



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У  
НОВОМ САДУ



Владимир Бугарски

**Експертски систем за управљање  
бродском преводницом заснован на  
рачунарској интелигенцији**

**ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА**

Нови Сад, 2015



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА  
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР:</b>	
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>	
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска документација
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Текстуални штампани материјал
Врста рада, <b>ВР:</b>	Докторска дисертација
Аутор, <b>АУ:</b>	Владимир Бугарски
Ментор, <b>МН:</b>	Др Филип Кулић, редовни професор
Наслов рада, <b>НР:</b>	Експертски систем за управљање бродском преводницом заснован на рачунарској интелигенцији
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски, енглески
Земља публикавања, <b>ЗП:</b>	Србија
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	АП Војводина
Година, <b>ГО:</b>	2015
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Ауторски репринт
Место и адреса, <b>МА:</b>	21000 Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	8/118/142/16/41/0/0
Научна област, <b>НО:</b>	Електротехника и рачунарство
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Аутоматика и управљање системима
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Фази експертски систем; подршка у одлучивању; SCADA; генетски алгоритам; PSO; вештачка колонија пчела; бродска преводница.
<b>УДК</b>	
Чува се, <b>ЧУ:</b>	Библиотека Факултета техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад
Важна напомена, <b>ВН:</b>	
Извод, <b>ИЗ:</b>	У дисертацији је дато једно решење аутоматског оперативног управљања двосмерном бродском преводницом са једном комором. Креиран је експертски систем заснован на расплинутој (fuzzy) логици. Управљачки систем је тестиран на моделу бродске преводнице који је креиран на основу статистичких података о густини саобраћаја на хидросистему ДТД (Дунав-Тиса-Дунав), на основу техничке документације бродске преводнице и на основу разговора са оператерима. Систем је затим оптимизован глобалним алгоритмима оптимизације. Добијено решење се показало значајно боље у поређењу са стандардним алгоритмима одлуке.
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	25.06.2015.
Датум одбране, <b>ДО:</b>	
Чланови комисије, <b>КО:</b>	Председник: Др Зоран Јеличић, редовни професор
	Члан: Др Томислав Шекара, ванредни професор
	Члан: Др Тодор Бачкалић, ванредни професор
	Члан: Др Велимир Чонградац, ванредни професор
	Члан, ментор: Др Филип Кулић, редовни професор
	Потпис ментора



## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monographic publication
Type of record, <b>TR</b> :	Textual printed material
Contents code, <b>CC</b> :	PhD thesis
Author, <b>AU</b> :	Vladimir Bugarski MSc
Mentor, <b>MN</b> :	Filip Kulić PhD, Full Professor
Title, <b>TI</b> :	Expert system for ship lock control based on computational intelligence
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian, English
Country of publication, <b>CP</b> :	Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	AP Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2015
Publisher, <b>PB</b> :	Author's reprint
Publication place, <b>PP</b> :	21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, <b>PD</b> : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	8/118/142/16/41/0/0
Scientific field, <b>SF</b> :	Electrical Engineering, Computing and Control
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Automation and Control Systems
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Fuzzy expert system; Decision support; SCADA; Genetic algorithm; PSO; Artificial bee colony; Ship lock.
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	Library of Faculty of technical sciences, 21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	This thesis presents a solution to automatic control of a two-way one-channel ship lock. Expert system based on fuzzy logic is designed. This control system is tested on model of ship lock created using statistical data of transportation density on DTD (Danube-Tisa-Danube) channel, using technical documentation of ship lock and interview with operators. The system is further optimized with global optimization techniques. Given solution proved to be significantly better than standard decision algorithms.
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	25.06.2015.
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	
President:	Zoran Jeličić PhD, Full Professor
Member:	Tomislav Šekara PhD, Associate Professor
Member:	Todor Bačkalić PhD, Associate Professor
Member:	Velimir Čongradac PhD, Associate Professor
Member, Mentor:	Filip Kulić PhD, Full Professor
	Mentor's sign

# SADRŽAJ

REZIME .....	3
ABSTRACT .....	5
ZAHVALNICA.....	7
SPISAK SLIKA .....	8
SPISAK TABELA .....	10
SPISAK KORIŠĆENIH SKRAĆENICA .....	11
1. UVOD.....	12
1.1. Predmet, problem, ciljevi i osnovne hipoteze doktorske disertacije .....	14
2. PREGLED LITERATURE.....	17
3. ORGANIZACIJA KANALSKOG SAOBRAĆAJA I MODEL BRODSKE PREVODNICE.....	19
3.1. Istorijat plovidbe kanalima i razvoj brodskih prevodnica u svetu i kod nas .....	19
3.1.1. Razvoj plovnih kanala .....	19
3.1.2. Plovni kanali danas.....	20
3.1.3. Razvoj plovnih kanala u Srbiji .....	20
3.1.4. Kanalska plovidba .....	23
3.1.5. Propusna sposobnost brodske prevodnice .....	23
3.2. Organizacija saobraćaja i tehnološki proces plovidbe u zoni brodske prevodnice.....	25
3.3. Parametri modela brodske prevodnice .....	29
3.4. Baza dolazaka plovila.....	35
4. EKSPERTSKI SISTEM ZA UPRAVLJANJE BRODSKOM PREVODNICOM.....	37
4.1. Informaciono-upravljački sistemi u saobraćaju na unutrašnjim vodnim putevima .....	38
4.2. Upravljanje plovidbom u zoni brodske prevodnice.....	39
4.3. Fazi sistemi i podrška u odlučivanju .....	39
4.3.1. Fazi (rasplinuta) logika.....	40
4.3.2. Lingvističke promenljive.....	41
4.3.3. Pojam fazi skupa i osnovne operacije .....	41
4.3.4. Mehanizam aproksimativnog zaključivanja .....	45
4.3.5. Fazi upravljanje .....	55
4.3.6. Fazi ekspertske sistemi.....	57
4.4. Fazi logika i upravljanje brodskom prevodnicom .....	59
4.5. Integracija fazi ekspertske sistema u nadzorno upravljački sistem prevodnice .....	59
4.5.1. Tehnički opis brodske prevodnice.....	60

4.5.2.	Predložen SCADA softver .....	63
5.	KONSTRUKCIJA EKSPERTSKOG SISTEMA I OPTIMIZACIJA PARAMETARA..	65
5.1.	Kriterijum optimalnosti .....	65
5.2.	Konstrukcija fazi ekspertskog sistema .....	66
5.2.1.	Definisanje ulaznih i izlaznih varijabli .....	67
5.2.2.	Fazifikacija i funkcije pripadnosti .....	68
5.2.3.	Kreiranje upravljačkih pravila (razvoj algoritma fazi zaključivanja) .....	70
5.2.4.	Defazifikacija .....	71
5.2.5.	Izbor metoda fazi odlučivanja .....	73
5.3.	Izbor metoda optimizacije .....	74
5.3.1.	Struktura jedinke (čestice) .....	75
5.3.2.	Veštački život i algoritmi optimizacije .....	75
5.4.	Genetski algoritam (GA) .....	78
5.5.	Optimizacija zasnovana na roju čestica (PSO) .....	79
5.5.1.	Konvergencija .....	80
5.5.2.	Algoritam .....	80
5.6.	Optimizacija zasnovana na veštačkoj koloniji pčela (ABC) .....	84
6.	REZULTATI I DISKUSIJA .....	86
6.1.	Kriterijumi za procenu rezultata .....	86
6.1.1.	Kriterijum minimalnog vremena čekanja .....	86
6.1.2.	Kriterijum minimalnog broja prevođenja .....	86
6.2.	Prikaz inicijalnih rezultata .....	86
6.3.	Prikaz rezultata nakon optimizacije parametara ekspertskog sistema .....	90
6.3.1.	Analiza, procena i izbor parametara kriterijuma optimalnosti .....	99
6.4.	Usporedni pregled metoda optimizacije: GA, PSO i ABC .....	100
7.	ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA .....	103
8.	LITERATURA .....	106
	KRATKA BIOGRAFIJA AUTORA .....	118

## REZIME

U disertaciji je prikazan razvoj ekspertskog sistema za operativno upravljanje prevođenjem plovila u brodskoj prevodnici sa jednom komorom projektovanom za jedno merodavno plovilo ili sastav. Ekspertski sistem je razvijen kao sistem za podršku u odlučivanju zasnovan na rasplinutoj (fazi, engl. Fuzzy) logici. Disertacija sadrži i kratak pregled istorijata i konstrukcije brodskih prevodnica, zatim osnovne informacije o fazi logici, fazi lingvističkim varijablama i metodama aproksimativnog zaključivanja. Upravljački algoritam je kreiran na osnovu skupa lingvističkih pravila koja opisuju upravljačku strategiju operatera brodskih prevodnica. Subjektivne procene i iskustva operatera (prevodničara) unutar algoritma su definisane pomoću fazi skupova. Na osnovu toga, i izlazni rezultat algoritma je fazi vrednost koja, posle primene defazifikacije, generiše jasnu i preciznu odluku koja može da se primeni u realnom sistemu.

Generisani skup podataka o saobraćaju plovila zasnovan je na statističkim podacima o godišnjoj raspodeli gustine saobraćaja na osnovnoj kanalskoj mreži DTD (Dunav-Tisa-Dunav). Ovaj skup je korišćen za analizu i za potrebe simulacije. Formiran je simulacioni model brodske prevodnice na osnovu tehničke dokumentacije i na osnovu razgovora sa operaterima. Predstavljena su dva kriterijuma za procenu upravljačke strategije. Ova dva kriterijuma pojedinačno predstavljaju, sa jedne strane interese brodarar, a sa druge strane, interese upravljača kanalskim sistemom. Ovi uzajamno suprotni interesi postoje u praksi i korišćeni su u istraživanju za evaluaciju rezultata rada ekspertskog sistema u prvom delu istraživanja, kao i za definisanje kriterijuma optimalnosti u drugom delu istraživanja.

Dodatno je u disertaciji opisan razvoj nadzorno upravljačkog (engl. SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition) sistema. Ovaj sistem se oslanja na PLC (programabilni logički kontroler, engl. Programmable Logic Controller) i pruža platformu za implementaciju predstavljenog fazi ekspertskog sistema.

Brodske prevodnice su najčešće korišćeni hidrotehnički objekti za savlađivanje denivelacije koja nastaje izgradnjom brane na unutrašnjim vodnim putevima. U praksi, upravljanje brodom prevodnicom se zasniva na subjektivnim procenama i iskustvu operatera.

Početni fazi sistem zaključivanja razvijen je na osnovu sugestija operatera koji imaju dugogodišnje iskustvo u upravljanju brodom prevodnicom. Razvijena je praktična aplikacija koja se oslanja na fazi sistem zaključivanja Mamdani tipa. Zatim je sistem optimizovan globalnim algoritmima optimizacije. Optimizovani su parametri ulaznih funkcija pripadnosti u cilju postizanja boljih rezultata u lokalnoj distribuciji prolazaka plovila kroz prevodnicu: kraća vremena zadržavanja plovila i manji broj promena nivoa bez plovila u komori. Upoređeni su rezultati dobijeni dobro poznatim globalnim algoritmima optimizacije: genetski algoritam (GA); algoritam zasnovan na roju čestica (PSO, engl. Particle Swarm Optimization) i algoritam zasnovan na veštačkoj koloniji pčela (ABC, engl. Artificial Bee Colony). Svrha poređenja je pronalazak najboljeg algoritma za optimizaciju funkcija pripadnosti fazi ekspertskog sistema. Rezultati su pokazali da sve tri procedure pokazuju približne rezultate i pružaju sveukupno poboljšanje performansi prevođenja plovila, što ih favorizuje u sličnim problemima upravljanja saobraćajem. Dobijeno rešenje se pokazalo značajno bolje u poređenju sa standardnim

algoritmima odlučivanja. Posebno se ovo rešenje pokazalo superiorno u situacijama kada je gustina saobraćaja izuzetno velika te se prevazilazi teorijski propusni opseg prevodnice. Interesantna je činjenica da se sa predloženim ekspertskim sistemom mogu poboljšati istovremeno rezultati po oba navedena suprotstavljena kriterijuma.

Fazi algoritam, razvijen tokom istraživanja i predstavljen u ovoj disertaciji, predstavlja retku primenu računarske inteligencije u upravljanju saobraćajem plovila i značajno poboljšava proces prevođenja plovila u brodskoj prevodnici. Predstavljani ekspertski sistem može se koristiti kao podrška u odlučivanju u procesu upravljanja ili/i kao platforma za obuku novih operatera. U potpuno automatizovanoj verziji predloženi ekspertski sistem može direktno da upravlja procesom operativnog prevođenja plovila. Na taj način bi se isključile greške nastale usled ljudskog faktora.

**Ključne reči:** fazi ekspertski sistem; podrška u odlučivanju; SCADA; genetski algoritam; PSO; veštačka kolonija pčela; brodska prevodnica.

## ABSTRACT

The thesis presents the development of an expert system for the operational control of two-way ship lock with one chamber and one vessel capacity. The expert system is designed as a decision support system based on fuzzy logic. The dissertation contains a summary of the history and construction of locks, then basic information about fuzzy logic, fuzzy linguistic variables and methods of approximate reasoning. The control algorithm is created from a set of linguistic rules that describe operator's control strategy. The subjective assessment and experience of the operator (lockmaster) are within the algorithm defined by fuzzy sets. Hence, the output of the algorithm is also a fuzzy value, which after application of defuzzification generates a clear and precise decision that can be applied in practice.

Water traffic dataset is generated based on statistical data on the annual distribution of the traffic density on the DTD (Danube-Tisa-Danube) canal in Serbia. This dataset is used for analysis and simulation purposes. A simulation model of a ship lock is created based on technical documentation and discussions with operators. Two criteria are presented for the evaluation of control strategies. These two criteria individually represent on one side the interests of shippers and on the other the interests of lock owners and workers. These mutually conflicting interests exist in practice. They are used for evaluation of the results of the expert system in the first part of the study. In the second part, they are used to define optimality criterion.

In addition, the thesis describes the development of SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) system. This system relies on a PLC (Programmable Logic Controller) and provides a platform on which to implement the desired fuzzy algorithm.

Ship locks are the most frequently used hydro-technical facilities designed to overcome the difference in water level resulting from the construction of dams on inland waterways. In practice, ship lock control is based on subjective assessments and experience of the operator.

The initial fuzzy inference system is developed based on suggestions of operators with extensive experience in ship lock control. A practical software that relies on fuzzy inference system of Mamdani type is developed. The system is then optimized using global optimization algorithms. The subject of optimization was parameters of input membership functions and the goal was to achieve better results in local distribution of ship arrivals, i.e. shorter waiting times for ships and less empty lockages (without a vessel in the chamber). Particle swarm optimization, artificial bee colony optimization and genetic algorithm were compared. The results shown in this paper confirmed that all these procedures show similar results and provide overall improvement of lock operation performance, which speaks in favor of their application in similar transportation problems. The solution turned out to be significantly better compared with classical ship lock control. In particular, this solution proved superior in situations when traffic density is extremely high and beyond the theoretical bandwidth of the lock. Interesting is the fact that the proposed expert system can, at the same time, improve results by both of the mentioned conflicting criteria.

Fuzzy algorithm presented in this thesis is a rare application of computational intelligence in the navigable canals, and significantly improves the lockage process. Presented expert system can be used as a decision support system during control and/or as a platform for training of new operators. The fully automated version of the proposed expert system can directly control the lockage process. This would eliminate errors caused by human factor.



**Keywords:** Fuzzy expert system; Decision support; SCADA; Genetic algorithm; PSO; Artificial bee colony; Ship lock.

## ZAHVALNICA

Zahvaljujem se svom mentoru, profesoru dr. Filipu Kuliću, na velikoj količini znanja i saveta koje mi je preneo tokom doktorskih studija i izrade doktorske disertacije. Zadovoljstvo i čast je imati za mentora ovog inovativnog čoveka u nauci.

Isto tako se zahvaljujem i profesoru dr. Todoru Bačkaliću na prepoznavanju važnosti naučne teme, na smernicama i pomoći u realizaciji rada. Profesor Bačkalić je zaslužan i za moje interesovanje za temu rada kao i za početne ideje.

Hvala i docentu dr. Željku Kanoviću na pomoći i zajedničkom radu iz koga je proistekao deo ove disertacije. Hvala kolegi Urošu Kuzmanovu na pomoći u kreiranju simulacionih modela. Hvala svim kolegama sa katedre.

Zahvaljujem se svojim prijateljima i porodici koji su me, čak i ako nisu razumeli šta istražujem i pišem, svesrdno podržavali i bili uz mene: Milošu, ćerki Danici, supruzi Aniti, bratu Nenadu i posebno mami i tati.

Istraživanje iz kojeg je nastala ova disertacija je finansirano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije pod ugovorom TR-36007.

## SPISAK SLIKA

Sl. 3.1 Mreža kanala Dunav – Tisa – Dunav .....	21
Sl. 3.2 Gustina mreže unutrašnjih plovnih puteva u Evropskim zemljama, 2006. (Izvor: Eurostat, Energy, Transport and Environment indicators, 2009) [67] .....	22
Sl. 3.3 Brana i prevodnica na gornjem toku reke Scheldt u Belgiji [69] .....	24
Sl. 3.4 Šematski prikaz elemenata brodske prevodnice .....	26
Sl. 3.5 Šematski prikaz prolaska plovila kroz brodsku prevodnicu .....	27
Sl. 3.6 Uprošćen dijagram upravljanja broskom prevodnicom .....	29
Sl. 3.7 Brodska prevodnica „Kucura“ – ulazna kapija sa donje strane kanala.....	30
Sl. 3.8 Brodska prevodnica „Kucura“ – komora i pogled na gornju stranu kanala .....	30
Sl. 3.9 Brodska prevodnica „Kucura“ – kapija sa gornje strane kanala.....	31
Sl. 3.10 Lokacija brodske prevodnice „Sombor“ .....	31
Sl. 3.11 Komora brodske prevodnice „Sombor“ .....	32
Sl. 3.12 Algoritam i pseudo kod računanja broja prevođenja na prazno i ukupnog vremena čekanja.....	33
Sl. 3.13 „Dilema“ situacija kod jednokanalne dvosmerne prevodnice .....	34
Sl. 3.14 Grafički prikaz baze dolazaka plovila.....	36
Sl. 4.1 Grafički prikaz mehanizma aproksimativnog zaključivanja.....	46
Sl. 4.2 Trougaona funkcija pripadnosti .....	48
Sl. 4.3 Trapezoidna funkcija pripadnosti .....	49
Sl. 4.4 Gausova funkcija pripadnosti .....	49
Sl. 4.5 Grafički prikaz metode implikacije tipa proizvod .....	51
Sl. 4.6 Faza implikacije: A – metod minimuma (odsecanje), B – metod proizvoda (skaliranje) .....	51
Sl. 4.7 Metode defazifikacije.....	53
Sl. 4.8 Fazifikacija i defazifikacija.....	54
Sl. 4.9 Redosled faza mehanizma aproksimativnog zaključivanja .....	54
Sl. 4.10 Funkcionisanje fazi sistema zaključivanja.....	54
Sl. 4.11 Osnovne komponente fazi upravljanja.....	57
Sl. 4.12 Semafori (ulazni, izlazni i pred-signalni sa leva na desno) .....	63
Sl. 4.13 Glavni pregledni ekran SCADA aplikacije.....	64
Sl. 5.1 Funkcije pripadnosti ulazne promenljive ROK (rastojanje sa strane otvorene kapije) .....	68
Sl. 5.2 Funkcije pripadnosti ulazne promenljive RZK (rastojanje sa strane zatvorene kapije) .....	69
Sl. 5.3 Funkcije pripadnosti izlazne promenljive PSP (promena stanja prevodnice) .....	69
Sl. 5.4 Grafički prikaz fazi mehanizma odlučivanja .....	72
Sl. 5.5 Upravljačka površ fazi ekspertskog sistema .....	73
Sl. 5.6 Šematski prikaz procedure optimizacije FES-a za upravljanje broskom prevodnicom .....	77
Sl. 5.7 Kretanje čestice ka optimalnom rešenju - konvergencija .....	80
Sl. 6.1 Prosečno vreme čekanja po plovilu za različite gustine saobraćaja .....	89
Sl. 6.2 Broj prevođenja na prazno za različite gustine saobraćaja .....	89
Sl. 6.3 Početne pozicije parametara jedinki PSO algoritma.....	94
Sl. 6.4 Krajnje pozicije parametara jedinki PSO algoritma .....	94

Sl. 6.5 Funkcije pripadnosti ulaznih fazi promenljivih sa parametrima dobijenim različitim ekonomskim kriterijumima .....	97
Sl. 6.6 Upravljačka površ fazi ekspertskog sistema za varijantu 4:1 .....	98
Sl. 6.7 Upravljačka površ fazi ekspertskog sistema za varijantu 1:4 .....	98

## SPISAK TABELA

Tabela 3-1 Mreža plovnih kanala hidro sistema Dunav-Tisa-Dunav [9].....	22
Tabela 3-2 Skup dolazaka plovila sumiran po mesecima .....	36
Tabela 5-1 Fazi pravila.....	70
Tabela 5-2 Ispitivanje kombinacija metoda fazi odlučivanja.....	74
Tabela 5-3 Struktura jedinke (čestice) .....	75
Tabela 5-4 Parametri PSO algoritma .....	83
Tabela 6-1 Uporedni rezultati simulacija sa različitim gustinama saobraćaja .....	88
Tabela 6-2 Rezultati simulacije rada brodske prevodnice .....	91
Tabela 6-3 Početne vrednosti parametara FES-a .....	93
Tabela 6-4 Parametri najbolje jedinke po PSO algoritmu.....	95
Tabela 6-5 Uporedni rezultati simulacije posle PSO optimizacije .....	95
Tabela 6-6 Uporedni pregled parametara FES-a dobijenih po različitim formama ekonomskog kriterijuma .....	96
Tabela 6-7 Rezultati simulacije dobijeni različitim ekspertskim sistemima.....	98
Tabela 6-8 Relativne promene u rezultatima optimalnih FES-ova u poređenju sa originalnim FES-om.....	99
Tabela 6-9 Vrednosti parametara FES-a dobijene različitim formama ekonomskog kriterijuma .....	101
Tabela 6-10 Uporedni prikaz rezultata simulacije za različite upravljačke strategije i ekonomske kriterijume .....	101

## SPISAK KORIŠĆENIH SKRAĆENICA

ABC	Artificial Bee Colony (veštačka kolonija pčela), metoda optimizacije zasnovana na oponašanju rojeva pčela
BCO	Bee Colony Optimization (drugi naziv za ABC)
BPnP	Broj prevođenja na prazno (promena nivoa vode u komori brodske prevodnice bez plovila)
HS DTD	Hidrosistem Dunav-Tisa-Dunav u Vojvodini
FES	Fazi ekspertski sistem (ekspertski sistem zasnovan na rasplinjutoj logici)
GA	genetski algoritam (engl. Genetic Algorithm), evolutivna metoda optimizacije
GPS	globalni pozicioni sistem (engl. Global Positioning System)
INDRIS	Inland Navigation Demonstrator for River Information Services (jedinostveni RIS sistem za plovidbu na unutrašnjim vodnim putevima) (vidi pod RIS)
MBP	Minimalan broj prevođenja (kriterijum za ocenu performansi)
MIN-MAX	minimum-maksimum metoda implikacije i agregacije kod fazi sistema
MVČ	Minimalno vreme čekanja (kriterijum za ocenu performansi)
PLC	Programmable Logic Controller (programabilni logički kontroler)
PROBOR	Probabilistic OR (verovatnosno ILI, poznatije kao algebarska suma)
PROD-SUM	proizvod-suma metoda implikacije i agregacije kod fazi sistema
PSO	Particle Swarm Optimization (optimizacija zasnovana na roju čestica)
PSP	promena stanja prevodnice (izlazna promenljiva ekspertskog sistema)
RIS	River Information Service/System (rečni informacioni servis/sistem)
ROK	rastojanje najbližeg plovila od prevodnice sa strane otvorene kapije (ulazna promenljiva ekspertskog sistema)
RZK	rastojanje najbližeg plovila od prevodnice sa strane zatvorene kapije (ulazna promenljiva ekspertskog sistema)
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition (nadzorno upravljački sistem za akviziciju podataka i upravljanje na višem nivou)
STI	Strategic Traffic Information (strategijske informacije o saobraćaju)
SVČ	Srednje vreme čekanja po plovilu
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol (standardni protokol za komunikaciju preko interneta)
TSK	Takagi-Sugeno-Kang metoda fazi zaključivanja
TTI	Tactical Traffic Information (informacije o saobraćaju)
UVČ	Ukupno vreme čekanja (suma svih zadržavanja plovila koja čekaju na prevođenje)
VoIP	Voice over IP (sistem telefoniranja preko internet protokola) (vidi pod TCP/IP)
VTS	Vessel Traffic Service (servis za praćenje i upravljanje saobraćajem plovila u pomorskom saobraćaju)
WinCC	Windows Control Center (SCADA aplikacija) (vidi pod SCADA)

# 1. UVOD

Brodске преводнице spadaju u najstarije i najčešće korišćene hidrotehničke objekte namenjene za savlađivanje denivelacije. Njihova svrha je da omogućе prelazak plovila sa jednog na drugi nivo na jednostavan i bezbedan način. Razlike u nivoima vode na unutrašnjim vodnim putevima nastaju najčešće kao posledica izgradnje brana. Prvi veštački vodni putevi datiraju još iz doba robovlasništva. Oni predstavljaju želju čovečanstva da prilagodi okruženje svojim potrebama i svojevrsni su pokazatelj stepena razvoja ljudskog društva [1]. Saobraćaj na unutrašnjim vodnim putevima i danas predstavlja jedan od najvažnijih vidova saobraćaja.

