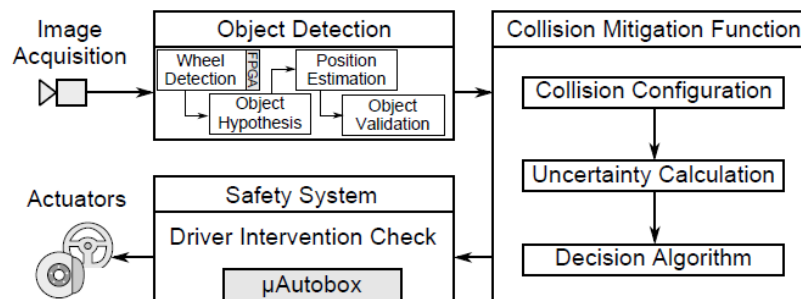
Ostvarenje bezbednosti na autoputevima je prilično kritičan zadatak. Razne vrste senzora su upotrebljene u vozilima u cilju smanjenja saobraćajnih nesreća koje su od koristi samo u okolini pojedinačnog vozila. Ukoliko vozač ranije primeti opasnu situaciju imaće više vremena da odreaguje i na taj način izbegne konfliktnu situaciju. U ovom smislu upotreba DSRC za razmenu statičkih i dinamičkih parametara između bliskih vozila, omogućava svakom vozilu da ima jasan pregled vozila koja ga okružuju. Kooperativni mehanizam za predikciju sudara i obaveštavanje CCPWM (Cooperative Collision Prediction and Warning Mechanism) obaveštava vozača o potencijalnom riziku kako bi se sprečio sudar.

U radu [77] je opisan simulator autoputa HiTSim (Highway Traffic Simulator) na kome je primenjen CCPWM baziran na DSRC komunikacionoj infrastrukturi. Sistem je predviđen da meri distancu između vozila i na osnovu nje vozačima šalje obaveštenja koja su gradirana u 4 nivoa po važnosti. U radu je posebno opisan način realizacije simulatora i njegova upotreba (jezik C++, struktura softver, dijagram klasa sa članovima i metodama i prozori za podešavanje i korišćenje simulatora).

U radu [78] je opisan koncept izbegavanja i ublažavanja (CM) bočnih sudara u raskrsnicama. Detektovanje vozila u raskrsnici se svodi na detektovanje bočnih točkova. Na osnovu procenjenog TTC sistem donosi odluke o potrebi i vrsti akcija koje treba preduzeti.



Sl. 2.45 – Primer performanse detektora točkova [78]



Sl. 2.46 – Blok dijagram sistema [78]

U radu [79] je opisan ICT (Information–Communication Technology) radar koji predstavlja sistem za rano obaveštavanje i izbegavanje konfliktnih situacija na putevima i auto-putevima. Ovaj sistem koristi specijalnu senzorsku mrežu koja obuhvata pokretna vozila i prepreke na putu, šalje automatski signale obaveštenja koloni iza vozila i omogućava vozačima na dovoljnoj distanci da se zaustave na vreme ili preduzmu neki drugi manevar kako bi izbegli konflikt.

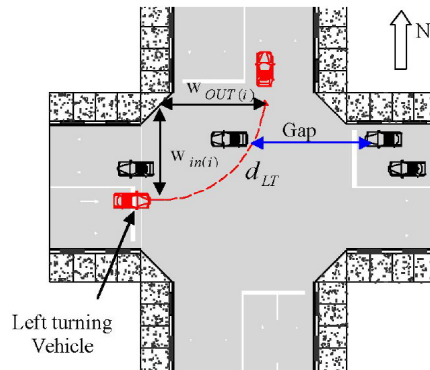
U radu [80] opisan je pristup autonomnom upravljanju vozilom kako bi ono bilo učesnik u autonomnom transportnom sistemu u kome bi sva vozila mogla da se međusobno koordinišu i samostalno kreću po putevima bez ugrožavanja bezbednosti. Formulisan je MPC (Model Predictive Control) algoritam kojim se generiše izvodljiva trajektorija za kretanje vozila. Partikularna ograničenja su postavljena kako bi se obezbedila interna bezbednost vozila. U cilju sigurnosti celokupnog sistema predložena su neka efikasna pravila za V2V i V2I koordinaciju. Uspostavljena je sigurnost celokupnog sistema u raznim saobraćajnim situacijama koje se mogu javiti u jednoj saobraćajnoj traci, više saobraćajnih traka ili raskrsnici.

U radu [81] prikazan je metod za predikciju verovatnoće sudara između dva vozila koja komuniciraju preko V2V veze (SAE J2735 DSRC Message Set [82]). Pristup ne zahteva da metod interakcije bude ograničen na bilo koji način, tj. funkcioniše za bilo koji saobraćajni scenario. Primenjeni metod je robustan u odnosu na neodređenosti u merenjima stanja vozila i gubitka komunikacije. Ove činjenice ga čine dobrom polaznom osnovom za primenu složenijih algoritama baziranih na V2V komunikaciji.

Kod raskrsnica sa svetlosnom signalizacijom pravilan izbor trajanja svetlosnih signala i njihova sinhronizacija neposredno utiču na bezbednost saobraćaja u raskrsnici. Manevar kojim vozilo skreće ulevo pokazao se potencijalno najopasnijim. Stoga je od velikog značaja procena

konfliktnog potencijala raskrsnice koji se odnosi na vozila koja skreću ulevo i vozila koja dolaze iz suprotnog pravca.

U radu [83] opisan je model ponašanja vozila u raskrsnici kada skreću ulevo. Veličine koje učestvuju u formiranju modela prikazane su na Sl. 2.47. Korišćenjem velike količine raspoloživih podataka, prikupljenih na jednoj raskrsnici u Teheranu, ustanovljeno je da je preloženi model blizak realnom procesu saobraćaja. Na taj način je pokazano da se predloženi metod može koristiti za procenu konfliktnog potencijala sličnih raskrsnica.



Sl. 2.47 – Definicija veličina koje učestvuju u modelovanju [83]

Na osnovu intuitivnog razmišljanja moglo bi se zaključiti da pojedini statistički parametri vezani za ponašanje u saobraćaju na pojedinim deonicama imaju određenu korelaciju sa brojem konfliktnih situacija. Vođeni ovom mišlju, autori rada [84] analizirali su uticaj disperzije brzina na bezbednost u saobraćaju. Usrednjena razlika brzina ASD (Average Speed Difference) dva susedna vozila korišćena je za definiciju disperzije brzine:

$$ASD = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |v_i - v_{i+1}|}{n-1} \quad (2.14)$$

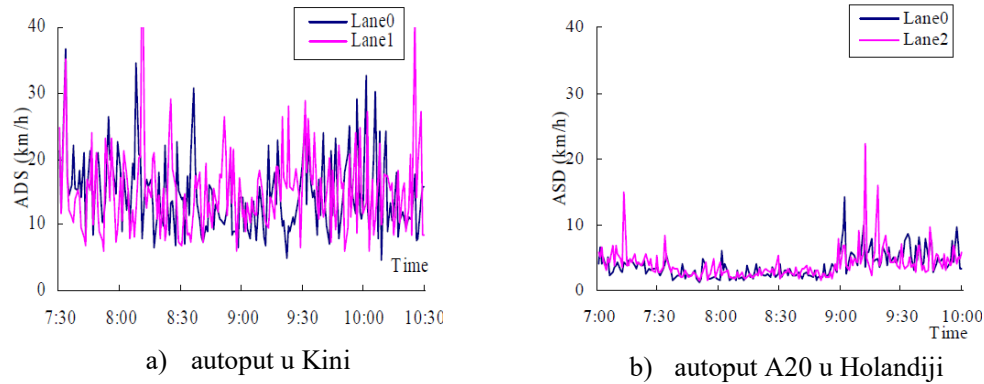
Posmatrana su dva autoputa (Sl. 2.48). Analizom podataka prikupljenih na ovim autoputevima dobijeni su grafici disperzija brzina (Sl. 2.49). Na osnovu činjenice da je u posmatranom periodu autoput A20 u Holandiji imao znatno manji broj konfliktnih situacija, a merenjem je ustanovljeno da je disperzija brzina u njegovom slučaju znatno manja, može se zaključiti da: **povećanje disperzija brzina na autoputevima povećava njihov konfliktni potencijal.**



a) autoput u Kini

b) autoput A20 u Holandiji

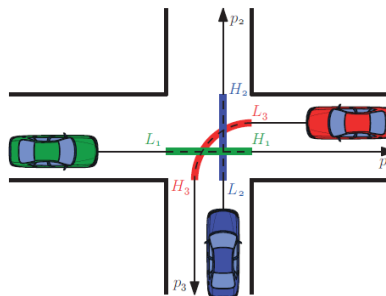
Sl. 2.48 – Šematski prikaz izabranih delova autoputeva [84]



Sl. 2.49 – Grafici disperzija brzina dobijenih analizom prikupljenih podataka [84]

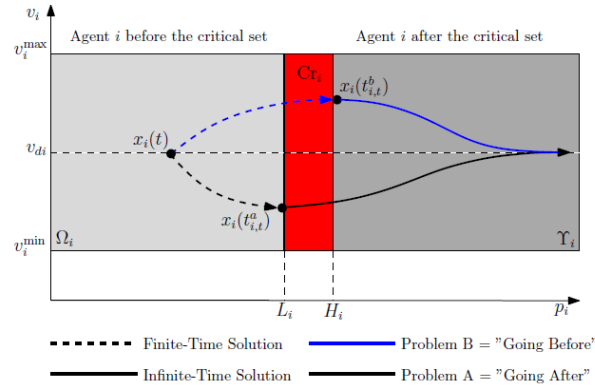
Kooperativni sistemi primenjeni u saobraćaju omogućavaju vozilima da se prilagode okolnoj situaciji na osnovu informacija koje primaju od okolnih vozila i okolne saobraćajne infrastrukture. U radu [85] prikazan je kooperativni pristup prolaska većeg broja vozila kroz raskrnicu (Sl. 2.50). Predloženi pristup kao krajnji rezultat daje sekvencu upravljanja (horizont uzmicanja) za svako vozilo ponaosob.

Za svako vozilo se definiše kritičan skup pozicija u kojima je sudar moguć sa nekim drugim vozilom. U slučaju da je kritičan skup dodeljen nekom drugom vozilu za prolaz u nekom vremenskom intervalu, onda je potrebno da se horizont uzmicanja formira tako da vozilo prođe kritičan skup pre ili posle tog intervala (Sl.2.51). Na ovaj način izvršena je decentralizacija upravljanja na svako vozilo ponaosob. Genrisanje horizonta uzmicanja se svodi na pronalaženje optimalnog upravljanja konačnog vremena trajanja i optimalnog upravljanja beskonačnog vremena trajanja. Formiranje upravljanja konačnog vremena trajanja mora se obaviti u realnom vremenu obavezno uvažavajući zahtev za izbegavanje konflikta, dok drugi zahtevi su nižeg prioriteta (npr. mala potrošnja goriva ili željeno trajanje putovanja). Formiranje upravljanja beskonačnog vremena trajanja nije vremenski kritično (može se obaviti i offline) i može uvažavati i druge zahteve (npr. mala potrošnja goriva ili željeno trajanje putovanja). Na Sl. 2.52 prikazan je algoritam za formiranje horizonta uzmicanja.



Sl. 2.50 – Primer scenarija prolaska vozila kroz raskrnicu [85]





Sl. 2.51 – Ilustracija strategije za generisanje upravljanja [85]

**Algorithm 1** Receding horizon control law computation at time  $t$  for agent  $i = (\mathcal{O})_m$ , where  $m > 1$

```

measure the state  $x_i(t)$  at time  $t$ ;
collect  $\Gamma_{j,t}, \forall j \in \mathcal{O}_i^b$ ;
compute  $t_{i,t}^b$  and  $t_{i,t}^a$ ;
verify feasibility of Problem A1 and B1
if  $x_i(t) \notin K_i^{(t_{i,t}^a-t)}(\Omega_i)$  and  $x_i(t) \notin K_i^{(t_{i,t}^b-t)}(\Gamma_i)$ 
then "Unfeasible problem"
    Trigger emergency measure;
else
    solve Problem A1 and/or Problem B1;
    compare  $J_{i,t}^*$  and choose the
    solution  $u_{i,t}^*$  with lower cost;
    apply the first element of  $u_{i,t}^*$  to the system;
    broadcast  $\Gamma_{i,t}$  to all elements of  $\mathcal{O}_i^b$ ;
    wait for the new sampling time  $t+1$  and until
    all preceding vehicles in the order have executed
    Algorithm 1.

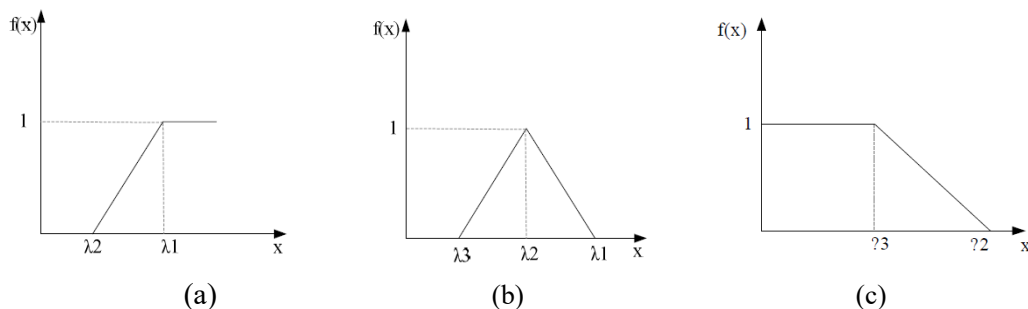
```

Sl. 2.52 – Algoritam za formiranje horizonta uzmicanja [85]

Generalno, ocena ili evaluacija bezbednosti saobraćaja u raskrscicama se može obaviti na dva načina: direktno (posmatranjem ponašanja saobraćajnih učesnika u raskrscnici i beleženjem incidentnih situacija) i indirektno (najčešće korišćenjem saobraćajnih konfliktnih tehnika kao dobre zamene u slučajevima kada nema dovoljno o podataka o realnim incidentima). U radu [86] opisana je studija u kojoj se primenjuje jedna od saobraćajnih konfliktnih tehnika. Predloženo je da konflikti iz nekoliko različitih klasa, ustanovljenih prema ozbiljnosti u odnosu na posledice, mogu se koristiti u oceni bezbednosti saobraćaja kada se podaci o nesrećama teško mogu prikupiti i kada veličina uzorka o ozbiljnim sudarima nije dovoljno velika. U prethodnim istraživanjima kao evaluacioni indeks korišćen je odnos broja konflikata i ukupnog broja prolazaka kroz raskrscnicu. Ovakav pristup ima dva nedostatka: bazira se samo na broju konflikata bez uvažavanja stepena njihove ozbiljnosti i ne uvažava podatke o trenutnom protoku saobraćaja. U cilju prevazilaženja pomenutih nedostataka izvršena je podela konflikata prema ozbiljnosti (ozbiljni i uobičajeni), trenutni protok je podeljen na tri perioda posmatranja (u špicu, uobičajeni i van špica).

Veličina TTC, tj. vreme do pojave konflikta, je izabrana kao merodavna za podelu konflikata prema ozbiljnosti. Merenjima su određene raspodele kumulativnog broja ozbiljnih i uobičajenih konflikata (Sl. 2.53).





Sl. 2.55 – Težinske funkcije izbjeljivanja ( $\lambda_1=80\%$ ,  $\lambda_2=60\%$  i  $\lambda_3=20\%$ ) kada indeks pripada: (a) bezbednoj, (b) manje bezbednoj i (c) nebezbednoj kategoriji [86]

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(d_{ij}) \times \eta_j^k$$

$$\eta_j^k = \lambda_j^k / \sum_{j=1}^m \lambda_j^k$$

Table 1. Whitening values of different gray categories

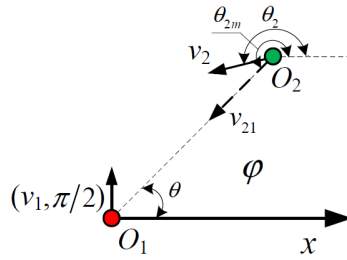
Evaluation index	Whitening values		
	Safe	Less safe	Unsafe
j=1	0.5837	0.3877	0.1539
j=2	0.4595	0.2614	0.0933
j=3	0.6496	0.4562	0.1591
j=4	0.7560	0.5074	0.2484
j=5	0.6315	0.4117	0.2007
j=6	0.5476	0.4731	0.1537

Sl. 2.56 – Izbeljene vrednosti različitih kategorija [86]

Prema izračunatim podacima raskrsnice 2, 6 i 7 su bezbedne, raskrsnice 1, 4, 5 i 8 su manje bezbedene, dok je raskrsnica 3 nebezbedna.

Diskriminacija (tj. razlikovanje) saobraćajnih konflikata je značajno za evaluaciju saobraćajne bezbednosti i što bolju pomoć (asistenciju) vozačima u saobraćaju. U radu [87] opisano je istraživanje u cilju poboljšanja tačnosti diskriminacije saobraćajnih konfliktnih situacija. U cilju postizanja automatske diskriminacije, diskriminacija saobraćajnih konfliktnih situacija se deli u dve faze: prvo prepoznavanje same konfliktne situacije i potom diskriminacija prema ozbiljnosti konfliktne situacije. Primenom kinematičke teorije definisan je model kritičnog konfliktnog regiona na osnovu brzine, udaljenosti i ugla (Sl. 2.57). Na osnovu ovog modela i bezbedne distance  $l_0$  kritični region se može izraziti na sledeći način:

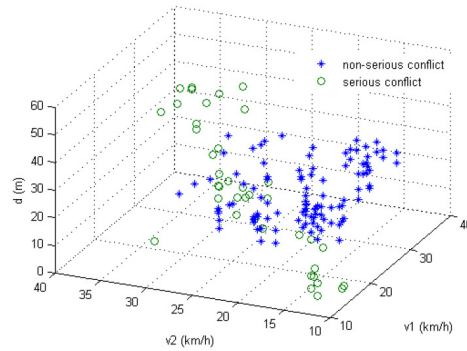
$$\rho(\theta) = \frac{\left( v_2 \cdot \frac{\cos\left(\theta - \arcsin\left(\frac{v_1}{v_2} \cdot \cos(\theta)\right)\right)}{\cos(\theta)} \right)^2}{2a_2} + l_0 \quad (2.15)$$



Sl. 2.57 – Model kritičnog konfliktnog regiona [87]

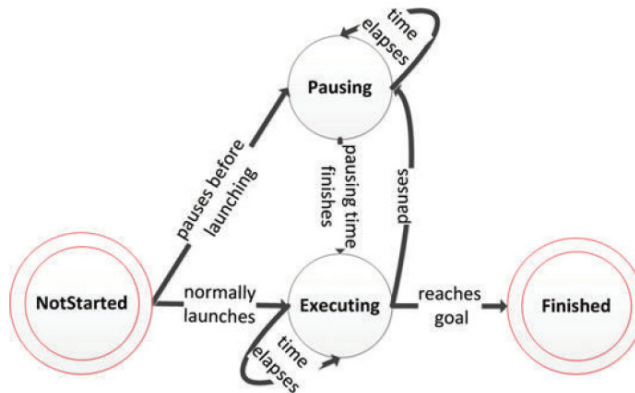
Na osnovu takvog modela omogućeno je prepoznavanje konfliktne situacije. Korišćenjem metoda za obučavanje mašina, zasnovanog na SVM (Support Vector Machine) metodi učenja, vrši se diskriminacija ozbiljnosti konfliktne situacije. Za diskriminaciju po ozbiljnosti koristi se LS-SVM (Least Squares Support Vector Machines) koji je definisan sledećim izrazom:

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{1}{2}(\omega \cdot \omega) + C \sum_{i=1}^l (\xi_i)^2 \\ \text{s.t.} \quad & y_i(\omega \cdot x_i + b) = 1 - \xi_i \quad i = 1, \dots, l \end{aligned} \quad (2.16)$$



Sl. 2.58 – Primer diskriminacije konfliktnih situacija dobijen primenom LS-SVM [87]

Centralizovano izbegavanje sudara više vozila u zajedničkom okruženju prikazano je u radu [88]. Razmatrana su vozila koja su realizovana poput robota. Za razliku od opšte prihvaćenog modela tretiranja ovakve problematike, u ovom radu dodatno se uvažavaju vreme pokretanja vozila od strane nadređenog sistema i prioritet prolaska vozila kroz željeni cilj kao nove veličine koje utiču na formiranje strategije izbegavanja konflikta. Formiranje strategije izbegavanja konflikta razdvojeno je na fazu planiranja i izvršenja kretanja duž željene putanje. Ostvarenje cilja, tj. izbegavanje konflikta, ostvaruje se suzdržavanjem pojedinih vozila (robota) da pređu u naredne intervale izvršenja kretanja duž željene putanje (Sl. 2.59). Suzdržavanje vozila obavlja centralizovani kontroler. Efikasnost ovakvog rešenja verifikovana je simulacionim eksperimentima. Simulacioni eksperimenti su vršeni na Linux operativnom sistemu korišćenjem otvorene biblioteke za globalno planiranje trajektorija kretanja (OMPL - Open Motion Planning Library) [89] i otvorene biblioteke za proračun vremena sudara (FCL - Flexible Collision Library) [90].



Sl. 2.59 – Stanja vozila tokom izvršenja kretanja [88]

Opisani sistemi i razmatrana problematika vezana za drumski saobraćaj u dosta slučajeva podrazumeva odlučivanje i donošenje odluka na osnovu trenutnih vrednosti nekih veličina i činjenica da li su one iznad ili ispod nekog praga. Drugim rečima, u ovakvim sistemima dve bliske situacije mogu proizvesti potpuno različite odluke. Ovakvu situaciju primena inteligentnih sistema baziranih na fazi-logici mogla bi da ublaži i kvalitativno podigne na viši nivo u velikom broju slučajeva.

#### 2.4.1. Određivanje pozicije i brzine vozila

Podaci koji sadrže informacije o poziciji i brzini vozila su neophodni inteligentnim sistemima kako bi bili u stanju da donose odluke i zaključke na osnovu kojih bi se omogućilo izbegavanje konfliktnih situacija. Do ovih podataka inteligentni sistemi mogu doći primenom najrazličitijih vrsta senzora, koji mogu biti postavljani i korišćeni na najrazličitije načine. Pored određivanja pozicije i brzine vozila, uloga ovog dela sistema može biti i određivanje dimenzija vozila (dužina i širina). Moguća su razna rešenja za određivanje pozicije i brzine vozila. U ovom radu su prikazani osnovni principi tri varijante rešenja.

##### 2.4.1.1. Primena induktivnih petlji ili magnetno rezistivnih senzora

Duž deonice postavlja se niz senzora za detekciju vozila. Ti senzori mogu biti induktivne petlje ili magnetno rezistivni senzori.

Induktivne petlje se koriste kao induktivni elemenat oscilatornog kola. Vrednost induktivnosti petlje određuje učestanost oscilovanja. Kada se vozilo nađe u blizini petlje izaziva smanjenje njene ekvivalentne induktivnosti što rezultuje povećanjem učestanosti oscilovanja [91]. Povećanje učestanosti oscilovanja senzor tretira kao detektovano vozilo. U cilju što boljeg detektovanja prolaska vozila, njegovog tipa i brzine, za detekciju se koristi više petlji postavljenih u pravilnom prostornom rasporedu, a podaci o prolasku vozila se dobijaju upoređivanjem učestanosti oscilacija dobijenim od ovih petlji. Ovi senzori se mogu koristiti za detekciju prisustva vozila, detekciju prolaska vozila i merenje brzine kretanja vozila.

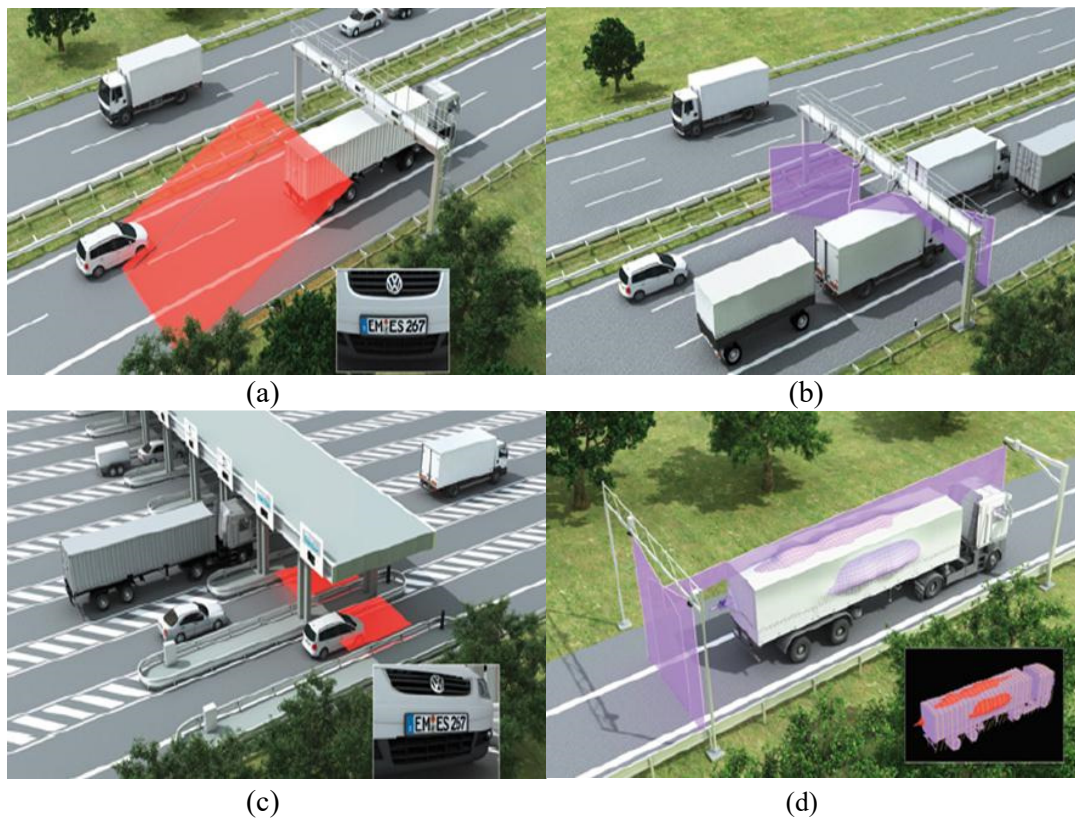
Magnetno rezistivni senzori spadaju u grupu magnetnih senzora (senzori za merenje magnetnog polja). Magnetni senzori, koji se upotrebljavaju za detekciju vozila, koriste činjenicu da su vozila koja treba da detektuju u stvari po svome sastavu pretežno feromagnetni objekti. Iz tog razloga, vozila kada se pojave u blizini magnetnih senzora izazivaju iskrivljenje (promenu) početnog magnetnog polja. Tu promenu magnetnog polja senzori treba da registruju. Za detekciju vozila





### 2.4.1.2. Primena 2D laserskih skenera

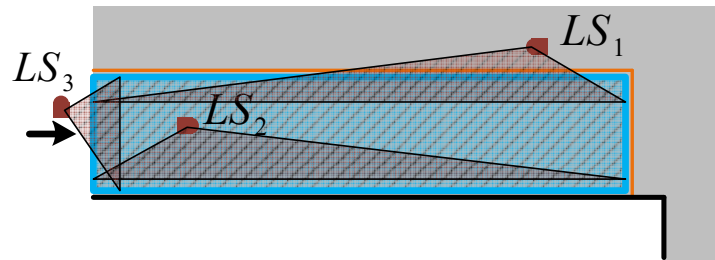
Laserski skeneri koriste laserski zrak usmeravan rotacionim ogledalom [7]. Zrak se širi u horizontalnoj ravni do prepreke koja ga reflektuje. Vreme do pojave reflektovanog talasa određuje distancu, dok intenzitet reflektovanog talasa daje informaciju o emisivnosti posmatrane tačke. Merenja vezana za svaku tačku se pamte kako bi formirala celokupnu sliku polja posmatranja. Skeneri koriste pulsni ili fazni metod. Pulsni metod se zasniva na merenju vremena od trenutka emitovanja impulsa do trenutka pojave reflektovanog talasa. Fazni metod se zasniva na merenju faznog pomaka između emitovanog i reflektovanog talasa od objekta. Primena laserskih skenera u nadzoru saobraćaja je višestruka [7]. Primeri primene u okviru sistema za naplatu putarina prikazani su na Sl. 2.63(a, c). Primer primene za klasifikaciju vozila je prikazan na Sl. 2.63(b). Primer primene za određivanje brzine vozila je prikazan na Sl. 2.63(d).



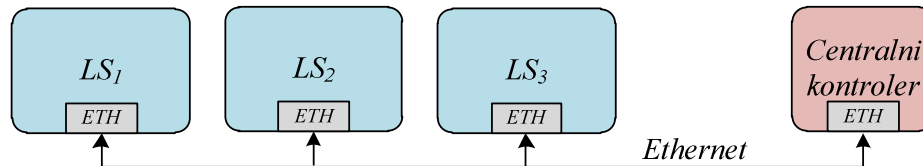
Sl. 2.63 – Primeri primene laserskih skenera u nadzoru saobraćaja [7]

Za svaku deonicu postavljaju se tri 2D laserska skenera iznad zone deonice. Prvi laserski skener  $LS_1$  se postavlja na ulazu deonice, dok se ostala dva skenera postavljaju tako da njihovi opsezi adekvatno pokriju celokupnu zonu deonice. Prilikom ulaska vozila u deonicu skener  $LS_1$  određuje širinu vozila, dok  $LS_2$  određuje dužinu vozila. Kretanje vozila kroz deonicu kao posledicu ima kretanje konture (posledice prisustva vozila) u odzivima skenera  $LS_1$  i  $LS_2$ . Ova pojava se koristi za određivanje položaja i brzine vozila.

Prednosti upotrebe 2D laserskih skenera se ogleda u činjenici da ih je dosta jednostavno instalirati u poređenju sa senzorima koji se postavljaju u sam kolovoz. Ovi skeneri daju precizna merenja položaja i brzine vozila. Sa druge strane najveći nedostatak je što u prisustvu magle i/ili padavina, očitavanja skenera mogu dosta biti iskvarena.



Sl. 2.64 – Postavljanje 2D laserskih skenera



Sl. 2.65 – Povezivanje 2D laserskih skenera sa centralnim kontrolerom

### 2.4.1.3. Obrada video signala

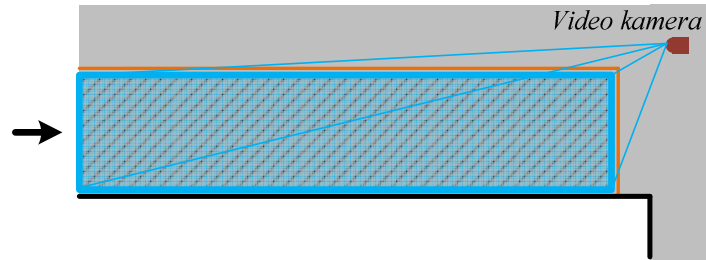
Uređaji bazirani na procesiranju video signala predstavljaju kombinaciju softvera i hardvera koji izdvaja informaciju iz video signala koji se dobija od kamere (video kamere, CCD kamere, termalne IR kamere i td.). Ovakvi uređaji mogu detektovati prisustvo vozila, prolazak vozila i brzinu vozila. Pored toga zbog velike količine informacija koje daju kamere ovakvi senzori mogu se koristiti i za klasifikovanje detektovanih vozila. Za razliku od induktivnih petlji i magnetorezistivnih senzora, koji se montiraju u sam put, ovi senzori se montiraju iznad ili pored puta kako bi imali optičku vidljivost prostora koji je od interesa za posmatranje [97]. Nedostaci ovih senzora se ogledaju u činjenici da kamere detektuju i neželjene signale koji su rezultat senke, refleksije kolovozne površine, refleksije od okolnih predmeta, vremenskih ne prilika kao što su magla, kiša, sneg i grad, detektovanje dima itd. Detektovanje ovih signala može uticati na pouzdanost detektovanja samih vozila. Ovi nedostaci se mogu prevazići izborom odgovarajuće kamere radnim uslovima i primenom složenih softverskih algoritama.

Kod ovih senzora se definiše oblast posmatranja u kojoj se vrši detekcija vozila. Može se osmatrati više traka odjednom. Problem smanjene vidljivosti (kada padne noć) prevazilazi se postavljanjem osvetljenja, ali se na taj način sistem usložnjava, a samim tim njegova pouzdanost smanjuje. Veliki nedostatak ovakvog sistema se ogleda u činjenici da kada padne magla onda je praćenje saobraćaja onemogućeno jer tada kamere vidljivog spektra nisu u stanju bilo šta da snime. Ovaj nedostatak se jedino može prevazići korišćenjem termalne IR kamere.

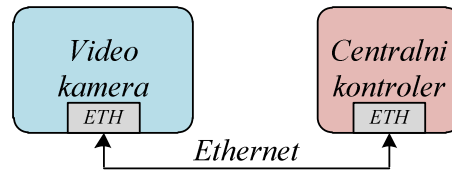
Osnovni metod analize slike se zasniva na upoređivanju snimljene slike sa slikom oblasti od interesa kada nema saobraćaja (obrazac slika). Problem je što se obrazac slika menja sa periodom dana (jutro, dan, večer, noć), sa vremenskim uslovima (vedro vreme i oblačno vreme), periodom godine (zimi mrak pada ranije, a leti kasnije). Zbog toga potrebno je imati više obrazaca i birati ih u skladu sa uslovima u kojima se snimanje obavlja. Zbog svih ovih nedostataka, moguće je primeniti metod u kome se u inicijalnoj detekcionoj zoni, koja se nalazi na početku oblasti, zapamti promenljivi inicijalni detekcioni obrazac. Ukoliko se ponovno prepozna u okviru oblasti od interesa tada senzor proglašava da je vozilo detektovano. U slučaju detekcije vozila računa se i njegova brzina kretanja. Na taj način snimanje saobraćaja se ne zasniva na nizu obrazaca snimane zone, već se za svako vozilo detektuje njegov obrazac u inicijalnoj zoni koji se posle prati [98]. Na ovaj način, metod praćenja saobraćaja postaje nezavistan od perioda dana, godišnjeg doba, trenutnog vremena i td.



Često se za obradu video signala u realnom vremenu koriste kompjuterske tehnike za obradu video signala (Computer Vision Techniques). Jedna od najčešće korišćenih biblioteka je OpenCV [66]. Biblioteka OpenCV se može koristiti za detektovanje, praćenje i određivanje brzine vozila [99], [100], [101].



Sl. 2.66 – Postavljanje video kamere



Sl. 2.67 – Povezivanje video kamere sa centralnim kontrolerom

### 3. FAZI EKSPERTSKI SISTEMI

Za proteklih dvadesetak godina fazi sistemi su u velikoj meri postali zamena konvencionalnim tehnologijama u velikom broju naučnih aplikacija i inženjerskih sistema, naročito u oblasti upravljanja sistemima i prepoznavanju oblika. Takođe smo svedoci naglog porasta upotrebe fazi logike u vrlo raznorodnim komercijalnim aplikacijama i industrijskim sistemima. Neki primeri kao što su veš mašine, kamkorderi, kamere sa autofokusiranjem, klima uređaji, usisivači, navigacioni uređaji, podzemna železnica i mnogi drugi su dovoljan dokaz velike rasprostranjenosti i primenljivosti ovakve tehnike. Fazi tehnologija je u formi aproksimativnog rezonovanja takođe našla primenu u informacionim tehnologijama, gde se koristi kao podrška pri odlučivanju kao i u ekspertskim sistemima.

Fazi skupovi, prvi put definisani kao novi pojam 1965. godine (Zadeh), uvedeni su sa osnovnim ciljem da se na matematički formalizovan način reprezentuje i modelira neodređenost u lingvistici, i tako definisani skupovi mogu se doživeti kao generalizacija klasične teorije skupova [102]. Osnovna ideja fazi skupova je veoma jednostavna. U klasičnim skupovima neki određeni element (pripadnik univerzalnog skupa) ili pripada ili ne pripada nekom definisanom skupu. Drugim rečima, pripadnost elementa skupu je krajnje razgraničena, ili jeste ili nije član skupa. Fazi skup je, u tom smislu, generalizacija klasičnog skupa jer se pripadnost elementa skupu može okarakterisati brojem iz intervala  $[0,1]$ . Drugim rečima, funkcija pripadnosti (membership function) fazi skupa preslikava svaki element univerzalnog skupa u ovaj interval realnih brojeva. Jedna od najvećih razlika između klasičnih i fazi skupova i jeste u tome da klasični skupovi uvek imaju jedinstvenu funkciju pripadnosti, dok za fazi skup postoji beskonačno mnogo različitih funkcija pripadnosti kojima se on može opisati. Ova činjenica omogućava fazi sistemima da se prilagođavaju na odgovarajući način situacijama u kojima se primenjuju. Ovu činjenicu je naglasio još Lotfi Zadeh definišući fazi skupove sa posebnom napomenom da se svaka oblast može fazifikovati i shodno tome generalizovati. Na taj način od neuralnih mreža, genetičkih algoritama, teorije stabilnosti, prepoznavanja oblika i matematičkog programiranja možemo dobiti fazi neuralne mreže, fazi genetičke algoritme, fazi prepoznavanje oblika, fazi teoriju stabilnosti i fazi matematičko programiranje. Prednost ovakve fazifikacije se sastoji u višem nivou generalizacije i iskazivanja, sa većom mogućnošću modeliranja realnih problema sa specifičnom metodologijom za analizu tolerancije u nepreciznostima.

Fazi logika se često zamenjuje i pogrešno poistovećuje sa verovatnoćom. Osnovna razlika između fazi logike i verovatnoće se sastoji u tome da fazi logika barata sa determinističkim nedorečenostima ili neodređenostima, dok se verovatnoća bavi verodostojnošću stohastičkih događaja. Fazi jeste jedan aspekt neodređenosti, ali neodređenosti u smislu koji sadrži iskaz "mlad čovek" ili "velika soba". Sa druge strane, verovatnoća se generalno bavi fenomenom ponavljanja koja se simbolizuje slučajnošću (slučajnim promenljivama ili slučajnim procesima). Drugim rečima, fazi i slučajni su dva atributa koja se razlikuju u svojoj prirodi, odnosno oni opisuju drugačiji aspekt neodređenosti. Fazi logika pokriva subjektivnost ljudskog mišljenja, osećanja, jezika, dok verovatnoća pokriva objektivnu statistiku u prirodnim naukama. Sa druge strane fazi modeli i modeli na bazi verovatnoće u sebi nose drugačiji vid informacija: *fazi funkcija pripadnosti predstavlja sličnost objekata u kontekstu neprecizne definicije osobina, dok verovatnoća daje informaciju o frekvenciji ponavljanja.*

Jedna od najvažnijih osobina fazi logike jeste njena mogućnost da izrazi stepen neodređenosti u čovekovom mišljenju i njegovu subjektivnost. Otuda su najčešći slučajevi kada se oseća velika potreba za fazi logikom, slučajevi okarakterisani nepostojanjem matematičkog modela ili zbog toga što je suviše komplikovano doći do njega ili zbog toga što je suviše komplikovano baratati njime u realnom vremenu. Dalje su to slučajevi kada se radi sa vrlo visokim nivoom šuma ambijenta, a kada je neophodno koristiti jeftine senzore pa je neophodno uključiti čovekovu interakciju i njegovu intuiciju. To su takođe situacije kada se projektuje ekspertski sistem pri čemu funkcije pripadnosti na odgovarajući način treba da opišu valjanost pojedinih svojstava. Otuda je fazi logika našla primenu u teoriji upravljanja, prepoznavanju oblika, kvantitativnoj analizi, ekspertskim sistemima za dijagnosticanje, planiranje i predikciju, informacionim sistemima i td.

Važno je napomenuti da je Zadeh 1975. godine uveo opštije oblike fazi skupova u kojima su njihovi stepeni pripadnosti takođe fazi. Dva najzastupljenija oblika su intervalno određeni fazi skupovi i tip-2 fazi skupovi. Za prvi oblik, stepen pripadnosti predstavlja uniformno ponderisani interval vrednosti, dok za drugi oblik stepen pripadnosti predstavlja ne nužno uniformno ponderisani interval vrednosti. Očigledno je da su skupovi prvog oblika u stvari specijalan slučaj skupova drugog oblika, pa se iz tog razloga nazivaju interval tip-2 fazi skupovi.

Zašto bi korišćenje tip-2 fazi skupova bilo od interesa za njihovu primenu u fazi-logičkim sistemima? Ukratko na ovo pitanje je moguće dati dva kratka odgovora:

- oni su robusniji na nesigurnosti sistema i mogu pružiti bolji sistem kontrole performansi nego tip-1 fazi skupovi i
- trenutno je pređena kritična masa objavljenih radova i istraživanja u kojima se pokazuju poboljšanja za mnoge aplikacije iz stvarnog sveta [103].

Tip-2 fazi skupovi omogućavaju da se na bolji način operiše sa nesigurnostima u modeliranju sistema i merenjima u okviru njega. Oni dozvoljavaju da se na adekvatniji način predstave lingvističke nesigurnosti koje potiču iz činjenice da „reči mogu označavati različite stvari za različite ljude“.

Tip-2 fazi skupovima se povećava stepen fazifikacije čime se povećava sposobnost operisanja ne egzaktnim informacijama na logički ispravan način.

S obzirom na činjenicu da saobraćajni procesi su dosta složeni i teško ih je opisati egzaktnim modelima, fazi-skupovi, sa svojom mogućnošću modelovanja neodređenosti, nameću se kao praktičan alat za opisivanje pojava u saobraćaju. Kao posledica ove činjenice, fazi ekspertski sistemi, kako tip-1 tako i tip-2, nameću se kao prirodan okvir za projektovanje inteligentnih sistema za upravljanje saobraćajem.

### 3.1. Fazi skupovi

Klasičan skup je kolekcija različitih objekata [102]. On je definisan tako da deli sve elemente univerzalnog skupa u dve kategorije: članove i one koji to nisu. Na kraju krajeva, klasičan skup se može definisati preko takozvane karakteristične funkcije. Označimo sa  $U$  univerzalni skup. Neka je  $\mu_A(x)$  karakteristična funkcija klasičnog skupa  $A$  iz  $U$  takva da može uzeti vrednosti iz skupa  $\{0,1\}$ , pri čemu je  $\mu_A(x)=1$  ako je  $x \in A$  i  $\mu_A(x)=0$  ako  $x \notin A$ . Drugim rečima:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

Primitimo da su granice skupa  $A$  oštre i jasne i predstavljaju dvoklasnu kategorizaciju elemenata skupa  $U$ . Fazi skup, sa druge strane, uvodi neodređenost poništavanjem oštih granica između članova i onih koji to nisu. Drugim rečima prelaz sa članova na ‘nečlanove’ nije tako oštar, već je postepen. Fazi skup  $\tilde{A}$  iz skupa  $U$  se može definisati kao skup uređenih parova:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in U\} \quad (3.2)$$

gde je  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  takozvana funkcija pripadnosti (ili karakteristična funkcija) skupa  $\tilde{A}$  i pri tome  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  predstavlja stepen pripadanja elementa  $x$  fazi skupu  $\tilde{A}$ . Funkcija pripadnosti  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  preslikava skup  $U$  u prostor pripadanja  $M$ , odnosno  $\mu_{\tilde{A}}: U \rightarrow M$ . Ako je  $M = \{0,1\}$  u pitanju je klasičan (‘nefazi’) skup, Za fazi skupove, opseg pripadanja je podskup nenegativnih realnih brojeva čiji je supremum konačan. Najčešće se usvaja da je skup  $M$  jedinični interval  $[0,1]$ .

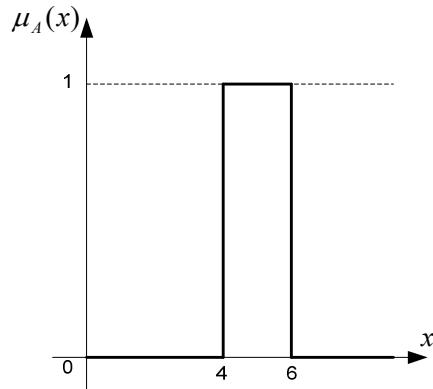
**Primer 3.1:** Neka je skup  $U$  zapravo skup realnih brojeva i neka klasičan skup  $A$  predstavlja realne brojeve veće ili jednake 4 i manje ili jednake 6. Tada imamo:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\} \quad (3.3)$$

gde je karakteristična funkcija definisana na sledeći način:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & 4 \leq x \leq 6 \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad (3.4)$$

i prikazana sledećom slikom:



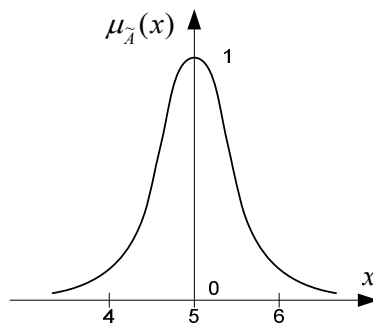
Sl. 3.1 - Primer jasnog skupa

Sa druge strane, ako definišemo fazi skup  $\tilde{A}$  kao skup realnih brojeva bliskih broju 5, tada možemo pisati:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in U\} \quad (3.5)$$

pri čemu je funkcija pripadnosti (Sl. 3.2):

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{1}{1 + 10 \cdot (x - 5)^2} \quad (3.6)$$



Sl. 3.2 – Primer funkcije pripadnosti fazi skupa

To znači da se fazi skup iz ovog primera može definisati na sledeći način:

$$\tilde{A} = \left\{ (x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid \mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{1}{1 + 10 \cdot (x - 5)^2} \right\} \quad (3.7)$$

Pri tome, jasno je da ovo nije bio jedini način da se fazi skup  $\tilde{A}$  definiše. Potpuno slobodno smo ga mogli definisati i na sledeći način:

$$\tilde{A} = \left\{ (x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid \mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{1}{1+(x-5)^2} \right\} \quad (3.8)$$

Ovaj primer jasno pokazuje da je funkcije pripadnosti fazi skupa subjektivne prirode, ali to ne znači da se ova funkcija može proizvoljno birati.

*Napomena:* U daljem tekstu znak „~“ iznad oznake fuzi skupa biće izostavljan.

### **Fazi singleton (singleton):**

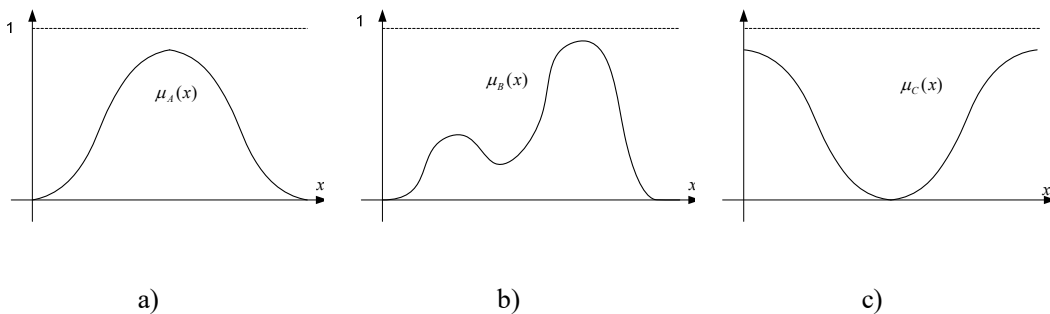
Fazi singleton je fazi skup  $A$  čija se podrška sastoji od samo jednog elementa  $x_0$  iz  $U$  i pri tome je  $\mu_A(x_0)=1$ .

### **Konveksnost fazi skupova:**

Konveksnost fazi skupova igra vrlo važnu ulogu u teoriji fazi skupova i može biti definisana na osnovu  $\alpha$ -odsecanja ili funkcije pripadnosti. Za fazi skup se kaže da je konveksan ako i samo ako je svako  $\alpha$ -odsecanje konveksan skup. Drugim rečima, fazi skup  $A$  je konveksan ako i samo ako je zadovoljena relacija:

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)) \quad (3.9)$$

gde je  $x_1, x_2 \in U, \lambda \in [0,1]$ . Poslednja relacija se može interpretirati i na sledeći način: uzmu se dva elementa  $x_1$  i  $x_2$  iz fazi skupa  $A$  i povuče se duž koja ih spaja. Da bi fazi skup bio konveksan, funkcija pripadnosti za svaku tačku sa duži mora biti veća ili jednaka od minimuma vrednosti  $\mu_A(x_1)$  i  $\mu_A(x_2)$ . Na Sl. 3.3a funkcija pripadnosti je konveksna, ali nije normalizovana, na Sl. 3.3b je prikazana nekonveksna, normalizovana funkcija. Primetimo da konveksnost fazi skupa ne podrazumeva konveksnost funkcije pripadnosti (Sl. 3.3c).



Sl. 3.3 - Konveksnost fazi skupova [102]

### **Fazi broj**

Konveksan, normalizovan fazi skup definisan na realnoj osi  $\mathfrak{R}$ , čija je funkcija pripadnosti deo po deo neprekidna, ili što je ekvivalentno, čija su  $\alpha$ -odsecanja zatvoreni intervali, se naziva fazi broj. Dva tipična fazi broja su  $S$  funkcija i  $\pi$  funkcija, koja su definisana na sledeći način:

$$S(x; a, b) = \begin{cases} 0 & x < a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a \leq x < \frac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x < b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (3.10)$$

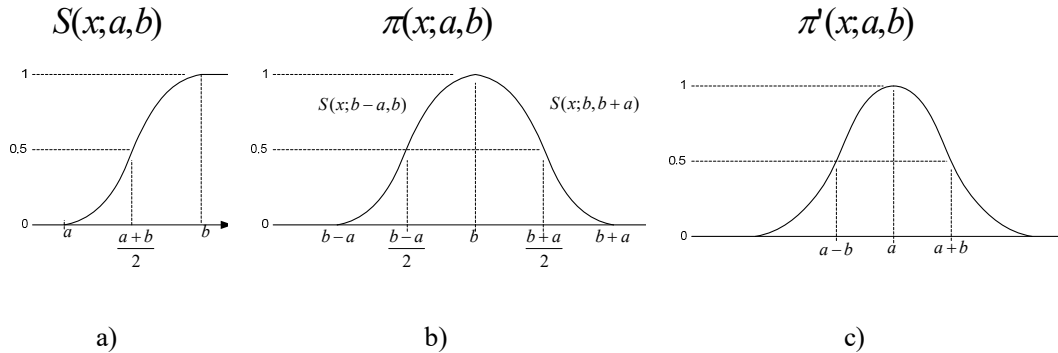
$$\pi(x; a, b) = \begin{cases} S(x; b-a, b) & x < b \\ 1-S(x; b, b+a) & x > b \end{cases} \quad (3.11)$$

Ove su dve funkcije prikazane na Sl. 3.4a i Sl. 3.4b. U funkciji  $S(x; a, b)$  tačka prolaska iznosi  $(a+b)/2$ , dok je u funkciji  $\pi(x; a, b)$  tačka  $b$  u kojoj funkcija uzima vrednost 1, a postoje dve tačke prolaska, jedna od njih je u  $(b-a)/2$ , a druga  $(b+a)/2$ . Rastojanje između ove dve tačke prolaska iznosi  $a$  i ovo se odstojanje često naziva *propusnim opsegom*.

Ponekada se  $\pi$  funkcija definiše na nešto jednostavniji način:

$$\pi'(x; a, b) = \frac{1}{1+(x-a/b)^2} \quad (3.12)$$

Oblik funkcija  $\pi$  i  $\pi'$  je vrlo sličan, jedina značajna razlika je u tome što je propusni opseg ove druge  $2b$ .



Sl. 3.4 - Standardnih fazi brojevi [102]

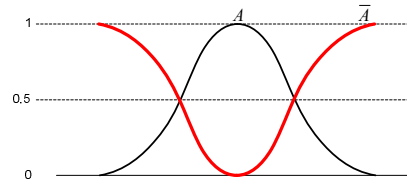
### 3.1.1. Osnovne operacije

Neka su  $A$  i  $B$  fazi skupovi nad univerzumom  $U$ , tada možemo definisati:

#### **Komplement:**

Kada je  $\mu_A(x) \in [0,1]$ , komplement fazi skupa  $A$  predstavlja fazi skup, koji se označava sa  $\bar{A}$ , i njegova funkcija pripadnosti se definiše na sledeći način:

$$\mu_{\bar{A}}(x) \equiv 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in U \quad (3.13)$$



Sl. 3.5 - Komplement fazi skupa [102]

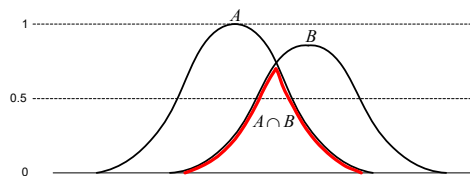
**Presek:**

Presek fazi skupova  $A$  i  $B$  predstavlja fazi skup, koji se označava sa  $A \cap B$ , i njegova funkcija pripadnosti se definiše na sledeći način:

$$\mu_{A \cap B}(x) \equiv \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \equiv \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (3.14)$$

gde je sa  $\wedge$  označen operator minimuma. Na osnovu definicije preseka može se zaključiti da važe relacije:

$$A \cap B \subseteq A \quad i \quad A \cap B \subseteq B \quad (3.15)$$



Sl. 3.6 - Presek fazi skupova [102]

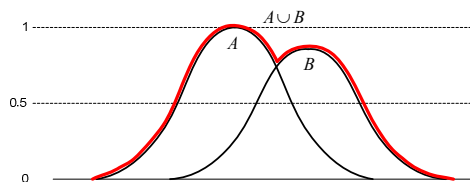
**Unija:**

Unija fazi skupova  $A$  i  $B$  predstavlja fazi skup, koji se označava sa  $A \cup B$ , i njegova funkcija pripadnosti se definiše na sledeći način:

$$\mu_{A \cup B}(x) \equiv \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \equiv \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (3.16)$$

gde je sa  $\vee$  označen operator maksimuma. Na osnovu definicije unije može se zaključiti da važe relacije:

$$A \subseteq A \cup B \quad i \quad B \subseteq A \cup B \quad (3.17)$$



Sl. 3.7 - Unija fazi skupova [102]

**Kartezijanski proizvod:**

Neka su  $A_1, A_2, \dots, A_n$  fazi skupovi definisani u univerzumima  $U_1, U_2, \dots, U_n$  respektivno. Kartezijanski proizvod fazi skupova  $A_1, A_2, \dots, A_n$  je fazi skup u  $n$ -dimenzionalnom prostoru  $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$  sa funkcijom pripadnosti definisanom na sledeći način:

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \equiv \min[\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)] \quad x_1 \in U_1, x_2 \in U_2, \dots, x_n \in U_n \quad (3.18)$$

**Algebarska suma:**

Algebarska suma dva fazi skupa  $A$  i  $B$  predstavlja fazi skup, koji se označava sa  $A + B$ , i ima funkciju pripadnosti definisanu kao:

$$\mu_{A+B}(x) \equiv \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (3.19)$$

**Algebarski proizvod:**

Algebarski proizvod dva fazi skupa  $A$  i  $B$  predstavlja fazi skup, koji se označava sa  $A \cdot B$ , i ima funkciju pripadnosti definisanu kao:

$$\mu_{A \cdot B}(x) \equiv \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (3.20)$$

**Ograničena suma:**

Ograničena suma dva fazi skupa  $A$  i  $B$  predstavlja fazi skup, koji se označava sa  $A \oplus B$ , i ima funkciju pripadnosti definisanu kao:

$$\mu_{A \oplus B}(x) \equiv \min[1, \mu_A(x) + \mu_B(x)] \quad (3.21)$$

**Ograničena razlika:**

Ograničena razlika dva fazi skupa  $A$  i  $B$  predstavlja fazi skup, koji se označava sa  $A \ominus B$ , i ima funkciju pripadnosti definisanu kao:

$$\mu_{A \ominus B}(x) \equiv \max[0, \mu_A(x) - \mu_B(x)] \quad (3.22)$$

**3.1.2. Tip- $m$  fazi skupovi**

Proširenjem osnovnog koncepta fazi skupova moguće je dozvoliti da stepen pripadnosti fazi skupu ne bude izražen jasno definisanom funkcijom već pomoću fazi skupova. Fazi skup čija se pripadnost izražava pomoću običnih fazi skupova naziva se *tip-2* fazi skup. Pod običnim fazi skupovima se smatraju skupovi čija se pripadnost izražava pomoću jasno definisane funkcije pripadnosti i nazivaju se *tip-1* fazi skupovi. Drugim rečima, *tip-2* fazi skup je fazi skup čije su vrednosti pripadnosti *tip-1* fazi skupovi na  $[0,1]$ .



Tip-2 fazi skup  $A$ , definisan na univerzumu  $U$ , ima pripadnost definisanu sa:

$$\mu_A : U \rightarrow [0,1]^{[0,1]} \quad (3.23)$$

gde je  $\mu_A(x)$  fazi ocena koja predstavlja fazi skup definisan na  $[0,1]$ :

$$\mu_A(x) = \int f(u)/u, \quad u \in [0,1] \quad (3.24)$$

gde je  $f$  funkcija pripadnosti fazi ocene  $\mu_A(x)$  definisana sa:

$$f : [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (3.25)$$

Tip- $m$  fazi skupovi ( $m > 1$ ) na  $U$  se definišu rekurzivno. Kod tip- $m$  fazi skupova vrednosti pripadnosti su tip- $(m-1)$  fazi skupovi. Parametar  $m$  predstavlja dubinu (stepen) ugnježdavanja. Ako se sa  $\tilde{P}(U)$  označi skup svih fazi podskupova definisanih na  $U$  i neka je:

$$\tilde{P}^m(U) = \tilde{P}(\tilde{P}^{m-1}(U)) \quad (3.26)$$

za  $m > 1$ . Tada je fazi ocena, tip- $m$  fazi skupa  $A$ , definisana sa:

$$\mu_A : \tilde{P}^{m-1}(U) \rightarrow [0,1] \quad (3.27)$$

### 3.2. Fazi relacije

Jasne binarne relacije reprezentuju prisustvo ili odsustvo pridruživanja, preseka ili neke druge povezanosti između elemenata dva jasna skupa. Fazi binarna relacija predstavlja generalizaciju jasne binarne relacije koja dozvoljava raznolike stepene pridruživanja između elemenata [102]. Stepem pridruživanja može se predstaviti stepenom pripadanja fazi binarnoj relaciji na isti način kao kod fazi skupova. Uva činjenica faktički govori da su binarne fazi relacije u stvari fazi skupovi čiji su elementi uređeni parovi. Takođe, moguće je definisati i  $n$ -arne fazi relacije koje faktički predstavljaju fazi skupove čiji su elementi uređene  $n$ -torke.

Jasne relacije su zasnovane na konceptu po kome su svi elementi u relaciji ili nisu u relaciji, dok su fazi relacije zasnovane na principu po kome su svi elementi u relaciji u nekom određenom stepenu.

Jasna relacija  $R$ , definisana na jasnim skupovima  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , je u stvari podskup kartezijanskog proizvoda tih skupova:

$$R(X_1, X_2, \dots, X_n) \subset X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n, \quad (3.28)$$

gde je kartezijanski proizvod definisan sa:

$$X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) \mid \forall x_i \in X_i, \forall i \in \{1, \dots, n\}\} \quad (3.29)$$

Sa druge strane fazi relacija  $R$  predstavlja fazi skup definisan na kartezijanskom proizvodu skupova  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , gde se svakoj  $n$ -torki  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  pridružuje stepen pripadanja definisan funkcijom pripadnosti  $\mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Na taj način fazi relacija se može prikazati na sledeći način:

$$R(X_1, X_2, \dots, X_n) = \int_{X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n} \mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n) / (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad x_i \in X_i \quad (3.30)$$

Jasno se vidi da su fazi relacije u stvari fazi skupovi.

**Primer 3.2:** Posmatrajmo skupove  $X = \mathfrak{R}$  i  $Y = \mathfrak{R}$ . Tada za  $x \in X$  i  $y \in Y$  može da se definiše binarna fazi relacija  $R = "y$  je mnogo veće od  $x"$  na  $X \times Y$  čija je funkcija pripadnosti:

$$\mu_R(x, y) = \begin{cases} 0, & x \geq y \\ \frac{1}{1 + (5/(y-x)^2)}, & x < y \end{cases}$$

### Kompozicija fazi relacija:

Postoje dva tipa kompozicionih operatora: *relacija-relacija* i *skup-relacija*. Neka je  $P(X, Y)$  fazi relacija na  $X \times Y$  i  $Q(Y, Z)$  na  $Y \times Z$ . Tada je moguće definisati dva najčešće korišćena operatora:

- *max-min* kompozicija ( $P \circ Q$ ):

$$\mu_{P \circ Q}(x, z) \equiv \max_{y \in Y} \min[\mu_P(x, y), \mu_Q(y, z)], \quad \forall x \in X, z \in Z \quad (3.31)$$

- *min-max* kompozicija ( $P \bullet Q$ ):

$$\mu_{P \bullet Q}(x, z) \equiv \min_{y \in Y} \max[\mu_P(x, y), \mu_Q(y, z)], \quad \forall x \in X, z \in Z \quad (3.32)$$

Kompozicija fazi relacija se može interpretirati kao indikacija jačine povezanosti između elemenata skupova  $X$  i  $Z$ . Na osnovu predhodnih definicija može se primetiti da važi sledeća relacija:

$$\overline{P \bullet Q} = \overline{P} \circ \overline{Q} \quad (3.33)$$

Takođe, može se primetiti da važe i sledeće relacije:

$$\begin{aligned} P * Q &\neq Q * P \\ (P * Q)^{-1} &= Q^{-1} * P^{-1} \\ (P * Q) * R &= Q * (P * R) \end{aligned} \quad (3.34)$$

gde simbol  $*$  označava *max-min* ili *min-max* operator.

Neka je  $A$  fazi skup na  $X$  i  $R(X, Y)$  fazi relacija na  $X \times Y$ . Tada je moguće definisati dva najčešće korišćena operatora:

- *max-min* kompozicija ( $A \circ R$ ):

$$\mu_{A \circ R}(y) \equiv \max_{x \in X} \min[\mu_A(x), \mu_R(x, y)], \quad \forall y \in Y \quad (3.35)$$

- *min-max* kompozicija ( $A \bullet R$ ):

$$\mu_{A \bullet R}(y) \equiv \min_{x \in X} \max[\mu_A(x), \mu_R(x, y)], \quad \forall y \in Y \quad (3.36)$$

### 3.3. *Lingvističke promenljive*

U slučaju kada su pojave (koje treba da se opišu, sagledaju i na osnovu toga posmatraju, tumače i kontrolišu na pravilan način) suviše složene ili gotovo nemoguće opisljive pomoću kvantitativnih relacija, do prihvatljivih rezultata se može doći primenom fazi logike i aproksimativnog rezonovanja. U aproksimativnom rezonovanju osnovni elementi sa kojima se operiše su lingvističke promenljive. Lingvističke promenljive su promenljive čije vrednosti su reči ili izrazi iz jezika ili prirodnog govora. Vrednosti lingvističkih promenljivih su fazi promenljive.

Pojam lingvističke promenljive uveo je Zadeh [104]. Da bi se definisala lingvistička promenljiva prethodno je potrebno definisti fazi promenljivu.

### **Fazi promenljiva:**

Fazi promenljiva se predstavlja kao uređena trojka  $(X, U, R(X))$  gde je  $X$  ime promenljive,  $U$  univerzum posmatranja i  $R(X)$  je fazi podskup  $U$  koji predstavlja fazi restrikciju nametnutu sa  $X$ .

Tako za  $X=Visok$  u univerzumu  $U = \{20,40,\dots,200\}$  može se definisati fazi restrikcija:

$$R(X) = R(Visok) = \frac{0}{40} + \frac{0.01}{60} + \frac{0.05}{80} + \frac{0.1}{100} + \frac{0.2}{120} + \frac{0.4}{140} + \frac{0.8}{160} + \frac{0.9}{180} + \frac{1}{200} + \frac{1}{220}$$

tada uređena trojka  $(Visok, U, R(Visok))$  predstavlja fazi promenljivu.

### **Lingvistička promenljiva:**

Lingvistička promenljiva je višeg reda promenljiva u odnosu na fazi promenljivu i vrednosti koje može da ima su u stvari fazi promenljive. Lingvistička promenljiva se predstavlja uređenom petorkom:

$$(x, T(x), U, G, M) \quad (3.37)$$

gde je:

- $x$  ime,
- $T(x)$  skup naziva  $x$ , gde svaki naziv  $x$  predstavlja fazi promenljivu definisanu na univerzumu  $U$ ,
- $G$  je sintaksno pravilo generisanja naziva promenljive  $x$  i
- $M$  je semantičko pravilo povezivanja svakog naziva promenljive  $x$  sa njegovim smislom.

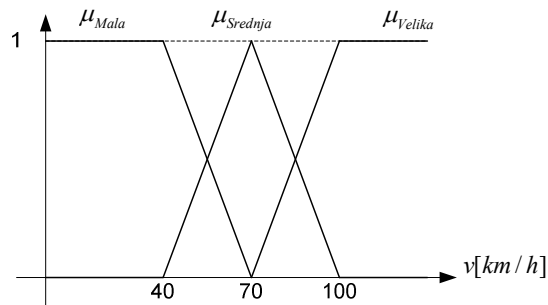
**Primer 3.3:** Ako je  $x=Brzina$  lingvistička promenljiva definisana na univerzumu  $U = [0,180]km/h$  tada bi njen skup naziva  $T(x)$  mogao biti:

$$T(Brzina) = \{Mala, Srednja, Velika\}$$

Tada semantičko pravilo  $M$  bi moglo biti definisano sa:

- $M(Mala) =$  Fazi skup "brzina ispod 40km/h" sa funkcijom pripadnosti  $\mu_{Mala}$ ,
- $M(Srednja) =$  Fazi skup "brzina oko 70km/h" sa funkcijom pripadnosti  $\mu_{Srednja}$ , i
- $M(Velika) =$  Fazi skup "brzina iznad 100km/h" sa funkcijom pripadnosti  $\mu_{Velika}$

pri čemu su funkcije pripadnosti prikazane na Sl. 3.8.

Sl. 3.8 - Funkcije pripadnosti lingvističke promenljive *Brzina*

U prethodnom primeru može se primetiti da postoji pravilnost u generisanju elemenata  $T(x)$ , kao i jasna veza između elemenata  $T(x)$  i njihovih značenja definisanog sa  $M$ .

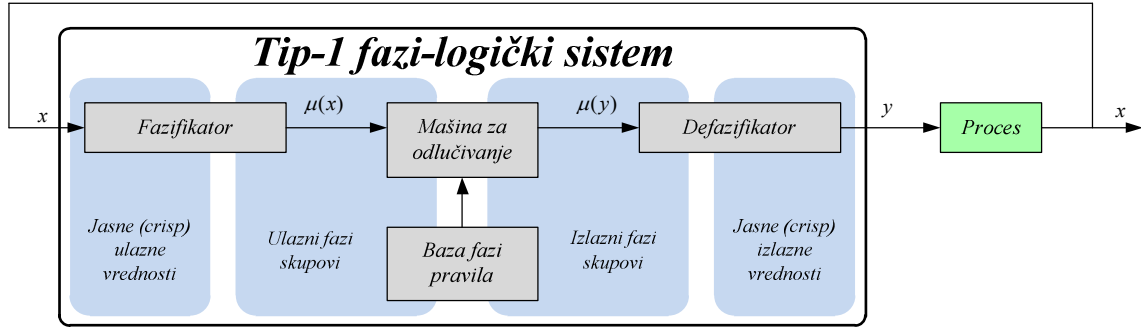
U slučajevima kada skup  $T(x)$  i pravila  $G$  i  $M$  mogu da se formulišu u obliku algoritma, tj. da se elementi skupa  $T(x)$  generišu algoritamski i značenja njegova takođe generišu algoritamski tada se  $x$  može smatra *strukturiranom lingvističkom promenljivom*.

### 3.4. Fazi-logički sistemi

Osnovna logika koja prati fazi-logičke sisteme (FLS) je primena *ekspertskog iskustva* operatera u dizajniranju algoritma odlučivanja, čije su ulazno-izlazne veze predstavljene kolekcijom *IF-THEN* fazi pravila u kojima su uključene fazi logičke promenljive. Primenom fazi lingvističkih varijabli, fazi kontrolnih pravila i fazi aproksimativnog rezonovanja omogućava se ugrađivanje ekspertskog iskustva operatera u dizajn algoritma upravljanja.

#### 3.4.1. Tip-1 fazi-logički sistemi (T1-FLS)

Tip-1 fazi-logički sistemi se najčešće primenjuju za upravljanje procesima (Sl. 3.9), kada se nazivaju FLC sistemima (FLC, Fuzzy Logic Control). Primena FLC sistema inicirana je pionirskim radovima [105] od kada FLC sistemi postaju najaktivnija i najplodonosnija oblast istraživanja primene teorije fazi skupova, fazi logike i fazi rezonovanja. Proizvedeno je mnoštvo industrijskih i potrošačkih proizvoda, zasnovanih na FLC tehnologiji. Poseban uspeh FLC sistemi su doživeli u Japanu. Za razliku od konvencionalnih upravljačkih tehnika, FLC tehnika se pokazala najboljom u slučajevima kada je proces kojim treba da se upravlja kompleksan i loše definisa, koji se valjano može kontrolisati veštinom operatera bez preteranog poznavanja same dinamike procesa kojim se upravlja.



Sl. 3.9 – Tip-1 fazi-logički sistem primenjen za upravljanje procesom [102]

Tipična struktura tip-1 fazi-logičkog sistema (Sl. 3.9) sačinjena je od četiri komponente:

- fazifikatora,
- baze fazi pravila,
- mašine za odlučivanje i
- defazifikatora.

U slučaju da izlaz iz defazifikatora nije upravljački ulaz procesa tada se radi o *fazi-logičkom sistemu za odlučivanje*. Fazifikator ima ulogu da jasan podatak ili merenje (npr. "Brzina iznosi 10km/h") prevede u fazi domen tako što odgovarajućoj fazi lingvističkoj promenljivoj dodeli vrednost u obliku odgovarajućeg fazi skupa. Na primer, merenje brzine se može iskazati jasanim izrazom "Brzina iznosi 10km/h". Fazifikator prevodi ovaj izraz u fazi izraz "Brzina je VRLO Mala" čime lingvističkoj fazi promenljivoj "Brzina" dodeljuje vrednost u obliku fazi skupa "VRLO Mala". U bazi fazi pravila uskladišteno je ekspertsko iskustvo operatera stečeno kontrolisanjem procesa. Mašina za odlučivanje je jezgro fazi-logičkog sistema i ona simulira operatera tj. donosi odluke umesto operatera primenom aproksimativnog rezonovanja kako bi se postigla željena strategija upravljanja. Defazifikator vrši prevođenje iz fazi domena u jasan domen čime se dobijaju upravljački signali za upravljanje procesom ili donose jasne odluke.