Brodске преводнице služe da poboljšaju plovību na unutrašnjim vodnim putevima [1, 2]. Iako se smatra da je saobraćaj na unutrašnjim vodnim putevima od velikog društvenog značaja za postizanje održive mobilnosti, on se trenutno razvija veoma skromno [3]. Kako ovaj potencijal zahteva nove koncepte za realizaciju postavljenih planova, pažnja će ubuduće sigurno biti koncentrisana na inovacijama koje mogu poboljšati upravljanje saobraćajem plovila. Inteligentni transportni sistemi kao i termin „inteligentna infrastruktura“ obično se odnose na oblast drumskog saobraćaja. U poslednje vreme, sve više istraživanja je usmereno ka inteligentnom razvoju infrastrukture i konstrukciji upravljačkih sistema [4]. Upotreba računarske inteligencije u saobraćaju na unutrašnjim vodnim putevima, za razliku od drugih načina transporta, je još uvek u povelju [5], naročito kada je u pitanju alternativa čoveku u procesu donošenja odluka u realnom vremenu. Upravljanje transportnim sistemima sve više dobija na značaju i fokus istraživanja u vodnom saobraćaju je na rešavanju problema nagomilavanja plovila [6].

Na prirodnim unutrašnjim vodnim putevima postoje prirodne prepreke kao što su brzaci i virovi, ali i veštačke prepreke kao što su brane koje sprečavaju nesmetanu plovību na određenim delovima. Izgradnjom brana javljaju se razlike u nivoima vode koje treba premostiti. Brodske преводнице kao hidrotehnički objekti omogućavaju plovilima da prevaziđu ove prepreke [7]. Brodska преводnica predstavlja objekat kog čine komora sa vodonepropusnim kapijama na svakom kraju i odgovarajući sistem za punjenje i pražnjenje. Savlađivanje denivelacije, odnosno prevođenje plovila sa jednog na drugi nivo ostvaruje se punjenjem ili pražnjenjem komore. Pri tom su i donja i gornja kapija zatvorene. Drugim rečima, преводnica je struktura za podizanje i spuštanje nivoa vode u kontrolisanom režimu, između dva različita nivoa na istom vodnom putu. Podizanjem i spuštanjem nivoa vode u komori plovilo se kreće u pravcu nagore, odnosno nadole. Operateri brodske преводnice (prevodničari) uvek pokušavaju da napune ili isprazne komoru za što kraće vreme sa minimalnom turbulencijom.

Povećanje gustine saobraćaja na vodnim putevima, kao posledica sve većih potreba industrije i tržišta za robnom razmenom, podstaklo je i istraživanja o propusnoj sposobnosti vodnih puteva, kao i mogućnosti njenog povećanja. U svim zemljama u kojima postoje veštački vodni putevi javlja se njihova raznolikost koja je nastala zbog toga što nisu građeni istovremeno i planski. Vrlo često, dimenzije kanala nisu standardizovane i postoje ograničenja plovibe na određenim deonicama za plovila većih dimenzija. Sa povećanjem gustine saobraćaja pogoršavaju se i postojeći uslovi plovibe u zoni brodske преводnice, a korisnici trpe znatno duža vremena obrade zahteva i kašnjenja [8]. Određivanje propusne sposobnosti brodske преводnice je najčešće rešavan problem. Razlog je to što brodske преводnice po svojoj konstrukciji imaju ograničenu propusnu sposobnost i najčešće predstavljaju usko grlo u vodnom saobraćaju. Todor Bačkalić [9] je obradio tehnološki proces plovibe u zoni

jednokomorne brodske prevodnice, na osnovu kojeg su razvijeni simulacioni modeli za određivanje propusne sposobnosti, odnosno modeli za planiranje upravljačkih akcija [10]. Naredni korak, posle određivanja propusne sposobnosti, predstavlja donošenje i sprovođenje rešenja problema uočenih pri analizi propusne sposobnosti. Rešenja mogu biti na:

- tehničko-eksploatacionom planu (izvođenje građevinskih radova u vezi proširivanja i produbljivanja, rekonstrukcija ili dogradnja nove brodske prevodnice i dr.)
- organizacionom planu (definisane novih modela - šema organizacije saobraćaja bez građevinskih intervencija, izmene pravila plovidbe)
- upravljačkom planu (formiranje informaciono-upravljačkih sistema koji bi imali kompletan uvid u stanje na deonici ili plovnom putu u celini).

Organizacija saobraćaja plovila na kanalima u zoni brodske prevodnice predstavlja kompromis između racionalnog korišćenja prevodnice i minimizacije vremena zadržavanja plovila kolja čekaju na prevođenje [9, 11, 12].

Osnovni cilj ove disertacije je razvijanje inovativnog rešenja na upravljačkom planu. Formiranje informaciono-upravljačkog sistema zahteva širu analizu čitavog sistema i okruženja, više nego što je to bilo neophodno pri određivanju propusne sposobnosti. Funkcija upravljanja, posmatrana izolovano od informativne funkcije, zahteva visok stepen poznavanja tehničko-eksploatacionih osobenosti infrastrukture i flote, kao i detaljnu analizu tehnoloških procesa plovidbe u zonama brodskih prevodnica. Upravljanje složenim sistemima sa nemerljivim i teško merljivim ulaznim veličinama, odnosno procesima zasnovanim na ljudskoj proceni situacije, zahteva primenu matematičkih modela koji će što realnije opisati donošenje stavova pri upravljanju.

Moderni informacioni servisi u upravljanju prevodnicama trenutno su u fazi implementacije na unutrašnjim vodnim putevima širom sveta. Inovacije u sistemima za upravljanje brodskim prevodnicama fokusirane su na poboljšanje servisa ka korisnicima i na optimizaciji. Planiranje procesa prevođenja u sistemima sa više prevodnica je, međutim, i dalje u začetku [5]. Osim određenih pravila i akcija u toku upravljanja samim radom opreme brodske prevodnice, odluka o pokretanju procesa prevođenja, kao glavna upravljačka akcija, je u većini realnih sistema zasnovana na proceni i iskustvu operatera, odnosno na algoritmu približnog rasuđivanja.

U radu je prikazan fazi ekspertske sistem (FES) kreiran kao pomoć prevodničarima u procesu donošenja odluka. FES je namenjen za integraciju u nadzorno upravljački (engl. SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition) softver koji se uobičajeno koristi na vrhu upravljačke hijerarhije [13]. Osnovna namena SCADA sistema je da prikuplja važne podatke iz procesa i omogući operateru upravljanje procesom na višem nivou [14]. Rad koji je predstavljen u ovoj disertaciji proširuje funkcionalnost SCADA sistema sa predloženim ekspertskim sistemom koji je dizajniran kao softverska nadogradnja za pomoć operaterima u procesu donošenja odluka.

Pri razvijanju modela za upravljanje procesom prevođenja plovila u ovoj disertaciji primenjena je teorija fazi (engl. Fuzzy – neodređeno, rasplinuto) skupova i teorija fazi logičkog upravljanja.



## 1.1. Predmet, problem, ciljevi i osnovne hipoteze doktorske disertacije

Predmet predložene doktorske disertacije predstavlja izučavanje organizacije saobraćaja plovila u zoni brodskih prevodnica u funkciji njihove propusne sposobnosti i racionalnog korišćenja resursa, kao i definisanje osnovnih pretpostavki i uslova za sprovođenje upravljačkih akcija pri regulisanju plovidbe.

Naučni cilj predložene doktorske disertacije je razvoj sistema za podršku u odlučivanju prilikom upravljanja brodom prevodnicom u smislu organizacije prevođenja plovila. Drugi cilj je da ukaže na potencijal primene računarske inteligencije kao alata za upravljanje saobraćajem na unutrašnjim vodnim putevima. Metode računarske inteligencije se mogu primenjivati u svrhu razvoja ovakvih sistema, a zatim i u svrhu pronalaženja optimalnih parametara tih sistema radi postizanja boljih performansi.

Osnovnu hipotezu predstavlja stanovište da je potrebno i moguće rešiti problem maksimizacije propusne sposobnosti brodskih prevodnica i problem racionalnog korišćenja resursa prilikom prevođenja plovila razvojem i primenom odgovarajućih upravljačkih sistema.

U disertaciji je analizirana mogućnost primene upravljačkog sistema zasnovanog na algoritmu približnog rezonovanja u procesu upravljanja brodom prevodnicom. Drugi deo hipoteze je mogućnost konvertovanja procesa donošenja odluka prevodničara (operatera na brodskim prevodnicama) u logički upravljački sistem.

Treći deo hipoteze predstavlja stanovište da je potrebno i moguće naći optimalne parametre takvog upravljačkog sistema u smislu maksimizovanja propusne sposobnosti (minimizovanja vremena čekanja plovila) i minimizovanja potrošnje resursa potrebnih za korišćenje prevodnice.

U ovoj disertaciji prikazan je razvoj FES-a koji je razvijen sa namenom da pomogne operaterima u procesu donošenja odluka prilikom operativnog upravljanja brodom prevodnicom. U razvoj sistema spadaju: izbor fazi lingvističkih promenljivih, izbor funkcija pripadnosti i određivanje baze pravila. Od širokog spektra tipova brodskih prevodnica izbor je sužen na sistem koji se obično koristi na plovnim kanalima na unutrašnjim vodnim putevima: jednokanalni sistem opsluživanja sa dva nezavisna stohastička toka dolazaka sa dve suprotne strane. Iako je model zasnovan i testiran na posebnom realnom sistemu, ne gubi se na principu opštosti. Sa manjim izmenama u dizajnu FES-a predloženi model može biti proširen za primenu na bilo kojoj prevodnici iz posmatrane kategorije.

Prilikom razvoja ekspertskog sistema za upravljanje brodom prevodnicom javljaju se dva posebna izazova: prikupljanje ekspertskog (stručnog) znanja i prilagođavanje promenama u prioritetima kriterijuma upravljanja. Fazi sistem je komplikovan sistem odlučivanja, opisan visoko nelinearnim i logičkim funkcijama i veoma je teško razviti model ovakvog sistema koji bi bio opisan analitičkim izrazima. Čak i kada bi se mogao razviti precizan analitički model, za optimizaciju ovakvog sistema to bi i dalje bio ne-konveksan problem optimizacije sa više lokalnih optimalnih rešenja. Zbog toga je odlučeno da se za optimizaciju koriste globalni numerički algoritmi optimizacije, koji pružaju detaljnu pretragu prostora rešenja i, u ovom konkretnom slučaju, pouzdanije rešenje od nekog klasičnog analitičkog pristupa. Inicijalno predloženi FES je optimizovan (fino podešen) uz pomoć tri globalna algoritma optimizacije iz grupe evolucionih algoritama i algoritama zasnovanih na inteligenciji jata: genetski algoritam (GA); algoritam zasnovan na roju čestica (PSO, engl. Particle Swarm Optimization) i algoritam zasnovan na veštačkoj koloniji pčela (ABC, engl. Artificial Bee Colony). Sva tri algoritma su

često korišćena u inženjerskim aplikacijama [15, 16, 17, 18]. Cilj optimizacije je da se pronade najbolja strategija prevođenja koja će da zadovolji predloženi ekonomski kriterijum koji je definisan kao linearna kombinacija dva osnovna pojedinačna suprotstavljena kriterijuma. Prvi je minimizacija broja prevođenja na prazno (promena nivoa vode u komori bez plovila), a drugi je minimizacija vremena čekanja (zadržavanja plovila). Rezultati dobijeni u ovom istraživanju dokazuju da se ovi globalni algoritmi optimizacije mogu uspešno primeniti u problemima koji se tiču poboljšanja performansi i optimizacije saobraćaja.

Disertaciju čine osam poglavlja. U prvom poglavlju posle uvoda je dat kratak pregled aktuelnog stanja u oblasti i relevantne literature.

U trećem poglavlju sledi kratak prikaz razvoja plovnih kanala i kanalske plovidbe, u svetu i kod nas. Dat je osvrt na istoriju i osnovne osobine veštačkih vodnih puteva (plovnih kanala) i kanalske plovidbe i saobraćaja na unutrašnjim vodnim putevima. U poglavlju 3 su još opisane i osnovne osobine, konstrukcija, princip rada i parametri modela brodske prevodnice kao i podaci korišćeni za istraživanje. Tu spadaju različiti modeli upravljanja broskom prevodnicom, simulacija rada prevodnice i način generisanja skupa plovila. Na osnovu godišnje raspodele dolazaka plovila do prevodnice i drugih statističkih podataka kreiran je skup koji je posle korišćen u analizi i simulacijama.

Poglavlje 4 je posvećeno rasplintoj (fazi) logici. Opisani su fazi skupovi i osnovne operacije nad fazi skupovima, fazi lingvističke promenljive i proces fazi zaključivanja. Dat je pregled najčešće korišćenih funkcija za opisivanje stepena pripadnosti fazi skupovima. Definirana je baza fazi pravila i objašnjene su metode koje se koriste u različitim fazama aproksimativnog zaključivanja: fazifikacija, aktivacija, agregacija i defazifikacija. Objašnjen je pojam fazi logičkog upravljanja. Na kraju poglavlja opisan je postupak projektovanja fazi ekspertskeg sistema za operativno upravljanje broskom prevodnicom. Definirane su ulazne i izlazne fazi promenljive, tipovi i parametri funkcija pripadnosti, i konstruisana je baza pravila fazi odlučivanja. Određene su metode koje su korišćene u različitim fazama mehanizma odlučivanja.

Poglavlje 5 se bavi podešavanjem parametara funkcija pripadnosti projektovanog fazi ekspertskeg sistema. Korišćene su tri globalna algoritma optimizacije (GA, PSO i ABC). Analizirana su dva u praksi prisutna suprotstavljena kriterijuma, na osnovu kojih su formirane dve ekstremne strategije upravljanja. Prvi kriterijum je minimizacija vremena čekanja na prevođenje i u praksi se realizuje tako što se prevodnica postavlja u položaj pogodan da se prevede prvo plovilo koje nailazi bez obzira na troškove prevodnice. Drugi kriterijum predstavlja minimizaciju broja „prevođenja na prazno“. Pod terminom „prevođenje na prazno“ se podrazumeva priprema prevodnice za prevođenje plovila koje dolazi sa strane zatvorene kapije, odnosno promena nivoa bez plovila u komori. Rezultat ove druge strategije su povećani troškovi same prevodnice, habanje opreme ali i trošenje vode. Ova dva kriterijuma predstavljaju ekstremne interese broдача i vlasnika brodske prevodnice koji se javljaju u realnim situacijama. U disertaciji se ova dva kriterijuma koriste za procenu rezultata i za formiranje sveukupnog kriterijuma optimalnosti.

U šestom poglavlju prikazani su i diskutovani dobijeni rezultati. Rezultati su analizirani po oba suprotstavljena kriterijuma, kao i po sveukupnom „ekonomskom“ kriterijumu definisanim uz pomoć prva dva. Upoređene su različite strategije upravljanja broskom prevodnicom. Poseban aspekt je stavljen na analizu rezultata u situacijama kada je broj plovila koji zahtevaju prevođenje izuzetno velik, čak i u situaciji kada je gustina saobraćaja teorijski veća nego što prevodnica može da opsluži. Detaljno su upoređene performanse FES-a pre i

posle optimizacije. Prikazan je uporedni pregled rezultata dobijenih različitim metodama optimizacije.

U sedmom poglavlju izloženi su osnovni zaključci, završne napomene i pravci daljih istraživanja.

Konačno, u osmom poglavlju je dat spisak korišćene literature.

## 2. PREGLED LITERATURE

Strategije upravljanja brodskom prevodnicom i definicija upravljačkih pravila su pod uticajem mnogih faktora. Stoga su u toj oblasti sprovedena značajna istraživanja [19, 20, 21]. Takođe, razvijeni su simulacioni modeli za određivanje propusne moći, analize upravljačkih pravila, kao i za upravljanje saobraćajem plovila u zoni brodske prevodnice [22, 23].

Teorija rasplinite (fazi) logike je relativno stara i dobro poznata teorija kojoj je temelje postavio Lotfi Zadeh 1965. godine, a deset godina kasnije dao i koncept lingvističke varijable i približnog (aproksimativnog) rezonovanja i zaključivanja [24]. Od tada do danas je u mnogome napredovala posebno na raznovrsnosti polja primene. Zadeh je kao tvorac fazi sistema ostavio upečatljiv utisak u istoriji razvoja fazi upravljačkih sistema i njegova najznačajnija dela su sumirana u [25]. Prelazak sa binarne logike, koja predstavlja preciznost i dopušta samo suprotnosti tačnog i netačnog bez mogućnosti definisanja stepena tačnosti između ova dva ekstrema, na fazi logiku, koja je puna nejasnoća i neizvesnosti, detaljno je i veoma jasno prikazan u [26]. Ebrahim Mamdani je svoj tip regulatora prvi put objavio 1974. godine u [27]. To je bila prva uspešna primena fazi logike u upravljanju laboratorijskim procesom. Mamdani tip regulatora je i dan danas najčešće korišćeni tip fazi regulatora [28]. Osnovne prednosti korišćenja fazi logike za svrhu upravljanja sistemima navedene su u [29]. Svi elementi projektovanja fazi logičkih sistema kao što su alati za razvoj, tabele pravila i simulacioni softver su objašnjeni u [30] uz pomoć studija slučaja iz realnih situacija i industrijskih aplikacija. Sveobuhvatan kurs o fazi logici i njenoj sve većoj ulozi u teoriji upravljanja čitalac može da pronađe u [31] gde su uvedeni osnovni pojmovi kao što su fazi skupovi, fazi unija, fazi presek, fazi komplement i dr.

Fazi logika se neretko koristi u kombinaciji sa drugim tehnikama računarske inteligencije kao što su veštačke neuronske mreže [32, 33, 34], genetski algoritmi [35, 36, 37], optimizacija zasnovana na roju čestica [38, 39, 40], teorija vektora podrške [41], optimizacija inspirisana kolonijom pčela [42] i dr.

Analiza stabilnosti, optimizacija i podešavanje fazi sistema su teme koje su veoma značajne za industrijske primene i iz tog razloga im je u [43] dat poseban značaj.

Razvoj algoritma zasnovanog na roju čestica (engl. Particle Swarm Optimization - PSO) od njegovog nastanka 1995. godine do danas opisan je u [44]. U [45] je pregledno predstavljen čitav niz informacija vezanih za PSO. Počevši od spiska istraživača koji se bave ovom oblašću, preko lista od preko 300 referenci objavljenih radova iz oblasti (pokrivene su godine od 1995. do 2004.), do tutorijala, konferencija, linkova i ostalih pratećih podataka. PSO algoritam je detaljno analiziran na referentnom (reper) skupu u [46] sa posebnim osvrtom na robusnost i performanse. Jedno poglavlje je posvećeno i optimalnom izboru parametara. U nastavku su navedene i adaptacije osnovnog algoritma, kao i uočena ograničenja. Na kraju su predstavljeni i opisani neki konkretni problemi i primene. U [47] je izložen pseudo kod osnovne verzije PSO algoritma. Primer podešavanja parametara fazi regulatora uz pomoć PSO algoritma se može pronaći u [38, 39].

Fazi upravljanje je praktična alternativa za niz zahtevnih upravljačkih aplikacija jer obezbeđuje pogodan postupak za izgradnju nelinearnih kontrolera putem upotrebe heurističkih informacija. Te heurističke informacije obično dolaze od operatera koji je delovao kao „čovjek u povratnoj sprezi“ kontroler nekog procesa. U metodologiji projektovanja fazi upravljanja, od operatera se traži da sastavi skup pravila na osnovu kojih upravlja procesom. Sledeći korak

predstavlja uključivanje definisanog skupa pravila u fazi ekspertskega sistema koji oponaša ljudski proces donošenja odluka [48]. Jedna od polaznih literatura za konstrukciju fazi ekspertskega sistema je svakako i [49]. Razvoj matematičkog aparata za rad sa nejasnim funkcijama pripadnosti je veoma aktuelan, jer omogućava rešavanje zadatka donošenja odluka na osnovu ekspertskega informacija uz pomoć metoda adekvatnijih prirodi eksperata koje se odlikuju različitim tipovima netačnosti i neizvesnosti [50].

Jedna primena inteligencije jata u upravljanju saobraćajem je objavljena u [51]. U [52] je na ustanovljenom modelu teoretski dokazano da se pravilnim izborom sekvenci prevođenja mogu značajno smanjiti redovi čekanja ispred brodskih prevodnica. Kembel [22] je predstavio alate za odlučivanje za primenu u smanjivanju zagušenja na prevodnicama na gornjem delu Misisipija. Bugarski, Bačkalić i Kuzmanov [10] su predložili fazi sistem za podršku u odlučivanju koji je namenjen za primenu u upravljanju brodskom prevodnicom.

Fazi logika je odabrana kao metod upravljanja koji ne zahteva precizan matematički model sistema kojim se upravlja [53] i kao najpogodniji matematički pristup za rešavanje neizvesnosti, subjektivnosti, višeznačnosti i neodređenosti [54]. I drugi autori [55, 35] su koristili fazi rezonovanje u procesima donošenja odluka. Teodorović i Vukadinović [33] su uspešno primenili fazi logiku i veštačku inteligenciju u upravljanju saobraćajem. Novije primene fazi ekspertskega sistema se mogu naći u [10, 56, 57]. Jedan primer podešavanja parametara fazi regulatora uz pomoć PSO-a je objavljen u [38].

Ekspertskega sistema predstavljen u ovoj disertaciji je kreiran tako da bude integralni deo nadzorno upravljačkog SCADA (engl. Supervisory Control And Data Acquisition) sistema brodske prevodnice. Glavni zadatak SCADA sistema je centralizovano prikupljanje podataka [58], a tek posle toga i upravljanje na višem nivou. Prednosti korišćenja jedinstvenog SCADA sistema su mnogobrojne [59]. Jedna od stvari koja je interesantna za primenu u brodskim prevodnicama je mogućnost prikupljanja podataka o potrošnji električne energije, zatim njihova kasnija analiza i evaluacija [60]. Prednosti i mane SCADA sistema su detaljno analizirane u [61]. Neke od praktičnih implementacija SCADA sistema su prikazane u [62, 63, 64]. Praktični primer povezivanja signala u jedan centralizovani SCADA sistem je predstavljen u [65].

Svi ovi objavljeni radovi svedoče o tome da još uvek postoji potreba i dovoljno prostora u oblasti za dalja istraživanja.