#### 3.4.1.1. Ulazni i izlazni vektor

Ulazne lingvističke promenljive  $x_i$  (ulazna stanja) smeštene su u ulazni vektor stanja  $x$ , a izlazne lingvističke promenljive  $y_i$  (izlazna stanja ili upravljanja) u izlazni vektor stanja  $y$ :

$$x = \left[ (x_i, U_i, \{T_{x_i}^1, T_{x_i}^2, \dots, T_{x_i}^{K_i}\}, \{\mu_{x_i}^1, \mu_{x_i}^2, \dots, \mu_{x_i}^{K_i}\}) \right]_{i=1, \dots, n} \quad (3.38)$$

$$y = \left[ (y_i, V_i, \{T_{y_i}^1, T_{y_i}^2, \dots, T_{y_i}^{L_i}\}, \{\mu_{y_i}^1, \mu_{y_i}^2, \dots, \mu_{y_i}^{L_i}\}) \right]_{i=1, \dots, m} \quad (3.39)$$

gde su ulazni lingvistički vektor  $x$  i izlazni lingvistički vektor  $y$  definisani na univerzumima  $U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$  i  $V = V_1 \times V_2 \times \dots \times V_m$  respektivno.

Iz predhodnih jednačina (3.38) i (3.39) može se primetiti da je svaka ulazna lingvistička promenljiva  $x_i$ , definisana u univerzumu  $U_i$ , opisana sa  $T(x_i) = \{T_{x_i}^1, T_{x_i}^2, \dots, T_{x_i}^{K_i}\}$  i  $\mu(x_i) = \{\mu_{x_i}^1, \mu_{x_i}^2, \dots, \mu_{x_i}^{K_i}\}$ , gde je  $T(x_i)$  skup naziva  $x_i$  čiji svaki element  $T_{x_i}^{k_i}$  predstavlja fazi skup sa funkcijom pripadnosti  $\mu_{x_i}^{k_i}$  definisan na univerzumu  $U_i$ . Slično ovome, može se primetiti da je svaka izlazna lingvistička promenljiva  $y_i$ , definisana u univerzumu  $V_i$ , opisana sa

$T(y_i) = \{T_{y_i}^1, T_{y_i}^2, \dots, T_{y_i}^{L_i}\}$  i  $\mu(y_i) = \{\mu_{y_i}^1, \mu_{y_i}^2, \dots, \mu_{y_i}^{L_i}\}$ , gde je  $T(y_i)$  skup naziva  $y_i$  čiji svaki element  $T_{y_i}^{L_i}$  predstavlja fazi skup sa funkcijom pripadnosti  $\mu_{y_i}^{L_i}$  definisan na univerzumu  $V_i$ .

Drugim rečima,  $\mu(x_i)$  predstavlja semantičko pravilo koje povezuje svaki član skupa  $T(x_i)$  sa njegovim fizičkim značenjem. Takođe,  $\mu(y_i)$  predstavlja semantičko pravilo koje povezuje svaki član skupa  $T(y_i)$  sa njegovim fizičkim značenjem. Tako, na primer, ako je  $x_i$  ulazna lingvistička promenljiva "Brzina", tada se može definisati kao:

$$T(x_i) = T(\text{Brzina}) = \{T_{\text{Brzina}}^1, T_{\text{Brzina}}^2, T_{\text{Brzina}}^3\} = \{\text{"Mala"}, \text{"Srednja"}, \text{"Velika"}\}.$$

**Fazi particija:**

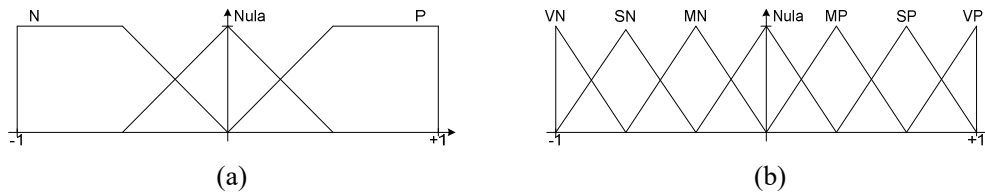
Veličina ili kardinalnost skupa  $T(x_i)$  je  $|T(x_i)| = K_i$  i naziva se **fazi particija**  $x_i$ . Fazi particije definišu fazi razućenost (*granularity*) fazi-logičkog upravljanja i definišu maksimalan broj mogućih fazi pravila. U slučaju  $n$  ulaznih lingvističkih promenljivih, maksimalan broj mogućih fazi logičkih pravila iznosio bi  $K_1 \times K_2 \times \dots \times K_n$ . Tako na primer u slučaju fazi-logičkog kontrolera sa dve ulazne promenljive kod koga je  $|T(x_1)| = 3$  i  $|T(x_2)| = 5$ , maksimalan broj mogućih fazi pravila bi bio  $|T(x_1)| \cdot |T(x_2)| = 15$ .

**Primer 3.4:** Ako posmatramo ulaznu lingvističku promenljivu "Brzina" u normalizovanom univerzumu  $U = [-1, +1]$ , fazi skupove  $N=Negativna$ ,  $Nula$  i  $P=Pozitivna$  definisane na  $U$  i fazi modifikatore  $Velika=V$ ,  $Srednja=S$  i  $Mala=M$  tada je moguće definisati *grubu* fazi particiju Sl. 3.10a sa tri elementa:

$$T(\text{Brzina}) = \{N, Nula, P\}$$

ili *finu* fazi particiju Sl. 3.10b sa sedam elemenata:

$$T(\text{Brzina}) = \{VN, SN, MN, Nula, MP, SP, VP\}.$$



Sl. 3.10 - Primer grube i fine fazi particije

Ulazne funkcije pripadnosti  $\mu_{x_i}^k, k = 1, \dots, K_i$  i izlazne funkcije pripadnosti  $\mu_{y_i}^l, l = 1, \dots, L_i$  u fazi-logičkim kontrolerima obično se predstavljaju kao parametarske trougaone i trapezoidalne funkcije ili pomoću funkcija u obliku zvona. Funkcija u obliku zvona se može definisati na sledeći način:

$$\mu_{x_i}^k(u) = e^{-\frac{(u-m_i^k)^2}{2\sigma_i^k}} \tag{3.40}$$

gde parametri  $m_i^k$  i  $\sigma_i^k$  određuju srednju vrednost i širinu zvona.

Pravilno partitionisanje ulaznih i izlaznih prostora je od suštinskog značaja za sintezu valjanog fazi-logičkog upravljanja. Na žalost, za ovaj problem ne postoji determinističko i jedinstveno rešenje. Zbog te činjenice, u praksi se primenjuju iterativne metode probanja i korigovanja greške. Ukoliko se definiše kriterijum za ocenu greške, tada je moguće formulisati automatsku proceduru kojom će se u svakoj iteraciji vršiti minimizacija kriterijuma korigovanjem parametara funkcija pripadnosti i korigovanjem fazi-logičkih pravila. Drugim rečima, iterativno se vrši obučavanje fazi-logičkog kontrolera.

### 3.4.1.2. Fazifikator

Fazifikator obavlja funkciju fazifikacije kojom se izmerena vrednost preslikava u odgovarajuću subjektivnu vrednost. Stoga, se fazifikacija može definisati kao preslikavanje posmatranog ulaznog prostora u nazive fazi skupova definisane u tom prostoru. S'obzirom na činjenicu da fazi-logički kontroleri se zasnivaju na primeni fazi teorije, fazifikacija je neophodna i poželjno je da se vrši u što ranijoj fazi. U aplikacijama u kojima se primenjuje fazi-logička kontrola posmatrani ulazni podaci su obično jasni (crisp), sa eventualnim dodatkom šuma merenja. Kao jednostavna i prirodna fazifikacija nameće se konverzija jasne vrednosti  $x_0$  u fazi singleton  $A$ . Drugim rečima ovakva fazifikacija predstavlja preslikavanje:

$$x_0 \xrightarrow{\text{fazifikacija}} A, \mu_A(u) = \begin{cases} 1, & u = x_0 \\ 0, & u \neq x_0 \end{cases} \quad (3.41)$$

U slučaju ulaznog vektora  $x(t)$  posmatranog u trenutku  $t$  fazifikacija bi se svela na njegovo preslikavanje u vektor fazi singltona:

$$x(t) = [x_i(t)]_{i=1,\dots,n} \xrightarrow{\text{fazifikacija}} [T_{x_i(t)}]_{i=1,\dots,n}, \mu_{x_i(t)}(u) = \begin{cases} 1, & u = x_i(t) \\ 0, & u \neq x_i(t) \end{cases} \quad (3.42)$$

Ovakav pristup fazifikacije, zasnovan na primeni fazi singltona, je najčešće primenjivan u praksi. Njegova široka rasprostranjenost je uzrokovana njegovom lakom implementacijom i što njegovom primenom značajno se pojednostavljuje fazi rezonovanje.

U složenijim slučajevima kada su posmatrani ulazni podaci merenja sa dodatkom šuma, koji se ne može ignorisati u sintezi fazi-logičkog kontrolera, potrebno je fazifikacijom slučajne podatke preslikati u odgovarajuće fazi mogućnosne (possibility) podatke.

### 3.4.1.3. Baza fazi pravila

Baza fazi pravila je u stvari kolekcija *IF-THEN* pravila u kojima su sadržane pretpostavke i njihove posledice u kojima su obuhvaćene ulazne i izlazne lingvističke promenljive. Kolekcija fazi pravila predstavlja jednostavne relacije između ulaza i izlaza sistema. Ako posmatramo sistem sa više ulaza i više izlaza tada je kolekcija fazi pravila:

$$R^{(j_1, \dots, j_n)} : \text{IF } x_1 \text{ is } A_{1,j_1}, \dots, x_n \text{ is } A_{n,j_n} \text{ THEN } y_1 = B_1^{(j_1, \dots, j_n)}, \dots, y_m = B_m^{(j_1, \dots, j_n)} \quad (3.43)$$

$$j_1 = 1, \dots, |T(x_1)|, \dots, j_n = 1, \dots, |T(x_n)|$$

gde su  $x_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) ulazne lingvističke promenljive (ulazi fazi-logičkog kontrolera) definisane na univerzumima  $U_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) sa lingvističkim vrednostima  $A_{i,j_i}$  i  $y_k$  ( $k=1, \dots, m$ ) izlazne lingvističke promenljive (izlazi fazi-logičkog kontrolera) definisane na univerzumima  $V_k$ , ( $k=1, \dots, m$ ) sa

lingvističkim vrednostima  $B_k^{(j_1, \dots, j_n)}$ . U slučaju da su posledice u obliku funkcija ulaznih promenljivih, kolekcija fazi pravila se svodi na:

$$R^{(j_1, \dots, j_n)} : \text{IF } x_1 \text{ is } A_{1,j_1}, \dots, x_n \text{ is } A_{n,j_n} \text{ THEN } y_1 = f_1^{(j_1, \dots, j_n)}(x_1, \dots, x_n), \dots, y_m = f_m^{(j_1, \dots, j_n)}(x_1, \dots, x_n) \quad (3.44)$$

$$j_1 = 1, \dots, |T(x_1)|, \dots, j_n = 1, \dots, |T(x_n)|$$

gde su ulazi fazifikovani dok su izlazi jasne vrednosti iz razloga što je defazifikacija izvršena u samim funkcijama  $f_k^{(j_1, \dots, j_n)}(x_1, \dots, x_n)$ .

#### 3.4.1.4. Mašina za odlučivanje

Mašina za odlučivanje je jezgro fazi-logičkog kontrolera kojim se modeluje donošenje odluka čoveka (operatera) u okviru primene fazi logike i aproksimativnog rezonovanja. U tom kontekstu **generalizovani modus ponens** ili **odlučivanje propagacijom podataka unapred** predstavlja posebno važno pravilo odlučivanja. Generalizovani modus ponens se može napisati i u obliku:

$$\begin{array}{l} \text{Pretpostavka 1 :} \quad \text{IF } x \text{ is } A \text{ THEN } y \text{ is } B \\ \text{Pretpostavka 2 :} \quad x \text{ is } A' \\ \hline \text{Zaključak :} \quad y \text{ is } B' \end{array} \quad (3.45)$$

gde su  $A, A', B$  i  $B'$  fazi predikati (fazi skupovi ili relacije) na univerzumima  $U, U, V$  i  $V$  respektivno. Generalno posmatrano fazi kontrolno pravilo "Pretpostavka 1" predstavlja fazi relaciju koja je u stvari fazi implikacija  $R=A \rightarrow B$ . Uvažavajući ovu činjenicu relaciju (3.45) možemo predstaviti u obliku:

$$\begin{array}{l} \text{Pretpostavka 1 :} \quad (x, y) \text{ is } A \rightarrow B \\ \text{Pretpostavka 2 :} \quad x \text{ is } A' \\ \hline \text{Zaključak :} \quad y \text{ is } B' \end{array} \quad (3.46)$$

Može se primetiti da je ovakva forma prikazivanja u stvari kompoziciono pravilo odlučivanja na osnovu čega se zaključuje da je:

$$B' = A' \circ R = A' \circ (A \rightarrow B) \quad (3.47)$$

Postoje četiri tipa kompozicionih operatora koji mogu da se koriste u kompozicionom pravilu odlučivanja (Tab. 3.1).

Tab. 3.1 - Kompozicioni operatori

Kompozicioni operator	Oznaka	Napomena
<i>max min</i>	•	[106]
<i>max proizvod</i>	·	[107]
<i>max ograničen proizvod</i>	⊙	[108]
<i>max drastičan proizvod</i>	⋈	[108]

U primeni fazi-logičkog upravljanja najčešće primenjivani operatori su *max-min* i *max-proizvod* operatori zbog njihove jednostavnosti i računске efikasnosti.

Ako prethodna četiri operatora predstavimo simbolom "max-\*" tada se funkcija pripadnosti može odrediti na sledeći način:



$$\mu_{B'}(v) = \sup_u \{ \mu_{A'}(u) * \mu_{A \rightarrow B}(u, v) \} \quad (3.48)$$

gde \* označava operatore min, proizvod, ograničeni proizvod i drastičan proizvod.

Sa druge strane fazi implikacija  $A \rightarrow B$  može biti neka od mnogobrojno definisanih u fazi teoriji (oko 40-ak fazi implikacija je definisano). Neke od najčešće primenjivanih fazi implikacija [108] su prikazane u Tab. 3.2.

Tab. 3.2 – Fazi implikacija [102]

Oznaka	Naziv	Formula ( $a \rightarrow b$ )	Napomena
$R_c$	minimum	$a \wedge b$	Mamdani
$R_p$	proizvod	$a \cdot b$	Larsen
$R_{bp}$	ograničeni proizvod	$0 \vee (a + b - 1)$	
$R_{dp}$	drastičan proizvod	$\begin{cases} a, & b = 1 \\ b, & a = 1 \\ 0, & a, b < 1 \end{cases}$	
$R_a$	aritmetičko pravilo	$1 \wedge (1 - a + b)$	Zadeh
$R_m$	max-min pravilo	$(a \wedge b) \vee (1 - a)$	Zadeh
$R_s$	standardna sekvenca	$\begin{cases} 1, & a \leq b \\ 0, & a > b \end{cases}$	
$R_b$	bulova fazi implikacija	$(1 - a) \vee b$	
$R_g$	Gudelijanova logika	$\begin{cases} 1, & a \leq b \\ b, & a > b \end{cases}$	
$R_A$	Gogenova fazi implikacija	$\begin{cases} 1, & a \leq b \\ b/a, & a > b \end{cases}$	

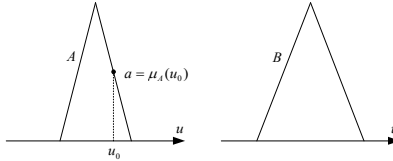
gde se do funkcija pripadnosti  $\mu_{A \rightarrow B}(u, v)$  fazi implikacija dolazi zamenom  $a$  i  $b$  sa  $\mu_A(u)$  i  $\mu_B(v)$  respektivno.

Može se primetiti da implikaciona fazi pravila iz Tab. 3.2 se generišu pomoću fazi konjunkcije, fazi disjunkcije ili fazi implikacije korišćenjem  $t$ -normi i  $t$ -konormi. Tako na primer  $R_c$ ,  $R_b$ ,  $R_{bp}$  i  $R_{dp}$  su  $t$ -konorme.  $R_c$  je primenjeni intersekcioni operator u fazi konjukciji.  $R_p$  primenjeni operator algebarskog proizvoda u fazi konjukciji.  $R_{bp}$  je primenjeni operator ograničenog proizvoda u fazi konjukciji.  $R_{dp}$  je primenjeni operator drastičnog proizvoda u fazi konjukciji.  $R_a$  koristi operator ograničene sume.  $R_m$  koristi max-min operator definisan od strane Zadeh-a.

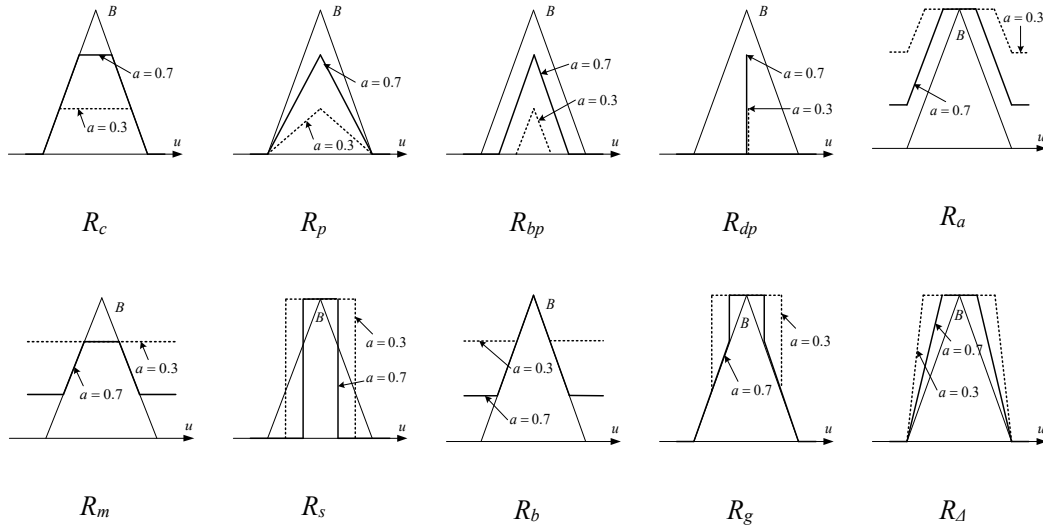
U cilju bolje ilustracije primene kompozicionog pravila i implikacionog pravila, kao i funkcije pripadnosti  $\mu_{B'}(v)$  dobijene primenom pravila odlučivanja posmatraćemo sledeći slučaj. Neka je  $A'$  fazi singleton u  $u_0$ :

$$\mu_A(u) = \begin{cases} 1, & u = u_0 \\ 0, & u \neq u_0 \end{cases} \quad (3.49)$$

Neka su  $A$  i  $B$  fazi skupovi definisani na univerzumima  $U$  i  $V$  respektivno (Sl. 3.11). Rezultujuća funkcija pripadnosti  $\mu_B(v)$  prikazana je na Sl. 3.12 za slučaj  $\mu_A(u_0) = a$ . Punom linijom prikazan je slučaj  $a=0.7$ , dok isprekidanom linijom je prikazan slučaj  $a=0.3$ . Do oblika funkcije pripadnosti  $\mu_B(v)$  se dolazi kada se u izrazu za  $\mu_{A \rightarrow B}(u, v)$  zameni  $\mu_A(u)$  sa konkretnom vrednošću  $a$ .



Sl. 3.11 - Fazi skupovi  $A$  i  $B$  na osnovu kojih se formira  $\mu_B(v)$  [102]



Sl. 3.12 - Funkcija pripadnosti  $\mu_B(v)$  dobijena zaključivanjem [102]

Od svih fazi implikacija Mamdani-jev fazi implikacioni metod  $R_c$  u kombinaciji sa *max-min* kompozicijom je najčešće i najšire primenjivan u fazi-logičkim sistemima.

U naj opštijem slučaju baza fazi pravila ima formu sistema sa više ulaza i više izlaza (MIMO - Multi Input Multi Output):

$$R = \{R_{MIMO}^1, \dots, R_{MIMO}^i, \dots, R_{MIMO}^n\} \quad (3.50)$$

gde  $R_{MIMO}^i$  predstavlja  $i$ -to pravilo:

$$\text{If } (x \text{ is } A_i \text{ AND } \dots \text{ AND } y \text{ is } B_i) \text{ THEN } (z_1 \text{ is } C_i^1, \dots, z_k \text{ is } C_i^k, \dots, z_q \text{ is } C_i^q) \quad (3.51)$$

gde  $z_k$  predstavlja  $k$ -tu upravljačku promenljivu i  $C_i^k$  predstavlja fazi predikat  $k$ -te upravljačke promenljive u  $i$ -tom pravilu. Preduslov  $i$ -tog pravila  $R_{MIMO}^i$  je fazi skup  $A_i \times \dots \times B_i$  definisan na

univerzumu  $U \times \dots \times V$ , a posledica je **unija  $q$  nezavisnih** upravljačkih vrednosti. Tako  $i$ -to pravilo možemo predstaviti na sledeći način:

$$R_{MIMO}^i : (A_i \times \dots \times B_i) \rightarrow (C_i^l + \dots + C_i^q) = \bigcup_{k=1}^q (A_i \times \dots \times B_i) \rightarrow C_i^k \quad (3.52)$$

gde je sa "+" označena unija  $q$  nezavisnih upravljačkih promenljivih. Prethodna jednačina upućuje na činjenicu da se celokupna baza pravila  $R$  može predstaviti kao unija svih  $n$  pravila odlučivanja:

$$R = \left\{ \bigcup_{i=1}^n R_{MIMO}^i \right\} = \left\{ \bigcup_{k=1}^q \bigcup_{i=1}^n (A_i \times \dots \times B_i) \rightarrow C_i^k \right\} = \left\{ \bigcup_{k=1}^q RB_{MISO}^k \right\} = \{RB_{MISO}^1, \dots, RB_{MISO}^k, \dots, RB_{MISO}^q\} \quad (3.53)$$

Prethodna jednačina ukazuje na činjenicu da je baza pravila  $R$  fazi-logičkog sistema upravljanja skup  $q$  pod baza pravila  $RB_{MISO}^k$ . Pri tome svaka pod baza pravila  $RB_{MISO}^k$  se sastoji od  $n$  fazi kontrolnih pravila sa više ulaznih promenljivih i jednom upravljačkom (izlaznom) promenljivom. Drugim rečima fazi-logički upravljački sistem sa  $n$  ulaza i  $q$  izlaza može se rastaviti na  $q$  pod sistema sa  $n$  ulaza i jednim izlazom čije su pod baze pravila odlučivanja  $RB_{MISO}^k$ . Stoga, umesto da se posmatra sistem sa više ulaza i više izlaza dovoljno je posmatrati sistem sa više ulaza i jednim izlazom (MISO - Multi Input Single Output). Generalna forma MISO sistema u slučaju dva ulaza i jednim izlazom je:

$$\begin{aligned} \text{Input} & : x \text{ is } A' \text{ AND } y \text{ is } B' \\ R^1 & : \text{IF } x \text{ is } A_1 \text{ AND } y \text{ is } B_1 \text{ THEN } z \text{ is } C_1 \\ \text{ALSO } R^2 & : \text{IF } x \text{ is } A_2 \text{ AND } y \text{ is } B_2 \text{ THEN } z \text{ is } C_2 \\ & \vdots \\ \text{ALSO } R^n & : \text{IF } x \text{ is } A_n \text{ AND } y \text{ is } B_n \text{ THEN } z \text{ is } C_n \\ \hline \text{Conclusion} & : z \text{ is } C' \end{aligned} \quad (3.54)$$

gde se sa AND uopšteno označava presek  $\cap$  i sa ALSO uopšteno označava unija  $\cup$  za različite fazi implikacije definisane u Tab. 3.2.

Ako pretpostavimo da u jednačini (3.54) ima samo jedno pravilo  $R^i$ , tada se sistem svodi na:

$$\begin{aligned} \text{Input} & : x \text{ is } A' \text{ AND } y \text{ is } B' \\ R^i & : \text{IF } x \text{ is } A_i \text{ AND } y \text{ is } B_i \text{ THEN } z \text{ is } C_i \\ \hline \text{Conclusion} & : z \text{ is } C'_i \end{aligned} \quad (3.55)$$

gde je  $C'_i$  zaključak koji potiče od pojedinačnog pravila  $R^i$ .

### **Teorema 3.1 (tretiranje operatora AND):**

**Zaključak  $C'_i$ , koji potiče od pojedinačnog pravila  $R^i$ , uopšteno se može predstaviti presekom pojedinačnih zaključaka koji potiču od pojedinačnih ulaza  $A_i$  i  $B_i$ .**

U slučaju *max-min* kompozicije i Mamdani fazi implikacije  $R_c$  prethodna teorema se može napisati na sledeći način:

$$C'_i = (A', B') \circ R_c(A_i, B_i; C_i) = [A' \circ R_c(A_i; C_i)] \cap [B' \circ R_c(B_i; C_i)] \quad (3.56)$$

gde su  $R_c(A_i, B_i; C_i) \equiv (A_i \text{ AND } B_i) \rightarrow C_i$ ,  $R_c(A_i; C_i) \equiv A_i \rightarrow C_i$  i  $R_c(B_i; C_i) \equiv B_i \rightarrow C_i$  fazi implikacije.

**Dokaz:**

$$\begin{aligned} \mu_{C'_i}(w) &= \mu_{(A', B') \circ R_c(A_i, B_i; C_i)}(w) \\ &= \bigvee_{u, v} \{ [\mu_{A'}(u) \wedge \mu_{B'}(v)] \wedge [\mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{B_i}(v) \wedge \mu_{C_i}(w)] \} \\ &= \bigvee_{u, v} \{ [\mu_{A'}(u) \wedge \mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{C_i}(w)] \wedge [\mu_{B'}(v) \wedge \mu_{B_i}(v) \wedge \mu_{C_i}(w)] \} \\ &= \left\{ \bigvee_u [\mu_{A'}(u) \wedge \mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{C_i}(w)] \right\} \wedge \left\{ \bigvee_v [\mu_{B'}(v) \wedge \mu_{B_i}(v) \wedge \mu_{C_i}(w)] \right\} \\ &= \mu_{A' \circ R_c(A_i; C_i)}(w) \wedge \mu_{B' \circ R_c(B_i; C_i)}(w) \end{aligned} \quad (3.57)$$

Ukoliko se umesto Mamdani fazi implikacije  $R_c$  primene fazi implikacije  $R_p$ ,  $R_{bp}$  ili  $R_{dp}$ , Teorema 3.1 će takođe važiti.

Ukoliko se operator AND (3.55) umesto preseka tretira kao unija i u (3.56) umesto  $R_c$ ,  $R_p$ ,  $R_{bp}$  ili  $R_{dp}$  primene  $R_a$ ,  $R_m$ ,  $R_s$ ,  $R_b$ ,  $R_g$  ili  $R_\Delta$  tada će Teorema 3.1 takođe biti zadovoljena. U slučaju  $R_a$  biće:

$$C'_i = (A', B') \circ R_a(A_i, B_i; C_i) = [A' \circ R_a(A_i; C_i)] \cup [B' \circ R_a(B_i; C_i)] \quad (3.58)$$

gde su  $R_a(A_i, B_i; C_i) \equiv (A_i \text{ AND } B_i) \rightarrow C_i$ ,  $R_a(A_i; C_i) \equiv A_i \rightarrow C_i$  i  $R_a(B_i; C_i) \equiv B_i \rightarrow C_i$  fazi implikacije.

U slučaju da se u jednačinama (3.56) i (3.58) umesto *max-min* kompozicije primeni *max-proizvod* kompozicija Teorema 3.1 će takođe biti zadovoljena.

**Teorema 3.2 (tretiranje operatora ALSO):**

***Celokupan zaključak  $C'$  uopšteno se može predstaviti unijom svih zaključaka  $C'_i$ , koji potiču od pojedinačnih pravila  $R^i$  ( $i=1, \dots, n$ ).***

U slučaju *max-min* kompozicije i Mamdani fazi implikacije  $R_c$  prethodna teorema se može napisati na sledeći način:

$$C'_i = (A', B') \circ \bigcup_{i=1}^n R_c(A_i, B_i; C_i) = \bigcup_{i=1}^n (A', B') \circ R_c(A_i, B_i; C_i) \quad (3.59)$$

**Dokaz:**

$$\begin{aligned}
 \mu_{C'}(w) &= \mu_{(A',B') \circ \bigcup_{i=1}^n R_c(A_i, B_i; C_i)}(w) = \mu_{(A',B') \circ \bigcup_{i=1}^n R_i}(w) \\
 &= (\mu_{A'}(u) \wedge \mu_{B'}(v)) \circ \bigvee_{u,v,w} (\mu_{R_1}(u, v, w), \dots, \mu_{R_n}(u, v, w)) \\
 &= \bigvee_{u,v} \left\{ (\mu_{A'}(u) \wedge \mu_{B'}(v)) \wedge \bigvee_{u,v,w} (\mu_{R_1}(u, v, w), \dots, \mu_{R_n}(u, v, w)) \right\} \\
 &= \bigvee_{u,v,w} \bigvee_{u,v} \left\{ ((\mu_{A'}(u) \wedge \mu_{B'}(v)) \wedge \mu_{R_1}(u, v, w)), \dots, ((\mu_{A'}(u) \wedge \mu_{B'}(v)) \wedge \mu_{R_n}(u, v, w)) \right\} \\
 &= \bigvee_{u,v,w} \left\{ ((\mu_{A'}(u) \wedge \mu_{B'}(v)) \circ \mu_{R_1}(u, v, w)), \dots, ((\mu_{A'}(u) \wedge \mu_{B'}(v)) \circ \mu_{R_n}(u, v, w)) \right\} \\
 &= \mu_{\bigcup_{i=1}^n (A', B') \circ R_i}(w) = \mu_{\bigcup_{i=1}^n (A', B') \circ R_c(A_i, B_i; C_i)}(w)
 \end{aligned} \tag{3.60}$$

Ukoliko se umesto Mamdani fazi implikacije  $R_c$  primene fazi implikacije  $R_p$ ,  $R_{bp}$  ili  $R_{dp}$ , Teorema 3.2 će takođe važiti.

Ukoliko se operator ALSO iz (3.54) umesto unije tretira kao presek i u (3.56) umesto  $R_c$ ,  $R_p$ ,  $R_{bp}$  ili  $R_{dp}$  primene  $R_a$ ,  $R_m$ ,  $R_s$ ,  $R_b$ ,  $R_g$  ili  $R_d$  tada će Teorema 3.2 takođe biti zadovoljena. U slučaju  $R_a$  biće:

$$C'_i = (A', B') \circ \bigcap_{i=1}^n R_c(A_i, B_i; C_i) = \bigcap_{i=1}^n (A', B') \circ R_c(A_i, B_i; C_i) \tag{3.61}$$

U slučaju da se u jednačinama (3.59) i (3.61) umesto *max-min* kompozicije primeni *max-proizvod* kompozicija Teorema 3.2 će takođe biti zadovoljena.

Teorema 3.1 i Teorema 3.2 mogu se kompaktno prikazati pomoću Tab. 3.3 i Tab. 3.4.

Tab. 3.3 - Zaključivanje fazi-logičkog sistema predstavljenog sa (3.54)

Kompoziciono pravilo	Fazi implikacija ( $R_x$ )	Zaključak $C'$
◦	$R_c, R_p, R_{bp}, R_{dp}$	$\bigcup_{i=1}^n \{ [A' \circ R_x(A_i; C_i)] \cap [B' \circ R_x(B_i; C_i)] \}$
	$R_a, R_m, R_s, R_b, R_g, R_d$	$\bigcap_{i=1}^n \{ [A' \circ R_x(A_i; C_i)] \cup [B' \circ R_x(B_i; C_i)] \}$
·	$R_c, R_p, R_{bp}, R_{dp}$	$\bigcup_{i=1}^n \{ [A' \cdot R_x(A_i; C_i)] \cap [B' \cdot R_x(B_i; C_i)] \}$
	$R_a, R_m, R_s, R_b, R_g, R_d$	$\bigcap_{i=1}^n \{ [A' \cdot R_x(A_i; C_i)] \cup [B' \cdot R_x(B_i; C_i)] \}$

U primeni fazi-logičkih sistema najčešće primenjivane fazi logičke implikacije su  $R_c$  i  $R_a$ . Sa druge strane ulazne promenljive fazi-logičkih sistema se najčešće faziifikuju u obliku fazi singltona. Ovaj specijalan i vrlo važan slučaj razmatra Teorema 3.3.

**Teorema 3.3:**

Ako su ulazi fazi-logičkog sistema fazi singltoni  $A'=u_0$  i  $B'=v_0$  tada se do zaključka  $C'$  može doći na osnovu sledeće tabele:

Tab. 3.4 - Zaključivanje fazi-logičkog sistema predstavljenog sa (3.54) u slučaju fazi singlton ulaza

Kompoziciono pravilo	Fazi implikacija ( $R_x$ )	Zaključak $C'$	
		Težinski faktor ( $\alpha_i$ ) (firing strength)	Izraz
•	$R_c$	$\mu_{A_i}(u_0) \wedge \mu_{B_i}(v_0)$	$\bigvee_{i=1}^n \alpha_i \wedge \mu_{C_i}(w)$
	$R_p$	$\mu_{A_i}(u_0) \wedge \mu_{B_i}(v_0)$	$\bigvee_{i=1}^n \alpha_i \cdot \mu_{C_i}(w)$
.	$R_c$	$\mu_{A_i}(u_0) \cdot \mu_{B_i}(v_0)$	$\bigvee_{i=1}^n \alpha_i \wedge \mu_{C_i}(w)$
	$R_p$	$\mu_{A_i}(u_0) \cdot \mu_{B_i}(v_0)$	$\bigvee_{i=1}^n \alpha_i \cdot \mu_{C_i}(w)$

**Dokaz:**

U slučaju primene *max-min* kompozicionog pravila i fazi implikacije  $R_c$ , na osnovu Teoreme 3.1, može se napisati:

$$\begin{aligned}
\mu_{C_i}(w) &= \bigvee_{i=1}^n \mu_{A' \circ R_c(A_i; C_i)}(w) \wedge \mu_{B' \circ R_c(B_i; C_i)}(w) \\
&= \bigvee_{i=1}^n [\mu_{A'}(u) \wedge (\mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{C_i}(w))] \wedge [\mu_{B'}(v) \wedge (\mu_{B_i}(v) \wedge \mu_{C_i}(w))] \\
&= \bigvee_{i=1}^n [\mu_{A_i}(u_0) \wedge \mu_{C_i}(w)] \wedge [\mu_{B_i}(v_0) \wedge \mu_{C_i}(w)] \\
&= \bigvee_{i=1}^n [\mu_{A_i}(u_0) \wedge \mu_{B_i}(v_0)] \wedge \mu_{C_i}(w) \\
&= \bigvee_{i=1}^n \alpha_i \wedge \mu_{C_i}(w)
\end{aligned} \tag{3.62}$$

U slučaju primene *max-min* kompozicionog pravila i fazi implikacije  $R_p$ , na osnovu Teoreme 3.1, može se napisati:

$$\begin{aligned}
\mu_{C_i}(w) &= \bigvee_{i=1}^n \mu_{A' \circ R_p(A_i; C_i)}(w) \wedge \mu_{B' \circ R_p(B_i; C_i)}(w) \\
&= \bigvee_{i=1}^n [\mu_{A'}(u) \wedge (\mu_{A_i}(u) \cdot \mu_{C_i}(w))] \wedge [\mu_{B'}(v) \wedge (\mu_{B_i}(v) \cdot \mu_{C_i}(w))] \\
&= \bigvee_{i=1}^n [\mu_{A_i}(u_0) \cdot \mu_{C_i}(w)] \wedge [\mu_{B_i}(v_0) \cdot \mu_{C_i}(w)] \\
&= \bigvee_{i=1}^n [\mu_{A_i}(u_0) \wedge \mu_{B_i}(v_0)] \cdot \mu_{C_i}(w) \\
&= \bigvee_{i=1}^n \alpha_i \cdot \mu_{C_i}(w)
\end{aligned} \tag{3.63}$$

Na sličan način se može pokazati da Teorema 3.3 važi i u slučaju primene *max-proizvod* kompozicionog pravila i fazi implikacija  $R_c$  i  $R_p$ .

U cilju definisanja tri tipa fazi rezonovanja najčešće korišćenih u fazi-logičkim kontrolerima, bez gubitka opštosti, posmatraćemo sistem sa dva ulaza i jednim izlazom:

$$\begin{array}{ll}
\text{Input} & : x \text{ is } A' = x_0 \text{ AND } y \text{ is } B' = y_0 \\
R^1 & : \text{IF } x \text{ is } A_1 \text{ AND } y \text{ is } B_1 \text{ THEN } z \text{ is } C_1 \\
R^2 & : \text{IF } x \text{ is } A_2 \text{ AND } y \text{ is } B_2 \text{ THEN } z \text{ is } C_2 \\
\hline
\text{Conclusion} & : z \text{ is } C'
\end{array} \tag{3.64}$$

čiji težinski faktori prvog i drugog pravila mogu se pretstaviti izrazima:

$$\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0) \quad \alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0) \tag{3.65}$$

gde su  $\mu_{A_1}(x_0)$  i  $\mu_{A_2}(x_0)$  težinski faktori atributa  $A_1$  i  $A_2$  lingvističke promenljive  $x$ , a  $\mu_{B_1}(y_0)$  i  $\mu_{B_2}(y_0)$  težinski faktori atributa  $B_1$  i  $B_2$  lingvističke promenljive  $y$ .

#### **Fazi rezonovanje prvog tipa:**

- **Mamdani-jev metod** - u ovom metodu rezonovanja primenjuje se minimum fazi implikaciono pravilo  $R_c$  na osnovu koga pojedinačno pravilo  $R^i$  dovodi do zaključka:

$$\mu_{C'_i}(w) = \alpha_i \wedge \mu_{C_i}(w) \tag{3.66}$$

dok je ukupan zaključak dat izrazom:

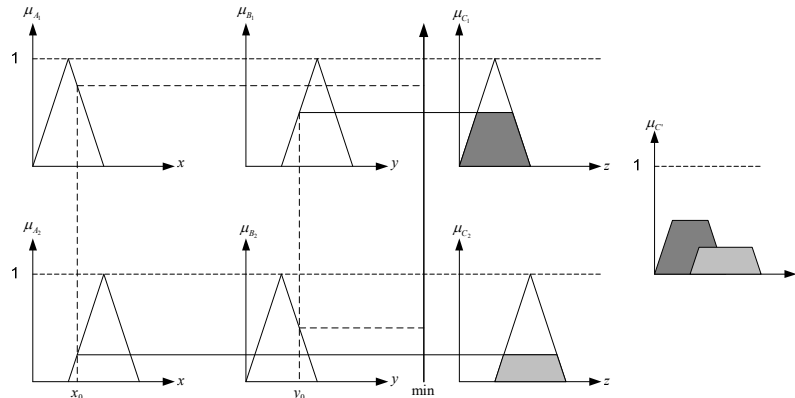
$$\mu_{C'}(w) = \mu_{C'_1}(w) \vee \mu_{C'_2}(w) = [\alpha_1 \wedge \mu_{C_1}(w)] \vee [\alpha_2 \wedge \mu_{C_2}(w)] \tag{3.67}$$

- **Larsen-ov metod** - u ovom metodu rezonovanja primenjuje se proizvod fazi implikaciono pravilo  $R_p$  na osnovu koga pojedinačno pravilo  $R^i$  dovodi do zaključka:

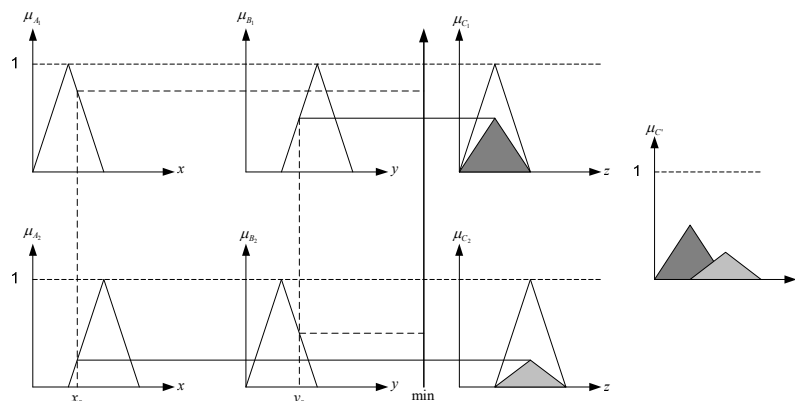
$$\mu_{C'_i}(w) = \alpha_i \cdot \mu_{C_i}(w) \tag{3.68}$$

dok je ukupan zaključak dat izrazom:

$$\mu_{C'}(w) = \mu_{C'_1}(w) \vee \mu_{C'_2}(w) = [\alpha_1 \cdot \mu_{C_1}(w)] \vee [\alpha_2 \cdot \mu_{C_2}(w)] \tag{3.69}$$



Sl. 3.13 - Fazi rezonovanje prvog tipa (Mamdani-jev metod) [102]



Sl. 3.14 - Fazi rezonovanje prvog tipa (Larsen-ov metod) [102]

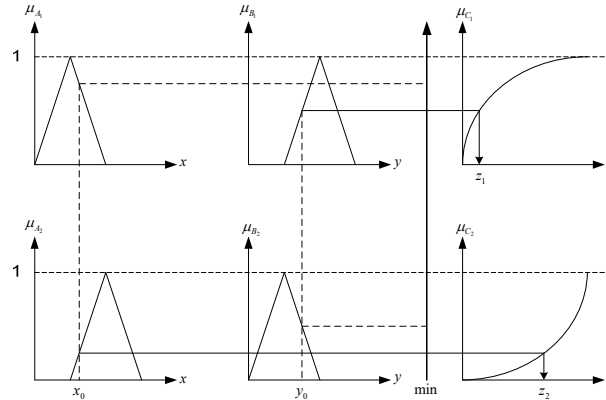
**Fazi rezonovanje drugog tipa:**

**Tsukamoto-ov metod** - može se primeniti u slučaju kada izlazne lingvističke promenljive imaju atribute čije su funkcije pripadnosti  $\mu_{C_i}(w)$  monotone [109]. Posledica monotonosti je postojanje inverzne funkcije  $\mu_{C_i}^{-1}(w)$ , pa su rezultati zaključivanja primene prvog i drugog pravila jasne vrednosti  $z_1 = \mu_{C_1}^{-1}(\alpha_1)$  i  $z_2 = \mu_{C_2}^{-1}(\alpha_2)$  respektivno. Prema tome jasna vrednost izlazne upravljačke promenljive može se dobiti kao težinska kombinacija pojedinačnih zaključaka:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 \cdot z_1 + \alpha_2 \cdot z_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (3.70)$$

Kao što se može primetiti, primenom ovog metoda defazifikacija je sadržana u samom postupku odlučivanja.





Sl. 3.15 - Fazi rezonovanje drugog tipa (Tsukamoto-ov metod) [102]

**Fazi rezonovanje trećeg tipa:**

Ovaj tip rezonovanja se primenjuje u slučaju kada su posledice u pravilima odlučivanja analitičke funkcije ulaznih lingvističkih promenljivih:

$$\begin{aligned} R^1 &: \text{IF } x \text{ is } A_1 \text{ AND } y \text{ is } B_1 \text{ THEN } f_1(x, y) \\ R^2 &: \text{IF } x \text{ is } A_2 \text{ AND } y \text{ is } B_2 \text{ THEN } f_2(x, y) \end{aligned} \quad (3.71)$$

Tada su pojedinačni zaključci prvog i drugog pravila  $f_1(x_0, y_0)$  i  $f_2(x_0, y_0)$  respektivno. Prema tome jasna vrednost izlazne upravljačke promenljive može se dobiti kao težinska kombinacija pojedinačnih zaključaka:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 \cdot f_1(x_0, y_0) + \alpha_2 \cdot f_2(x_0, y_0)}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (3.72)$$

Kao što se može primetiti, primenom ovog metoda defazifikacija je sadržana u samom postupku odlučivanja.

**3.4.1.5. Defazifikator**

Defazifikacija je preslikavanje iz prostora fazi izlaznih kontrolnih promenljivih u prostor nefazifikovanih (jasnih) izlaznih kontrolnih promenljivih. U fazi-logičkom upravljanju ovaj proces je neophodan jer samo nefazifikovane (jasne) vrednosti upravljačkih signala mogu da pokreću izvršne organe pomoću kojih se realizuje upravljanje procesima. Kod fazi rezonovanja drugog i trećeg tipa defazifikacija je implicitno uključena u procesu odlučivanja, dok kod fazi rezonovanja prvog tipa to nije slučaj pa se defazifikacija mora obaviti eksplicitno nakon primene pravila odlučivanja.

Defazifikaciona strategija ima za cilj da proizvede takvu upravljačku vrednost koja bi na najbolji način reprezentovala mogućnosnu raspodelu fazi upravljačke izlazne promenljive dobijene primenom pravila odlučivanja. Na nesreću, ne postoji sistematska procedura za odabir defazifikacione strategije.

Dva najčešće korišćena metoda defazifikacije su:

- centar oblasti (COA - Center Of Area) i
- srednja vrednost maksimuma (MOM - Mean Of Maximum).

Široko korišćeni COA metod generiše centar gravitacije mogućnosne raspodele fazi upravljačke izlazne promenljive dobijene primenom pravila odlučivanja. U slučaju diskretnog univerzuma na kome je definisana fazi izlazna promenljiva, COA metod se svodi na:

$$z_{COA}^* = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{C'}(z_j) \cdot z_j}{\sum_{j=1}^n \mu_{C'}(z_j)} \quad (3.73)$$

gde je  $n$  broj kvantizacionih nivoa,  $z_j$  je nivo upravljačkog izlaza na  $j$ -tom kvantizacionom nivou i  $\mu_{C'}(z_j)$  funkciju pripadnosti fazi skupu  $C'$ . U slučaju kontinualnog univerzuma na kome je definisana fazi izlazna promenljiva, COA metod se svodi na:

$$z_{COA}^* = \frac{\int_z \mu_{C'}(z) \cdot z \cdot dz}{\int_z \mu_{C'}(z) \cdot dz} \quad (3.74)$$

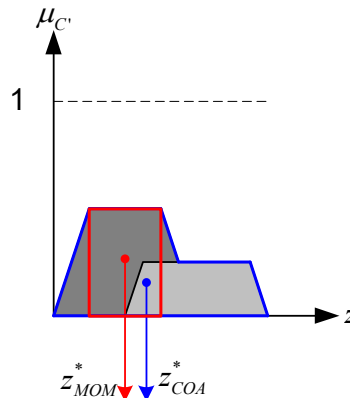
MOM metod generiše takvu upravljačku vrednost koja predstavlja srednju vrednost svih upravljačkih vrednosti  $z$  za koje funkcija pripadnosti  $\mu_{C'}(z)$  ima maksimalnu vrednost, tj.  $\mu_{C'}(z) = Height(C')$ . Definišimo jasan skup  $H_{C'} = \{z \mid \mu_{C'}(z) = Height(C')\}$ . U slučaju diskretnog univerzuma na kome je definisana fazi izlazna promenljiva, MOM metod se svodi na:

$$z_{MOM}^* = \frac{\sum_{j=1}^m z_j}{m} \quad (3.75)$$

gde je  $m$  skalarna kardinalnost skupa  $H_{C'}$  (tj.  $m = |H_{C'}|$ ) i  $z_j \in H_{C'}$ . U slučaju kontinualnog univerzuma na kome je definisana fazi izlazna promenljiva, MOM metod se svodi na:

$$z_{MOM}^* = \frac{\int_{z \in H_{C'}} z \cdot dz}{\int_{z \in H_{C'}} dz} \quad (3.76)$$

Upoređivanjem ove dve strategije primećeno je da MOM strategija ima bolje tranzijentne performanse dok COA strategija ima bolje performanse u ustaljenom režimu rada [110]. Ipak ukupno gledano COA strategija daje bolje rezultate u odnosu na MOM strategiju [111].



Sl. 3.16 - Primer defazifikacije primenom COA i MOM strategije [102]

Yager i Filev [112], [113] su predložili generalizovan pristup za defazifikaciju zasnovan na BADD (Basic Defuzzification Distributions) transformaciji. U ovom pristupu prvo se fazi skup  $C'$  (kao fazi vrednost izlazne upravljačke promenljive  $z$  definisane na univerzumu  $W$ ), transformiše u raspodelu (primenom BADD transformacije) definisanu na univerzumu  $W$ , a potom se do jasne vrednosti upravljačke promenljive dolazi izračunavanjem srednje vrednosti raspodele. U slučaju diskretnog univerzuma na kome je definisana fazi izlazna promenljiva, generalizovani metod defazifikacije primenom BADD transformacije se svodi na:

$$z_{BADD}^* = \sum_{i=1}^n z_i \cdot p_i \quad (3.77)$$

gde je  $p_i$  dobijen BADD transformacijom:

$$p_i = \frac{\mu_{C'}^\alpha(z_i)}{\sum_{j=1}^m \mu_{C'}^\alpha(z_j)} \quad (3.78)$$

određenom parametrom  $\alpha \in [0, \infty)$ . U slučaju kontinualnog univerzuma na kome je definisana fazi izlazna promenljiva, generalizovani metod defazifikacije primenom BADD transformacije se svodi na:

$$z_{BADD}^* = \frac{\int_z \mu_{C'}^\alpha(z) \cdot z \cdot dz}{\int_z \mu_{C'}^\alpha(z) \cdot dz} \quad (3.79)$$

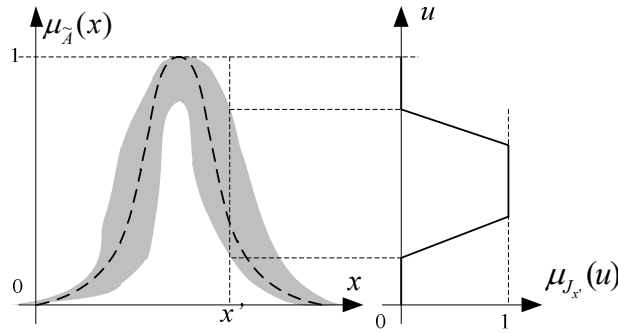
Primenom različitih vrednosti parametra  $\alpha$  dobijaju se različite strategije defazifikacije:

- za  $\alpha = \infty$  strategija se svodi na MOM,
- za  $\alpha = 1$  strategija se svodi na COA ili
- za  $\alpha = 0$  imamo da je  $p_i = 1/n$ , gde je  $n$  skalarna kardinalnost podrške  $C'$  (tj.  $n = |\text{supp}(C')|$ ).

Postojanje promenljivog parametra  $\alpha$  navodi na činjenicu da je moguće primeniti adaptivno obučavanje defazifikacione strategije pronalaženjem optimalne vrednosti parametra  $\alpha_{opt}$ . Parametar  $\alpha$  se može tretirati kao neka vrsta mere poverenja u rezultat odlučivanja fazi-logičkog kontrolera. Tako za  $\alpha = 0$  se može primetiti da informacije koje daje  $C'$  se potpuno ignorišu pa se može smatrati da u ovom slučaju *nema poverenja* u kontroler. U slučaju  $\alpha = 1$  celokupna informacija iz  $C'$  se tretira tako da u ovom slučaju se može smatrati da ima *normalnog poverenja* u kontroler. U slučaju  $\alpha = \infty$  celokupna informacija iz  $C'$  se tretira tako da u ovom slučaju se može smatrati da ima *ekstremno visokog poverenja* u kontroler.

### 3.4.2. Tip-2 fazi-logički sistemi (T2-FLS)

Ako se „zamagli“, levo i desno, funkcija pripadnosti tip-1 fazi skupa tada se dobija funkcija pripadnosti tip-2 fazi skupa (Sl. 3.17). Može se primetiti da za konkretnu vrednost  $x'$  funkcija pripadnosti nema jedinstvenu vrednost, već ih ima više i pritom one ne moraju biti podjednako ponderisane, tj. moguće je dodeliti im različiti stepen pripadnosti [103], [114], [115], [116], [117], [118], [119], [120], [121].



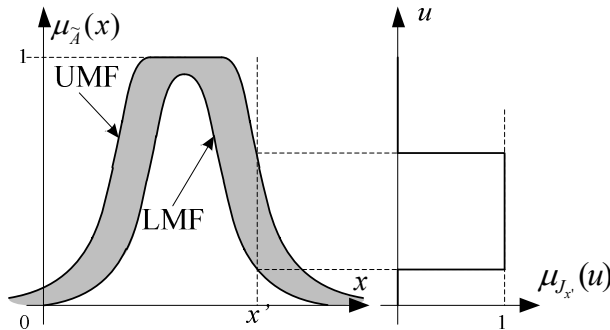
Sl. 3.17 - Primer „zamagljene“ funkcije pripadnosti tip-1 fazi skupa [115]

Ukoliko se isti postupak izvrši za svako  $x \in X$ , tada se dolazi do tro-dimenzionalne funkcije pripadnosti tip-2 fazi skupa  $\tilde{A}$ :

$$\tilde{A} = \{(x, u, \mu_{\tilde{A}}(x, u)) | \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0, 1]\} \quad (3.80)$$

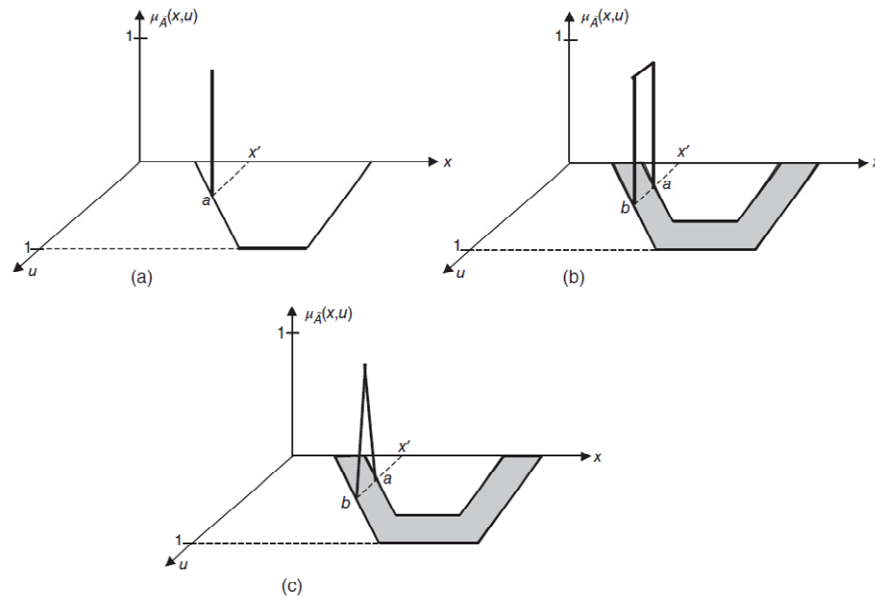
u kojoj je  $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$ . Zapravo  $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$  predstavlja primarnu funkciju pripadnosti  $x$ , dok je  $J_x \subseteq [0, 1]$ , u stvari tip-1 fazi skup, i predstavlja sekundarnu funkciju pripadnosti  $x$ . Sekundarna pripadnost definiše mogućnost primarne pripadnosti.

Neodređenost se prikazuje kao region (FOU, Footprint Of Uncertainty). Ukoliko je  $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = 1, \forall u \in J_x \subseteq [0, 1]$  tada se radi o interval tip-2 funkciji pripadnosti (Sl. 3.18). Uniformno osenčena oblast FOU prikazuje celokupan interval tip-2 fazi skup. Interval tip-2 fazi skup se u potpunosti može opisati pomoću gornje funkcije pripadnosti (UMF, Upper Membership Function)  $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$  i donje funkcije funkcije pripadnosti (LMF, Lower Membership Function)  $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ .



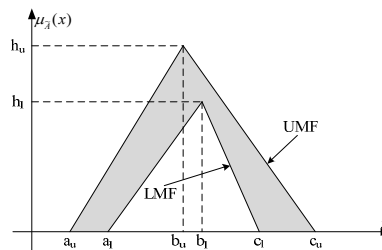
Sl. 3.18 – Interval tip-2 funkcija pripadnosti

Na Sl. 3.19 prikazane su sekundarne funkcije pripadnosti u tački  $x=x'$  za tip-1 fazi skup (T1-FS), interval tip-2 fazi skup (IT2-FS) i generalni tip-2 fazi skup (GT2-FS) [103].



Sl. 3.19 – Sekundarna funkcija pripadnosti u tački  $x=x'$  za (a) T1-FS, (b) IT2-FS i (c) GT2-FS [103]

**Primer 3.5:** Interval T2 trougaoni fazi skup

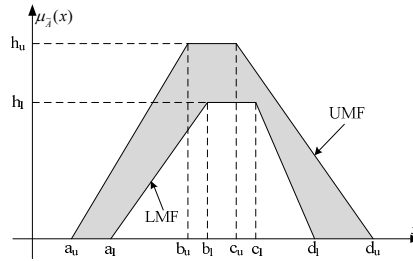


Sl. 3.20 – Interval T2 trougaoni fazi skup

$$Triangle(x; a, b, c, h) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} \cdot h & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b} \cdot h & b \leq x < c \\ 0 & \text{inace} \end{cases} \quad (3.81)$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = [\mu_{LMF}(x), \mu_{UMF}(x)] = [Triangle(x; a_l, b_l, c_l, h_l), Triangle(x; a_u, b_u, c_u, h_u)] \quad (3.82)$$

**Primer 3.6:** Interval T2 trapezoidalni fazi skup



Sl. 3.21 – Interval T2 trapezoidalni fazi skup

$$Trapez(x; a, b, c, h) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} \cdot h & a \leq x < b \\ h & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} \cdot h & c \leq x < d \\ 0 & \text{inace} \end{cases} \quad (3.83)$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = [\mu_{LMF}(x), \mu_{UMF}(x)] = [Trapez(x; a_l, b_l, c_l, d_l, h_l), Trapez(x; a_u, b_u, c_u, d_u, h_u)] \quad (3.84)$$

**Primer 3.7:** Generička lingvistička promenljiva Stanje(„Subjekat“)

Generička lingvistička promenljiva *Stanje(„Subjekat“)*, definisana na skupu [0,1], ima skup naziva:

$$T(Stanje("Subjekat")) = \{Loše, Srednje, Dobro\} \quad (3.85)$$

ima funkcije pripadnosti:

$$\mu_{Loše}(x) = [Triangle(x; -0.3, 0, 0.3, 0.5), Triangle(x; -0.4, 0, 0.4, 1)] \quad (3.86)$$

$$\mu_{Srednje}(x) = [Triangle(x; 0.2, 0.5, 0.8, 0.5), Triangle(x; 0.1, 0.5, 0.9, 1)] \quad (3.87)$$

$$\mu_{Dobro}(x) = [Triangle(x; 0.7, 1, 1.3, 0.5), Triangle(x; 0.6, 1, 1.4, 1)] \quad (3.88)$$

**Primer 3.8:** Generička lingvistička promenljiva Sposobnost(„Subjekat“)

Generička lingvistička promenljiva *Sposobnost(„Subjekat“)*, definisana na skupu [0,1], ima skup naziva:

$$T(Sposobnost("Subjekat")) = \{Loša, Srednja, Dobra\} \quad (3.89)$$

ima funkcije pripadnosti:

$$\mu_{Mala}(x) = [Triangle(x; -0.3, 0, 0.3, 0.5), Triangle(x; -0.4, 0, 0.4, 1)] \quad (3.90)$$

$$\mu_{Srednja}(x) = [Triangle(x;0.2,0.5,0.8,0.5), Triangle(x;0.1,0.5,0.9,1)] \quad (3.91)$$

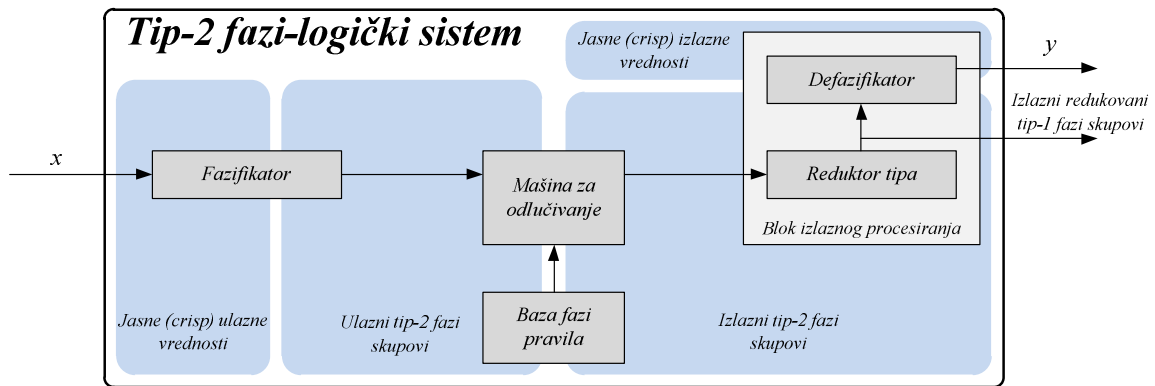
$$\mu_{Velika}(x) = [Triangle(x;0.7,1,1.3,0.5), Triangle(x;0.6,1,1.4,1)] \quad (3.92)$$

**Primer 3.9:** Lingvističke promenljive izvedene iz generičkih lingvističkih promenljivih

	Lingvistička promenljiva	Način generisanja
1.	SA	Stanje („Ambijent“)
2.	SK	Stanje („Kolovoz“)
3.	SV	Sposobnost („Vozač“)
4.	SVozila	Sposobnost („Vozilo“)
5.	SRV	Sposobnost („Reakcija vozila“)

Ukoliko se u opisu fazi-logičkog sistema (FLS) koristi barem jedan ili više tip-2 fazi skupova onda taj sistem predstavlja tip-2 fazi-logički sistem (T2-FLS). Tip-1 fazi-logički sistemi nisu u mogućnosti da na direktan način barataju sa neodređenostima fazi pravila, iz razloga što koriste tip-1 fazi skupove koji su određeni i nesumnjivi (tj. potpuno opisani sa jedinstvenom numeričkom vrednošću). Sa druge strane, tip-2 fazi-logički sistemi su korisni u okolnostima kada je teško odrediti preciznu funkciju pripadnosti kada postoje i nesigurnosti u merenju [120], [121].

Poput tip-1 fazi-logičkih sistema i tip-2 fazi-logički sistemi su određeni IF-THEN fazi-logičkim pravilima sa tom razlikom što T2-FLS operišu sa tip-2 fazi-logičkim promenljivama. Takođe, poput T1-FLS, T2-FLS imaju fazifikator, bazu fazi pravila, mašinu za odlučivanje i defazifikator. Jedina razlika je u proširenju bloka defazifikatora u blok izlaznog procesiranja koji u sebi sadrži defazifikator i reduktor tipa. Blok šema T2-FLS (Mamdani tip) prikazana je na Sl. 3.22.



Sl. 3.22 – Blok šema T2-FLS (Mamdani tip) [103]

### 3.4.2.1. Fazifikator

Fazifikator vrši mapiranje vektora:

$$x = [x_1, \dots, x_p]^T = X_1 \times \dots \times X_p \equiv X \quad (3.93)$$

u tip-2 fazi skup  $\tilde{A}_x$  definisan nad  $X$ . Najčešće skup  $\tilde{A}_x$  je interval tip-2 fazi skup i to specijalan slučaj tip-2 fazi singleton. U tom slučaju ulazni tip-2 fazi skup ima samo jednu tačku sa pripadnošću različitom od nule. Drugim rečima,  $\tilde{A}_x$  je tip-2 fazi singleton ako je ispunjeno:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 1/1 & \text{za } x = x' \\ 1/0 & \text{za } x \neq x' \end{cases} \quad (3.94)$$

### 3.4.2.2. Baza fazi pravila

Struktura baze fazi pravila kod T2-FLS je identična strukturi baze fazi pravila T1-FLS sa tom razlikom što su ulazne i izlazne fazi-logičke promenljive predstavljene tip-2 fazi skupovima. U opštem slučaju T2-FLS može imati više ulaznih i više izlaznih fazi-logičkih promenljivih (MIMO, Multiple-Input and Multiple-Output). Kao i kod T1-FLS, opšti slučaj T2-FLS sa  $k$  izlaznih fazi-logičkih promenljivih se može svesti na  $k$  nezavisnih T2-FLS sa jednom izlaznom fazi-logičkom promenljivom (MISO, Multiple-input and Single-Output). Iz tog razloga, bez gubitka opštosti, dovoljno je razmatrati MISO T2-FLS.

U slučaju da MISO T2-FLS ima  $p$  ulaznih fazi-lingvističkih promenljivih  $x_1 \in X_1, \dots, x_p \in X_p$  i  $M$  lingvističkih pravila, tada je baza fazi pravila definisana sa:

$$R^l : \text{If } x_1 \text{ is } \tilde{F}_1^l \text{ and...and } x_p \text{ is } \tilde{F}_p^l \text{ then } y \text{ is } \tilde{G}^l \quad l = 1, \dots, M \quad (3.95)$$

gde su sa  $\tilde{F}$  i  $\tilde{G}$  označeni odgovarajući fazi skupovi.

### 3.4.2.3. Mašina za odlučivanje

Mašina za odlučivanje procesira pravila iz baze i na osnovu njih vrši mapiranje ulaznih tip-2 fazi skupova u izlazne tip-2 fazi skupove. Da bi se obavilo max-min kompoziciono pravilo potrebno je vršiti operacije  $\cup$  (unija) i  $\cap$  (presek). Ako usvojim  $F_1^l \times \dots \times F_p^l = \tilde{A}^l$  tada baza fazi logičkih pravila se svodi na:

$$R^l : \tilde{F}_1^l \times \dots \times \tilde{F}_p^l \rightarrow \tilde{G}^l = \tilde{A}^l \rightarrow \tilde{G}^l \quad l = 1, \dots, M \quad (3.96)$$

Pravilo  $R^l$  je definisano funkcijom pripadnosti:

$$\mu_{R^l}(x, y) = \mu_{R^l}(x_1, \dots, x_p, y) = \mu_{\tilde{A}^l \rightarrow \tilde{G}^l}(x, y) \quad (3.97)$$

koja može da se napiše i u obliku:

$$\mu_{\tilde{A}^l \rightarrow \tilde{G}^l}(x, y) = \mu_{\tilde{F}_1^l}(x) \cap \dots \cap \mu_{\tilde{F}_p^l}(x) \cap \mu_{\tilde{G}^l}(y) = \left[ \bigcap_{i=1}^p \mu_{\tilde{F}_i^l}(x) \right] \cap \mu_{\tilde{G}^l}(y) \quad (3.98)$$

U opštem slučaju  $p$ -dimenzionalni ulaz u pravilo  $R^l$  predstavlja tip-2 fazi skup  $\tilde{A}_x$  čija je funkcija pripadnosti:

$$\mu_{\tilde{A}_x}(x) = \mu_{\tilde{x}_1}(x_1) \cap \dots \cap \mu_{\tilde{x}_p}(x_p) = \bigcap_{i=1}^p \mu_{\tilde{x}_i}(x_i) \quad (3.99)$$



gde su sa  $\tilde{x}_i, i = 1, \dots, p$  označeni ulazi.

Svako pravilo  $R^l$  određuje tip-2 fazi skup  $\tilde{B}^l = \tilde{A}_x \circ R^l$  za koji je:

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{A}_x \circ R^l}(y) = \bigcup_{x \in X} [\mu_{\tilde{A}_x}(x) \cap \mu_{R^l}(x, y)] \quad y \in Y \quad l = 1, \dots, M \quad (3.100)$$

Ova zavisnost u stvari predstavlja ulazno/izlaznu relaciju koja se nalazi između tip-2 fazi skupa koji aktivira odgovarajuće pravilo na osnovu koga T2-FLS donosi zaključke u obliku generisanja odgovarajućeg tip-2 fazi skupa [121].

Ukoliko se koriste interval tip-2 fazi skupovi i proizvod  $t$ -norma kao operator preseka, težinski fazi skup:

$$F^l(x') \equiv \bigcap_{i=1}^p \mu_{\tilde{F}_i}(x_i') \quad (3.101)$$

postaje interval tip-2 fazi skup:

$$F^l(x') = [\underline{f}^l(x'), \overline{f}^l(x')] \equiv [\underline{f}^l, \overline{f}^l] \quad (3.102)$$

gde je:

$$\underline{f}^l(x') = \underline{f}^l = \underline{\mu}_{\tilde{F}_1}(x_1') * \dots * \underline{\mu}_{\tilde{F}_p}(x_p') \quad (3.103)$$

i:

$$\overline{f}^l(x') = \overline{f}^l = \overline{\mu}_{\tilde{F}_1}(x_1') * \dots * \overline{\mu}_{\tilde{F}_p}(x_p') \quad (3.104)$$

gde je sa  $*$  označen operator proizvoda.

#### 3.4.2.4. Reduktor tipa

Blok reduktora tipa vrši mapiranje tip-2 fazi skupa, koji se dobija iz mašine za odlučivanje, u odgovarajući tip-1 fazi skup. Od ovako dobijenog tip-1 fazi skupa defazifikator će generisati izlaznu brojnu vrednost kao izlaz T2-FLS. S obzirom na činjenicu da je izlaz i mašine za odlučivanje interval tip-2 fazi skup, za redukciju tipa moguće je koristiti metod pod nazivom *centar skupova* (COS, Center Of Sets) [121]:

$$\begin{aligned} Y_{\text{cos}}(x) &= [y_l, y_r] = \\ &= \int y^1 \in [y_l^1, y_r^1] \dots \int y^M \in [y_l^M, y_r^M] \int f^1 \in [\underline{f}_l^1, \overline{f}_r^1] \dots \int f^1 \in [\underline{f}_l^1, \overline{f}_r^1] 1 / \frac{\sum_{i=1}^M f^i y^i}{\sum_{i=1}^M f^i} \end{aligned} \quad (3.105)$$

Ovaj interval tip-2 fazi skup određen je sa dve krajnje tačke,  $y_l$  i  $y_r$ , koje odgovaraju centroidu tip-2 fazi skupa  $\tilde{G}^i$ :

$$C_{\tilde{G}^i} = \int \theta_1 \in J_{y_1} \dots \int \theta_N \in J_{y_N} 1 / \frac{\sum_{i=1}^N y^i \theta^i}{\sum_{i=1}^N \theta^i} = [y_l^i, y_r^i] \quad (3.106)$$

Pre nego što se izračuna  $Y_{cos}(x)$ , potrebno je iz prethodne relacije izraziti  $y_l$  i  $y_r$ . Ako se vrednosti  $f_i$  i  $y_i$ , vezane za  $y_l$  označe sa  $f_l^i$  i  $y_l^i$ . Ako se vrednosti  $f_i$  i  $y_i$ , vezane za  $y_r$  označe sa  $f_r^i$  i  $y_r^i$ . Tada imamo:

$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^M f_l^i y_l^i}{\sum_{i=1}^M f_l^i} \quad (3.107)$$

$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^M f_r^i y_r^i}{\sum_{i=1}^M f_r^i} \quad (3.108)$$

Vrednosti  $y_l$  i  $y_r$  određuju izlazni interval T2-FLS i mogu se koristiti za proveru da li su podaci o obuci ili testiranju sadržani u izlazu sistema. Mera prekrivanja podataka može se koristiti kao jedan od kriterijuma za dobijanje optimalnog T2-FLS. Drugi kriterijum može biti težnja da dužina izlaznog intervala bude što je moguće manja.

#### 3.4.2.5. Defazifikator

Iz bloka reduktor tipa defazifikator dobija interval tip-2 fazi skup  $Y_{cos}(x)$ . Na osnovu njega moguće je izvršiti defazifikaciju izračunavanjem srednje vrednosti [121]:

$$y(x) = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (3.109)$$

#### 4. INTELIGENTNI SISTEM ZA IZBEGAVANJE KONFLIKTNIH SITUACIJA U SAOBRAĆAJU

U ovoj disertaciji su prikazana dva inteligentna sistema za izbegavanje konfliktnih situacija u saobraćaju bazirana na primeni fazi-logike. Jedan je vezan za rečni saobraćaj i regulisanje rada brodskih prevodnica i prikazan je u šestom poglavlju disertacije. Drugi je vezan za izbegavanje konfliktnih situacija u drumskom saobraćaju i prikazan je u ovom poglavlju disertacije.

Ovo poglavlje predstavlja centralni deo disertacije i u njemu će biti izložena struktura i koncept inteligentnog sistema za izbegavanje konfliktnih situacija na raskrsnicama i kružnim tokovima bez svetlosne signalizacije.

Naime, kada se vozila nađu u blizini raskrsnica i kružnih tokova, u kojima zbog ukrštanja i/ili preklapanja eventualnih trajektorija kretanja vozila, mogućnost pojave sudara se višestruko povećava. Ako se pridoda činjenica da na pojedinim raskrsnicama nema svetlosne signalizacije, ta mogućnost se uvećava.

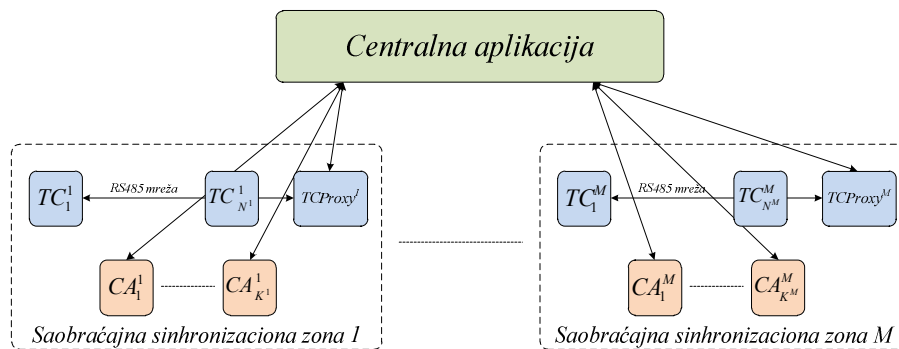
Pored toga ako na primer: stanje na putu je loše (zaleđen kolovoz zbog ledene kiše ili klizav kolovoz zbog fleke od ulja), vozilo ima loš kočioni sistem, preglednost smanjena zbog objekata pored puta, vozilo ima loše pneumatike, vozač je u alkoholisanom stanju i/ili td. tada se mogućnost pojave konflikta ili sudara dodatno povećava.

Zbog svega prethodno navedenog, a u cilju smanjenja konfliktnih situacija, poželjna bi bila primena inteligentnog sistema za izbegavanje konfliktnih situacija na saobraćajnim lokacijama (raskrsnice bez svetlosne signalizacije i kružni tokovi) tamo gde je to moguće, tj. tamo gde ima prostora za postavljanje svih elemenata sistema.

Prvenstveno, da bi sistem adekvatno obavljao svoju ulogu potrebno je da ima informacije o položaju vozila u reonu saobraćajne lokacije, eventualno o stanju vozača i vozila, o stanju ambijenta i td. Potom ove informacije potrebno je obraditi i na osnovu određenih kriterijuma doneti zaključke o potrebnim manevrisanjima. I na kraju, zaključke o manevrisanjima potrebno je na što vidljiviji način prikazati vozačima kako bi blagovremenom reakcijom izbegli eventualne konflikte.

Inteligentni sistem za izbegavanje konfliktnih situacija u saobraćaju zamišljen je kao dodatak sistemu prikazanom u [5] u cilju njegovog poboljšanja i povećanja obima funkcionalnosti. Polazni sistem, prikazan u [5], prevashodno je bio namenjen da obezbedi sinhronizaciju svetlosnih signalizacija na raskrsnicama u okviru saobraćajne sinhronizacione zone u cilju smanjenja zastoja i gužvi. Modifikacijom sistema i njegovim proširenjem sa dodatnim funkcionalnostima kojima se obezbeđuje izbegavanje konfliktnih situacija i sudara, sistem prikazan u [5], prerasta u integralni sistem za upravljanje saobraćajem (Sl. 4.1). Na taj način, osim smanjenja zastoja i gužvi, utiče se i na povećanje bezbednosti učesnika u saobraćaju. Povećanjem bezbednosti smanjuje se prvenstveno broj žrtava i povređenih, ali i smanjuje se materijalna šteta izazvana sudarima.

Osim direktnog efekata proširenja sistema, koji se ogleda u smanjenju broja konfliktnih situacija i sudara, značajan je i indirektni efekat koji se ogledaju u činjenici da izbegavanjem konfliktnih situacija i sudara u stvari izbegavaju se i pojave dodatnih zastoja i gužvi čime se osnovna funkcionalnost integralnog sistema podiže na viši nivo.



Sl. 4.1 - Integralni sistem za upravljanjem saobraćajem

Na Sl. 4.1 prikazana je arhitektura integralnog sistema za upravljanje saobraćajem. Sistem je sačinjen od  $M$  saobraćajnih sinhronizacionih zona koje se nadziru pomoću hijerarhijski nadređene aplikacije pod nazivom centralna aplikacija.

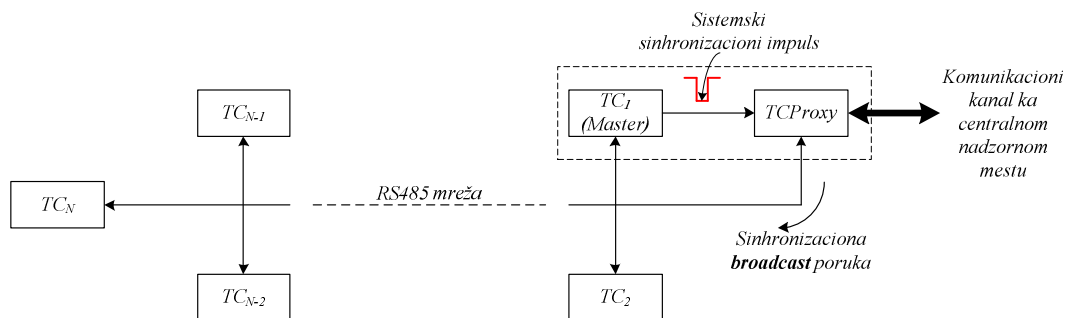
Centralna aplikacija se izvršava u dispečarskom centru [122]. Pored uloge u strateškom upravljanju i nadzoru saobraćajnih sinhronizacionih zona, centralna aplikacija omogućava i vizuelni prikaz stanja u okviru zona (Sl. 4.2).



Sl. 4.2 – Centralna aplikacija (vizuelni prikaz stanja u okviru zona) [122]

Prvenstvena uloga sistema [5] je povećanje protoka, a time i smanjenje zastoja i gužvi, u okviru saobraćajnih sinhronizacionih zona. Ova uloga je ostvarena pomoću  $N$  uređaja (kontrolera)  $TC_i, i=1, \dots, N$  postavljenih na raskrsnicama sa svetlosnom indikacijom i jednog zastupničkog uređaja  $TCProxy$  koji su komunikaciono povezani u okviru jedinstvene RS485 mreže (Sl. 4.3).

Uloga zastupničkog uređaja  $TCProxy$  je dvojaka. Prva uloga je da u slučaju pojave sistemskog sinhronizacionog impulsa (koji generiše *Master* uređaj celokupne zone) pošalje sinhronizacionu broadcast poruku svim uređajima koji se nalaze u RS485 mreži, a druga uloga je da omogući komunikaciju sa centralnom aplikacijom koja sa strateškog nivoa vrši podešavanje trajanja dužina svetlosnih impulsa na raskrsnicama u cilju povećanja saobraćajnog protoka i smanjenja gužvi.

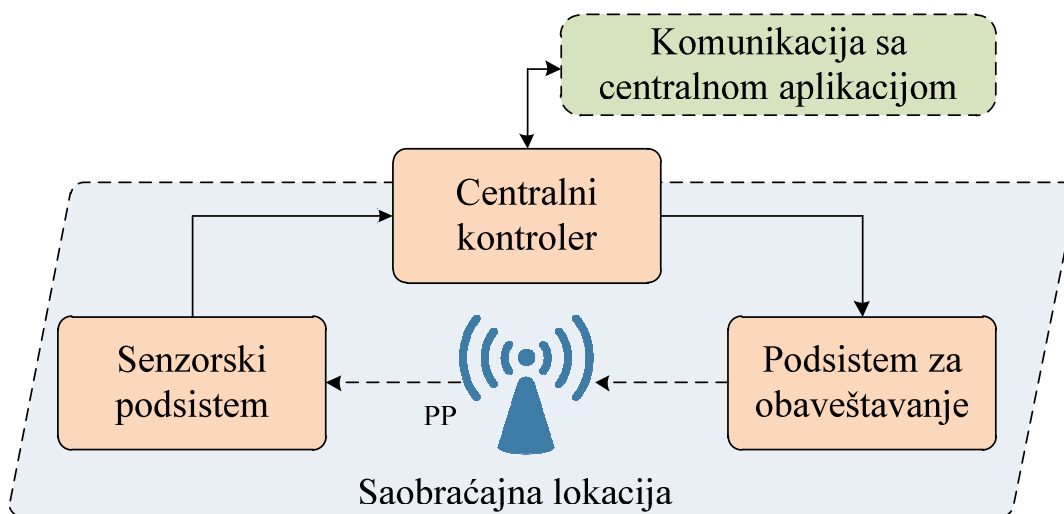


Sl. 4.3 - Deo sistema za povećanje saobraćajnog protoka [5]

Modifikacija integralnog sistema ili tačnije njegovo proširenje se ogleda u dodavanju/installiranju  $K$  podsistema  $CA_i, i=1, \dots, K$  (CA, Collision Avoidance) na raskrsnicama ili kružnim tokovima na kojima nema svetlosne indikacije, a u cilju izbegavanja konfliktnih situacija. Drugim rečima  $CA_i$  predstavlja inteligentni sistem za izbegavanje konfliktnih situacija čiji glavni elementi su prikazani na Sl. 4.1.

#### 4.1. Struktura inteligentnog sistema za izbegavanje konfliktnih situacija

Uvažavajući prethodno navedeno, inteligentni sistem za izbegavanje konfliktnih situacija potrebno je da ima senzorski podsistem, centralni kontroler i podsistem za obaveštavanje (Sl. 4.4).



Sl. 4.4 – Struktura inteligentnog sistema za izbegavanje konfliktnih situacija

Pod pojmom saobraćajna lokacija podrazumeva se raskrsnica bez svetlosne signalizacije ili kružni tok na kome je instaliran inteligentni sistem za izbegavanje konfliktnih situacija.

Senzorski podsistem prikuplja podatke o trenutnom položaju i brzini vozila koja se nalaze u reonu saobraćajne lokacije, podatke o stanju okoline (ambijenta) i eventualno prikuplja podatke o samom vozaču i vozilu ukoliko vozilo ima komunikacione sposobnosti da sistemu pošalje ove podatke.

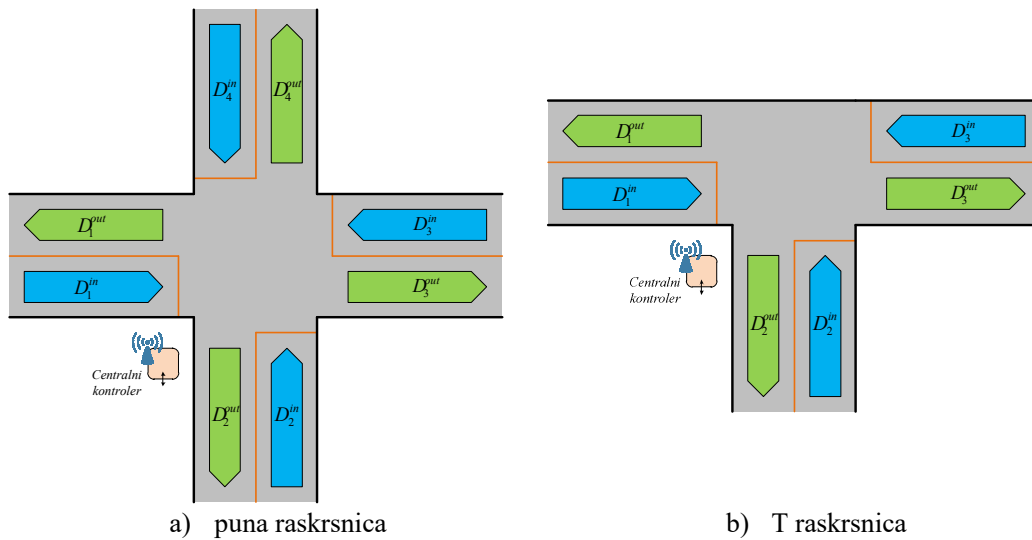
Centralni kontroler na osnovu informacija koje dobija od senzorskog podsistema vrši proračune i procenjuje mogućnost nastanka eventualnog konflikta i u tom slučaju daje predlog manevrisanja kako bi se izbegao eventualni konflikt. Pored ove osnovne uloge, centralni kontroler ima i ulogu da omogući komunikaciju prema hijerarhiski nadređenoj centralnoj aplikaciji. U komunikaciji sa centralnom aplikacijom može da dobije strateške upravljačke instrukcije sa jedne strane, a sa druge strane može da šalje izmerene podatke kako bi se vodila statistika o trendovima na posmatranoj saobraćajnoj lokaciji.

Podsistem za obaveštavanje ima ulogu da na što bolji način svako vozilo obavesti sa odgovarajućom informacijom koju dobija od centralnog kontrolera.

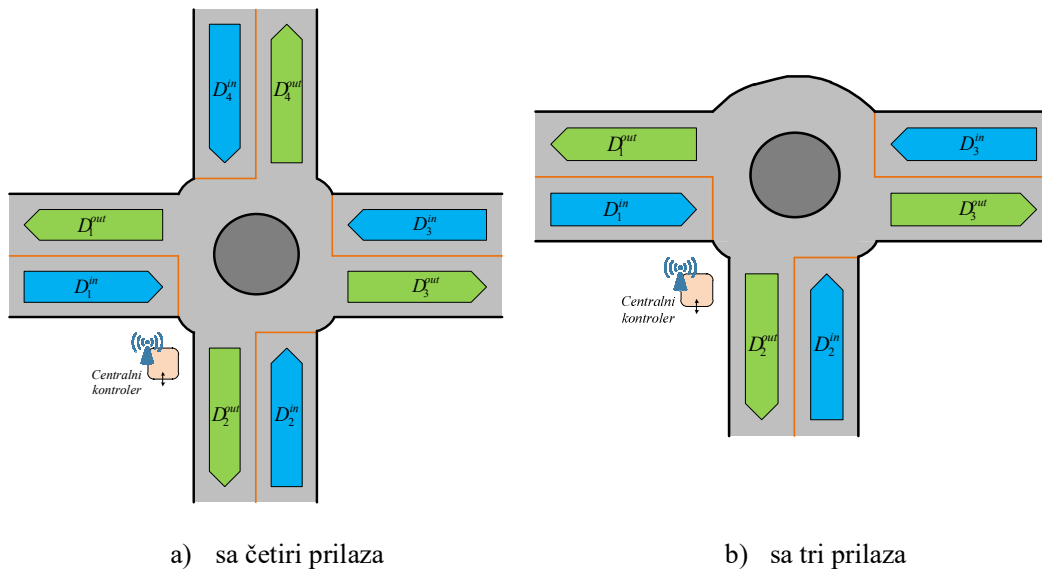
Pored tri osnovna dela sistema na Sl. 4.4 prikazan je i primopredajnik (PP), koji u stvari predstavlja dvostruki RF primopredajnik koji omogućava dva tipa komunikacije sa vozilima: V2I (Vehicle-to-Infrastructure) i Wi-Fi. Drugim rečima, PP je sačinjen od V2I primopredajnika i Wi-Fi pristupne tačke. Na taj način se omogućava da vozila šalju informacije sistemu sa jedne strane, a sa druge strane omogućava se sistemu da vozilima šalje poruke obaveštenja.

#### 4.1.1. Saobraćajna lokacija

Pod pojmom saobraćajna lokacija podrazumeva se raskrsnica bez svetlosne signalizacije (Sl. 4.5) ili kružni tok (Sl. 4.6) na kome je instaliran inteligentni sistem za izbegavanje konfliktnih situacija.



Sl. 4.5 – Primeri saobraćajne lokacije tipa raskrsnica



Sl. 4.6 – Primeri saobraćajne lokacije tipa kružni tok

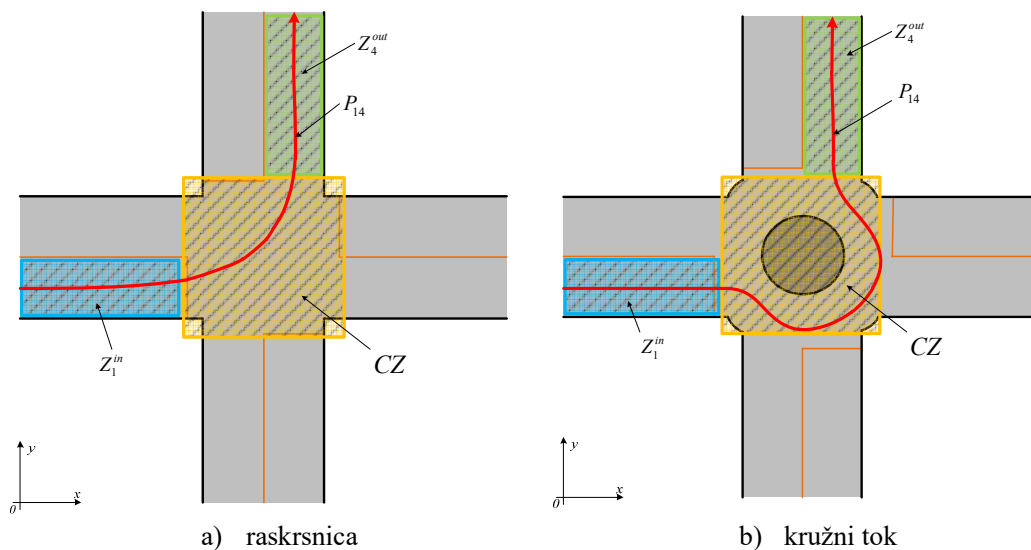
Svaka saobraćajna lokacija ima više prilaza. Tako u primerima prikazanim na Sl. 4.5 imamo četiri i tri prilaza, dok u primerima prikazanim na Sl. 4.6 takođe imamo četiri i tri prilaza.

Svakom prilazu pridružena je po jedna ulazna i jedna izlazna deonica. Na taj način na saobraćajnoj lokaciji sa  $P$  prilaza imamo definisane ulazne deonice  $D_i^{in}, i=1, \dots, P$  i izlazne deonice  $D_i^{out}, i=1, \dots, P$ .

Za svaku saobraćajnu lokaciju definišu se (Sl. 4.7):

- putanje  $P_{ij}, i=1, \dots, P, j=1, \dots, P$ ,

- ulaznih deonica  $Z_i^{in}, i = 1, \dots, P$ ,
- izlaznih deonica  $Z_i^{out}, i = 1, \dots, P$  i
- zona ukrštanja CZ (Crossing Zone).



Sl. 4.7 – Primeri putanje, zone ukrštanja, zone ulazne deonice i zone izlazne deonice

Pojmovi prikazani na Sl. 4.7 su označeni prema sledećoj tabeli:

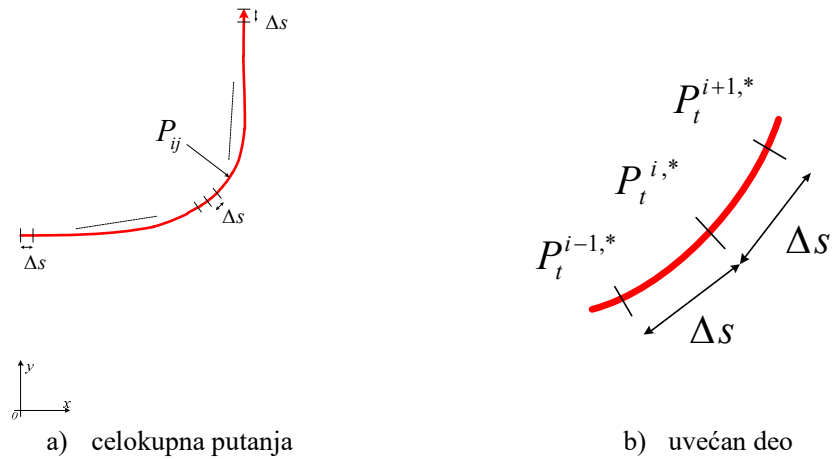
Pojam	Boja	Šablon
Putanja	Crvena	Linija
Zona ulazne deonice	Svetlo plava	Šrafirana površina
Zona izlazne deonice	Svetlo zelena	Šrafirana površina
Zona ukrštanja	Narandžasta	Šrafirana površina

#### 4.1.1.1. Look-Up tabela putanje

Svaka putanja koja je definisana na saobraćajnoj lokaciji u memoriji se pamti kao niz tačaka (sa  $xy$  koordinatama) koje se nalaze na ekvidistantnim razmacima duž putanje. Ako se posmatra putanja  $P_{ij}$  tada njena look-up tabela za ekvidistantni razmak  $\Delta s$  se može predstaviti vektorom:

$$LookUp(P_{ij}, \Delta s) = [P_t^{i,*}]_{t=1, \dots, N-1} = [(x^{i,*}, y^{i,*})]_{t=1, \dots, N-1} \quad (4.1)$$

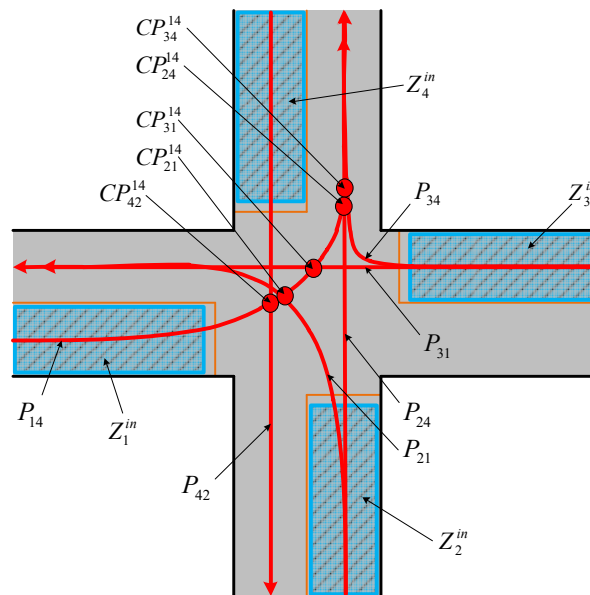
gde je znakom „\*“ označena putanja  $P_{ij}$ .



Sl. 4.8 – Look-Up tabela putanje

#### 4.1.1.2. Konfliktne tačke putanje

Za svake dve putanje koje se ukrštaju definiše se po jedna konfliktna tačka (CP, Conflict Point). Na Sl. 4.9 prikazan je primer saobraćajne lokacije (raskrsnice) u kome su prikazane sve konfliktne tačke putanje  $P_{14}$ .



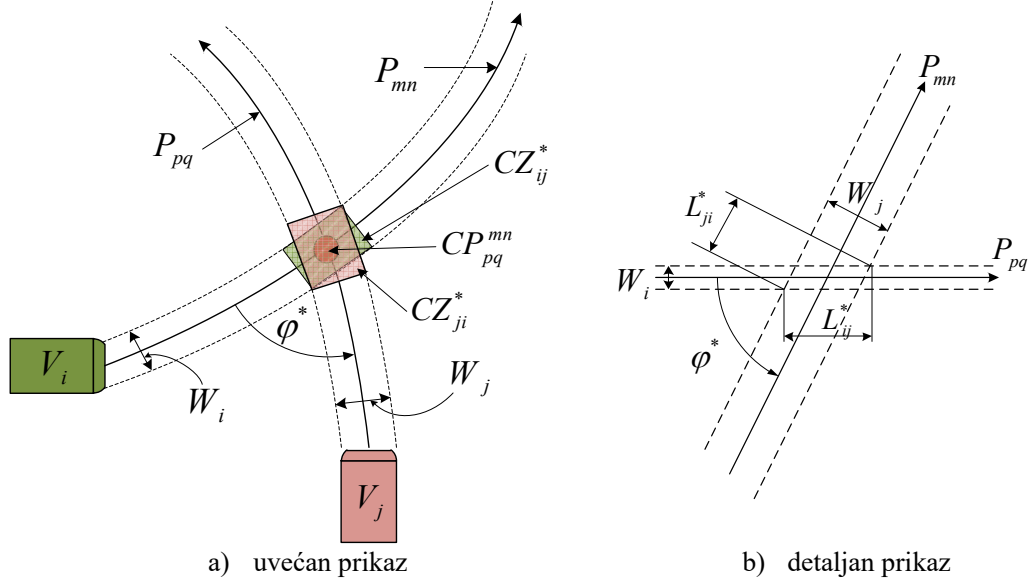
Sl. 4.9 – Konfliktne tačke  $P_{14}$  putanje

$CP_{mn}^{ij}$  označava konfliktnu tačku dve putanje  $P_{ij}$  i  $P_{mn}$ . Ustvari konfliktna tačka predstavlja  $xy$  koordinate mesta preseka dve putanje.



#### 4.1.1.3. Konfliktne zone dva vozila

Konfliktna zona vozila  $V_i$  (koje se kreće putanjom  $P_{mn}$ ) sa vozilom  $V_j$  (koje se kreće putanjom  $P_{pq}$ ) označava se sa  $CZ_{ij}^*$  (Sl. 4.10). Analogno predhodnom, konfliktna zona vozila  $V_j$  sa vozilom  $V_i$  označava se sa  $CZ_{ji}^*$ . Gde je sa znakom „\*“ označena konfliktna tačka dve putanje  $P_{mn}$  i  $P_{pq}$ .



Sl. 4.10 - Konfliktne zone dva vozila

Dimenzije obe konfliktne zone zavise od širine vozila i ugla pod kojim se ukrštaju putanje  $\varphi^*$ . Uvažavajući tu činjenicu dimenzije  $CZ_{ij}^*$  se mogu predstaviti sa:

$$L_{ij}^* = \frac{W_j + W_i \cdot \cos \varphi^*}{\sin \varphi^*} \quad W_{ij}^* = W_i \quad (4.2)$$

dok dimenzije  $CZ_{ji}^*$  se mogu predstaviti sa:

$$L_{ji}^* = \frac{W_i + W_j \cdot \cos \varphi^*}{\sin \varphi^*} \quad W_{ji}^* = W_j \quad (4.3)$$

Svaka konfliktna zona  $CZ_{ij}^*$  potpuno je definisana sa četiri parametra:

$$CZ_{ij}^* = (P_{mn}, Index_{mn}^*, L_{ij}^*, W_{ij}^*) \quad (4.4)$$

gde je sa  $Index_{ij}^*$  označen indeks iz look-up table putanje  $P_{mn}$  koji odgovara konfliktnoj tački  $CP_{pq}^{mn}$ .

#### 4.1.2. Centralni kontroler

Na svakoj saobraćajnoj lokaciji postavljen je centralni kontroler. Centralni kontroler komunicira sa delovima senzorskog podsistema od kojih dobija vektore merenja vozila u saobraćajnoj lokaciji i merenja vezana za trenutno stanje ambijenta.

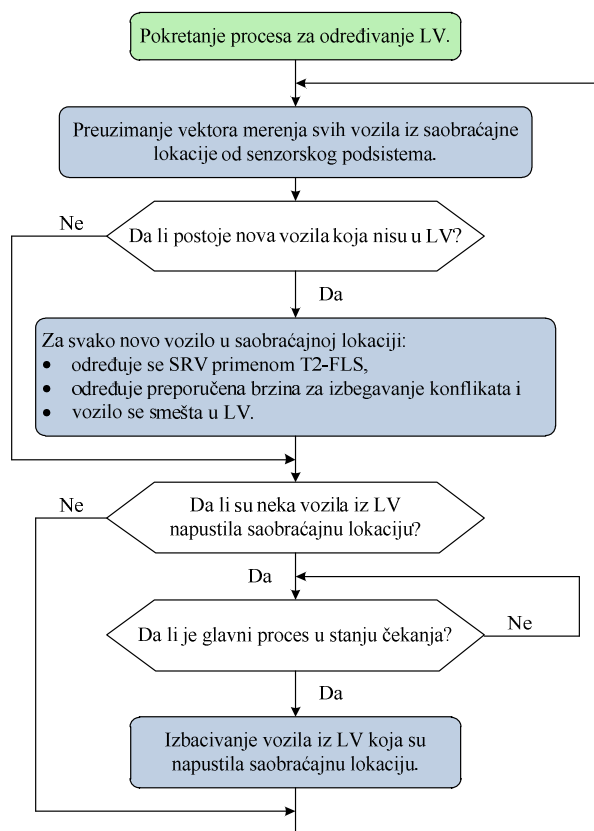
U centralnom kontroleru se izvršavaju: proces za određivanje liste vozila (LV) i glavni proces.

Za svako novopridošlo vozilo u saobraćajnu lokaciju, centralni kontroler određuje *spособnost reagovanja vozila* (SRV) i preporučenu brzinu kretanja na osnovu podataka dobijenih od senzorskog podsistema. Nakon određivanja SRV i preporučene brzine, vozilo se uključuje u listu vozila (LV). LV predstavlja skup svih vozila koja se razmatraju prilikom procene mogućnosti da do konflikta dođe. Određivanje SRV i preporučene brzine obavlja proces za određivanje liste vozila čiji je dijagram toka prikazan na Sl. 4.11.

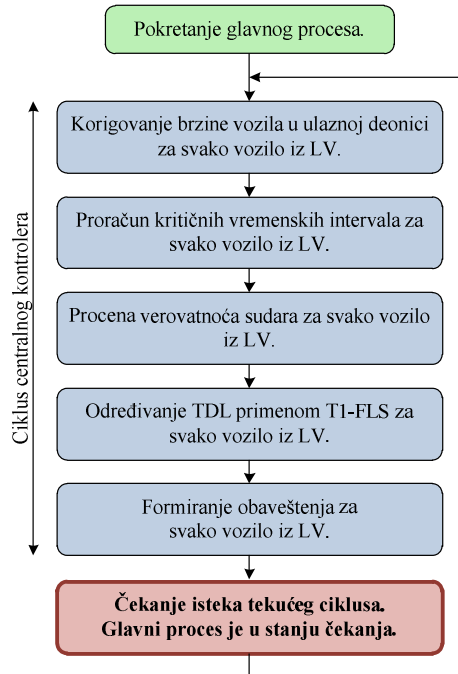
Na osnovu merenja trenutnih pozicija i brzina svih vozila iz LV centralni kontroler određuje ukupan nivo opasnosti kretanja TDL (Total Danger Level) za svako vozilo iz LV. Na osnovu izračunatih TDL i vrednosti preporučenih brzina centralni kontroler formira obaveštajne poruke za svako vozilo iz TDL, a podsistem za obaveštavanje ih prikazuje vozačima. U okviru glavnog procesa obrada se vrši u ciklusima u trajanju od 0.5 sekunda. Dijagram toka glavnog procesa prikazan na Sl. 4.12.

Centralni kontroler obezbeđuje izbegavanje konflikta na dužem vremenskom horizontu posmatranja (upotrebom preporučene brzine i korigovanjem brzine vozila u ulaznoj deonici) i kraćem vremenskom horizontu posmatranja (upotrebom SRV i TDL).

Za određivanje SRV koristi se T2-FLS (detaljno opisan u poglavlju 4.2), dok se za određivanje TDL koristi T1-FLS (detaljno opisan u poglavlju 4.3).



Sl. 4.11 – Dijagram toka procesa za određivanje LV



Sl. 4.12 – Dijagram toka glavnog procesa

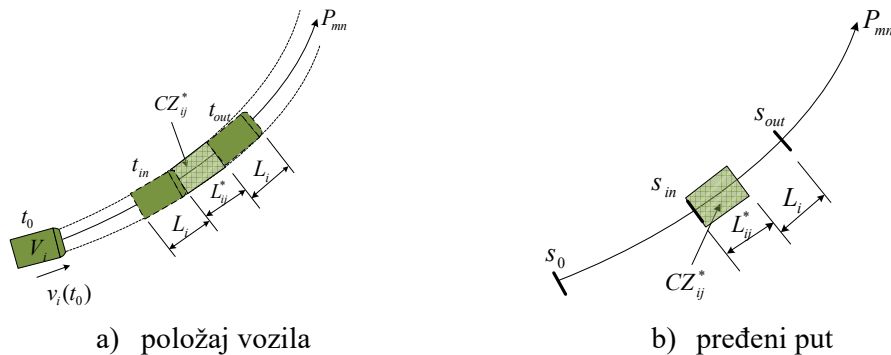
#### 4.1.2.1. Proračun kritičnog vremenskog intervala

Pod kritičnim vremenskim intervalom podrazumeva se vremenski period u kome se vozilo nalazi u posmatranoj konfliktnoj zoni, pod pretpostavkom da se kreće konstantnom brzinom.

Ukoliko se pretpostavi da se vozilo  $V_i$  kreće konstantnom brzinom  $v_i(t_0)$  u periodu  $t > t_0$ , tada kritičan vremenski interval prolaska kroz konfliktnu zonu  $CZ_{ij}^*$  je (Sl. 4.13):

$$I^{**}(t_0) = [t_{in}, t_{out}] = \left[ \frac{s_{in} - s_0}{v_i(t_0)}, \frac{s_{out} - s_0}{v_i(t_0)} \right] = \left[ \frac{s_{in} - s_0}{v_i(t_0)}, \frac{s_{in} + L_{ij}^* + L_i - s_0}{v_i(t_0)} \right] \quad (4.5)$$

gde je sa „\*\*“ označena konfliktna zona  $CZ_{ij}^*$ . Sa  $t_{in}$  i  $t_{out}$  su obeleženi ulazni i izlazni trenutak kritičnog vremenskog intervala.



Sl. 4.13 – Proračun kritičnog vremenskog intervala

Na osnovu ulaznog i izlaznog trenutka kritičnog vremenskog intervala može se izračunati vreme do konflikta:

$$TTC^{**}(t_0) = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} \quad (4.6)$$

Na osnovu izračunatog vreme do konflikta može se izračunati i rastojanje do konflikta (DTC, Distance To Conflict):

$$DTC^{**}(t_0) = v_i(t_0) \cdot TTC^{**}(t_0) \quad (4.7)$$

#### 4.1.2.2. Procena verovatnoće sudara dva vozila

Procena verovatnoće sudara dva vozila se vrši na osnovu posmatranja kritičnih vremenskih intervala. Ako sa  $I^i(t_0) = [t_{in}^i, t_{out}^i]$  obeležimo kritičan vremenski interval prolaska vozila  $V_i$  kroz konfliktnu zonu  $CZ_{ij}^*$ , a sa  $I^j(t_0) = [t_{in}^j, t_{out}^j]$  obeležimo kritičan vremenski interval prolaska vozila  $V_j$  kroz konfliktnu zonu  $CZ_{ji}^*$ , tada se procena verovatnoće sudara dva vozila u trenutku  $t_0$  može predstaviti izrazom:

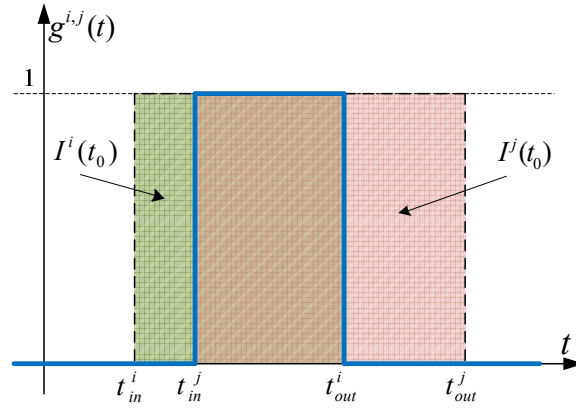
$$\Pr(\Omega|C) = \frac{1}{\min(t_{out}^i - t_{in}^i, t_{out}^j - t_{in}^j)} \cdot \int g^{i,j}(t) \cdot dt \quad (4.8)$$

Pošto se u suštini radi o uslovnoj verovatnoći, u prethodnom izrazu:

- sa  $\Omega$  je obeležen događaj sudara dva vozila  $V_i$  i  $V_j$ , dok
- sa  $C$  je obeležen uslov da se vozilo  $V_i$  kreće putanjom  $P_{mn}$  konstantnom brzinom  $v_i(t_0)$ , a vozilo  $V_j$  kreće putanjom  $P_{pq}$  kreće konstantnom brzinom  $v_j(t_0)$ .

Funkcija  $g^{i,j}(t)$  data je izrazom:

$$g^{i,j}(t) = \begin{cases} 1 & t \in [t_{in}^i, t_{out}^i] \cap [t_{in}^j, t_{out}^j] \\ 0 & t \notin [t_{in}^i, t_{out}^i] \cap [t_{in}^j, t_{out}^j] \end{cases} \quad (4.9)$$

Sl. 4.14 – Primer funkcije  $g^{i,j}(t)$ 

#### 4.1.2.3. Određivanje preporučene brzine za izbegavanje konflikata

U trenutku ulaska novog vozila  $V_i$  u saobraćajnu lokaciju potrebno je odrediti preporučenu brzinu kojom bi trebalo vozilo da se kreće odgovarajućom putanjom kako bi se prvenstveno izbegli konflikti. Izbor ove brzine, ako zadovolji zahtev za izbegavanje konflikta, može da uvaži i neke druge zahteve kao što je npr. prosečno kretanje vozila u nekom pravcu prosečnom brzinom definisanom od strane centralne aplikacije (hierarhiski nadređenog dela celokupnog sistema).

Osnovna ideja za određivanje preporučene brzine za izbegavanje konflikta jeste da se za niz brzina izračunaju sve verovatnoće sudara, a da se za preporučenu brzinu usvoji ona za koju je zbir verovatnoća ravan nuli ili dovoljno mali.

Prvo je potrebno definisati skup mogućih brzina (SMB):

$$SMB = \{v_k\}_{k=0, \dots, K-1} \quad (4.10)$$

gde je svaki element skupa definisan sa:

$$v_k = v_{\min} + k \cdot v_{step} \quad (4.11)$$

Tako, na primer, za  $v_{\min} = 5$ ,  $v_{step} = 0.5$  i  $K=100$  dobijamo niz:

$$SMB = \{5, 6, \dots, 54.5\} [km/h] \quad (4.12)$$

Ako se posmatra kretanje vozila  $V_i$  duž putanje  $P_{mn}$  moguće je proračunati skup zbirnih verovatnoća koji odgovara SMB:

$$\{\Pr_{v_k}^{V_i, P_{mn}}\}_{k=0, \dots, K-1} \quad (4.13)$$

gde je svaki element skupa predstavlja zbirnu verovatnoću definisanu sa:

$$\Pr_{v_k}^{V_i, P_{mn}} = \sum_{l \in \Omega_{CZ}} W_l \cdot \Pr^l \quad (4.14)$$

gde je sa  $\Omega_{CZ}$  označen skup svih kritičnih zona vozila  $V_i$  duž putanje  $P_{mn}$ , sa  $W_l$  označen keficijent koji odgovara verovatnoći da se konfliktno vozilo  $V_j$  kreće kroz konfliktnu zonu i sa  $Pr^l$  označena je procena verovatnoće sudara dva vozila.

Sada se može definisati skup odgovarajućih brzina SOB, kao podskup skupa SMB, u koji ulaze brzine kojima odgovaraju zbirne verovatnoće jednake nuli:

$$SOB = \{v_k\} \Big|_{Pr_{v_k}^{V_i, P_{mn}} = 0} \quad (4.15)$$

U trenucima kada u saobraćajnoj lokaciji ima veliki broj vozila, teoretski je moguća situacija da je SOB prazan skup. Tada se kao preporučena brzina vozila  $V_i$  usvaja ona brzina iz skupa SMB za koju je zbirna verovatnoća minimalna:

$$v_i^{rec} = v_{k^{rec}} \in SMB \quad (4.16)$$

pri čemu je ispunjen sledeći uslov:

$$Pr_{v_{k^{rec}}}^{V_i, P_{mn}} < Pr_{v_k}^{V_i, P_{mn}} \Big|_{\forall k \neq k^{rec}} \quad (4.17)$$

Ukoliko se sa  $N(t)$  označi ukupan broj vozila koja su ušla u saobraćajnu lokaciju do trenutka  $t$ , tada je moguće definisati veličinu:

$$PNZM(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N(t)} Pr_{v_{k^{rec}}}^{V_i, P_{mn}}}{N(t)} \quad (4.18)$$

koja u stvari predstavlja srednu vrednost suboptimalnih zbirnih verovatnoća (Probability Not Zero Mean).

Veličina  $PNZM(t)$  predstavlja indikator suboptimalnosti rada dela sistema za određivanje preporučene brzine. Drugim rečima, dok je vrednost  $PNZM(t)$  jednaka nuli sistem radi optimalno, a kad  $PNZM(t)$  počne da raste to govori da se sistem udaljava od optimalnog rada.

Ukoliko SOB nije prazan skup, preporučena brzina vozila  $V_i$  može biti bilo koja brzina iz ovog skupa pri kojoj bi se obezbedili uslovi za izbegavanje konflikta. Drugim rečima, u ovom slučaju moguće je ostvariti primenu još nekih kriterijuma pri izboru preporučene brzine, a da se pri tome ne naruše uslovi za izbegavanje konflikta.

### **Određivanje preporučene brzine prema početnoj brzini vozila:**

U slučaju da se teži izboru preporučene brzine na način da vozilo  $V_i$ , prilikom ulaska u saobraćajnu lokaciju, mora što manje da koriguje svoju brzinu, tada se za preporučenu brzinu uzima brzina iz skupa SOB:

$$v_i^{rec} = v_{k^{rec}} \in SOB \quad (4.19)$$

za koju je ispunjen sledeći uslov:

$$\left| v_i(t_0) - v_{k^{rec}} \right| < \left| v_i(t_0) - v_k \right|_{\forall k \neq k^{rec}} \quad (4.20)$$

gde je sa  $v_i(t_0)$  označena početna brzina vozila  $V_i$  prilikom ulaska u saobraćajnu lokaciju.

#### **Određivanje preporučene brzine prema zadatoj brzini nadređenog sistema:**

U slučaju da se teži izboru preporučene brzine na način da vozilo  $V_i$ , prilikom ulaska u saobraćajnu lokaciju, mora da se kreće brzinom što bliskijom brzini  $v^{sv}$  koja je definisana od strane supervizorskog dela sistema (centralna aplikacija), tada se za preporučenu brzinu uzima brzina iz skupa SOB:

$$v_i^{rec} = v_{k^{rec}} \in SOB \quad (4.21)$$

za koju je ispunjen sledeći uslov:

$$\left| v^{sv} - v_{k^{rec}} \right| < \left| v^{sv} - v_k \right|_{\forall k \neq k^{rec}} \quad (4.22)$$

#### **4.1.2.4. Korigovanje brzine vozila u ulaznoj deonici**

Kada vozilo  $V_i$  uđe u saobraćajnu lokaciju, centralni kontroler proračunava njegovu preporučenu brzinu  $v_i^{rec}$ , kojom bi vozilo trebalo da se kreće duž ulazne deonice u cilju izbegavanja konflikata. Pošto obično nije slučaj da je preporučena brzina jednaka početnoj brzini vozila:

$$v_i^{rec} \neq v_i(t_0) \quad (4.23)$$

potrebno je izvršiti korekciju brzine vozila kako se ne bi narušili uslovi za izbegavanje konflikata.

Ako je dužina ulazne deonice  $L$  onda uslov za izbegavanje konflikata se može modifikovati u zahtev da vozilo  $V_i$  napusti ulaznu deonicu krećući se konstantnom brzinom jednakoj  $v_i^{rec}$  u trenutku:

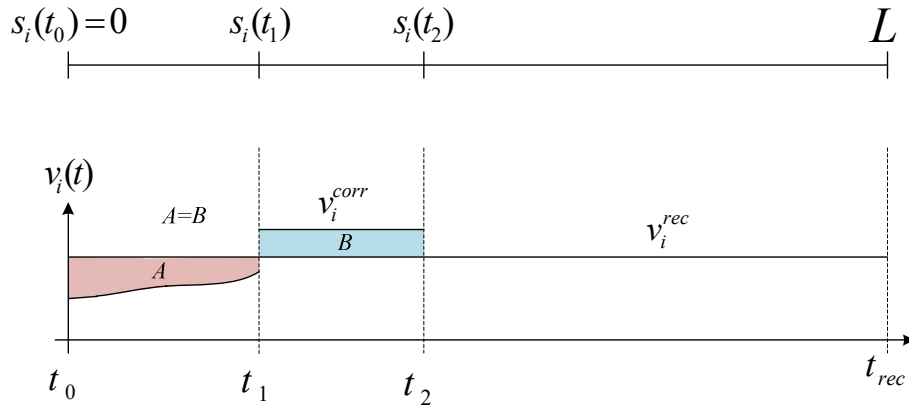
$$t_{rec} = \frac{L}{v_i^{rec}} \quad (4.24)$$

Neka je  $t_1$  trenutak posmatranja u kome se želi odrediti korekcija brzine vozila  $V_i$ . U tom trenutku centralni kontroler ima podatak o položaju vozila  $V_i$ , tj. o pređenom putu do tog trenutka  $s_i(t_1)$ . Ako se želi da obaveštavanje sa porukom o korigovanoj brzini traje do trenutka  $t_2$  (Sl. 4.15), tada se do vrednosti željenog pređenog puta dolazi primenom izraza:

$$s_i(t_2) = L - v_i^{rec} \cdot (t_{rec} - t_2) \quad (4.25)$$

Sada se do vrednosti korigovane brzine dolazi primenom izraza:

$$v_i^{corr} = \frac{s_i(t_2) - s_i(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (4.26)$$

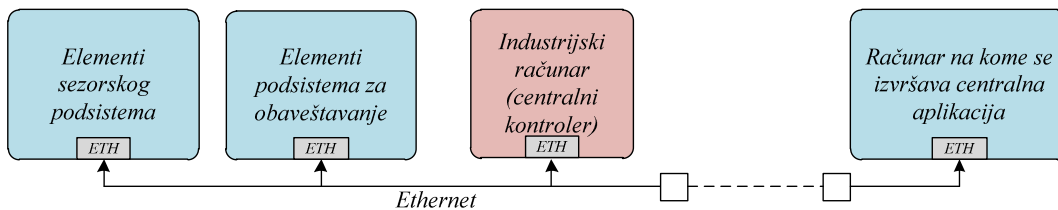


Sl. 4.15 – Korigovanje brzine vozila u ulaznoj deonici

Korigovanje se vrši ispisom poruke sa podatkom o  $v_i^{corr}$  na panelima za obaveštavanje u intervalu  $[t_1, t_2]$ . Ukoliko je odstupanje kretanja vozila od planiranog veliko onda se vrši nova korekcija ponovnom primenom gore navedene procedure.

#### 4.1.2.5. Realizacija

Hardver centralnog kontrolera je realizovan pomoću industrijskog računara (robustan, izdržljiv na ekstremne uslove rada, bez periferija i sa Ethernet interfejsom). Sa ostalim delovima sistema centralni kontroler povezan je preko Ethernet interfejsa (Sl. 4.16).

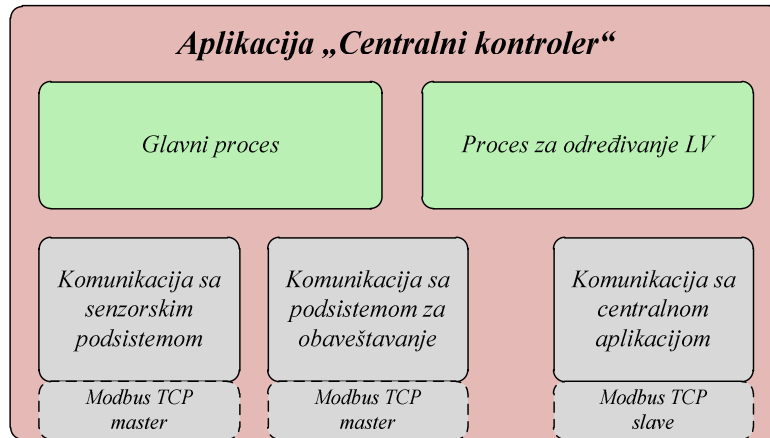


Sl. 4.16 – Hardverska realizacija centralnog kontrolera i povezivanje sa ostalim delovima sistema

Softver centralnog kontrolera ili aplikacija “Centralni kontroler” realizovana je pomoću programskog jezika C# i ima strukturu prikazanu kao na Sl. 4.17. Pored glavnog procesa i procesa za određivanje LV, postoje još tri celine koje omogućavaju komunikaciju sa elementima senzorskog pod sistema, elementima pod sistema za obaveštavanje i centralnom aplikacijom primenom Modbus TCP protokola.

U svakom ciklusu glavnog procesa, u trajanju 0.5 sekundi, potrebno je izračunati procene opasnosti kretanja za sva vozila i za sve potencijalne putanje kretanja. Ova činjenica, u slučaju velikog broja vozila u saobraćajnoj lokaciji, rezultuje velikim brojem primena T1-FLS u svrhu određivanja opasnosti kretanja vozila. Ukoliko bi se koristio alat “Matlab fuzzy toolbox”, vreme potrebno za fazifikaciju, odlučivanje, defazifikaciju i međuplikacijsku komunikaciju (baziranu na COM tehnologiji) moglo bi biti predugo. Iz tog razloga pristupilo se realizaciji T1-FLS, primenom programskog jezika C#, u kome se odlučivanje vrši primenom max-min kompozicije i Rc (Mamdani) fazi implikacije.





Sl. 4.17 – Struktura aplikacije “Centralni kontroler”

U okviru inteligentnog sistema za upravljanje saobraćajem implementacija tip-2 fazi-logičkih sistema (T2-FLS) se ostvaruje korišćenjem *Matlab*-a i njegovog dodatnog alata *IT2-FLS Matlab/Simulink Toolbox* koji služi za rad sa tip-2 fazi skupovima i sistemima.

Glavna aplikacija sistema, koja odgovara bloku *Centralni kontroler*, realizuje se pomoću *Microsoft C#* programskog jezika. Stoga, da bi se implementirali T2-FL sistemi, neophodno je obezbediti vezu između aplikacije *Centralni kontroler* i *MATLAB*-a. Za tu namenu koristi se *Microsoft COM (Component Object Model)* tehnologija i *MApp* interfejs (Sl. 4.18). U samom *Matlab*-u T2-FLS se implementira primenom funkcija *readt2fis* i *evalt2*.

Sl. 4.18 – Povezivanje aplikacije sa *MATLAB*-om

**Primer 4.1:** C# kod kojim se realizuje T2-FLS za određivanje SRV:

```
double SRV;
double[] inputs = {SA, SV, SVozila};
instanceMApp.PutFullMatrix("inputT2", "base", inputs, new double[inputs.Length]);
instanceMApp.Execute("T2FLS=readt2fis('SRV.t2fis');");
instanceMApp.Execute("outputT2=evalt2(T2FLS, inputT2, 1, false);");
System.Array outArrayReal = new double[1];
System.Array outArrayImag = new double[1];
instanceMApp.GetFullMatrix("outputT2", "base", ref outArrayReal, ref outArrayImag);
SRV = (double)outArrayReal.GetValue(0);
```

gde su *SA*, *SV* i *SVozila* definisane ulazne vrednosti, dok fajl *SRV.t2fis* sadrži informacije o odgovarajućem T2-FLS. Ovaj fajl se prethodno kreira u grafičkom editoru koji se pokreće funkcijom *fuzzyt2*.

#### 4.1.3. Senzorski podsistem

Da bi centralni kontroler valjano obavljao svoju funkciju potrebno je da raspolaže sa dovoljnom količinom informacija o trenutnom stanju na saobraćajnoj lokaciji. Tu ulogu na sebe preuzima senzorski podsistem koji vrši prikupljanje podataka:

- o poziciji i brzini vozila,
- o stanju okoline ambijenta i
- eventualno o vozilu i vozaču.

Svako vozilo koje uđe u saobraćajnu lokaciju potrebno je da bude detektovano i potom praćeno tokom svog kretanja u zoni ulazne deonice u kojoj se pojavilo. Senzorski podsistem u svakom trenutku obezbeđuje centralnom kontroleru, za svako vozilo  $V_i$ , informaciju u obliku vektora merenja:

$$M_i(t) = \begin{bmatrix} M_i^{PB}(t)^T & M_i^{DT} & M_i^{VT} & M_i^{VoziloT} \end{bmatrix}^T \quad (4.27)$$

Prvi element vektora merenja nosi informaciju o trenutnoj poziciji ( $x$  koordinata i  $y$  koordinata) i brzini vozila  $V_i$ :

$$M_i^{PB}(t) = \begin{bmatrix} x_i(t) & y_i(t) & v_i(t) \end{bmatrix}^T \quad (4.28)$$

Vrednost ovog elementa vektora merenja se kontinualno ažurira sve dok se vozilo  $V_i$  nalazi u odgovarajućoj zoni ulazne deonice.

Drugi element vektora merenja nosi informaciju o dimanzijama (dužina i širina) vozila  $V_i$ :

$$M_i^D = \begin{bmatrix} L_i & W_i \end{bmatrix}^T \quad (4.29)$$

Vrednost ovog elementa vektora merenja se ažurira samo jednom i to prilikom ulaska vozila u saobraćajnu lokaciju.

Treći  $M_i^V$  i četvrti  $M_i^{Vozilo}$  element vektora merenja nose informacije o samom vozaču i vozilu. Vrednosti ovih elementata se osvežavaju samo jednom i to prilikom ulaska vozila u saobraćajnu lokaciju. Ukoliko vozilo poseduje tehničke mogućnosti da komunicira sa sistemom, onda se elementi ova dva vektora postavljaju na osnovu vrednosti koje sistemu šalje odgovarajuća aplikacija iz vozila. U suprotnom, ukoliko vozilo ne pošalje podatke sistemu, onda se vrednosti elemenata vektora  $M_i^V$  i  $M_i^{Vozilo}$  postavljaju na prosečne vrednosti. Relevantne informacije koje se tiču vozača mogu biti: godište, zdravstveno stanje, stanje vida, refleks i td., dok relevantne informacije koje se tiču vozila mogu biti: godište vozila, stanje pneumatika, stanje kočionog sistema i td.

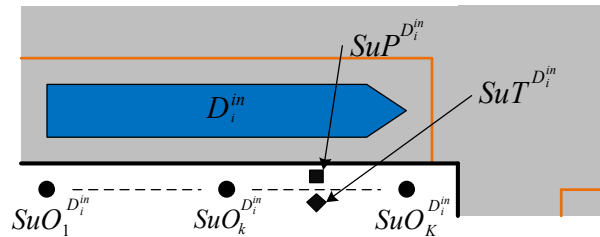
#### 4.1.3.1. Određivanje pozicije i brzine vozila

Deo senzorskog podsistema za određivanje pozicije i brzine vozila je organizovan prema ulaznim deonicama. Svako ulaznoj deonici pridružena je grupa senzora i uređaja. Pored kontinualnog određivanja pozicije i brzine vozila, uloga ovog dela senzorskog podsistema je da prilikom ulaska vozila u saobraćajnu lokaciju odredi i njegove dimenzije (dužinu i širinu). Moguća su razna rešenja za određivanje pozicije i brzine vozila. U ovom radu su prikazani osnovni principi tri varijante rešenja (poglavlje 2.4.1).

#### 4.1.3.2. Određivanje stanja ambijenta

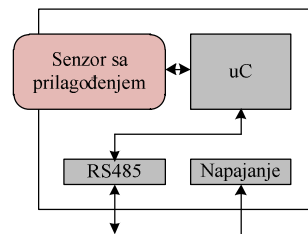
Da bi se odredila sposobnost vozila da reaguje na pojave iz okoline (pojavu drugog vozila ili obaveštenja koje generiše podsistem za obaveštavanje) potrebno je znati kakvo je stanje u okolini po pitanju: osvetljenja, prisustvu padavina, temperaturi i td. Na sposobnost vozila za reakciju realno utiče mnoštvo faktora, ali nije moguće sve uzeti u obzir. Iz tog razloga, kao dominantni, u obzir su uzeti: osvetljenje, stanje padavina i temperatura.

Duž  $i$ -te ulazne deonice  $D_i^{in}$  postavlja se grupa senzorskih uređaja za merenje osvetljenja  $SuO_k^{D_i^{in}}$ ,  $k = 1, \dots, K$ , senzorski uređaj za merenje temperature  $SuT^{D_i^{in}}$  i senzorski uređaj za detektovanje padavina  $SuP^{D_i^{in}}$  (Sl. 4.19).



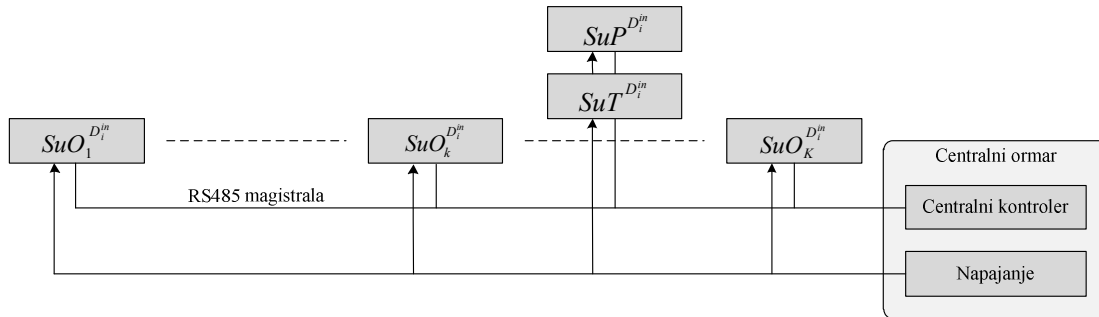
Sl. 4.19 – Postavljanje senzora osvetljenja duž ulazne deonice

Svaki senzorski uređaj, bilo da meri osvetljenje, temperaturu ili detektuje padavine, ima strukturu prikazanu kao na Sl. 4.20. Uređaj se sastoji iz senzorskog bloka, mikro-kontrolerskog bloka (uC), bloka za realizaciju interfejsa RS485 i bloka za napajanje. uC blok vrši očitavanje senzora i omogućava komunikaciju sa spoljašnjim svetom preko interfejsa RS485 tipa. U uC bloku je realizovan Modbus RTU Slave, čime je omogućeno očitavanje uređaja preko RS485 interfejsa primenom Modbus RTU protokola.



Sl. 4.20 – Blok šema senzorskog uređaja

Povezivanje senzorskih uređaja sa centralnim kontrolerom, raspoređenih duž ulazne deonice, se vrši prema Sl. 4.21. Svi uređaji se napajaju iz centralnog ormara jednosmernim naponom preko dve žice, dok se komunikacija centralnog kontrolera i senzorskih uređaja ostvaruje preko RS485 interfejsa primenom Modbus RTU protokola.



Sl. 4.21 – Povezivanje senzorskih uređaja sa centralnim kontrolerom

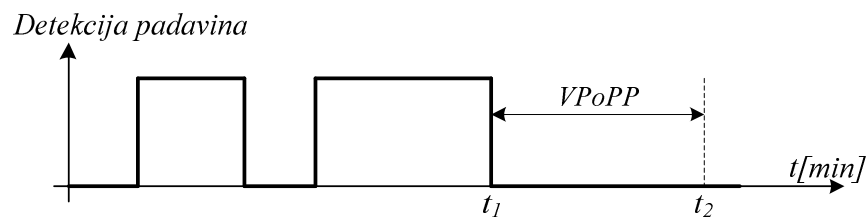
Na osnovu merenja koja se obezbeđuju primenom strukture prikazane na Sl. 4.21 određuju se vrednosti koje služe centralnom kontroleru za određivanje sposobnosti reagovanja vozila. Te vrednosti su:

- trenutna vidljivost (TV),
- temperatura (T) i
- vreme proteklo od poslednje padavine (VPoPP).

Trenutna vrednost TV se formira na osnovu očitavanja grupe senzorskih uređaja za merenje osvetljenja. Senzorski uređaji za merenje osvetljenja koriste senzore osvetljenja [123]. Senzori osvetljenja predstavljaju svetlosno-digitalne konvertore koji su dizajnirani da aproksimiraju svetlosnu karakteristiku ljudskog oka. Na osnovu očitanih vrednosti iz senzorskih uređaja do vrednosti TV dolazi se usrednjavanjem:

$$TV^{D_i^n} = \frac{\sum_{k=1}^K SuO_k^{D_i^n}}{K} \quad (4.30)$$

Senzorski uređaj za merenje temperature može biti baziran na bilo kom temperaturnom senzoru koji ima merni opseg dovoljno širok da obuhvati sve varijacije temperature kako na dnevnom nivou tako i na nivou godišnjih doba (npr. Pt100, Pt1000, termoparovi i td.). Senzorski uređaj za detekciju padavina koristi senzor za detekciju padavina [124].



Sl. 4.22 - Formiranje trenutne vrednosti VPoPP

Trenutna vrednost  $VPoPP$  se formira na osnovu signala koji se dobija od senzora detekcije padavina kao razlika trenutnog vremena i trenutka prestanka padavina (trenutak  $t_1$  na Sl. 4.22). U trenutku  $t_2$  trenutna vrednost  $VPoPP$  je:

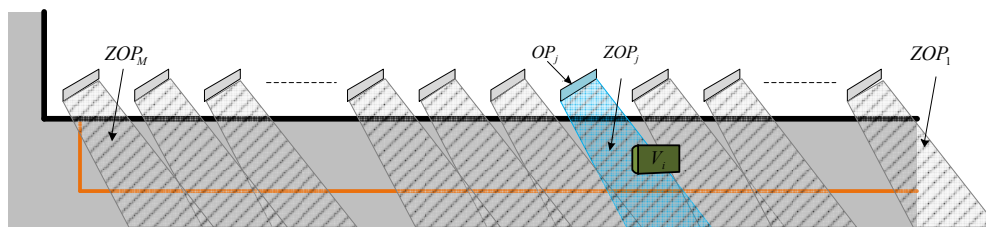
$$VPoPP(t_2) = t_2 - t_1 \quad (4.31)$$

#### 4.1.4. Podsystem za obaveštavanje

Nakon procesiranja podataka, koje dobija od mernog sistema, centralni kontroler definiše poruke koje treba da budu prenete svakom vozilu koje se nađe u nekoj od zona ulaznih deonica. U okviru obaveštenja nalaze se informacije o preporučenoj brzini kojom vozilo treba da se kreće i ukoliko ima bojazni da može doći do konflikta u poruci se ubacuju i informacije o nivou opasnosti.

Podsystem za obaveštavanje se sastoji iz niza vizuelnih panela poređanih pored kolovoza (Sl. 4.23). Za svaku ulaznu deonicu postavlja se po jedan niz vizuelnih panela. Vizuelni paneli su realizovani uz pomoć displeja. Tip displeja može biti različit, a u praksi najčešći izbor su displeji sa tečnim kristalima (LCD, Liquid Crystal Display) ili LED sedmosegmentni displeji. Vizuelni paneli ili obaveštajni paneli se postavljaju pod uglom u odnosu na pravac deonice. Ugao postavljanja se bira tako da obezbedi vidljivost displeja samo od strane jednog vozača. Pri izboru ugla postavljanja ima se u vidu i parametar displeja *horizontalni ugao vidljivosti*. Na ovaj način obezbeđuje se da svaki obaveštajni panel  $OP_j, j = 1, \dots, M$  ima svoju zonu  $ZOP_j$  u kojoj je samo on vidljiv vozilima koja se nalaze u toj zoni.

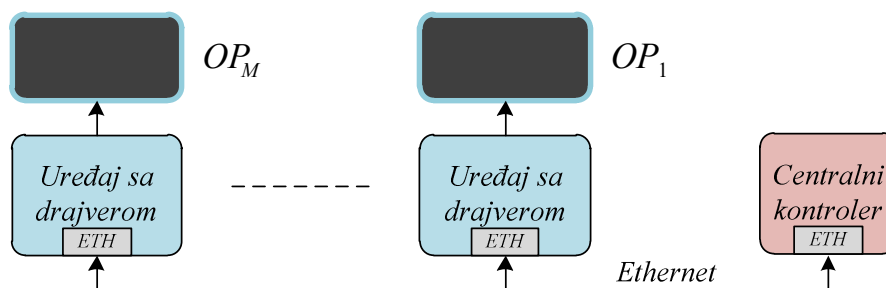
Kada se vozilo nađe u zoni ulazne deonice, proverava se u kojoj zoni obaveštajnog panela se vozilo nalazi, a potom se obaveštenje prikazuje na obaveštajnom panelu koji odgovara toj zoni. Tako u primeru, prikazanom na Sl. 4.23, vozilo  $V_i$  se nalazi u zoni  $ZOP_j$  pa zbog toga obaveštenje se prikazuje na obaveštajnom panelu  $OP_j$ .



Sl. 4.23 – Niz obaveštajnih panela ulazne deonice

U slučaju da vozilo ima mogućnost V2I komunikacije ili Wi-Fi komunikacije i da su aktivirane odgovarajuće aplikacije na tabli vozila (OBU, On Board Units) ili pametnom telefonu (Smart Phones) vozača, tada je poruku obaveštenja moguće prikazati u samom vozilu. Na taj način obaveštavanje vozača se podiže na viši nivo, a efikasnost sistema povećava.

Pored niza obaveštajnih panela postavljenih za svaku ulaznu deonicu, takođe se postavlja po jedan obaveštajni panel za svaku izlaznu deonicu. Taj panel se postavlja na ulazu izlazne deonice i na njemu se ispisuje vrednost brzine koju definiše hierarhiski nadređen sistem (centralna aplikacija).



Sl. 4.24 – Povezivanje niza obaveštajnih panela ulazne deonice sa centralnim kontrolerom

#### 4.2. Fazi-ekspertski sistem za određivanje sposobnosti reagovanja vozila (SRV)

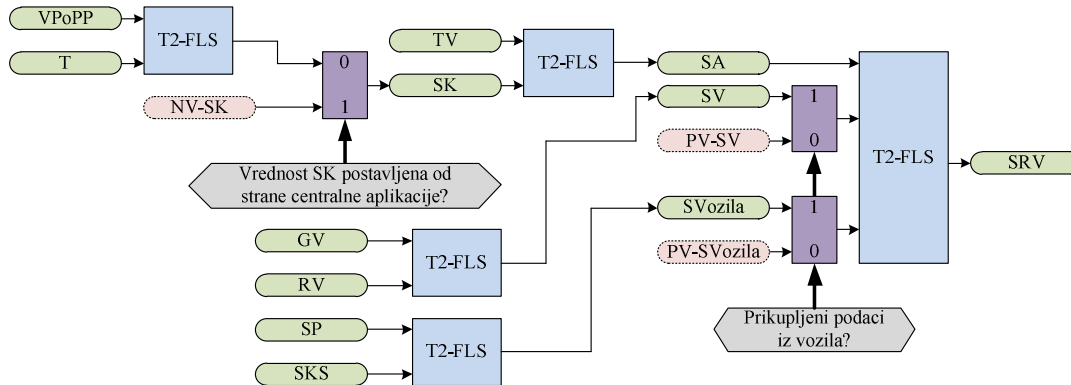
Do vrednosti *sposobnost reagovanja vozila (SRV)* se dolazi primenom nekoliko T2-FLS sistema. Tip-2 fazi skupovi i tip-2 fazi logički sistemi se koriste iz razloga što u veličinama koje određuju *SRV* postoje velike neodređenosti definisanju funkcija pripadnosti.

Vrednost *SRV* se određuje primenom sistema prikazanog na Sl. 4.25. Vrednost *SRV* zavisi od *stanja ambijenta (SA)*, *sposobnosti vozača (SV)* i *sposobnosti vozila (SVozila)*. Ove tri vrednosti su izvedene i zavise od drugih ulaznih/merenih veličina i drugih izvedenih veličina. Veličina stanje ambijenta se određuje uvek za svako vozilo jer ulazne/merne veličine, koje određuje vrednost *SA*, se prikupljaju u okviru samog sistema. Sa druge strane, vrednosti sposobnost vozača i sposobnost vozila zavise od veličina koje se dobijaju iz samog vozila, pa iz tog razloga *SV* i *SVozila* se računaju samo u slučaju da se vozilo koje ulazi u saobraćajnu lokaciju javi i pošalje podatke o vozaču i samom vozilu koje će centralni kontroler iskoristiti za proračun *SV* i *SVozila*. Ukoliko vozilo, prilikom ulaska u saobraćajnu lokaciju, ne pošalje ove podatke centralni kontroler će koristiti prosečne vrednosti za *SV* i *SVozila (PV-SV i PV-SVozila)*.

Formiranjem izvedene veličine *stanje ambijenta (SA)* sistem teži da na egzaktan način uračuna uticaj okoline na sposobnost vozila da reaguje na iznenadna dešavanja u okviru saobraćajne lokacije. Tako na primer, smanjena vidljivost nepovoljno utiče na sposobnost vozača da adekvatno reaguje, dok klizav kolovoz nepovoljno utiče na sposobnost vozila da pri istoj sili pritiska na kočnicu vozilo se zaustavi ispred mesta eventualnog konflikta. Drugim rečima, smanjena vidljivost i klizav kolovoz nepovoljno utiču na ukupnu reaktivnu sposobnost vozila. Da bi se odredila vrednost *SA* prvo je potrebno odrediti vrednost koja opisuje u kakvom je stanju kolovoz. *Stanje kolovoza (SK)* je vrednost koja se formira primenom T2-FLS na merenja prikupljena od senzorskog uređaja za merenje temperature i senzorskog uređaja za detekciju padavina. Ako se formiraju lingvističke promenljive *vreme proteklo od poslednje padavine (VPoPP)* i *temperatura (T)* tada je moguće formirati fazi-logički sistem za određivanje *SK*.

Formiranjem izvedene veličine *sposobnost vozača (SV)* sistem teži da na egzaktan način uračuna uticaj sposobnosti vozača na sposobnost vozila da reaguje na iznenadna dešavanja u okviru saobraćajne lokacije. Naravno, ukoliko postoji komunikaciona mogućnost da se iz vozila prikupe podaci o vozaču i ako samo vozilo prosledi podatke sistemu, tada se formira vrednost *SV* primenom T2-FLS. U suprotnom za pristiglo vozilo u saobraćajnu lokaciju koristila bi se prosečna vrednost *SV* čiji je iznos 0.5. Sposobnost vozača zavisi od dosta faktora kao što su: godište, zdravstveno stanje, stanje vida, refleksa, povećani umor, alkoholisano stanje i td. Postoji veliki broj faktora koji mogu uticati na *SV*. U ovom radu razmatrana je zavisnost *SV* od veličina *godište vozača (GV)* i *refleks vozača (RV)*.