## **3. ORGANIZACIJA KANALSKOG SAOBRAĆAJA I MODEL BRODSKE PREVODNICE**

### **3.1. Istorijat plovidbe kanalima i razvoj brodskih prevodnica u svetu i kod nas**

Prvi plovni kanali su nastali kao rezultat razvoja ljudskog društva i ljudske težnje da prilagodi prirodu svojim potrebama [9]. Prvi veštački vodni putevi datiraju još iz perioda robovlasništva, a danas kanalima plove najmoderniji brodovi podržani odgovarajućim informaciono-upravljačkim sistemima. Kasnije su plovni kanali doprineli još intenzivnijem društvenom razvoju. U Evropi (naročito u Engleskoj i Francuskoj) su uticali na prelazak društva iz feudalizma u kapitalizam. Danas se najintenzivniji saobraćaj na unutrašnjim vodnim putevima odvija baš u Evropi, i to u Nemačkoj, Holandiji, Belgiji, Francuskoj i Rusiji. Na tlu Srbije (i bivše Jugoslavije) prvi plovni kanal izgrađen je u Vojvodini u kojoj se danas nalazi jedinstvena višefunkcionalna kanalska mreža [1]. U razvijenim zemljama Evrope posebna pažnja se posvećuje rečnom i kanalskom saobraćaju kako zbog masovnog jeftinijeg prevoza, tako i zbog manjeg zagađenja okoline, veće bezbednosti uopšte, a naročito pri transportu opasnih tereta i dr [9].

Plovni kanali predstavljaju veštačke vodne puteve izgrađene na kopnu ili u vodi koji sa svojim objektima i postrojenjima pružaju mogućnost odvijanja plovidbe. Prema području plovidbe kanali se dele u dve osnovne grupe:

- morski plovni kanali i
- plovni kanali na unutrašnjim vodnim putevima

#### 3.1.1. Razvoj plovnih kanala

Rečni saobraćaj je kao najstariji vid saobraćaja u isto vreme bio i nosilac i pokazatelj razvoja ljudskog društva i civilizacije [66]. Uz prirodne plovne tokove postoje i veštački plovni tokovi sa pratećim neophodnim objektima koje je izgradio čovek. Još pre par hiljada godina javila se potreba za uređenim vodnim putevima koji bi služili za odbranu od poplava, navodnjavanje i plovidbu u povoljnijim uslovima nego od onih na prirodnim vodnim putevima. Naročito se javlja potreba za spajanjem vodotokova koji su blizu, ali prirodno nisu povezani, pogotovo ako su pripadali različitim slivovima. Na mestima gde su dva vodotoka bila blizu ili je unutrašnji vodotok bio blizu mora ili jezera građen je kanal koji je spajao ta dva vodna puta. Prvi plovni kanali nastali su u Egiptu, Kini i Indiji, dok se sa gradnjom kanala u Evropi krenulo par hiljada godina kasnije. U jednom Aristotelovom izveštaju (jedan od najstarijih zapisa iz Stare Grčke) govori se o tome da je u Egiptu oko 1400 godina pre nove ere postojala jednostavna prevodnica na plovnom kanalu između Nila i Crvenog mora i da je bila u upotrebi preko 600 godina [9]. U Kini je 215. godine pre nove ere izgrađen plovni kanal koji je povezivao rečni transport severnog dela zemlje sa južnim. Polovinom šestog veka nove ere započeta je izgradnja velikog carskog kanala koji je bio dugačak preko 8000 kilometara. Izgradnja je završena krajem XIII veka nove ere, uz rekonstrukcije, dogradnje i povezivanja sa drugim prirodnim i veštačkim plovnim putevima [66]. Prvi plovni kanali u Evropi građeni su u severnoj Italiji u XV i XVI veku. Nešto kasnije počelo je sa izgradnjom kanala u Holandiji i Francuskoj.

U Engleskoj početak izgradnje kanala kasni za ovim zemljama, ali zato napreduje izuzetno brzo. Jedan od savremenih primera uspešnog razvoja veštačkih vodnih puteva predstavlja završetak izgradnje kanala Majna – Dunav i otvaranje plovne magistrale Severno more – Crno more.

### 3.1.2. Plovni kanali danas

U kontinentalnom delu Evrope države koje su u slivovima Dunava, Labe, Odre, Rajne, Rone i Visle povezane su i plovnim kanalima koji spajaju te slivove. Svi ovi prirodni i veštački vodni putevi formiraju jedinstveni sistem vodnih puteva Evrope, pri čemu svaka od zemalja ima specifičnosti sopstvene plovne mreže. Najrazvijenija mreža plovnih puteva nalazi se u Zapadnoj Evropi, preciznije u Holandiji i Belgiji, gde su kanali i kanalska plovidba sastavni deo kulture. U Nemačkoj se oko 30% ukupnog unutrašnjeg transporta obavi na plovnim putevima. U zemljama bivšeg SSSR postoji jedinstvena mreža plovnih puteva koja povezuje Moskvu sa pet svetskih mora dok plovni put Rajna – Majna – Dunav predstavlja najvažniju plovnu magistralu koja spaja Severno i Crno more.

### 3.1.3. Razvoj plovnih kanala u Srbiji

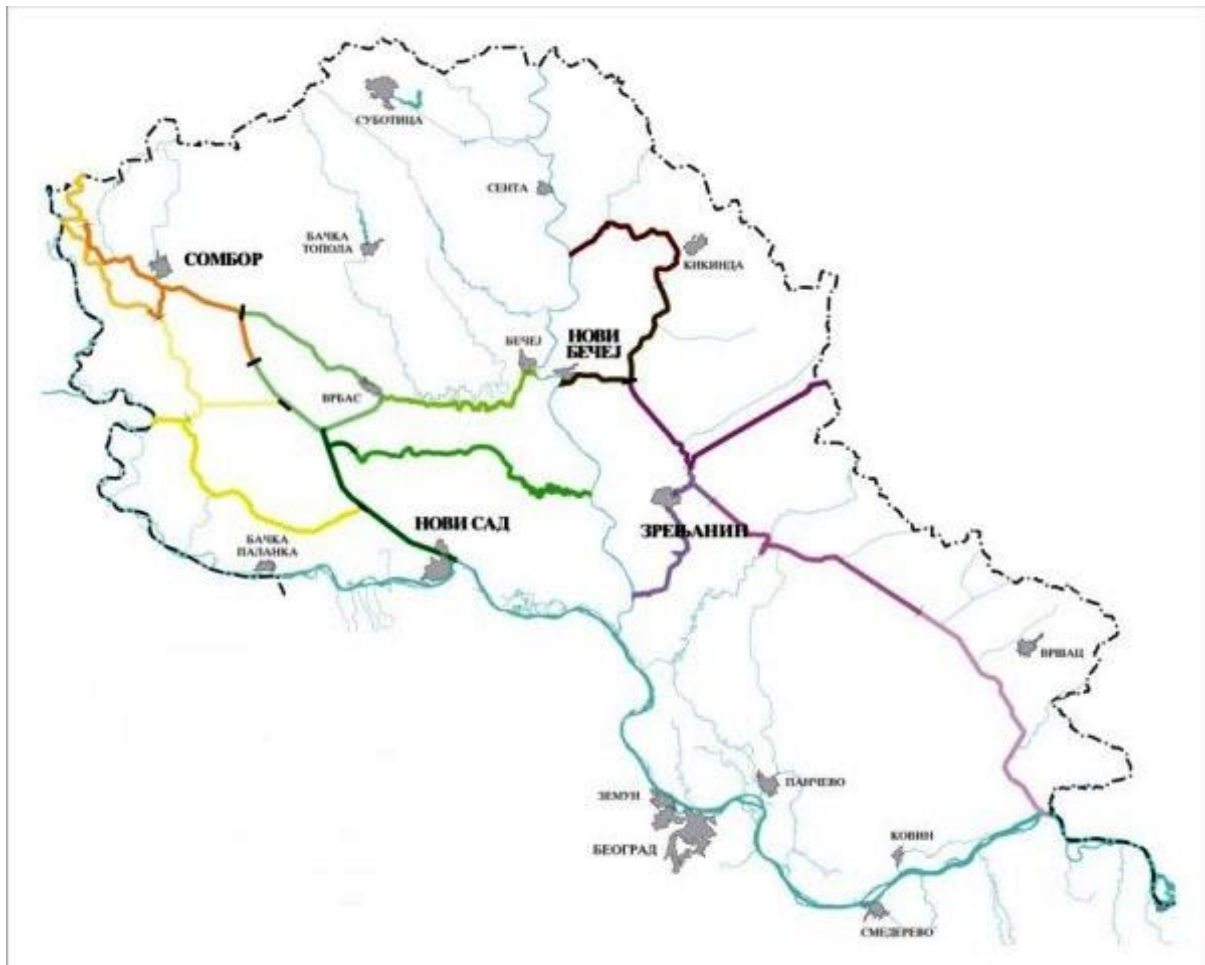
Prvi plovni kanal na prostoru Srbije izgrađen je u Vojvodini. Danas se u Vojvodini nalazi jedinstvena višefunkcionalna kanalska mreža. Izgradnja ove mreže počela je u periodu 1793.-1802. godine izgradnjom plovnog kanala koji je spajao Dunav sa Tisom presecajući Bačku između Bačkog Monoštor i Bačkog Gradišta. Bio je dugačak 105 km i njime je plovni put iz gornje Tise u gornji Dunav skraćen za približno 160 km, a trajanje putovanja između Bačkog Gradišta i Bačkog Monoštor skraćeno sa 21 na svega 2 dana (kanalom). Ovim je i transport znatno pojeftinilo. Kanal je prvenstveno bio namenjen za potrebe plovidbe, zatim industrije i tek na trećem mestu za potrebe odvodnjavanja. Projektom su za ovaj kanal bile predviđene svega tri prevodnice (Bačko Gradište, Vrbas i Bački Monoštor), ali su tokom izgradnje dodate još dve (Mali Stapar i Srbobran). Već 1830. godine Dunav menja svoj tok pa se ulaz i prevodnica u Bačkom Monoštoru napuštaju i 1856. godine grade se novi ulaz i brodska prevodnica kod Bezdana. To je bio jedan od prvih objekata (prva prevodnica) u Evropi koji je izveden u betonu, a još i danas je u eksploataciji. U radovima na regulaciji Tise (1895.-1899. god.) ušće kanala u Tisu je pomereno iz Bačkog Gradišta u Bečej pa je i u istom periodu napuštena i prevodnica u Bačkom Gradištu i izgrađena nova u Bečeju. Posle ovih radova plovni kanal Bački Monoštor – Bačko Gradište postaje plovni kanal Beždan – Bečej (dužine 123 km.).

Drugi plovni kanal u Vojvodini, izgrađen u periodu 1870.-1875. god., spajao je kanal Beždan-Bečej kod Malog Stapara sa Dunavom kod Novog Sada (dužine 68 km.). Izgrađen je prvenstveno za potrebe navodnjavanja (pre svega pirinčanih polja), ali nije zanemarena ni plovidba pa su izgrađene i brodske prevodnice.

Kanalisanjem Begeja, Vojvodina dobija treći po redu veštački vodni put izgrađen u periodu 1902.-1913. godine. Dužina ovog kanala bila je oko 115km. Na kanalu je bilo 6 prevodnica sa branama za regulaciju nivoa i protoka [1]. Kako su plovni kanali prolazili kroz privredno najznačajnije krajeve Vojvodine, u nedostatku drugih saobraćajnica, predstavljali su važnu komponentu u razvoju tih krajeva.

Nakon završetka II svetskog rata javlja se potreba za intenziviranjem plovnog saobraćaja. Zahvaljujući ideji Nikole Mirkova, kanalska plovidba u Vojvodini dobila je značajno mesto u

velikom projektu "Kanal Dunav-Tisa-Dunav", prvenstveno namenjenom za navodnjavanje obradivog zemljišta i radi zaštite od poplava. Sa dodatnim investicijama izvršena je i dogradnja brodskih prevodnica i prilagođavanje kanala za potrebe plovidbe. Eksploatacija prvih završenih deonica ove mreže počinje krajem 60-tih. Kanalska mreža je zvanično puštena u rad 1978. godine s tim što su neke kanalske deonice još uvek bile u fazi izgradnje [9]. Danas mreža kanala hidrosistema Dunav–Tisa–Dunav (HS DTD) obuhvata 12 kanala ukupne dužine 929 km, koji se protežu na 12.700 km<sup>2</sup>, od čega je plovno oko 600 km (tabela 3-1). Na Sl. 3.1 je prikazana osnovna kanalska mreža DTD.



Sl. 3.1 Mreža kanala Dunav – Tisa – Dunav

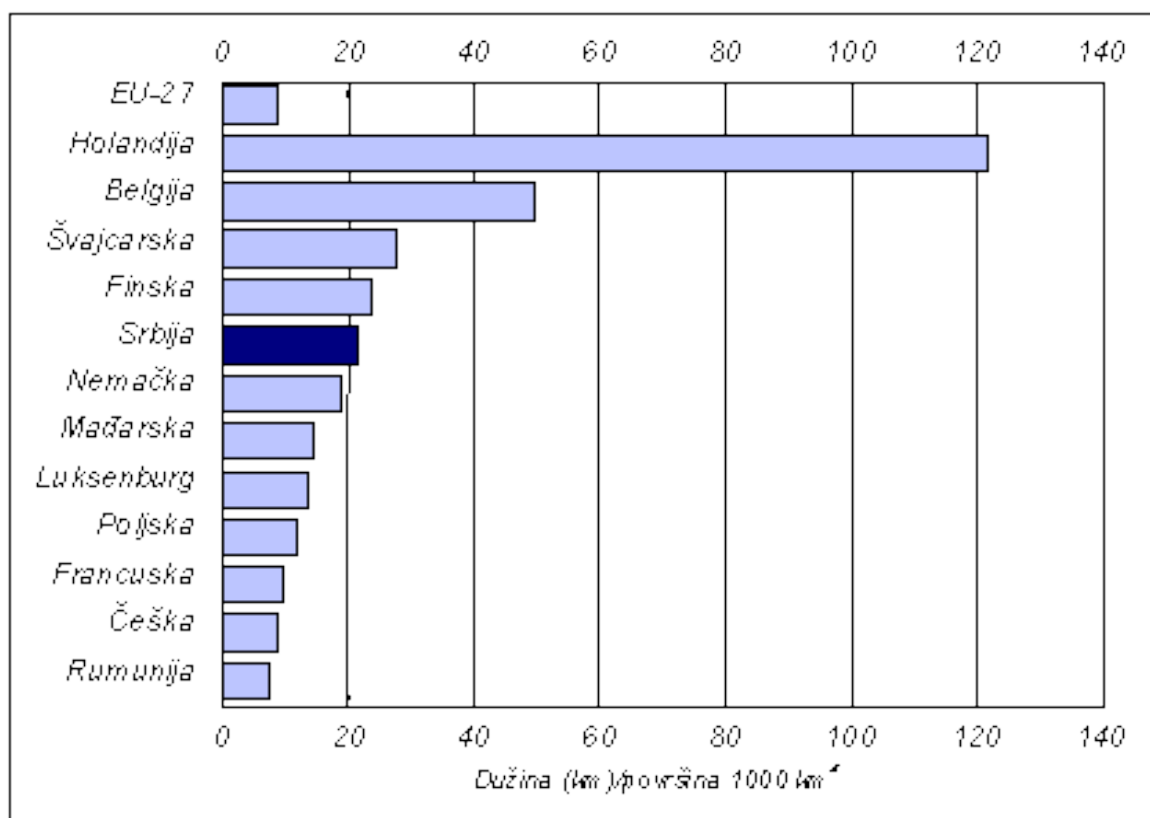
Kanali DTD osim za plovidbu služe i za odbranu od poplava, navodnjavanje zemljišta, za odvođenje otpadnih voda, turizam, lov i ribolov. Po grafikonu prikazanom na Sl. 3.2 Srbija se nalazi na petom mestu po gustini plovne mreže u Evropi. Po informacijama sa tog dijagrama može se izračunati da bi Vojvodina sa postojećom gustinom od 47,14 km/1000km<sup>2</sup> (598,62 km na 12700 km<sup>2</sup>) sa kanalskom mrežom HS DTD otprilike delila drugo mesto sa Belgijom u Evropi po gustini plovnih kanala. U HS DTD postoje 24 ustave, 16 predvodnica, 5 sigurnosnih kapija, 6 pumpi, kao i 180 mostova. Od ovih 16 prevodnica 12 mogu da prime plovila do 1000 t nosivosti, a 4 do 500 t nosivosti. Neki od razloga relativno slabog korišćenja kanalske mreže DTD za plovidbu su: nedovoljna širina kanala, nedostatak markiranja i navigacionih znakova, podvodna i obalska vegetacija, itd. Domaća plovila uglavnom transportuju robu u jednom smeru i na malim rastojanjima, pri čemu plaćaju takse za korišćenje kanala, dok je za prolazak



stranih plovila potrebna dozvola ministarstva zaduženog za saobraćaj [67]. Tabela 3-1 prikazuje spisak plovnih kanala hidro sistema DTD sa njihovim plovnim dužinama.

Tabela 3-1 Mreža plovnih kanala hidro sistema Dunav-Tisa-Dunav [9]

Redni broj	Naziv kanala	Dužina (km)
1.	Bečej - Bogojevo	90,22
2.	Novi Sad - Savino Selo	39,10
3.	Vrbas - Bezdán	80,90
4.	Odžaci - Sombor	27,80
5.	Bački Petrovac - Karavukovo	52,00
6.	Prigrevica - Bezdán	31,70
7.	Kosančić - Mali Stapar	21,10
8.	Bajski kanal	12,70
9.	Banatska Palanka - Novi Bečej	147,30
10.	Begej	34,80
11.	Plovni Begej	29,00
12.	Kikindski kanal	32,00
UKUPNO:		598,62



Sl. 3.2 Gustina mreže unutrašnjih plovnih puteva u Evropskim zemljama, 2006. (Izvor: Eurostat, Energy, Transport and Environment indicators, 2009) [67]

### 3.1.4. Kanalska plovidba

Kretanje plovila po plovnim kanalima na unutrašnjim vodnim putevima često je znatno otežano zbog ograničenih dimenzija plovnog puta. Usled toga dolazi do povećanja otpora i drugih fenomena koji se javljaju pri plovidbi kanalima (uronjaj, pramčani i krmeni talas, oštećenje obale usled dejstva talasa koje prouzrokuje kretanje plovila itd.). Pri plovidbi i upravljanju plovilima ili sastavima potrebno je obratiti pažnju na karakteristične osobenosti plovnih kanala koje utiču na organizaciju plovidbe. Javljaju se poteškoće pri prolazima kroz brane i brodske prevodnice usled kretanja vode izazvanog radom crpnih stanica. Uz to, pri plovidbi postoji opasnost od udara o obalu, nailazak na plićak, klizanje po kosini kanala, skretanje sa kursa itd. Na kanalsku plovidbu utiču i karakteristike plovila kao što su brzina kretanja, rastojanje između plovila, udaljenost plovila od obale i slično [9].

Plovidba na osnovnoj kanalskoj mreži hidrosistema DTD regulisana je posebnim pravilnikom [68]. Brodari koji obavljaju plovidbu na kanalskoj mreži obavezni su da se pridržavaju datih pravila, a neka od njih koja su bitna za istraživanje u ovoj disertaciji su:

- Plovnim kanalima osnovne kanalske mreže, u skladu sa njihovom prirodom i namenom, dozvoljena je plovidba svim plovnim objektima čije dimenzije dopuštaju bezbedno odvijanje plovidbe (dimenzije komora brodskih prevodnica su ograničavajući faktor).
- Plovidba i susretanje na kanalu vrši se po principu “desno-desno”, okretanje je dozvoljeno samo na posebnim mestima koja su za to izgrađena i obeležena.
- Prekid plovidbe na osnovnoj kanalskoj mreži vrši se, po pravilu, svake godine u periodu od 21. decembra do 21. marta, a mogući su i prekidi usled većih kvarova na objektima ili loših vremenskih uslova.
- Brzina plovidbe mora biti ograničena tako da se kretanjem plovnih objekata ne ugrožava stanje, stabilnost i sigurnost, odnosno da se ne nanosi šteta obalama, koritu i objektima na kanalu, kao i drugim plovnim objektima koji u kanalu stoje ili njime plove. Maksimalna dozvoljena brzina plovidbe na kanalima hidro sistema DTD iznosi 8 km/h.
- Pri prolazu kroz prevodnice plovni objekti se moraju pridržavati propisanih pravila.

### 3.1.5. Propusna sposobnost brodske prevodnice

Povećanje broja plovila uslovljava i porast broja zastoja, nezgoda i drugih problema izazvanih većom gustinom saobraćaja. Kada broj uočenih problema na određenom vodnom putu dostigne konstantan nepovoljan nivo smatra se da je postignuta maksimalna propusna sposobnost tj. kapacitet datog vodnog puta. Propusna sposobnost i gustina saobraćaja predstavljaju osnovne karakteristike svih transportnih sistema.

Propusnu sposobnost nekog transportnog sistema ili podsistema često je nemoguće izraziti jednostavnom matematičkom formulom zbog kompleksnosti sistema. U najjednostavnijim primerima koji se u stvarnosti retko sreću propusna sposobnost je obrnuto srazmerna trajanju perioda koji je potreban za izvršenje određene operacije ili skupa operacija. Propusna sposobnost se najčešće izražava kao vrednost data u vidu mase (u tonama) ili broja plovila koja prođu kroz posmatrani presek vodnog puta u određenom vremenskom intervalu.

Vodni putevi sastoje se od deonica različitih dimenzija plovnog puta, uslova plovidbe i tehničke opremljenosti. Ovo je karakteristično naročito za prirodne vodne puteve. Celokupan

vodni put može se rastaviti na manje deonice različitih uslova plovidbe i propusnih sposobnosti. Propusna sposobnost svake deonice predstavlja maksimalnu količinu tereta u tonama ili broj plovila koja mogu biti propuštena kroz tu deonicu u jedinici vremena. Maksimalna propusna sposobnost celog vodnog puta jednaka je maksimalnoj propusnoj sposobnosti deonice sa najmanjom propusnom sposobnošću koja u toj celini predstavlja “usko grlo”. Na unutrašnjim vodnim putevima uska grla su najčešće deonice na kojima je dozvoljen jednosmerni saobraćaj i brodske prevodnice. Na Sl. 3.3 prikazana je prevodnica i brana na gornjem toku reke Scheldt u Belgiji [69]. Sa slike se vidi da je širina komore prevodnice mnogo manja od širine celog kanala i širine reke Scheldt.



*Sl. 3.3 Brana i prevodnica na gornjem toku reke Scheldt u Belgiji [69]*

Propusna sposobnost može biti teorijska i stvarna. Teorijska propusna sposobnost ne uzima u obzir moguće gubitke. Stvarna propusna sposobnost odgovara realnim uslovima eksploatacije. Propusna sposobnost brodske prevodnice zavisi od tehničkih i konstrukcionih osobina, trajanja operacije prevođenja (sa ili bez plovila u komori prevodnice), stepena popunjenosti komore prevodnice, zatim hidroloških i meteoroloških uslova [9].

Na prirodnim unutrašnjim vodnim putevima često postoje prepreke kao što su brzaci, ustave ili brane koje onemogućavaju slobodnu plovidbu na određenim deonicama vodotokova. U cilju rešavanja navedenog problema konstruišu se prilazni kanali i brodske prevodnice pomoću kojih se savlađuje razlika u nivoima vode. Često se koristi kombinacija prevodnica i ustava. Ustave služe da povećaju nivo vode, tj. dubinu prilaza prevodnici sa gornje strane. U gradnji prvih kompletno veštačkih kanala preko relativno ravnog terena konstruisane su obilaznice oko manjih uzvišenja ili depresija. Prevodnice su ušle u upotrebu radi skraćivanja kanala i izbacivanja nepotrebnih obilaznica koje su povećavale troškove izgradnje i vreme plovidbe.

### **3.2. Organizacija saobraćaja i tehnološki proces plovidbe u zoni brodske prevodnice**

Pod organizacijom saobraćaja na veštačkom vodnom putu podrazumeva se skup pravila i aktivnosti kojima se vrši upravljanje plovidbom, u cilju obezbeđivanja racionalnog iskorišćenja propusne sposobnosti vodnog puta i smanjenja vremena zadržavanja plovila, uz poštovanje postojećih pravila plovidbe i ostvarivanje potrebnog nivoa bezbednosti plovidbe. Organizacija saobraćaja na veštačkom vodnom putu (kanalu) ili na deonici plovnog kanala zavisi od:

- tehničko-eksploatacionih karakteristika plovnog kanala i objekata
- tehničko-eksploatacionih karakteristika kanalske flote
- gustine saobraćaja
- broja različitih tipova plovila u kanalskoj floti
- stepena prioriteta određenih plovila
- hidrometeoroloških uslova.

Organizacija saobraćaja na plovnom kanalu u zoni brodske prevodnice, odnosno organizacija prevođenja plovila na plovnim kanalima, predstavlja kompromis između racionalnog iskorišćenja brodske prevodnice i smanjenja zadržavanja plovila u zoni brodske prevodnice [70]. Organizacija saobraćaja u zoni brodske prevodnice zavisi od sledećih činilaca [19, 71, 11]:

- broj brodskih prevodnica (jedna ili dve paralelne)
- broj komora brodske prevodnice (jedna, dve ili više komora u nizu)
- način prevođenja (jednostrano ili dvostrano)
- tehničko-eksploatacione karakteristike brodske prevodnice i prilaznih kanala
- gustina saobraćaja
- tehničko-eksploatacione karakteristike kanalske flote
- broj različitih tipova plovila u kanalskoj floti
- stepen prioriteta određenih plovila
- hidrometeorološki uslovi.

Navedeni faktori ukazuju na raznovrsnost u načinu organizacije, odnosno o mogućnosti određivanja velikog broja šema organizacije saobraćaja, koje zavise o stepenu važnosti pojedinačnog kriterijuma.

U zavisnosti od tehničko-eksploatacionih karakteristika plovila i komora brodskih prevodnica, razlikuju se sledeće veze između brodskih prevodnica i tehnoloških procesa prevođenja:

- jedna komora - jedno plovilo (razmatrano u ovoj disertaciji);
- jedna komora - više plovila.

U zavisnosti od dodeljenog stepena prioriteta pojedinim plovilima moguće je izvršiti sledeću klasifikaciju tehnoloških procesa:

- sva plovila imaju jednak prioritet, odnosno prevođenje bez prioriteta (razmatrano u ovoj disertaciji)
- dodeljivanje različitih stepena prioriteta plovilima, odnosno prevođenje sa prioritetima.

Pri organizovanju prevođenja dodeljuju se stepeni važnosti ostvarivanju postavljenih ciljeva. Na osnovu toga, razlikuju se stepeni važnosti i prioriteta u sprovođenju tehnoloških procesa prevođenja:

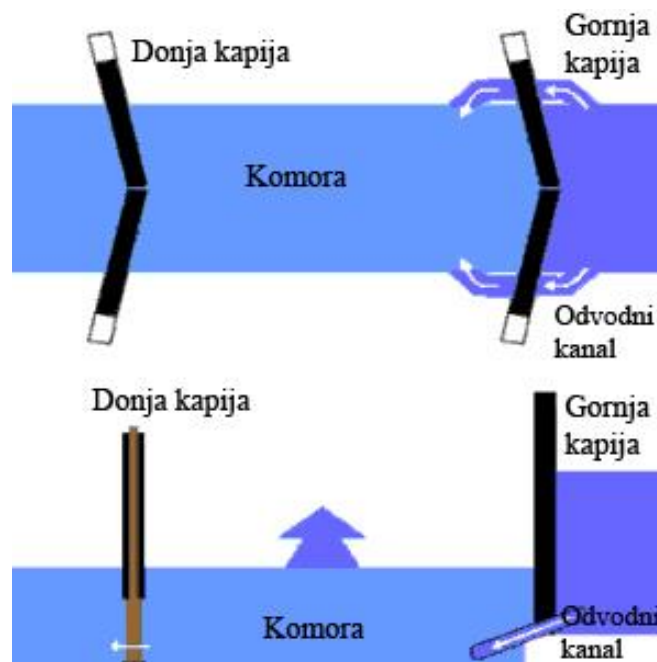
- skraćenje vremena zadržavanja plovila u zoni brodske prevodnice
- smanjenje gubitaka vode i potrošnje energije u brodskoj prevodnici
- kompromis između skraćenja vremena zadržavanja plovila i uštede vode i energije (razmatrano u ovoj disertaciji).

U ovoj disertaciji je analiziran tehnološki proces prevođenja jednog merodavnog plovila kroz jednokomornu prevodnicu namenjenu za oba smera. Faze kroz koje brodska prevodnica prolazi u toku prevođenja određene su operacijama koje je potrebno izvršiti. Trajanje operacija zavisi od više faktora: stanje tehničke opreme, hidrometeorološki uslovi, broj i vrsta plovila koja se prevode, raspodela zahteva za prevođenjem i drugi [9].

Postoji mnogo tipova brodskih prevodnica. Ipak, sve prevodnice imaju tri osnovna elementa:

1. Komora – povezuje gornji i donji deo prilaznog kanala i dovoljno je velika da može da prihvati jedan ili više plovnih objekata. Pozicija i veličina komore je fiksna, dok nivo vode u komori može da varira.
2. Kapija – nalazi se na ulazu i izlazu iz komore, mora biti tako konstruisana da voda ne može da prolazi kroz kapiju kad je zatvorena. Često se konstruiše kao dve polu-kapije (po jedna na svakom kraju komore) koje su zatvorene pod nekim uglom (vidi Sl. 3.4). Gornja i donja kapija su pokretne i mogu se otvarati da dozvole ulazak plovila u komoru ili izlazak iz nje [2].
3. Elementi za punjenje i pražnjenje komore – ventili, pumpe, galerije i dr.

Šematski prikaz osnovnih elemenata brodske prevodnice je dat na Sl. 3.4.



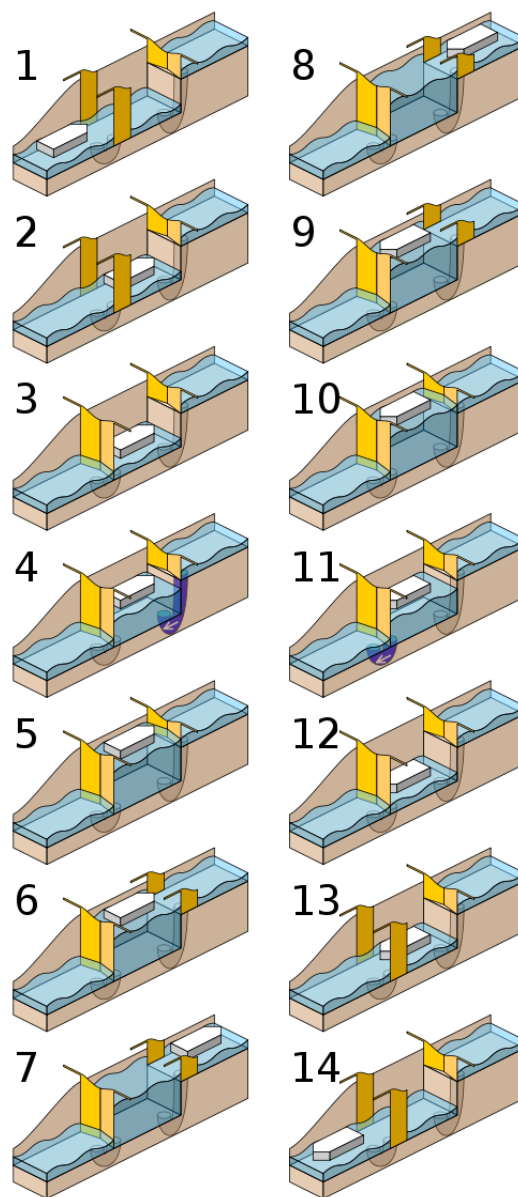
Sl. 3.4 Šematski prikaz elemenata brodske prevodnice

Princip rada brodske prevodnice je vrlo jednostavan. Ako na primer plovilo plovi nizvodno i dolazi do prevodnice koja je već napunjena vodom:

1. Ulazna (gornja) kapija se otvara, plovilo ulazi u komoru i vezuje se
2. Ulazna (gornja) kapija se zatvara
3. Otvara se ventil koji prazni komoru i spušta nivo vode i
4. Otvara se izlazna (donja) kapija, plovilo se odvezuje i izlazi iz komore.

U slučaju da je plovilo naišlo na zatvorenu kapiju i da je voda u komori bila na donjem nivou, plovilo bi moralo da sačeka neko vreme koje zavisi od tehničkih karakteristika prevodnice da se komora napuni vodom do nivoa na kojem je plovilo. U slučaju da plovilo plovi uzvodno proces je obrnut.

Na Sl. 3.5 se može videti šematski prikaz rada brodske prevodnice. U levoj koloni je prikazan slučaj kada plovilo dolazi do prevodnice sa donjeg nivoa.



Sl. 3.5 Šematski prikaz prolaska plovila kroz brodsku prevodnicu

Redom se odigravaju sledeće aktivnosti:

- 1 i 2 - plovilo ulazi u komoru brodske prevodnice sa donjeg nivoa i vezuje se
- 3 - zatvara se donja kapija
- 4 i 5 - komora se puni vodom (tamno plavom bojom i strelicom je označen izvor i smer vode kojom se puni komora)
- 6 - otvara se gornja kapija
- 7 - plovilo se odvezuje i izlazi iz komore brodske prevodnice na gornji nivo

Za obrnut slučaj (kada plovilo dolazi sa gornjeg nivoa):

- 8 i 9 – plovilo ulazi u komoru brodske prevodnice sa gornjeg nivoa i vezuje se
- 10 - zatvara se gornja kapija
- 11 i 12 - komora se prazni (tamno plavom bojom i strelicom je prikazano kuda otiče voda iz komore prevodnice)
- 13 - otvara se donja kapija
- 14 – plovilo se odvezuje i izlazi iz komore brodske prevodnice na donji nivo

U toku prevođenja, plovilo menja svoju poziciju u prostoru, a brodska prevodnica prolazi kroz određene faze, ili stanja. Na šemu organizacije saobraćaja u zoni brodske prevodnice utiče usvojeni tip organizacije. Tehnološki proces prevođenja plovila je analiziran kao složen proces u cilju što jasnijeg ukazivanja na specifičnost i uzajamnu zavisnost između promene stanja prevodnice i pomeranja plovila. Duža zadržavanja plovila na ulazu u zonu prevodnice i nagomilavanje plovila se ne smeju dozvoliti.

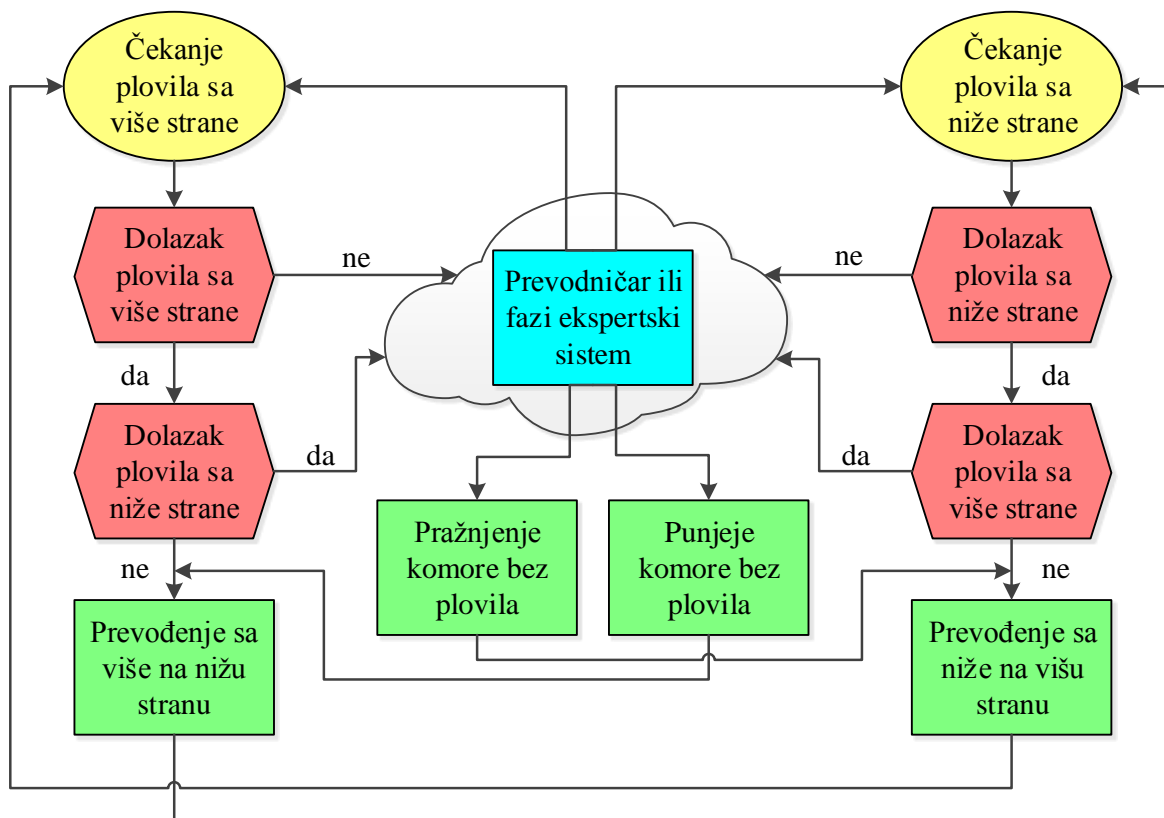
Tehnološki proces prevođenja plovila se može podeliti u dva glavna podskupa:

- tehnološki proces prevođenja sa aspekta brodske prevodnice
- tehnološki proces prevođenja sa aspekta plovila.

Faze kroz koje prolaze i plovila i brodska prevodnica u toku prevođenja su određene operacijama koje treba da se sprovedu. Trajanje ovih operacija zavisi od raznih faktora, a najviše od: gustine saobraćaja, broja i tipova plovila koja se prevode, stanja tehničke opreme brodske prevodnice i hidro-meteoroloških uslova. Faze su predstavljene sledećim redosledom akcija:

- akcije sa aspekta plovila (pristizanje u zonu brodske prevodnice, čekane na dostupnost komore, ulazak u komoru, prevođenje, izlazak iz komore, napuštanje zone brodske prevodnice)
- akcije sa aspekta brodske prevodnice, sa ili bez plovila u komori (otvaranje i zatvaranje kapija komore, punjenje i pražnjenje komore sa vodom, signalizacija plovilima).
- akcije upravljačke logike brodske prevodnice (Sl. 3.6).





Sl. 3.6 Uprošćen dijagram upravljanja brodskom prevodnicom

### 3.3. Parametri modela brodske prevodnice

Modelovanje je veoma moćan alat za analizu i planiranje operacija brodske prevodnice. Dobro osmišljen i kalibrisan simulacioni model može da pruži korisne uvide o složenim operacijama koje analitički modeli ne mogu precizno da opišu [71]. Svaka brodska prevodnica se sastoji od komore prevodnice, kapija i potrebne opreme za funkcionisanje prevodnice (ventili, pumpe, elektro-mehanička oprema, ...). Osnovni elementi klasične brodske prevodnice su predstavljeni u [9, 10, 69]. U [70] razvijeni su numerički metodi za procenu kašnjenja i modelovane su operacije u dvosmernom saobraćaju.

Između širokog spektra tipova brodskih prevodnica izbor je sužen na jedan specifičan tip brodske prevodnice: prevodnica sa jednom komorom (jednokanalni sistem opsluživanja) koja može da primi jedno plovilo u trenutku, sa nezavisnim stohastičkim zahtevima za prevođenje iz dva suprotna smera. Uprkos tome, nema gubitka na generalizaciji, jer rad predstavljen u ovoj disertaciji može biti proširen na bilo koji drugi tip brodske prevodnice sa manjim izmenama u strukturi fazi ekspertskog sistema (FES). Brodska prevodnica „Kucura“ na kanalu Bečej-Bogojevo poslužila je kao reprezentativni sistem (najzastupljeniji tip prevodnice kod nas) prilikom kreiranja modela. Sl. 3.7, Sl. 3.8 i Sl. 3.9 prikazuju slike brodske prevodnice „Kucura“. Na Sl. 3.7 se vidi kapija sa donje strane kanala. Sl. 3.8 je slikana sa komandnog mosta. Vidi se komora i pogled na gornju stranu kanala. Na Sl. 3.9 se vidi komora iz drugog ugla i pogled na komandni most (slikano sa gornje strane kanala).





*Sl. 3.7 Brodska prevodnica „Kucura“ – ulazna kapija sa donje strane kanala*



*Sl. 3.8 Brodska prevodnica „Kucura“ – komora i pogled na gornju stranu kanala*





*Sl. 3.9 Brodska prevodnica „Kucura“ – kapija sa gornje strane kanala*

Još jedna brodska prevodnica (od ukupno 12 novih u HS DTD) koja je po tehničkim karakteristikama slična prevodnici „Kucura“ je brodska prevodnica „Sombor“. Sl. 3.10 prikazuje snimak iz vazduha na kome se vidi lokacija brodske prevodnice i širina komore u odnosu na širinu plovnog kanala. Sl. 3.11 prikazuje snimak iz unutrašnjosti komore koji gleda ka otvorenoj donjoj kapiji.



*Sl. 3.10 Lokacija brodske prevodnice „Sombor“*



*Sl. 3.11 Komora brodske prevodnice „Sombor“*

Brodaska prevodnica „Kucura“ ima sledeće karakteristike:

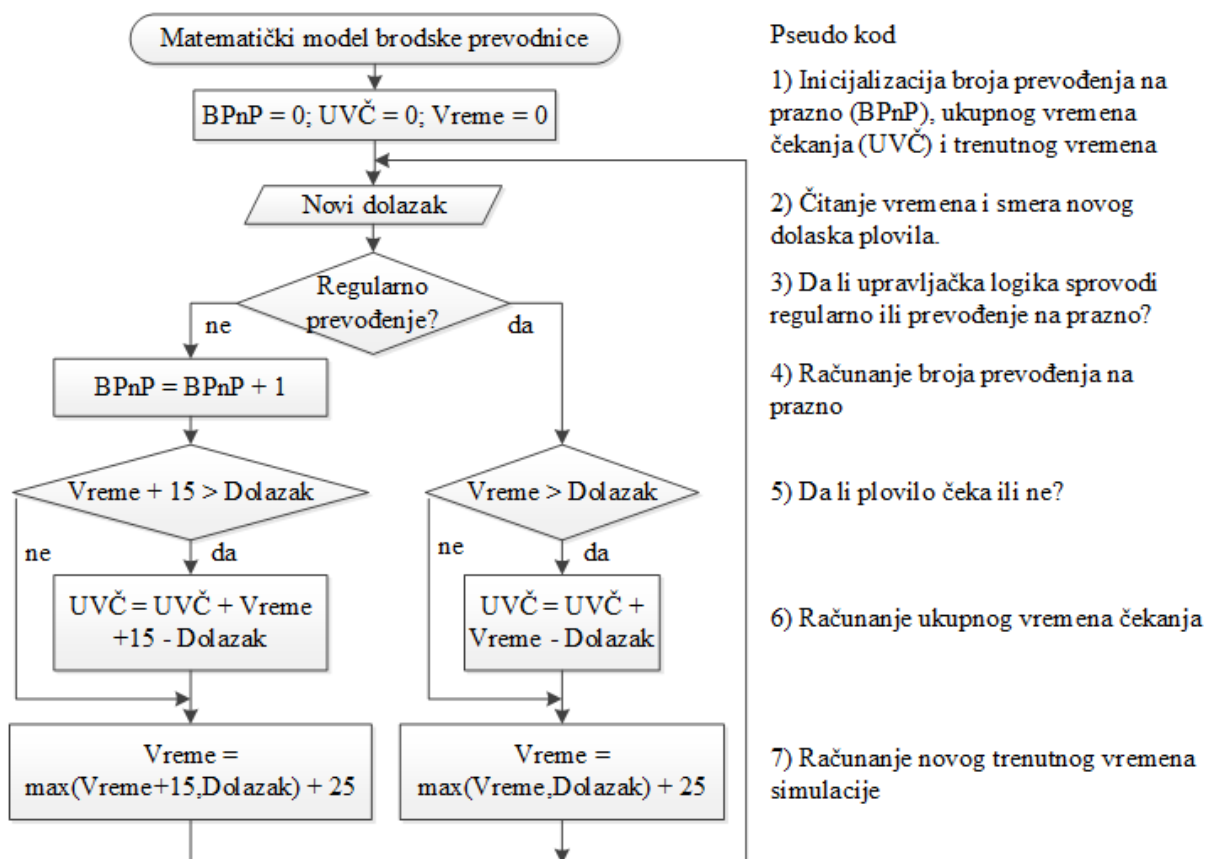
- nezavisan je objekat na dvosmernom plovnom kanalu (dva nezavisna stohastička reda zahteva za prevođenje sa različitih nivoa vode);
- jednokanalni sistem redova (jedna komora dimenzija za jedno plovilo);
- mala razlika u nivou vode (oko 2m);
- smanjenje kašnjenja plovila ima prioritet (promene nivoa vode u komori bez plovila se izbegavaju)

Osnovne karakteristike pojavljivanja zahteva za prevođenje su:

- Šema dolazaka plovila prati Poasonovu (Poisson) raspodelu, odnosno vreme dolaska prilaznih plovila sa oba smera prati eksponencijalnu raspodelu (distribuciju).
- Plovilo koje pristiže u plovni kanal može ući u pristupni kanal samo ako održava bezbednu distancu od prethodnog plovila.
- Po pravilima plovidbe autoriteta na kanalu (Javno vodoprivredno preduzeće „Vode Vojvodine, Novi Sad“) [68], maksimalna dozvoljena brzina plovidbe je 8 km/h.
- Politika redosleda prevođenja plovila koja pristižu (disciplina reda) je „First Come First Served“, odnosno prvo se uslužuju plovila koja su prva pristigla do prevodnice.
- Kada plovila ulaze brodsku prevodnicu, ostala plovila iz istog smera ne mogu ući iz bezbednosnih razloga.

Vremenski intervali prevođenja (prolaska plovila kroz prevodnicu) su odabrani i definisani na osnovu eksperimentalnog merenja i detaljnih razgovora sa operaterima. Usvojeno je da prosečno vreme potrebno da se plovilo prevede sa jednog na drugi nivo bude 25 minuta, a vreme potrebno da se promeni nivo vode u komori bez plovila - 15 minuta. Dalje je pretpostavljeno da komora prevodnice može da primi samo jedno plovilo u trenutku prevođenja. Dimenzije plovila nisu uzimane u obzir u ovom radu. Na osnovu ovih vremenskih intervala, moguća su dva scenarija. Prvi, koji je nazvan „regularno prevođenje“ i koji nastupa kada plovilo ulazi u prevodnicu sa kraja na kojem je kapija otvorena. U ovoj situaciji plovilo ne mora da čeka na promenu nivoa vode u komori. Regularno prevođenje, prema tome, traje 25 minuta. Sledeći scenario je „prevođenje na prazno“ koje nastupa kada plovilo prilazi prevodnici sa kraja na kojem je kapija zatvorena, pa je pre samog prevođenja neophodno promeniti nivo vode u komori. Prevođenje na prazno za kojim sledi regularno prevođenje, prema tome, traje 40 minuta.

Za svaki novi dolazak plovila, upravljačka logika mora da odluči da li da obavi regularno prevođenje ili prevođenje na prazno. Na osnovu ove odluke, broj prevođenja na prazno (BPnP) i ukupno vreme čekanja (UVČ) u modelu se uvećavaju algoritmom koji je predstavljen na Sl. 3.12. Na samom kraju simulacije, srednje vreme čekanja po plovilu se računa deljenjem ukupnog vremena čekanja sa ukupnim brojem plovila koja su prevedena.