Formiranjem izvedene veličine *sposobnost vozila (SVozila)* sistem teži da na egzaktan način uračuna uticaj sposobnosti vozila na ukupnu sposobnost vozila da reaguje na iznenadna dešavanja u okviru saobraćajne lokacije. Naravno, ukoliko postoji komunikaciona mogućnost da se iz vozila prikupe podaci o vozilu i ako samo vozilo prosledi podatke sistemu, tada se formira vrednost *SVozila* primenom T2-FLS. U suprotnom za pristiglo vozilo u saobraćajnu lokaciju koristila bi se prosečna vrednost *SVozila* čiji je iznos 0.5. Sposobnost vozila zavisi od dosta faktora kao što su: godište, stanje pneumatika, stanje kočionog sistema i td. Postoji veliki broj faktora koji mogu uticati na *SVozila*. U ovom radu razmatrana je zavisnost *SVozila* od veličina stanje pneumatika (*SP*) i *stanje kočionog sistema (SKS)*.

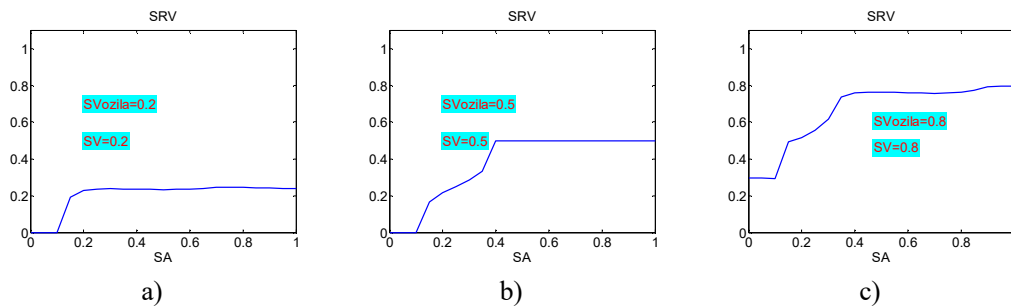
Sl. 4.25 – Fazi-ekspertski sistem za određivanje *SRV*

Na osnovu određenih *SA*, *SV* i *SVozila* moguće je odrediti *SRV* primenom fazi-logičkih pravila odlučivanja koja su prikazana u Tab. 4.1. U slučaju da vozilo nema mogućnost komunikacije sa sistemom, centralni kontroler ne raspolaže sa podacima o vozaču i vozilu. Tada se do vrednosti *SRV* dolazi primenom T2-FLS (Tab. 4.1) gde se kao ulazne veličine za sposobnost vozača i vozila usvajaju prosečne vrednosti  $SV=0.5$  i  $SVozila=0.5$ . U tom slučaju *SRV* zavisi samo od *SA* i ta zavisnost je prikazana na Sl. 4.26b.

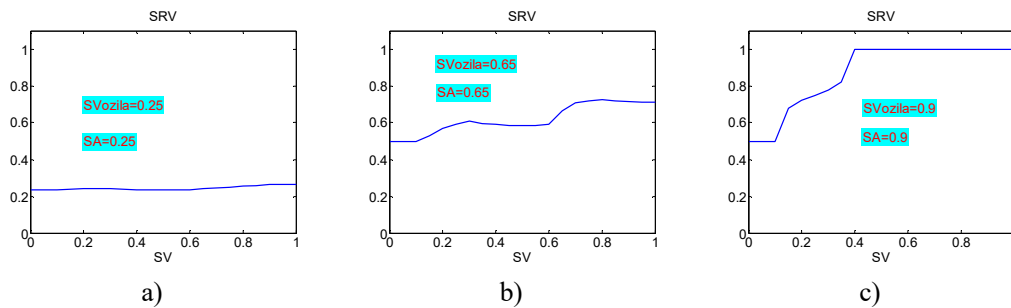
Tab. 4.1 – Pravila odlučivanja T2-FLS za određivanje *SRV*

1.	Ako je SA Loše, SV Mala i SVozila Mala tada je SRV Mala.
2.	Ako je SA Loše, SV Mala i SVozila Srednja tada je SRV Mala.
3.	Ako je SA Loše, SV Mala i SVozila Velika tada je SRV Mala.
4.	Ako je SA Loše, SV Srednja i SVozila Mala tada je SRV Mala.
5.	Ako je SA Loše, SV Srednja i SVozila Srednja tada je SRV Mala.
6.	Ako je SA Loše, SV Srednja i SVozila Velika tada je SRV Srednja.
7.	Ako je SA Loše, SV Velika i SVozila Mala tada je SRV Mala.
8.	Ako je SA Loše, SV Velika i SVozila Srednja tada je SRV Srednja.
9.	Ako je SA Loše, SV Velika i SVozila Velika tada je SRV Srednja.
10.	Ako je SA Srednje, SV Mala i SVozila Mala tada je SRV Mala.
11.	Ako je SA Srednje, SV Mala i SVozila Srednja tada je SRV Srednja.
12.	Ako je SA Srednje, SV Mala i SVozila Velika tada je SRV Srednja.
13.	Ako je SA Srednje, SV Srednja i SVozila Mala tada je SRV Mala.
14.	Ako je SA Srednje, SV Srednja i SVozila Srednja tada je SRV Srednja.
15.	Ako je SA Srednje, SV Srednja i SVozila Velika tada je SRV Srednja.
16.	Ako je SA Srednje, SV Velika i SVozila Mala tada je SRV Srednja.
17.	Ako je SA Srednje, SV Velika i SVozila Srednja tada je SRV Srednja.
18.	Ako je SA Srednje, SV Velika i SVozila Velika tada je SRV Velika.
19.	Ako je SA Dobro, SV Mala i SVozila Mala tada je SRV Mala.

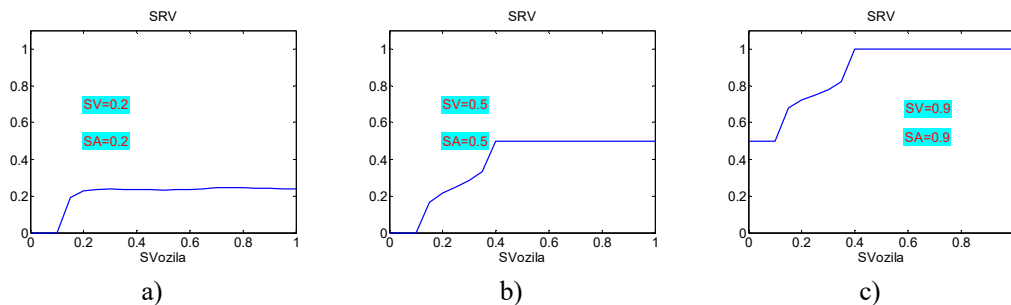
20.	Ako je SA Dobro, SV Mala i SVozila Srednja tada je SRV Srednja.
21.	Ako je SA Dobro, SV Mala i SVozila Velika tada je SRV Srednja.
22.	Ako je SA Dobro, SV Srednja i SVozila Mala tada je SRV Srednja.
23.	Ako je SA Dobro, SV Srednja i SVozila Srednja tada je SRV Srednja.
24.	Ako je SA Dobro, SV Srednja i SVozila Velika tada je SRV Velika.
25.	Ako je SA Dobro, SV Velika i SVozila Mala tada je SRV Srednja.
26.	Ako je SA Dobro, SV Velika i SVozila Srednja tada je SRV Velika.
27.	Ako je SA Dobro, SV Velika i SVozila Velika tada je SRV Velika.



Sl. 4.26 – Zavisnost *SRV* od *SA*



Sl. 4.27 – Zavisnost *SRV* od *SV*



Sl. 4.28 – Zavisnost *SRV* od *SVozila*



Posmatrajući Sl. 4.26-4.28 može se primetiti da svako povećanje stanja ambijenta, stanja vozača ili stanja vozila pozitivno utiče na povećanje vrednosti SRV, dok svako smanjenje bilo kog od ova tri faktora dovodi do smanjenja SRV.

#### 4.2.1. Određivanje stanja ambijenta (SA)

Ulazna lingvistička promenljiva *vreme proteklo od poslednje padavine (VPoPP)*, definisana na skupu  $[0,90]$  min, ima skup naziva:

$$T(VPoPP) = \{Malo, Srednje, Veliko\} \quad (4.32)$$

ima funkcije pripadnosti:

$$\mu_{Malo}(x) = [Triangle(x; -27, 0, 27, 0.5), Triangle(x; -36, 0, 36, 1)] \quad (4.33)$$

$$\mu_{Srednje}(x) = [Trapez(x; 20, 43, 47, 70, 0.5), Triangle(x; 13, 42, 48, 77, 1)] \quad (4.34)$$

$$\mu_{Veliko}(x) = [Triangle(x; 63, 90, 117, 0.5), Triangle(x; 54, 90, 126, 1)] \quad (4.35)$$

Ulazna lingvistička promenljiva *temperatura (T)*, definisana na skupu  $[-10, 40]$  °C, ima skup naziva:

$$T(T) = \{Niska, Srednja, Visoka\} \quad (4.36)$$

ima funkcije pripadnosti:

$$\mu_{Niska}(x) = [Triangle(x; -25, -10, 5, 0.5), Triangle(x; -30, -10, 10, 1)] \quad (4.37)$$

$$\mu_{Srednja}(x) = [Trapez(x; 1, 14, 16, 29, 0.5), Triangle(x; -3, 13, 17, 33, 1)] \quad (4.38)$$

$$\mu_{Visoka}(x) = [Triangle(x; 25, 40, 55, 0.5), Triangle(x; 20, 40, 60, 1)] \quad (4.39)$$

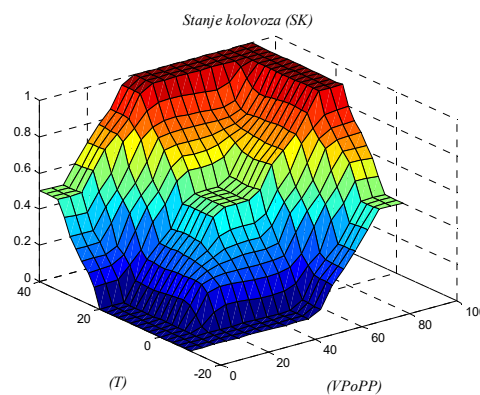
U slučaju da su prisutne padavine u obliku snega, velika je verovatnoća da detektor padavina neće biti u mogućnosti da ispravno funkcioniše. U takvim situacijama predviđena je mogućnost da se vrednost *SK* postavi od strane centralne aplikacije. Ta vrednost može biti definisana od operatera ili automatski. Formiranje vrednosti *SK* se ostvaruje uvažavanjem informacija od drugih službi (npr. za održavanje puteva). Na ovaj način se omogućava da u kraćem periodu godine, kada T2-FLS za određivanje *SK* nije u mogućnosti da pravilno funkcioniše, se adekvatna vrednost *SK* postavi od hierarhiski nadređenog sistema. U tom periodu vrednost *SK* se definiše u odnosu na situaciju prema Tab. 4.2.

Tab. 4.2 – Vrednost *SK* formirana od strane centralne aplikacije

Situacija	Vrednost <i>SK</i>
Ledena kiša	0.02
Zaleđen kolovoz	0.05
Neočišćen kolovoz od snega	0.1
Padanje snega	0.12

Tab. 4.3 – Pravila odlučivanja T2-FLS za određivanje *SK*

1.	Ako je VPoPP Malo i T Niska tada je SK Loše.
2.	Ako je VPoPP Malo i T Srednja tada je SK Loše.
3.	Ako je VPoPP Malo i T Visoka tada je SK Srednje.
4.	Ako je VPoPP Srednje i T Niska tada je SK Loše.
5.	Ako je VPoPP Srednje i T Srednja tada je SK Srednje.
6.	Ako je VPoPP Srednje i T Visoka tada je SK Dobro.
7.	Ako je VPoPP Veliko i T Niska tada je SK Srednje.
8.	Ako je VPoPP Veliko i T Srednja tada je SK Dobro.
9.	Ako je VPoPP Veliko i T Visoka tada je SK Dobro.



Sl. 4.29 – Zavisnost SK od VPoPP i T

Ulazna lingvistička promenljiva *trenutna vidljivost (TV)*, definisana na skupu  $[0,1]$ , ima skup naziva:

$$T(TV) = \{Loša, Srednja, Dobra\} \quad (4.40)$$

ima funkcije pripadnosti:

$$\mu_{Loša}(x) = [Triangle(x; -0.3, 0, 0.3, 0.5), Triangle(x; -0.4, 0, 0.4, 1)] \quad (4.41)$$

$$\mu_{Srednja}(x) = [Triangle(x; 0.2, 0.5, 0.8, 0.5), Triangle(x; 0.1, 0.5, 0.9, 1)] \quad (4.42)$$

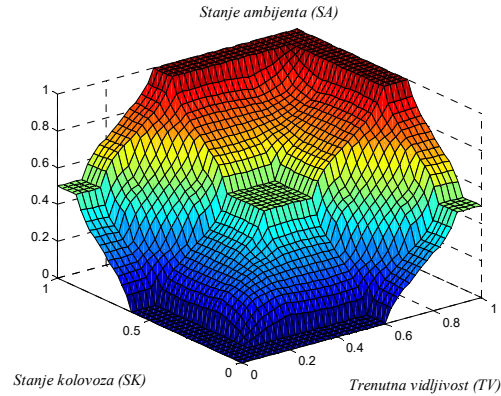
$$\mu_{Dobra}(x) = [Triangle(x; 0.7, 1, 1.3, 0.5), Triangle(x; 0.6, 1, 1.4, 1)] \quad (4.43)$$

Za tako formirane ulazne veličine *trenutna vidljivost (TV)* i *stanje kolovoza (SK)*, moguće odrediti vrednost *stanje ambijenta (SA)*, kojom bi se na egzaktan način odredila među vrednost uticaja ambijenta na celokupnu reaktivnu sposobnost vozila, primenom tip-2 fazi logičkog sistema.

Tab. 4.4 – Pravila odlučivanja T2-FLS za određivanje SA

1.	Ako je TV Loša i SK Loše tada je SA Loše.
2.	Ako je TV Loša i SK Srednje tada je SA Loše.
3.	Ako je TV Loša i SK Dobro tada je SA Srednje.

4.	Ako je TV Srednja i SK Loše tada je SA Loše.
5.	Ako je TV Srednja i SK Srednje tada je SA Srednje.
6.	Ako je TV Srednja i SK Dobro tada je SA Dobro.
7.	Ako je TV Dobra i SK Loše tada je SA Srednje.
8.	Ako je TV Dobra i SK Srednje tada je SA Dobro.
9.	Ako je TV Dobra i SK Dobro tada je SA Dobro.



Sl. 4.30 – Zavisnost SA od TV i SK

#### 4.2.2. Određivanje sposobnosti vozača (SV)

Ulazna lingvistička promenljiva *godište vozača (GV)*, definisana na skupu [18,90], ima skup naziva:

$$T(GV) = \{Malo, Srednje, Veliko\} \quad (4.44)$$

ima funkcije pripadnosti:

$$\mu_{Malo}(x) = [Triangle(x; -4, 18, 40, 0.5), Triangle(x; -11, 18, 47, 1)] \quad (4.45)$$

$$\mu_{Srednje}(x) = [Triangle(x; 32, 54, 76, 0.5), Triangle(x; 25, 54, 83, 1)] \quad (4.46)$$

$$\mu_{Veliko}(x) = [Triangle(x; 68, 90, 112, 0.5), Triangle(x; 61, 90, 119, 1)] \quad (4.47)$$

Ulazna lingvistička promenljiva *refleks vozača (RV)*, definisana na skupu [0,1], ima skup naziva:

$$T(RV) = \{Loš, Srednji, Dobar\} \quad (4.48)$$

ima funkcije pripadnosti:

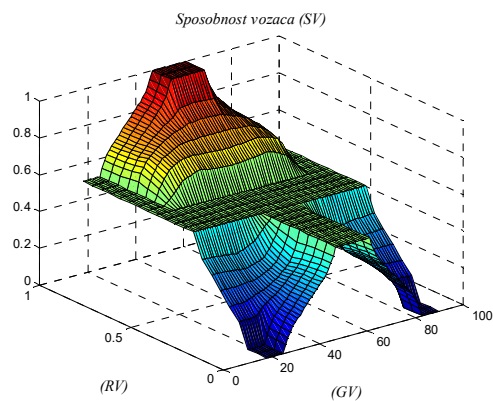
$$\mu_{Loš}(x) = [Triangle(x; -0.3, 0, 0.3, 0.5), Triangle(x; -0.4, 0, 0.4, 1)] \quad (4.49)$$

$$\mu_{Srednji}(x) = [Triangle(x; 0.2, 0.5, 0.8, 0.5), Triangle(x; 0.1, 0.5, 0.9, 1)] \quad (4.50)$$

$$\mu_{Dobar}(x) = [Triangle(x; 0.7, 1, 1.3, 0.5), Triangle(x; 0.6, 1, 1.4, 1)] \quad (4.51)$$

Tab. 4.5 – Pravila odlučivanja T2-FLS za određivanje *SV*

1.	Ako je GV Malo i RV Loš tada je SV Mala.
2.	Ako je GV Malo i RV Srednji tada je SV Srednja.
3.	Ako je GV Malo i RV Dobar tada je SV Srednja.
4.	Ako je GV Srednje i RV Loš tada je SV Srednja.
5.	Ako je GV Srednje i RV Srednji tada je SV Srednja.
6.	Ako je GV Srednje i RV Dobar tada je SV Velika.
7.	Ako je GV Veliko i RV Loš tada je SV Mala.
8.	Ako je GV Veliko i RV Srednji tada je SV Srednja.
9.	Ako je GV Veliko i RV Dobar tada je SV Srednja.

Sl. 4.31 – Zavisnost *SV* od *GV* i *RV*

#### 4.2.3. Određivanje sposobnosti vozila (SVozila)

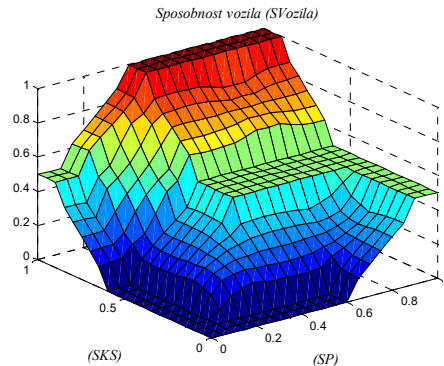
Od generičke lingvističke promenljive *Stanje* definišu se ulazne lingvističke promenljive:

	Lingvistička promenljiva	Način generisanja
1.	SP	Stanje („Pneumatik“)
2.	SKS	Stanje („Kočioni sistem“)

Tab. 4.6 – Pravila odlučivanja T2-FLS za određivanje *SVozila*

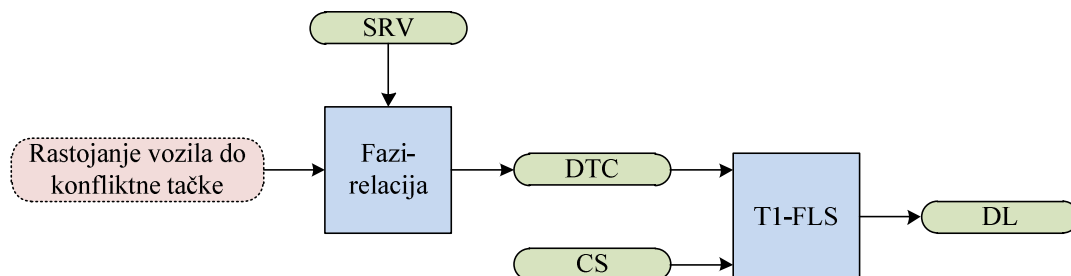
1.	Ako je SP Loše i SKS Loše tada je SVozila Mala.
2.	Ako je SP Loše i SKS Srednje tada je SVozila Mala.
3.	Ako je SP Loše i SKS Dobro tada je SVozila Srednja.

4.	Ako je SP Srednje i SKS Loše tada je SVozila Mala.
5.	Ako je SP Srednje i SKS Srednje tada je SVozila Srednja.
6.	Ako je SP Srednje i SKS Dobro tada je SVozila Velika.
7.	Ako je SP Dobro i SKS Loše tada je SVozila Srednja.
8.	Ako je SP Dobro i SKS Srednje tada je SVozila Srednja.
9.	Ako je SP Dobro i SKS Dobro tada je SVozila Velika.

Sl. 4.32 – Zavisnost *SVozila* od *SP* i *SKS*

#### 4.3. Fazi-ekspertski sistem za određivanje ukupnog nivoa opasnosti kretanja vozila (TDL)

Za svaku putanju kretanja vozila  $V_i$  i za svaku kritičnu zonu duž ove putanje centrali kontroler procenjuje nivo opasnosti kretanja. Procena nivoa opasnosti kretanja se vrši u fazi domenu gde se kao ulazne fazi promenljive koriste trenutna brzina vozila (CS, Current Speed) i rastojanje do konflikta (DTC, Distance To Conflict), dok se kao izlazna promenljiva koristi nivo opasnosti (DL, Danger Level). Drugim rečima, procena opasnosti kretanja vozila se vrši primenom tip-1 fazi logičkog sistema (T1-FLS).



Sl. 4.33 – Fazi-ekspertski sistem za određivanje DL

Tab. 4.7 – Pravila odlučivanja za određivanje *DL*

	Pravilo
1.	Ako je DTC Malo i CS Mala tada je DL srednji.
2.	Ako je DTC Malo i CS Srednja tada je DL velik.
3.	Ako je DTC Malo i CS Velika tada je DL velik.

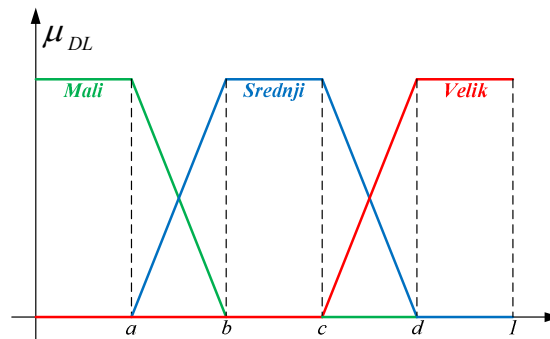
4.	Ako je DTC Srednje i CS Mala tada je DL mali.
5.	Ako je DTC Srednje i CS Srednja tada je DL srednji.
6.	Ako je DTC Srednje i CS Velika tada je DL velik.
7.	Ako je DTC Veliko i CS Mala tada je DL mali.
8.	Ako je DTC Veliko i CS Srednja tada je DL mali.
9.	Ako je DTC Veliko i CS Velika tada je DL srednji.

Ukoliko vozilo  $V_i$ , u trenutku posmatranja  $t_0$ , potencijalno može da se nađe u  $K$  konfliktnih zona krećući se putanjom  $P_{mn}$ , tada se do procene ukupnog nivoa opasnosti kretanja (TDL, Total Danger Level) dolazi primenom izraza:

$$TDL_i^{mn}(t_0) = \max_{k=1, \dots, K} \{P_k(t_0) \cdot DL_k(t_0)\} \quad (4.52)$$

gde je sa  $P_k(t_0)$  označena procena verovatnoće sudara, a sa  $DL_k(t_0)$  označena procena opasnosti kretanja. U prethodnom izrazu, ukoliko je rastojanje vozila  $V_i$  do odgovarajuće konfliktne tačke manje od  $DTC_{\max}$  onda se ta procena ignoriše, tj. usvaja se  $DL_k(t_0) = 0$ .

#### 4.3.1. Nivo opasnosti (DL)

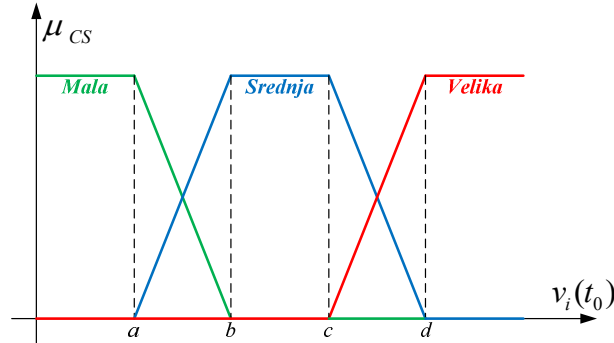


Sl. 4.34 – Funkcije pripadnosti promenljive  $DL$

Fazi-logička promenljiva  $DL$  ima skup naziva  $T(DL) = \{Mali, Srednji, Velik\}$ . Funkcije pripadnosti promenljive  $DL$  prikazane su na Sl. 4.34. Parametri funkcija pripadnosti imaju vrednosti:

$$\begin{aligned} a &= 0.1 \\ b &= 0.45 \\ c &= 0.55 \\ d &= 0.9 \end{aligned} \quad (4.53)$$

#### 4.3.2. Trenutna brzina (CS)



Sl. 4.35 – Funkcije pripadnosti promenljive CS

Fazi-logička promenljiva *CS* ima skup naziva  $T(CS)=\{Mala, Srednja, Velika\}$ . Funkcije pripadnosti promenljive *CS* prikazane su na Sl. 4.35. Parametri funkcija pripadnosti se izražavaju u [km/h] i imaju vrednosti:

$$\begin{aligned} a &= 2 \\ b &= 24 \\ c &= 26 \\ d &= 48 \end{aligned} \quad (4.54)$$

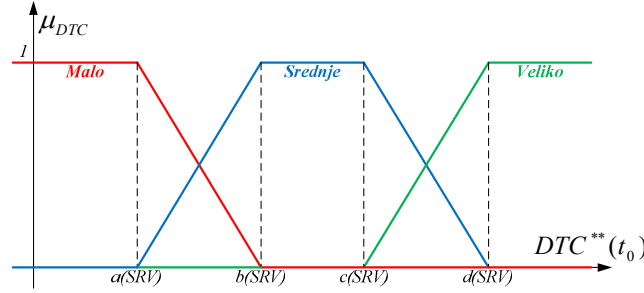
#### 4.3.3. Rastojanje do konflikta (DTC)

Na univerzumu kartezijanskog proizvoda *DTC* i *SRV* moguće je definisati skup naziva  $T(DTC \times SRV)=\{RMalo, RSrednje, RVeliko\}$ . Svaki naziv predstavlja binarnu fazi-relaciju nad univerzumu  $DTC \times SRV = [0, DTC_{max}] \times [0,1] = [0,12] \times [0,1]$ . S obzirom na činjenicu da centralni kontroler za svako vozilo prilikom njegovog ulaska u saobraćajnu lokaciju određuje vrednost *SRV*, do funkcija pripadnosti dolazi se primenom ove vrednosti u odgovarajućoj funkciji pripadnosti fazi relacije:

$$\begin{aligned} \mu_{RMalo}(x, y) &= \mu_{RMalo}(x, SRV) = \mu_{Malo}(x) \\ \mu_{RSrednje}(x, y) &= \mu_{RSrednje}(x, SRV) = \mu_{Srednje}(x) \\ \mu_{RVeliko}(x, y) &= \mu_{RVeliko}(x, SRV) = \mu_{Veliko}(x) \end{aligned} \quad (4.55)$$

Na ovaj način se formira fazi-logička promenljiva *DTC* sa skupom naziva  $T(DTC)=\{Malo, Srednje, Veliko\}$ . Funkcije pripadnosti promenljive *DTC* prikazane su na Sl. 4.36. Parametri funkcija pripadnosti zavise od *SRV* i predstavljeni su izrazima:

$$\begin{aligned}
 a(SRV) &= a(y) = (1 - y) \cdot (2.5 - 0.5) + 0.5 = 2 \cdot (1 - y) + 0.5 \\
 b(SRV) &= b(y) = (1 - y) \cdot (5.75 - 3.75) + 3.75 = 2 \cdot (1 - y) + 3.75 \\
 c(SRV) &= c(y) = (1 - y) \cdot (6.25 - 4.25) + 4.25 = 2 \cdot (1 - y) + 4.25 \\
 d(SRV) &= d(y) = (1 - y) \cdot (9.5 - 7.5) + 7.5 = 2 \cdot (1 - y) + 7.5
 \end{aligned}
 \tag{4.56}$$



Sl. 4.36 – Funkcije pripadnosti promenljive  $DTC$

Binarna fazi-logička relacija  $RMalo$  definisana je izrazom:

$$\mu_{RMalo}(x, y) = \begin{cases} 1 & x < a(y) \\ 1 - \frac{x - a(y)}{b(y) - a(y)} & a(y) \leq x \leq b(y) \\ 0 & b(y) < x \end{cases}
 \tag{4.57}$$

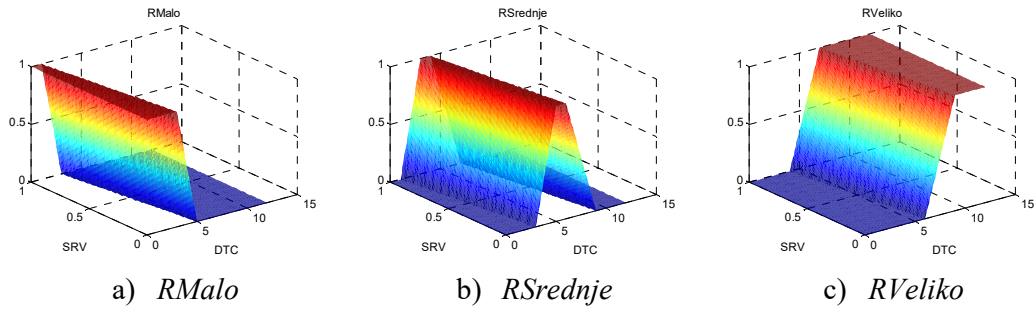
Binarna fazi-logička relacija  $RSrednje$  definisana je izrazom:

$$\mu_{RSrednje}(x, y) = \begin{cases} 0 & x < a(y) \\ \frac{x - a(y)}{b(y) - a(y)} & a(y) \leq x < b(y) \\ 1 & b(y) \leq x < c(y) \\ 1 - \frac{x - c(y)}{d(y) - c(y)} & c(y) < x \leq d(y) \\ 0 & d(y) < x \end{cases}
 \tag{4.58}$$

Binarna fazi-logička relacija  $RVeliko$  definisana je izrazom:

$$\mu_{RVeliko}(x, y) = \begin{cases} 0 & x < c(y) \\ \frac{x - c(y)}{d(y) - c(y)} & c(y) \leq x \leq d(y) \\ 1 & d(y) < x \end{cases}
 \tag{4.59}$$

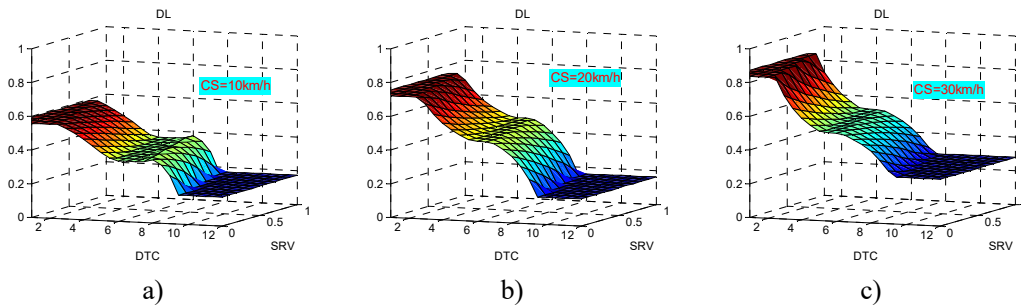




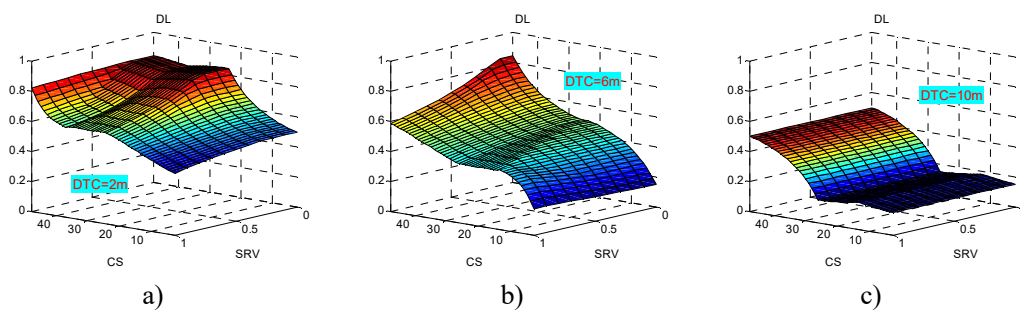
Sl. 4.37 – Binarne fazi-logičke relacije

#### 4.3.4. Analiza osetljivosti

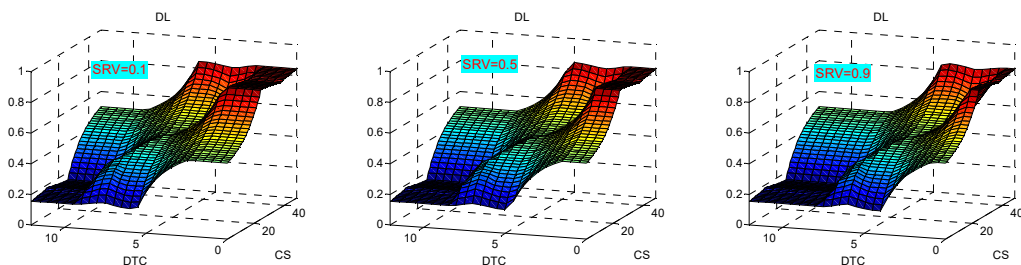
Na Sl. 4.38-4.40 prikazane su zavisnosti DL od SRV, DTC i CS. S obzirom na činjenicu da veličina DL zavisi od tri ulazne veličine izabran je 3D prikaz zavisnosti kod koga su dve veličine tretirane kao promenljive dok je jedna uzeta sa fiksnom vrednošću.



Sl. 4.38 – Zavisnost DL od SRV i DTC



Sl. 4.39 – Zavisnost DL od SRV i CS



a) b) c)

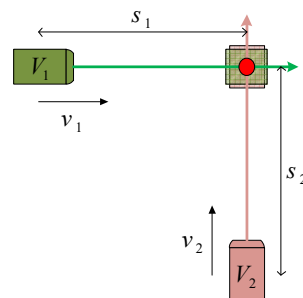
Sl. 4.40 – Zavisnost DL od DTC i CS

Na Sl. 4.38 prikazana je zavisnost DL od SRV i DTC pri fiksiranoj vrednosti CS. Može se primetiti da sa porastom vrednosti CS vrednost DL raste. Takav rezultat je u skladu sa zdravorazumskom logikom koja kaže da kada se vozilo kreće većom brzinom opasnost kretanja je veća.

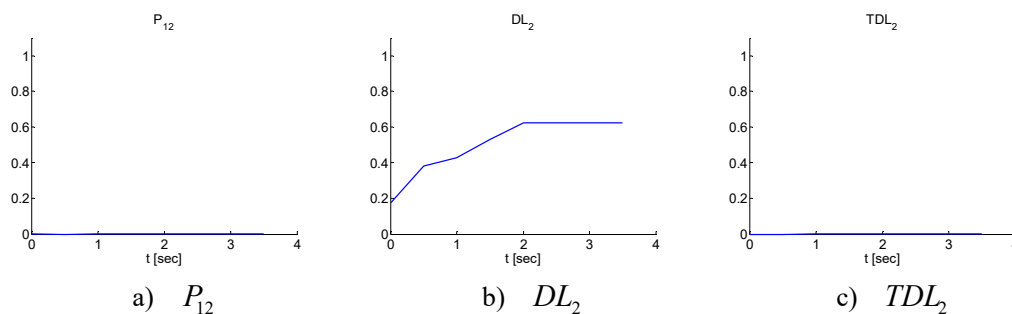
Na Sl. 4.39 prikazana je zavisnost DL od SRV i CS pri fiksiranoj vrednosti DTC. Može se primetiti da sa porastom vrednosti DTC vrednost DL opada. Takav rezultat je u skladu sa zdravorazumskom logikom koja kaže da kada se vozilo nalazi na većoj razdaljini od mesta konflikta da je opasnost kretanja manja.

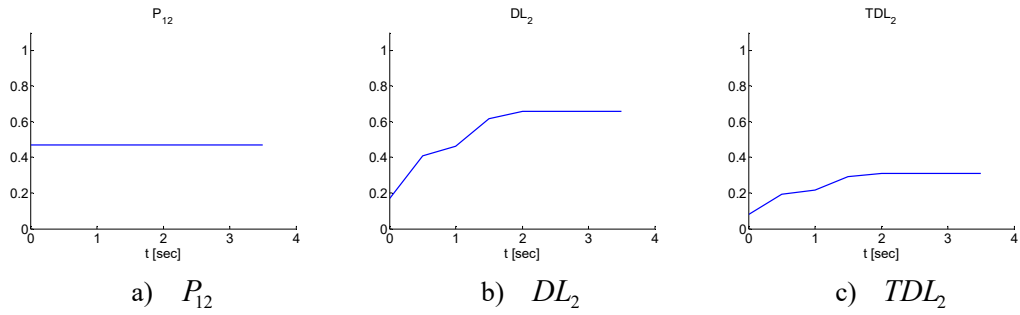
Na Sl. 4.40 prikazana je zavisnost DL od DTC i CS pri fiksiranoj vrednosti SRV. Može se primetiti da sa porastom vrednosti SRV vrednost DL opada (tj. neravna površina zavisnosti se pomera u pravcu smanjenja DTC i povećanja CS). Takav rezultat je u skladu sa zdravorazumskom logikom koja kaže da kada vozilo ima veću sposobnost kontrole da je opasnost kretanja manja.

**Primer 4.2:** Posmatrajmo dva vozila  $V_1$  i  $V_2$  koja ulaze u raskrsnicu (Sl. 4.41). Neka se vozila početnom trenutku nalaze na podjednakim udaljenostima  $s_1(t_0) = s_2(t_0) = 40m$ . Ako se vozila kreću konstantnim brzinama i ako je brzina prvog vozila  $v_1 = 20km/h$ , tada na Sl. 4.42-4.46 su prikazane vremenske zavisnosti procene verovatnoće sudara  $P_{12}$ , opasnosti kretanja drugog vozila  $DL_2$  i ukupna opasnost kretanja drugog vozila  $TDL_2$  pri različitim vrednostima brzine drugog vozila  $v_2$ .

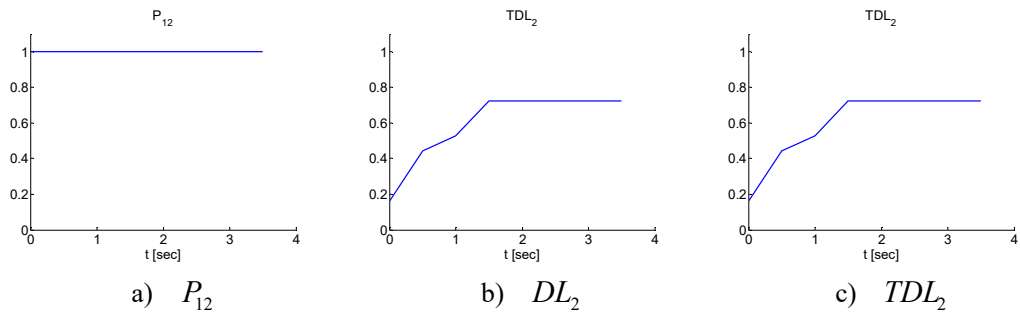


Sl. 4.41 – Primer dva vozila u raskrsnici

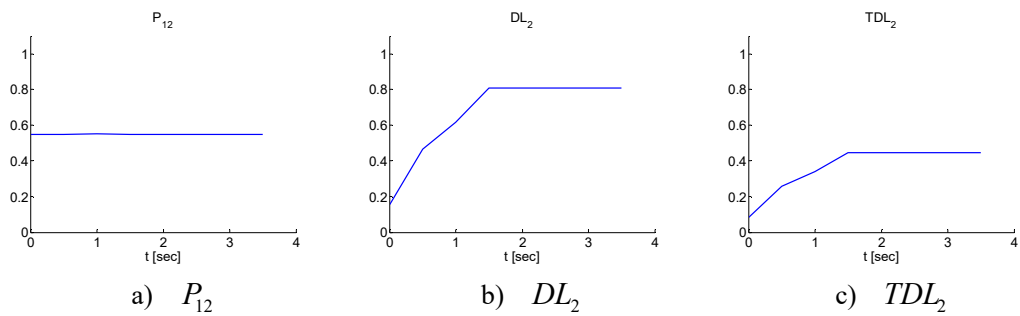
Sl. 4.42 – Vremenske zavisnosti pri  $v_2 = 15km/h$



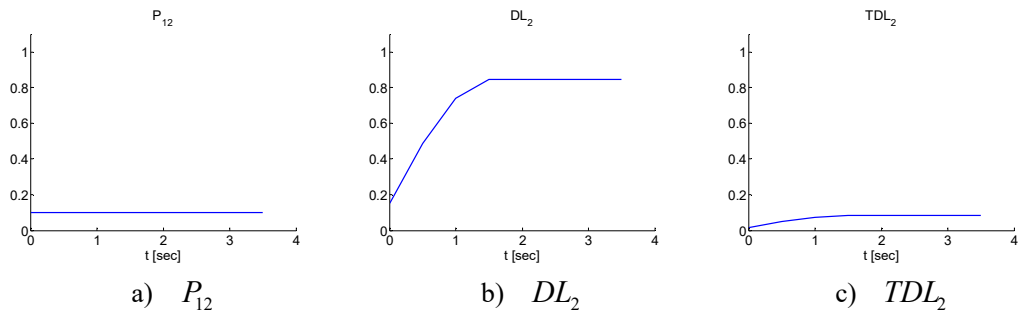
Sl. 4.43 – Vremenske zavisnosti pri  $v_2 = 17km/h$



Sl. 4.44 – Vremenske zavisnosti pri  $v_2 = 20km/h$



Sl. 4.45 – Vremenske zavisnosti pri  $v_2 = 23km/h$



Sl. 4.46 – Vremenske zavisnosti pri  $v_2 = 26km/h$

Na Sl. 4.42-4.46 može se primetiti da vrednost  $DL_2$ , pri svim vrednostima brzina  $v_2$ , dostiže relativno visoku vrednost iznad 0.6 u blizini kritične tačke. To je posledica činjenice da su vrednosti brzine drugog vozila  $v_2$  dosta visoke. Sa druge strane može se primetiti da vrednost ukupne opasnosti kretanja drugog vozila  $TDL_2$  ne prati uvek vrednost  $DL_2$ .  $TDL_2$  prati vrednost  $DL_2$  samo u slučaju kada je procena verovatnoće sudara  $P_{12}$  visoka kao u slučaju kada je  $v_2 = 20\text{km/h}$ .

Uopšteno gledajući, na osnovu prethodnih analiza, može se zaključiti da ukupna vrednost opasnosti kretanja vozila  $TDL$  na dobar način broičano reprezentuje opasnost situacije u kojoj se vozilo nalazi. Drugim rečima, kada se vozilo kreće na opasan način (velikom brzinom, u blizini kritične tačke i sa velikom verovatnoćom sudara sa drugim vozilom) tada  $TDL$  ima visok nivo.

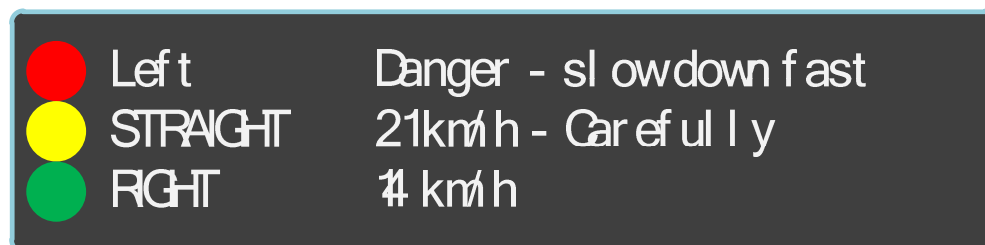
#### 4.3.5. Upotreba TDL

Uvažavajući činjenicu da na dobar način reprezentuje opasnost kretanja vozila, TDL se može upotrebiti za formiranje poruke o eventualnoj opasnosti.

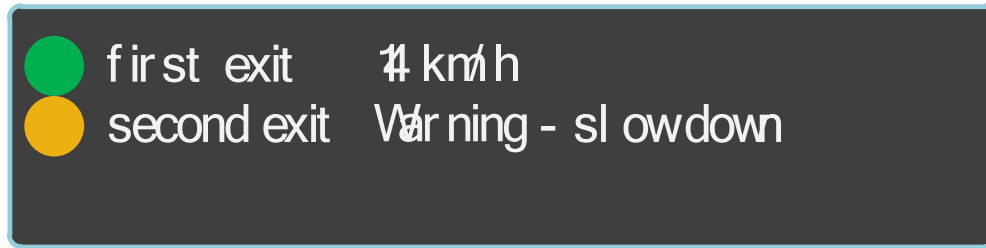
Poruka o eventualnoj opasnosti koja će biti prikazan u obaveštenju, za odgovarajuću putanju kretanja, određuje se na osnovu vrednosti TDL primenom pravila prikazanih u Tab. 4.8.

Tab. 4.8 – Pravila za definisanje poruke o opasnosti

	Opis	Opseg	Poruka	Ispis preporučene brzine	Boja
1.	Kretanje bez opasnosti.	$0 < TDL < 0.2$	-	Da	Zelena
2.	Preporuka za oprezno kretanje.	$0.2 \leq TDL < 0.4$	Carefully	Da	Žuta
3.	Upozorenje na potencijalnu opasnost.	$0.4 \leq TDL < 0.6$	Warning - slow down	Ne	Narandžasta
4.	Vrlo izvesna opasnost.	$0.6 \leq TDL$	Danger - slow down fast	Ne	Crvena



Sl. 4.47 – Primer prikaza obaveštajne poruke na raskrsnici



Sl. 4.48 – Primer prikaza obaveštajne poruke na kružnom toku sa dva prilaza

Na Sl. 4.47 i Sl. 4.48 mogu se videti primeri prikaza obaveštajnih poruka (na obaveštajnom panelu, tabli vozila ili pametnom telefonu vozača). Na Sl. 4.47 dat je primer obaveštajne poruke u slučaju raskrsnice, dok na Sl. 4.48 dat je primer obaveštajne poruke u slučaju kružnog toka sa dva prilaza.

## 5. SIMULACIONI MODEL SAOBRAĆAJNE LOKACIJE

Nakon teorijskog razmatranja problematike prevazilaženja konfliktnih situacija u saobraćaju i koncipiranja sistema potrebno je verifikovati njegove karakteristike i performanse pre eventualne primene u praksi. U cilju određivanja performansi inteligentnog sistema za izbegavanje konfliktnih situacija neophodno je izvršiti simulacije za koje je potreban model saobraćajnog procesa koji se odvija na saobraćajnoj lokaciji (raskrsnici ili kružnom toku).

Za verifikaciju performansi rada sistema za izbegavanje konfliktnih situacija moguće je koristiti neke od gotovih rešenja. Jedno od gotovih komercijalnih rešenja je simulacioni paket PTV Vissim [69]. Simulacioni paket PTV Vissim omogućava simulaciju najrazličitijih situacija i scenarija u saobraćaju zasnovanih na velikom broju raznih modela i sa mogućnošću postojanja velikog broja učesnika u simulacionom procesu. Ovaj paket omogućava detaljnu analizu simulacionih podataka i 3D prikaz situacija u saobraćaju.

Sa jedne strane činjenica da se radi o komercijalnom proizvodu, a sa druge strane postojanje verovatnoća da se primenom PTV Vissim ipak svi aspekti možda ne mogu sagledati i obraditi na željeni način, pristupilo se izradi specijalizovanog simulatora koji je poslužio za verifikaciju rada sistema za izbegavanje konfliktnih situacija definisanog u prethodnom poglavlju.

Za realizaciju simulatora izabran je C# programski jezik i WPF (Windows Presentation Foundation) tehnologija [125]. Pored dobrih karakteristika izabranih alata po pitanju kvaliteta grafičkog prikaza, još jedan razlog za izbor ovih alata je i činjenica da je i realizacija centralnog kontrolera zamišljena pomoću programskog jezika C#.

### 5.1. Elementi modela

#### 5.1.1. Generisanje vozila

Generisanje vozila koja ulaze u saobraćajnu lokaciju može se realizovati pomoću pseudo-slučajnog generatora ili pomoću unapred predefinisane sekvence.

Parametri pseudo-slučajnog generatora su prikazani u izvodu iz konfiguracionog fajla simulacione aplikacije:

```
<ExternalSource Name="I1" TimeOfOccurrence_min="6.0" TimeOfOccurrence_max="16.0" Length_min="3.5"
Length_max="5"
  Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
<ExternalSource Name="I2" TimeOfOccurrence_min="6.0" TimeOfOccurrence_max="16.0" Length_min="3.5"
Length_max="5"
  Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
<ExternalSource Name="I3" TimeOfOccurrence_min="6.0" TimeOfOccurrence_max="16.0" Length_min="3.5"
Length_max="5"
  Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
<ExternalSource Name="I4" TimeOfOccurrence_min="6.0" TimeOfOccurrence_max="16.0" Length_min="3.5"
Length_max="5"
  Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
```

Za svaku ulaznu deonicu definisan je po jedan pseudo slučajni generator (element *ExternalSource*). Parametrima ovog elementa definišu se slučajne promenljive uniformne raspodele:

<b>Slučajna promenljiva uniformne raspodele</b> $X = U(a, b)$	<b>a</b>	<b>b</b>
--	----------	----------

$t_{next}$	TimeOfOccurrence_min	TimeOfOccurrence_max
$L$	Length_min	Length_max
$W$	Width_min	Width_max
$v$	Speed_min	Speed_max
$SRV$	SRV_min	SRV_max

Ako u trenutku  $t_0$  slučajne promenljive imaju vrednosti  $L(t_0)$ ,  $W(t_0)$ ,  $v(t_0)$  i  $SRV(t_0)$ , tada će se na ulazu posmatrane ulazne deonice u trenutku  $t_0 + t_{next}$  pojaviti vozilo koje će se kretati početnom brzinom  $v(t_0)$ , koje će imati dužinu  $L(t_0)$ , širinu  $W(t_0)$  i sposobnost reagovanja vozila  $SRV(t_0)$ .

Primer parametara sekvence su prikazani u izvodu iz konfiguracionog fajla simulacione aplikacije:

```
<Sequence Name="Sekvenca 1">
  <Vehicle Name="V1" InputDirectionName="I1" OutputDirectionName="O2" TimeOfOccurrence="0.9" Length="4"
  Width="1.9"
  Speed="45" SRV="0.5" />
  <Vehicle Name="V2" InputDirectionName="I3" OutputDirectionName="O2" TimeOfOccurrence="0.9" Length="4"
  Width="1.9"
  Speed="45" SRV="0.5" />
  <Vehicle Name="V3" InputDirectionName="I4" OutputDirectionName="O2" TimeOfOccurrence="1.9" Length="4"
  Width="1.9"
  Speed="45" SRV="0.5" />
</Sequence>
```

Svako vozilo sekvence definiše se u posebnim elementom tipa *Vehicle*. Tako, prema primeru prikazanom u izvodu iz konfiguracionog fajla, vozilo V2 će se pojaviti na ulazu deonice I1 u trenutku  $t = 0.9$  sec . Vozilo će se kretati brzinom 45 km/h, imaće dužinu 4 m, širinu 1.9 m i sposobnost reagovanja vozila 0.5.

### 5.1.2. Usporavanje vozila

U svakom ciklusu simulatora određuje se naredna pozicija svakog vozila u saobraćajnoj lokaciji. Sa jedne strane naredna pozicija vozila zavisi od prethodnog položaja i brzine samog vozila, a sa druge strane naredna pozicija vozila zavisi od stanja na saobraćajnoj lokaciji u okolini samog vozila, tj. da li se u blizini posmatranog vozila nalazi neko drugo vozilo. Pored toga i sam sistem za izbegavanje konfliktnih situacija ispisuje poruke obaveštenja koje dodatno utiču na ponašanje vozila i njegovu narednu poziciju.

U realnosti korekciju brzine kretanja vozila vrši vozač na osnovu njegove percepcije trenutnog stanja na lokaciji. Vozač na osnovu svog opažanja koriguje kretanje vozila u cilju izbegavanja sudar sa vozilima koja se kreću sporije ispred njegovog vozila ili izbegavanja sudar sa vozilima koja se kreću iz drugih pravaca. U slučaju da ispred ili sa strane nema vozila u blizini vrlo verovatno vozač neće mnogo menjati u načinu kretanja vozila. Ipak, u slučaju prisustva drugog vozila u blizini ili prisustva obaveštenja o potrebi usporjenja kretanja vozač će pokušati vozilo da uspori ili čak zaustavi.

U skladu sa prethodno navedenim, u okviru simulatora, realizovan je model usporavanja vozila. Ovaj model, u stvari, predstavlja zavisnost promene brzine od rastojanja najbližeg potencijalno konfliktnog vozila:

$$\Delta v(k) = v(k) - v(k-1) = \begin{cases} \frac{\Delta v_{\max}}{d_{th}} \cdot d(k) - \Delta v_{\max} & d(k) \leq d_{th} \\ 0 & d(k) > d_{th} \end{cases} \quad (5.1)$$

gde je sa  $d(t)$  označeno rastojanje najbližeg potencijalno konfliktnog vozila, a sa  $\Delta v_{\max}$  i  $d_{th}$  zavisni parametri od vrednosti SRV i sadržaja obaveštajne poruke:

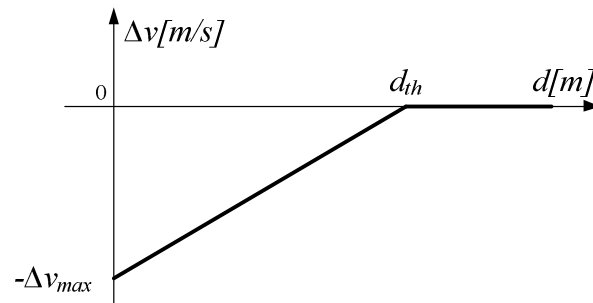
$$\begin{aligned} \Delta v_{\max} &= SRV \cdot (\Delta v_{\max}^b - \Delta v_{\max}^a) + \Delta v_{\max}^a + k^N \cdot \Delta v_{\max}^{step} \\ d_{th} &= SRV \cdot (d_{th}^b - d_{th}^a) + d_{th}^a + k^N \cdot d_{th}^{step} \end{aligned} \quad (5.2)$$

u kojima konstante imaju vrednosti:

$$\begin{aligned} [\Delta v_{\max}^a, \Delta v_{\max}^b, \Delta v_{\max}^{step}] &= [5, 10, 5] \frac{m}{s} \\ [d_{th}^a, d_{th}^b, d_{th}^{step}] &= [6, 8, 2] m \end{aligned} \quad (5.3)$$

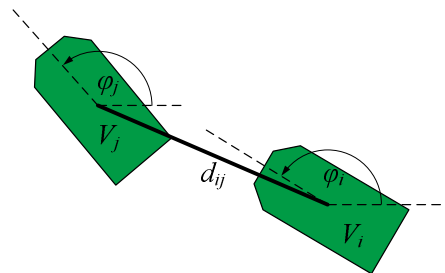
Vrednost  $k^N$  zavisi od nivoa opasnosti obaveštajne poruke:

$$k^N = \begin{cases} 1 & \text{nivo} = 3 \\ 2 & \text{nivo} = 4 \\ 0 & \text{nivo} = 1, 2 \end{cases} \quad (5.4)$$



Sl. 5.1 – Zavisnost promene brzine od rastojanja najbližeg potencijalno konfliktnog vozila

Bukvalna primena ovakvog modela, koji uvažava samo rastojanje između dva vozila, uslovlila bi usporavanje vozila zbog prisustva drugog vozila neposredno iza njega. Da bi se ovaj efekat izbegao, uvedeno je dodatno razmatranje i orijentacija vozila. Drugim rečima tretiraju se samo vozila koja se nalaze uslovno rečeno „ispred“ posmatranog vozila.



Sl. 5.2 – Pravci kretanja i razdaljina dva vozila



Da bi vozilo  $V_j$  ušlo u razmatranje potrebno je da zadovoljava uslov:

$$|\varphi_j - \varphi_i| < \varphi_{th} \quad (5.5)$$

gde je za granični ugao usvojena vrednost  $\varphi_{th} = 75^\circ$ .

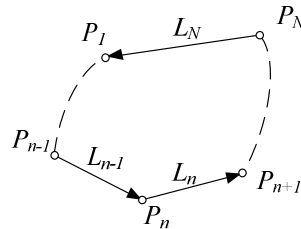
Drugim rečima, za vrednost  $d$ , u izrazu (6.1), usvaja se minimalna vrednost rastojanja dva vozila za koja je zadovoljena relacija:

$$d = \min(d_{ij})_{\forall i,j} \quad \text{gde je} \quad |\varphi_j - \varphi_i| < \varphi_{th} \quad (5.6)$$

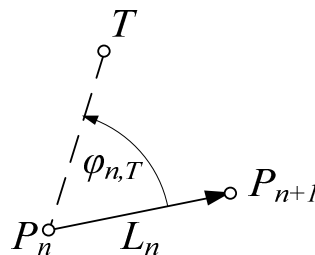
### 5.1.3. Poligon

U realizaciji simulatora, pored ostalih funkcionalnosti, potrebno je obezbediti mogućnost određivanja konflikta dva vozila. Ukoliko se spoljne konture vozila tretiraju kao izlomljene zatvorene linije (poligoni) onda se detekcija sudara dva vozila svodi na ispitivanje da li ima preklapanja te dve izlomljene zatvorene linije. Iz tog razloga definisan je pojam poligona.

Takođe, pojam poligona i njegova realizacija se koriste i u implementaciji aplikacije „Centralni kontroler“. Naime, kada centralni kontroler generiše obaveštajnu poruku potrebno je tu poruku ispisati na nekom od obaveštajnih panela iz niza obaveštajnih panela ulazne deonice. U tu svrhu svaka zona obaveštajnog panela se definiše kao poligon, a panel na koji će poruka biti ispisana se određuje na osnovu pripadnosti trenutne pozicije vozila odgovarajućem poligonu.



Sl. 5.3 – Definicija poligona



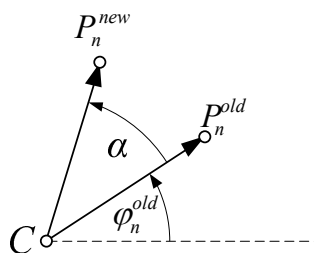
Sl. 5.4 – Određivanje položaja tačke u odnosu na poligon

Ugao između tačke  $T$  i segmenta poligona  $L_n$  se može odrediti primenom izraza:

$$\varphi_{n,T} = \arctan\left(\frac{y_T - y_{P_n}}{x_T - x_{P_n}}\right) - \arctan\left(\frac{y_{P_{n+1}} - y_{P_n}}{x_{P_{n+1}} - x_{P_n}}\right) \quad (5.7)$$

Tada se uslov pripadnosti tačke poligonu svodi na:

$$\text{If } 0 < \varphi_{n,T} < \pi \text{ for } \forall 1 \leq n \leq N \text{ then } (T \text{ is in polygon}) \quad (5.8)$$



Sl. 5.5 – Rotacija poligona oko tačke za određeni ugao

Rotacijom poligona oko tačke  $C$  za ugao  $\alpha$  dobijaju se nove tačke poligona sa koordinatama:

$$\varphi_n^{new} = \alpha + \arctan\left(\frac{y_n^{old} - y_C}{x_n^{old} - x_C}\right) \quad (5.9)$$

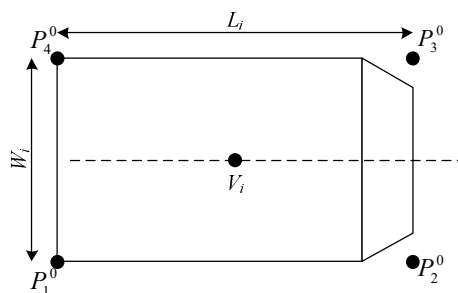
$$r_n = \sqrt{(y_n^{old} - y_C)^2 + (x_n^{old} - x_C)^2} \quad (5.10)$$

$$x_n^{new} = x_C + r_n \cdot \cos(\varphi_n^{new}) \quad (5.11)$$

$$y_n^{new} = y_C + r_n \cdot \sin(\varphi_n^{new}) \quad (5.12)$$

#### 5.1.4. Položaj vozila

Polazni položaj vozila  $V_i$  je definisan kao četvorougao (pravougaonik) čiji se centar nalazi u tački trenutne pozicije vozila  $V_i$ , a veličina pravougla je određena dužinom  $L_i$  i širinom  $W_i$  vozila.



Sl. 5.6 – Polazni položaj vozila bez izvršene rotacije

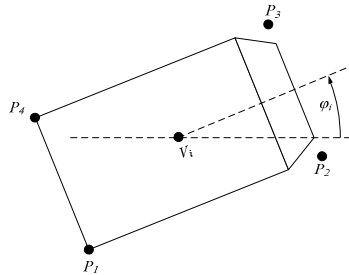
$$P_1 = (x_1, y_1) = \left( x_i - \frac{L_i}{2}, y_i - \frac{W_i}{2} \right) \quad (5.13)$$

$$P_2 = (x_2, y_2) = \left( x_i + \frac{L_i}{2}, y_i - \frac{W_i}{2} \right) \quad (5.14)$$

$$P_3 = (x_3, y_3) = \left( x_i + \frac{L_i}{2}, y_i + \frac{W_i}{2} \right) \quad (5.15)$$

$$P_4 = (x_4, y_4) = \left( x_i - \frac{L_i}{2}, y_i + \frac{W_i}{2} \right) \quad (5.16)$$

Do položaja vozila se dolazi rotiranjem polaznog poligona za ugao  $\varphi_i$ .

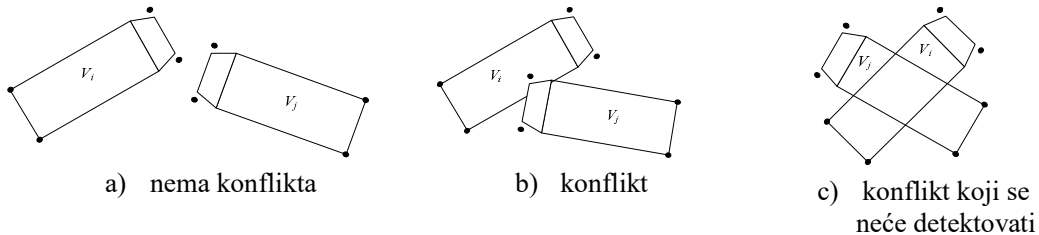


Sl. 5.7 – Trenutni položaj vozila

### 5.1.5. Konflikt i izbegnuti konflikt

Detekcija konflikta dva vozila  $V_i$  i  $V_j$  se vrši na osnovu položaja poligolana tih vozila. Dva vozila su u konfliktu ukoliko se bilo koja tačka prvog poligona nalazi u drugom poligonu ili ukoliko se bilo koja tačka drugog poligona nalazi u prvom poligonu:

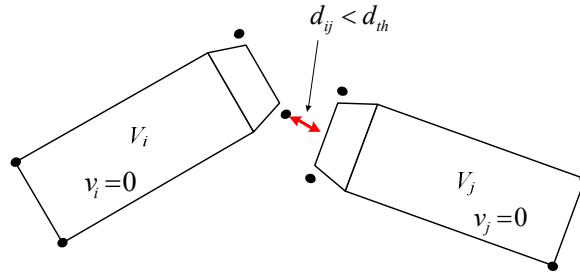
$$\text{If } \bigvee_{n=1}^4 P_i^n \in P_j \vee \bigvee_{m=1}^4 P_j^m \in P_i \text{ then } (V_i, V_j \text{ are in conflict}) \quad (5.17)$$



Sl. 5.8 – Situacije međusobnih položaja dva vozila

**Napomena:** primenom ovog metoda u slučaju prikazanom na Sl. 5.8c neće biti registrovan sudar dva vozila. U realnosti se ovakav slučaj neće dogoditi jer ovoj situaciji prethode konfliktne situacije koje će ova metoda registrovati kao sudar. Ova činjenica opravdava primenu ove metode jer je ona „malo“ zahtevna po pitanju zauzeća procesorskog vremena.

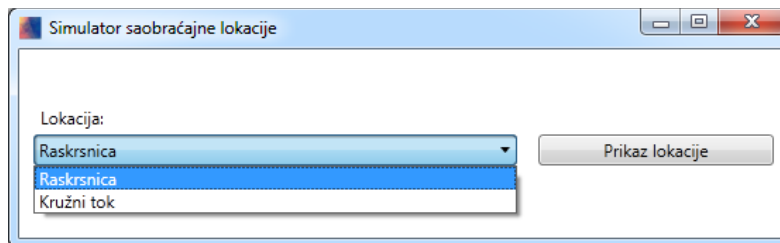
Izbegnuti konflikt je prikazan na Sl. 5.9 i odgovara situaciji kada su dva vozila zaustavljena ( $v_i = 0$  i  $v_j = 0$ ), a rastojanje između njih je manje od vrednosti praga  $d_{ij} < d_{th}$ . Za vrednost praga je usvojena  $d_{th} = 1m$ .



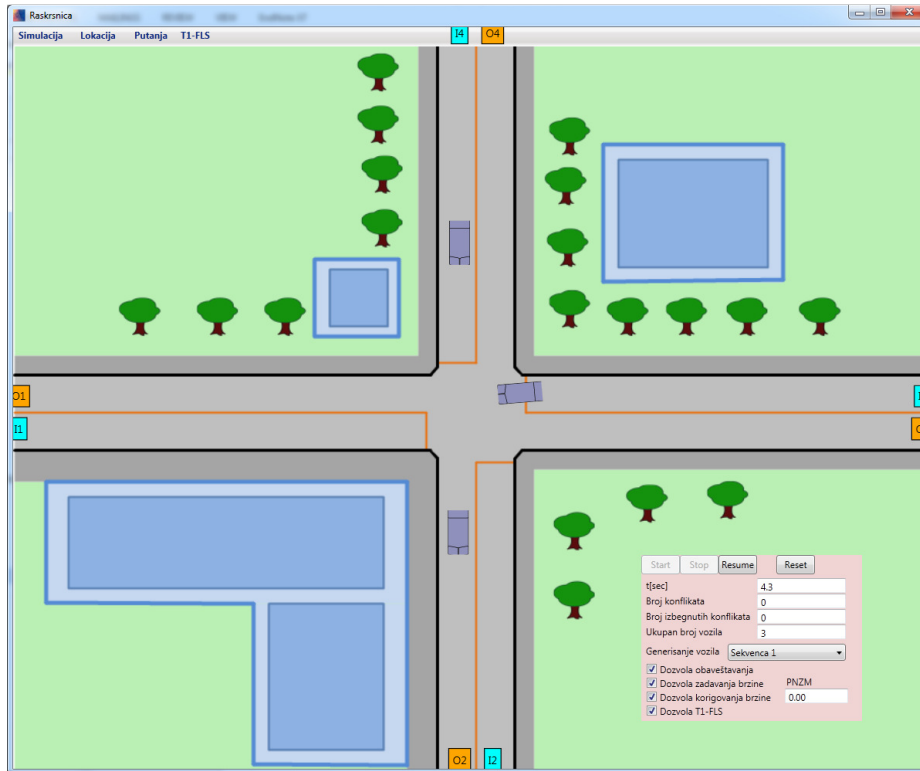
Sl. 5.9 – Izbegnuti konflikt

## 5.2. Simulaciona aplikacija

Pokretanjem simulacione aplikacije otvara se polazni prozor u kome se bira tip saobraćajne lokacije koja će biti prikazana Sl. 5.10. Izborom opcije „Prikaz lokacije“ otvara se prozor za prikaz izabrane lokacije (raskrsnica Sl. 5.11 ili kružni tok Sl. 5.12).



Sl. 5.10 – Polazni prozor

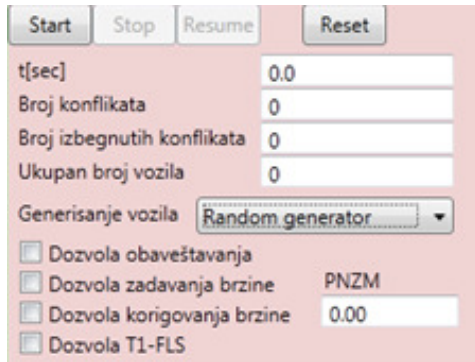


Sl. 5.11 – Prozor za prikaz saobraćajne lokacije tipa raskrsnica

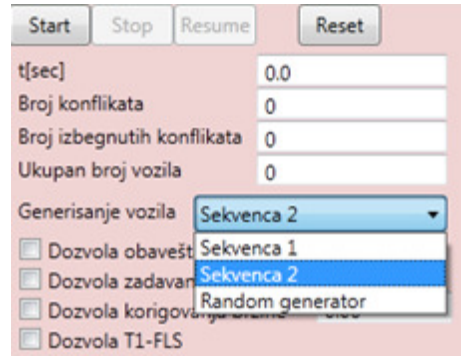


Sl. 5.12 – Prozor za prikaz saobraćajne lokacije tipa kružni tok

U okviru prozora za prikaz saobraćajne lokacije nalazi se simulacioni panel (Sl. 5.13) pomoću koga se upravlja simulacijom i u kome se prikazuje trenutna statistika. U okviru simulacionog panela vrši se i izbor generatora vozila iz padajuće liste.



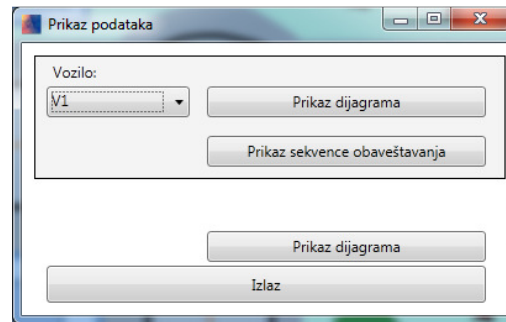
a) izgled



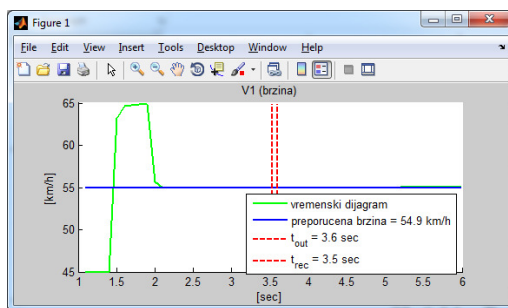
b) padajuća lista za izbor generatora vozila

Sl. 5.13 – Simulacioni panel

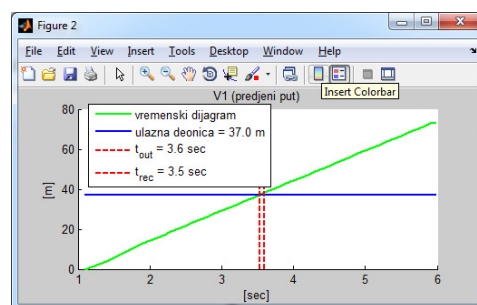
Izborom opcije „Simulacija->Prikaz podataka“, iz prozora za prikaz saobraćajne lokacije, prikazuje se prozor za izbor tipa prikaza podataka (Sl. 5.14). U okviru ovog prozora moguće je izabrati prikaz dijagrama i izveštaja vezanih za pojedinačno vozilo (Sl. 5.15) ili dijagrame vezane za celokupnu saobraćajnu lokaciju (Sl. 5.16). Vremenski dijagrami i histogram se prikazuju u okviru Matlab figura.



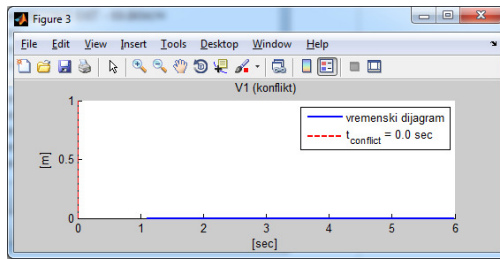
Sl. 5.14 – Prozor za izbor tipa prikaza podataka



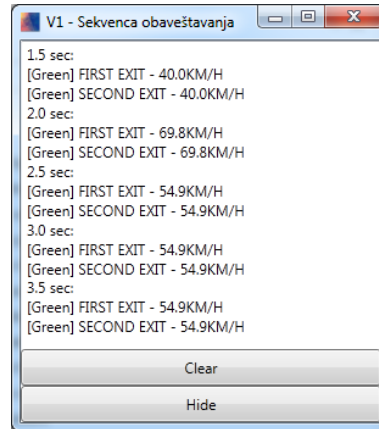
a) vremenski dijagram brzine



b) vremenski dijagram pređenog puta

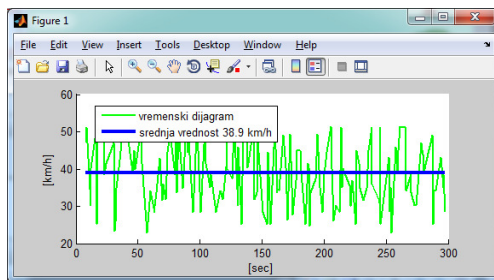


c) vremenski dijagram konflikta

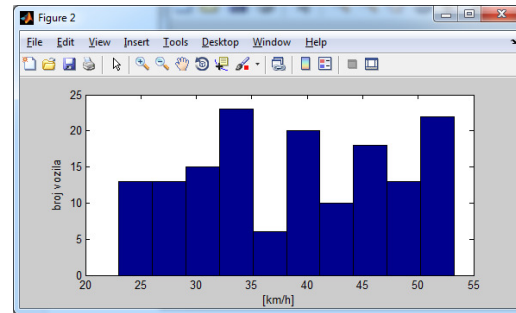


d) sekvenca obaveštavanja

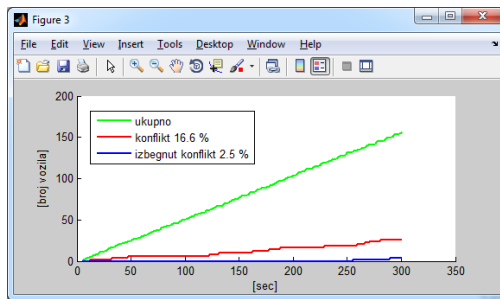
Sl. 5.15 – Dijagrami i izveštaji vezani za pojedinačno vozilo



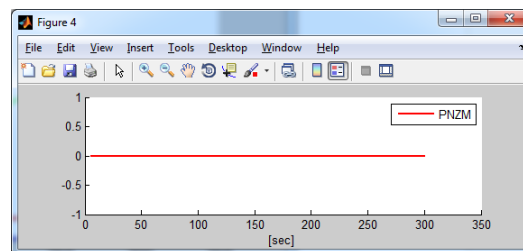
a) vremenski dijagram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici



b) histogram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici



c) vremenski dijagram ukupnog broja vozila, broja konflikata i izbegnutih konflikata



d) vremenski dijagram vrednosti PNZM

Sl. 5.16 – Dijagrami vezani za celokupnu saobraćajnu lokaciju

Svi podaci o saobraćajnoj lokaciji (ime, dimenzije, pozadinska slika ...) i podaci o elementima koji definišu saobraćajnu lokaciju (ulazne i izlazne deonice, putanje, sekvence, pseudo-slučajni generatori ...) su definisani u konfiguracionom fajlu. Konfiguracioni fajl je tekstualni fajl u kome su podaci organizovani hierarhiski i prikazani u XML (eXtensible Markup Language) formatu.

## Sadržaj konfiguracionog fajla kome su izbačeni elementi nižeg hierarhiskog nivoa:

```

<root>
  <Location Name="Raskrsnica" Picture="intersection.png" Width="1200" Height="1000" X_max="84" Y_max="70">
    <Sequence Name="Sekvenca 1">...</Sequence>
    <Sequence Name="Sekvenca 2">...</Sequence>
    <CrossingZone>...</CrossingZone>
    <ExternalSource Name="I1" TimeOfOccurrence_min="5.0" TimeOfOccurrence_max="10.0" Length_min="3.5"
    Length_max="5"
      Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
    <ExternalSource Name="I2" TimeOfOccurrence_min="5.0" TimeOfOccurrence_max="10.0" Length_min="3.5"
    Length_max="5"
      Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
    <ExternalSource Name="I3" TimeOfOccurrence_min="5.0" TimeOfOccurrence_max="10.0" Length_min="3.5"
    Length_max="5"
      Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
    <ExternalSource Name="I4" TimeOfOccurrence_min="5.0" TimeOfOccurrence_max="10.0" Length_min="3.5"
    Length_max="5"
      Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
    <Direction Name="I1" Type="Input" X="0.5" Y="33.5" DesiredSpeed="55">...</Direction>
    <Direction Name="I2" Type="Input" X="43.5" Y="3.5" DesiredSpeed="55">...</Direction>
    <Direction Name="I3" Type="Input" X="82.5" Y="36.5" DesiredSpeed="55">...</Direction>
    <Direction Name="I4" Type="Input" X="40.5" Y="69.5" DesiredSpeed="55">...</Direction>
    <Direction Name="O1" Type="Output" X="0.5" Y="36.5" RecommendedSpeed="55">...</Direction>
    <Direction Name="O2" Type="Output" X="40.5" Y="3.5" RecommendedSpeed="55">...</Direction>
    <Direction Name="O3" Type="Output" X="82.5" Y="33.5" RecommendedSpeed="55">...</Direction>
    <Direction Name="O4" Type="Output" X="43.5" Y="69.5" RecommendedSpeed="55">...</Direction>
    <Path Name="I1_O2" InputDirectionName="I1" OutputDirectionName="O2" ExitName="RIGHT">...</Path>
    <Path Name="I1_O3" InputDirectionName="I1" OutputDirectionName="O3" ExitName="STRAIGHT">...</Path>
    <Path Name="I1_O4" InputDirectionName="I1" OutputDirectionName="O4" ExitName="LEFT">...</Path>
    <Path Name="I2_O1" InputDirectionName="I2" OutputDirectionName="O1" ExitName="LEFT">...</Path>
    <Path Name="I2_O3" InputDirectionName="I2" OutputDirectionName="O3" ExitName="RIGHT">...</Path>
    <Path Name="I2_O4" InputDirectionName="I2" OutputDirectionName="O4" ExitName="STRAIGHT">...</Path>
    <Path Name="I3_O1" InputDirectionName="I3" OutputDirectionName="O1" ExitName="STRAIGHT">...</Path>
    <Path Name="I3_O2" InputDirectionName="I3" OutputDirectionName="O2" ExitName="LEFT">...</Path>
    <Path Name="I3_O4" InputDirectionName="I3" OutputDirectionName="O4" ExitName="RIGHT">...</Path>
    <Path Name="I4_O1" InputDirectionName="I4" OutputDirectionName="O1" ExitName="RIGHT">...</Path>
    <Path Name="I4_O2" InputDirectionName="I4" OutputDirectionName="O2" ExitName="STRAIGHT">...</Path>
    <Path Name="I4_O3" InputDirectionName="I4" OutputDirectionName="O3" ExitName="LEFT">...</Path>
  </Location>
  <Location Name="Kružni tok" Picture="roundabout.png" Width="1200" Height="700" X_max="84" Y_max="49">
    <Sequence Name="Sekvenca 1">...</Sequence>
    <CrossingZone>...</CrossingZone>
    <ExternalSource Name="I1" TimeOfOccurrence_min="4" TimeOfOccurrence_max="8" Length_min="3.5" Length_max="5"
      Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.9" SRV_max="0.91" />
    <ExternalSource Name="I2" TimeOfOccurrence_min="4" TimeOfOccurrence_max="8" Length_min="3.5" Length_max="5"
      Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.9" SRV_max="0.91" />
    <ExternalSource Name="I3" TimeOfOccurrence_min="4" TimeOfOccurrence_max="8" Length_min="3.5" Length_max="5"
      Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.9" SRV_max="0.91" />
    <Direction Name="I1" Type="Input" X="0.5" Y="33.5" DesiredSpeed="55">...</Direction>
    <Direction Name="I2" Type="Input" X="43.5" Y="3.5" DesiredSpeed="55">...</Direction>
    <Direction Name="I3" Type="Input" X="82.5" Y="36.5" DesiredSpeed="55">...</Direction>
    <Direction Name="O1" Type="Output" X="0.5" Y="36.5" RecommendedSpeed="55">...</Direction>
    <Direction Name="O2" Type="Output" X="40.5" Y="3.5" RecommendedSpeed="55">...</Direction>
    <Direction Name="O3" Type="Output" X="82.5" Y="33.5" RecommendedSpeed="55">...</Direction>
    <Path Name="I1_O2" InputDirectionName="I1" OutputDirectionName="O2" ExitName="FIRST EXIT">...</Path>
    <Path Name="I1_O3" InputDirectionName="I1" OutputDirectionName="O3" ExitName="SECOND EXIT">...</Path>
    <Path Name="I2_O1" InputDirectionName="I2" OutputDirectionName="O1" ExitName="SECOND EXIT">...</Path>
    <Path Name="I2_O3" InputDirectionName="I2" OutputDirectionName="O3" ExitName="FIRST EXIT">...</Path>
    <Path Name="I3_O1" InputDirectionName="I3" OutputDirectionName="O1" ExitName="FIRST EXIT">...</Path>
    <Path Name="I3_O2" InputDirectionName="I3" OutputDirectionName="O2" ExitName="SECOND EXIT">...</Path>
  </Location>
</root>

```



### 5.3. Rezultati simulacija

Višestrukim simulacijama pod različitim uslovima i sa različitim vrednostima parametara pokušao je prikaz svrsishodnosti i efikasnosti inteligentnog sistema za upravljanje saobraćajem u izbegavanju konfliktnih situacija na raskrscima bez svetlosne signalizacije i kružnim tokovima. Simulacije su organizovane prema scenarijima u kojima je pokušao prikaz načina funkcionisanja pojedinih elemenata sistema. Prvenstveno scenariji su podeljeni u dve grupe. U prvu grupu spadaju scenariji koji služe za posmatranje ponašanja sistema u odnosu na sva vozila koja su se nalazila u saobraćajnoj lokaciji u toku simulacije, dok u drugu grupu scenarija spadaju oni koji prevashodno služe za posmatranje ponašanja sistema u odnosu na pojedinačna vozila.

#### 5.3.1. Srednja brzina vozila u ulaznoj deonici

U ovim simulacijama prvenstveni cilj je prikaz statističkih podataka vezanih za kretanje vozila u ulaznim deonicama. Simulacije će biti izvršene za slučaj saobraćajne lokacije tipa raskrsnica i kružni tok.

##### 5.3.1.1. Raskrsnica

U svim scenarijima koristi se pseudo-slučajni generator za generisanje vozila koja ulaze u saobraćajnu lokaciju sa istim parametrima. Parametri pseudo-slučajnog generatora su prikazani u izvodu iz konfiguracionog fajla:

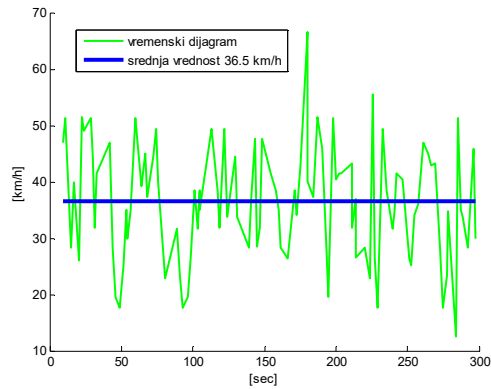
```
<ExternalSource Name="I1" TimeOfOccurrence_min="6.0" TimeOfOccurrence_max="16.0" Length_min="3.5"
Length_max="5"
  Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
<ExternalSource Name="I2" TimeOfOccurrence_min="6.0" TimeOfOccurrence_max="16.0" Length_min="3.5"
Length_max="5"
  Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
<ExternalSource Name="I3" TimeOfOccurrence_min="6.0" TimeOfOccurrence_max="16.0" Length_min="3.5"
Length_max="5"
  Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
<ExternalSource Name="I4" TimeOfOccurrence_min="6.0" TimeOfOccurrence_max="16.0" Length_min="3.5"
Length_max="5"
  Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
```

dok su zadate brzine nadređenog sistema definisane u elementima za definisanje ulaznih deonica konfiguracionog fajla (DesiredSpeed):

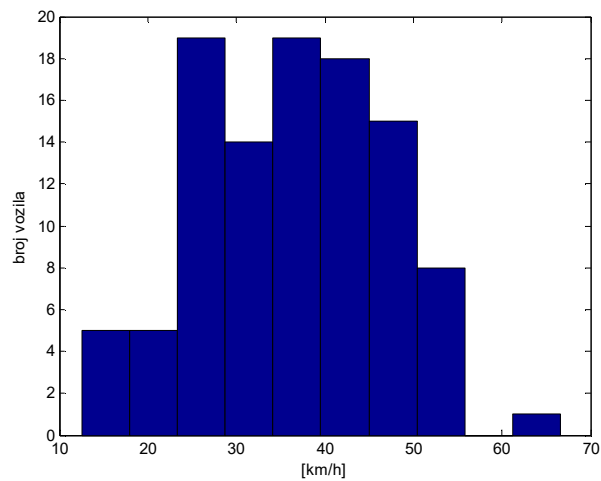
```
<Direction Name="I1" Type="Input" X="0.5" Y="33.5" DesiredSpeed="55"> ... </Direction>
<Direction Name="I2" Type="Input" X="43.5" Y="3.5" DesiredSpeed="55"> ... </Direction>
<Direction Name="I3" Type="Input" X="82.5" Y="36.5" DesiredSpeed="55"> ... </Direction>
<Direction Name="I4" Type="Input" X="40.5" Y="69.5" DesiredSpeed="55"> ... </Direction>
```

#### **Scenario 1:**

U ovom senariju korišćena je strategija za određivanje preporučene brzine prema početnoj brzini vozila.



Sl. 5.17 – Vremenski dijagram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici



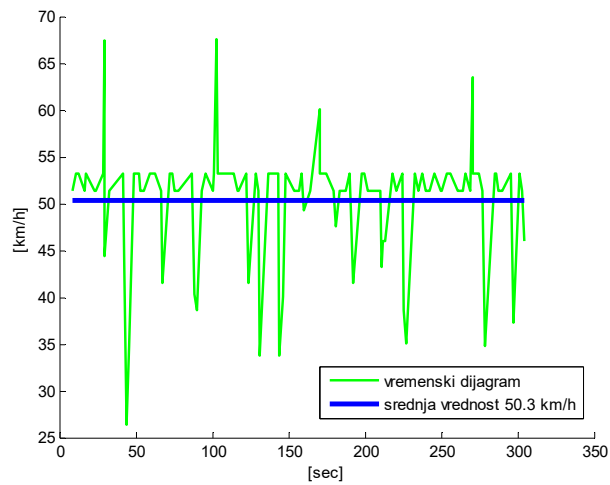
Sl. 5.18 – Histogram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici

Simulaciona statistika:

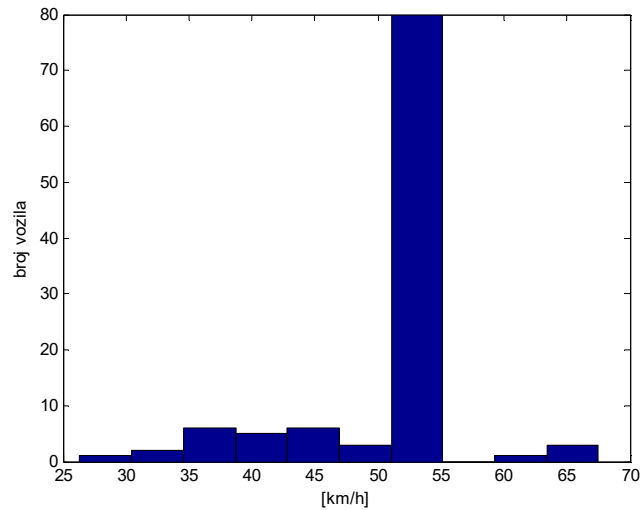
Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	0	0 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %
Ukupno vozila	107	
Trajanje simulacije	302.1 sec	
Prosečna brzina	36.5 km/h	

### Scenario 2:

U ovom scenariju korišćena je strategija za određivanje preporučene brzine prema zadatoj brzini od strane nadređenog sistema.



Sl. 5.19 – Vremenski dijagram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici



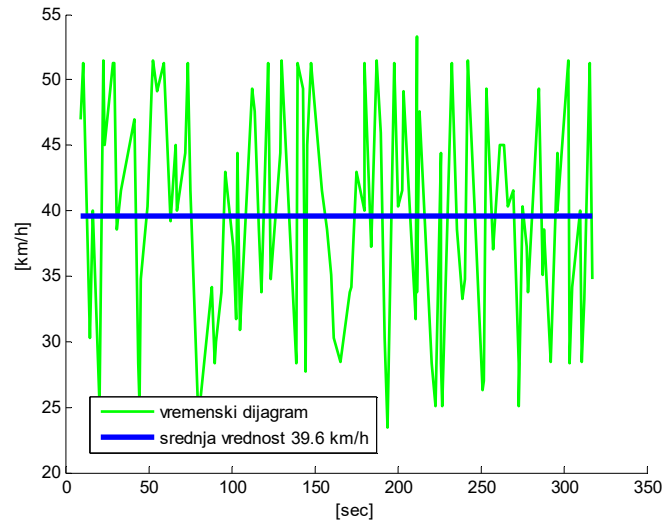
Sl. 5.20 – Histogram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici

Simulaciona statistika:

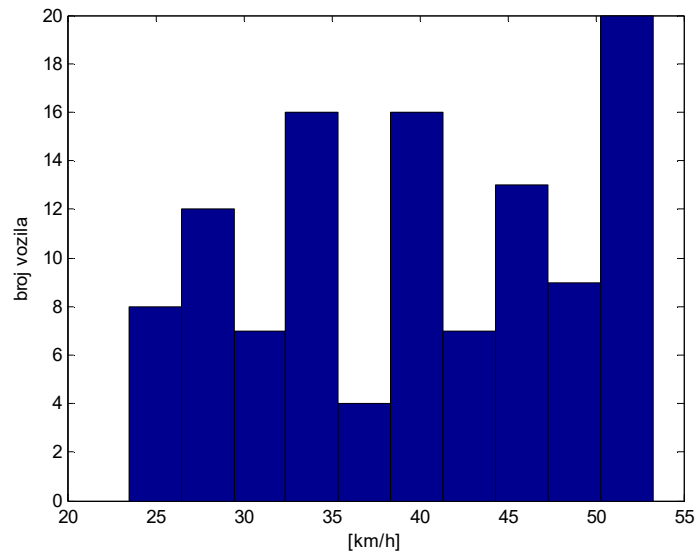
Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	0	0
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0
Ukupno vozila	109	
Trajanje simulacije	307.8 sec	
Prosečna brzina	50.3 km/h	

### **Scenario 3:**

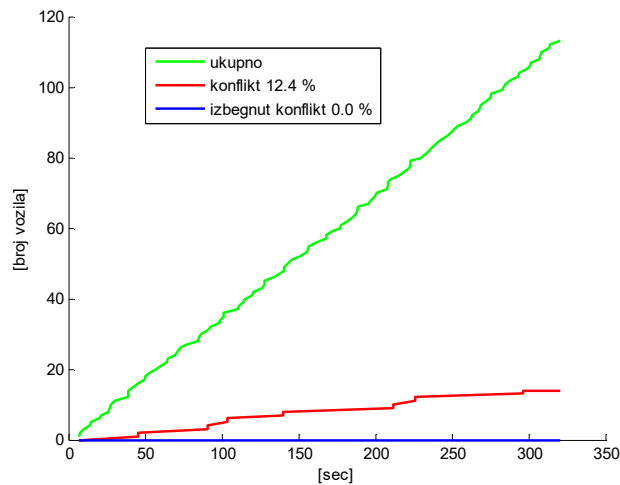
U ovom scenariju posmatrana je raskrsnica bez obaveštavanja, tj. raskrsnica bez aktiviranog sistema za izbegavanje konfliktnih situacija.



Sl. 5.21 – Vremenski dijagram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici



Sl. 5.22 – Histogram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici



Sl. 5.23 – Vremenski dijagram broja vozila u raskrsnici

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	14	12.4 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %
Ukupno vozila	113	
Trajanje simulacije	320.8 sec	
Prosečna brzina	39.6 km/h	

### **Komentar:**

Kao rezultat simulacija, primenom prva dva scenarija, dobija se potpuno izbegavanje konflikata. Primenom trećeg scenarija, pri zadatim parametrima i definisanom modelu ponašanja vozila, dobija se dosta veliki broj konflikata. Na osnovu toga, može se primetiti da primenom sistema uspešno se ostvaruje njegova osnovna uloga izbegavanja konflikata.

Posmatranjem rezultata simulacije, dobijenih primenom drugog scenarija, može se primetiti da je sistem u velikoj meri sposoban da odgovori zahtevu hierarhiski nadređenog sistema koji se ogleda u željenoj brzini kretanja kroz pojedine deonice. Naime, prosečna brzina kretanja je bila 50.3 km/h, što je znatno bliže zahtevanoj vrednosti od 55 km/h, u odnosu na prosečnu brzinu kretanja vozila 36.5 km/h koja je ostvarena primenom prvog scenarija u kome se ignoriše zahtev nadređenog sistema. Prosečna brzina dobijena primenom drugog scenarija nije još bliža zadatoj vrednosti iz razloga što sistem prvenstveno obezbeđuje uslove za izbegavanje konflikata, a tek potom da ispunjava zahteve nadređenog sistema.

### 5.3.1.2. Kružni tok

U svim scenarijima koristi se pseudo-slučajni generator za generisanje vozila koja ulaze u saobraćajnu lokaciju sa istim parametrima. Parametri pseudo-slučajnog generatora su prikazani u izvodu iz konfiguracionog fajla:

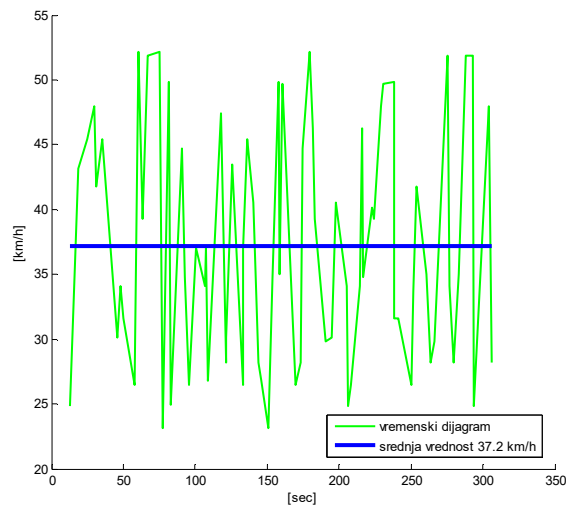
```
<ExternalSource Name="I1" TimeOfOccurrence_min="6" TimeOfOccurrence_max="16" Length_min="3.5" Length_max="5"
  Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
<ExternalSource Name="I2" TimeOfOccurrence_min="6" TimeOfOccurrence_max="16" Length_min="3.5" Length_max="5"
  Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
<ExternalSource Name="I3" TimeOfOccurrence_min="6" TimeOfOccurrence_max="16" Length_min="3.5" Length_max="5"
  Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="25" Speed_max="55" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
```

dok su zadate brzine nadređenog sistema definisane u elementima za definisanje ulaznih deonica konfiguracionog fajla (DesiredSpeed):

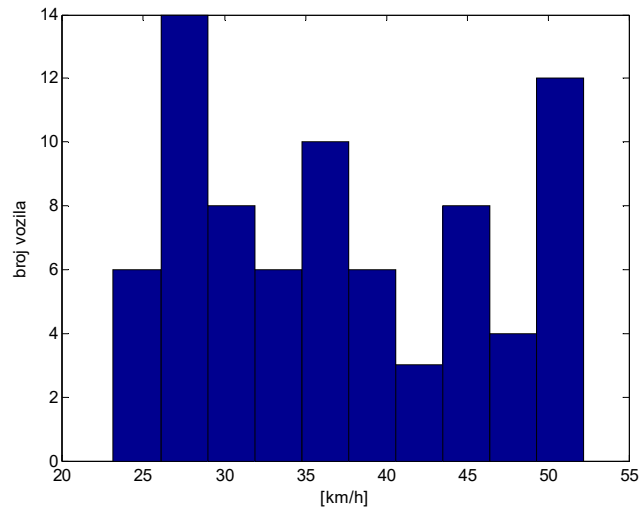
```
<Direction Name="I1" Type="Input" X="0.5" Y="33.5" DesiredSpeed="55"> ... </Direction>
<Direction Name="I2" Type="Input" X="43.5" Y="3.5" DesiredSpeed="55"> ... </Direction>
<Direction Name="I3" Type="Input" X="82.5" Y="36.5" DesiredSpeed="55"> ... </Direction>
```

#### Scenario 1:

U ovom senariju korišćena je strategija za određivanje preporučene brzine prema početnoj brzini vozila.



Sl. 5.24 – Vremenski dijagram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici



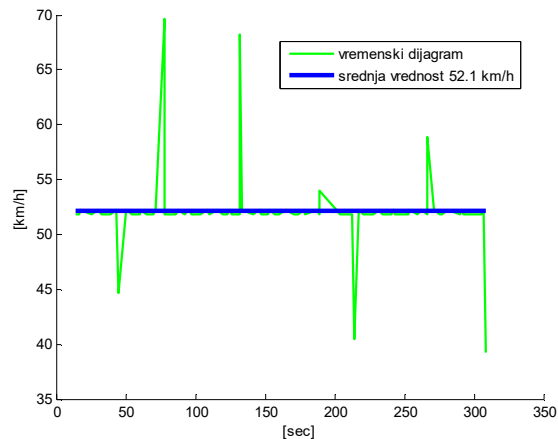
Sl. 5.25 – Histogram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici

Simulaciona statistika:

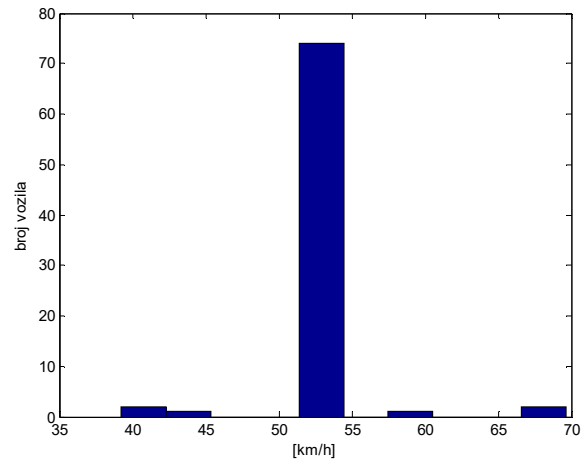
Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	0	0 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %
Ukupno vozila	78	
Trajanje simulacije	309.3 sec	
Prosečna brzina	37.2 km/h	

### Scenario 2:

U ovom scenariju korišćena je strategija za određivanje preporučene brzine prema zadatoj brzini od strane nadređenog sistema.



Sl. 5.26 – Vremenski dijagram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici



Sl. 5.27 – Histogram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici

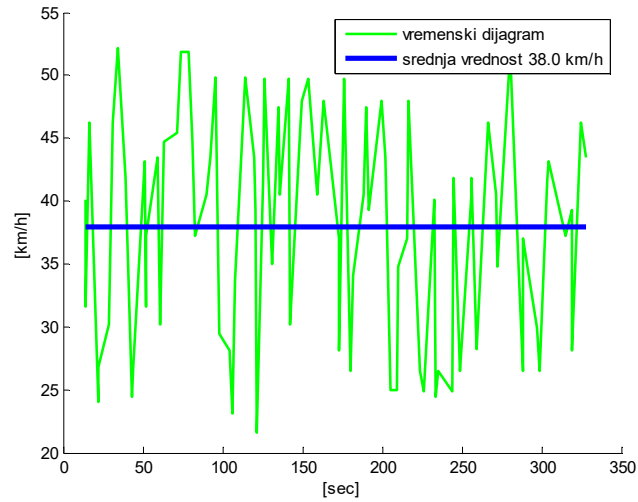
Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	0	0
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0
Ukupno vozila	80	
Trajanje simulacije	312.3 sec	
Prosečna brzina	52.1 km/h	

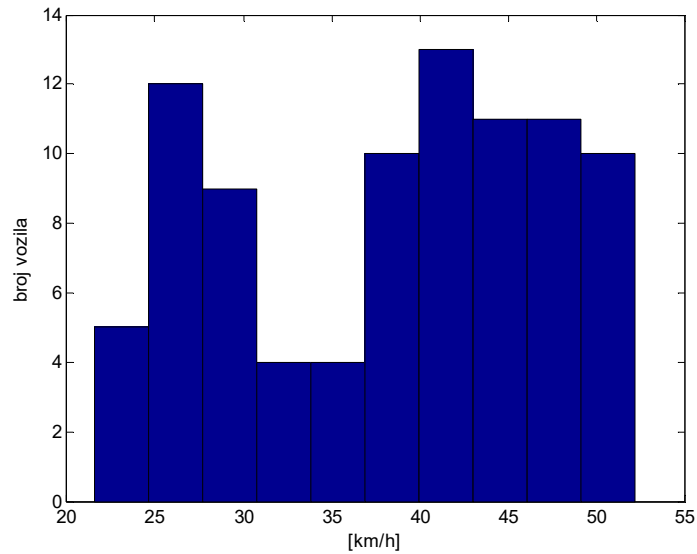


### **Scenario 3:**

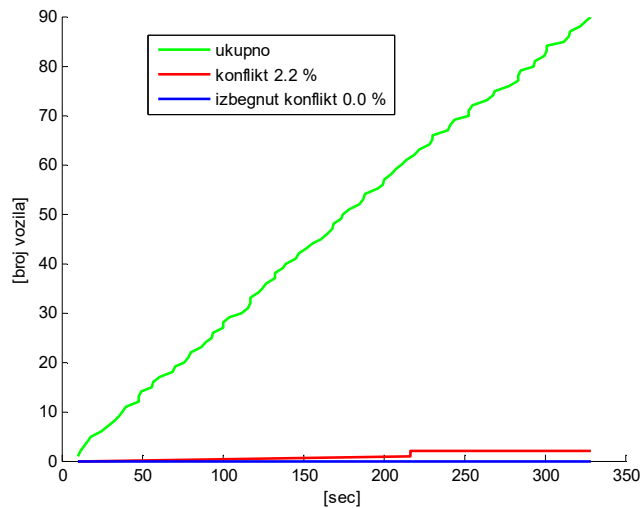
U ovom scenariju posmatran je kružni tok bez obaveštavanja, tj. raskrsnica bez aktiviranog sistema za izbegavanje konfliktnih situacija.



Sl. 5.28 – Vremenski dijagram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici



Sl. 5.29 – Histogram srednjih brzina vozila u ulaznoj deonici



Sl. 5.30 – Vremenski dijagram broja vozila u kružnom toku

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	2	2.2 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %
Ukupno vozila	90	
Trajanje simulacije	331.7 sec	
Prosečna brzina	38 km/h	

### **Komentar:**

Kao rezultat simulacija, primenom prva dva scenarija, dobija se potpuno izbegavanje konflikata. Primenom trećeg scenarija, pri zadatim parametrima i definisanom modelu ponašanja vozila, dobija se dosta veliki broj konflikata. Na osnovu toga, može se primetiti da primenom sistema uspešno se ostvaruje njegova osnovna uloga izbegavanja konflikata.

Posmatranjem rezultata simulacije, dobijenih primenom drugog scenarija, može se primetiti da je sistem u velikoj meri sposoban da odgovori zahtevu hierarhiskog nadređenog sistema koji se ogleda u željenoj brzini kretanja kroz pojedine deonice. Naime, prosečna brzina kretanja je bila 52.1 km/h, što je znatno bliže zahtevanoj vrednosti od 55 km/h, u odnosu na prosečnu brzinu kretanja vozila 37.2 km/h koja je ostvarena primenom prvog scenarija u kome se ignoriše zahtev nadređenog sistema. Prosečna brzina dobijena primenom drugog scenarija nije još bliža zadatoj vrednosti iz razloga što sistem prvenstveno obezbeđuje uslove za izbegavanje konflikata, a tek potom ispunjava zahteve nadređenog sistema.

### 5.3.2. Korigovanje brzine vozila u ulaznoj deonici

Ovim simulacijama prvenstveni cilj je prikaz kretanja vozila duž ulaznih deonica na koja sistem utiče preko obaveštajnih poruka kako bi korigovao njihove brzine u cilju izbegavanja konflikata. Simulacije su vršene za slučaj saobraćajne lokacije tipa raskrsnica i kružni tok.

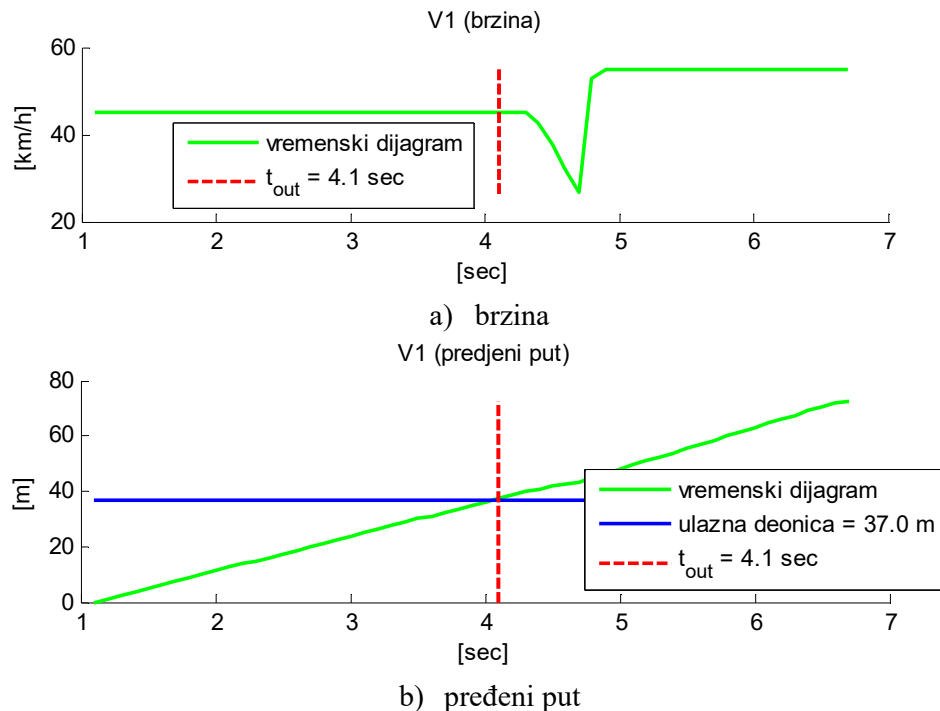
#### 5.3.2.1. Raskrsnica

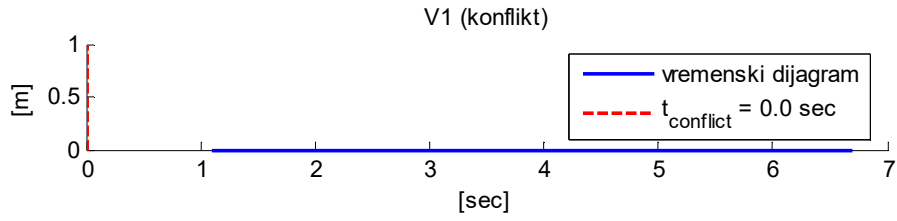
U oba scenarija korišćena je sekvenca za generisanje vozila koja ulaze u saobraćajnu lokaciju sa istim parametrima. Parametri sekvence prikazani su u izvodu iz konfiguracionog fajla:

```
<Sequence Name="Sekvenca 1">
  <Vehicle Name="V1" InputDirectionName="I1" OutputDirectionName="O2" TimeOfOccurrence="0.9" Length="4"
  Width="1.9" Speed="45" SRV="0.5" />
  <Vehicle Name="V2" InputDirectionName="I3" OutputDirectionName="O2" TimeOfOccurrence="0.9" Length="4"
  Width="1.9" Speed="45" SRV="0.5" />
  <Vehicle Name="V3" InputDirectionName="I4" OutputDirectionName="O2" TimeOfOccurrence="1.9" Length="4"
  Width="1.9" Speed="45" SRV="0.5" />
</Sequence>
```

#### Scenario 1:

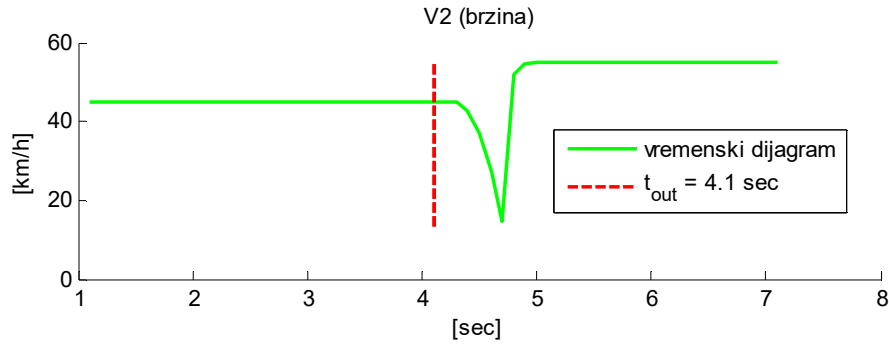
U ovom scenariju posmatrana je raskrsnica bez obaveštavanja, tj. raskrsnica bez aktiviranog sistema za izbegavanje konfliktnih situacija.



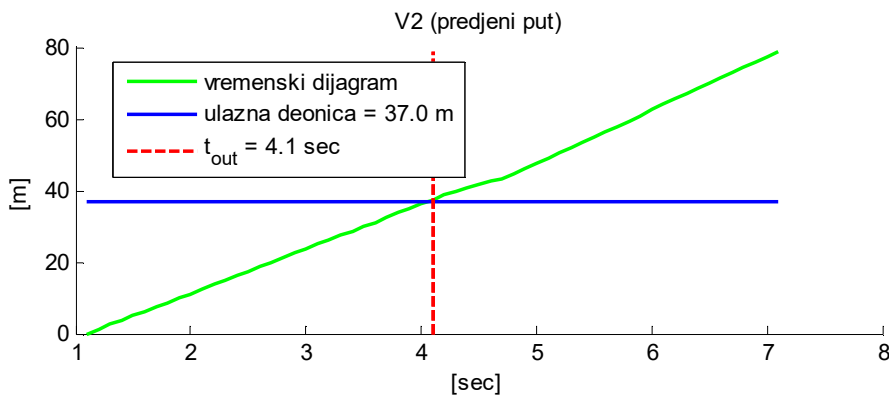


c) konflikt

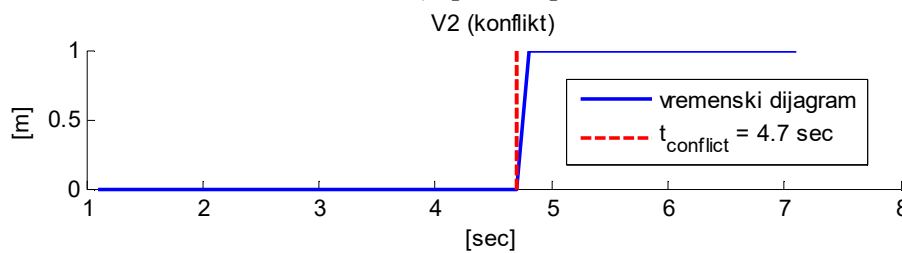
Sl. 5.31 – Dijagrami vozila V1



a) brzina

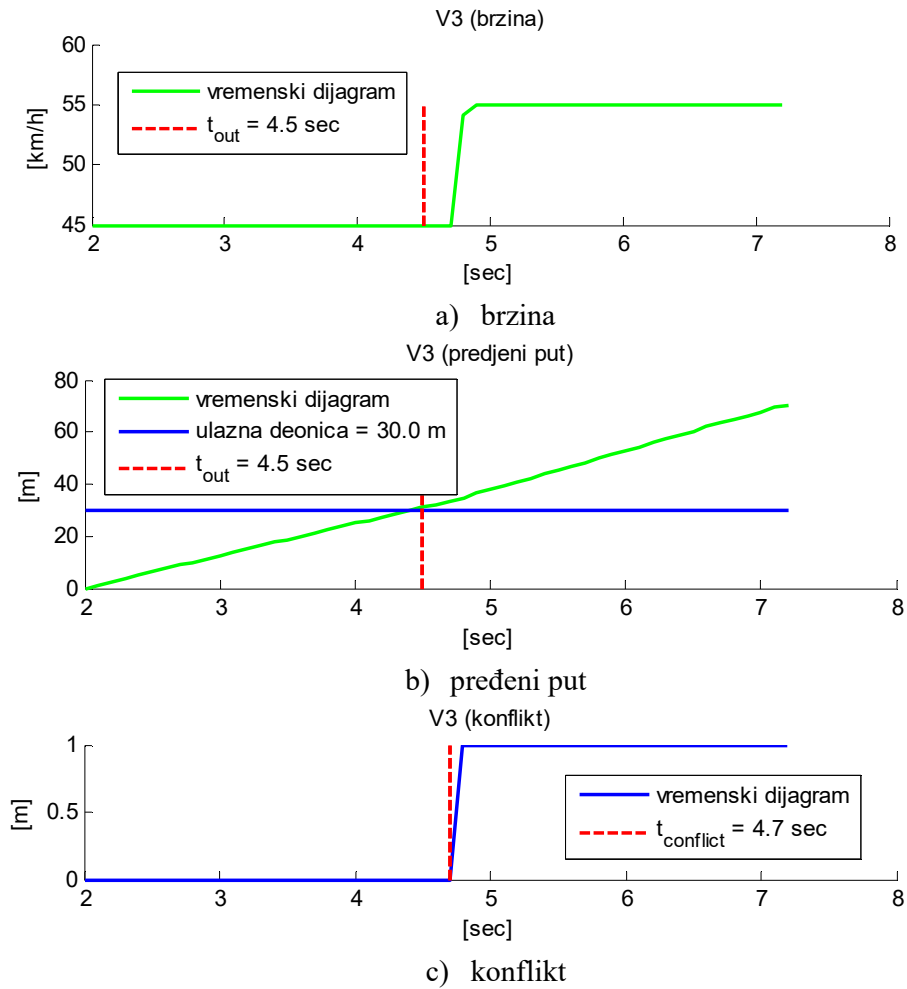


b) pređeni put



c) konflikt

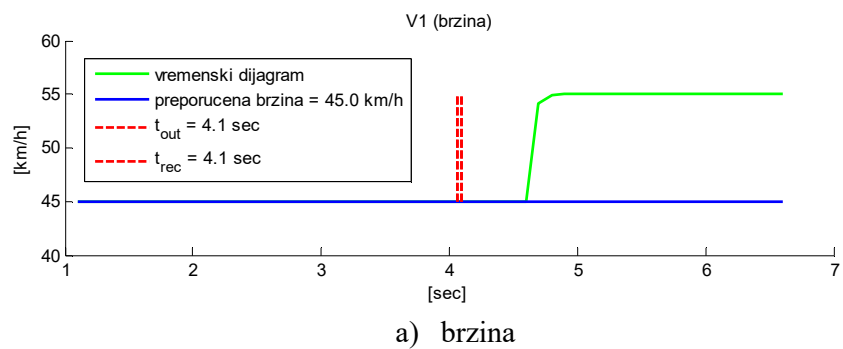
Sl. 5.32 – Dijagrami vozila V2

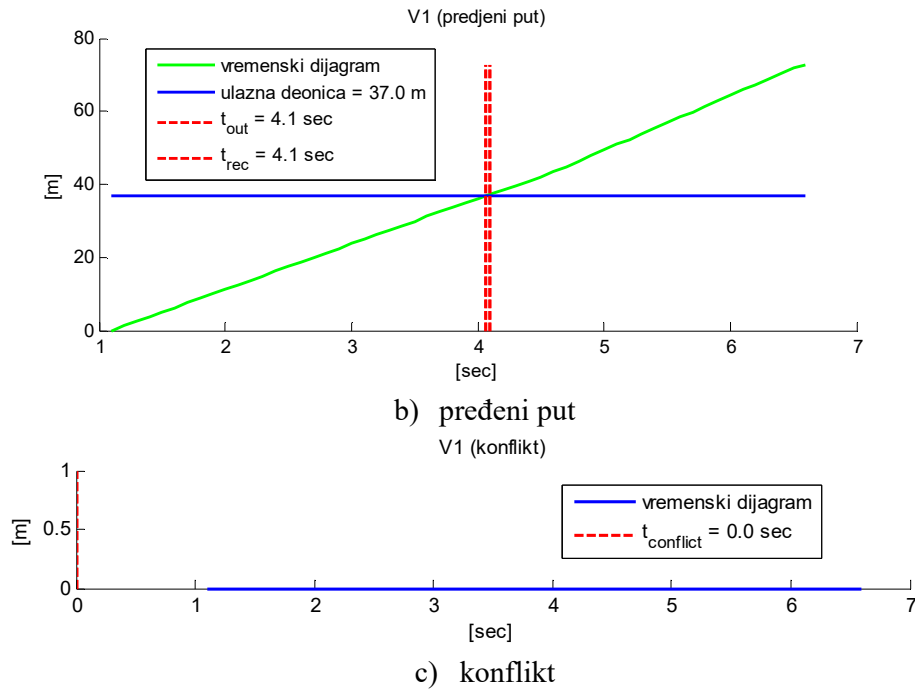


Sl. 5.33 – Dijagrami vozila V3

**Scenario 2:**

U ovom scenariju posmatrana je raskrsnica sa obaveštavanjem, tj. raskrsnica sa aktiviranim sistemom za izbegavanje konfliktnih situacija.

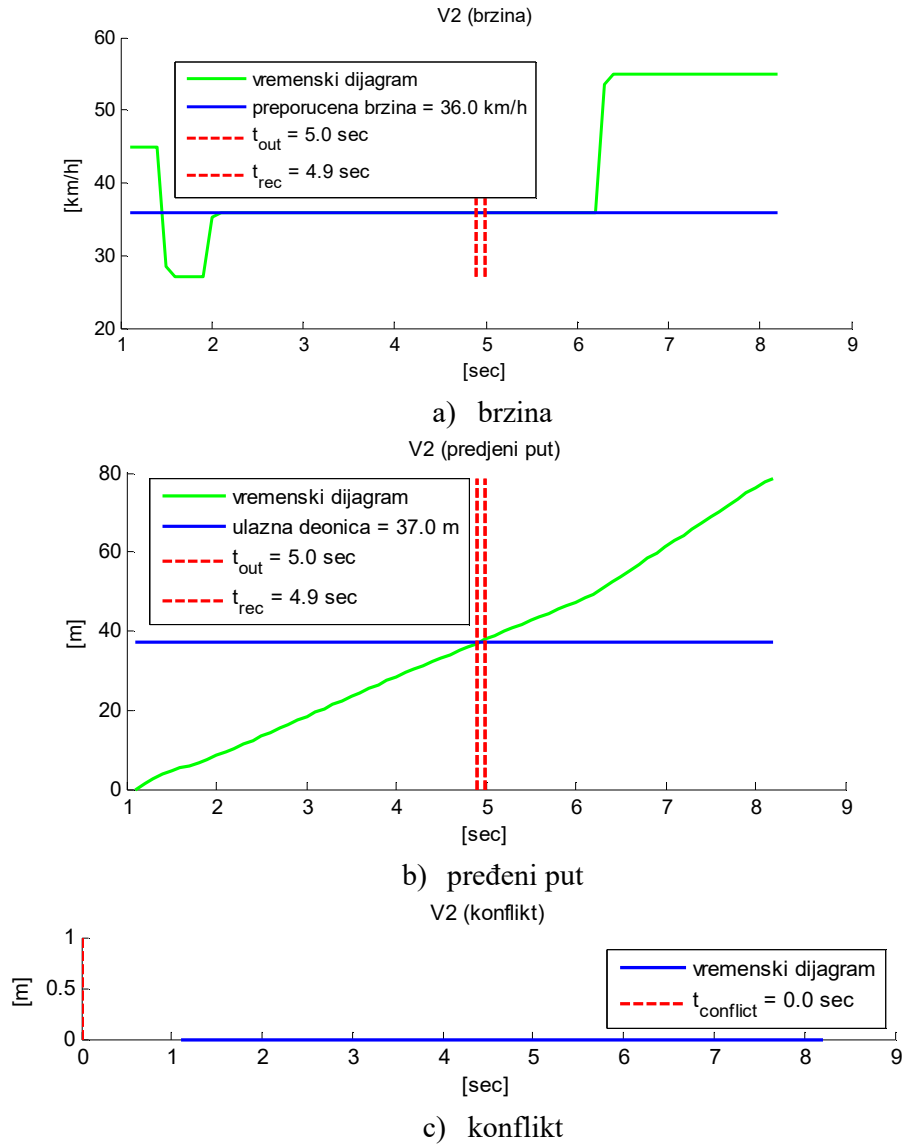




Sl. 5.34 – Dijagrami vozila V1



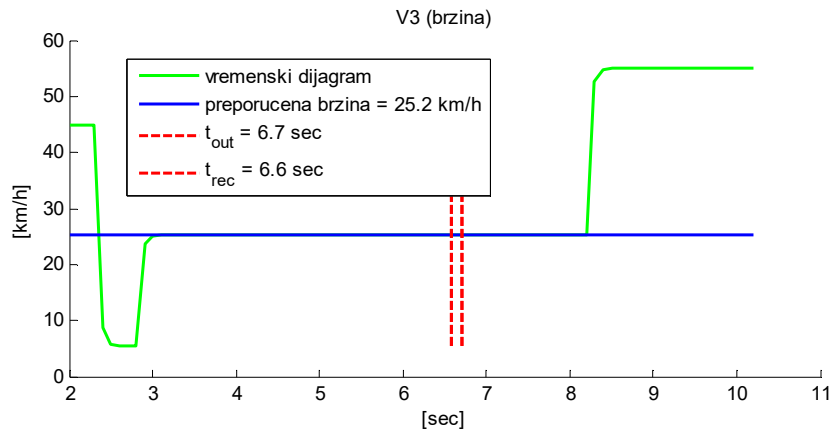
Sl. 5.35 – Sekvenca obaveštavanja V1



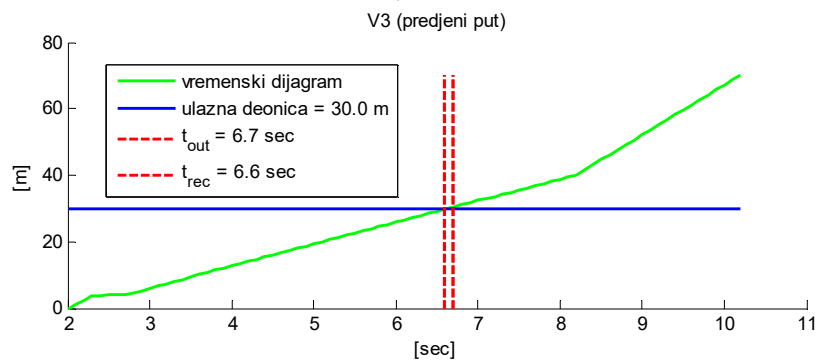
Sl. 5.36 – Dijagrami vozila V2



Sl. 5.37 – Sekvenca obaveštavanja V2

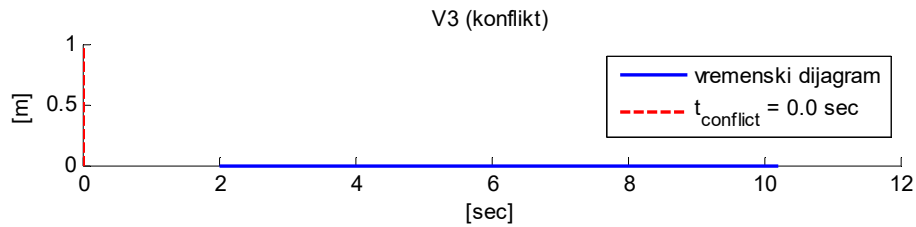


a) brzina



b) pređeni put





c) konflikt

Sl. 5.38 – Dijagrami vozila V3



Sl. 5.39 – Sekvenca obaveštavanja V3

**Komentar:**

Razmatrajući rezultate simulacija može se primetiti da primena sistema za izbegavanje konflikata uspešno ostvaruje svoj osnovni zadatak. Naime, u situacijama kada dolazi do konflikata (prvi scenario) ako se primeni sistem za izbegavanje saobraćaja može se uspešno izbeći konflikt.

Tokom kretanja vozila kroz ulaznu deonicu, sistem generiše takva obaveštenja kojima teži da se vozilo kreće na optimalan način. S obzirom na činjenicu da početna brzina vozila nije jednaka preporučenoj brzini, sistem teži da privoli vozilo da se kreće na taj način kako bi ulaznu deonicu napustilo u optimalnom trenutku i to krećući se preporučenom brzinom, jer na taj način ispunjava potreban uslov za izbegavanje konflikta. Razmatrajući drugi scenario može se primetiti da sva tri vozila ulaznu deonicu napuštaju gotovo u optimalnom trenutku i to brzinama skoro jednakim preporučenoj brzini. Kao rezultat toga imamo izbegnut konflikt između vozila V2 i V3.

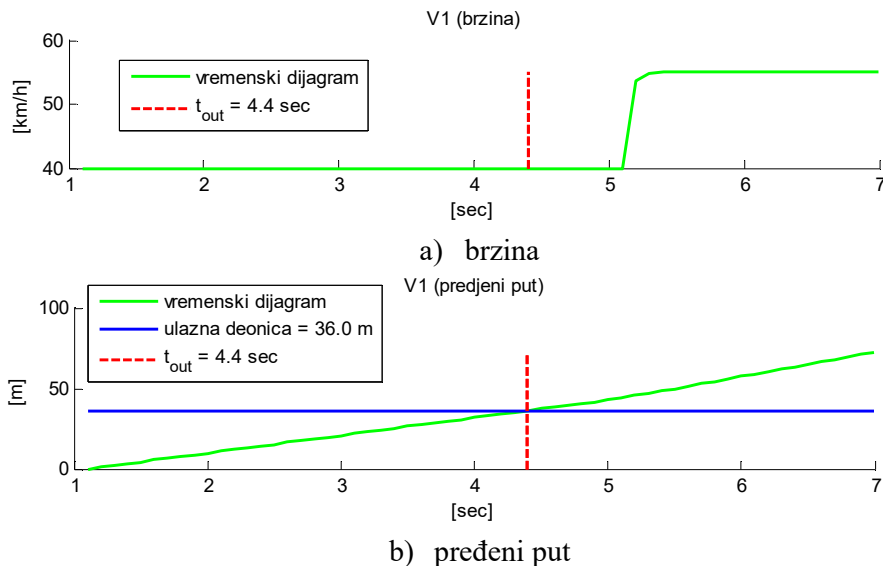
**5.3.2.2. Kružni tok**

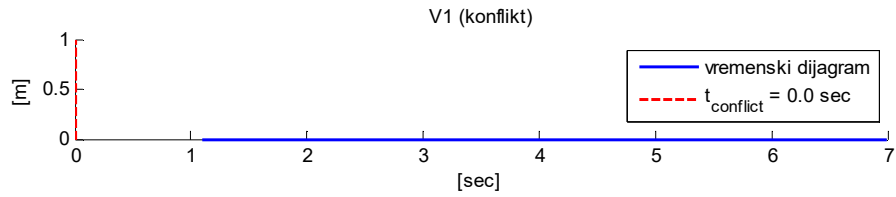
U oba scenarija korišćena je sekvenca za generisanje vozila koja ulaze u saobraćajnu lokaciju sa istim parametrima. Parametri sekvence prikazani su u izvodu iz konfiguracionog fajla:

```
<Sequence Name="Sekvenca 1">
  <Vehicle Name="V1" InputDirectionName="I1" OutputDirectionName="O2" TimeOfOccurrence="0.9" Length="4"
  Width="1.9" Speed="40" SRV="0.5" />
  <Vehicle Name="V2" InputDirectionName="I2" OutputDirectionName="O1" TimeOfOccurrence="1.3" Length="4"
  Width="1.9" Speed="40" SRV="0.5" />
  <Vehicle Name="V3" InputDirectionName="I3" OutputDirectionName="O2" TimeOfOccurrence="0.9" Length="4"
  Width="1.9" Speed="40" SRV="0.5" />
</Sequence>
```

**Scenario 1:**

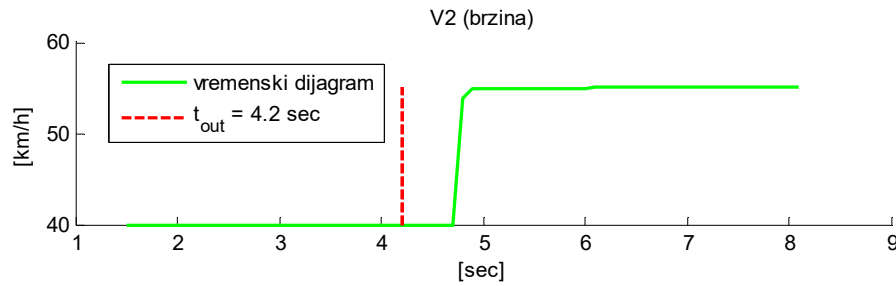
U ovom scenariju posmatra se kružni tok bez obaveštavanja, tj. kružni tok bez aktiviranog sistema za izbegavanje konfliktnih situacija.



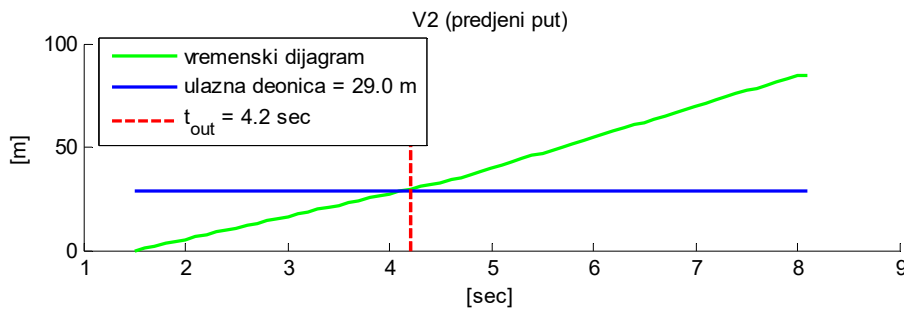


c) konflikt

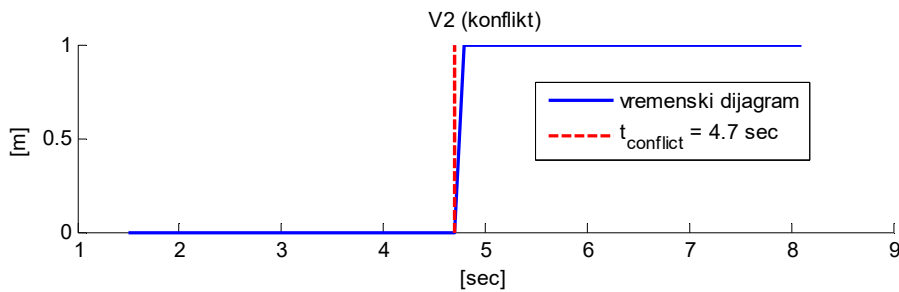
Sl. 5.40 – Dijagrami vozila V1



a) brzina

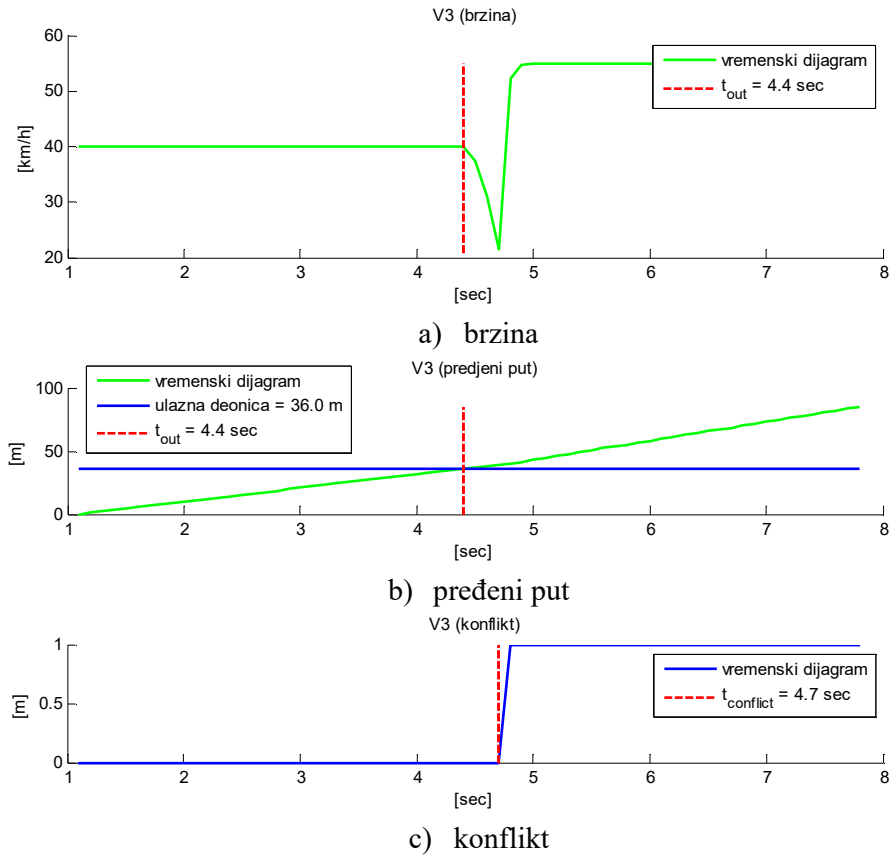


b) pređeni put



c) konflikt

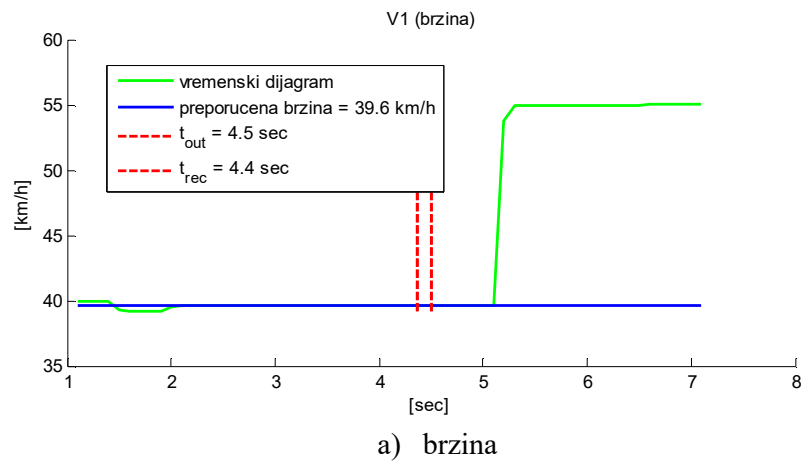
Sl. 5.41 – Dijagrami vozila V2

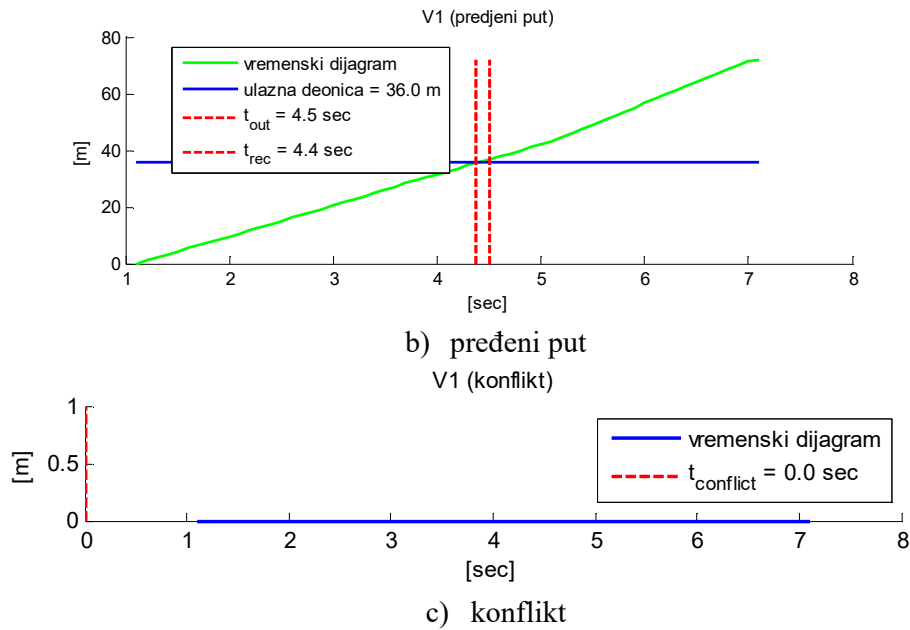


Sl. 5.42 – Dijagrami vozila V3

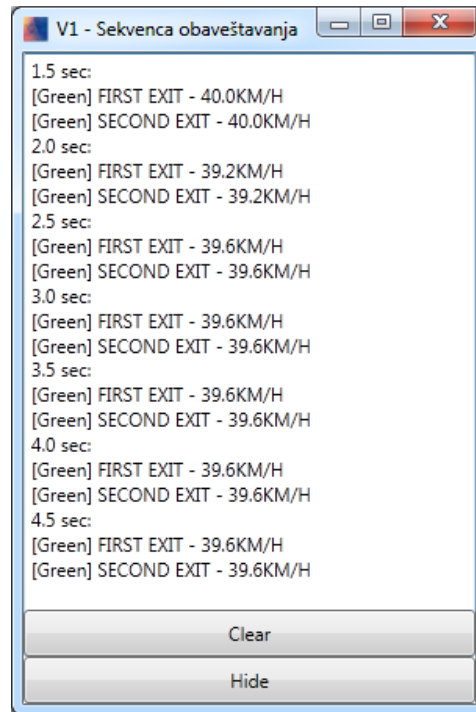
**Scenario 2:**

U ovom scenariju posmatran je kružni tok sa obaveštavanjem, tj. kružni tok sa aktiviranim sistemom za izbegavanje konfliktnih situacija.

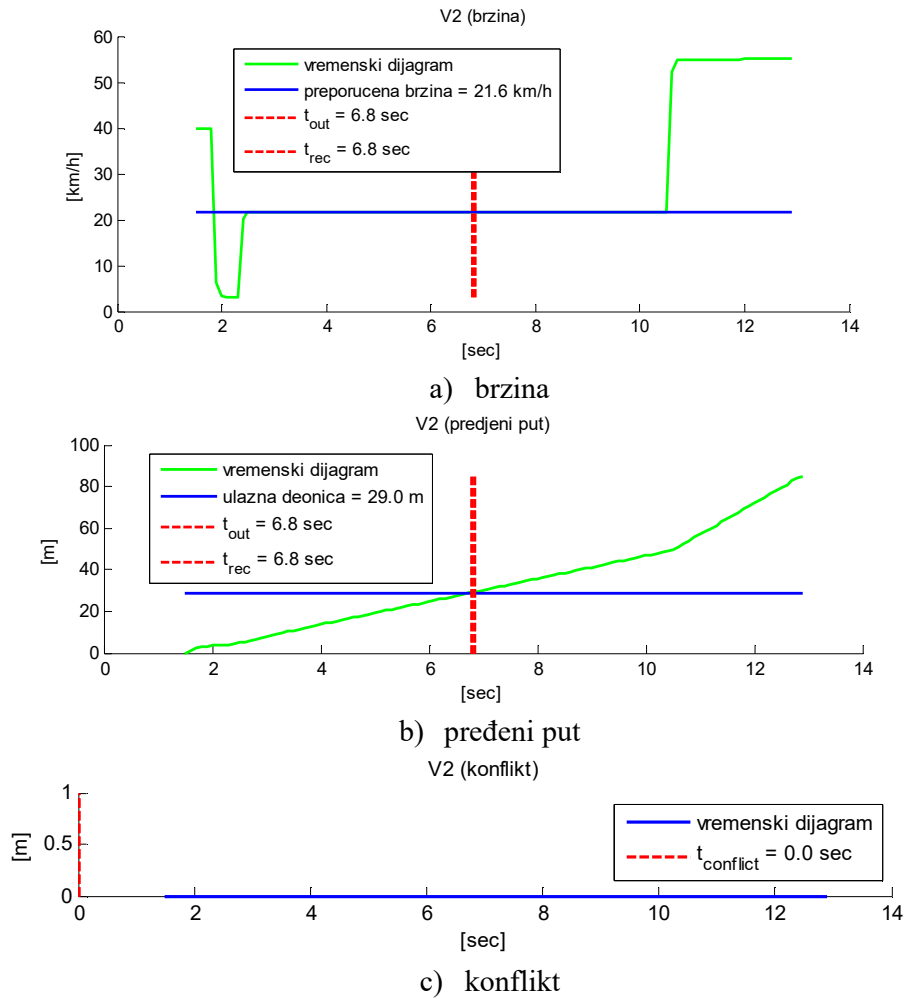




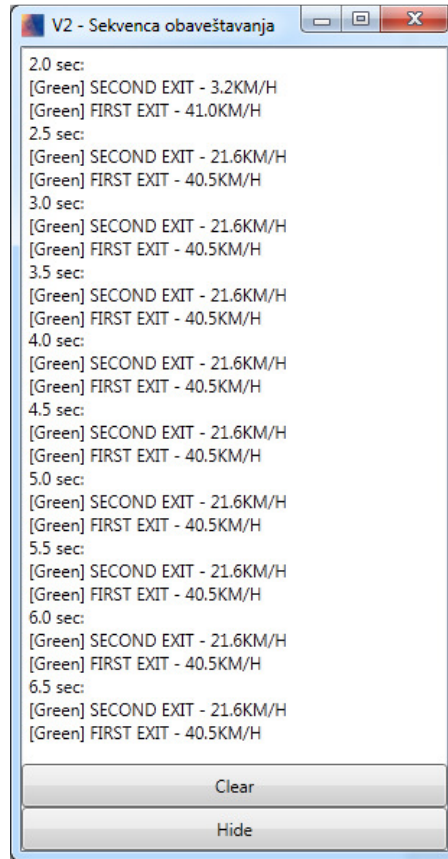
Sl. 5.43 – Dijagrami vozila V1



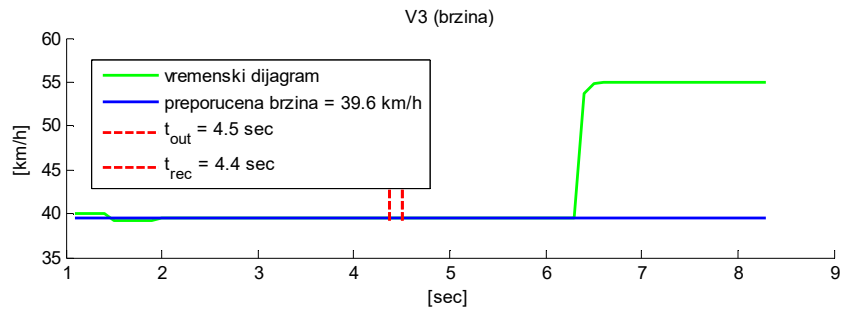
Sl. 5.44 – Sekvenca obaveštavanja V1



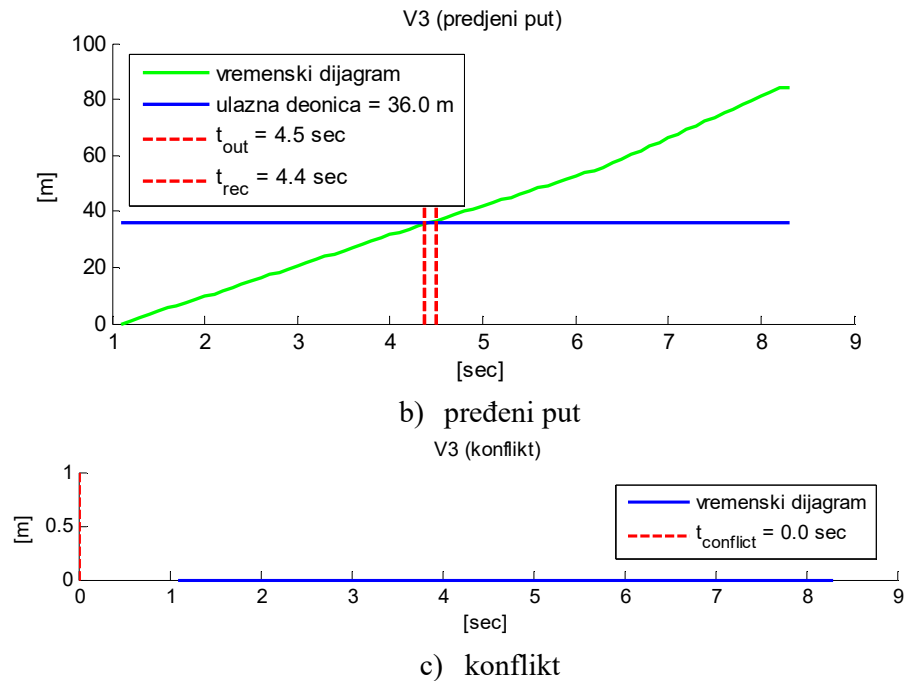
Sl. 5.45 – Dijagrami vozila V2



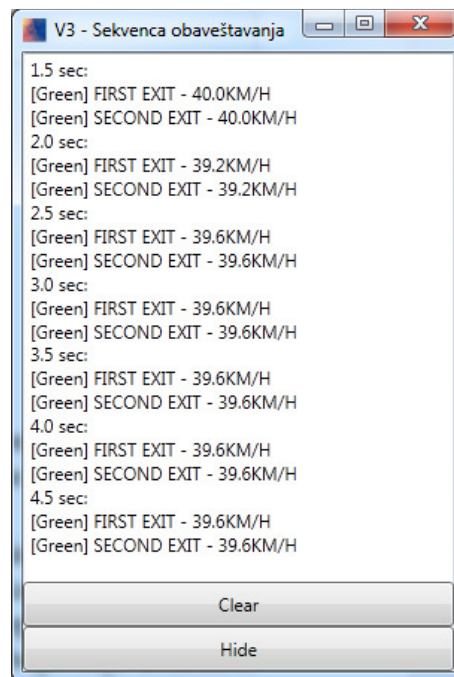
Sl. 5.46 – Sekvenca obaveštavanja V2



a) brzina



Sl. 5.47 – Dijagrami vozila V3



Sl. 5.48 – Sekvenca obaveštavanja V3

**Komentar:**

Razmatrajući rezultate simulacija može se primetiti da primena sistema za izbegavanje konflikata uspešno ostvaruje svoj osnovni zadatak. Naime, u situacijama kada dolazi do konflikata (prvi scenario) ako se primeni sistem za izbegavanje saobraćaja može se uspešno izbeći konflikt.