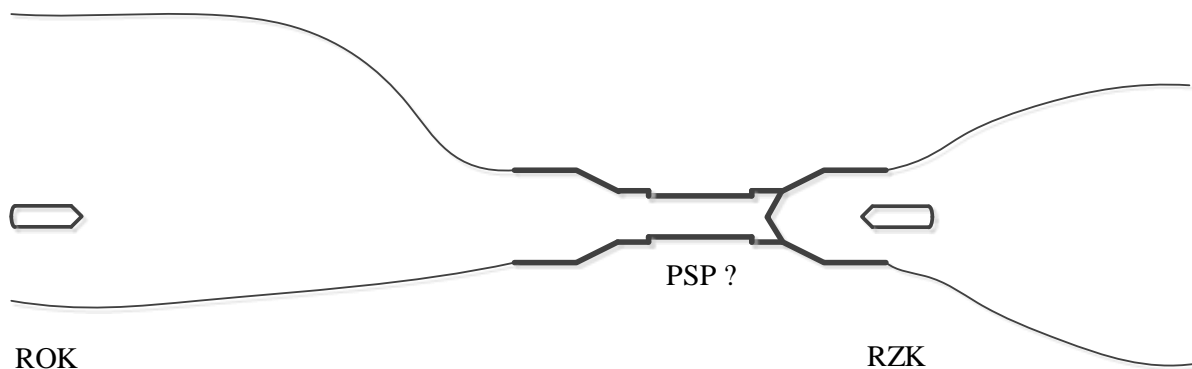
Sl. 3.12 Algoritam i pseudo kod računanja broja prevođenja na prazno i ukupnog vremena čekanja

Glavni cilj u upravljanju brodom prevodnicom je pronaći kompromis između minimizovanja vremena čekanja na prevođenje i minimizovanja potrošnje energije i vode potrebne za prevođenje [21]. To je ujedno i glavni problem koji je razmatran u ovoj disertaciji. Vlasnici brodske prevodnice bi želeli da imaju što manje prevođenja na prazno, radi smanjenja



operacionih troškova (u vidu što manjeg broja prevođenja zbog gubitka vremena i habanja opreme, ali i u smislu potrošnje vode i energije). Međutim, vlasnicima plovila i brodarima je cilj da se poveća komercijalna brzina plovila, odnosno da čekaju što je manje moguće da prođu kroz prevodnicu. Cena koju plovila plaćaju da bi bila prevedena nije uzimana u obzir u ovom radu. Najgora moguća situacija je kada više plovila prilazi prevodnici iz istog smera. Tada operater mora da menja nivo vode u praznoj komori (prevođenje na prazno) da bi smanjio ukupno vreme čekanja plovila, a to je upravo ono što povećava troškove rada brodske prevodnice. U praksi u slučajevima kada plovilo stiže na jednokanalnu prevodnicu brodari koji su išli ka prevodnici uvek su voleli da naiđu na plovilo koje im ide u susret jer je to značilo da je to plovilo već prošlo kroz prevodnicu i da je prevodnica najverovatnije otvorena na njihovoj strani.

Prilikom prevođenja plovila i upravljanja jednokanalnom dvosmernom prevodnicom, glavni zadatak je procena i smanjivanje transportnih kašnjenja [72], ali i minimizacija potrošnje vode i energije [21, 22, 10]. Prevodničari su po tradiciji na unutrašnjim vodnim putevima odgovorni za pravilno funkcionisanje prevodnice i kontrolu saobraćaja plovila u zoni brodske prevodnice. Njihove odluke prilikom upravljanja saobraćajem plovila zasnivaju se na procenama u uslovima neizvesnosti. Stoga, iskustvo prevodničara ima značajnu ulogu u procesu odlučivanja. Tokom odlučivanja, kod prevodničara se često javlja dilema da li da daju prioritet uštedi vode i energije ili smanjenju vremena zadržavanja plovila. Ova dilema je posebno izražena u situaciji kada plovila stižu do prevodnice sa obe njene strane ali je plovilo koje stiže sa strane otvorene kapije dalje nego plovilo koje stiže sa strane zatvorene kapije. Ta situacija je vizuelno prikazana na Sl. 3.13 (ROK – rastojanje plovila od prevodnice sa strane otvorene kapije; RZK – rastojanje plovila od prevodnice sa strane zatvorene kapije; PSP – promena stanja prevodnice).



Sl. 3.13 „Dilema“ situacija kod jednokanalne dvosmerne prevodnice

Zadatak prevodničara je istovremeno upravljanje saobraćajem plovila u zoni brodske prevodnice i radom same brodske prevodnice. Slično kao kod operatera u službi za praćenje saobraćaja plovila u pomorskim lukama (engl. Vessel Traffic Service - VTS), iskustvo je neophodno i u upravljanju brodskom prevodnicom, ali je isto tako neophodna i kvalitetna podrška u odlučivanju [73]. Adaptivni ekspertski sistem za upravljanje brodskom prevodnicom zasnovan na ljudskom iskustvu može da obezbedi potrebnu podršku u odlučivanju. Fazi ekspertski sistem koji je kasnije predstavljen u ovoj disertaciji je razvijen da bi rešio predstavljani problem (dilemu) prevodničara.

### 3.4. Baza dolazaka plovila

Za potrebe simulacije generisan je jedinstveni skup dolazaka plovila do brodske prevodnice. Ovaj skup je generisan na osnovu kumulativnih statističkih podataka o dolascima plovila, što su bili jedini dostupni podaci. Određeni stohastički parametri su naknadno primenjeni da bi se generisao vremenski raspored dolazaka plovila koji je korišćen u simulaciji. U okviru ove disertacije pomenuti skup je posmatran kao baza podataka o saobraćaju plovila. Pojedinačni podatak u toj bazi (jedan dolazak plovila) sastoji se od dva elementa: vremena kada plovilo stiže do brodske prevodnice i pozicije sa koje strane prevodnice plovilo nailazi. Vreme dolaska plovila do prevodnice u praksi se može predvideti, odnosno izračunati na osnovu brzine plovila i njegovog rastojanja od prevodnice [22]. Obe ove informacije su dostupne u realnom vremenu od strane rečnog informacionog servisa (engl. River Information Service - RIS) [74].

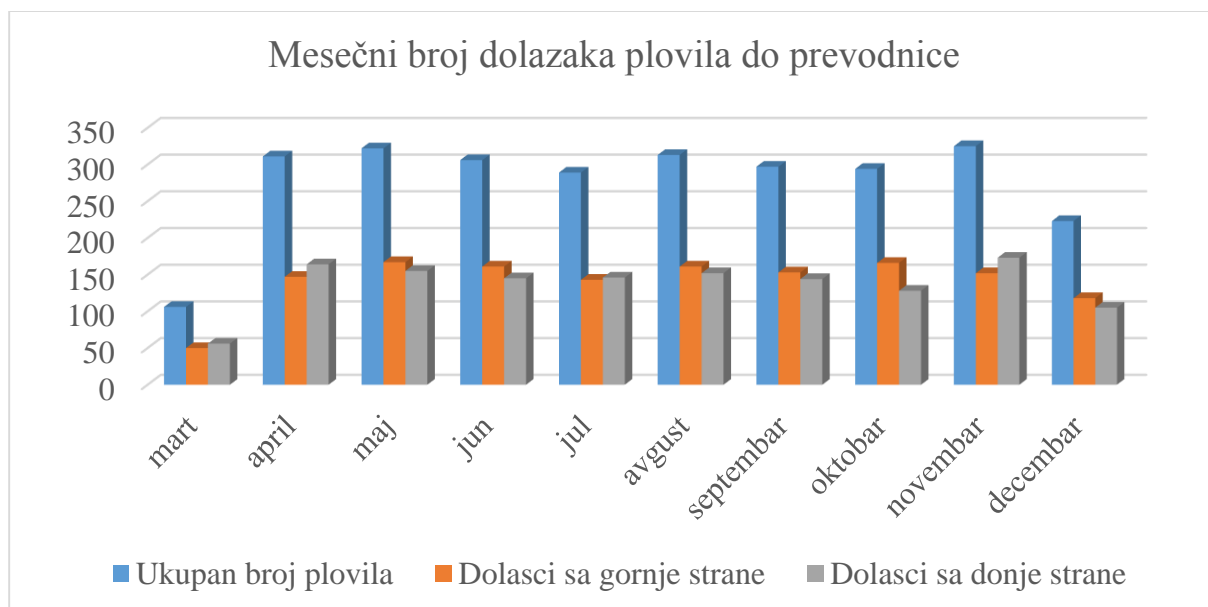
Određene varijable u procesu prevođenja plovila su veoma bitne za simulaciju. Jedna od njih je binarna varijabla koja sadrži informaciju o tome sa koje strane je otvorena kapija brodske prevodnice. Druge dve varijable su vremena potrebna za prevođenje koja su za ovu simulaciju uzeta kao konstante i jednake za sve vrste plovila (25 minuta prevođenje sa plovilom u prevodnici, 15 minuta promena nivoa vode u komori bez plovila). Pošto je vreme prevođenja izraženo u minutima, i vremena dolazaka plovila su radi lakšeg računanja takođe izražena u minutima.

Broj plovila koji pristižu do brodske prevodnice varira u toku dana, nedelje, meseca i godine [52, 23]. U posmatranom slučaju (plovni deo kanalske mreže Dunav-Tisa-Dunav), postoji godišnje prekidanje saobraćaja u zimskom periodu (od 21. decembra do 21. marta). Taj podatak je takođe uključen u konstrukciju baze dolazaka plovila. Za gustinu saobraćaja ostalim danima (operativni dani) uzet je prosek od deset plovila na dan koji odgovara realnim gustinama saobraćaja u kojima se dilema operatera i najčešće javlja. Dilema prevodničara se retko javlja u situacijama kada su gustine saobraćaja značajno manje od kapaciteta prevodnice ili blizu maksimalnog kapaciteta prevodnice. Ako je gustina saobraćaja mala, veoma su male šanse da istovremeno stižu plovila do prevodnice sa suprotnih strana, pa se plovila opslužuju po dolasku. Sa druge strane, ako je gustina saobraćaja veoma velika, u većini slučajeva postoje istovremeni zahtevi za prevođenje, i tada retko postoji potreba za prevođenjem na prazno [9].

Ovo istraživanje je kasnije pokrilo i veoma širok spektar gustina saobraćaja od slabog intenziteta (5 plovila na dan) do veoma visokog intenziteta saobraćaja (50 plovila na dan). Na ove prosečne vrednosti dodate su slučajno generisane brojevi koji predstavljaju stohastiku u toku dana i u zavisnosti od broja dolazaka plovila u toku meseca. Kreirani skup dolazaka obuhvata period od jedne godine sa ukupno 2786 generisanih dolazaka plovila do prevodnice. Broj dolazaka po mesecima sa opštim karakteristikama uzorka je predstavljen u tabeli 3-2 i grafički prikazan na Sl. 3.14. U kolonama tabele je redom prikazan ukupan broj plovila tog meseca, zatim plovila koja su došla sa gornjeg nivoa prevodnice, plovila sa donjeg nivoa i na kraju međusobni odnos ova dva broja plovila.

Tabela 3-2 Skup dolazaka plovila sumiran po mesecima

Mesec	Ukupan broj plovila	Dolasci sa gornjeg nivoa	Dolasci sa donjeg nivoa	Odnos dolazaka dole/gore
mart	106	50	56	1,12
april	311	147	164	1,11
maj	322	167	155	0,93
jun	306	161	145	0,90
jul	289	143	146	1,02
avgust	313	161	152	0,94
septembar	297	153	144	0,94
oktobar	294	166	128	0,77
novembar	325	152	173	1,14
decembar	223	118	105	0,89



Sl. 3.14 Grafički prikaz baze dolazaka plovila

## 4. EKSPERTSKI SISTEM ZA UPRAVLJANJE BRODSKOM PREVODNICOM

Upravljanje brodskom prevodnicom u ovoj disertaciji podrazumeva organizaciju saobraćaja plovila u zoni brodske prevodnice, odnosno donošenje odluka o prioritetima prevođenja. U širem smislu ova problematika spada u grupu upravljanja kretanjem plovila (navigacija). Navigacija kao izučavanje načina izbora najpogodnije putanje plovila i njegovog bezopasnog kretanja na plovnom putu, odnosno kao znanje i veština upravljanja plovilom, zasniva se na stečenim iskustvima. Šire posmatrano navigacija se može definisati kao znanje i veština bezbednog, ekonomičnog, fleksibilnog i vremenski određenog upravljanja plovilima [9].

U plovidbenim sistemima, kao organizacionim sistemima između čoveka i mašina, svi procesi plovidbe dele se na:

- procese planiranja (ili pripreme)
- procese organizovanja (ili analize)
- procese usmeravanja (ili sinteze) i
- procese kontrolisanja (ili kontrole).

Od toga koji su procesi plovidbe povereni mašini (računaru) na "obradu", a koji čoveku, zavisi i stepen automatizacije navigacijskog sistema. Pretpostavka je da se navigacija može obaviti:

1. na manuelnom (ručnom) nivou, kada se obavljanje procesa planiranja, donošenja (i realizacije) i kontrole navigacijskih odluka (znači celokupan proces plovidbe) poverava čoveku
2. na mehanizovanom (tehničkom) nivou, kada se obavljanje procesa planiranja i kontrole poverava čoveku, a procesi donošenja (i realizacije) odluka o plovidbi poveravaju se mašini (računaru)
3. na automatizovanom (tehnološkom) nivou, kada se obavljanje procesa planiranja poverava čoveku, a procesi donošenja (i realizacije) i kontrole odluka o plovidbi poveravaju mašini (računaru)
4. na automatskom (potpuno automatizovanom) nivou, kada se obavljanje svih procesa plovidbe (planiranje, donošenje i realizacija, i kontrola) poveravaju mašini (računaru), kada plovidbeni sistem postaje tehnički sistem.

Na osnovu navedene podele zaključeno je da se celokupno upravljanje plovidbenim sistemom ili pojedinim njegovim delovima može obaviti:

1. samo pomoću ljudi,
2. preko ljudi, uz pomoć mašina (računara),
3. preko mašine (računara), uz pomoć ljudi i
4. samo pomoću mašina (računara).

U zavisnosti od tipa plovidbe koji se odvija u zoni brodske prevodnice, sistem predložen u ovoj disertaciji se može primeniti na različite načine. U prva tri tipa plovidbe, gde konačnu odluku donose ljudi (operateri brodske prevodnice) predloženi sistem se može upotrebiti kao sistem za podršku u odlučivanju ili kao sistem za trening (obuku) novih operatera. U četvrtom



tipu navigacije (automatskom) predloženi sistem se može direktno upotrebiti kao upravljački algoritam.

#### **4.1. Informaciono-upravljački sistemi u saobraćaju na unutrašnjim vodnim putevima**

U zonama ograničenja plovidbenih uslova na veštačkom vodnom putu (kao što je i brodska prevodnica) neophodno je upravljanje plovidbom iz kontrolno-upravljačkog centra, odnosno bezbednosno-plovidbenog sistema. Ulaskom u takvu zonu vodnog puta završava se proces slobodne plovitbe i započinje proces ograničene ili regulisane plovitbe, u zavisnosti da li na obali postoji kontrolno-upravljački centar ili ne.

Regulisanu plovitbu karakteriše razdvajanje navigacijskog procesa u dva podsistema. Prvi podsistem čine plovila i navigatori, a drugi je kontrolno-upravljački centar sa posadom i opremom. U ovom slučaju, odluke vezane za organizaciju prevođenja donosi kontrolno-upravljački centar, a navigatori upravljaju svojim plovilima u skladu sa informacijama i instrukcijama dobijenim iz upravljačkog centra. Ulazne veličine u kontrolno-upravljački centar su sledeće informacije: broj, smer kretanja, brzina, pozicija, stepen prioriteta i dimenzije plovila u zoni nadležnosti ("pokrivanja"), a izlazne veličine su upravljačke odluke.

Osnovna uloga informaciono-upravljačkog sistema je praćenje i koordinisanje svih učesnika u plovitbi, u cilju sprovođenja bezbednog i efikasnog saobraćaja plovila u zoni nadležnosti, kroz prikupljanje i obradu svih potrebnih informacija. Informaciono-upravljački centar organizovan je kao služba za praćenje i upravljanje saobraćajem plovila (engl. Vessel Traffic Service - VTS) [9].

Za razliku od drugih vidova saobraćaja, saobraćaj na unutrašnjim vodnim putevima, kao najstariji vid saobraćaja u kom i tradicija ponekad dosta utiče na donošenje odluka, nije prihvatio nove informatičke tehnologije u dovoljnom stepenu. U zapadnoj Evropi, koja se odlikuje izvanrednom saobraćajnom infrastrukturom za sve vidove saobraćaja, navedeni problem je uočen i pokrenuti su projekti na nivou Evropske unije za njegovo rešavanje. Na osnovu postojećih informacionih sistema, koji su u upotrebi na opterećenijim delovima mreže plovnih puteva Evrope, krenulo se u definisanje novog zajedničkog sistema i postavljanje standarda u toj oblasti. Primena novih tehnologija u saobraćaju na unutrašnjim plovnim putevima odvija se u pravcu izgradnje jedinstvenog sistema za rečne informacione usluge INDRIS (engl. Inland Navigation Demonstrator for River Information Services), u okviru rečnog informacionog sistema RIS (engl. River Information System) [9]. RIS su moderni sistemi za upravljanje saobraćajem koji unapređuju brzi elektronski prenos podataka između plovila na vodi i objekata na obali putem razmena informacija unapred i u realnom vremenu [75]. RIS je u fazi implementacije u Severnoj i Južnoj Americi, Africi, Evropi i Aziji. Saobraćajni i transportni servisi i sistemi za unutrašnju plovitbu treba da budu usklađeni pomoću RIS-a. RIS treba da pokrije reke, kanale, jezera i luke u slivnom području na širokom području, često van nacionalnih granica [74]. Primena RIS-a je priznata kao jedan od prioritarnih projekata master plana za saobraćaj na unutrašnjim vodnim putevima u Srbiji 2006. godine. Implementacija RIS-a na srpskom delu Dunava predstavlja značajan podsticaj za razvoj efikasnog i održivog transportnog sistema u celom regionu. Jedan od ciljeva ovakvog projekta je optimizacija korišćenja plovnog puta Dunava (naročito u uskim grlima kao što su brodske prevodnice) [76].

## **4.2. Upravljanje plovidbom u zoni brodske prevodnice**

Zona brodske prevodnice, sa stanovišta brodarara, na svim vodnim putevima predstavlja zonu zadržavanja i posebnog rizika. Brodarima je u interesu da zadržavanje u ovoj zoni bude što kraće. Međutim, postoje još i interesi vlasnika i službe održavanja plovidbenog sistema, za postizanje što većeg broja prevođenja uz što je moguće manje gubitke energije i vode iz kanala [22]. U slučajevima kada je brodska prevodnica deo sistema na plovnom kanalu javlja se i problem usklađivanja rada brodskih prevodnica i saobraćaja plovila u kanalu. Jedan od problema kod nekih prevodnica je i nagomilavanje plovila u prilaznom kanalu, pogotovo ako je taj kanal ograničene dužine [12]. Donošenje odluka u prvim upravljačko-informacionim sistema zasnivalo se na procenama iskusnih dispečera; kasnije, pod uticajem napretka informatičke tehnologije, veći deo aktivnosti u praćenju, kontroli i podrške u odlučivanju prepušten je računaru. Razvoj sistema za upravljanje saobraćajem plovila u zoni brodske prevodnice teži u dva smera. Prvi, težnja ka smanjenju uloge čoveka u procesa prevođenja (automatizacija), i drugi, optimizacija procesa prevođenja i plovidbe u zoni brodske prevodnice [9].

Plovidba kanalima spada u kategoriju saobraćaja plovila u ograničenim zonama i stoga zahteva posebnu pažnju i odgovarajuća pravila. Osim upravljanja samim kretanjem plovila u zoni brodske prevodnice, javlja se i problem dodele prioriteta za prevođenje. Operater mora da proceni koje plovilo treba prvo da pristupi komori i da pripremi brodsku prevodnicu za prevođenje. U skladu sa tim, zona brodske prevodnice se može posmatrati kao usko grlo na dvosmernom kanalu, dok upravljanje brodskom prevodnicom predstavlja izbor između nekoliko alternativa. Upravljanje plovidbom u zonama sa nekoliko alternativnih putanja [77] se zasniva na definisanju sektora, odnosno područja posebne brige, i zahteva optimizaciju sa ciljem definisanja upravljačkih akcija. Uzimajući u obzir nekoliko činioca (tip plovila, karakteristike putanje, početni raspored prevođenja) određuje se putanja i konačan raspored prevođenja plovila. Upravljanje procesom prevođenja je uprošćen problem upravljanja saobraćajem plovila u području ograničene plovidbe. Plovila prilaze sa gornjeg ili donjeg nivoa i kreću se u precizno definisanim pravcima. Osim toga, brodska prevodnica može imati samo dva stanja u zavisnosti od trenutnog nivoa vode komori brodske prevodnice. Shodno tome, broj alternativa je značajno smanjen i problem se svodi na donošenje odluke o promeni ili održanju trenutnog nivoa vode u komori, u zavisnosti od smera iz kog će prvo plovilo pristići u prilazni kanal.

## **4.3. Fazi sistemi i podrška u odlučivanju**

Namena ovog poglavlja je da se prodiskutuje o motivaciji za pribegavanje teoriji fazi (rasplinutih, engl. Fuzzy) skupova u modelima upravljanja brodskom prevodnicom i prikažu neke osnovne definicije iz teorije fazi skupova. Većina tradicionalnih alata za formalno modelovanje, zaključivanje i računanje su jasni, deterministički i precizni po karakteru. Preciznost podrazumeva da parametri modela predstavljaju tačnu ljudsku percepciju svojstva realnog sistema koji se modeluje. U tom slučaju odgovarajući model mora biti detaljan i zasnovan na mnogim statističkim podacima.

### 4.3.1. Fazi (rasplinuta) logika

Koncept fazi logike osmislio je Lotfi Zadeh, profesor na Univerzitetu u Kaliforniji i predstavio ga ne kao kontrolnu metodologiju već kao način obrade podataka tako što se dozvoljava delimična pripadnost nekom skupu umesto jasne pripadnosti ili nepripadnosti [25]. Prvi rad posvećen fazi skupovima objavio je Zadeh još davne 1965. godine. Ovaj pristup teoriji skupova nije bio primenjen na upravljanje sistemima do 70-tih godina zbog nedovoljnih sposobnosti računara tog vremena. Profesor Zadeh je zastupao mišljenje da ljudima nisu potrebne precizne i numerički tačno definisane informacije, a da su oni ipak sposobni za visoko adaptivno upravljanje. Ako bi kontroleri mogli biti programirani tako da prihvataju neprecizne unose bili bi mnogo efikasniji i možda lakši za implementaciju.

Analizirajući složene sisteme, profesor Zadeh došao je do zaključka da kada se kompleksnost sistema povećava, naša mogućnost da napravimo precizno a u isto vreme i značajno tvrđenje o njegovom ponašanju se umanjuje, dok se ne dostigne prag posle čega preciznost i značaj postaju gotovo isključive osobine. Zbog toga je predložio da se sa veoma složenim problemima treba izboriti tako što umesto ka rigoroznosti i što većoj preciznosti opisa i razmišljanja o pojavama, treba krenuti upravo u suprotnom pravcu i dozvoliti da oni budu neprecizni. U tom smislu je nastao i njegov poznati princip nekompatibilnosti (“Što se bliže posmatra realan problem, njegovo rešenje postaje sve više fazi” – Lotfi Zadeh) [29]. Suština njegovog značenja je u tome da povećanjem nepreciznosti iskaza kojim kvalifikujemo rešenje problema dobijamo na njegovoj relevantnosti i smislu. Fazi pogled na svet upravo uzima u obzir jednostavne i čoveku jasne lingvističke kvalifikacije pojava i pokušava da ih analizira i praktično upotrebi. Sam pojam “fazi” znači nešto neprecizno, nejasno, mutno, rasplinuto.

Rasplinuta (fazi) logika pripada “knowledge based” sistemima (sistemi zasnovani na znanju) tj. “soft computing”-u (meko računarstvo) kojem je glavni cilj eksploatacija tolerancije koja postoji pri nepreciznosti, nejasnoći i parcijalnoj istinitosti u svrhu postizanja robusnijih i jeftinijih rešenja. Fazi logika daje matematički formalizam za postizanje tog cilja. Fazi logika se najčešće primenjuje kod modelovanja složenih sistema u kojima je primenom drugih metoda veoma teško utvrditi međuzavisnosti koje postoje između pojedinih promenljivih.

Pristup problemima upravljanja koji je zasnovan na fazi logici oponaša proces donošenja odluka koji bi koristili ljudi, samo mnogo brže (sa obzirom da se izvršava na računaru). Fazi logika je u osnovi viševrednosna logika koja dozvoljava da se vrednosti definišu i između vrednosti koje su povezane sa tradicionalnim shvatanjima: da/ne, tačno/pogrešno, crno i belo, na primer [78]. Fazi logika koristi iskustva ljudi (eksperata) u formi lingvističkih AKO-ONDA pravila i mehanizam aproksimativnog (približnog) zaključivanja da bi izračunala upravljачke promenljive za specifičan slučaj [27].

Fazi logika kao termin ima dva različita značenja. U užem smislu fazi logika je logički sistem koji je proširenje klasične logike. U širem smislu koji je danas više zastupljen, fazi logika je većinom sinonim sa teorijom fazi skupova, koja se odnosi na klasu objekata sa nejasnim granicama čija se pripadnost meri određenim stepenom. Ono što je bitno da se prepozna je da je suština fazi logike veoma različita od suštine tradicionalnog logičkog sistema [24].

Neke prednosti fazi logike [30] su sledeće:

- Konceptualno jednostavna za razumevanje – matematički koncept fazi rezonovanja je jednostavan zbog prirode pristupa fazi logike zasnovanog na principu zdravog razuma.
- Fleksibilna – svaki sistem je jednostavno korigovati bez potrebe vraćanja na početak.
- Toleriša neprecizne podatke – sve je neprecizno ako se posmatra površno, ali i više od toga, većina stvari su neprecizne, rasplintane uprkos pažljivom proučavanju. Fazi rezonovanje ugrađuje takvo razmišljanje u sam proces.
- Može modelovati nelinearne funkcije – postoji mogućnost kreiranja fazi sistema koji se prilagođava bilo kakvom skupu ulaznih i izlaznih podataka.
- Bazirana je na prirodnom jeziku – osnova fazi logike je i osnova ljudske komunikacije. Prirodni jezik koji koriste ljudi u svojoj svakodnevnoj komunikaciji je menjan i optimizovan hiljadama godina.

#### 4.3.2. Lingvističke promenljive

Profesor Lotfi Zadeh je predložio koncept lingvističke ili fazi promenljive [24] kao i koncept aproksimativnog zaključivanja. Po tom konceptu lingvistički objekti su reči a ne brojevi. Lingvistička promenljiva je promenljiva čije su dozvoljene vrednosti reči prirodnog jezika. Lingvistički izraz predstavlja most između numeričkog predstavljanja informacija u računaru i čovekovog načina razmišljanja.

Na primer, ako fizička promenljiva “udaljenost plovila od otvorene kapije prevodnice” može da ima vrednosti: “veoma mala”, “mala”, “srednja”, “velika” i “veoma velika”, onda je “udaljenost plovila od otvorene kapije prevodnice” lingvistička promenljiva, a “mala”, “srednja” i “velika” su osnovne vrednosti lingvističke promenljive ili osnovne lingvističke vrednosti. Ispred ovih lingvističkih vrednosti često se dodaju modifikatori kao što je u ovom primeru “veoma”, da bi se bolje opisala osnova lingvistička vrednost. Lingvistički modifikatori tako vrše i modifikaciju funkcija pripadnosti, a matematički se definišu u zavisnosti od upotrebe i namene. Svi modifikatori moraju biti matematički konzistentni sa shvatanjem reči koje se upotrebljavaju u složenim lingvističkim izrazima [79].

#### 4.3.3. Pojam fazi skupa i osnovne operacije

U klasičnoj teoriji skupova postoje veoma precizne granice razdvajanja između elemenata koji pripadaju određenom skupu od elemenata van posmatranog skupa, odnosno veoma lako se utvrđuje da li posmatrani element pripada ili ne pripada određenom skupu. Funkcija pripadnosti,  $\mu(x)$ , za element  $x$  skupa  $A$  u klasičnoj teoriji skupova definiše se na sledeći način:

$$\begin{aligned}\mu_A(x) &= 1, \text{ ako i samo ako } x \text{ pripada } A \\ \mu_A(x) &= 0, \text{ ako i samo ako } x \text{ ne pripada } A\end{aligned}\tag{4.1}$$

U teoriji fazi skupova funkcija pripadnosti može da uzme bilo koju vrednost iz zatvorenog intervala  $[0,1]$ .

Fazi skup  $A$  se definiše na univerzalnom skupu  $X$  kao skup uređenih parova generičkih elemenata  $x$  i njihovih stepena pripadnosti  $\mu_A(x)$  kao  $A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\}$ . Ukoliko je  $\mu_A(x)$  veće utoliko ima više istine u tvrdnji da element  $x$  pripada skupu  $A$ .

Za fazi skup se definiše pojam visina fazi skupa kao najveća vrednost funkcije pripadnosti na celom  $x \in X$ . Fazi skup je normalan ako i samo ako je maksimalna vrednost funkcije pripadnosti jednaka 1 ( $\max_{x \in X} \mu_A(x) = 1$ ).

Fazi skup koji nije normalan naziva se sub-normalan ili pod-normalan fazi skup. Ovakvi fazi skupovi mogu se jednostavno transformisati u normalne skupove ako se sve vrednosti stepena pripadnosti podele sa najvećim stepenom pripadnosti za dati fazi skup. Ova operacija naziva se normalizacija.

Jednakost: Za fazi skupove  $A$  i  $B$  kaže se da su jednaki ako i samo ako je  $\mu_A(x) = \mu_B(x)$  za sve elemente  $x$  iz skupa  $X$  nad kojim su definisani fazi skupovi  $A$  i  $B$ .

Komplement: Fazi skup  $A^c$  je komplement fazi skupa  $A$  ako važi  $\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$ .

Fazi skup  $A$  je podskup fazi skupa  $B$  ( $A \subset B$ ) ako i samo ako je  $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$  za sve elemente  $x$  iz skupa  $X$ .

Unija (ili disjunkcija) fazi skupova  $A$  i  $B$  ( $A \cup B$ ) predstavlja najmanji fazi skup koji istovremeno sadrži sve elemente iz fazi skupa  $A$  i sve elemente iz fazi skupa  $B$ . Funkcija pripadnosti unije  $A \cup B$  je oblika:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \forall x \in X \quad (4.2)$$

Presek fazi skupova  $A$  i  $B$  ( $A \cap B$ ) definiše se kao najveći fazi skup koji je istovremeno podskup fazi skupa  $A$  i fazi skupa  $B$ . Funkcija pripadnosti preseka  $A \cap B$  je oblika:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \forall x \in X \quad (4.3)$$

U literaturi se mogu naći i drugačije klase unija i preseka fazi skupova ali u ovoj disertaciji su korišćene osnovne klase koje su definisane jednačinama (4.2) i (4.3).

Termin alfa presek fazi skupa neće biti ovde definisan ali zainteresovani čitalac ga može pronaći u [80, 81]. Definicija fazi broja kao i osnovna pravila fazi aritmetike (sabiranje, oduzimanje, množenje i deljenje fazi brojeva) su detaljno navedeni u [29, 81] i u ovoj disertaciji neće biti posebno razmatrani.

Fazi relacija služi za predstavljanje odnosa između elemenata koji važe u izvesnom stepenu.

Fazi relacija u formi  $R: A \Rightarrow B$ , se može definisati kao binarna relacija dva fazi skupa  $A \in X$  i  $B \in Y$  kao fazi podskup Dekartovog proizvoda  $X * Y$ .  $R$  se opisuje sa bivarijantnom funkcijom pripadnosti  $\mu_R(x, y)$  za konačne skupove:

$$R = A * B = \sum_{x,y} \mu_R(x, y) / (x, y) \quad (4.4)$$

Na sličan način se može definisati i  $n$ -arna relacija između  $n$  fazi skupova.

Ako su  $A_1, \dots, A_n$  fazi skupovi definisani na univerzalnim skupovima  $X_1, \dots, X_n$ , onda je Dekartov proizvod fazi skupova  $A_1, \dots, A_n$  isto fazi skup u prostoru  $X_1 * \dots * X_n$ , sa funkcijom pripadnosti

$$\mu_{A_1 * \dots * A_n}(x_1, \dots, x_n) = \mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{A_2}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{A_n}(x_n) \quad (4.5)$$

, gde simbol  $\wedge$  označava minimum (u osnovnoj klasi formulacija).

Nakon definisanja fazi relacije uvodi se pravilo kompozicije kao jedno od osnovnih pravila fazi logike.

Kompozicija više relacija: Ako su  $R$  i  $S$  fazi relacije u Dekartovom prostoru  $X * Y$  i  $Y * Z$  respektivno, kompozicija relacija  $R$  i  $S$  je fazi relacija data sa max-min kompozicijom (u osnovnoj klasi formulacija):

$$\mu_{R \circ S} = \left\{ \left[ \max_{y \in Y} (\mu_R(x, y) \wedge \mu_S(y, z)) \right], x \in X, y \in Y, z \in Z \right\} \quad (4.6)$$

Dati izraz (4.6) može se posmatrati kao proizvod dve matrice, pri čemu se umesto proizvoda upotrebljava operacija  $\wedge$  koja označava minimalni broj od dva broja, a umesto zbira upotrebljava se operacija  $\max$  koja označava maksimum dva broja. Ovo je tzv. maksimum – minimum kompozicija koja je najčešće korišćena kompozicija u fazi sistemima zaključivanja.

U binarnoj logici uobičajen je način zaključivanja pod originalnim nazivom modus ponens. Na osnovu poznate činjenice  $A$  i pravila  $A \rightarrow B$  (ako  $A$  onda  $B$ ), pokazuje se da važi zaključak  $B$ . Ovaj način se može ilustrovati čuvenim Aristotelovim silogizmom. Iz dve pretpostavke: “svaki Grk je čovek”, i “svaki čovek je smrtno”, zaključuje se jednostavno “svaki Grk je smrtno”. Vidi se da se ovde koriste ekstremna kvalifikacija “svaki” i jasno ograničene precizne kategorije “čovek”, “Grk” i “smrtno”. Međutim, pravila i činjenice koje se upotrebljavaju u svakodnevnom životu su neprecizne, naročito ako su bazirane na iskustvu. Ako se činjenica i pravilo malo razlikuju ili ako postoji postepenost iz realnog sveta modus ponens ne daje zaključak. Na primer, ako navedemo dve pretpostavke: “Ako je telo broda zarđalo, brod je davno napravljen” i “telo broda je poprilično zarđalo”. Većina ljudi bi iz ove dve pretpostavke zaključila “brod je poprilično davno napravljen”, što je i prirodno, ali ovakav zaključak se ne može doneti i pomoću Aristotelovog silogizma.

Pošto čovek razmišlja fleksibilnije i raznoliko, on može da dobije koristan zaključak i kad postoje male razlike između činjenica i pravila. To znači da čovek ne posmatra činjenice i pravila kao proste jasno određene entitete, već kao reprezentaciju znanja koje ima dublje značenje i smisao. Fazi zaključivanje se koristi da bi se predstavio i upotrebio ovakav način razmišljanja. Da bi se izračunao zaključak koristi se neki stepen saglasnosti između činjenica i pravila. Na osnovu poznate činjenice  $A'$  koja se u nekom stepenu razlikuje od preduslova  $A$  i pravila  $A \rightarrow B$ , izračunava se zaključak  $B'$  koji je u opštem slučaju različit od zaključka  $B$  iz pravila. Ovaj način zaključivanja naziva se fazi ili generalizovani modus ponens [25]. Postoji više metoda fazi zaključivanja. Jedna od njih je i direktni metod [82].

Pravilo fazi zaključivanja: Ako je  $R$  fazi relacija na  $X * Y$  i  $A$  fazi skup nad  $X$  onda je fazi skup  $B$  nad  $Y$  indukovano iz  $A$  dat sa  $B = A \circ R$  za max-min kompoziciju.

Pri izračunavanju rezultata pomoću fazi zaključivanja u realnim problemima, potrebno nam je da imamo poznatu fazi relaciju, tj. neophodno je fazi pravilo  $A \rightarrow B$  transformisati u fazi relaciju [83].

Neka je  $A$  fazi skup definisan nad  $X$ ,  $B$  fazi skup definisan nad  $Y$ . Fazi pravilo  $A \rightarrow B$  treba izraziti pomoću fazi relacije između  $X$  i  $Y$ , tj. treba izvršiti transformaciju ovih fazi skupova u fazi skup koji predstavlja relaciju nad  $X * Y$ . Ova transformacija zavisi od toga kako se tumači simbol implikacije  $\rightarrow$  (ako – onda). Jedinstven metod ne postoji. Jedan od najčešće korišćenih metoda je Mamdanijev metod [27]. Definicija tog metoda bazirana je na operatoru preseka  $\wedge$  tj. minimuma i glasi:

Ako su  $a$  i  $b$  realni brojevi iz intervala  $[0,1]$  onda je  $a \xrightarrow{R} b = a \wedge b = \min(a, b)$  ili u stepenima pripadnosti  $\mu_R(x, y) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\}$ . Ovo objašnjenje se odnosi na slučaj sa jednim pravilom. Međutim, u stvarnosti fazi zaključivanje se izvodi sa većim brojem pravila koja se paralelno izvršavaju, na primer

AKO  $x$  je  $A_1$  ONDA  $y$  je  $B_1$  ili  
 AKO  $x$  je  $A_2$  ONDA  $y$  je  $B_2$  ili  
 AKO  $x$  je  $A_3$  ONDA  $y$  je  $B_3$  ili  
 ...  
 AKO  $x$  je  $A_n$  ONDA  $y$  je  $B_n$

Ako se  $n$  paralelnih pravila tumače pomoću veznika „ili“, onda se ovih  $n$  pravila može izraziti pomoću fazi relacije:

$$\tilde{R} = \bigcup_{i=1}^n R_i \quad (4.7)$$

Funkcija pripadnosti ove fazi relacije je

$$\mu_{\tilde{R}} = \max_i(\mu_{R_i}(x, y)) = \max_i(\min(\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y))) \quad (4.8)$$

Ovo nije ništa drugo nego ranije spomenuta max-min kompozicija koja se najčešće upotrebljava u fazi teoriji i njenim praktičnim primenama.

Prilikom praktičnog projektovanja fazi sistema, znanje eksperta izraženo je u obliku određenog broja lingvističkih pravila u formi

AKO fazi propozicija ONDA fazi propozicija

Ta se pravila još nazivaju i ekspertska pravila [50]. Bitno je da stručnjak ima mogućnost da rečima svakodnevnog govora izrazi svoje znanje o nekom procesu. Uopšteni primer ekspertske pravila bi bio:

AKO  $x$  je  $A$  ONDA  $y$  je  $B$

Ovo jednostavno ekspertsko pravilo ima dva dela:

1. AKO fazi propozicija
2. ONDA fazi propozicija

AKO deo pravila predstavlja ulazno stanje. Fazi propozicija u ovom delu predstavlja premisu. Ona može biti i u složenom obliku, sastavljena od više jednostavnijih fazi propozicija, npr. AKO  $x$  je  $A$ ,  $y$  je  $B$ ,  $z$  je  $C$ . U ovom slučaju sistem ima tri ulazne promenljive  $x$ ,  $y$  i  $z$ .

ONDA deo pravila je izlazno stanje. Fazi propozicija u ovom delu predstavlja zaključak. On takođe može biti složen i tada sistem ima više izlaznih promenljivih.

Veći broj pravila u kojima se rečima opisuje rešenje nekog problema predstavlja bazu pravila. Zbog lakšeg razumevanja često se pišu u pogodnom redosledu mada on suštinski nije bitan. Obično su povezana veznikom „ili“ koji se često ne navodi.

#### 4.3.4. Mehanizam aproksimativnog zaključivanja

Aproksimativno zaključivanje je forma fazi logike koja sadrži skup pravila zaključivanja čije su premise fazi propozicije. Aproksimativno zaključivanje je zasnovano na konceptu lingvističkih promenljivih, fazi propozicija i generalizovanog modus ponensa. To je oblik zaključivanja koji nudi puno prirodniji okvir za ljudsko rezonovanje od tradicionalne dvovrednosne logike.

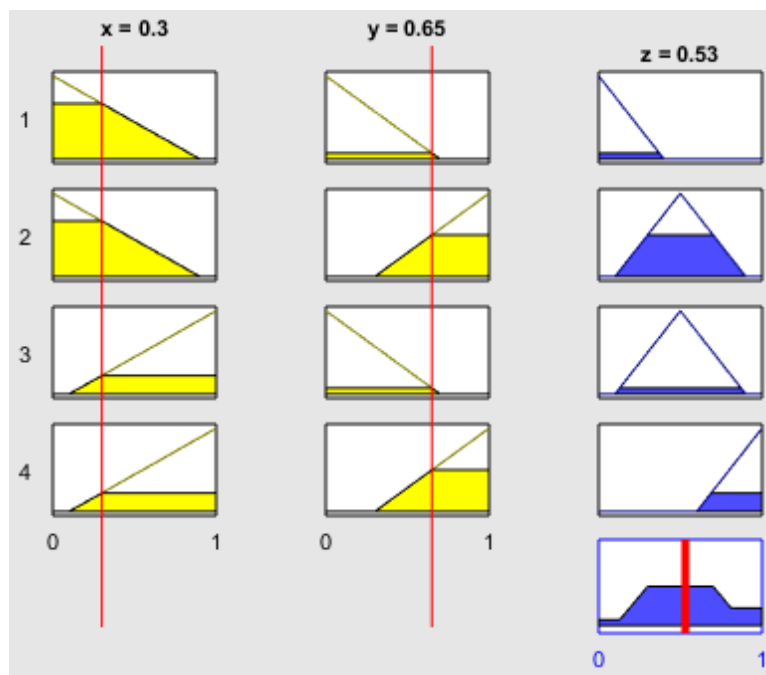
U realnim aplikacijama ulazne vrednosti u fazi sistem su najčešće predstavljene realnim brojem, pri čemu se najčešće želi da i izlazna vrednost bude predstavljena takođe u obliku broja. Zbog toga najpre na određeni način konvertujemo (fazifikujemo) te vrednosti. Nakon te prve faze, mehanizam aproksimativnog zaključivanja obrađuje dobijene fazi vrednosti u procesu koji se sastoji od tri faze: implikacija (aktivacija), agregacija i akumulacija. Brojčana izlazna vrednost dobija se pomoću procesa defazifikacije koji se primenjuje na konačan akumuliranu fazi vrednost. Mehanizam nije komplikovan, ali zahteva značajno procesorsko vreme računara. Zbog toga je fazi logika dobila veliki zamah tek razvojem personalnih računara koji su imali potrebnu snagu za zahtevni matematički aparat koji se nalazi u pozadini mehanizma aproksimativnog zaključivanja.

Faze aproksimativnog zaključivanja će biti objašnjene na jednostavnom primeru. Posmatra se fazi sistem sa dva ulaza  $x$  i  $y$  i jednim izlazom  $z$ . Neka su oba ulaza opisana sa po dva fazi skupa  $A_1, A_2$  i  $B_1, B_2$  a izlaz sa tri fazi skupa  $C_1, C_2$  i  $C_3$ . Neka su funkcije pripadnosti kojim su definisani ovi fazi skupovi trougaonog tipa. Bez upuštanja u fizičku interpretaciju sistema biramo sledeća pravila:

1. AKO  $x$  je  $A_1$  I  $y$  je  $B_1$  ONDA  $z$  je  $C_1$
2. AKO  $x$  je  $A_1$  I  $y$  je  $B_2$  ONDA  $z$  je  $C_2$
3. AKO  $x$  je  $A_2$  I  $y$  je  $B_1$  ONDA  $z$  je  $C_2$
4. AKO  $x$  je  $A_2$  I  $y$  je  $B_2$  ONDA  $z$  je  $C_3$

Odabrana pravila su pravila „I“ tipa (engl. AND method). Osim toga postoje i pravila „ILI“ tipa (engl. OR method). O razlikama u sprovođenju mehanizma aproksimativnog zaključivanja za različite tipove pravila će biti kasnije reči kod opisa aktivacije pravila. Kao što je već rečeno, prvi korak u rešavanju fazi problema je fazifikacija ulaznih veličina. To je proces koji pretvara svaki brojčani ulazni podatak u stepene pripadnosti različitim fazi skupovima. Na Sl. 4.1 je grafički prikazan mehanizam aproksimativnog zaključivanja.





Sl. 4.1 Grafički prikaz mehanizma aproksimativnog zaključivanja

Odabrane brojučane vrednosti za ulazne promenljive su  $x = 0.3$  i  $y = 0.65$ . Žuti deo trougla na Sl. 4.1 prikazuje stepen pripadnosti ulazne promenljive ulaznim fazi skupovima. U donjem desnom delu slike se vidi ukupna izlazna fazi vrednost koja je dobijena agregacijom 4 pravila i akumulacijom pojedinačnih fazi vrednosti za svako pravilo. Može se uočiti da je ukupna izlazna vrednost dobijena maksimizacijom svih aktiviranih izlaznih vrednosti. Plavi deo trouglova predstavlja stepen aktivacije svakog pravila i može se videti da je dobijen kao minimalna vrednost od dva stepena pripadnosti  $\mu_{A_i}(x)$ ,  $\mu_{B_i}(y)$  za svako pojedinačno pravilo. Primena minimizacije za metod implikacije i aktivacije, zatim maksimizacije za metod akumulacije (poznatija kao max-min kompozicija) je tipična za Mamdanijev tip fazi sistema. Konačna izlazna brojučana vrednost je dobijena defazifikacijom (debela crvena linija na Sl. 4.1) i iznosi  $z = 0.53$ .

Čini se da se ovde javlja paradoks: fazi logika tretira sisteme sa nepreciznim vrednostima, a ovde je dat veoma precizan brojučani ulaz i traži se precizan izlaz. Međutim, sistem je kvalitativno opisan korišćenjem lingvističkih promenljivih u određenom broju pravila. Izbegnuto je ono što je nemoguće, pogotovo za sistem o kojem se malo zna, a to je da se za svaku broječanu vrednost ulaza daje posebno pravilo po kojem se pridružuje određena brojučana vrednost izlaza. Matematički aparat koji stoji u pozadini kvalitativnog (nepreciznog) opisa preslikava ulazne promenljive u izlazne. Njima se dobijaju dovoljno dobra i prihvatljiva rešenja. Međutim, u određenim slučajevima postoji mogućnost dobijanja i veoma preciznih željenih izlaznih vrednosti. To se postiže podešavanjem funkcija pripadnosti lingvističkih promenljivih i/ili povećavanjem broja lingvističkih vrednosti. Što je znanje o sistemu veće, veća je i mogućnost njihovog podešavanja u cilju dobijanja vrlo preciznih rezultata.

Faze mehanizma aproksimativnog zaključivanja su:

1. Fazifikacija
2. Aktivacija
3. Implikacija
4. Agregacija
5. Akumulacija
6. Defazifikacija

Ulazi u fazi sistem mogu biti fazi ulazi ili oštri (engl. “crisp”) ulazi, dok je izlaz uvek fazi skup (defazifikacija se vrši da bi se dobili oštri izlazi kada je to potrebno). Ukoliko su ulazi oštri (u praktičnim primenama najčešće jesu) na njih se prvo primenjuje fazifikacija. Fazifikacija je transformacija kojom se od oštih ulaza dobijaju fazi vrednosti. Na osnovu funkcija pripadnosti kojima su opisani i definisani pojedini fazi skupovi izračunavaju se stepeni pripadnosti oštih vrednosti svim fazi skupovima ulaznih promenljivih. Fazifikacija je proces kojim se utvrđuje sa kojim stepenom pripadnosti neka ulazna brojevana vrednost pripada određenom fazi skupu. Na Sl. 4.1 crvena tanka vertikalna linija predstavlja ulazne oštre vrednosti i fazifikacija je predstavljena žutim osenčenim delom ulaznih fazi skupova. Na svakom skupu se vidi sa koliko istinitosti važi da ulazna varijabla pripada tom skupu (žuti deo trougla). Najčešći oblici funkcija pripadnosti su trougaona, trapezoidna, Gausova, sigmoida, itd.