Tokom kretanja vozila kroz ulaznu deonicu, sistem generiše takva obaveštenja kojima teži da se vozilo kreće na optimalan način. S obzirom na činjenicu da početna brzina vozila nije jednaka preporučenoj brzini, sistem teži da privoli vozilo da se kreće na taj način kako bi ulaznu deonicu napustilo u optimalnom trenutku i to krećući se preporučenom brzinom, jer na taj način ispunjava potreban uslov za izbegavanje konflikta. Razmatrajući drugi scenario može se primetiti da sva tri vozila ulaznu deonicu napuštaju gotovo u optimalnom trenutku i to brzinama skoro jednakim preporučenoj brzini. Kao rezultat toga imamo izbegnut konflikt između vozila V2 i V3.

### 5.3.3. Uticaj vrednosti SRV

Ovim simulacijama prvenstveni cilj je prikaz uticaja vrednosti SRV (Sposobnost Reagovanja Vozila) na efikasnost rada sistema za izbegavanje konflikata. Simulacije su vršene za slučaj saobraćajne lokacije tipa raskrsnica i kružni tok.

#### 5.3.3.1. Raskrsnica

U svim scenarijima koristi se pseudo-slučajni generator za generisanje vozila koja ulaze u saobraćajnu lokaciju sa istim parametrima, osim SRV\_min (čija vrednost je označena sa X) i SRV\_max (čija vrednost je označena sa Y). Parametri pseudo-slučajnog generatora su prikazani u izvodu iz konfiguracionog fajla:

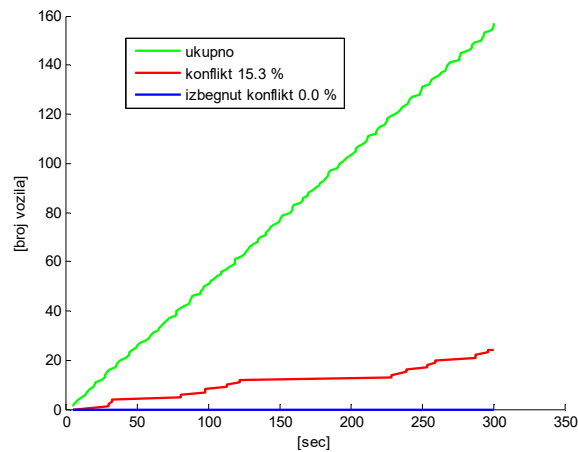
```
<ExternalSource Name="I1" TimeOfOccurrence_min="5.0" TimeOfOccurrence_max="10.0" Length_min="3.5"
Length_max="5"
  Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="32" Speed_max="55" SRV_min="X" SRV_max="Y" />
<ExternalSource Name="I2" TimeOfOccurrence_min="5.0" TimeOfOccurrence_max="10.0" Length_min="3.5"
Length_max="5"
  Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="32" Speed_max="55" SRV_min="X" SRV_max="Y" />
<ExternalSource Name="I3" TimeOfOccurrence_min="5.0" TimeOfOccurrence_max="10.0" Length_min="3.5"
Length_max="5" Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="32" Speed_max="55" SRV_min="X" SRV_max="Y" />
<ExternalSource Name="I4" TimeOfOccurrence_min="5.0" TimeOfOccurrence_max="10.0" Length_min="3.5"
Length_max="5" Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="32" Speed_max="55" SRV_min="X" SRV_max="Y" />
```

Scenario	Sistem za izbegavanje konflikata	SRV_min	SRV_max
1	neaktivan	0.1	0.1
2	aktivan	0.1	0.1
3	neaktivan	0.5	0.5
4	aktivan	0.5	0.5
5	neaktivan	0.9	0.9
6	aktivan	0.9	0.9

#### Scenario 1:

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	24	15.3 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %
	Ukupno vozila	157
	Trajanje simulacije	301.9 sec

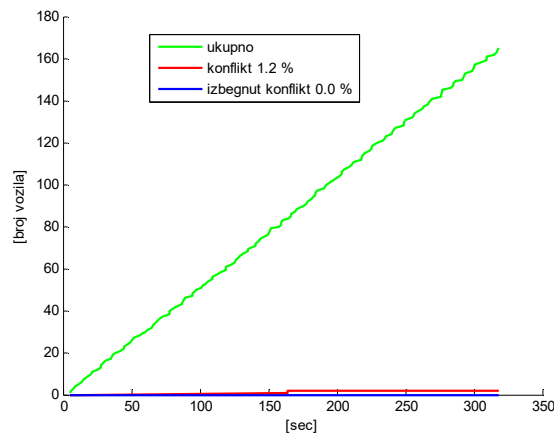


Sl. 5.49 – Vremenski dijagram broja vozila u raskrsnici

### **Scenario 2:**

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	2	1.2 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %
Ukupno vozila	165	
Trajanje simulacije	322.3 sec	



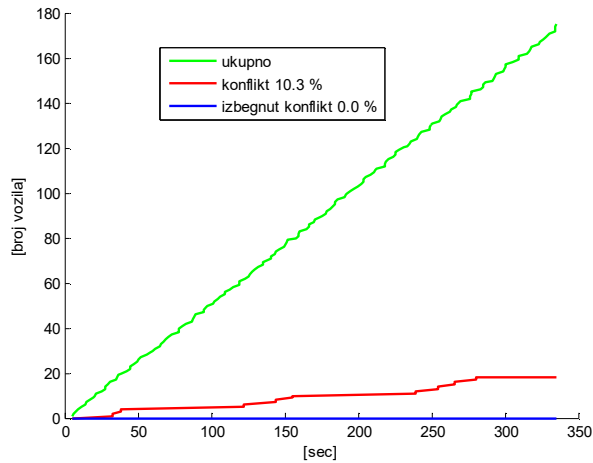
Sl. 5.50 – Vremenski dijagram broja vozila u raskrsnici

### **Scenario 3:**

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	18	10.3 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %

Ukupno vozila	175
Trajanje simulacije	335.1 sec

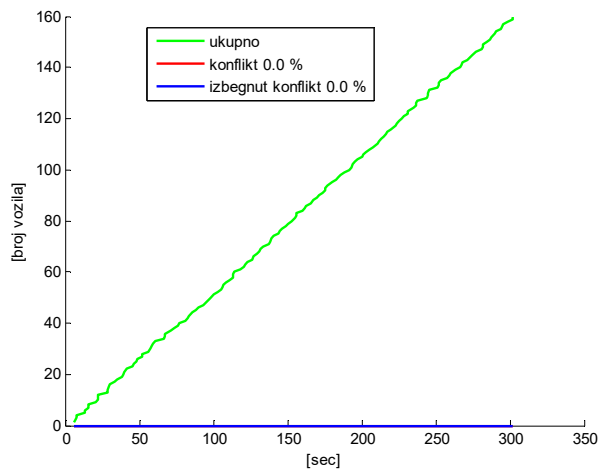


Sl. 5.51 – Vremenski dijagram broja vozila u raskrsnici

**Scenario 4:**

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	0	0 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %
Ukupno vozila	160	
Trajanje simulacije	302.9 sec	

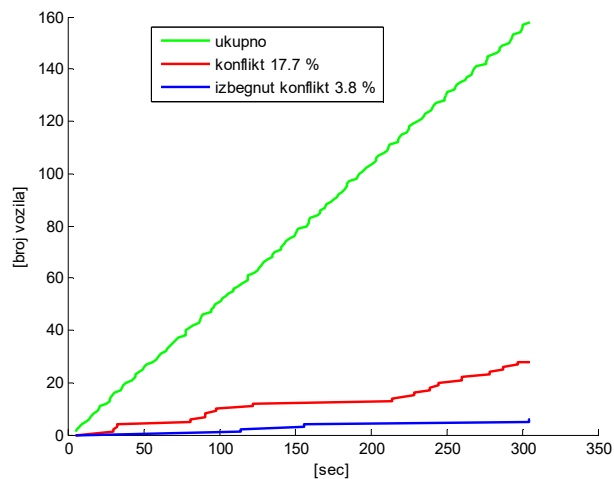


Sl. 5.52 – Vremenski dijagram broja vozila u raskrsnici

**Scenario 5:**

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	28	17.7 %
Vozila koja su izbegla konflikt	6	3.8 %
Ukupno vozila	158	
Trajanje simulacije	307.3 sec	

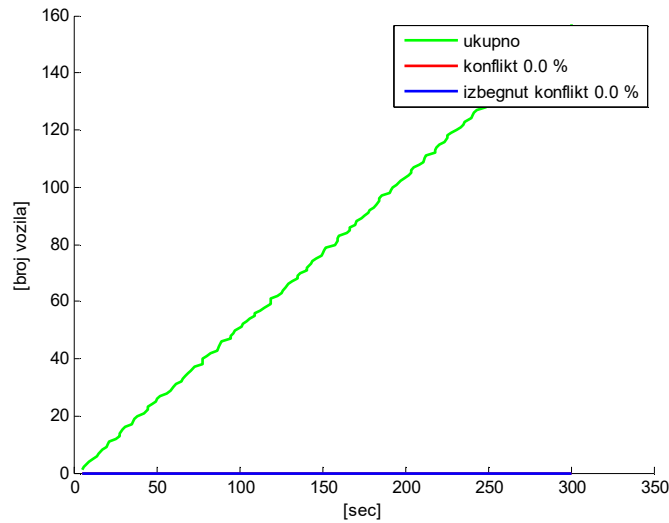


Sl. 5.53 – Vremenski dijagram broja vozila u raskrsnici

**Scenario 6:**

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	0	0 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %
Ukupno vozila	157	
Trajanje simulacije	304.2 sec	



Sl. 5.54– Vremenski dijagram broja vozila u raskrsnici

**Komentar:**

Promenom parametara kojima se definiše vrednost SRV, za vozila koja ulaze u raskrsnicu, nije se narušila osnovna funkcionalnost sistema. U četvrtom i šestom scenariju potpuno je ostvareno izbegavanje konflikata. Jedino u najkritičnijem slušaju, u drugom scenariju kada je  $SRV=0.1$ , procentualna vrednost broja konflikata iznosi 1.2 % (sudar dva vozila). Ipak, taj rezultat je značajno poboljšanje u odnosu na procentualna vrednost broja konflikata od 15.3 % koja se dobijaju u prvom scenariju, kada sistem za izbegavanje konflikata nije aktivan.

Imajući u vidu prethodno može se smatrati da sistem na adekvatan način amortizuje promene vrednosti SRV i obavlja svoju osnovnu funkciju izbegavanja konflikata.

**5.3.3.2. Kružni tok**

U svim scenarijima koristi se pseudo-slučajni generator za generisanje vozila koja ulaze u saobraćajnu lokaciju sa istim parametrima, osim  $SRV_{min}$  (čija vrednost je označena sa X) i  $SRV_{max}$  (čija vrednost je označena sa Y). Parametri pseudo-slučajnog generatora su prikazani u izvodu iz konfiguracionog fajla:

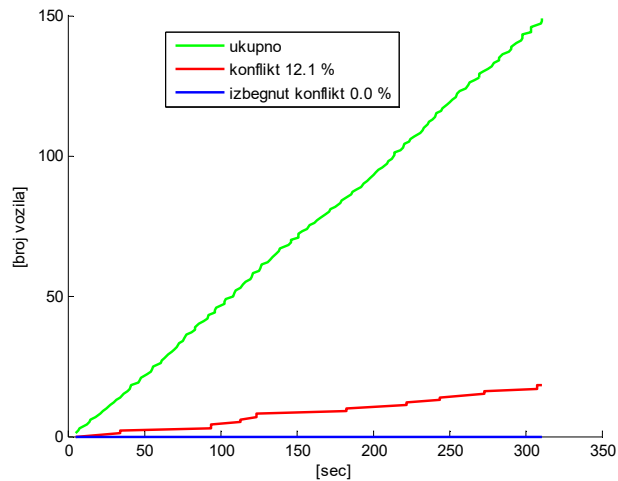
```
<ExternalSource Name="I1" TimeOfOccurrence_min="4" TimeOfOccurrence_max="8" Length_min="3.5" Length_max="5"
Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="32" Speed_max="55" SRV_min="X" SRV_max="Y" />
<ExternalSource Name="I2" TimeOfOccurrence_min="4" TimeOfOccurrence_max="8" Length_min="3.5" Length_max="5"
Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="32" Speed_max="55" SRV_min="X" SRV_max="Y" />
<ExternalSource Name="I3" TimeOfOccurrence_min="4" TimeOfOccurrence_max="8" Length_min="3.5" Length_max="5"
Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="32" Speed_max="55" SRV_min="X" SRV_max="Y" />
```

Scenario	Sistem za izbegavanje konflikata	SRV_min	SRV_max
1	neaktivan	0.1	0.1
2	aktivan	0.1	0.1
3	neaktivan	0.5	0.5
4	aktivan	0.5	0.5
5	neaktivan	0.9	0.9
6	aktivan	0.9	0.9

**Scenario 1:**

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	18	12.1 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %
Ukupno vozila	149	
Trajanje simulacije	311.2 sec	

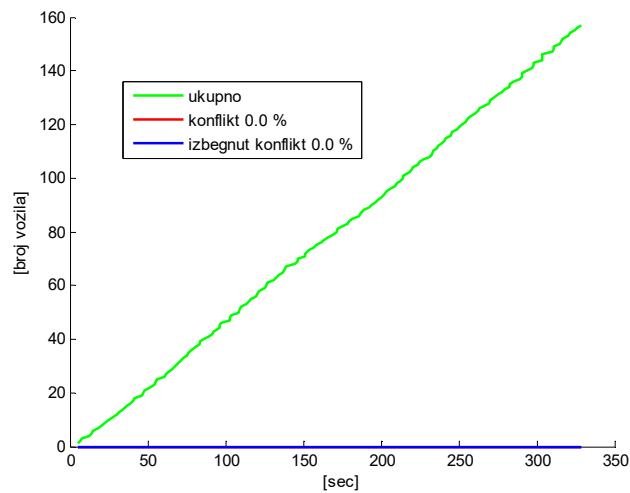


Sl. 5.55 – Vremenski dijagram broja vozila u kružnom toku

**Scenario 2:**

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	0	0 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %
Ukupno vozila	157	
Trajanje simulacije	330.7 sec	

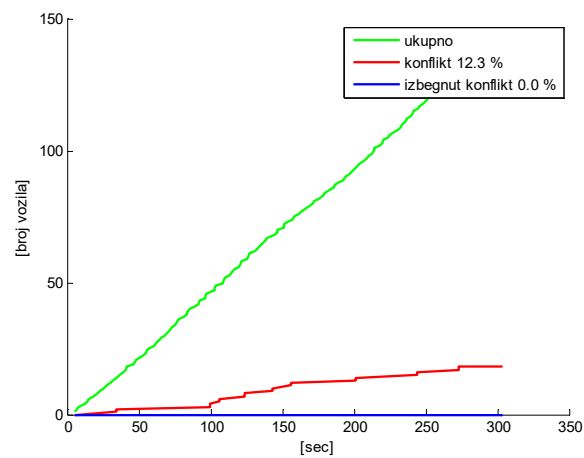


Sl. 5.56 – Vremenski dijagram broja vozila u kružnom toku

**Scenario 3:**

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	18	12.3 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %
Ukupno vozila	146	
Trajanje simulacije	304.7 sec	

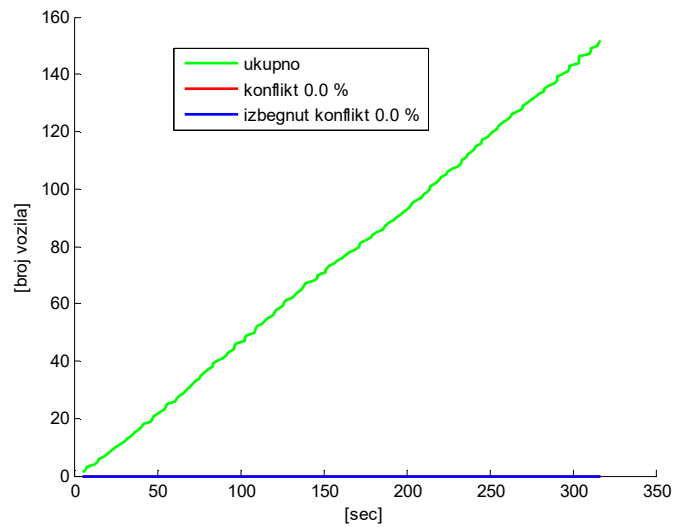


Sl. 5.57 – Vremenski dijagram broja vozila u kružnom toku

**Scenario 4:**

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	0	0 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %
Ukupno vozila	152	
Trajanje simulacije	318.2 sec	



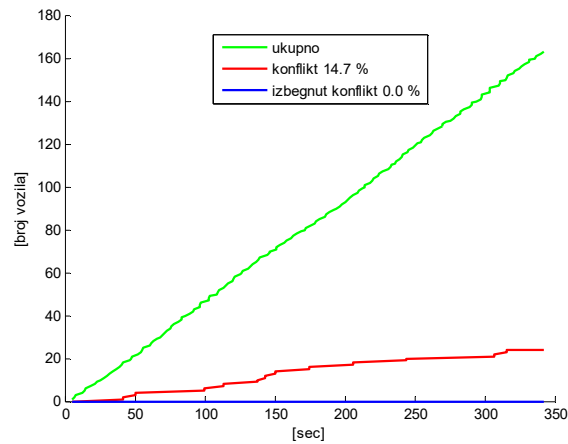
Sl. 5.58 – Vremenski dijagram broja vozila u kružnom toku

**Scenario 5:**

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt	24	14.7 %
Vozila koja su izbegla konflikt	0	0 %
Ukupno vozila	163	
Trajanje simulacije	343.7 sec	



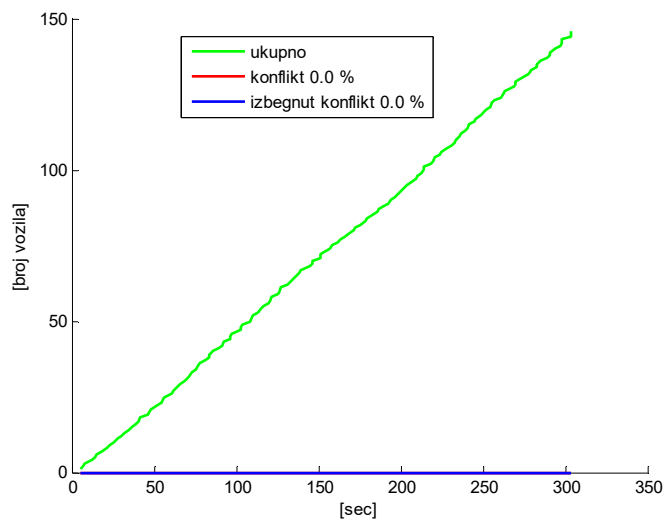


Sl. 5.59 – Vremenski dijagram broja vozila u kružnom toku

**Scenario 6:**

Simulaciona statistika:

Opis	Broj vozila	Procentualni odnos
Vozila koja su doživela konflikt		%
Vozila koja su izbegla konflikt		%
	Ukupno vozila	146
	Trajanje simulacije	310.2 sec



Sl. 5.60 – Vremenski dijagram broja vozila u kružnom toku

**Komentar:**

Promenom parametara kojima se definiše vrednost SRV, za vozila koja ulaze u raskrnicu, nije se narušila osnovna funkcionalnost sistema. U drugom, četvrtom i šestom scenariju potpuno je ostvareno izbegavanje konflikata kada je aktivan sistem za izbegavanje konflikata.

Prema tome, može se smatrati da sistem na adekvatan način amortizuje promene vrednosti SRV i obavlja svoju osnovnu funkciju izbegavanja konflikata.

**5.3.4. Izbegnuti konflikt**

Ovim simulacijama prvenstveni cilj je prikaz uticaja T1-FLS na izbegavanje konflikata. T1-FLS vrši procenu ukupne opasnosti kretanja vozila na osnovu koje se generišu eventualne obaveštajne poruke o naglom usporavanju u cilju izbegavanja konflikta. Na taj način, delovanjem T1-FLS, moguće je izbeći konflikt tako što će obavešteno vozilo početi usporavanje svog kretanja na vreme.

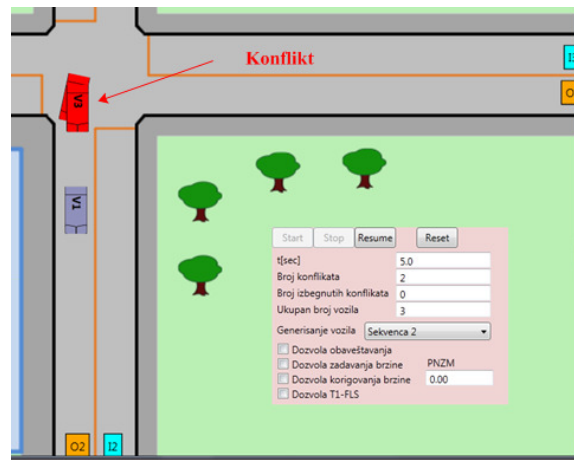
U ovim simulacijama sistem za izbegavanje konflikata posmatran je kao sistem iz dva dela. Prvi deo je satavljen iz elemenata koji vrše određivanje preporučene brzine i vrše korekciju kretanja vozila obaveštavanjem tokom njihovog kretanja duž ulazne deonice.

Posmatrana je saobraćajna lokacija tipa raskrsnice. U sva tri scenarija korišćena je sekvenca za generisanje vozila koja ulaze u saobraćajnu lokaciju sa istim parametrima. Parametri sekvence prikazani su u izvodu iz konfiguracionog fajla:

```
<Sequence Name="Sekvenca 2">
  <Vehicle Name="V1" InputDirectionName="I1" OutputDirectionName="O2" TimeOfOccurrence="0.9" Length="4"
  Width="1.9"
    Speed="45" SRV="0.5" />
  <Vehicle Name="V2" InputDirectionName="I3" OutputDirectionName="O2" TimeOfOccurrence="1.1" Length="4"
  Width="1.9"
    Speed="45" SRV="0.5" />
  <Vehicle Name="V3" InputDirectionName="I4" OutputDirectionName="O2" TimeOfOccurrence="1.9" Length="4"
  Width="1.9"
    Speed="45" SRV="0.5" />
</Sequence>
```

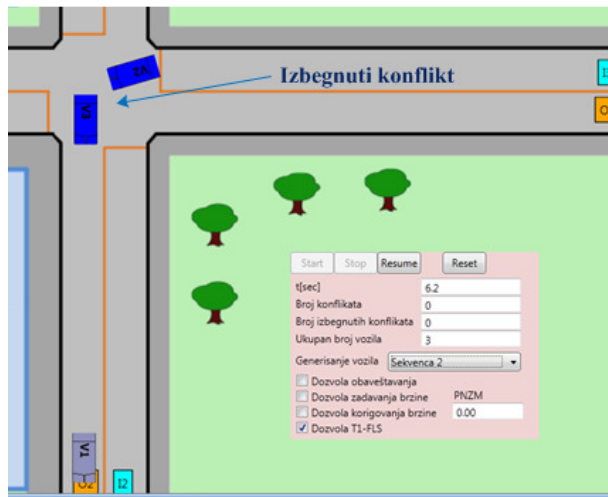
Scenario	Rezultat	Određivanje preporučene brzine i korekcija brzine	T1-FLS
1	Konflikt	neaktivno	neaktivan
2	Izbegnuti konflikt	neaktivno	aktivan
3	Nema konflikta	aktivno	aktivan

**Scenario 1:**

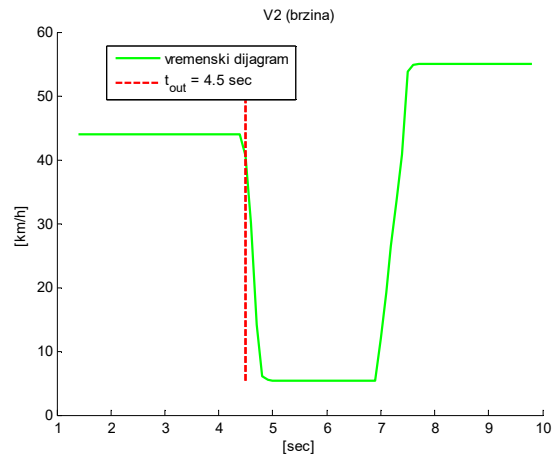


Sl. 5.61 – Deo glavnog prozora za prikaz saobraćajne lokacije (raskrsnice) u slučaju konflikta

**Scenario 2:**

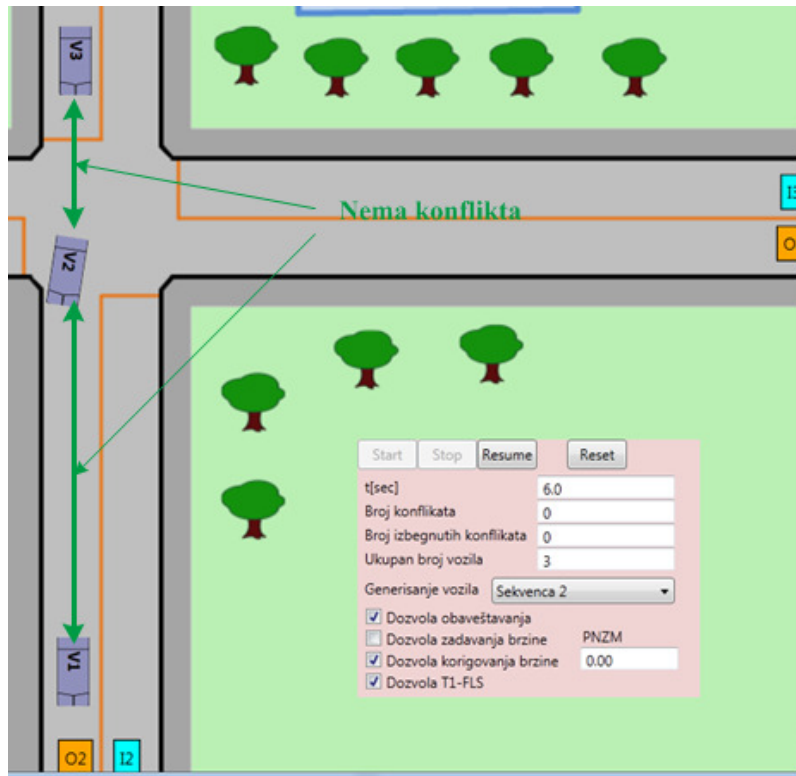


Sl. 5.62 – Deo glavnog prozora za prikaz saobraćajne lokacije (raskrsnice) u slučaju izbegnutog konflikta



Sl. 5.63 – Vremenski dijagram brzine vozila V2

**Scenario 3:**



Sl. 5.64 – Deo glavnog prozora za prikaz saobraćajne lokacije (raskrsnice) u slučaju kada nema konflikta

**Komentar:**

Primenom celokupnog sistema za izbegavanje konflikata (treći scenario) vrši se procena preporučene brzine i korigovanje brzine vozila u toku kretanja kroz ulaznu deonicu. Na taj način

se obezbeđuje da se vozila međusobno nađu na dovoljno velikom rastojanju tako da nema opasnosti od konflikta.

U slučaju da nema korekcije brzine (prvi i drugi scenario) moguće je da se vozila nađu na malim rastojanjima u oblasti konfliktne zone. U tom slučaju može doći do konflikta (prvi scenario), osim ako nije aktivno obaveštavanje, kao proizvod delovanja T1-FLS, čime se omogućuje izbegavanje konflikta.

Drugim rečima, može se konstatovati da deo sistema koji određuje preporučenu brzinu i koriguje brzinu kretanja se stara da se konflikt izbegne u ranoj fazi pojavljivanja vozila u saobraćajnoj lokaciji (na većim razdaljinama između vozila), dok se drugi deo sistema, oličen u T1-FLS, stara da se izbegnu konflikti kada su razdaljine između vozila manje.

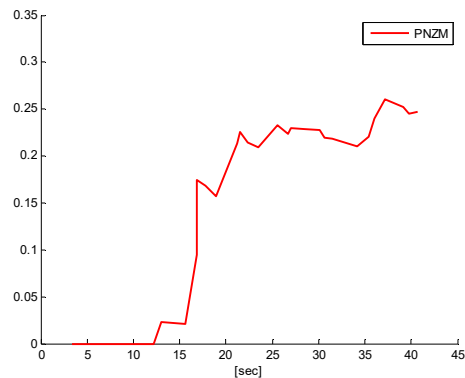
### 5.3.5. Zagušena saobraćajna lokacija

Cilj ove simulacijom je da se pokažu ograničenja sistema u slučaju prevelikog broja vozila u saobraćajnoj lokaciji. U ovoj simulaciji koristi se pseudo-slučajni generator za generisanje vozila koja ulaze u saobraćajnu lokaciju. Parametri pseudo-slučajnog generatora su prikazani u izvodu iz konfiguracionog fajla:

```
<ExternalSource Name="I1" TimeOfOccurrence_min="3.0" TimeOfOccurrence_max="6.0" Length_min="3.5" Length_max="5"
Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="12" Speed_max="20" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
<ExternalSource Name="I2" TimeOfOccurrence_min="3.0" TimeOfOccurrence_max="6.0" Length_min="3.5" Length_max="5"
Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="12" Speed_max="20" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
<ExternalSource Name="I3" TimeOfOccurrence_min="3.0" TimeOfOccurrence_max="6.0" Length_min="3.5" Length_max="5"
Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="12" Speed_max="20" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
<ExternalSource Name="I4" TimeOfOccurrence_min="3.0" TimeOfOccurrence_max="6.0" Length_min="3.5" Length_max="5"
Width_min="1.7" Width_max="2" Speed_min="12" Speed_max="20" SRV_min="0.2" SRV_max="0.8" />
```



Sl. 5.65 – Glavni prozor za prikaz saobraćajne lokacije (raskrsnice) u slučaju zagušenja



Sl. 5.66 – Vremenski dijagram veličine PNZM u slučaju zagušenja raskrsnice

**Komentar:**

Razmatranjem rezultata ove simulacije može se primetiti veliki broj konfliktnih situacija. Karakteristika primenjenog pseudo-slučajnog generatora je da često generiše vozila koja se kreću malom brzinom. Kao rezultat toga je pojava velikog broja vozila u raskrsnici. Zbog malih brzina vozila procene kritičnih vremenskih intervala su široke, a zbog velikog broja vozila procene verovatnoće dva sudara često nisu jednake nuli pa čak i sa dosta velikim vrednostima. Kao rezultat ovih činjenica javlja se vrednost veličine PNZM različita od nule.

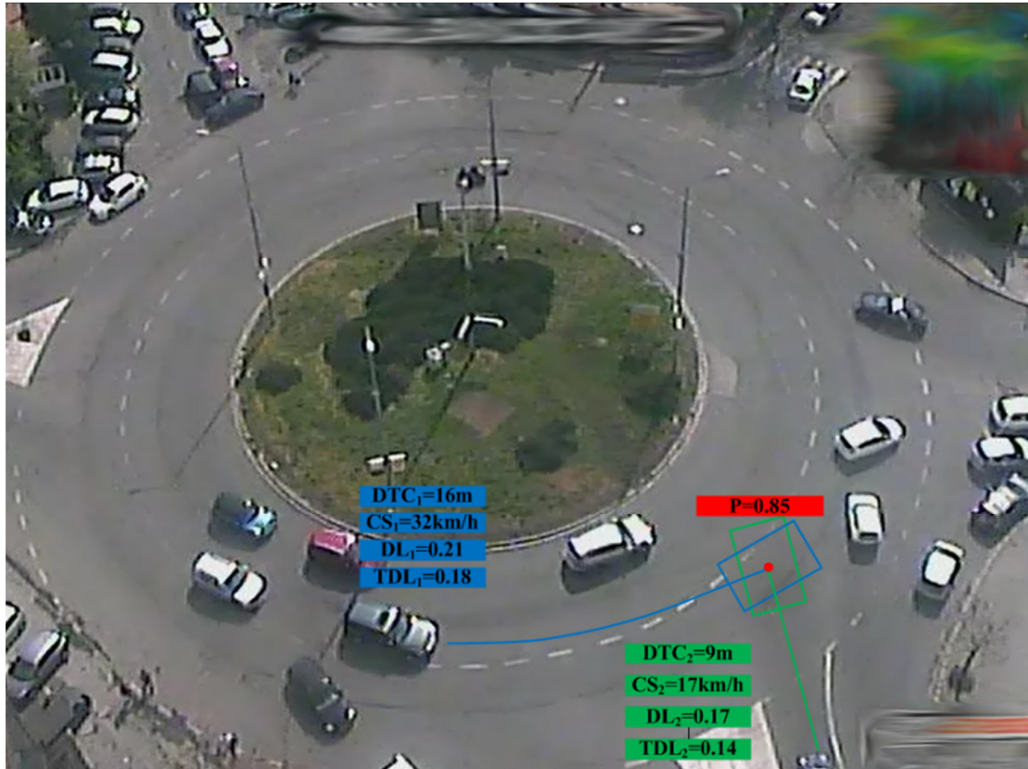
Kao što se može primetiti pojava vrednosti PNZM različita od nule se može tretirati kao indikator nemogućnosti sistema da vrši izbegavanje konflikata na optimalan način. Na sreću, ovakve situacije su malo verovatne u realnosti.

**5.4. Eksperimentalni rezultati**

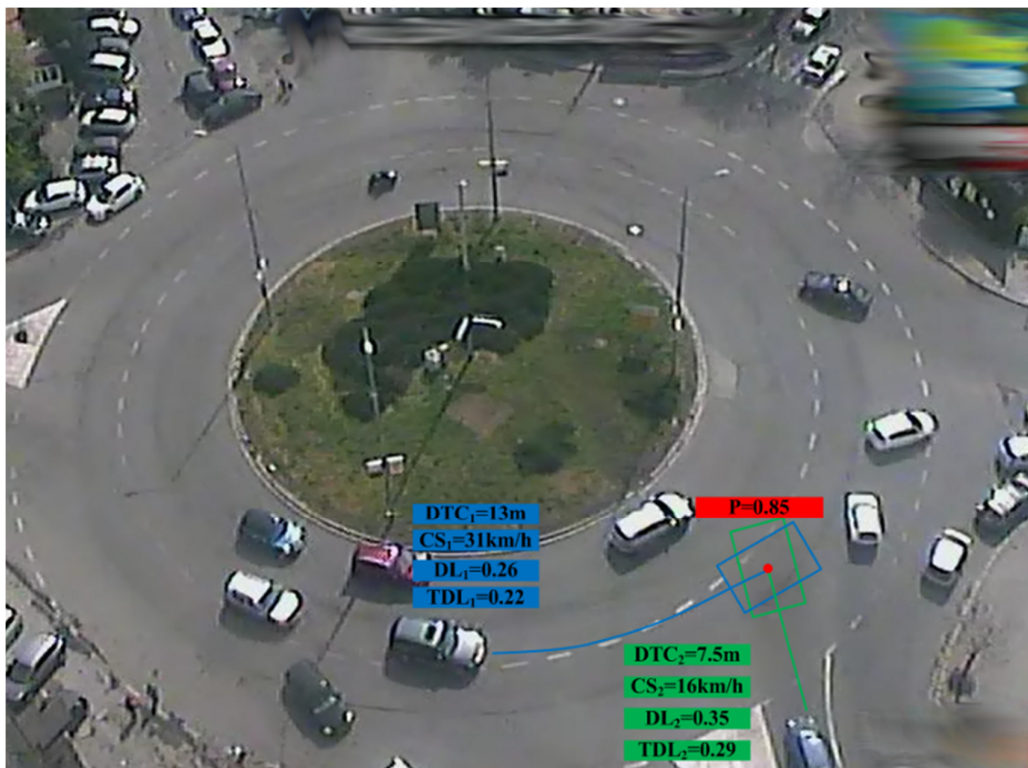
U ovom poglavlju prikazani su eksperimentalni rezultati koji su dobijeni analizom realne situacije na kružnom toku (kod Bogoslovskog fakulteta u Beogradu) snimljene WEB kamerom [126] dana 10.04.2019. godine u 11:13h. Snimljena je sekvenca u trajanju od 7 sekundi. Cilj snimanja sekvence i njena analiza je verifikacija opravdanosti određivanja ukupne opasnosti kretanja vozila prema algoritmu opisanom u ovoj disertaciji i mogućnost korišćenja takvog podatka za generisanje obaveštenja. Celokupna sekvenca je prikazana na Sl. 5.67 – 5.75.

Na slikama sekvence posmatrana su dva vozila. Naznačene su konfliktna tačka i konfliktna zona oba vozila. Pored vrednosti procene verovatnoće sudara dva vozila  $P$ , na slikama su prikazane i vrednosti:

- udaljenosti od konfliktna tačke prvog vozila  $DTC_1$  i drugog vozila  $DTC_2$ ,
- trenutna brzina prvog vozila  $CS_1$  i drugog vozila  $CS_2$ ,
- opasnost kretanja prvog vozila  $DL_1$  i drugog vozila  $DL_2$  i
- ukupna opasnost kretanja prvog vozila  $TDL_1$  i drugog vozila  $TDL_2$ .

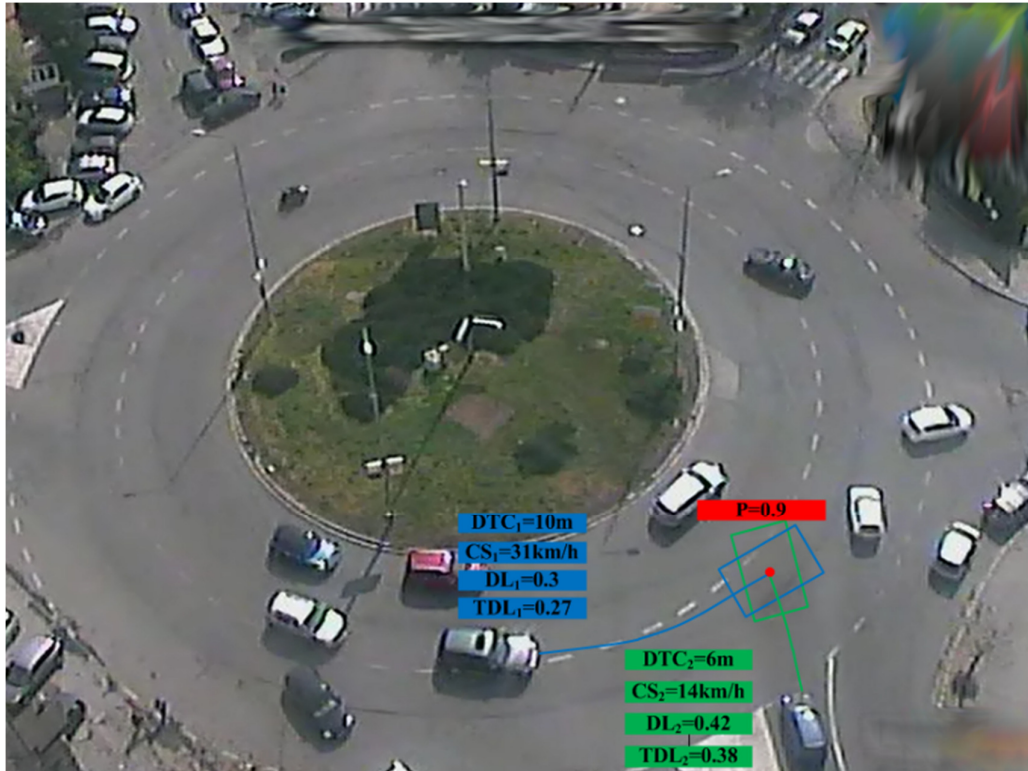


Sl. 5.67 – Prva slika iz sekvence

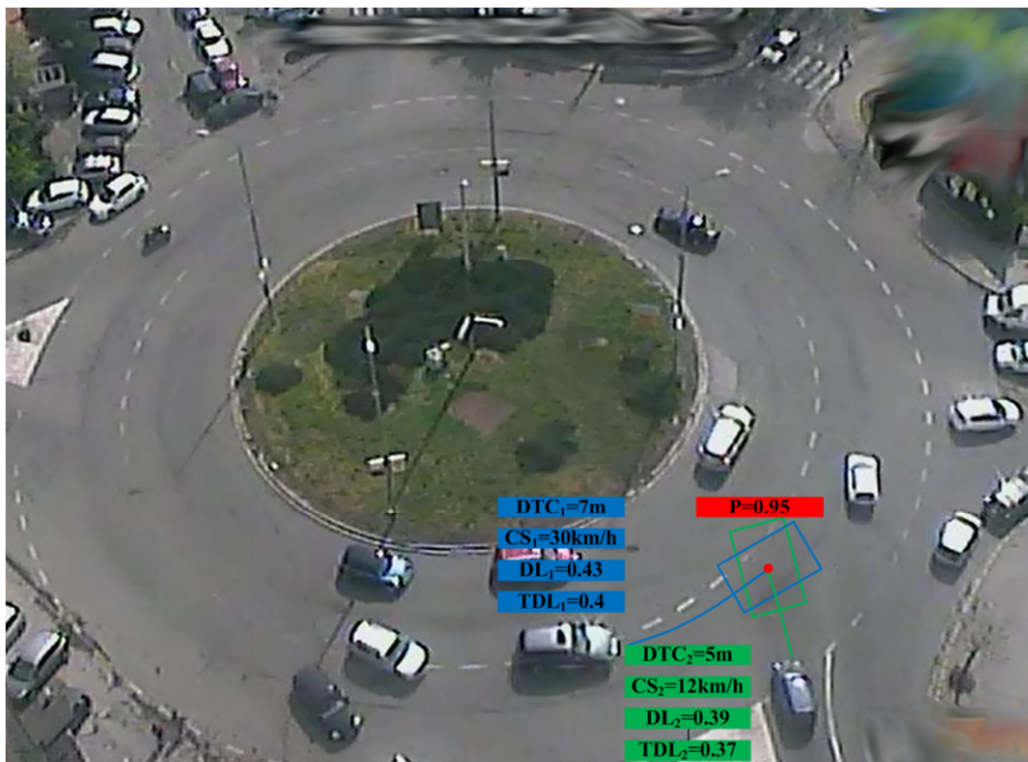


Sl. 5.68 – Druga slika iz sekvence



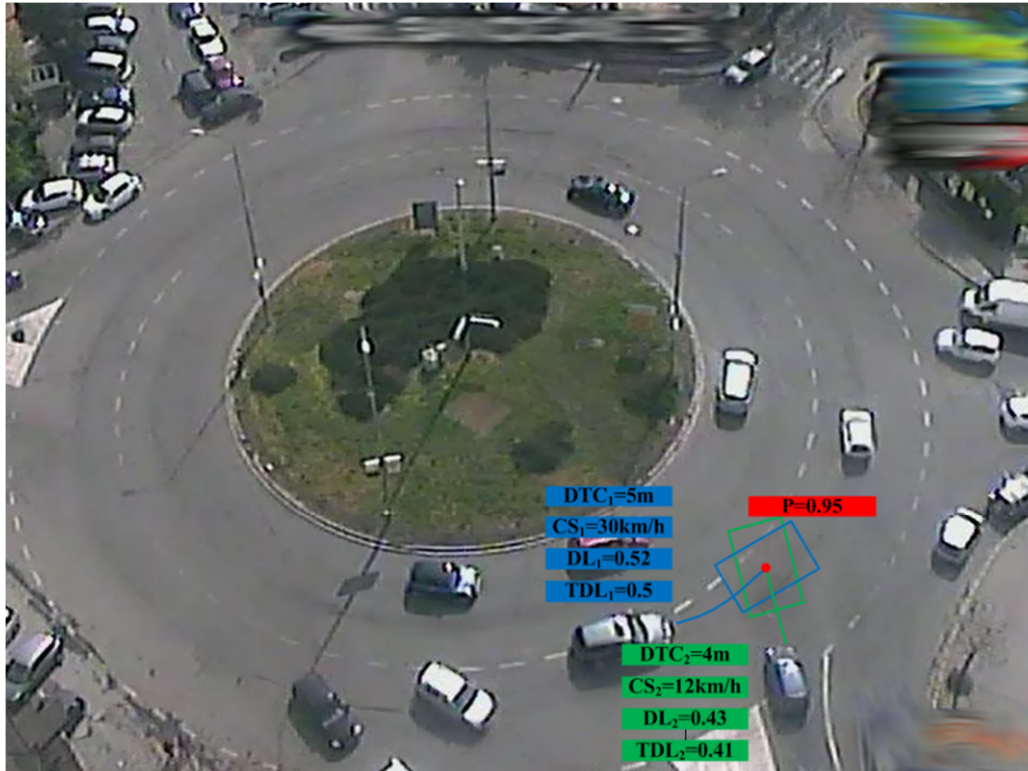


Sl. 5.69 – Treća slika iz sekvence

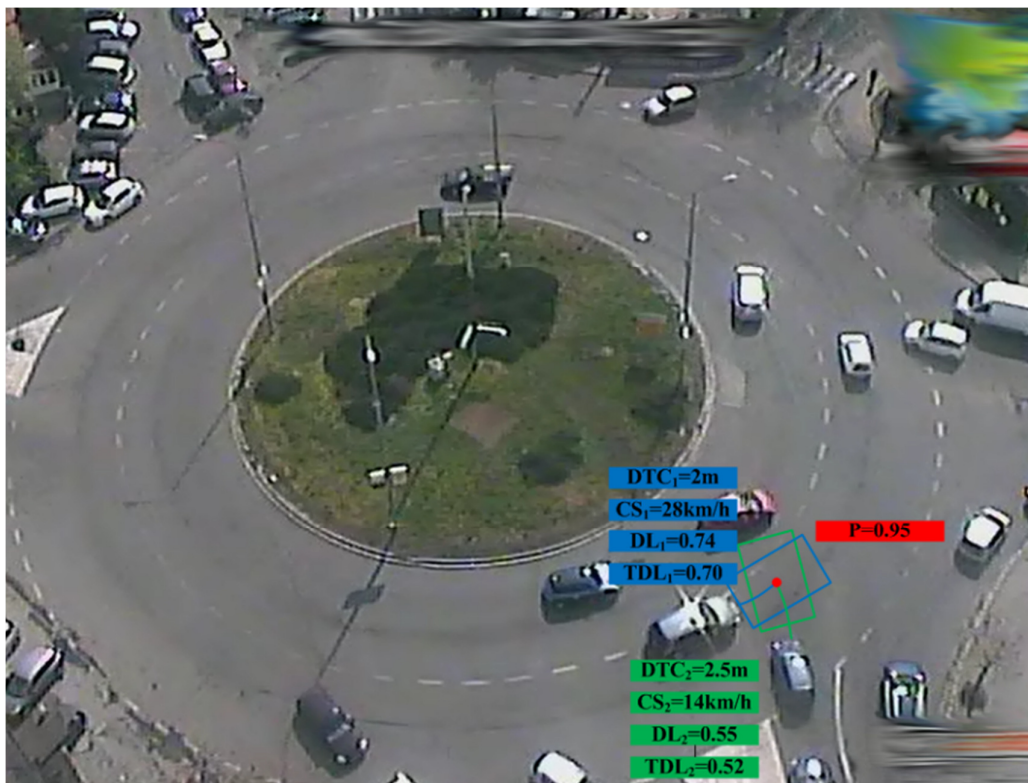


Sl. 5.70 – Četvrta slika iz sekvence

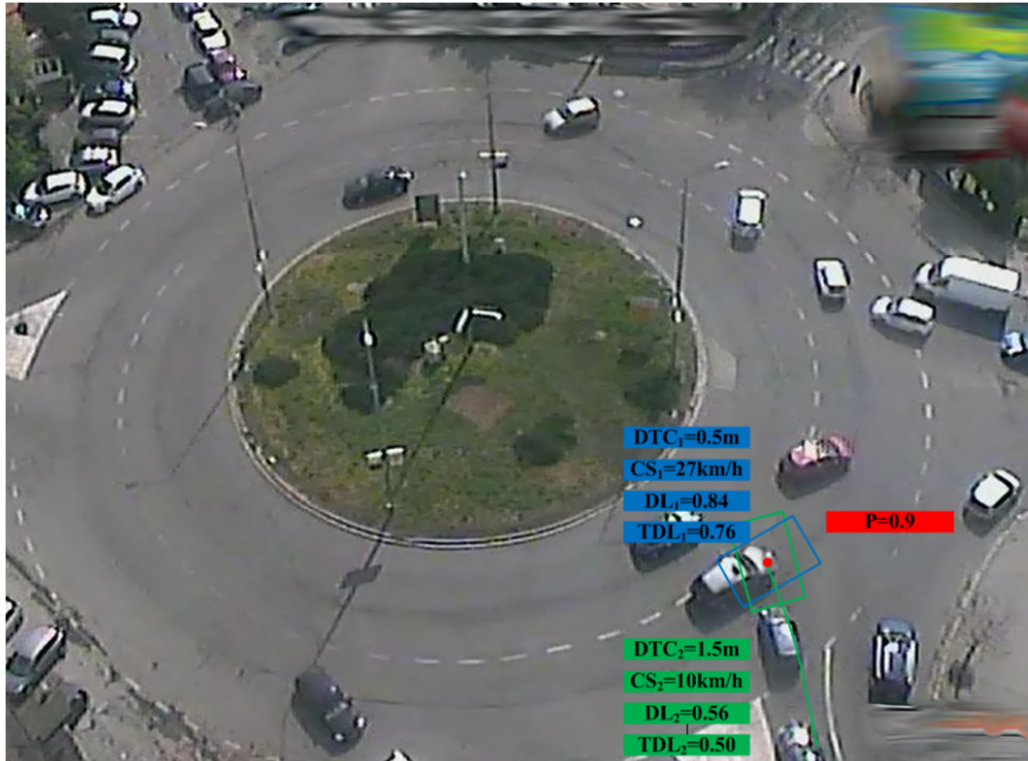




Sl. 5.71 – Peta slika iz sekvence



Sl. 5.72 – Šesta slika iz sekvence



Sl. 5.73 – Sedma slika iz sekvence



Sl. 5.74 – Osmo slika iz sekvence

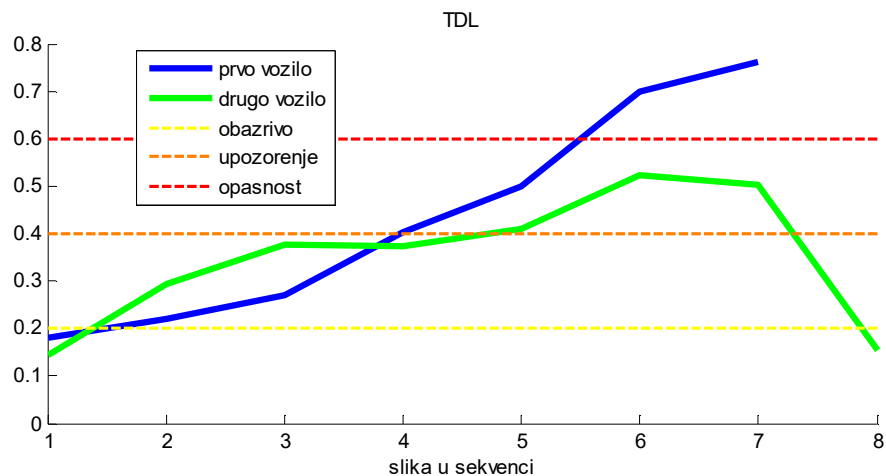




Sl. 5.75 – Deveta slika iz sekvence

Posmatranjem sekvence slika može se primetiti da se dva posmatrana vozila kreću na takav način da je pojava konflikta dosta izvesna. Na slikama 1-7 brzine vozila su takve da je procenjena vrednost verovatnoće sudara na visokom nivou od 0.85 do 0.95. To ukazuje na činjenicu da je sudar gotovo neizbežan ukoliko ne dođe do promene u kretanju vozila u narednim trenucima. Ipak, do sudara nije došlo jer je drugo vozilo naglo usporilo svoje kretanje, što se može videti na osmoj i devetoj slici sekvence, čime je izbegnut sudar.

Na Sl. 5.76 prikazane su promene ukupne opasnosti kretanja prvog i drugog vozila tokom sekvence. Takođe, na slici su prikazani nivoi (obazrivo, upozorenje i opasnost) na osnovu kojih podsistem za obaveštavanje generiše poruku o opasnosti kretanja.



Sl. 5.76 – Ukupna opasnost kretanja oba vozila

Za oba vozila može se primetiti da TDL raste kako se vozila približavaju konfliktnoj tački sve dok se kreću brzinama koje obećavaju pojavu sudara. Takođe, može se primetiti da vrednost TDL prvog vozila, koje se kreće većim brzinama, na šestoj i sedmoj slici sekvence prelazi čak i nivo „opasnost“. Sve prethodno navedeno može navesti na zaključak da ovako određena vrednost TDL je dobar indikator na osnovu koga podsistem za obaveštavanje može da generiše valjane poruke.

## 6. INTELIGENTNI SISTEM ZA UPRAVLJANJE SAOBRAĆAJEM BRODSKE PREVODNICE

U ovom poglavlju opisan je algoritam za detekciju plovila koji se koristi u on-line sistemu za lasersko praćenje saobraćaja u brodskoj prevodnici HE Đerdap 2. Sistem mora da obezbedi striktno otkrivanje položaja broda kako bi se sprečilo manipulisanje vratima brodske prevodnice dok je plovilo u zoni vrata. Detaljno je opisan koncept monitoringa, algoritam detekcije koji je implementiran u kompjuterskom programu koji vrši detekciju objekata u vidnom polju laserskih skenera. Algoritam detekcije je razvijen u modularnom obliku i sadrži brojne funkcionalne delove zasnovane na prepoznavanju oblika: deo za prepoznavanje smetnji, deo za prepoznavanje površine vode sa plutajućom prljavštinom, delom za prepoznavanje smetnji prouzrokovanih preletom jedne ptice ili jata ptica, dela za prepoznavanje smetnji prouzrokovanih meteorološkim uslovima, dela za prepoznavanje visokih talasa i dela za prepoznavanje plovila. Glavni delovi sistema za nadzor su: infracrveni laserski skeneri, kontroleri, industrijski PC, razvijeni softver sa implementiranim algoritmom detekcije, baza podataka i SCADA interfejs. Ovaj monitoring sistem ima ključnu ulogu u održavanju bezbednosti vodenog saobraćaja, preventivnom održavanju i izbegavanju oštećenja plovila u zonama vrata brodske prevodnice. Implementacija algoritma detekcije je značajno poboljšala karakteristike sistema za praćenje. Sistem uspešno otkriva sva plovila, dok je broj lažnih otkrića zanemarljiv.

Tab. 6.1 – Tabela korišćenih oznaka

$S_i^A, S_i^B$	$i$ – broj vrata, $S$ – laserski skener, $A, B$ – skeneri po jednim vratima,
$C_i$	$i$ – broj vrata, $C$ – ulazno/izlazni kontroler,
$MRV$	Matrica očitanih vrednosti (Matrix of Read Values)
$RSSI$	Indikacija jačine primljenog signala (Received Signal Strength Indication)
$e$	Eho indeks
$e_{max}$	Maksimalna vrednost eho indeksa ( $e_{max}=5$ )
$i$	Ugaoni indeks
$i_{max}$	Maksimalna vrednost ugaonog indeksa
$\Delta\varphi$	Ugaona rezolucija ( $0.5^\circ$ )
$R_{max}$	Širina prevodnice (40m)
$R_i^e$	Razdaljina $e$ -tog primljenog ehoa
$GF$	Matrica globalnog polja (Global Field matrix)
$MMECRV$	Matrica višestruki-eho kompenzovanih vrednosti (Matrix Multi-Echo Compensated Read Values)
$RSSI_i^{raw,e}$	Neobrađena RSSI vrednost (može imati vrednost u opsegu [0,254])
$RSSI_i^e$	RSSI nakon eho kompenzacije
$\Delta R$	Rezolucija rastojanja (5cm)

$j_i^e$	Diskretizacioni indeks rastojanja $R_i^e$
$RSSI_{i,m}$	RSSI kao element GF
$FGF$	Filtrirano globalno polje (Filtered global field)
$T_{lp}$	Vremenska konstanta nisko-propusnog filtra prvog reda
$RSSI_{i,m}^{filtered}$	RSSI kao element FGF
$SDF$	Startno polje za odlučivanje (Start Decision Field)
$m$	Indeks razdaljine
$m_{max}$	Maksimalna vrednost indeksa razdaljine
$t_k$	$k$ -ti momenat očitavanja senzora
$TH$	Prag razmatranja RSSI
$EDF$	Krajnje polje za odlučivanje (End Decision Field)
$H$	Broj tačaka koje su zadovoljile kriterijum praga
$E_h$	$h$ -ta tačka koja je zadovoljila kriterijum praga
$J$	Broj segmenta prave izlomljene zatvorene linije
$L_j$	$j$ -ti segment prave izlomljene zatvorene linije
$V_j$	$j$ -to teme prave izlomljene zatvorene linije
$ZO$	Zona posmatranja (Zone of Observation)
$\varphi_{h,j}$	Ugao između $E_h$ i $L_j$
$R_a$	Poluprečnik unutrašnjeg kruga objekta tipa KRUG
$R_b$	Poluprečnik spoljašnjeg kruga objekta tipa KRUG
$FHL$	Objekat tipa PLUTAJUĆA HORIZONTALNA LINIJA (Floating Horizontal Line)
$Y_{mean}$	Srednja vrednost $y$ -koordinata svih tačaka
$\Delta Y_{max}^{abs}$	Širina “apsolutno dozvoljene zone” objekta tipa FHL
$\Delta Y_{max}^{con}$	Širina “uslovno dozvoljene zone” objekta tipa FHL
$P_k^{center}$	Centar objekta tipa ZABRANJENI KRUG
$R^{con}$	Poluprečnik objekta tipa ZABRANJENI KRUG
$\Delta Y_{mean}^{max}$	Maksimalno dozvoljeno odstupanje $Y_{mean}$

## 6.1. Uvod

On-line i real-time sistemi detekcije i metode merenja i algoritmi koji se koriste u svim sferama saobraćaja se ubrzano razvijaju tokom proteklih nekoliko decenija. Postoje brojne klasične i nove

metode i algoritmi koji su uključeni u daljinski nadzor, detekciju, navigaciju, praćenje i kontrolu aviona, vozova, vozila i plovila, a koji služe za modernizaciju i uvođenje novih tehnologija u svim granama saobraćaja, kao i za poboljšanje sigurnosti, pouzdanosti i ekonomske izvodljivosti u saobraćaju u celini [127], [128], [129], [130] i [131].

U ovom poglavlju prikazan je laserski stacionarni monitoring sistem za detekciju plovila u brodskoj prevodnici, kao i novo razvijeni detekcioni algoritam. Predloženi monitoring sistem je stand-alone tipa [131], zasnovan na daljinskoj detekciji pomoću laserskih skenera i prepoznavanju bilo koje vrste plovila u prevodnici sa mogućnošću kontinuiranog praćenja i detekcije bez prekida u saobraćaju. Sistem je instaliran na prevodnici HE Đerdap 2 na Dunavu (Sl. 6.1). Brodska prevodnica na HE Đerdap 2 je jednokomornog tipa.



Sl. 6.1 - Prevodnica hidroelektrane Đerdap 2 na Dunavu (zumirana slika u desnom gornjem uglu prikazuje baržu u prevodnici)

Istraživanja prikazana u ovoj disertaciji predstavljaju napor konstruktora da osiguraju striktno otkrivanje prisustva broda kako bi se spriječila manipulacija vratima dok se plovilo nalazi u zoni vrata. Više od jednog incidenta se dogodio u kojima je nastala materijalna šteta u situacijama kada su aktivirana vrata dok je brod (turistički brod) bio u zoni kapije. Pri tome je došlo do oštećenja i broda i vrata. Uvođenje sistema za laserski monitoring sprečava takve nesreće i podiže nivo bezbednosti tokom ciklusa prevođenja plovila u prevodnici HE Đerdap 2 na Dunavu (srpska strana postrojenja). Sistem je implementiran u praksi i već nekoliko godina u neprestanoj primeni.

Brodске prevodnice su strateški objekti koji se nalaze na plovnim putevima reka i rečnih i morskih kanala kroz koje se odvija vodeni saobraćaj. Kao vitalni objekti, brodske prevodnice imaju na sebi ugrađene brojne nadzorne i sigurnosne sisteme. Pomenuti sistemi služe, kako za podizanje nivou sigurnosti, tako i za potrebe regulacije vodenog saobraćaja koji se odvija kroz njih [132] i [133].

Na hidroelektrani Đerdap 2 postoje dve brodske prevodnice, i to jedna na srpskoj strani hidroelektrana i jedna na rumunskoj strani. Njihova uloga je da obezbede nesmetan protok rečnog saobraćaja plovnim putem Dunava.

Daljinski nadzorni sistemi, koji rade u realnom vremenu, su već niz godina prisutni u svim granama saobraćaja. Sistem daljinskog nadzora brodske prevodnice služi za automatizovan, daljinski i besprekidni nadzor zauzetosti zone gornjih i donjih vrata brodske prevodnice. Konkretno, pomenuti sistem za detekciju brodova treba da obezbedi detekciju prisustva plovila u zoni gornjih i donjih vrata (sa obe strane vrata). Na ovaj način se podiže pouzdanost manipulacije vratima i izbegava moguća greška usled pokretanja vrata dok je plovilo u nebezbednoj zoni manipulacije (previše blizu vrata ili iznad njih) [132].

Postoji veliki broj detekcionih i mernih metoda i algoritama koji se danas koriste u pomenutim sistemima sa ciljem pouzdane detekcije vozila ili plovila, sa ciljem podizanja nivoa bezbednosti, pouzdanosti i ekonomske koristi. U ovoj disertaciji je opisan novorazvijeni detekcioni algoritam implementiran laserskom daljinskom nadzornom sistemu koji služi za besprekidno praćenje i

detekciju prisustva plovila u zonama vrata brodske prevodnice [132]. Sistem je realizovan tako da besprekidno radi i detektuje plovila u realnom vremenu bez uticaja na rečni saobraćaj koji se odvija kroz prevodnicu.

Kao detekcione/senzorske jedinice za nadzor gornjih i donjih vrata brodske prevodnice, upotrebljeni su laserski skeneri (LMS 511 - proizvođač SICK) [7]. Laserski skeneri su postavljeni ispred i iza gornjih i donjih vrata tako da su im detekcione ravni paralelne sa poprečnim presekom prevodnice.

## **6.2. Pregled laserskih i vizuelnih sistema**

Prvi laserski monitoring i vizuelni sistem, dinamički modeli i detekcioni algoritmi za detekciju prepreka i pokretnih objekata u saobraćaju su uvedeni pre više od dvadeset godina [26], [27], [28] i [29].

Brojni monitoring sistemi bazirani na RADAR (Radio Detection And Ranging), LIDAR (LIght Detection And Ranging) i LADAR (LAser Detection And Ranging) se koriste za za detekciju brodova i čamaca na morima, rekama, lukama i prevodnicama [30], [31], [32], [33], [34], [35] i [36].

Moderni vizuelni sistemi upotrebljavaju napredne detekcione algoritme kako bi detektovali, identifikovali, pratili plovila i predviđali njihove putanje kretanja u realnom vremenu. Da bi se olakšalo praćenje, upotrebljavaju se inteligentni algoritmi koji pružaju informacije kao što su dužina, visina, tip plovila (klasifikacija broda), geografska širina, dužina, brzina, smer i vreme. Stereovizija se može koristiti za detekciju plovila [37]. Međutim, pozicioniranje i procena širine su daleko manje precizne od onih koje obezbeđuje laserski skener (netačnost se povećava kao funkcija udaljenosti od stereo senzora). Ipak, one se sprovode na značajnoj udaljenosti od objekta, gde jedan snimak ekrana može obuhvatiti više od jednog broda.

Osnovni princip stereo vizije je da projekcija 3D objekta ima jedinstveni par slike nastalih od dve kamere koje gledaju istu scenu sa različitih tačaka gledišta. 3D merenje stereovizijom koristi disparitet između leve i desne slike za izračunavanje udaljenosti objekta. Disparitet se smanjuje kako se udaljenost povećava, u poređenju sa osnovnom dužinom, tj. dužinom između dve kamere [37]. Prethodno navedeno čini stereovizijske sisteme neadekvatnim za rad na bliskim udaljenostima u prevodnicama. Slično tome, 3D LADAR detekcioni sistemi su neadekvatni za blisku ili kratku distancu u prevodnicama, jer su razvijeni za otkrivanje objekata na većim udaljenostima, tj. za detekciju objekata iz vazduha [38]. Takođe postoji niz vojnih 3D LADAR sistema (tj. Jigsaw LADAR Sensor Technology) koji se koriste za detekciju objekata, ali oni nisu prikladni zbog njihove visoke cene i složenosti.

Skora dostignuća u tehnologiji laserskih skenera ponudila su neke nove pristupe i rešenja za detekciju broda. Laserski skener može pružiti centimetarsko pozicioniranje objekata, kao i procenu širine i dubine, kada je strana objekta vidljiva [40]. Sistem za praćenje sa laserskim skenerima i novim algoritmom može se koristiti za detekciju položaja plovila u zonama prevodnice i analizu protoka saobraćaja. Tehnologija laserskih skenera je korisna za širok spektar primena [7], [41] i [43]. Glavne prednosti skenera su veliki ugao radnog polja posmatranja i udaljenosti od nekoliko metara do nekoliko stotina metara.

Laserski skeneri koriste laserske zrake koji se okreću rotirajućim ogledalom. Širina snopa se širi u horizontalnoj ravni, pri čemu se za svaku pojedinačnu tačku određuje rastojanje i vrednost energije refleksije. Pojedinačne tačke merenja se akumuliraju preko radnog polja posmatranja čime se formira potpuna ravan skeniranja. Skeneri koriste pulsne ili fazne metode. Prvi metod se zasniva na merenju vremenskog intervala između emisije laserskog impulsa i pulsa koji se ponovo prima. Drugi metod se zasniva na merenju fazne razlike odlazećeg talasa i talasa koji se reflektuje od objekta.

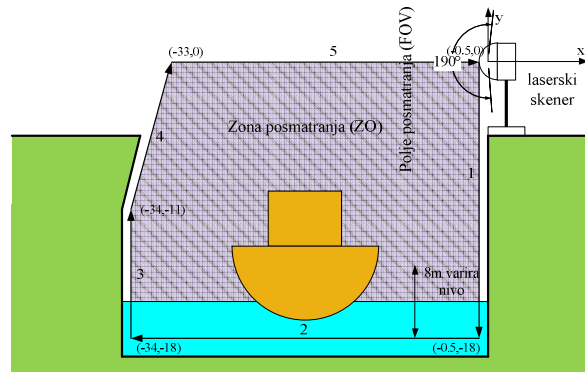


### 6.3. Koncept monitoring sistema

Koncept za daljinski nadzor prevodnice je razvijen da zadovolji sve aspekte praćenja vodenog saobraćaja kroz prevodnicu: punjenje i pražnjenje komore, manipulacija vratima, vreme dolaska i prolaza broda kroz vidno polje skenera arhiviranje događaja, štampanje izveštaja, praćenje ciklusa prolaza kroz prevodnicu, praćenje pojave smetnji koje algoritam odbacuje kao neželjeni objekat i td. Sistem je razvijen na bazi laserskih skenera koji predstavljaju kombinaciju predajnih i prijemnih elemenata u jedinstvenom kućištu, što ih čini kompaktnim industrijskim mernim uređajima. Sistem radi u potpuno automatskom režimu i rezultati (dvodimenzionalne konture na Sl. 27 i Sl. 29-32) dobijeni su u realnoj eksploataciji. Dvodimenzionalne konture formirane su podacima koje skeneri prikupljaju i obrađuju u algoritmu detekcije broda.