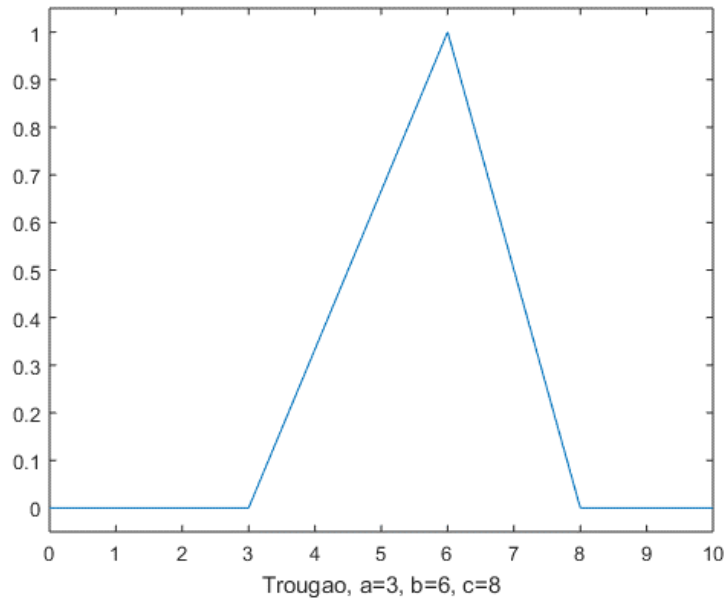
Trougaona funkcija pripadnosti se definiše sa tri parametra  $a$ ,  $b$  i  $c$ . U opštem slučaju stepen pripadnosti fazi skupu koji je opisan sa trougaonom funkcijom pripadnosti se računa po formuli:

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (4.9)$$

ili u eksplicitnom obliku

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (4.10)$$

Parametri  $a$  i  $c$  određuju podnožje trougla a parametar  $b$  položaj njegovog vrha. Na slici Sl. 4.2 je prikazan primer trougaone funkcije pripadnosti sa parametrima  $a = 3$ ,  $b = 6$  i  $c = 8$ .



Sl. 4.2 Troughaona funkcija pripadnosti

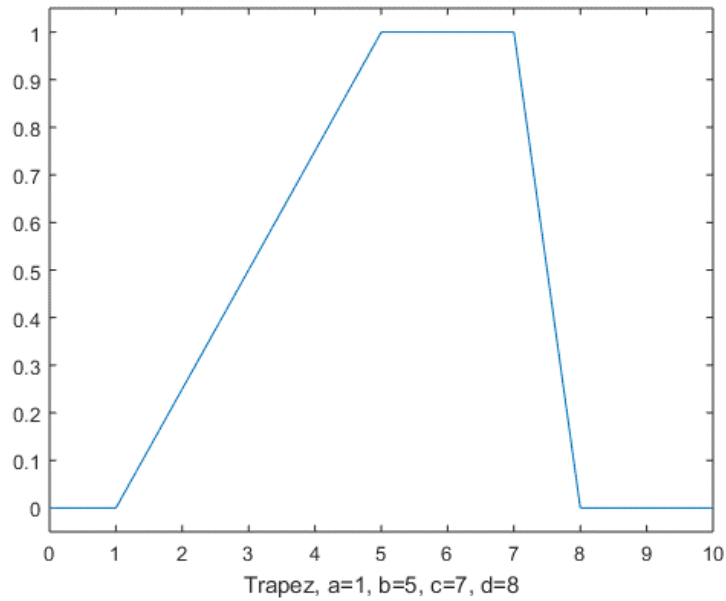
Trapezoidna funkcija pripadnosti se definiše sa četiri parametra  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i  $d$ . U opštem slučaju stepen pripadnosti fazi skupu koji je opisan sa trapezoidnom funkcijom pripadnosti se računa po formuli:

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (4.11)$$

ili u eksplicitnom obliku

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (4.12)$$

Parametri  $a$  i  $d$  određuju podnožje trapeza a parametri  $b$  i  $c$  određuju položaj „ramena“ trapeza. Na slici Sl. 4.3 je prikazan primer trapezoidne funkcije pripadnosti sa parametrima  $a = 1$ ,  $b = 5$ ,  $c = 7$  i  $d = 8$ .

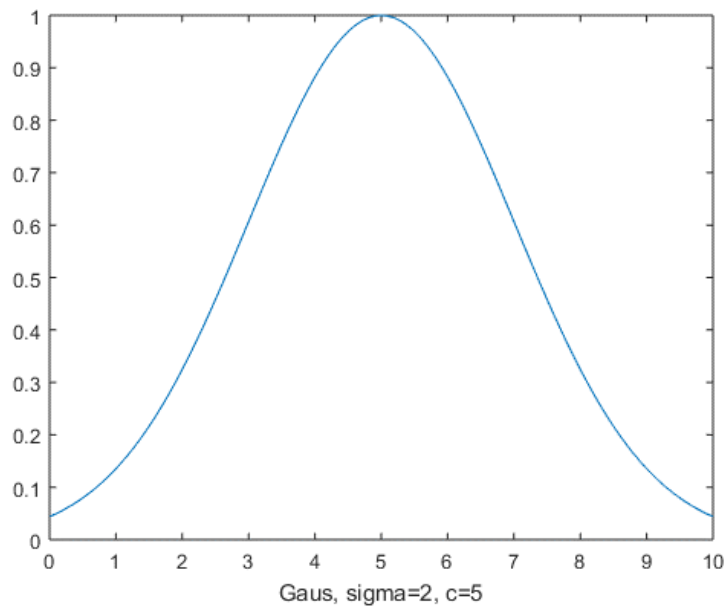


Sl. 4.3 Trapezoidna funkcija pripadnosti

Gausova simetrična funkcija pripadnosti zavisi od dva parametra  $\sigma$  i  $c$ . U opštem slučaju stepen pripadnosti fazi skupu koji je opisan sa Gausovom funkcijom pripadnosti se računa po formuli:

$$\mu(x) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.13)$$

$\sigma$  predstavlja nagib funkcije a  $c$  položaj vrha.



Sl. 4.4 Gausova funkcija pripadnosti

Aktivacija je postupak kojim se na osnovu stepena pripadnosti promenljivih ulaznim fazi skupovima (vrednosti dobijene od fazifikacije) računa stepen aktivacije svakog pojedinačnog

pravila. Aktivacija je dedukcija konkluzije – to je zaključak koji se izvodi u ONDA delu pravila. U trećoj koloni na Sl. 4.1 osenčeni delovi trouglova označavaju aktivirani deo fazi skupa u izlazu (plavo). Aktivacija na taj način odlučuje koliko će pojedini izlazni fazi skupovi učestvovati u narednom koraku implikacije. Ona je ujedno i mera koliko sveukupno ulazne promenljive pripadaju ulaznim fazi skupovima koji učestvuju u datom pravilu. Izvodi se za svako pravilo pojedinačno i u zavisnosti od tipa pravila ima dve varijante. Kod pravila „I“ tipa se najčešće aktivacija pravila računa kao najmanji stepen pripadnosti od svih varijabli i funkcija pripadnosti koje učestvuju u tom pravilu. Za  $i$ -to pravilo u našem primeru MIN metod bi se računao po sledećoj formuli:

$$\mu_{C_i}(z) = \min(\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)), \forall i \quad (4.14)$$

Osim metode minimuma mogu se koristiti i razne druge metode a još jedna koja se dosta često koristi je metoda proizvoda kada se aktivacija pravila računa kao proizvod svih stepena pripadnosti svih varijabli i funkcija pripadnosti koje učestvuju u tom pravilu. Za  $i$ -to pravilo u našem primeru metod proizvoda bi se računao po sledećoj formuli:

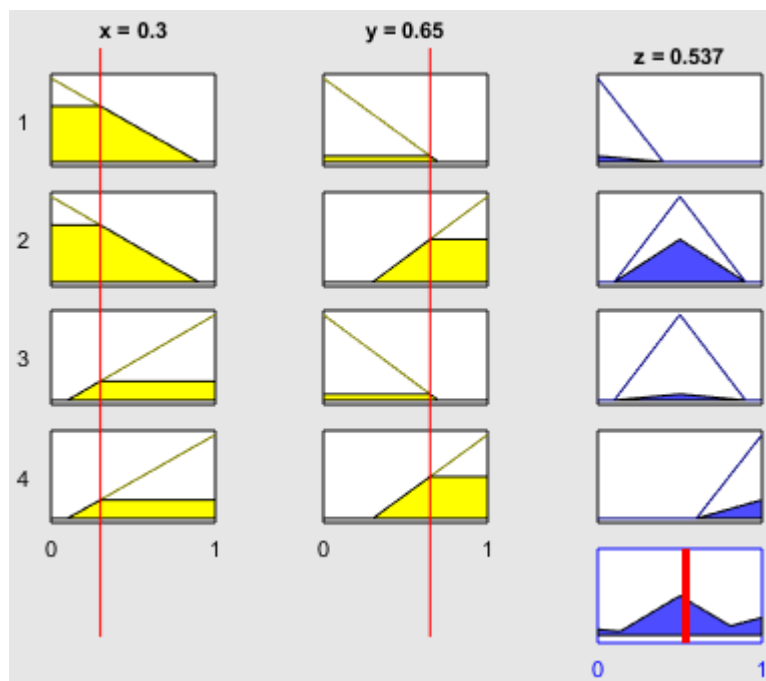
$$\mu_{C_i}(z) = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \forall i \quad (4.15)$$

Iz (4.14) i (4.15) se vidi da metod minimuma uzima „najslabiju kariku“ odnosno pravilo se primenjuje u onoj meri kolika je najmanja pripadnost od svih ulaznih fazi skupova i ne uzima u obzir veće pripadnosti, dok se kod metoda proizvoda uzimaju u obzir svi stepeni pripadnosti. Kod pravila „ILI“ tipa obično se koriste metode maksimuma ili metoda algebarske sume (verovatnosne unije).

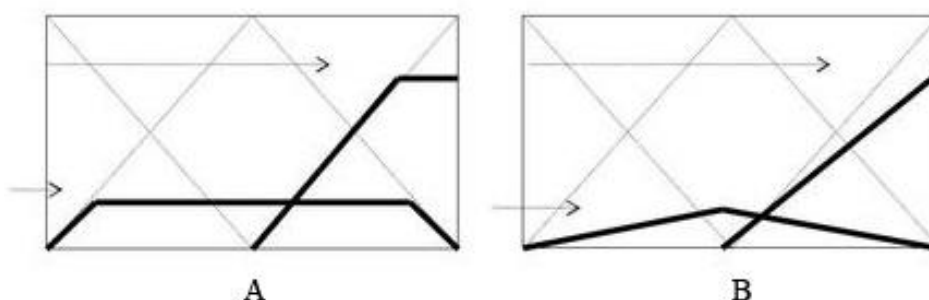
Nakon aktivacije sledi implikacija koja na osnovu vrednosti dobijenih aktivacijom formira izlaznu fazi promenljivu za svaku izlaznu varijablu svakog pravila. Najčešće korišćeni metod implikacije je metod minimuma koji jednostavno odseca vrh izlaznog fazi skupa (treća kolona na Sl. 4.1). U literaturi se za ovakvu funkciju može naći i naziv  $\alpha$ -preseka. Druga široko rasprostranjena metoda implikacije je metoda proizvoda koja jednostavno fazi skup pomnoži sa dobijenim skalarom, odnosno sve vrednosti stepena pripadnosti se množe dobijenim skalarom. Na našem primeru proizvod metoda implikacije bi izgledala kao na slici Sl. 4.5.

Sl. 4.6 prikazuje uporednu grafičku interpretaciju ove dve metode implikacije. Tu se još jednom može videti da metoda minimuma vrši odsecanje, dok metoda proizvoda vrši skaliranje (proporcionalno smanjenje).

Treba naglasiti da su u našem primeru (Mamdani tip fazi zaključivanja) i na ulazu i na izlazu metode implikacije fazi skupovi. Kod drugih tipova zaključivanja ona može izgledati sasvim drugačije. Na primer Takagi–Sugeno–Kang tip fazi zaključivanja se ne razlikuje bitno od ostalih tipova direktnog zaključivanja ali postoji velika razlika u strukturi fazi pravila. Umesto fazi skupa u zaključku se nalazi linearna funkcija između ulaza i izlaza. Najčešće korišćeni slučaj je kada su linearni koeficijenti jednaki nuli i tada se dobije tip funkcije pripadnosti poznat kao singleton (engl. Singleton).



Sl. 4.5 Grafički prikaz metode implikacije tipa proizvod



Sl. 4.6 Faza implikacije: A – metoda minimuma (odsecanje), B – metoda proizvoda (skaliranje)

Faze agregacije i akumulacije se često posmatraju i definišu zajedno kao jedna faza U literaturi se obično koristi samo jedan od ova dva naziva: akumulacija ili agregacija. Na osnovu svih fazi promenljivih dobijenih fazom implikacije (ima ih onoliko koliko ima aktivnih pravila) formira se konačna izlazna fazi promenljiva. Svi aktivni zaključci se u tom smislu akumuliraju na različite načine. Najčešće korišćene metode agregacije su metoda maksimuma, metoda sume i probabilističko ILI. Na Sl. 4.1 i Sl. 4.5 u donjem desnom uglu se vidi fazi promenljiva koja je dobijena kao rezultat metode maksimuma faze agregacije na osnovu akumuliranih fazi promenljivih dobijenim implikacijom svakog pojedinačnog pravila. Metoda maksimuma je definisana unijom fazi skupova. U slučaju metode sume konture konačnog oblika se dobijaju kao algebarska suma fazi skupova, odnosno suma svih stepena pripadnosti u svakoj tački  $z$ . Metoda agregacije se često kombinuje sa metodom implikacije pa su tako poznati tipovi mehanizama aproksimativnog zaključivanja kao što su MIN-MAX (metoda minimuma u fazi implikacije i metoda maksimuma u fazi agregacije) ili PROD-SUM (metoda proizvoda u fazi implikacije i metoda sume u fazi agregacije).

Često se traži da fazi sistem ima jasno definisane (oštre) izlaze, posebno kada se koristi kao fazi regulator. U tom slučaju se koristi metoda defazifikacije i iz konačnog fazi skupa dobijenog agregacijom i akumulacijom „izvlači“ se njegov najbolji reprezent. Defazifikacija

predstavlja operaciju kojom se rezultujući fazi skup konvertuje u realni (oštri) broj. Na Sl. 4.1 i Sl. 4.5 vidimo u donjem desnom uglu podebljanu crvenu vertikalnu punu liniju koja predstavlja brojeve 0,53 i 0,537 respektivno u našim primerima. Time je fazi skup koji je dobijen kao rezultat agregacije i akumulacije metodom defazifikacije konvertovan u oštar broj koji u svakom sistemu ima svoju interpretaciju. Defazifikacija se primenjuje zbog potrebe da se u mnogim praktičnim aplikacijama koristi diskretna vrednost upravljanja. Defazifikacijom se teži proizvesti nefazi upravljanje koje najbolje predstavlja moguću raspodelu zaključene fazi upravljačke akcije.

Ne postoji sistematična procedura za izbor strategije defazifikacije. Iako postoji jako puno različitih metoda defazifikacije, neke od najčešće korišćenih su:

- Centar mase
- Bisekcija površi (metoda polovljenja površi)
- Najmanji maksimum
- Sredina maksimuma
- Najveći maksimum

Centar mase (ili centar gravitacije) računa centar površine ispod krive koja predstavlja akumulirane fazi skupove i vraća njegov položaj. Ako tu površinu posmatramo kao ravan jednake gustine, centar mase je tačka na  $x$  osi oko koje bi ovaj oblik bio u ravnoteži. Brojčana (sirova) izlazna vrednost je apscisa centra gravitacije fazi skupa koji je dobijen akumulacijom. Iako je računski veoma zahtevan i relativno kompleksan ovaj metod defazifikacije je široko rasprostranjen u upotrebi.

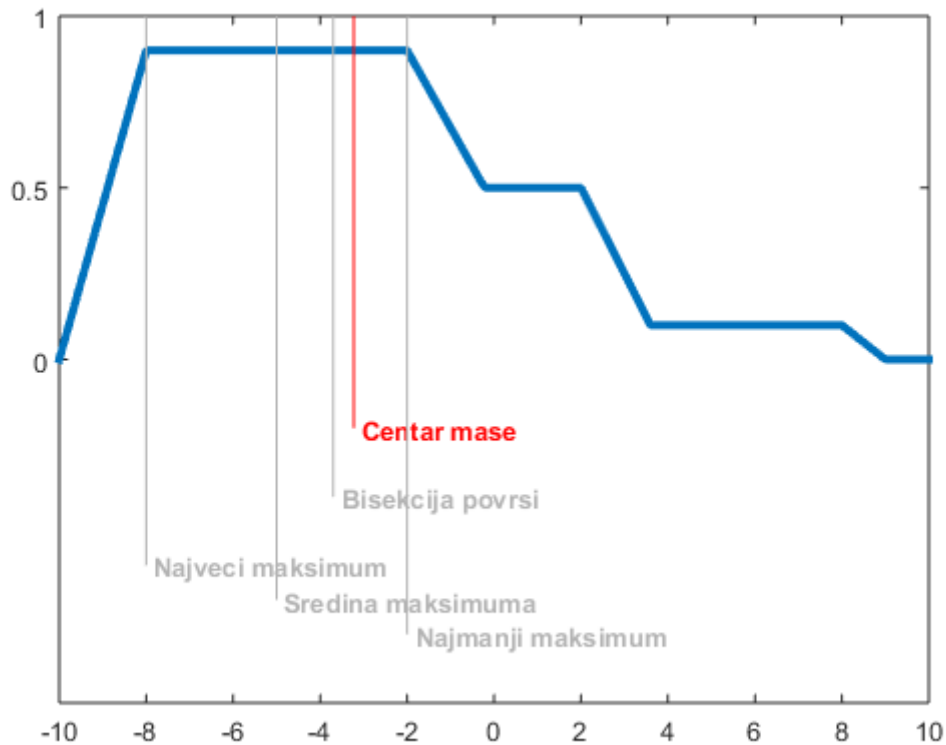
Bisekcija površi (ili polovljenje prostora) bira tačku na  $x$ -osi koja je presek  $x$ -ose i vertikalne linije koja deli posmatrani region u dva podregiona jednakih površina. Računska kompleksnost ovog metoda je veoma visoka a rezultat može biti dvosmislen. Na primer, ako se fazi skup sastoji od dve brojčane vrednosti, tj. dva singltona, onda svaka tačka između dva broja deli prostor na dva dela. Zbog toga se ovaj metod ne primenjuje u diskretnim slučajevima. Rezultat dobijen ovom metodom se ponekad, ali ne i uvek, podudara sa linijom centra mase.

Najmanji, srednji i najveći maksimum su tri metode koje vraćaju tačku, ili tačke, u kojima posmatrana površ ima svoj maksimum. Intuitivni pristup je da tražimo tačku koja ima maksimalnu pripadnost. U slučaju kada postoji zaravan (kada površ ima istu vrednost maksimuma u više tačaka na  $x$ -osi) ove tri metode će vratiti različite vrednosti. Ako akumulirana funkcija pripadnosti ima jedinstven maksimum onda će sve ove tri metode vratiti istu vrednost. Ove tri metode zanemaruju oblik fazi skupa i računski kompleksnost im je relativno dobra. Koriste se veoma često u problemima prepoznavanja oblika i klasifikacije [43].

U opisu pojedinih metoda date su njihove osnovne karakteristike bitne za neke oblasti primene. Opšte fazi zaključivanje kod organizacionih ili finansijskih sistema ne zahteva sofisticirane tehnike defazifikacije. Sa druge strane ono zahteva veliku fleksibilnost prilikom konstrukcije pravila što nije slučaj kod primene u automatskom upravljanju [84]. U sistemima automatskog upravljanja u realnom vremenu veoma je važna brzina dobijanja rezultata što najčešće zavisi od metode defazifikacije. Zato će verovatnije biti odabrane metode koje zahtevaju najkraće vreme procesiranja. Metoda „centar mase“ zahteva relativno veliko vreme za računanje. Na digitalnim računarima se računa numeričkom integracijom koja može trajati i 1000 puta duže od računanja metodom sredine maksimuma, zavisno od rezolucije i tipa procesora. Iz tog razloga mnogi softverski alati i fazi logički procesori koriste aproksimaciju

metode „centar mase“ poznatu kao „brzi centar mase“ [85]. Još veće ubrzanje procesiranja ostvaruje se korišćenjem singleton vrednosti umesto funkcija pripadnosti izlaznih vrednosti.

Na Sl. 4.7 su grafički prikazane vrednosti koje bi vratile različite defazifikacione metode na primeru akumulirane površi. Može se uočiti da je u zavisnosti od problema koji se rešava moguće da više defazifikacionih metoda daju vrlo sličan rezultat, što može da igra ulogu u izboru metode radi smanjenja zahtevnosti izračunavanja [86].



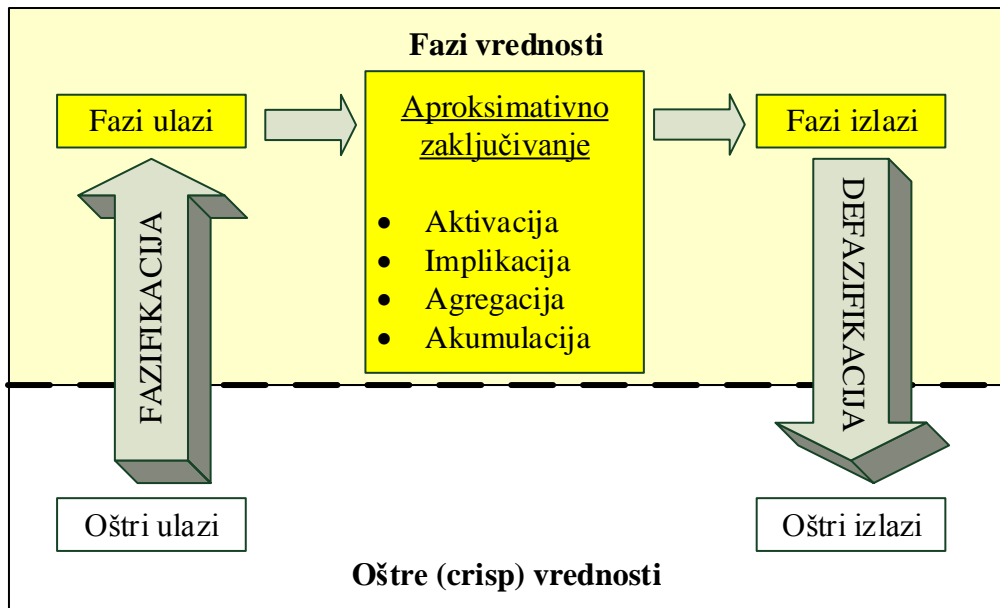
Sl. 4.7 Metode defazifikacije

Za neke primene vrlo je bitno i ostvarivanje postepenosti, odnosno kontinuiteta defazifikacije. To znači da defazifikaciona metoda treba da daje takve rezultate kod kojih za male promene ulaza imamo malu promenu izlaza, pod uslovom da je za svaku kombinaciju ulaznih promenljivih najmanje jedno pravilo aktivirano i ako se ulazne funkcije pripadnosti preklapaju. Metoda „centar mase“ je kontinualna dok su metode najmanjeg srednjeg i najvećeg maksimuma diskontinualne. U automatskom upravljanju korišćenje diskontinualnih metoda bi prouzrokovalo nestabilnost i oscilacije što u većini slučajeva nije poželjno.

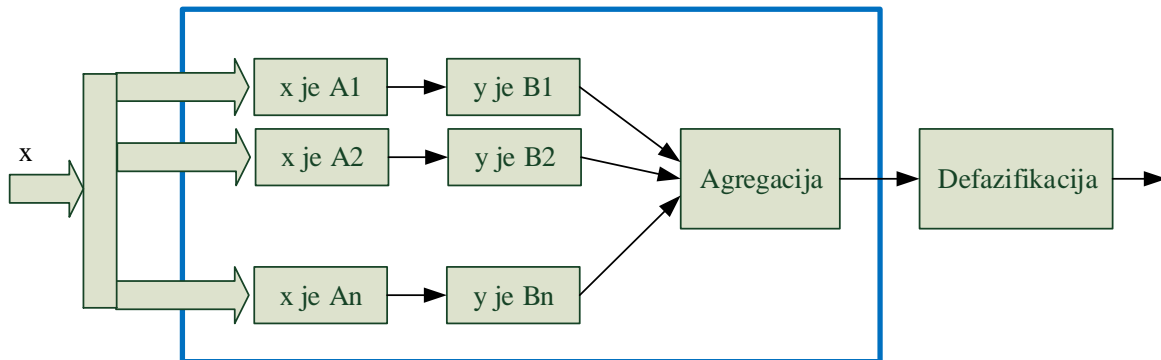
Kada se poredе ove metode defazifikacije, u literaturi [85, 86, 83] se navodi da je „centar mase“ najbolje kompromisno rešenje, dok „sredina maksimuma“ daje najverovatnije rešenje. Metod „centar mase“ ima primenu u velikom broju sistema jer je kontinuiran i nedvosmislen. Mora se imati u vidu i to da je defazifikacija sa matematičkog stanovišta preslikavanje (mapiranje) vektora (vrednost lingvističke promenljive) u realan broj. U tom preslikavanju postoji redukcija informacije, zbog toga što nije jedinstveno, jer se različite vrednosti lingvističke promenljive mogu preslikati u isti defazifikovani realni broj.