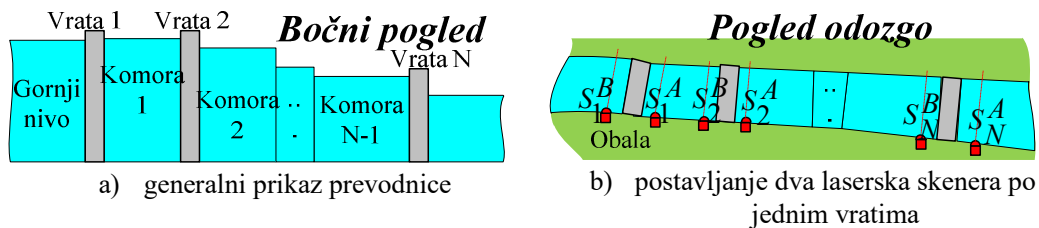
Cilj razvoja navedenog monitoring sistema je automatizacija i daljinski nadzor plovnog saobraćaja kroz sve vrste prevodnica, kao i sprečavanje potencijalnih šteta uzrokovanih pogrešnom manipulacijom vrata u situaciji kada se plovilo nalazi u zabranjenoj zoni vrata. Da bi se precizno definisala željena zona, bilo je potrebno formirati dve vertikalne ravni skeniranja na udaljenosti od tri metra ispred i iza svakih vrata prevodnice.

Primenjeni metod za detekciju plovila uključuje i formiranje detekcione ravni na kojoj se definiše zona posmatranja (ZO, Zone Of Observation). Zona posmatranja predstavlja u stvari zonu od interesa koja se nalazi u okviru polja posmatranja (FOV, Field Of View) laserskog skenera. Zona posmatranja se definiše na osnovu dimenzija brodske prevodnice i maksimalnog i minimalnog nivoa vode u prevodnici (Sl. 6.2).



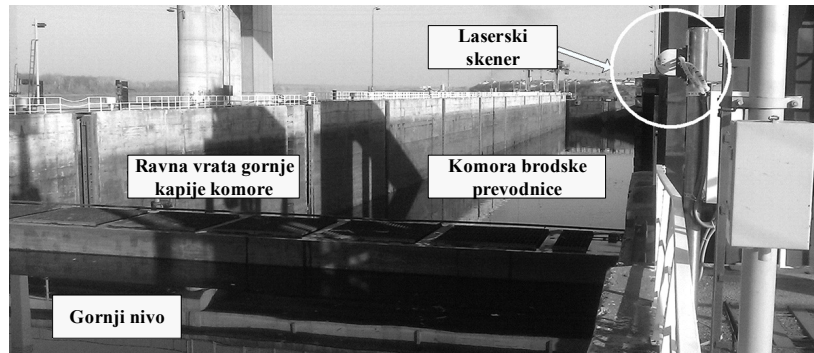
Sl. 6.2 - Polje posmatranja (FOV) laserskog skenera i definisana zona posmatranja (ZO)

Prostorni dizajn monitoring sistema prikazan je na Sl. 6.3, zona gornjih vrata (prevodnica hidroelektrane Đerdap 2 na Dunavu) prikazana je na Sl. 6.4, dok je koncept monitoring sistema prikazan na Sl. 6.5.

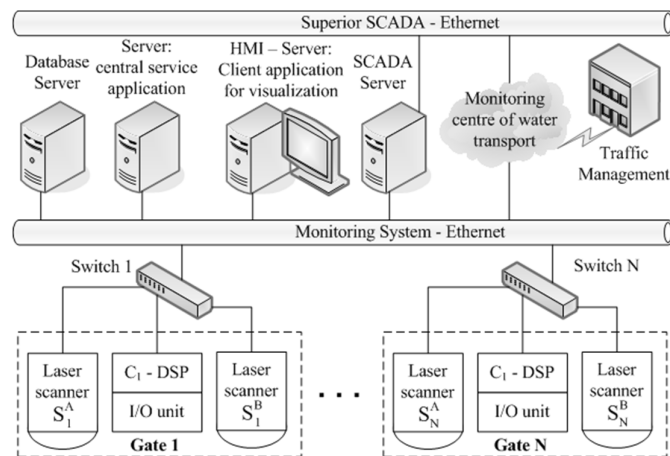


Sl. 6.3 - Prostorni dizajn monitoring sistema

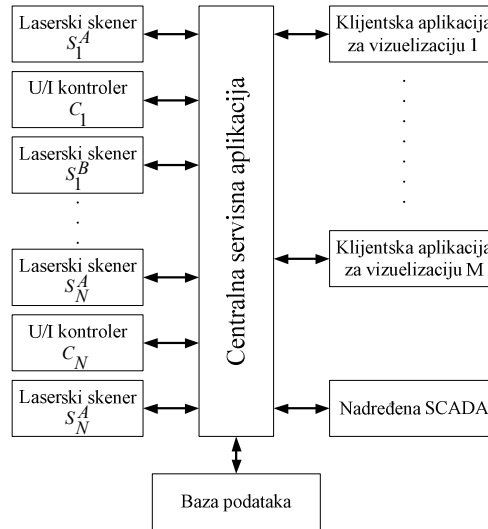
Glavni elementi (po jednim vratima) predloženog samostalnog monitoring sistema su: dva laserska skenera ( $S_i^A, S_i^B$ ,  $i$  – broj vrata,  $S$  – laserski skener, A, B – dva skenera po jednim vratima), kontroler sa ulazno/izlaznim modulima, industrijski PC sa touch-panel-om, razvijeni softver sa implementiranim detekcionim algoritmom i grafički korisnički interfejs (GUI, Graphical User Interface), baza podataka i interfejs ka SCADA aplikaciji. Glavni elementi sistema su: laserski skeneri, procesorska jedinica, kontrolna jedinica i računarska mreža. Računarska mreža se sastoji od četiri mrežna servera za: bazu podataka, centralnu servisnu aplikaciju, klijentsku aplikaciju za vizuelizaciju (HMI, Human-Machine Interface) i SCADA aplikaciju (Sl. 6.5). Sve aplikacije monitoring sistema komuniciraju TCP protokolom.



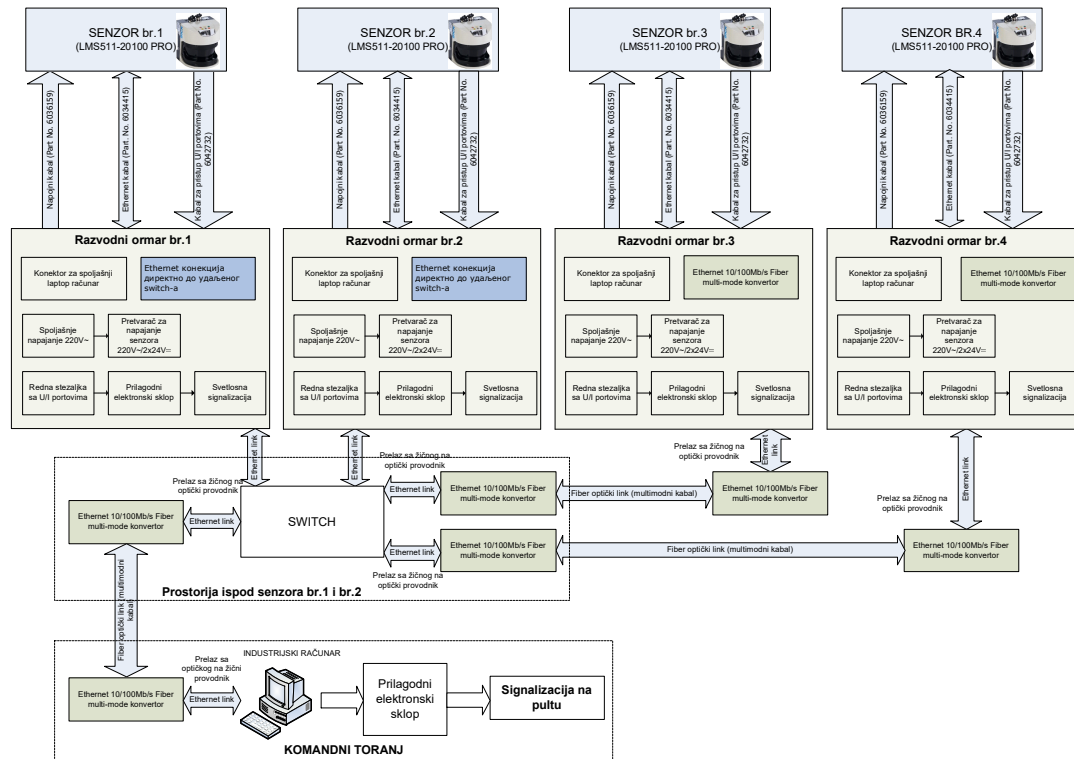
Sl. 6.4 - Zona gornjih vrata (prevodnica hidroelektrane Đerdap 2 na Dunavu)



Sl. 6.5 - Koncept monitoring sistema



Sl. 6.6 - Programska koncepcija



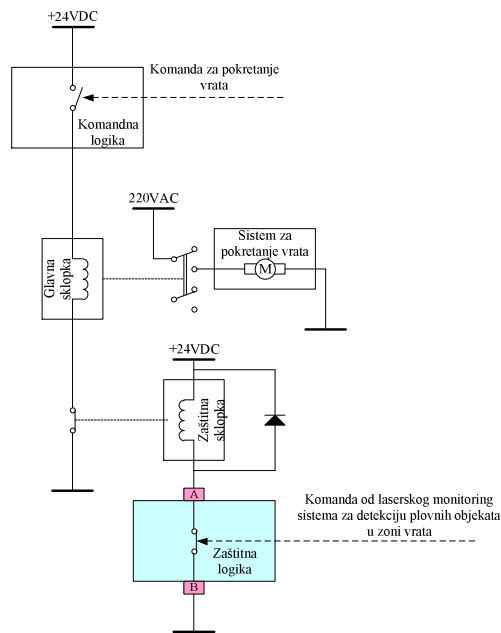
Sl. 6.7 - Detaljan prikaz elemenata monitoring sistema

### 6.3.1.1. Tehničko rešenje upravljanja vratima brodske prevodnice

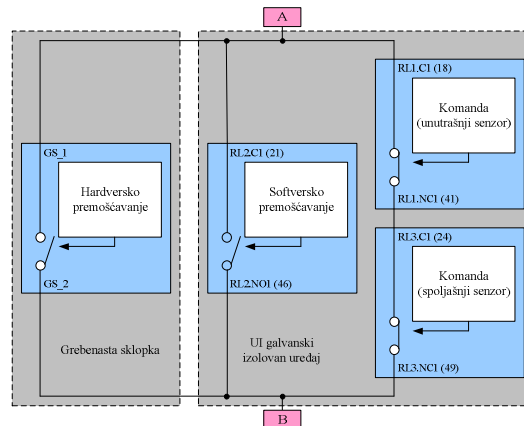
Logika upravljanja je slična za gornja i donja vrata. Razlika je u samoj konstrukciji vrata, gornja su iz jednog dela tzv. *ravna vrata*, dok se donja sastoje iz dva krila, tzv. *kosa dvokrilna vrata*.

Deo na šemi (Sl. 6.8), pod naziv “zaštitna logika” je deo laserskog nadzornog sistem i on služi da onemogući manipulisanje vratima dok se plovilo nalazi u vidnom polju laserskih skenera. Struktura zaštitne logike je data na Sl. 6.9 [132].

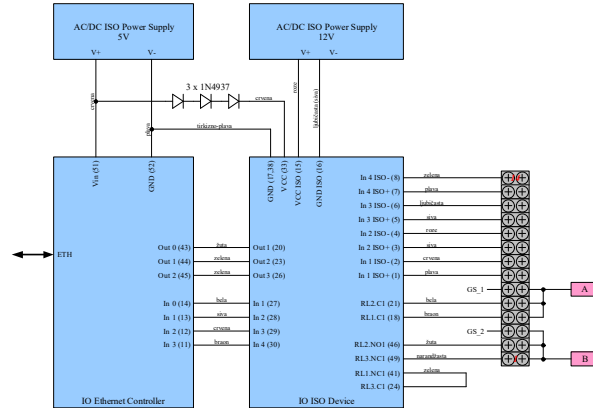
Ukoliko je plovni objekat u vidnom polju skenera, mikroprocesorska jedinica (Sl. 6.10 i Sl. 6.11) generiše signal koji aktivira zaštitnu sklopku koja prekida kolo glavne sklopke čime se onemogućava pokretanje hidrauličnog pogona, koji služi za pokretanje vrata prevodnice. Mikroprocesorsku jedinicu čine ethernet kontroler i ulazno/izlazni optički izolovan modul. Ona je povezana preko zasebnog komunikacionog interfejsa i optičkim kablom u lokalnu komunikacionu mrežu. Gornja i donja vrata prevodnice imaju ovakve odvojene nezavisne procesorske jedinice povezane u jedinstvenu lokalnu računarsko-komunikacionu mrežu zajedno sa centralnim industrijskim računarom. Pomenuti računar je industrijskog tipa i smešten je u komandnom centru. Komandni centar se nalazi u tornju brodske prevodnice i njime rukovodi kapetan rečne plovidbe.



Sl. 6.8 - Logička šema upravljanja vratima brodske prevodnice



Sl. 6.9 - Struktura zaštitne logike



Sl. 6.10 - Mikroprocesorsku jedinicu čine ethernet kontroler i ulazno izlazni (I/O) modul sa optički izolovanim kanalima



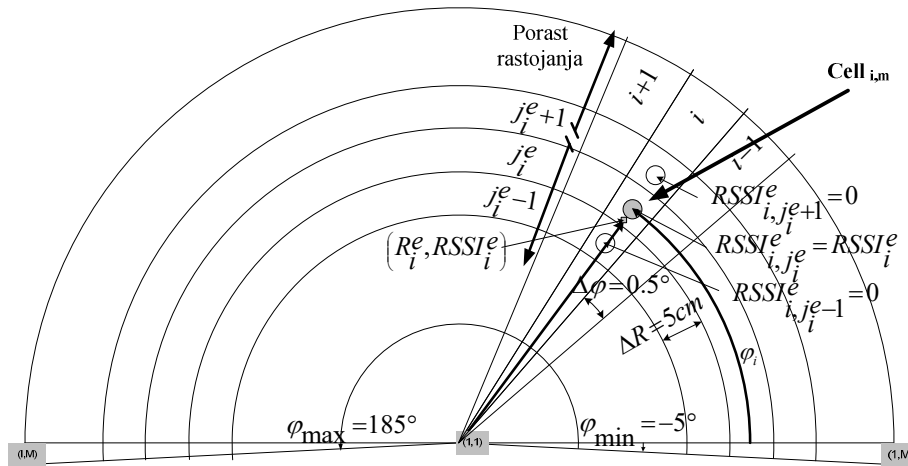
Sl. 6.11 - Na slici je dat prikaz procesorske jedinice: ethernet kontroler, U/I galvaniski izolovan modul, mrežni ruter, optički konvertor i dva modularna napajanja.

#### 6.4. *Procesiranje primljenih podataka*

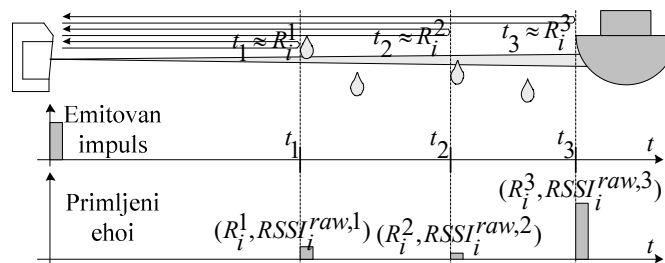
U pojedinačnom emitovanom snopu, svetlosna tačka ima merljivi prečnik koji se povećava što se više snop udaljava od laserskog skenera. U senzorima sa jednim impulsom, poželjno je da pojedinačne zrake preklapaju snopovi susednih zraka kako bi se poboljšala rezolucija senzora i povećale mogućnosti senzora za određivanje dometa i detekcije. Da bi se objekat mogao pouzdano detektovati, on mora jednom biti potpuno pogoden snopom [7].

Pošto se sistem monitoringa zasniva na laserskim skenerima, bilo je potrebno razviti algoritam koji zadovoljava sve zahteve vodenog saobraćaja i prolaza plovila kroz prevodnicu i odgovara nizu specifičnih zahteva. Posebni zahtevi u odnosu na algoritam odnose se na nadgledanje zauzimanja zona ispred i iza svakih vrata, sa ciljem podizanja nivoa bezbednosti i sprečavanja manipulacije vrata dok se plovilo nalazi u nadgledanim zonama. Plovila u prevodnici su dovoljnih dimenzije da zadovolje zahtjeve koje diktira disperzija laserskog snopa i njihova rezolucija. Problemi se javljaju kod otkrivanja i prepoznavanja neželjenih objekata u cilju njihove eliminacije. Ovo može uključivati ptice, prljavštinu koja pluta na površini vode ili dim koji potiče od brodskih motora. Česte smetnje izazivaju vremenski elementi, kao što su visoki talasi usled vetra, jaka kiša, gusta magla, grad i sneg. Takve elemente treba prepoznati po algoritmu i isključiti iz dalje obrade.

Laserski zraci formiraju ravan detekcije (Sl. 6.12). Detekcija objekata se postiže analizom back-scattering-a, koji se detektuje povratnim zračenjem od objekta pogođenog laserskim snopom. Osnovni parametri koji definišu detektovani signal u laserskom skeneru su: dolazni ugao laserskog snopa  $\varphi$ , intenzitet detektovanog signala RSSI. Detektovani signal RSSI može sadržati do pet ( $e_{max}=5$ ) povratnih signala koji se nazivaju i ehoi (Sl. 6.13). Pojava više od jednog eho signala dolazi kao posledica delimične refleksije emitovanog zračenja koje se javlja kada tok laserskog zračenja delimično udari u mali objekat (kapi kiše, pahuljice snega, insekti i td.).



Sl. 6.12 - Laserski snopovi formiraju detekcionu ravan



Sl. 6.13 - Primer trostrukog eho signala

Centralna servisna aplikacija (Sl. 6.5) neprestano šalje upite laserskom skeneru i prihvata odgovore na osnovu kojih se formira matrica očitanih vrednosti  $MRV$  (*Matrix of Read Values*) sa uređenim parovima kao elementima (1):

$$MRV = \left[ (R_i^e, RSSI_i^{raw,e}) \right]_{i_{max} \times e_{max}} \quad (1)$$

gde je  $R_i^e$  rastojanje  $e$ -tog ehoa,  $R \in [0m, R_{max}]$  ( $R_{max}$  je širina prevodnice),  $i$  je ugaoni indeks kojim se implicitno definiše ugao laserskog snopa ( $i_{max}=380$ ),  $e$  je eho indeks (laserski skener detektuje do pet eho signala,  $e_{max}=5$ ) i  $RSSI_i^{raw,e}$  je  $RSSI$  (Received Signal Strength Indication) pre eho kompenzacije,  $RSSI \in [0, 254]$ .

### 6.4.1. Strategija proračuna RSSI signala

Laserski skener ima mogućnost da generiše višestruke RSSI vrednosti reflektovanog signala. Ova činjenica se koristi za unapređenje detekcionog algoritma. U stvari, u zavisnosti od vremenskih uslova, algoritam vrši izračunavanje RSSI signala i bira jednu od tri strategije za otkrivanje plovila sa manje lažnih detekcija. Tamo gde postoji nekoliko odjeka, intenzitet signala koji se reflektuje od detektovanog objekta biće manji nego ako nema eha. Uzimajući u obzir gore navedeno, algoritam omogućava kompenzaciju pojave odabirom jedne od sledećih strategija (sve strategije se odnose na RSSI računanje po jednom laserskom snopu):

- 1) *RSSI* signal se formira dodavanjem svih dolaznih eho signala signalu detektovanom od objekta:

$$RSSI_i^{raw,e} \quad \underline{\text{Echo Compensation}} \quad RSSI_i^e = \sum_{k=1}^{k=e} RSSI_i^{raw,k} \quad (2)$$

- 2) *RSSI* se formira uzimajući u obzir samo poslednji dolazni detektovani signal i zanemarujući bilo koje eho signale koji su možda stigli prethodno:

$$RSSI_i^{raw,e} \quad \underline{\text{Echo Compensation}} \quad RSSI_i^e = \begin{cases} 0 & e < e_{last} \\ RSSI_i^{raw,e} & e = e_{last} \end{cases} \quad (3)$$

- 3) *RSSI* signal se formira kompenzacijom zadnjeg dolaznog signala detektovanog od objekta dodavanjem prethodnih eho signala:

$$RSSI_i^{raw,e} \quad \underline{\text{Echo Compensation}} \quad RSSI_i^e = \begin{cases} 0 & e < e_{last} \\ \sum_{k=1}^e RSSI_i^{raw,k} & e = e_{last} \end{cases} \quad (4)$$

Na Sl. 6.14 prikazan je algoritam za selekciju strategije računanja vrednosti *RSSI* signal.



Sl. 6.14 - Algoritam za selekciju strategije na osnovu koje se računaju *RSSI* vrednosti

Laserski monitoring sistem je projektovan da koristi Strategiju 3 kao podrazumevanu (default). Sistem kontinuirano analizira ulazne podatke iz sva četiri laserska skenera. Ako signali ukazuju na prisustvo broda u vidnom polju svakog od senzora u intervalu od 1 minuta (što je nemogući scenario), sistem zaključuje da su signali uzrokovani ekstremnim vremenskim uslovima sa visokim talasima i automatski se prebacuju na Strategiju 1 ili Strategiju 2. Izbor između dve strategije se vrši na osnovu prostorne analize tačaka (tj. talasi se mogu pojaviti samo u donjem segmentu vidnog polja skenera). Tamo gde nema značajnih atmosferskih padavina i nema ekstremno visokih talasa (viših od 1m), primenjuje se treća strategija jer se očekuje mali broj eho signala. U uslovima teških atmosferskih padavina i magle, primenjuje se prva strategija. Druga strategija odgovara uslovima u kojima postoje visoki talasi (viši od 1m).

Upotrebom vrednosti *RSSI* signala (prikupljenih direktnim očitavanjem laserskih skenera) i primenom trenutno aktivne strategije formira se matrica *MMECRV* (*Matrix Multi-Echo Compensated Read Values*):

$$MMECRV = \left[ (R_i^e, RSSI_i^e) \right]_{i_{\max} \times e_{\max}} \quad (5)$$

U cilju pripreme podataka za dalju digitalnu obradu i filtriranje, potrebno je izvršiti diskretizaciju duž distance *R* (Sl. 6.12), a time i ekspanziju *MMECRV* u novu matricu *GF* (*Global Field Matrix*):

$$GF = \left[ RSSI_{i,m} \right]_{i_{\max} \times m_{\max}} \quad (6)$$

Globalno polje *GF* predstavljeno je matricom dimenzija  $i_{\max} \times m_{\max}$  čiji su elementi u stvari *RSSI* vrednosti:

$$RSSI_{i,m} = \begin{cases} 0 & , m \neq j_i^e \\ RSSI_{i,j_i^e}^e & , m = j_i^e \end{cases} \quad (7)$$

$$j_i^e = \text{round}(R_i^e / \Delta R) + 1$$

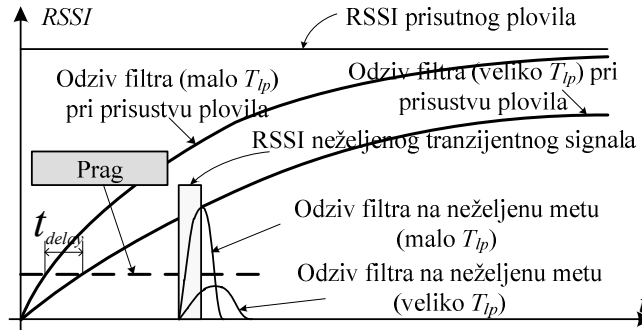
gde *m* predstavlja redni broj ćelije u redu, a  $m_{\max}$  redni broj najudaljenije ćelije. Sl. 6.12 prikazuje matricu ćelija, gde je svaka ćelija  $Cell_{i,m}$  definisana ugaonim indeksom *i* i indeksom *m* koji je rezultat diskretizacije rastojanja duž jednog laserskog snopa.

#### 6.4.2. Filteriranje globalnog polja (GF)

U cilju suzbijanja interferencijskih signala (dim broskog motora, magle, snijega, tuče, kiše, ptica, valova ...) čiji je intenzitet nedovoljan za predstavljanje plovila, uveden je filtarski deo algoritma.

Matrica niskopropusnih filtera sa podesivom vremenskom konstantom ( $T_{ip}$ ) filtrira sve dolazne signale s ciljem odbacivanja interferencijskih signala čiji intenzitet ne zadovoljava postavljeni prag (Sl. 6.15). Izbor dovoljno velike vrednosti vremenske konstante osigurava da se kratkoročne smetnje odbace. S druge strane, izbor prekomerne vremenske konstante može dovesti do kašnjenja u otkrivanju plovila ( $t_{\text{delay}}$ ). Stoga bi izbor vremenske konstante trebao proizaći iz kompromisa između dva gore spomenuta suprotna zahtjeva.

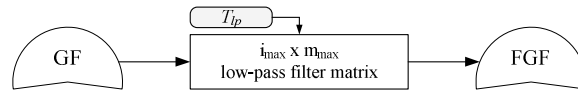




Sl. 6.15 - Odziv nisko-propusnog filtra jednog elementa globalnog polja (GF)

Za filtriranje koristi se modifikovani filter prvog reda (8) iz razloga što vreme između dva očitavanja laserskog senzora u opštem slučaju nije jednako ( $t_{k+1}-t_k \neq const$ ). Razlog tome je što se komunikacija odvija preko lokalne mreže (LAN, Local-Area Network) kao deljenog resursa i što vreme procesiranja telegrama primljenog od laserskog skenera nije striktno definisano. Rezultati filtriranja se nalaze u filtriranom globalnom polju (FGF, Filtered Global Field) (Sl. 6.16).

$$RSSI_{i,m}^{filtered}(t_{k+1}) = (1 - e^{-\frac{t_{k+1}-t_k}{T_{lp}}}) \cdot (RSSI_{i,m}(t_{k+1}) - RSSI_{i,m}^{filtered}(t_k)) + RSSI_{i,m}^{filtered}(t_k) \quad (8)$$



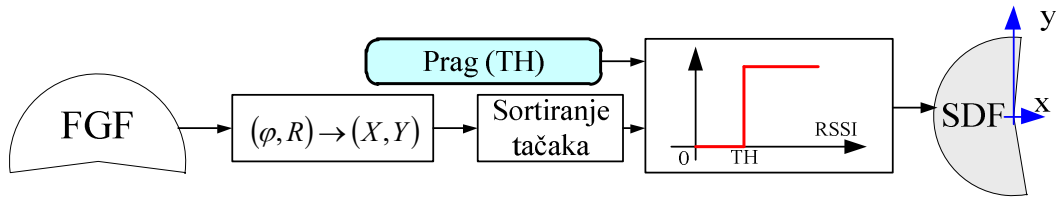
Sl. 6.16 - Formiranje filtriranog globalnog polja (FGF)

Uvođenje mreže niskopropusnih filtera omogućilo je automatsko eliminisanje smetnji usled malog broja tačaka i kratkotrajne pojave pojedinačnih tačaka (ptice, grad ...) koje ne mogu predstavljati plovilo.

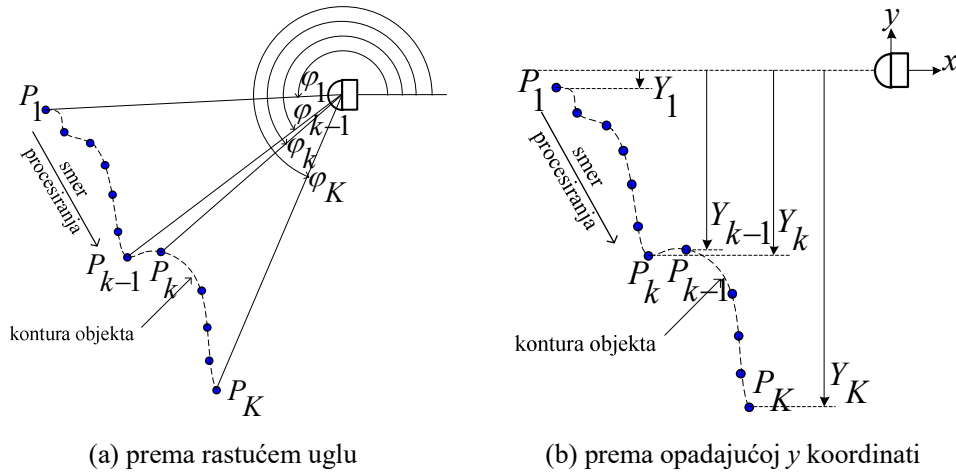
### 6.4.3. Startno polje za odlučivanje (SDF)

Svi signali čiji je intenzitet veći od definisanog praga (TH), nakon filtriranja GF, formiraju novu matricu SDF (*Start Decision Field*) (Sl. 6.17).

Sve tačke u matrici imaju  $RSSI > TH$  i posledično postaju kandidati za prepoznavanje broda ili, u isto vreme, postaju kandidati za prepoznavanje neželjenih smetnji. SDF se formira iz FGF polja pretvarajući tačke iz polarnog koordinatnog sistema u pravougaoni koordinatni sistem i sortirajući ih prema jednoj od postojećih strategija. Postoje dve dostupne strategije sortiranja: prema rastućem uglu (Sl. 6.18a) i prema opadajućoj  $y$  koordinati (Sl. 6.18b).



Sl. 6.17 - Formiranje startnog polja za odlučivanje (SDF)



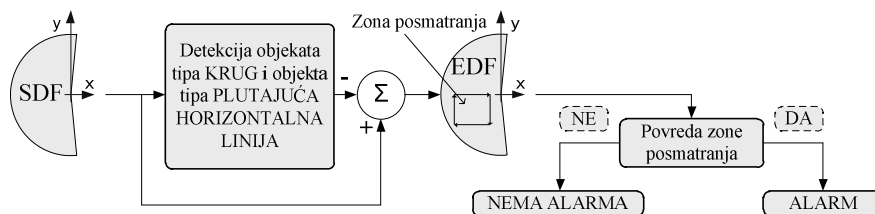
Sl. 6.18 - Strategije sortiranja tačaka

## 6.5. Detekcioni algoritam plovila

### 6.5.1. Strategija donošenja odluka

Prilikom odlučivanja o prirodi tačaka koje su se pojavile u vidnom polju laserskog skenera, potrebno je izvršiti dalju analizu njihove korelacije sa ciljem odvajanja tačaka koje potiču od plovila od tačaka koje bi mogle nastati iz drugih (neželjenih) pojava kao što su: variranje nivoa vode u komorama prevodnice, atmosferske padavine, magla, dim brodskih motora, ptice, visoki talasi, plutajući otpad i td.

Da bi se što više smanjila detekcija lažnih signala, razvijen je algoritam za detekciju objekta (plovila) (Sl. 6.19). Tačke dobijene prepoznavanjem lažnih objekata nakon primene algoritma isključuju se iz startnog polja za odlučivanje (SDF). Na taj način se formira krajnje polje za odlučivanje (EDF). Tek tada, ako se bilo koja od tačaka EDF-a nalazi u zoni posmatranja, smatra se da je došlo do „povrede zone posmatranja od strane plovila“.



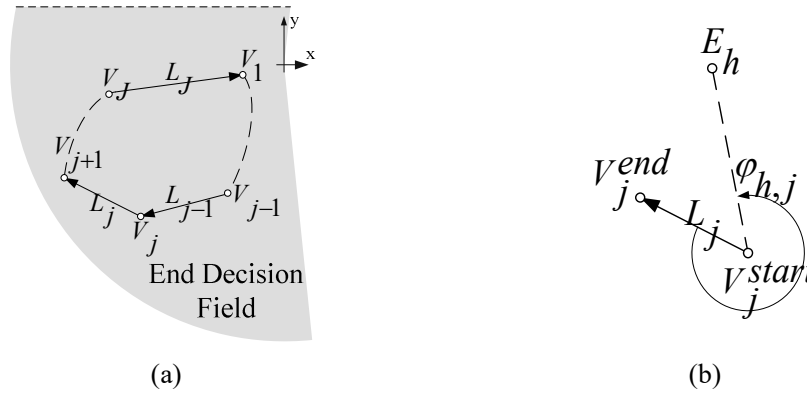
Sl. 6.19 - Detekcioni algoritam plovila

Primena algoritma daje EDF (End Decision Field) kao rezultat koji se može predstaviti vektorom čija je dužina  $H$  (9):

$$EDF = [E_h]_{H \times 1} = [(X_h^{RSSI > TH}, Y_h^{RSSI > TH})]_{H \times 1} \quad (9)$$

gde su  $X_h$  i  $Y_h$  koordinate  $h$ -te tačke prošla kriterijum praga. Zona posmatranja definisana je kao prava izlomljena zatvorena linija (Sl. 6.20a) koja se može predstaviti vektorom (Sl. 6.20b) dužine  $J$  čiji elementi su tačke ili segmenti zatvorene linije (10):

$$[(X_j, Y_j)]_{J \times 1} = [V_j]_{J \times 1} \quad \text{or} \quad [(V_j^{start}, V_j^{end})]_{J \times 1} = [L_j]_{J \times 1} ; \quad \begin{matrix} V_j^{start} = V_j \\ V_j^{end} = V_{\text{mod}(j+1, J)} \end{matrix} \quad (10)$$



Sl. 6.20 - Definicija zone posmatranja u EDF kao sekvenca segmenata prave izlomljene zatvorene linije

Za određivanje događaja „povreda zone posmatranja“ potrebno je proračunati uglove između svake tačke iz EDF i svakog segmenta zone posmatranja (OZ), prema (11, 12):

$$\varphi_{h,j} = \arctan\left(\frac{Y_h^{RSSI > TH} - Y_j^{start}}{X_h^{RSSI > TH} - X_j^{start}}\right) - \arctan\left(\frac{Y_j^{end} - Y_j^{start}}{X_j^{end} - X_j^{start}}\right) \quad (11)$$

$$\text{Ako } (0 < \varphi_{h,j} < \pi \text{ for } \forall 1 \leq h \leq H, \forall 1 \leq j \leq J) \text{ tada (nema povrede ZO)} \quad (12)$$

Tačke koje ispunjavaju uslov (12), ne pripadaju zoni posmatranja (ZO) (Sl. 6.19). Ukoliko su sve tačke izvan zone posmatranja tada nema „povrede zone posmatranja“ i sistem smatra da nema prisustva plovila u zoni vrata.

### 6.5.2. Detekcija oblika tipa “krug” i oblika tipa “plutajuća horizontalna linija”

Grupisanje u cilju klasifikacije potencijalnih objekata je kompleksan poduhvat [134] koji zahteva dugoročna merenja i formiranje baze podataka potencijalnih oblika.

Da bi se izbegao takav pristup, razvijen je algoritam inspirisan tehnikom za statističko prepoznavanje oblika, koja se naziva *opcija odbacivanja u testiranju hipoteza* [135]. Analizirajući sve otkrivene oblike, algoritam bira samo neželjene oblike i tretira sve ostale kao plovila. Svi

neželjeni oblici su klasifikovani u jedan od dva tipa oblika: „krug“ (circle) i „plutajuća horizontalna linija“ (FHL, Floating Horizontal Line). Ovo služi da se izbegne komplikovana analiza velikog broja oblika koji odgovaraju plovilima. Osnovni doprinos razvoju algoritma detekcije ogleda se u otkrivanju neželjenih signala i objekata i njihovoj definiciji u skladu sa prostornim obrascem i brojem tačaka koje ih svrstavaju u jednu od dve odgovarajuće kategorije - krug ili plutajuća horizontalna linija. Svi ostali otkriveni oblici koji ne pripadaju jednoj od dve kategorije predstavljaju plovila, i u takvim slučajevima laserski monitoring sistem blokira mogućnost manipulisanja vratima sve dok je plovilo u vidnom polju laserskih skenera.

Detekcija oblika tipa „krug“ odgovara otkrivanju izolovane tačke ili grupe tačaka. Ukratko, tačka ili grupa tačaka koje su okružene kružnicom čiji je poluprečnik  $R_a$  i ako spoljni prsten čiji je unutrašnji poluprečnik  $R_a$  i njegov spoljni poluprečnik  $R_b$  ne sadrži druge tačke, smatra se da je detektovan oblika tipa „krug“.

U literaturi su opisani primeri metoda za detekciju slomljene ravne linije [134]. Algoritam za detekciju ne koristi nijednu metodu za otkrivanje slomljene ravne linije jer uključuje detekciju oblika koji je unapred prepoznat kao linija preseka dve okomite ravni, vertikalne ravni skeniranja i površine vode.

Osnovni problem u analizi rezultata odnosi se na slučajeve u kojima se tačke pojavljuju u zoni posmatranja uprkos odsustvu broda. Ove tačke ili grupe tačaka mogu biti rezultat sledećih pojava: kiša, grad, magla, ptice, dim brodskih motora, visoki talasi i plutajuća prljavština.

Algoritam detekcije (Sl. 6.21) je razvijen sa ciljem otkrivanja gore navedenih fenomena. Ako je detektovan određeni broj tačaka, u definisanoj zoni posmatranja koja je deo vidnog polja (FOV, Field Of View) laserskog skenera, uprkos prisustvu gore navedenih fenomena, algoritam zaključuje da je plovilo prisutno.



Sl. 6.21 - Detekcioni algoritam

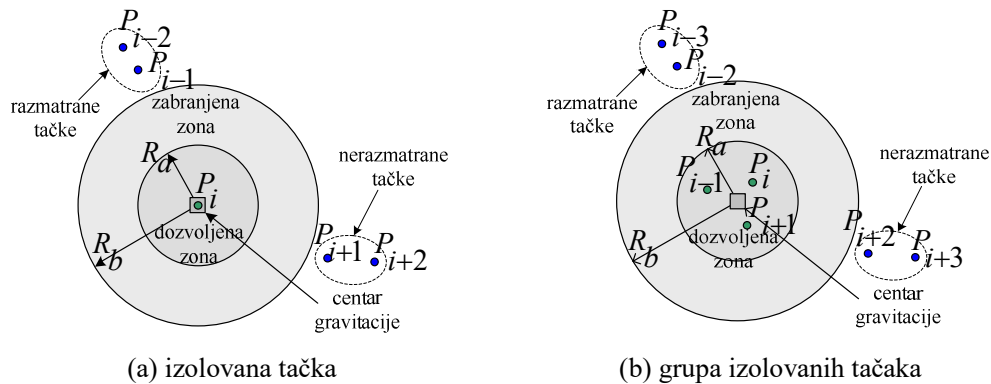
Dva algoritma su razvijena sa ciljem prepoznavanja tačaka ugrađenih u SDF polje i koje pripadaju oblicima tipa „krug“ ili obliku tipa FHL. Ako tačke pripadaju jednom od ovih oblika, to ukazuje da one nisu rezultat prisustva plovila koja ulaze u vidno polje laserskih skenera, već iz jedne od gore navedenih neželjenih pojava. Stohastički oblici koji odgovaraju talasima ili atmosferskim padavinama se određuju u segmentu algoritma koji se naziva *algoritam za prepoznavanje oblika tipa „krug“*. Plutajuća prljavština predstavlja ravnu liniju u ukupnom detektovanom signalu i njeno prepoznavanje se odvija u segmentu pod nazivom *algoritam za prepoznavanje FHL*.

### 6.5.2.1. Detekcija objekta tipa „krug“

Algoritam analizira sve dolazne tačke i sve tačke iz SDF polja. SDF tačke se mogu izolovati ili formirati grupe tačaka. Kriterijumi za definisanje oblika određeni su specifičnim zonama koje okružuju tačke ili grupe tačaka koje se analiziraju i grafički su prikazane na Sl. 6.22a i Sl. 6.22b. Zone su definisane njihovim centrima i radijusima. Ako je uključeno više tačaka, centar kruga se izračunava kao prosečna vrednost njihovih koordinata.

Segment algoritma za prepoznavanje oblika tipa „krug“ je razvijen na principu koji uključuje formiranje kružnih zona oko detektovanih tačaka. Oko svake detektovane tačke formira se kružna zona sa dve sfere (dva koncentrična kruga). Jedna zona može da sadrži više tačaka koje odgovaraju kriterijumima rastojanja definisanim poluprečnicima. Dozvoljena zona definisana je unutrašnjim krugom (poluprečnik  $R_a$ ), a zabranjena zona je definisana razlikom između unutrašnjeg kruga (poluprečnik  $R_a$ ) i spoljašnjeg kruga (poluprečnik  $R_b$ ). Ako se tačke ne mogu grupisati u jedan ili više prepoznatih objekata tipa „krug“ (broj krugova je definisan parametrom *maksimalan broj objekata tipa „krug“*, Sl. 6.21), proverava se njihova eventualna pripadnosti objektu tipa FHL.

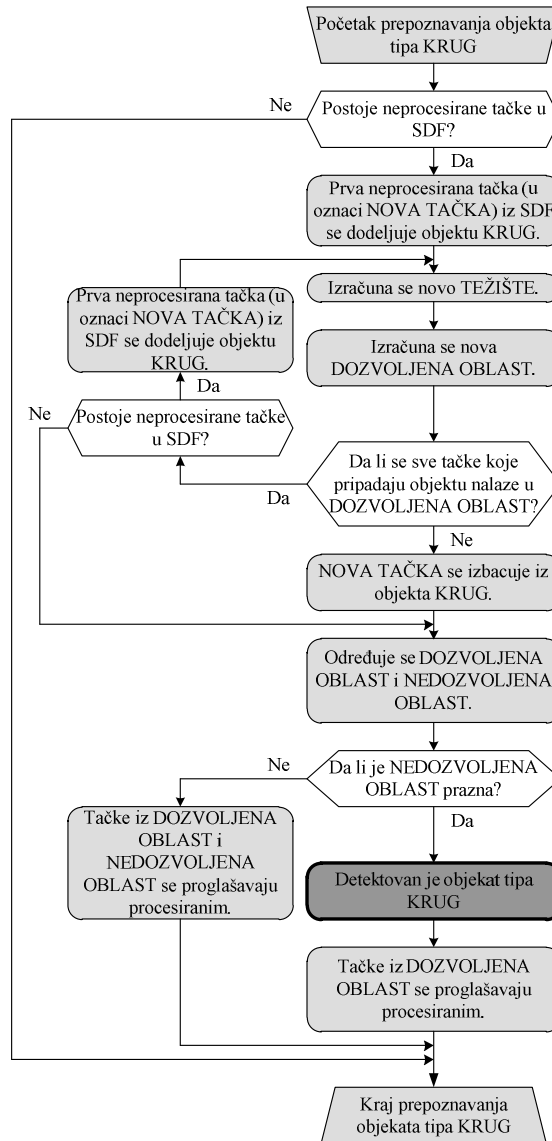
Pseudo kod za detekciju objekata tipa „krug“ prikazan je u Tab. 6.2., a dijagram toka dela detekcionog algoritma za prepoznavanje oblika tipa „krug“ prikazan je na Sl. 6.23.



Sl. 6.22 - Prepoznavanje dozvoljenog objekta tipa „krug“

Tab. 6.2 - Pseudo kod za detekciju objekta tipa „krug“

Korak	Operacija
1	Početak prepoznavanja objekta tipa „krug“.
2	Dodavanje nove tačke i računanje novog centra gravitacije
3	Jesu li sve tačke u unutrašnjem krugu: Da – prelazak na korak 2 Ne – prelazak na korak 4
4	Poslednja dodata tačka se izbacuje iz razmatranja i računa se centar gravitacije.
5	Da li je spoljašnji prsten prazan? Da – prepoznat je objekat tipa „krug“. Prelazak na korak 6. Ne – prelazak na korak 6.
6	Kraj prepoznavanja objekta tipa „krug“.



Sl. 6.23 - Detekcioni algoritam – dijagram toka dela za prepoznavanje oblika tipa „krug“

### 6.5.2.2. Detekcija objekta tipa “plutajuća horizontalna linija” (FHL)

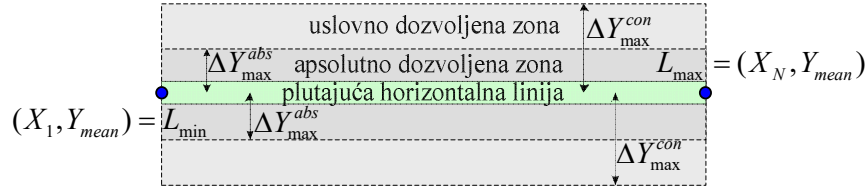
Algoritam za prepoznavanje FHL (nečistoće koje plutaju na površini vode) i detekciju visokih talasa razvijen je posebno. Ovaj segment algoritma detekcije razvijen je na osnovu analize odstupanja  $y$ -koordinata tačaka od srednje vrednosti tačaka koje nisu obuhvaćene oblicima tipa „krug“. Tačke koje nisu uključene u oblike tipa „krug“ čine grupu uređenih parova sortiranih prema rastućim vrednostima  $x$ -koordinata iz preostalih SDF tačaka koje se nalaze u zoni definisanoj parametrima:

$$\{(X_1, Y_1), \dots, (X_N, Y_N)\} \quad (13)$$

Na osnovu toga izračunava se prosečna vrednost y-koordinate svih tačaka:

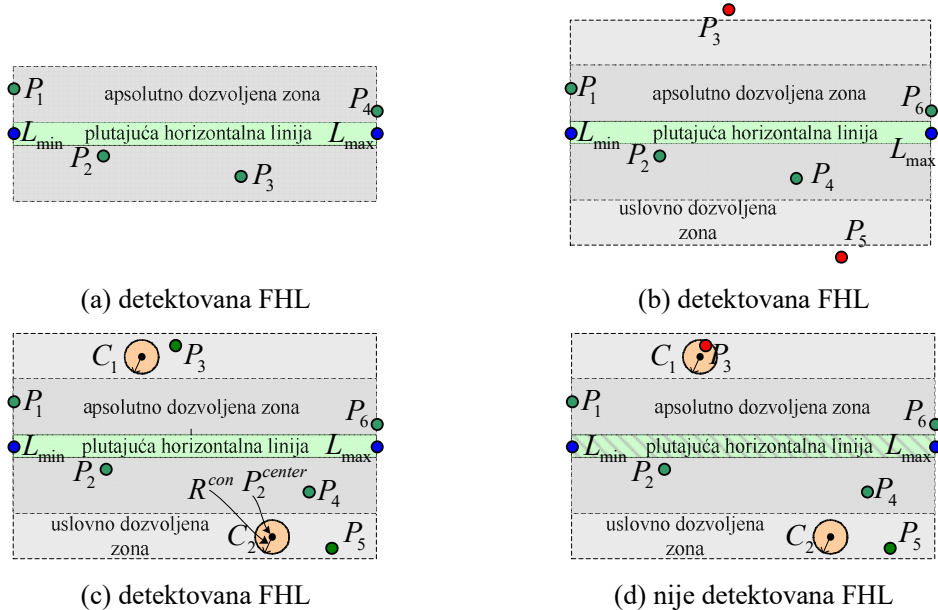
$$Y_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Y_n \quad (14)$$

Tako postavljena horizontalna linija formira potencijalni oblik tipa FHL. Da bi se postavio kriterijum za prepoznavanje oblika, potrebno je formirati “apsolutno dozvoljenu zonu” i “uslovno dozvoljenu zonu” (Sl. 6.24).



Sl. 6.24 - Apsolutno i uslovno dozvoljena zona

Mogući slučajevi prepoznavanja oblika tipa FHL prikazani su na Sl. 6.25: (a) sve tačke se nalaze u dozvoljenoj zoni i objekat tipa FHL je detektovan, (b) nekoliko tačaka su izvan obe zone, ali ipak je detektovan objekat tipa FHL, (c) sve tačke se nalaze u dozvoljenim zonama i detektovan je objekat tipa FHL zato što tačke  $P_3$  i  $P_5$  ne pogađaju zabranjene krugove  $C_1$  i  $C_2$ , (d) sve tačke su u dozvoljenim zonama, jedan objekat tipa „zabranjeni krug“  $C_1$  je pogođen tačkom  $P_3$  i zbog toga objekat tipa FHL nije detektovan.



Sl. 6.25 - Mogući slučajevi prepoznavanja objekta tipa FHL

Prepoznavanje talasa se vrši na osnovu prethodnog algoritma za prepoznavanje objekta tipa FHL, uz pomoć dodatnih objekata tipa „zabranjeni krug“ (Sl. 6.25c i Sl. 6.25d -  $C_1$  i  $C_2$ ), kojima se detaljnije definišu tačke koje stvaraju talasi.

Na kraju svakog pokušaja prepoznavanja dozvoljenog objekta tipa FHL, vrši se grupisanje objekata tipa "zabranjeni krug". Centri ovih objekata su tačke koje pripadaju uslovno dozvoljenoj zoni.

Ako dođe do naglog povećanja prosečne vrednosti, smatraće se da dozvoljeni objekat tipa FHL nije otkriven ako je ispunjen sledeći uslov:

$$(Y_{mean}(t_k) - Y_{mean}(t_{k-1})) > \Delta Y_{mean}^{\max} \quad (15)$$

gde su  $t_k$  i  $t_{k-1}$  trenuci dva uzastopna očitavanja laserskog skenera.

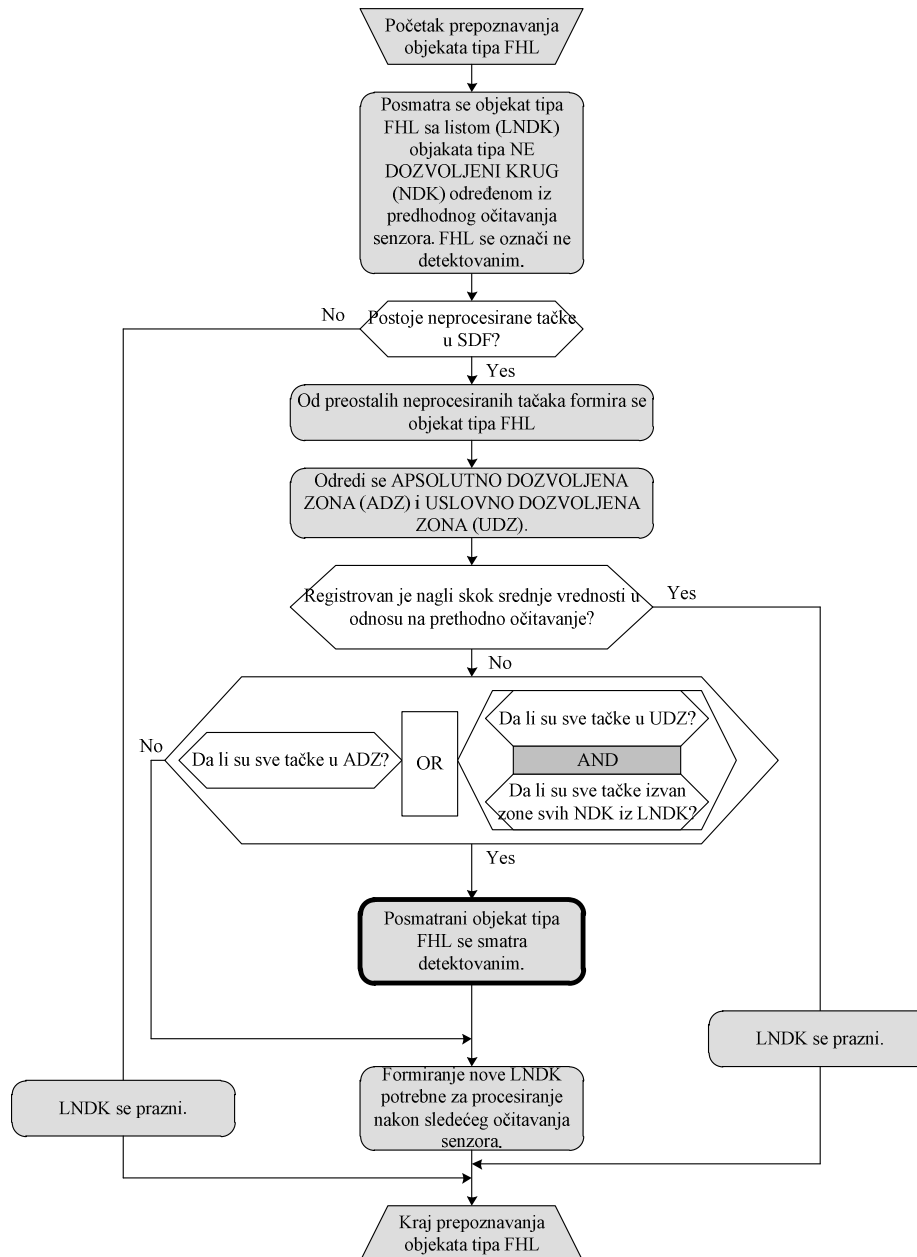
Ovaj uslov ima za cilj da razdvoji objekte koji se javljaju kao posledica plutajućih nečistoća i objekte koji se javljaju kao rezultat prisustva ravnih plovila (tj. prazne barže sa ravnom površinom koje se takođe pojavljuju kao horizontalna linija u skeniranoj slici). Diskontinuitet u vertikalnoj koordinati pravi razliku između ravnih barži i nivoa vode.

Pseudo kod za detekciju objekata tipa FHL prikazan je u Tab. 6.3., a dijagram toka dela detekcionog algoritma za prepoznavanje oblika tipa FHL prikazan je na Sl. 6.26.

Tab. 6.3 - Pseudo kod za detekciju objekta tipa FHL

Korak	Operacija
1	Početak prepoznavanja objekta tipa.
2	Proračun srednje vrednosti $Y_{mean}$ .
3	Da li je srednja vrednost prešla maksimalnu dozvoljenu vrednost (15)? Da – prelazak na korak 8. Ne – prelazak na korak 4.
4	Da li su sve tačke u apsolutno dozvoljenoj zoni? Da – objekat tipa FHL je detektovan. Prelazak na korak 8. Ne – prelazak na korak 5.
5	Da li su sve tačke u uslovno dozvoljenoj zoni? Da – prelazak na korak 6. Ne – prelazak na korak 8.
6	Da li je neka od tačaka pogodila objekat tipa „zabranjeni krug“? Da – prelazak na korak 8. No – objekat tipa FHL je detektovan. Prelazak na korak 7.
7	Detekcija objekata tipa „zabranjeni krug“ koji će biti korišćenju sledećem prepoznavanju objekta tipa FHL.
8	Kraj prepoznavanja objekta tipa FHL.





Sl. 6.26 - Detekcioni algoritam – dijagram toka dela za prepoznavanje oblika tipa FHL

## 6.6. Rezultati

Predloženi detekcioni algoritam plovila uključen je u laserski monitoring sistem vrata brodske prevodnice. Pošto se merni algoritam zasniva na modularnom principu, lako je analizirati svaki karakterističan oblik detektovanog objekta. Svaki od oblika signala (Sl. 27 i Sl. 29-32) dobijen je primenom detekcionog algoritma na podatke iz telegrama [7] prihvaćenih od odgovarajućeg laserskog skenera (Sl. 6.5). Detekcionog algoritma se primenjuje u okviru servisne aplikacije koja se izvršava na glavnom serveru sistema.

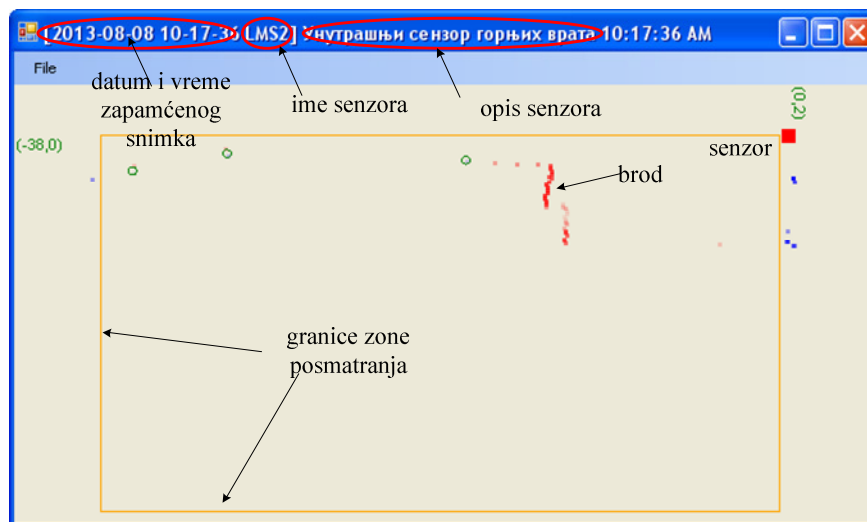
Laserski skeneri i procesne jedinice (bazirane na DSP tehnologiji) obavljaju kompletnu obradu ulaznih izmerenih vrednosti i zatim šalju obrađene vrednosti na industrijski panel PC. Virtualni

instrument radi na PC panelu. Mereni podaci prikupljeni iz mjerne jedinice prikazani su na prednjoj ploči grafičkog korisničkog interfejsa (GUI) virtualnog instrumenta [136]. Grafički prikaz svih oblika se vrši klijentskom aplikacijom za vizualizaciju procesa. Oblici signala su konture koje predstavljaju datu grupu tačaka koje detektuje laserski skener. Ovde je važno naglasiti da laserski skeneri ne detektuju nivo vode, osim ako na površini ne lebdi prljavština. Ovo je posledica slabog povratnog zračenja laserskog snopa sa površine vode.

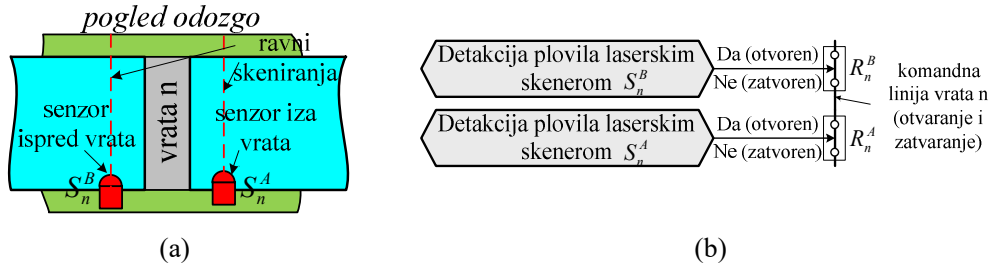
Kao i kod svih drugih procesa koji se odnose na razvoj klasifikacijskih algoritama, veoma je važno procijeniti kvalitet implementiranog rešenja. Najčešće korišćena mera za kvantifikaciju pouzdanosti klasifikatora je verovatnoća greške, koja se može podeliti na dve komponente: verovatnoću lažnog alarma i verovatnoću propuštene detekcije. U scenariju klasifikacije koji je opisan u ovoj disertaciji, takve verovatnoće se mogu aproksimirati samo na osnovu kontrolisanog praćenja uspešnosti klasifikacije u dužem vremenskom periodu. Izabran je period od tri meseca tokom kojeg je kroz prevodnicu prošlo 452 plovila, uz uspešnu registraciju svih 452 plovila (ne izvršena detekcija = 0%) i samo dva lažna alarma prijavljena od strane sistema (stopa lažne detekcije = 0.5%).

### 6.6.1. Detekcija plovila

Sl. 6.27 prikazuje konturu sastavljenu od niza tačaka koje pokazuju prisustvo plovila u vidnom polju laserskog skenera. Sistem je uspešno otkrio plovilo i zabeležio događaj otkrivanja plovila s povezanim parametrima (datum, vrijeme i smer prolaza plovila) u bazi podataka. Sl. 6.27 jasno pokazuje konturu broda, dok voda nije detektovana laserskim skenerom. Dobijeni sirovi podaci mogu predstavljati dimenzije plovila i omogućiti klasifikaciju u različite grupe plovila [137]. Izolovane kružne tačke su rezultat detekcije malih površina koje su reflektovale laserski zrak ali nisu pridružene konturi glavnog broda pomoću algoritma jer su ispunile kriterijume za detekciju oblika kružnice, što znači da su bili smeštene u jednu od kategorija detektovanih objekata koji ne predstavljaju plovilo. Međutim, pošto su skeneri  $S_n^A$  ili  $S_n^B$  (Sl. 6.28a) otkrili oblik koji odgovara brodu, centralna servisna aplikacija generisala je komandne signale za otvaranje relejnih kontakata (Sl. 6.28b). Otvaranje svakog relejnog kontakta sprečava manipulaciju vratima brodske prevodnice tako što se prekida glavna komandnu liniju. Kontakti releja ostaju otvoreni sve dok se plovilo nalazi u polju posmatranja jednog od skenera.



Sl. 6.27 - Detekcija plovila



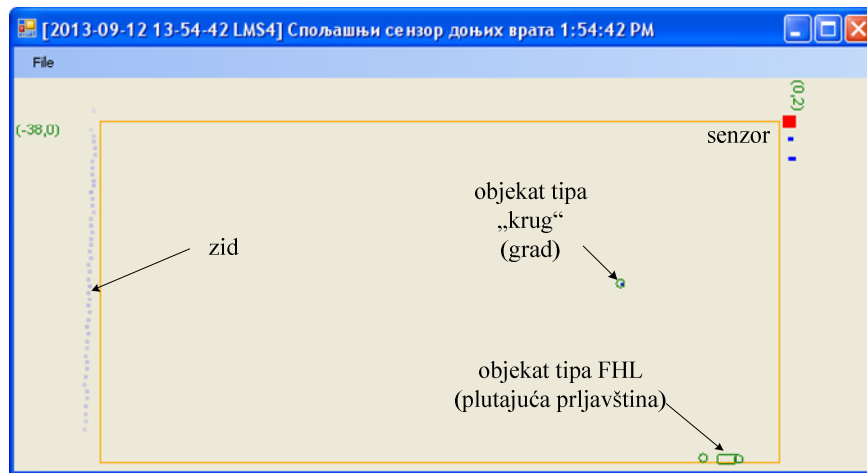
Sl. 6.28 - (a) dva laserska skenera  $S_n^A$  i  $S_n^B$  i (b) njihovi releji

### 6.6.2. Detekcija dozvoljenih oblika koji ne utiču na rad vrata brodske prevodnice

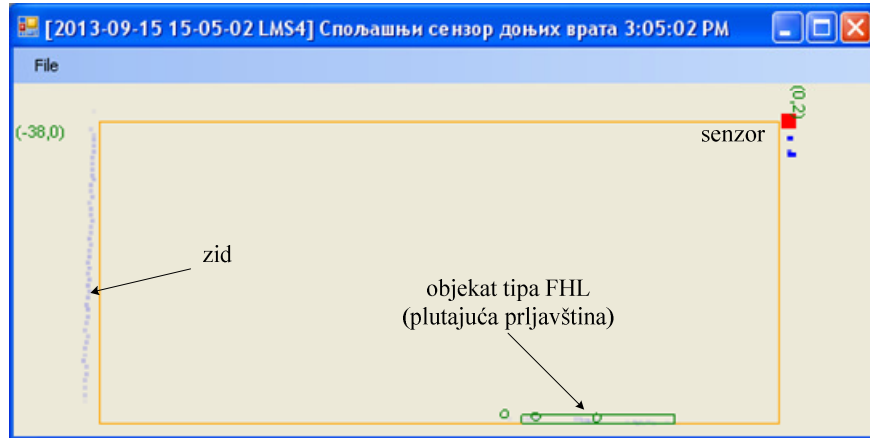
Sl. 6.29 prikazuje jednu smetnju (koja se odnosi na grad) koja je rezultat prepoznavanja oblika tipa „krug“. Leva vertikalna linija je rezultat detekcije zida prevodnice.

Detekcioni algoritam prepoznaje plutajuću prljavštinu kao oblik tipa FHL. Sl. 6.30 prikazuje uokvirenu plutajuću liniju i izolovanu zaokruženu tačku. Oba oblika pripadaju grupi oblika koji ne utiču na rad vrata brodske prevodnice.

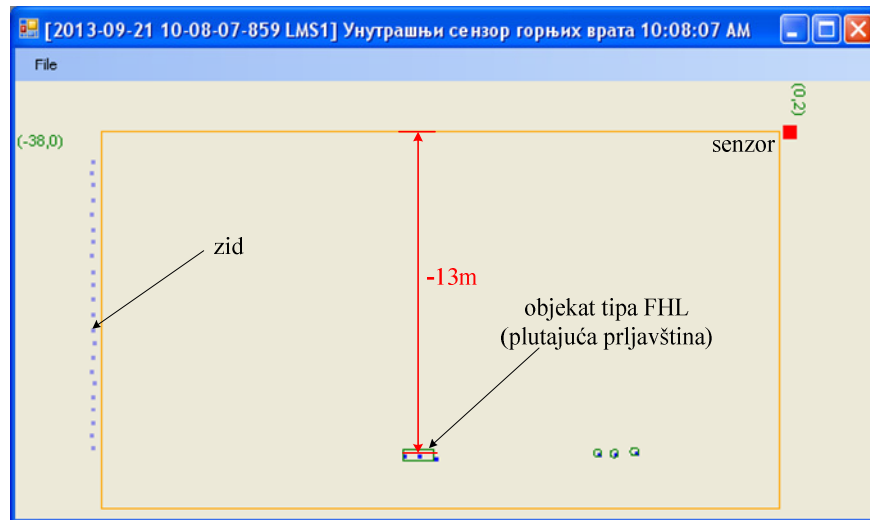
Na Sl. 6.31 i Sl. 6.32 prikazan je rezultat obrade signala detekcionim algoritmom u najsloženijem scenariju. Teško je razlikovati oblike plutajućih horizontalnih linija (uzrokovanih plutajućom prljavštinom) u odnosu na oblike koji potiču od plovila sa ravnom horizontalnom površinom (barže) čija refleksija predstavlja takođe horizontalnu liniju. Imajući to u vidu praćenje iznenadne promene y-koordinata objekata tipa FHL je uvedeno u detekcioni algoritama (može se primetiti razlika y-koordinata 13m i 12.25m). Oba oblika su zabeležena u dva uzastopna telegrama očitana u razmaku od 200 ms.



Sl. 6.29 - Usamljena smetnja (potiče od grada)



Sl. 6.30 - Plutajuća prljavština



Sl. 6.31 - Plutajuća prljavština pre pojave barže



Sl. 6.32 - Prisustvo barže

## 6.7. Unapređenje sistema primenom fazi-logike

Sistem opisan u ovom poglavlju sadrži veliki broj parametara (pragova) koji su iskustveno usvojeni: unutrašnji i spoljašnji poluprečnik objekta tipa „krug“, maksimalan broj dozvoljenih objekata tipa „krug“, širina apsolutno i uslovno dozvoljene zone objekta tipa FHL i vrednost porasta  $y$  koordinate objekta tipa FHL koji bi se tretirao kao pojava plovila tj. najčešće barže. Ovi parametri su usvojeni na osnovu dugotrajnog posmatranja i analize obimne baze podataka formirane od oblika snimljenih laserskim skenerima.

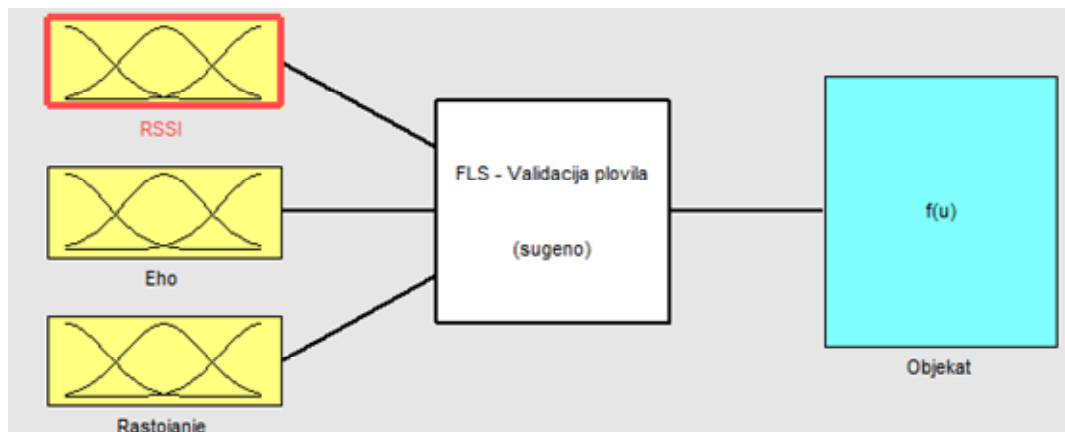
Sa druge strane vrednosti ovih parametara mogu biti rezultat mehanizma odlučivanja koji je sličan čovekovom rezonovanju. U tom slučaju vrednosti parametara bili bi rezultat ekspertskog znanja formalizovanog u obliku fazi-logičkog sistema.

U cilju validacije valjanosti izabranih parametara i njihove eventualne korekcije na osnovu validacionih rezultata, u ovom poglavlju prikazani su fazi-logički sistemi koji su predviđeni da vrše validaciju prepoznatog plovila, validaciju prepoznatog objekta tipa FHL i validaciju prepoznatog objekta tipa „krug“.

Pored validacionih fazi-logičkih sistema u ovom poglavlju prikazan je i fazi-logički kontroler (FLC) koji upravlja svim fazama pokretanja, zaustavljanja i zatvaranja (gornjih i donjih) vrata brodske prevodnice i upravlja punjenjem/praznjenjem komore brodske prevodnice. Pored ova dva upravljačka izlaza FLC generiše i izlaz koji daje informaciju o poziciji broda koja se koristi za prikaz u GUI korisničkoj aplikaciji.

### 6.7.1. Fazi-logički sistem za validaciju prepoznatog plovila

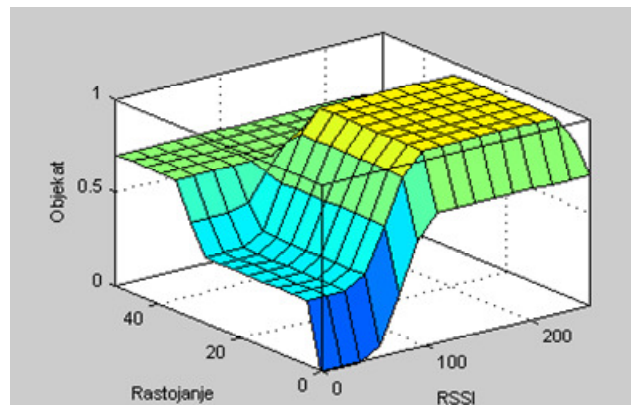
Za sve tačke koje su pridružene plovilu, primenom detekcionog algoritma, moguće je izvršiti validaciju njihovog porekla, tj. dodatno ispitivanje da li je njihova pojava uzrok refleksije od plovnog objekta ili od smetnje (prljavština na površini vode, ptica, kiša, grad ili dim brodskih motora). Na taj način se može dodatno ispitati pouzdanost primenjenog detekcionog algoritma. Validacija se vrši za svaku tačku pridruženu objektu tipa plovilo koja je nastala kao rezultat refleksije odgovarajućeg emitovanog snopa laserskog skenera koju karakteriše odgovarajući intenzitet signala (RSSI), broj ehoa i rastojanje. Fazi-logički sistem (FLS) za validaciju prepoznatog plovila prikazana je na Sl. 6.33.

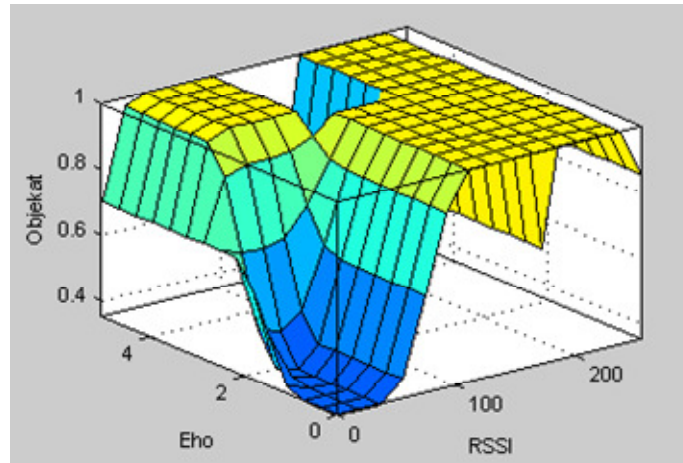


Sl. 6.33 - FLS za validaciju prepoznatog plovila

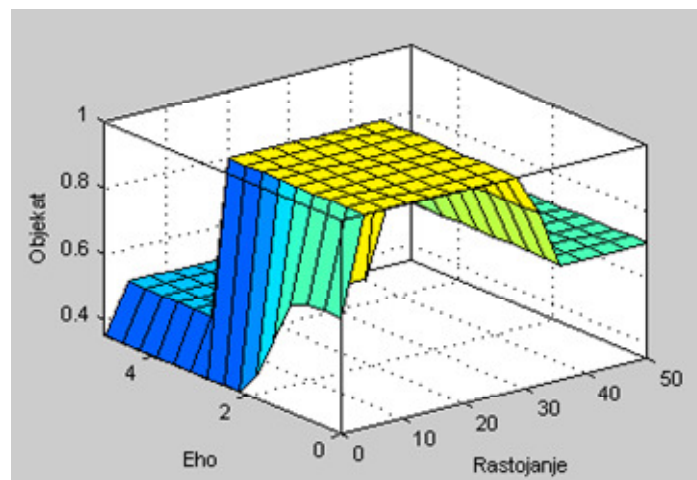
Tab. 6.4 – Lingvističke promenljive FLS za validaciju prepoznatog plovila

Naziv	Funkcija pripadnosti			Napomena
	Naziv	$\mu(x)$	Jed.	
<b>RSSI</b> (ulaz)	Slab	trimf(0, 0, 20)	-	intenzitet prijemnog zračenja
	Mali	trapmf(0, 20, 50, 100)		
	Srednji	trapmf(50, 100, 150, 200)		
	Jak	trapmf(150, 200, 240, 254)		
	Zaslepljen	trimf(240, 255, 255)		
<b>Eho</b> (ulaz)	Eho1	trapmf(0, 0, 1, 2)	-	broj povratnih signala
	Eho2	trimf(1, 2, 3)		
	Eho3-5	trapmf(2, 3, 5, 5)		
<b>Rastojanje</b> (ulaz)	Kratko	trapmf(0, 0, 2)	m	
	Regularno	trimf(0, 2, 30, 35)		
	Dugo	trapmf(30, 35, 50, 50)		
<b>Objekat</b> (izlaz)	Šum	0	-	ND - nedefinisano
	Smetnja	0.35		
	ND	0.7		
	Plovilo	1		

Sl. 6.34 - Zavisnost  $Objekat=f(RSSI, Rastojanje, 1)$



Sl. 6.35 - Zavisnost  $Objekat=f(RSSI,10,Eho)$



Sl. 6.36 - Zavisnost  $Objekat=f(100,Rastojanje,Eho)$

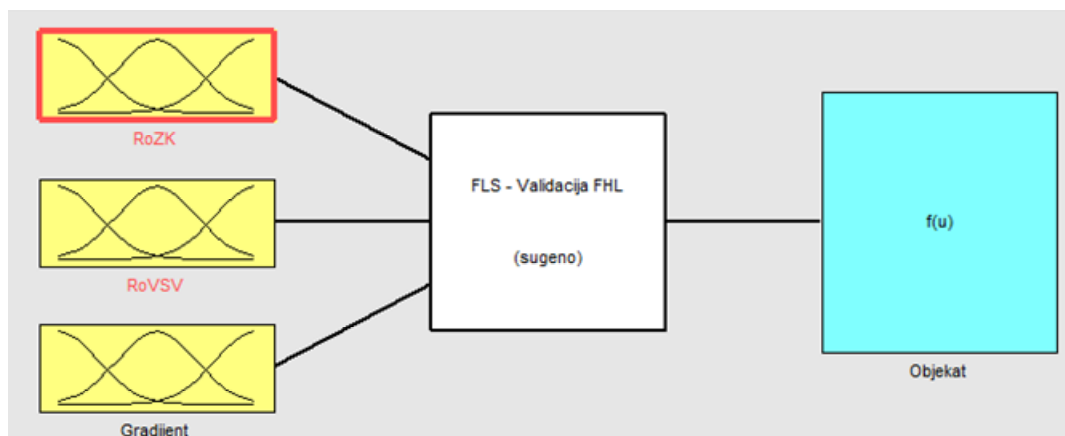
Tab. 6.5 – Pravila odlučivanja FLS za validaciju prepoznatog plovila

1. If (RSSI is Slab) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Kratko) then (Objekat is Sum) (1)
2. If (RSSI is Slab) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Regularno) then (Objekat is Smetnja) (1)
3. If (RSSI is Slab) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Dugo) then (Objekat is ND) (1)
4. If (RSSI is Slab) and (Eho is Eho2) and (Rastojanje is Kratko) then (Objekat is Smetnja) (1)
5. If (RSSI is Slab) and (Eho is Eho2) and (Rastojanje is Regularno) then (Objekat is ND) (1)
6. If (RSSI is Slab) and (Eho is Eho2) and (Rastojanje is Dugo) then (Objekat is ND) (1)
7. If (RSSI is Slab) and (Eho is Eho3-5) and (Rastojanje is Kratko) then (Objekat is Smetnja) (1)
8. If (RSSI is Slab) and (Eho is Eho3-5) and (Rastojanje is Regularno) then (Objekat is ND) (1)
9. If (RSSI is Slab) and (Eho is Eho3-5) and (Rastojanje is Dugo) then (Objekat is ND) (1)
10. If (RSSI is Mali) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Kratko) then (Objekat is Sum) (1)
11. If (RSSI is Mali) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Regularno) then (Objekat is Smetnja) (1)
12. If (RSSI is Mali) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Dugo) then (Objekat is ND) (1)
13. If (RSSI is Mali) and (Eho is Eho2) and (Rastojanje is Kratko) then (Objekat is Smetnja) (1)
14. If (RSSI is Mali) and (Eho is Eho2) and (Rastojanje is Regularno) then (Objekat is Smetnja) (1)
15. If (RSSI is Mali) and (Eho is Eho2) and (Rastojanje is Dugo) then (Objekat is ND) (1)
16. If (RSSI is Mali) and (Eho is Eho3-5) and (Rastojanje is Kratko) then (Objekat is Smetnja) (1)
17. If (RSSI is Mali) and (Eho is Eho3-5) and (Rastojanje is Regularno) then (Objekat is Plovilo) (1)

18. If (RSSI is Mali) and (Eho is Eho3-5) and (Rastojanje is Dugo) then (Objekat is ND) (1)
19. If (RSSI is Srednji) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Kratko) then (Objekat is ND) (1)
20. If (RSSI is Srednji) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Regularno) then (Objekat is Plovilo) (1)
21. If (RSSI is Srednji) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Dugo) then (Objekat is ND) (1)
22. If (RSSI is Srednji) and (Eho is Eho2) and (Rastojanje is Kratko) then (Objekat is Smetnja) (1)
23. If (RSSI is Srednji) and (Eho is Eho2) and (Rastojanje is Regularno) then (Objekat is Plovilo) (1)
24. If (RSSI is Srednji) and (Eho is Eho2) and (Rastojanje is Dugo) then (Objekat is ND) (1)
25. If (RSSI is Srednji) and (Eho is Eho3-5) and (Rastojanje is Kratko) then (Objekat is Smetnja) (1)
26. If (RSSI is Srednji) and (Eho is Eho3-5) and (Rastojanje is Dugo) then (Objekat is ND) (1)
27. If (RSSI is Jak) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Kratko) then (Objekat is ND) (1)
28. If (RSSI is Jak) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Regularno) then (Objekat is Plovilo) (1)
29. If (RSSI is Jak) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Dugo) then (Objekat is ND) (1)
30. If (RSSI is Jak) and (Eho is Eho2) and (Rastojanje is Kratko) then (Objekat is Smetnja) (1)
31. If (RSSI is Jak) and (Eho is Eho2) and (Rastojanje is Regularno) then (Objekat is Plovilo) (1)
32. If (RSSI is Jak) and (Eho is Eho2) and (Rastojanje is Dugo) then (Objekat is ND) (1)
33. If (RSSI is Jak) and (Eho is Eho3-5) and (Rastojanje is Kratko) then (Objekat is Smetnja) (1)
34. If (RSSI is Jak) and (Eho is Eho3-5) and (Rastojanje is Regularno) then (Objekat is Plovilo) (1)
35. If (RSSI is Jak) and (Eho is Eho3-5) and (Rastojanje is Dugo) then (Objekat is ND) (1)
36. If (RSSI is Zasljepljen) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Kratko) then (Objekat is ND) (1)
37. If (RSSI is Zasljepljen) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Regularno) then (Objekat is ND) (1)
38. If (RSSI is Zasljepljen) and (Eho is Eho1) and (Rastojanje is Regularno) then (Objekat is Plovilo) (1)

### 6.7.2. Fazi-logički sistem za validaciju prepoznatog objekta tipa FHL

Za sve tačke koje su pridružene objektu tipa FHL, primenom detekcionog algoritma, moguće je izvršiti validaciju njihovog porekla, tj. dodatno ispitivanje da li je njihova pojava uzrok refleksije od plovnog objekta ili od smetnje (prljavština na površini vode, ptica, kiša, grad ili dim brodskih motora). Na taj način se može dodatno ispitati pouzdanost primenjenog detekcionog algoritma. Validacija se vrši za svaku tačku pridruženu objektu tipa FHL za koju se dodatno definišu veličine RoZK (Rastojanje od Zabranjenog Kruga), RoVSV (Rastojanje od Vertikalne Srednje Vrednosti) Gradijent. Sa veličinom Gradijent se predstavlja porast vertikalne srednje vrednosti FHL u odnosu na vrednost iz prethodno obrađenog telegrama odgovarajućeg laserskog skenera. Ove veličine koristi fazi-logički sistem (FLS) za validaciju prepoznatog objekta tipa FHL (Sl. 6.37).

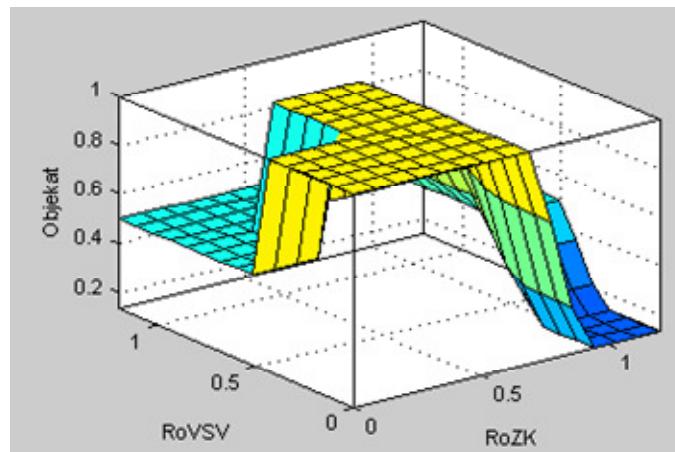


Sl. 6.37 - FLS za validaciju prepoznatog objekta tipa FHL

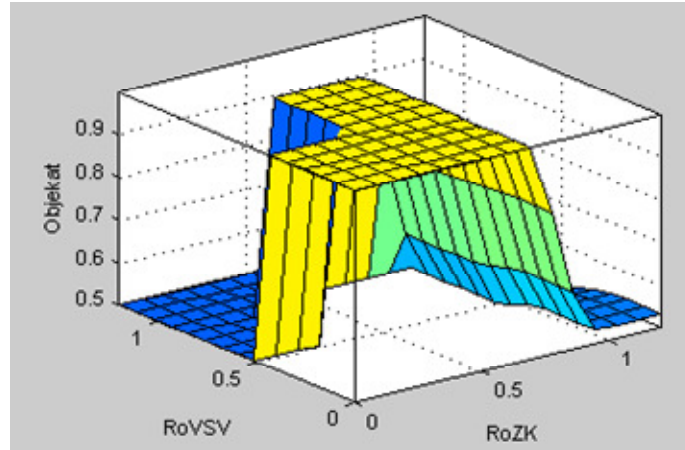


Tab. 6.6 – Lingvističke promenljive FLS za validaciju prepoznatog objekta tipa FHL

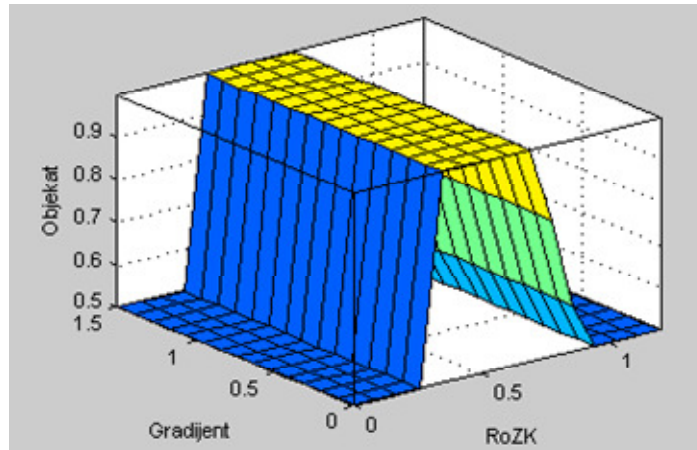
Naziv	Funkcija pripadnosti			Napomena
	Naziv	$\mu(x)$	Jed.	
<b>RoZK</b> (ulaz)	Malo	trapmf(0, 0, 0.3, 0.5)	m	Rastojanje od Zabranjenog Kruga
	Srednje	trapmf(0.3, 0.5, 0.7, 0.9)		
	Veliko	trapmf(0.7, 0.9, 1.2, 1.2)		
<b>RoVSV</b> (ulaz)	Malo	trapmf(0, 0, 0.3, 0.5)	m	Rastojanje od Vertikalne Srednje Vrednosti
	Srednje	trapmf(0.3, 0.5, 0.7, 0.9)		
	Veliko	trapmf(0.7, 0.9, 1.2, 1.2)		
<b>Gradijent</b> (ulaz)	Ne	trimf(0, 0, 1.5)	m	
	Da	trimf(0, 1.5, 1.5)		
<b>Objekat</b> (izlaz)	Plovilo	1	-	
	Talas	0.5		
	Đubre	0		



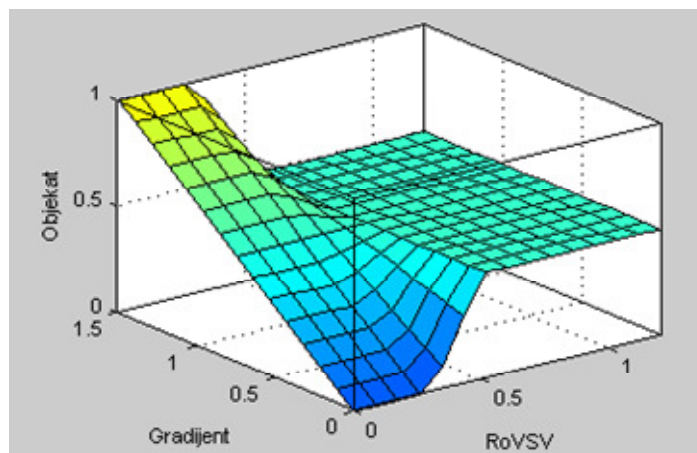
Sl. 6.38 - Zavisnost  $Objekat=f(RoZK, RoVSV, 0.2)$



Sl. 6.39 - Zavisnost  $Objekat=f(RoZK, RoVSV, 0.8)$



Sl. 6.40 - Zavisnost  $Objekat=f(RoZK, 0.6, Gradijent)$



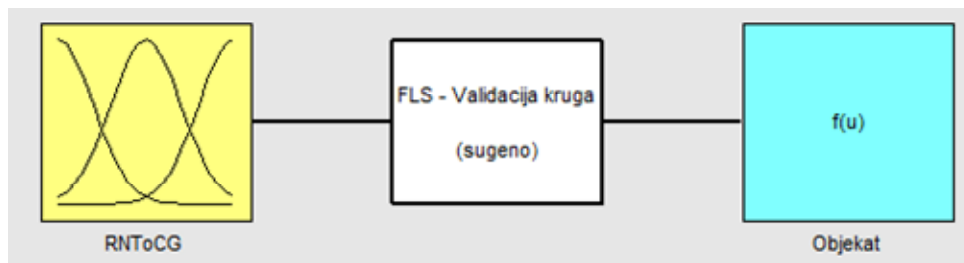
Sl. 6.41 - Zavisnost  $Objekat=f(0.9, RoVSV, Gradijent)$

Tab. 6.7 – Pravila odlučivanja FLS za validaciju prepoznatog oblika tipa FHL

1. If (RoZK is Veliko) and (RoVSV is Malo) and (Gradijent is Ne) then (Objekat is Djubre) (1)
2. If (RoZK is Veliko) and (RoVSV is Malo) and (Gradijent is Da) then (Objekat is Plovilo) (1)
3. If (RoZK is Veliko) and (RoVSV is Srednje) and (Gradijent is Ne) then (Objekat is Talas) (1)
4. If (RoZK is Veliko) and (RoVSV is Srednje) and (Gradijent is Da) then (Objekat is Talas) (1)
5. If (RoZK is Malo) and (RoVSV is Malo) and (Gradijent is Da) then (Objekat is Plovilo) (1)
6. If (RoZK is Malo) and (RoVSV is Malo) and (Gradijent is Ne) then (Objekat is Plovilo) (1)
7. If (RoZK is Srednje) and (RoVSV is Malo) and (Gradijent is Ne) then (Objekat is Plovilo) (1)
8. If (RoZK is Srednje) and (RoVSV is Malo) and (Gradijent is Da) then (Objekat is Plovilo) (1)
9. If (RoZK is Srednje) and (RoVSV is Srednje) and (Gradijent is Ne) then (Objekat is Plovilo) (1)
10. If (RoZK is Srednje) and (RoVSV is Srednje) and (Gradijent is Da) then (Objekat is Plovilo) (1)

### 6.7.3. Fazi-logički sistem za validaciju prepoznatog objekta tipa „krug“

Za sve tačke koje su pridružene objektu tipa „krug“, primenom detekcionog algoritma, moguće je izvršiti validaciju njihovog porekla, tj. dodatno ispitivanje da li je njihova pojava uzrok refleksije od plovnog objekta ili od smetnje (prljavština na površini vode, ptica, kiša, grad ili dim brodskih motora). Na taj način se može dodatno ispitati pouzdanost primenjenog detekcionog algoritma. Validacija se vrši za svaku tačku pridruženu objektu tipa „krug“ za koju se dodatno definiše veličina RNToCG (Rastojanje Najbliže Tačke od Centra Gravitacije). Ovu veličinu koristi fazi-logički sistem (FLS) za validaciju prepoznatog objekta tipa „krug“ (Sl. 6.42).



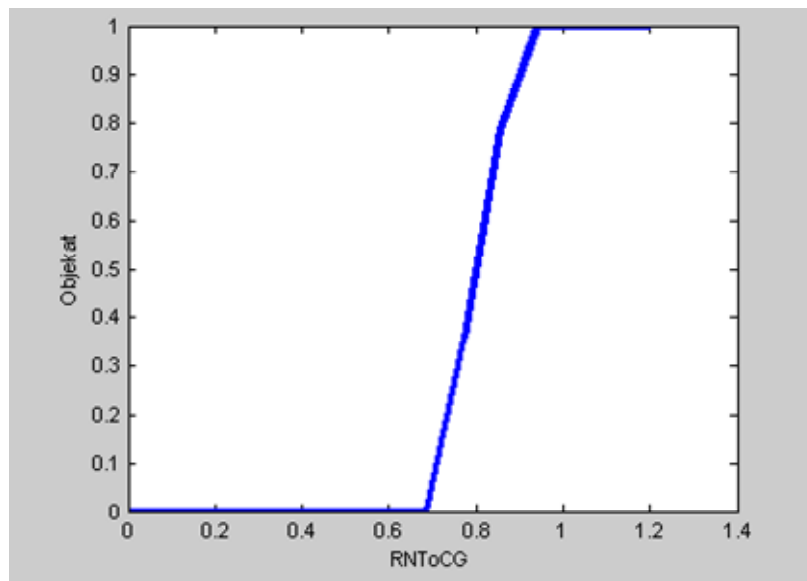
Sl. 6.42 - FLS za validaciju prepoznatog objekta tipa „krug“

Tab. 6.8 – Lingvističke promenljive FLS za validaciju prepoznatog objekta tipa „krug“

Naziv	Funkcija pripadnosti			Napomena
	Naziv	$\mu(x)$	Jed.	
<b>RNToCG</b> (ulaz)	UnutrasnjiKrug	trapmf(0, 0, 0.3, 0.5)	m	Rastojanje od Zabranjenog Kruga
	Prsten	trapmf(0.3, 0.5, 0.7, 0.9)		
	Veliko	trapmf(0.7, 0.9, 1.2, 1.2)		
<b>Objekat</b> (izlaz)	IzolovanaTacka	1	-	
	Ostalo	0		

Tab. 6.9 – Pravila odlučivanja FLS za validaciju prepoznatog oblika tipa „krug“

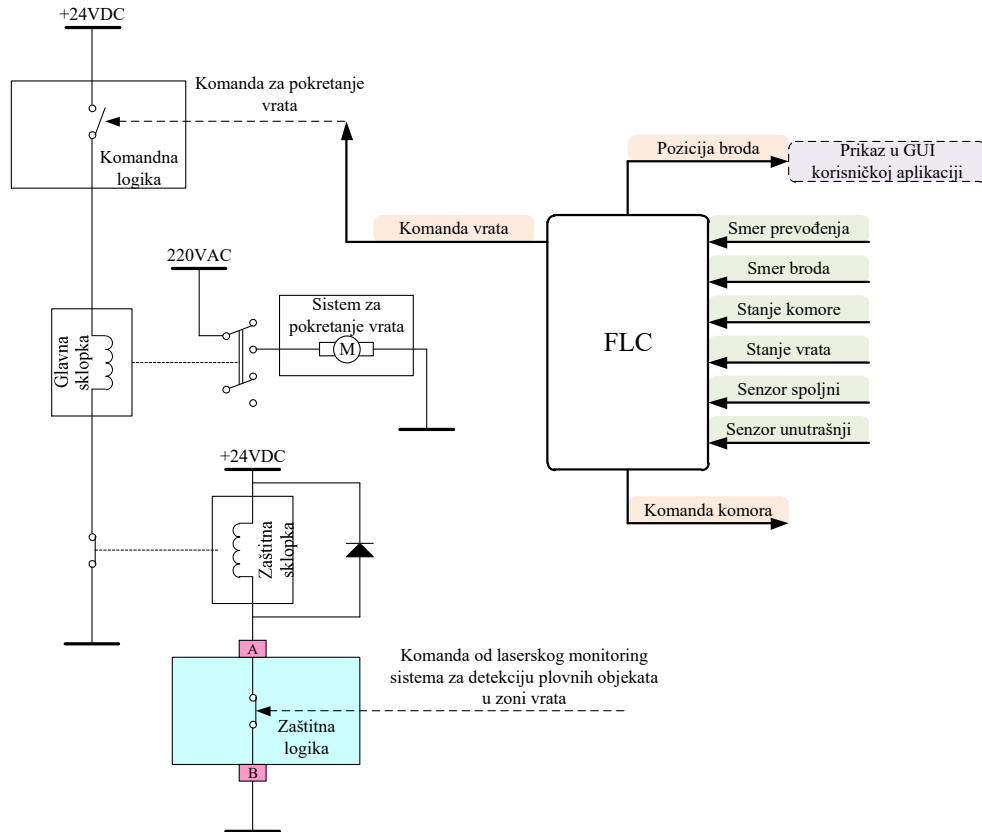
1. If (RNToCG is UnutrasnjiKrug) then (Objekat is Ostalo) (1)
2. If (RNToCG is Prsten) then (Objekat is Ostalo) (1)
3. If (RNToCG is Veliko) then (Objekat is IzolovanaTacka) (1)



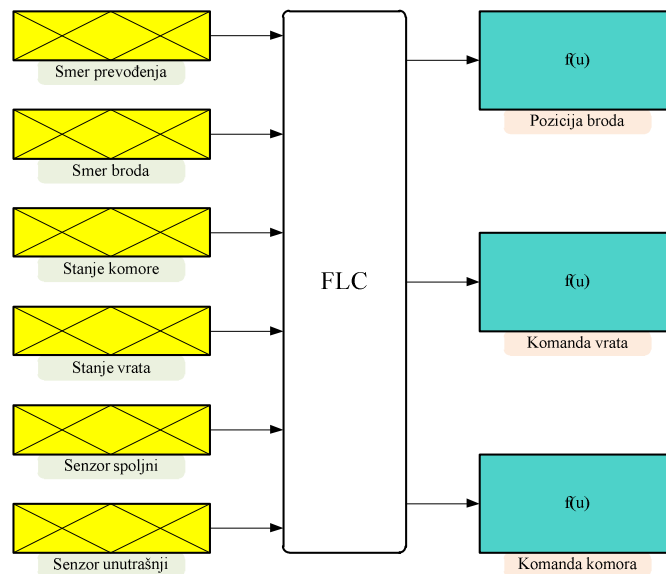
Sl. 6.43 - Zavisnost  $Objekat=f(RNTtoCG)$

#### 6.7.4. Fazi-logički kontroler za upravljanje vratima brodske prevodnice

Fazi-logički kontroler (FLC) treba da upravlja svim fazama pokretanja, zaustavljanja i zatvaranja vrata (gornjih i donjih) brodske prevodnice (Sl. 6.44). Takođe, FLC treba da upravlja punjenjem/praznjenjem komore brodske prevodnice. Pored ova dva upravljačka izlaza FLC generiše i izlaz koji daje informaciju o poziciji broda koja se koristi za prikaz u GUI korisničkoj aplikaciji.



Sl. 6.44 - Logička šema upravljanja vratima brodske prevodnice proširena sa FLC



Sl. 6.45 - Fazi-logički kontroler za upravljanje vratima brodske prevodnice

Tabela “ako-onda” (if-then) pravila primenjenih u kontroleru koji treba da bude redni logički element svake odluke koja se odnosi na sve faze prevođenja plovila kroz brodsku prevodnicu. Na ovaj način kontroler onemogućava svaku odluku operatera koja je van postavljenih uslova, tj. očitanih uslova sa većeg broja senzora koji ukazuju na trenutno stanje prevodnice.

Tab. 6.10 - Pravila odlučivanja FLC za upravljanje vratima brodske prevodnice

	Smer prevođenja (ulaz)	Smer broda (ulaz)	Stanje komore (ulaz)	Stanje vrata (ulaz)	Senzor spoljni (ulaz)	Senzor unutrašnji (ulaz)	Pozicija broda (izlaz)	Komanda vrata (izlaz)	Komanda komore (izlaz)
1	nizvodno	ulazi	prazna	zatvorena	-	-	-	blokiraj	puni
2	nizvodno	ulazi	puna	zatvorena	-	-	-	otvori	blokiraj
3	nizvodno	ulazi	puna	otvorena	brod	nema	nailazi	blokiraj	blokiraj
4	nizvodno	ulazi	puna	otvorena	brod	brod	iznad	blokiraj	blokiraj
5	nizvodno	ulazi	puna	otvorena	nema	brod	ulazi	zatvori	blokiraj
6	nizvodno	izlazi	puna	zatvorena	-	-	-	blokiraj	prazni
7	nizvodno	izlazi	prazna	zatvorena	-	-	-	otvori	blokiraj
8	nizvodno	izlazi	prazna	otvorena	nema	brod	nailazi	blokiraj	blokiraj
9	nizvodno	izlazi	prazna	otvorena	brod	brod	iznad	blokiraj	blokiraj
10	nizvodno	izlazi	prazna	otvorena	brod	nema	izlazi	zatvori	blokiraj
11	uzvodno	ulazi	puna	zatvorena	-	-	-	blokiraj	prazni
12	uzvodno	ulazi	prazna	zatvorena	-	-	-	otvori	blokiraj
13	uzvodno	ulazi	prazna	otvorena	brod	nema	nailazi	blokiraj	blokiraj
14	uzvodno	ulazi	prazna	otvorena	brod	brod	iznad	blokiraj	blokiraj
15	uzvodno	ulazi	prazna	otvorena	nema	brod	ulazi	zatvori	blokiraj
16	uzvodno	izlazi	prazna	zatvorena	-	-	-	blokiraj	puni
17	uzvodno	izlazi	puna	zatvorena	-	-	-	otvori	blokiraj
18	uzvodno	izlazi	puna	otvorena	nema	brod	nailazi	blokiraj	blokiraj
19	uzvodno	izlazi	puna	otvorena	brod	brod	iznad	blokiraj	blokiraj
20	uzvodno	izlazi	puna	otvorena	brod	nema	izlazi	zatvori	blokiraj

## 7. ZAKLJUČAK

Ako se ima u vidu da se broj učesnika u saobraćaju neprestano povećava, pogotovo u urbanim sredinama, unapređenje praćenja i upravljanja saobraćajnim procesima se nameće kao imperativ. Posmatranjem rezultata simulacija može se primetiti da, u ovoj disertaciji, koncipirani inteligentni sistem za izbegavanje konfliktnih situacija valjano obavlja svoju prevashodnu ulogu. Naime, na osnovu rezultata simulacija dobijenih primenom različitih scenarija sistem je imao gotovo potpuno izbegavanje konflikata. Primenom ovakvog sistema na saobraćajnim lokacijama (tipa raskrscima i kružni tok), bez svetlosne signalizacije, mogla bi se bitno povećati sigurnost i bezbednost saobraćajnih učesnika u urbanim sredinama.

S obzirom na činjenicu da se u urbanim sredinama sve više povećava broj učesnika u saobraćaju, pored neophodnosti da saobraćajni proces bude što je moguće bezbedniji, značajan postaje i zahtev da saobraćajni protok bude što je moguće veći kako bi se izbegle gužve i zastoji u saobraćaju. Koncipirani sistem u ovoj disertaciji, činjenicom da sprečava pojavu konflikata u saobraćaju, indirektno sprečava pojavu zastoja zbog sudara, a na taj način povećava protočnost kroz saobraćajne lokacije tretirane ovim sistemom.

Analizom rezultata simulacija kojima se posmatrao efekat zadavanja, od strane hierarhiski nadređenog sistema, željene brzine kretanja kroz ulazne deonice saobraćajnih lokacija može se konstatovati da inteligentni sistem za izbegavanje konfliktnih situacija ima mogućnost da adekvatno odgovori ovom zahtevu. Naime, prilikom određivanja preporučene brzine kretanja vozila kroz ulaznu deonicu sistem prvo odredi skup preporučenih brzina za koje je zadovoljen uslov za izbegavanje konflikata, a potom iz tako određenog skupa sistem bira onakvu brzinu koja na najbolji način odgovara zahtevu hierarhiski nadređenog sistema.

S obzirom na činjenicu da sistem opisan u [5] ima prvenstvenu ulogu u smanjenju gužvi i povećanju saobraćajnog protoka u okviru saobraćajnih sinhronizacionih zona, njegova modifikacija opisana u četvrtom poglavlju ima punu potvrdu u činjenici da sistem za izbegavanje konfliktnih situacija, prema prethodno navedenom, indirektno i direktno doprinosi smanjenju gužvi i povećanju saobraćajnog protoka. Drugim rečima, pozicioniranje inteligentnog sistema, ili više sistema, za izbegavanje konfliktnih situacija u okviru integralnog sistema za upravljanje saobraćajem ima svoj puni smisao.

Primenom algoritma za određivanje kritičnih intervala, algoritma za procenu verovatnoće sudara i algoritma za određivanje preporučene brzine, prilikom ulaska vozila u saobraćajnu lokaciju postavljaju se uslovi koje treba vozilo da ispuni kako bi što verovatnije moglo da izbegne konflikt. Ti uslovi se svode na to da posmatrano vozilo treba da napusti ulaznu deonicu preporučenom brzinom i to u preporučenom trenutku. Da bi ovi uslovi u praksi što više bili ispunjeni sistem vrši obaveštavanje vozila porukama koje su rezultat primene algoritma za korigovanje brzina. Drugim rečima, definisanje preporučene brzine i korekcija brzine vozila tokom kretanja kroz ulaznu deonicu obezbeđuju izbegavanje konflikata na dužem vremenskom horizontu. Prisustvo dobrih rezultata simulacije u punoj meri opravdava ovakav pristup izbegavanju konflikata na dužem vremenskom horizontu.

Ulogu izbegavanja konflikata na kraćem vremenskom horizontu, kada su razdaljine između vozila manje, preuzima fazi ekspertski sistem koji daje procenu o ukupnoj opasnosti kretanja vozila na osnovu koje sistem za obaveštavanje generiše poruke. Fazi ekspertski sistem za određivanje ukupne opasnosti kretanja vozila, pored podatka o trenutnoj brzini i razdaljini od potencijalnog konflikta, koristi i podatak o procenjenoj sposobnosti reagovanja vozila (SRV). Procena vrednosti SRV je rezultat primene T2-FLS kojim se na još bolji način modeliraju neodređenosti u odnosu na T1-FLS. Prisustvo dobrih rezultata simulacija u punoj meri opravdava primenu fazi-ekspertskih sistema definisanih u ovoj disertaciji.

Sistem je koncipiran na takav način da podržava komunikaciju sa vozilima (kooperativna razmena podataka) koja tu mogućnost imaju. Predviđena je komunikacija tipa V2I ili Wi-Fi gde u slučaju aktiviranih odgovarajućih aplikacija vozači dobijali obaveštajne poruke na komandnoj tabli

vozila (OBU, On Board Units) ili pametnom telefonu (Smart Phones). Pored toga, aktivirane aplikacije šalju dodatne podatke vezane za vozilo i samog vozača čime se omogućava T2-FLS da adekvatnije proceni sposobnost reagovanja vozila (SRV). Prisustvo kooperativne razmene podataka između sistema i vozila dodatno povećava efikasnost sistema u izbegavanju konflikata.

Rezultati simulacija su pokazali da u slučaju prevelikog broja vozila u nekom trenutku u saobraćajnoj lokaciji (zagušenje npr. uzrokovano pojavom velikog broja vozila iz svih pravaca koja se kreću malom brzinom) pojavljuje se vrednost signala PNZM različita od nule. Tada, preporučena brzina ne može da se odredi na optimalan način i funkcija izbegavanja konflikata spada samo na fazi-ekspertski sistem. Signal PNZM se može smatrati indikatorom stepena suboptimalnosti rada dela sistema za određivanje preporučene brzine. Ipak, na sreću ovakve situacije nisu mnogo verovatne u realnosti.

Ukupno gledano, inteligentni sistem za izbegavanje konfliktnih situacija u saobraćaju baziran na primeni fazi logike svojom primenom dosta bi mogao da unapredi bezbednost u saobraćaju i smanji broj konflikata i sudara. Pored toga, pomenuti sistem bi značajnu ulogu imao u okviru integralnog sistema, dobijenog modifikacijom [5], gde bi pored osnovne namene u izbegavanju konflikata doprineo i smanjenju gužvi i povećanju saobraćajnog protoka.

Ovakav koncept sistema ni izbliza nije dat u zatvorenoj formi. On se bolje može nazvati polaznim konceptom koji je otvoren za nadgradnju. Ta nadgradnja bi prvenstveno mogla da se kreće u pravcu boljeg iskorišćenja kooperativne komunikacije između sistema i vozila. Nadgradnja bazirana na primeni kooperativne komunikacije dobija na smislu u bliskoj budućnosti kada će veliki broj vozila imati ovu mogućnost, pogotovu u malo daljoj budućnosti kada verovatno vozila bez ove mogućnosti neće ni imati dozvolu za učešće u saobraćaju.

Ukoliko vozilo, sa mogućnošću kooperativne komunikacije bude bilo u mogućnosti da šalje informaciju o železnom pravcu kretanja (npr. informaciju o uključenom indikatoru skretanja) u znatnoj meri može centralnom kontroleru da pojednostavi proceduru za generisanje kvalitetnije poruke po pitanju izbegavanja konflikta, jer iz razmatranja se izbacuju ostali alternativni pravci kretanja (putanje).

U slučaju da u saobraćajnu lokaciju ulazi vozilo sa autonomnim upravljanjem (vozilo bez vozača) sistem za izbegavanje konflikata bi u toj situaciji bilo dodatni korektiv vozilu koje bez obzira na mnoštvo senzora nije u mogućnosti da sagleda sve opasnosne aspekte trenutne situacije na saobraćajnoj lokaciji.

Kod izbora preporučene brzine trenutno su definisane dve strategije gde prema prvoj strategiji preporučena brzina se određuje na osnovu početne brzine vozila dok po drugoj strategiji preporučena brzina se određuje prema fiksnoj vrednosti (ili konstantnoj vrednosti u nekom vremenskom intervalu) zadatoj od strane hierarhiski nadređenog sistema. U koncipiranju strategije izbora preporučene brzine ima prostora da se uključe i druge veličine i faktori, što bi moglo biti predmet daljih istraživanja u ovoj oblasti.

U disertaciji je koncipiran model simulatora saobraćajne lokacije i realizovana simulaciona aplikacija. U ovom modelu ni izbliza nisu modelirane sve pojave i faktori koji utiču na ponašanje učesnika u saobraćaju na saobraćajnoj lokaciji. To je jednostavno posledica činjenice da je saobraćajni proces vrlo složen i zavistan od faktora koji se često ponašaju kao slučajne veličine. Sve ovo ostavlja mnogo prostora za unapređenje simulacionog modela po pitanju uvažavanja raznih faktora (npr. smanjena vidljivost iz pojedinih pravaca zbog objekata pored puta, pojava masnih mrlja na kolovozu, i td.).

U ovoj disertaciji predstavljen je novi detekcioni algoritam i monitoring sistem za praćenje zone vrata brodske prevodnice.

U cilju izbegavanja složene analize velikog broja potencijalnih oblika plovila (od malih čamaca, kanua i jedrilica do velikih turističkih brodova i transportnih barži), detekcioni algoritam je razvijen po ugledu na tehniku statističkog prepoznavanja oblika pod nazivom *opcija odbacivanja u testiranju hipoteza* [135]. Analizirajući sve otkrivene oblike, algoritam bira samo neželjene oblike i ostale tretira kao plovila. Osnovni doprinos razvoju algoritma detekcije ogleda



se u otkrivanju neželjenih signala i objekata i njihovoj definiciji u skladu sa prostornim obrascem i brojem tačaka koje ih svrstavaju u jednu od dve odgovarajuće kategorije: objekte tipa „krug“ i objekte tipa „plutajuća horizontalna linija - FHL“. Svi ostali otkriveni oblici koji ne pripadaju jednoj od ove dve kategorije predstavljaju plovila.

Monitoring sistem primenjuje predloženi algoritam merenja i radi u potpuno automatskom režimu. Glavni delovi sistema su: laserski skeneri, procesna jedinica, kontrolna jedinica i računarska mreža. Mreža se sastoji od četiri mrežna servera koji se koriste za: bazu podataka, centralnu servisnu aplikaciju, klijentsku HMI aplikaciju za vizualizaciju i SCADA. Pored detekcije plovila, nadzorni sistem ima i upravljačku ulogu u sprečavanju upravljanja vrata brodske prevodnice dok se plovilo nalazi u zabranjenoj zoni ispred i iza vrata.

Posebna pažnja je posvećena razvoju mereno-kontrolnog algoritma sa ciljem da se sistemu za praćenje omogući detekcija svih tipova plovila, kao i svih pojava koje mogu poslati lažni signal (atmosferske padavine, magla, dim brodskih motora, prljavština na površini vode, ptice i td.) koji nije od interesa za ciklus prevođenja. Da bi se postiglo gore navedeno, analizirani su svi mogući scenariji koji se odnose na otkrivanje događaja koji mogu predstavljati objekat ili grupu objekata u polju posmatranja laserskog skenera. Laserski skeneri šalju sekvence tačaka koje su rezultat refleksije laserskog snopa. Takve sekvence predstavljaju oblike koji su dodeljeni dvema karakterističnim grupama. Prva grupa uključuje oblike koji potiču od plovila, dok druga uključuje oblike koji potiču od smetnji. Druga grupa može da obuhvati dve karakteristične podgrupe: oblici tipa „krug“ i oblici tipa „plutajuća horizontalna linija – FHL“.

U disertaciji je detaljno objašnjen algoritam za detekciju broda i prikazani su rezultati rada sistema u stvarnoj upotrebi sa karakterističnim oblicima signala. Puna prednost bi se postigla implementacijom predloženog monitoring sistema u okviru globalnog monitoring centra.

Unapređenje sistema za upravljanje saobraćajem brodske prevodnice moguće je ostvariti njegovim proširenjem sa tri fazi-logička sistemima za validaciju (prepoznatog plovila, objekta tipa „krug“ i objekta tipa FHL) i fazi-logičkim kontrolerom vrata i komore brodske prevodnice. Na taj način postojeći sistem se transformiše u inteligentni sistem za upravljanje saobraćajem baziran na primeni fazi-logike.

Posmatrajući dva sistema prikazana u ovoj disertaciji može se zaključiti da inteligentni sistemi bazirani na fazi logici se pojavljuju kao prirodna opcija za rešavanje problema, kako u drumskom i vodenom saobraćaju, tako i u svim ostalim vidovima saobraćaja.

## 8. LITERATURA

- [1] John A. Stoop, "Independent accident investigation: a modern safety tool", *Journal of Hazardous Materials* 111 (2004) 115–122
- [2] [https://www.tutorialspoint.com/artificial\\_intelligence/artificial\\_intelligence\\_overview.htm](https://www.tutorialspoint.com/artificial_intelligence/artificial_intelligence_overview.htm)
- [3] [https://www.tutorialspoint.com/artificial\\_intelligence/artificial\\_intelligent\\_systems.htm](https://www.tutorialspoint.com/artificial_intelligence/artificial_intelligent_systems.htm)
- [4] [https://www.tutorialspoint.com/artificial\\_intelligence/artificial\\_intelligence\\_expert\\_systems.htm](https://www.tutorialspoint.com/artificial_intelligence/artificial_intelligence_expert_systems.htm)
- [5] Dejan Misović, „DALJINSKO NADGLEDANJE I UPRAVLJANJE SAOBRAĆAJEM“, magistarski rad, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2014. godina
- [6] D. S. Misović, S. D. Milić, and Ž. M. Đurović, „Vessel Detection Algorithm Used in a Laser Monitoring System of the Lock Gate Zone“, *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on Year: 2016, Volume: PP, Issue: 99, Pages: 1 - 11, DOI: 10.1109/TITS.2015.2477352*
- [7] SICK sensor intelligence, „LMS5xx Laser Measurement Technology - Product Information“
- [8] Centre of Regional Science, Vienna UT, “Smart cities – Ranking of European medium-sized cities”, Final report, October 2007
- [9] Sabhijiit Singh Sandhu, Naman Jain, Aditya Gaurav, N. Ch. Sriman Narayana Iyengar “Agent Based Intelligent Traffic Management System for Smart Cities”, *International Journal of Smart Home, Vol. 9, No. 12, (2015), pp. 307-316, http://dx.doi.org/10.14257/ijsh.2015.9.12.31*
- [10] Lin Y. (2014), “The Design and Simulation of Intelligent Traffic Signal Control System Based on Fuzzy Logic”. In: Wen Z., Li T. (eds) *Foundations of Intelligent Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 277. Springer, Berlin, Heidelberg, http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-54924-3\_90*
- [11] Michael Düring, Reza Balaghiassefi, Markus Belkner, “Adaptive Cooperative Maneuver Planning Algorithm for Conflict Resolution in Diverse Traffic Situations”, 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), DOI: 10.1109/ICCVE.2014.3, (2014) 242–249.
- [12] Sverre Roed-Larsen, T. Valvisto, L. Harms-Ringdahl, C. Kirchsteiger, „Accident investigation practices in Europe - main responses from a recent study of accidents in industry and transport“, *Journal of Hazardous Materials* 111 (2004) 7–12
- [13] J.A. Stoop, „Accidents - In-Depth Analysis, towards a method AIDA?“, *Safety Science* 19 (1995) 125-136
- [14] K. Smart, „Credible investigation of air accidents“, *Journal of Hazardous Materials* 111 (2004) 111–114
- [15] Lotte Larsen, „Methods of multidisciplinary in-depth analyses of road traffic accidents“, *Journal of Hazardous Materials* 111 (2004) 115–122
- [16] Lotte Larsen, Peter Kines, „Multidisciplinary in-depth investigations of head-on and left-turn road collisions“, *Accident Analysis and Prevention* 34 (2002) 367–380
- [17] <https://www.eurocontrol.int/articles/history-future-airborne-collision-avoidance>
- [18] ACASA/WP6.1/015, “ACAS II“, WP-6.1– ACAS brochure, Version 2.0, May 2000
- [19] CHENG Dejie, LI Xiaofeng, LI Zaiming, „Motion Analysis and Morphological Approach for Optical Aerial Conflict Alarm in Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS)“, 2006 6th International Conference on ITS Telecommunications Proceedings
- [20] Liangfu Peng and Yunsong Lin, „Study on the Model for Horizontal Escape Maneuvers in TCAS“, *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 11, NO. 2, JUNE 2010*

- [21] Cristina Rico Garcia, Andreas Lehner, Thomas Strang and Matthias Rockl, „Comparison of Collision Avoidance Systems and Applicability to Rail Transport“, Telecommunications, 2007. ITST '07. 7th International Conference on ITS
- [22] Mei Li, Mieczyslaw M. Kokar, „AN EXAMPLE OF HORIZONTAL CONFLICT ALERT RESOLUTION USING SYMBOLIC REASONING“, 26th Digital Avionics Systems Conference, October 21, 2007
- [23] Kyle Treleaven, Zhi-Hong Mao, „Conflict Resolution and Traffic Complexity of Multiple Intersecting Flows of Aircraft“, IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 9, NO. 4, DECEMBER 2008
- [24] CHENG Dejie, LI Xiaofeng, LI Zaiming, “Motion Analysis and Morphological Approach for Optical Aerial Conflict Alarm in Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS)”, 6th International Conference on ITS, Telecommunications, Proceedings, (2006) 314–317.
- [25] Tianhang Wu, Wenbo Du, „A Distributed Approach to Aircraft Conflict Resolution Based on Satisficing Game Theory“, Proceedings of the Eighth International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, Shenzhen, China, Nov 2013 (ISKE 2013), pages 383 – 393
- [26] J. Sparbert, K. Dietmayer, D. Streller, ”Lane Detection and Street Type Classification using Laser Range Images”, IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Proceedings, Oukland, USA, 25-29 August 2001, Pages: 454-459.
- [27] N. Shimomura, K. Fujimoto, T. Oki, H. Muro, “An Algorithm for Distinguishing the Types of Objects on the Road Using Laser Radar and Vision”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 3, No. 3, September 2002, Pages: 189-195.
- [28] A. J. Lipton, H. Fujiyoshi, R. S. Patil, “Moving Target Classification and Tracking from Real-time Video”, WACV '98, Applications of Computer Vision - Fourth IEEE Workshop, Proceedings, ISBN 0-8186-8606-5, 19-21 October 1998, Pages: 8-14.
- [29] J. Li, X. Yuan, L. Z. Xia, “A Ship detection algorithm used in a navigation lock monitored system”, SPIE Object Detection, Classification, and Tracking Technologies, Proceedings, Vol. 4554, DOI:10.1117/12.441622, 24 September, 2001.
- [30] Merrill I. Skolnik, „Introduction to Radar Systems“, 2nd ed., McGraw-Hill, Printed in Singapore, 1981.
- [31] K.-W. Gurgel, T. Schlick, J. Horstmann, S. Maresca, „Evaluation of an HF-radar ship detection and tracking algorithm by comparison to AIS and SAR data“, 2nd International Conference, Waterside Security Conference (WSS), Marina di Carrara, Italy, 3-5 November 2010.
- [32] A. Kadyrov, Hui Yu and Honghai, „Ship Detection and Segmentation using Image Correlation“, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), Manchester , UK, 13-16 October 2013.
- [33] Jiaqiu Ai, Xiangyang Qi, Weidong Yu, Yunkai Deng, Fan Liu, Li Shi, „A New CFAR Ship Detection Algorithm Based on 2-D Joint Log-Normal Distribution in SAR Images“, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 7, No. 4, October 2010, Pages: 806-810.
- [34] Jie Shan, Charles K. Toth, „Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing“, CRC Press: Boca Rato, ISBN 978-1-4200-5142-1, 2009.
- [35] Paul F. McManamon, „Review of ladar: a historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology“, Optical Engineering, Vol. 51, Issue 6, 2012, Pages: 060901-060901-13.
- [36] A. R. J. Ruiz, F. S. Granja, „A Short-range Ship Navigation System based on Ladar Imaging and Target Tracking for Improved Safety and Efficiency“, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 10, No. 1, March 2009, Pages: 186-197.
- [37] G. Kocak, S. Yamamoto, T. Hashimoto, “Detection and tracking of ships using a stereo vision system”, Scientific Research and Essays, Vol. 8(7), February 2013, Pages: 288-303.

- [38] A. N. Vasile, R. M. Marino, "Pose-Independent Automatic Target Detection and Recognition Using 3D Laser Radar Imagery", *Lincoln Laboratory Journal*, Vol. 15, No. 1, 2005, Pages: 61-78.
- [39] Richard M. Marino, William R. Davis Jr., „Jigsaw: A Foliage-Penetrating 3D Imaging Laser Radar System“, *LINCOLN LABORATORY JOURNAL*, VOLUME 15, NUMBER 1, 2005.
- [40] R. Labayrade, C. Royere, D. Gruyer, D. Aubert: "Cooperative Fusion for Multi-Obstacles Detection With Use of Stereovision and Laser Scanner", *Autonomous Robots*, Springer, Vol. 19, Issue 2, September 2005, Pages: 117-140.
- [41] C. C. Wang, C. Thorpe, A. Suppe, "Ladar-Based Detection and Tracking of Moving Objects from a Ground Vehicle at High Speeds", *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Proceedings, ISBN 0-7803-7848-2, 9-11 June 2003, Pages: 416-421.
- [42] Detection and Ranging Solutions - Laser measurement technology, components and applications packages (SICK).
- [43] Robert MacLachlan, Tracking Moving Objects from a Moving Vehicle using a Laser Scanner, The Robotics Institute Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 23 June, 2005.
- [44] J. Zhao, M. Tan, W. G. Price, P. A. Wilson, „DCPA SIMULATION MODEL FOR AUTOMATIC COLLISION AVOIDANCE DECISION MAKING SYSTEMS USING FUZZY SETS“, *OCEANS '94. 'Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation.'* Proceedings
- [45] Dr. Roman Katz, Raymond Schulz, „Towards the Development of a Laserscanner-based Collision Avoidance System for Trams“, 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), June 23-26, 2013, Gold Coast, Australia
- [46] Aron Ballagi, Gabor Rozsa, Laszlo T. Koczy, „Fuzzy Signature Based Description of Overtaking and Engagement Conflicts in Railway Traffic Control“, *AFRICON 2015*
- [47] Perkins S. R. and Harris J. I., "Traffic conflicts characteristics: Accident potential at intersections", *HRB Rec. 225, Highway Res. Bd.*, 35-44, 1968.
- [48] Lotte Larsen, "Methods of multidisciplinary in depth analyses of road traffic accidents", *Journal of Hazardous Materials* 111 (2004) 115–122
- [49] L. Hantula, Fatal Accident, VALT Method. Road Accident Investigation Team Research Plan 1992, Finnish Motor Insurance Centre, Traffic Safety Committee of Insurance Companies (VALT), Helsinki, Finland (Transl. 18 February 1997).
- [50] Wu Qun, Xiang Qiao-jun, „Traffic Safety Evaluation of Highway Intersection with the Use of Conflict Severity Concept“, 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation
- [51] V. Trinadha Rao, V. R. Rengaraju, „Modeling Conflicts of Heterogeneous Traffic at Urban Uncontrolled Intersections“, *Journal of Transportation Engineering*, 1998(1): 23-34.
- [52] V. Trinadha Rao, V.R. Rengaraju, „Probabilistic Model for Conflicts at Urban Uncontrolled Intersection“, *Journal of Transportation Engineering*, 1997(1): 81-84.
- [53] Xiang Qiao-jun, Lu Jian, „The Evaluation of Traffic Safety Based on Traffic Conflict at Highway Intersection“, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2004, 11(21): 55-58.
- [54] Ye Fan, Lu Jian, Ding Ji-Ping, Xiang Qiao-jun, „Application Study of Traffic Conflict Technique in Safety Evaluation on ETC System“, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2004, 12(21): 107-111.
- [55] Luo Jiang-tao, Liu Xiao-ming, Ren Fu-tian, „The Gray Evaluation of Road Traffic Safety“, *China Journal of Highway and Transport*, 1995, 4(8):78-83.
- [56] Guan Xiao-wei, Xiao Gui-ping. The Gray Cluster Theory Method in Evaluation of Traffic Safety Based on Traffic Conflict Technique at Signal Intersection. *Journal of North China Technology College*, 2006, 3(3):21-24.

- [57] Guan Xiao-wei, Xiao Gui-ping. The Gray Cluster Theory Method in Evaluation of Traffic Safety Based on Traffic Conflict Technique at Signal Intersection. *Journal of North China Technology College*, 2006, 3(3):21-24.
- [58] Cheng Wei, Wang Gui-yong. Gray Cluster Evaluation of Safety at Intersections by Traffic Conflict Technique. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 2005, 3(30): 106-110.
- [59] Snorre Sklet, "Comparison of some selected methods for accident investigation", *Journal of Hazardous Materials* 111 (2004) 29–37.
- [60] Sihan Cheng, Yuelong Su, Danya Yao, Yi ZhangLi Li, Renjie Teng, "A CA Model for Intrusion Conflicts Simulation in Vehicles-Bicycles Laminar Traffic Flow", *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Eindhoven University of Technology, Netherland, June 4-6, 2008, 727–732.
- [61] Tong Zhu, Jian Xu, Xiaoguang Yang, Yu Bai, "Factors Contributing to Urban Expressway Entrance and Exit Safety", *IET, The Sixth Advanced Forum on Transportation of China*.
- [62] Wu Lingtao, Yang Manjuan, Tang Chengcheng, Peng Daoyue, Shen Guohua, Zhang Tiejun, Guo Zhanyang, "Research on Influence Extension of Two-lane Highway Intersections Based on Traffic Accident Database", *2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing, Proceedings (2010)*, 244-246.
- [63] Fan Xiaoqiu, Ji Jinzhang, Zhang Guoqiang, "Impact of Driving Behavior on the traffic safety of Highway Intersection", *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, DOI:10.1109/ICMTMA.2011.379, *Proceedings*, pp 370-373, 2011.
- [64] Nicolas Saunier, Tarek Sayed, Clark Lim, „Probabilistic Collision Prediction for Vision-Based Automated Road Safety Analysis“, *WeB3.4, Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, Seattle, WA, USA, Sept. 30 - Oct. 3, 2007
- [65] W. Hu, X. Xiao, D. Xie, T. Tan, and S. Maybank, "Traffic accident prediction using 3d model based vehicle tracking," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 3, pp. 677-694, May 2004.
- [66] <https://opencv.org/>
- [67] Jung S. Jung, Chul H. Jung, Jung Kim, Young K. Kwag, „Road Watch Radar System Development“, *2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*
- [68] ZHU Tong, XU Jian, BAI Yu, YANG Xiaoguang, „A Research on Risk Assessment and Warning Strategy for Intersection Collision Avoidance System“, *Proceedings of the 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, St. Louis, MO, USA, October 3-7, 2009
- [69] <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/>
- [70] Hemant Kowshik, Student Member, IEEE, Derek Caveney, Member, IEEE, and P. R. Kumar, Fellow, IEEE, „Provable Systemwide Safety in Intelligent Intersections“, *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, VOL. 60, NO. 3, MARCH 2011
- [71] Adam Houenou, Philippe Bonnifait and Veronique Cherfaoui, „Risk Assessment for Collision Avoidance Systems“, *2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* October 8-11, 2014. Qingdao, China
- [72] Albert Rizaldi, Sebastian Sontges, Matthias Althoff, „On Time-Memory Trade-Off for Collision Detection“, *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* June 28 - July 1, 2015. COEX, Seoul, Korea
- [73] S. Gottschalk, M. C. Lin, and D. Manocha, "OBBTree: A hierarchical structure for rapid interference detection," *Computer Graphics*, vol. 30, pp. 171–180, 1996.

- [74] Ruili Zeng, Weihua Sheng, Dan Yang, „Collision Probability Computation Based on Vehicle to Vehicle Communication“, The 5th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems June 8-12, 2015, Shenyang, China
- [75] Jorg Hillenbrand, Kristian Kroschel, „A Study on the Performance of Uncooperative Collision Mitigation Systems at Intersection-like Traffic Situations“, Cybernetics and Intelligent Systems, 2006 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems
- [76] Jeong-Ah Jang, Keechoo Choi, Hanbyeog Cho, „A Fixed Sensor-Based Intersection Collision Warning System in Vulnerable Line-of-Sight and/or Traffic-Violation-Prone Environment“, IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 13, NO. 4, DECEMBER 2012
- [77] Chung-Ping Young, Member, Bao Rong Chang, Shiou-Yu Chen, Li-Chang Wang, „Highway Traffic Simulator with Dedicated Short Range Communications Based Cooperative Collision Prediction and Warning Mechanism“, 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Eindhoven University of Technology Eindhoven, The Netherlands, June 4-6, 2008
- [78] Philip Heck, Jan Bellin, Martin Matoušek, Stefan Wonneberger, Ondrej Sychrovsky, Radim Šara, Markus Maurer, „Collision Mitigation for Crossing Traffic in Urban Scenarios“, 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) June 23-26, 2013, Gold Coast, Australia
- [79] J. Pawelec, K. Kosmowski, Z. Krawczyk, „ICT ANTI COLLISION RADAR FOR ROAD TRAFFIC“, Vehicular Technology Conference, 2007. VTC-2007 Fall. Vehicular Technology Conference
- [80] Kyoung-Dae Kim, „Collision Free Autonomous Ground Traffic: A Model Predictive Control Approach“, Cyber-Physical Systems (ICCPS), 2013 ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS)
- [81] James Ward, Gabriel Agamennoni, Stewart Worrall, Eduardo Nebot, „Vehicle Collision Probability Calculation for General Traffic Scenarios Under Uncertainty“, 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) June 8-11, 2014. Dearborn, Michigan, USA
- [82] CAMP - VSC3 Consortium, „SAE J2735 DSRC Message Dictionary Overview“, March 8, 2012
- [83] J. Shahi, B. Namaki Araghi, Aliasghar Mehdizadeh, „ESTIMATING THE ACCURACY OF OPPOSING LEFT-TURN POTENTIAL CONFLICT MODEL VIA PROGRAMMING IN MATLAB“, System Safety, 2008 3rd IET International Conference on System Safety
- [84] Fangqiang Lu, Xuewu Chen, „Analyzing the Speed Dispersion Influence on Traffic Safety“, 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation
- [85] Gabriel R. Campos, Paolo Falcone, Henk Wymeersch, Robert Hult, Jonas Sjoberg, „Cooperative receding horizon conflict resolution at traffic intersections“, 53rd IEEE Conference on Decision and Control December 15-17, 2014. Los Angeles, California, USA
- [86] Wu Qun, Xiang Qiao-jun, „Traffic Safety Evaluation of Highway Intersection with the Use of Conflict Severity Concept“, 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation
- [87] Guo Weiwei, Wang Dianhai, Chen Yongheng, „Research on Traffic Conflict Automatic Discrimination Based on Support Vector Machine“, 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation
- [88] Dong Shen, Youfang Lin, Sheng Han, Ruibo Xun, „Collision Avoidance Among Multiple Car-Like Robots in Common Environment“, Proceedings of the Eighth International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, Shenzhen, China, Nov 2013 (ISKE 2013), pages 657 – 667
- [89] The Open Motion Planning Library, <http://ompl.kavrakilab.org>
- [90] A Flexible Collision Library, [http://gamma.cs.unc.edu/FCL/fcl\\_docs/webpage/generated/](http://gamma.cs.unc.edu/FCL/fcl_docs/webpage/generated/)

- [91] Mimbela L.E.Y., Klein L. A., "SUMMARY OF VEHICLE DETECTION AND SURVEILLANCE TECHNOLOGIES USED IN INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS", The Vehicle Detector Clearinghouse (2000)
- [92] Caruso M. J., Bratland Tamara, Smith C. H., Schneider R., "A New Perspective on Magnetic Field Sensing", Honeywell, Inc.
- [93] <http://www.gmr-sensors.com/gmr-operation.htm>
- [94] A. Daubaras, M. Zilys, "Vehicle Detection based on Magneto-Resistive Magnetic Field Sensor", ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING, ISSN 1392 – 1215, 2012. No. 2
- [95] Honeywell International Inc., "Vehicle Detection Using AMR Sensors", Application Note, August 2005
- [96] Bence Koszteczyk, Gyula Simon, "Magnetic-based vehicle detection with sensor networks", DOI: 10.1109/I2MTC.2013.6555421, 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)
- [97] Higashikubo M., Hinenoya T., TAKEUCHI K., "Traffic Queue Length Measurement Using an Image Processing Sensor", Intelligent Transportation: Realizing the Future. Abstracts of the Third World Congress on Intelligent Transport Systems, Orlando, Florida, (1996)
- [98] Takahashi K., Kitamura T., Takatoo M., Kobayashi Y., Satoh Y., "Traffic Flow Measuring System by Image Processing", MVA '96 IAPR Workshop on Machine Vision Applications, November. 12-14, 1996. Tokyo. Japan
- [99] Agustín Yabo, Sebastian Arroyo, Felix Safar, Damian Oliva, "VEHICLE CLASSIFICATION AND SPEED ESTIMATION USING COMPUTER VISION TECHNIQUES", AADECA 2016 - Semana del Control Automático - 25 Congreso Argentino de Control Automático 1 al 3 de Noviembre de 2016 - Buenos Aires, Argentina
- [100] Nilesh J Uke, Ravindra C Thool, "Moving Vehicle Detection for Measuring Traffic Count Using OpenCV", DOI: 10.12720/joace.1.4.349-352, Conference: 4th International Conference on Conference on Electronics Computer Technology (ICECT 2012)
- [101] Amirali Jazayeri, Hongyuan Cai, Member, IEEE, Jiang Yu Zheng, Senior Member, IEEE, and Mihran Tuceryan, Senior Member, IEEE, "Vehicle Detection and Tracking in Car Video Based on Motion Model", IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 12, NO. 2, JUNE 2011
- [102] Chin-Teng Lin, C. S. George Lee, "Neural Fuzzy Systems: A Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems", 1996, Prentice Hall
- [103] Jerry Mendel, Hani Hagrass, Woei-Wan Tan, William W. Melek, Hao Ying, "Introduction To Type-2 Fuzzy Logic Control: Theory and Applications", Jul 2014, Wiley-IEEE Press
- [104] Zadeh L. A., "The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning, Part I.", Inf. Sci. 8:199-249 (1975)
- [105] Mamdani E.H., Assilian S., "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", International Journal of Man-Machine Studies Volume 7, Issue 1, January 1975, Pages 1–13 (1975)
- [106] Zadeh L. A., "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOL. SMC-3, NO. 1, JANUARY 1973
- [107] Kaufmann A., "Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets", New York: Academic Press (1990)
- [108] Mizumoto M., "Fuzzy sets and their operations", Inf. Control 48:30-48 (1981)
- [109] Tsukamoto Y., "An approach to fuzzy reasoning method", In M.M. Gupta, R.K. Ragade and R.R. Yager (eds.) Advances in Fuzzy Sets Theory and Applications, 137-149, Amsterdam North Holland (1979)

- [110] Lee C.C., "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller, Parts I. and II.", *Systems Man and Cybernetics*, IEEE Transactions on (Volume:20 , Issue: 2 ) (1990)
- [111] BRAAE M., RUTHERFORD D.A., "FUZZY RELATIONS IN A CONTROL SETTING", *Kybernetes*, Vol. 7 Iss: 3, pp.185 - 188 (1978)
- [112] Yager R. R., "Fuzzy sets and approximate reasoning in decision and control", *Proc. IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*, San Diego (1992)
- [113] Filev D. P., Yager R. R., "A generalized defuzzification method via BADD distribution", *Int. J. Intell. Syst.* 6(7):687-697 (1991)
- [114] Oscar Castillo, Patricia Melin, „Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications“, ISBN 978-3-540-76283-6, Springer, 2008
- [115] Oscar Castillo, Patricia Melin, „Recent Advances in Interval Type-2 Fuzzy Systems“, ISBN 978-3-642-28955-2, DOI 10.1007/978-3-642-28956-9, Springer, 2012
- [116] Nilesh N. Karnik, Jerry M. Mendel, Fellow, IEEE, Qilian Liang, „Type-2 Fuzzy Logic Systems“, *IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS*, VOL. 7, NO. 6, DECEMBER 1999
- [117] Jerry M. Mendel, Robert I. Bob John, „Type-2 Fuzzy Sets Made Simple“, *IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS*, VOL. 10, NO. 2, APRIL 2002
- [118] Jerry M. Mendel, Life Fellow, IEEE, Robert I. John, Member, IEEE, Feilong Liu, Student Member, IEEE, „Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple“, *IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS*, VOL. 14, NO. 6, DECEMBER 2006
- [119] Jerry M. Mendel, Life Fellow, IEEE, „General Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple: A Tutorial“, *IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS*, VOL. 22, NO. 5, OCTOBER 2014
- [120] Arianna Mencattini, Marcello Salmeri, Roberto Lojaco, „Type-2 Fuzzy Sets for Modeling Uncertainty in Measurement“, *AMUEM 2006 - International Workshop on Advanced Methods for Uncertainty Estimation in Measurement*, Sardinia, Trento, Italy, 20-21 April 2006
- [121] N.N. Karnik, J.M. Mendel, „An introduction to type-2 fuzzy logic systems“, Technical Report, University of Southern California (1998)
- [122] <http://mail.beogradput.com/KontrolaSaobracajaWeb/Beograd.aspx>
- [123] Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc., „TSL2561 - LIGHT TO DIGITAL CONVERTER“, TAOS059N – MARCH 2009
- [124] <https://store.arduino.cc/grove-water-sensor>
- [125] <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/framework/wpf/getting-started/introduction-to-wpf-in-vs>
- [126] <http://saobracaj.bg-info.org/kamere-uzivo>
- [127] S. Kamijo, Y. Matsushita, K. Ikeuchi, M. Sakauchi, "The Traffic Monitoring and Accident Detection at Intersections", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 1, No. 2, June 2000, Pages: 108-118.
- [128] E. J. Molenaar, M. Tsameny, "Satellite-based Vessel Monitoring Systems, International Legal Aspects & Developments in State Practice", *FAO Legal Papers*, online #7, April 2000.
- [129] P. A. Ioannou, C. C. Chien, "Autonomous Intelligent Cruise Control", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 42, No. 4, DOI: 10.1109/25.260745, November 1993, Pages: 657-672.
- [130] Z. Changxiao, C. Yao, W. Hailiang, X. Huagan, "Reliability Analysis of Aircraft Condition Monitoring Network Using an Enhanced BDD Algorithm", *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 57, No. 6, 2012, Pages: 925-930.



- [131] S.Milić, M.Srećković, “A stationary System of Non-contact Temperature Measurement and Hot Box Detecting”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, Issue 5, Sept. 2008, Pages: 2684-2694.
- [132] Saša Milić, Dejan Misović, Željko Đurović, Miša Kožicić, “Detekcioni algoritam laserskih nadzornih sistema u brodskim prevodnicama”, INFOTEH-JAHORINA Vol. 15, March 2016.
- [133] J. F. Campbell, L. D. Smith, D. C. Sweeney II, R. Mundy, „Decision Tools for Reducing Congestion at Locks on the Upper Mississippi River“, HICSS 2007. 40th Annual Hawaii International Conference on, System Sciences 2007, ISSN: 1530-1605, E-ISSN: 0-7695-2755-8, DOI: 10.1109/HICSS.2007.164, Page 56, Jan. 2007, Waikoloa, Hawaii,
- [134] Mendes, L. C. Bento, U. Nunes, „Multi-target Detection and Tracking with a Laserscanner“, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, Parma, Italy, 14-17 June 2004, Pages: 796-801.
- [135] K. Fukunaga, „Introduction to Statistical Pattern Recognition“, 2nd Edition, Academic Press, ISBN 0-12-269851-7, 1990, Pages: 65-84.
- [136] S. Milić, A. Žigić, M. Ponjavić, „On-line Temperature Monitoring, Fault Detection and a Novel Heat Run Test of Water-Cooled Rotor of Hydrogenerator“, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 28, Issue 3, September 2013 , Pages: 698 - 706.
- [137] K. Fürstenberg, J. Hipp, A. Liebram, „A Laser Scanner for Detailed Traffic Data Collection and Traffic Control“, 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, Turin, Italy, 6-9 November, 2000.

## BIOGRAFIJA AUTORA

Dejan S. Misović je rođen 1977. godine u Beogradu gde je završio osnovnu i srednju elektrotehničku školu. Elektrotehnički fakultet u Beogradu upisao je 1995. godine. Diplomirao je 2001. godine, na Katedri za automatiku. Naslov diplomskog rada je bio „Primena LMI tehnika u sintezi upravljanja i analizi stabilnosti“.

Zaposlen je u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla“. Radio je i u privatnoj firmi „Decode Data Communications“. Njegova uža stručna oblast je automatika, procesna i merna tehnika. Duži niz godina je angažovan na poslovima izrade mernih i kontrolnih uređaja koji imaju primenu u sistemima za daljinski nadzor i upravljanje procesima: detekcija plovila u brodskim prevodnicama, detekcija pregrejanih ležajeva teretnih vagona, upravljanje procesom saobraćajne signalizacije u nekoliko područja na teritoriji grada Beograda i dr.

Zvaršio je magistarske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na odseku Upravljanje sistemima, položio je predviđene ispite sa ocenom 10 i odbranio magistarski rad (18.9.2014.) sa ocenom 10 pod naslovom "Daljinsko nadgledanje i upravljanje saobraćajem".

Tokom 2012. i 2013. godine učestvovao je u razvoju i implementaciji laserskog sistema za daljinski nadzor i detekciju plovila u brodskoj prevodnici HE Đerdap 2. Kao rezultat pomenutih aktivnosti publikovan je naučni rad u vrhunskom međunarodnom časopisu kategorije M21 (IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems), u kome je prvi autor. Takođe je učestvovao u pisanju dva rada na međunarodnim konferencijama, dva tehnička rešenja i osam radova objavljenih na domaćim konferencijama.

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Потписани: Дејан С. Мисовић  
Број уписа: 5046/2015

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

#### **Интелигентни систем за управљање саобраћајем базиран на примени фази логике**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, 11.03.2019.

Потпис докторанда



**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ  
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Име и презиме аутора: Дејан С. Мисовић  
Број уписа: 5046/2015  
Студијски програм: Управљање системима и обрада сигнала  
Наслов рада: Интелигентни систем за управљање саобраћајем базиран  
на примени фази логике  
Ментор: др Жељко Ђуровић, редовни професор

Потписани: Дејан С. Мисовић

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада. Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 11.03.2019.

Потпис докторанда



## ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

**Интелигентни систем за управљање саобраћајем базиран на примени фази логике**

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

У Београду, 11.03.2019.

Потпис докторанда



Мисовић Дејан

1. Autorstvo. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. Autorstvo – bez prerada. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.