Na Sl. 4.8 su vizuelno prikazani procesi fazifikacije i defazifikacije koji vrše preslikavanje iz jednog matematičkog prostora u drugi i nazad. Na Sl. 4.9 su još jednom šematski prikazane faze u mehanizmu aproksimativnog zaključivanja.





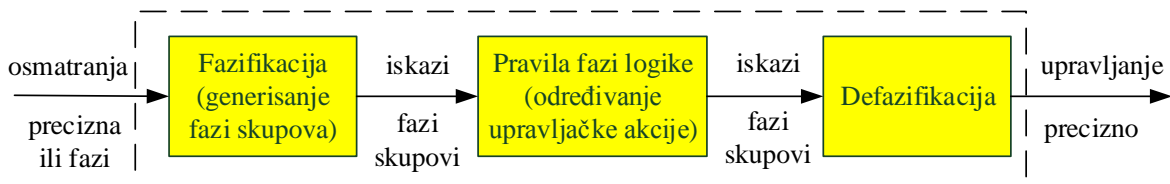
Sl. 4.8 Fazifikacija i defazifikacija



Sl. 4.9 Redosled faza mehanizma aproksimativnog zaključivanja

Primena mehanizma aproksimativnog zaključivanja u upravljanju sistemima predstavlja pokušaj da se neprecizni opisi funkcionisanja nekog realnog sistema predstave računarski pomoću jednostavnih pravila. To se postiže primenom teorije fazi skupova i fazi logičkog (aproksimativnog) zaključivanja čime se omogućuje da se znanje eksperta iz određene relevantne oblasti koristi za efikasno upravljanje nekim sistemom.

Na Sl. 4.10 prikazan je princip funkcionisanje fazi sistema zaključivanja.



Sl. 4.10 Funkcionisanje fazi sistema zaključivanja

Fazi logika i mehanizam aproksimativnog zaključivanja su našli veoma široku primenu. Tako na primer, uobičajene aplikacije fazi logike uključuju modelovanje složenih sistema u kojima je veoma teško odrediti odnose između varijabli nekim drugim metodom [87]. Osim

toga sve češće se fazi logika koristi u problemima grupisanja (engl. Group Clustering). Jedna od uspešnih primena fazi logike u upravljanju saobraćajem je objavljena u [33]. Jedna oblast u kojoj se fazi sistemi duži niz godina veoma uspešno primenjuju jesu ekspertske sistemi [15, 56].

#### 4.3.5. Fazi upravljanje

Konvencionalno upravljanje karakteriše skup zadataka koji moraju biti ispunjeni kada je u pitanju upravljanje bilo kojim sistemom [83]. U te zadatke spadaju:

1. obezbeđivanje dobre osetljivosti na promene parametara
2. obezbeđivanje otpornosti na smetnje
3. stabilnost sistema
4. vreme uspona
5. preskok
6. vreme smirenja
7. minimizacija grešaka u stacionarnom stanju

U isto vreme moraju biti zadovoljeni i mnogobrojni uslovi:

- cena – koliko novca će biti potrebno za razvoj, konstrukciju i ugradnju kontrolera
- računarska zahtevnost – koliko procesorske snage i memorije će biti potrebno za rad
- proizvodljivost – da li postoji odgovarajuća tehnologija za konstrukciju i ugradnju
- pouzdanost – kontroler mora da funkcioniše odgovarajuće i pouzdano, postavlja se pitanje srednjeg vremena između dva otkazivanja
- održavanje – da li će biti lako obavljati rutinsko održavanje i podešavanja na kontroleru
- prilagodljivost – da li jedan isti dizajn može da se primeni na druge slične probleme kako bi se cena razvoja smanjila
- razumljivost – da li će ljudi koji ga implementiraju ili testiraju moći da ga potpuno razumeju, itd.

Uspešno upravljanje nekim sistemom obično zahteva poznavanje prirode procesa kojim se upravlja i poznavanje odgovarajućeg upravljačkog algoritma pogodnog za postizanje definisanih ciljeva, željenih karakteristika odziva ili performansi sistema. Neke upravljačke strategije zahtevaju i treći skup informacija, koji pokriva znanje o trenutnom stanju procesa kojim se upravlja. Metod upravljanja koji ne zahteva precizan matematički model sistema je poželjan u slučajevima kada je sistem kojim je potrebno upravljati složen i/ili vremenski promenljiv ili u slučajevima kada je teško ili nemoguće definisati matematički model sistema. Jedan metod koji zadovoljava ove kriterijume je metod upravljanja zasnovan na rasplinjutoj (fazi) logici [53]. Fazi upravljanje se bazira na primeni teorije fazi skupova i mehanizmu aproksimativnog zaključivanja. Fazi logika daje matematički aparat pomoću koga je moguće prisvojiti znanje eksperta iz određene oblasti i iskoristiti ga za postizanje efektivnog upravljanja nekim sistemom. Teorija fazi skupova (rasplinuti skupovi, nerazgovetni skupovi) predstavlja najpogodniji matematički aparat za tretiranje neizvesnosti, subjektivnosti, višeznačnosti i neodređenosti [54]. Mnogi autori su pribegavali fazi mehanizmima zaključivanja u sistemima za podršku u odlučivanju [55, 35].

Fazi upravljanje predstavlja pokušaj da se neprecizni i procenjeni opisi rada nekog sistema prenesu u računar i predstave pomoću jednostavnih pravila [78]. Postoje različiti pristupi modelovanju u uslovima neizvesnosti, kao što su teorija verovatnoće i fazi teorija. U pristupu preko verovatnoće, verovatnoće raspodele su postavljene na osnovu stohastičkih eksperimenata i dobijenih podataka. Fazi upravljanje je zasnovano na primeni teorije fazi skupova i fazi logičkog zaključivanja, čime je omogućeno da se znanje stručnjaka u određenoj oblasti koristi za postizanje efikasnog i efektivnog upravljanja određenim sistemom.

Fazi logički upravljački sistemi konstruisani su tako da oponašaju i modeluju ljudsko iskustvo i delovanje pri odlučivanju. Fazi upravljanje obezbeđuje formalnu metodologiju za predstavljanje, manipulaciju i implementaciju ljudskog znanja o kontroli sistema [86]. Fazi upravljanje predstavlja metod upravljanja na makro nivou korišćenjem kvalitativnih opisa [88]. Fazi upravljanje je izuzetno korisno u slučajevima kada su procesi previše komplikovani da bi bili analizirani konvencionalnim kvantitativnim tehnikama ili u slučajevima kada su dostupni izvori informacija interpretirani kvalitativno, neprecizno i nesigurno [89, 90]. Fazi logika je metodologija koja se koristi u upravljačkim sistemima za rešavanje problema koji se pojavljuju u velikom spektru sistema, od jednostavnih, malih mikro kontrolera (engl. Embedded) [91] do velikih mrežnih više-kanalnih računarskih sistema za prikupljanje podataka i upravljanje sistemima. Može se implementirati u hardveru, softveru ili kombinovano [92]. Fazi logika pruža jednostavan način da se dođe do konačnog rešenja pomoću nepreciznih, nejasnih, dvosmislenih ili ulaza sa šumom. Teorija fazi skupova je prilagodljiva različitim kontekstima [79] što ukazuje na potrebu da se teorija prilagodi kontekstu ako želimo da nam bude odgovarajući alat za modelovanje. Veoma česta primena fazi logike je baš u modelovanju složenih sistema gde je teško odrediti odnose među varijablama korišćenjem nekih drugih metoda [87].

Fazi logika je u osnovi viševrednosna logika koja dopušta postojanje vrednosti definisane između postojećih vrednosti vezanih za tradicionalne stavove: da-ne, istinito-neistinito, crno-belo, itd. Fraze “veoma blizu” ili “jako daleko” putem fazi logike mogu biti formulisane matematički i mogu se procesirati računarom [78]. Fazi logika koristi iskustvo čoveka – stručnjaka u formi lingvističkih AKO-ONDA (engl. IF-THEN) pravila, a mehanizam aproksimativnog rezonovanja računa upravljačku akciju za konkretan slučaj. Koncept fazi logike je već deo opšteg individualnog znanja, a ono što je novo jeste razvoj teorije koja formalizuje svakodnevno neformalno mišljenje i koristi ga za programiranje kompjutera. Teorija fazi skupova nudi naučno zasnovan pristup koji koristi i iskustvo i intuiciju. Velika prednost teorije fazi logike je baš u mogućnosti modelovanja tj. prevođenja u algoritam, potpuno nestruktuiranog skupa heurističkih tvrđenja izraženih rečima.

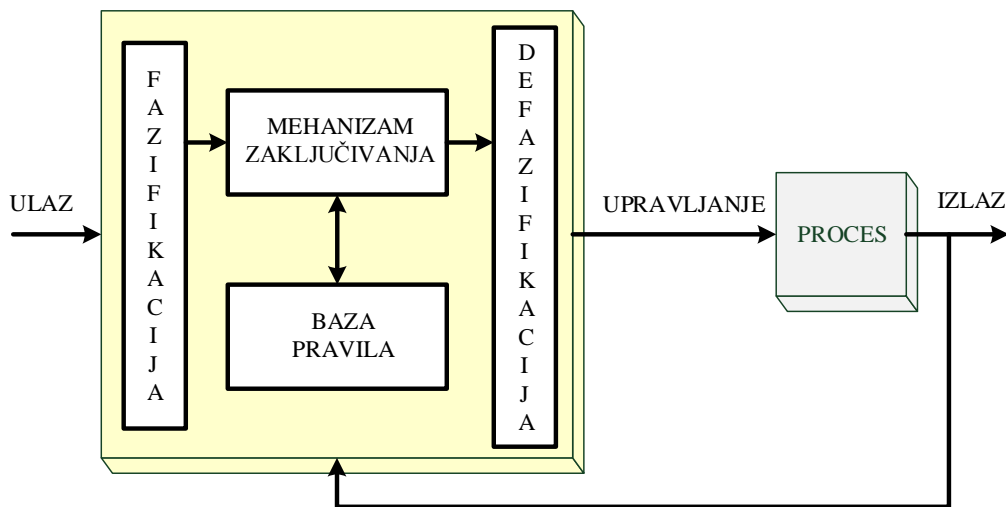
Fazi logički upravljački sistemi nastali su iz težnje za modelovanjem ljudskog iskustva i ponašanja u procesu donošenja odluka. Fazi upravljanje predstavlja metod upravljanja sistemima na opštem nivou korišćenjem kvalitativnih opisa [93, 33]. Osnovu takvog upravljanja čine fazi-lingvistička pravila upravljanja. Lingvistička pravila upravljanja su pravila koja stručnjak (ekspert) koristi u stvarnoj situaciji prilikom upravljanja objektom ili procesom. Ona predstavljaju zbirno upravljačko znanje (zajedno sa znanjem koje potiče iz iskustva operatera), koje se izražava primenom nepreciznih, lingvističkih izraza.

Fazi upravljački sistemi se primenjuju u slučaju kada je objekat ili problem upravljanja:

- previše kompleksan
- kada određivanje matematičkog modela ne može biti precizno
- dinamičan, odnosno promenljiv u vremenu
- nelinearan

Postoje četiri osnovne komponente fazi upravljanja [89] (kao što je prikazano na Sl. 4.11:

1. Interfejs za fazifikaciju – transformiše ulazne podatke u fazi vrednosti
2. Baza pravila – sadrži pravila iz domena aplikacije u obliku AKO-ONDA
3. Logika za odlučivanje (mehanizam zaključivanja)
4. Defazifikacija



Sl. 4.11 Osnovne komponente fazi upravljanja

Početak 21. veka fazi logika se veoma mnogo primenjuje. Fazi logika je unapredila mnogobrojne potrošačke proizvode, uređaje automatskog upravljanja u industriji, medicinske instrumente, itd. Koristi se u ekonomiji, marketingu, borbenim sistemima, sistemima za podršku odlučivanju, ekspertskim sistemima, biologiji, meteorologiji, politici, saobraćaju, itd. Zahvaljujući razvoju računara i komercijalnih softvera moguća je primena na bilo koji kompleksni sistem koji se može kvalitativno opisati [25].

Jedna od veoma čestih primena fazi logike danas je primena u regulaciji i upravljanju sistemima. Projektovanje fazi regulatora je veoma kratko ali precizno prikazano u [85]. Tanaka i Wang su u [83] dali detaljnu analizu stabilnosti i robusnosti fazi upravljačkih sistema projektovanih za praktične realizacije po Takagi-Sugeno konceptu i predložili sintezu optimalnog višekriterijumskog fazi upravljanja.

#### 4.3.6. Fazi ekspertski sistemi

Jedna od mnogih primena fazi sistema zaključivanja je i primena u sistemima za podršku u odlučivanju (engl. Decision Support Systems) u šta spada i fazi ekspertski sistem (FES) predložen u ovoj disertaciji. Mnogi autori [55, 35, 15, 50, 56] su takođe eksperimentisali sa primenom fazi sistema zaključivanja u podršci pri odlučivanju. U raznim primenama je početni fazi sistem zaključivanja kasnije menjan ili optimizovan nekim drugim tehnikama. Jedan dobar

primer računanja fazi aritmetičkih intervala za primenu u podršci u odlučivanju je objavljen u [94].

Mnogi procesi u industriji kojima upravljaju operateri (ljudi) ne mogu biti automatizovani uz pomoć konvencionalnih tehnika upravljanja, jer su performanse takvih kontrolera često inferiorne u odnosu na operatere. Jedan od razloga je što linearni kontroleri, koji se obično koriste u konvencionalnom upravljanju, nisu pogodni za nelinearna postrojenja. Još jedan razlog je mogućnost ljudi da sakupe razne vrste informacija i kombinuju upravljačke strategije koje ne mogu biti integrisane u analitičke upravljačke formule. Osnovno načelo upravljanja zasnovanog na znanju (ekspertskog upravljanja) je uhvatiti i sprovesti iskustvo i znanje koje se može dobiti od stručnjaka (na primer procesnih operatera). Specifična vrsta upravljanja zasnovanog na znanju je fazi upravljanje koje je zasnovano na pravilima i gde su upravljačke akcije koje odgovaraju određenim uslovima sistema opisane u smislu fazi ako-onda pravila. Fazi logika može da snimi kontinualnu prirodu ljudskog procesa donošenja odluka i kao takva je definitivno poboljšanje u odnosu na metode zasnovane na binarnoj logici (koje se široko koriste u industrijskim kontrolerima). Rad na fazi upravljanju je motivisano željom da [89]:

- se imitiraju upravljački postupci iskusnog ljudskog operatera
- se postigne glatka interpolacija između diskretnih izlaza koji bi obično bili dobijeni.

Uz pomoć fazi logike i fazi sistema zaključivanja [54, 53, 36] moguće je sakupiti znanje od eksperata u određenoj oblasti i implementirati ga u upravljački algoritam u svrhu postizanja željenog upravljanja specifičnim sistemom. Osnovna ideja kod fazi sistema zaključivanja je da se oponaša proces ljudskog razmišljanja i donošenja odluka, samo mnogo brže. Zadeh [24] je uveo koncept lingvističke varijable i aproksimativnog rasuđivanja. U [95], a kasnije i [33] je primenjena fazi logika i neuronske mreže za upravljanje u saobraćaju i dobijeni su značajno dobri rezultati. Skorije primene ekspertskih sistema zasnovanih na fazi logici koje vredi pomenuti se mogu naći u [10, 15, 56].

Projektovanje fazi ekspertskog sistema sastoji se od nekoliko faza:

1. Definisane ulaznih promenljivih veličina za određena stanja procesa kojim se upravlja i izbor upravljačkih promenljivih. Izbor promenljivih zavisi od ekspertskog znanja u vezi procesa.
2. Definisane načina na koji će veličine stanja procesa biti pretvorene u fazi vrednosti.
3. Konstruisanje baze upravljačkih pravila.
4. Izbor metoda fazi zaključivanja (Mamdani, Larsen, Tsukamoto, TSK i drugi). Rezultat fazi zaključivanja je fazi skup, tj. fazi upravljačka akcija.
5. Određivanje metoda defazifikacije kako bi se fazi upravljačka akcija dobijena iz procesa zaključivanja pretvorila u ne-fazi (preciznu) upravljačku akciju.
6. Testiranje i podešavanje fazi ekspertskog sistema. U ovom koraku podešava se baza podataka, baza pravila i testiraju se različiti metodi zaključivanja i defazifikacije.
7. (opciono korak) Kreiranje lukap (engl. Lookup) tabele. Zbog moguće velike kompleksnosti fazi kontrolera procesi fazi zaključivanja i defazifikacije mogu oduzeti mnogo vremena. Lukap tabela pokazuje veze između ulaznih promenljivih i izlaznih upravljačkih akcija i time "premošćava" proces računanja. U opštem slučaju, veoma je teško konstruisati prihvatljivu lukap tabelu za nelinearne upravljačke sisteme bez konstrukcije i odgovarajućeg logičkog kontrolera.

#### **4.4. Fazi logika i upravljanje brodskom prevodnicom**

Ulazni parametri u sistem za podršku u odlučivanju su trenutni nivo vode u komori i procena trenutaka dolazaka plovila do prilaznog kanala, odnosno rastojanja plovila od brodske prevodnice. Rastojanje plovila od brodske prevodnice je u stvari razdaljina od komore brodske prevodnice do plovila. Ovde se javlja i problem preciznog određivanja rastojanja na osnovu pozicije tačke merenja na plovilu (pramac plovila, pozicija radarske antene, pozicija GPS predajnika, itd.) [96]. Takođe, treba uzeti u obzir zonu oko plovila koja je neophodna za bezbedno vođenje plovila. Zona oko plovila ili broda, slično kao kod ljudi, predstavlja slobodan prostor između sopstvenog tela i objekata i tela u okolini koja obezbeđuje slobodne pokrete. U morskoj i rečnoj navigaciji, područje broda zavisi od mnogih faktora i može imati različite veličine i oblike [97]. Plovilo je locirano negde unutar svog domena i ostali učesnici u saobraćaju ih posmatraju kao celinu. Na osnovu toga, može se smatrati da je rastojanje plovila od brodske prevodnice u stvari rastojanje domena plovila od brodske prevodnice. Kako je dokazano da je domen plovila promenljiva (fazi) veličina [97], tako se i rastojanje plovila od brodske prevodnice može posmatrati kao fazi vrednost. U kanalskoj navigaciji, odnosno vodotoku ograničenih dimenzija, domen plovila se može aproksimirati pravougaonikom. Sa aspekta upravljanja brodskom prevodnicom to znači da je rastojanje plovila razdaljina izmerena od komore do određene tačke locirane negde u kanalu unutar intervala okupiranog domenom plovila. Jedna primena fazi logike u upravljanju saobraćajem plovila je objavljena u [98].

Kao što je već rečeno, uz pomoć fazi logike mogu se na jednostavan način modelovati nejasnoće i nepreciznosti, bez potrebe za znanjem tačnih parametara modela. U situacijama kada nema podataka za potrebe estimacije (procene), parametri mogu biti procenjeni neprecizno ali dovoljno jasno na osnovu percepcije operatera. U stvari, umesto prikupljanja podataka za statističku estimaciju parametara trošeći vreme i ostale troškove, moguće je razviti i analizirati model na osnovu nepreciznih podataka. U ovom slučaju, teorija fazi skupova se može pokazati kao veoma korisna za formulisanje modela ugrađivanjem verbalnih varijabli zasnovanih na ljudskim osećanjima i opažanjima [37]. U modelu brodske prevodnice, na primer, rastojanje plovila od brodske prevodnice može biti procenjeno kao „oko 6 kilometara“ ili „rastojanje je veliko“.

#### **4.5. Integracija fazi ekspertskog sistema u nadzorno upravljački sistem prevodnice**

Rečni Informacioni Sistem/Servisi (RIS, engl. River Information System/Services) predstavlja usklađeni skup informacionih servisa i sistema koji se upotrebljavaju kao podrška upravljanju saobraćajem, transportom i navigacijom na unutrašnjim vodnim putevima [75]. Funkcionisanje RIS-a bazira se na prikupljenim informacijama sa vodotokova, luka, prevodnica, brana itd. U ove informacije spadaju podaci o kretanju i lokaciji plovila, vremenskim uslovima i stanju vodotokova. Ove informacije se koriste za upravljanje, nadgledanje i optimizaciju saobraćaja.

Informacije o saobraćaju (TTI – engl. Tactical Traffic Information) dostavljaju se brodarima kao podrška u donošenju brzih odluka vezanih za navigaciju [75]. TTI sadrži informacije o poziciji plovila, brzini, pravcu kretanja i specifične informacije o svakom plovilu. U ovaj skup informacija spadaju i strategijske informacije o saobraćaju (STI – engl. Strategic Traffic Information) koje predstavljaju uopšteni pregled situacije u saobraćaju preko većeg dela

teritorije [5]. STI se koristi u glavnom za planiranje i dugoročno praćenje. Upravljanje saobraćajem vrši se u dve kategorije – upravljanje plovnim saobraćajem i upravljanje brodskim prevodnicama i mostovima.

Fazi ekspertski sistem (FES) predložen u ovoj disertaciji je kreiran da bude kompatibilan sa RIS-om, poštujući direktive i preporuke komisije za unutrašnju navigaciju (Inland Navigation Commission) [99]. FES je osmišljen da u toku rada prikuplja podatke od RIS-a, kao što su podaci o brzini, poziciji i smeru kretanja plovila [5]. Softver je kreiran da se izvršava na personalnom računaru (PC) pod *Windows* operativnim sistemom. Jedan takav računar se obično nalazi u komandnoj sobi brodske prevodnice i u praksi je najčešće povezan sa programabilnim logičkim kontrolerom (engl. Programmable Logic Controller - PLC) putem *Eternet* (engl. *Ethernet*) komunikacije korišćenjem standardnog *TCP/IP* (engl. Transmission Control Protocol / Internet Protocol) protokola [100] ili nekog drugog industrijskog komunikacionog protokola [101]. FES predstavljen u ovoj disertaciji je kreiran kao nadogradnja na SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) sistem za prikupljanje podataka i upravljanje na višem nivou. Neka praktična rešenja koja koriste SCADA sisteme za daljinski nadzor i upravljanje se mogu naći u [102, 103, 104, 105].

U ovom delu disertacije je predloženo i jednostavno rešenje SCADA sistema na osnovu predloženog fazi modela. SCADA softver se obično nalazi na samom vrhu upravljačke hijerarhije [13]. Osnovna svrha SCADA sistema je da prikuplja važne podatke iz procesa [14]. U stvari, PLC komunicira sa mašinama, pogonima i instrumentima u polju i snabdeva SCADA-u sa neophodnim podacima. SCADA zatim na osnovu ovih podataka prikazuje stanje procesa operaterima. Sporedna uloga SCADA-e je i da vrši upravljanje sistemima na višem nivou. Tada komunikacija teče u suprotnom smeru. Operateri imaju mogućnost da upravljaju pogonima uz pomoć SCADA-e i da zadaju referentne vrednosti PLC-u [105] koji na osnovu toga upravlja izvršnim organima.

Kod brodske prevodnice SCADA i PLC softver upravljaju:

- mernom i regulacionom opremom;
- sistemom semaforne signalizacije;
- sistemom video nadzora;
- sistemom interfona.

#### 4.5.1. Tehnički opis brodske prevodnice

U ovoj poglavlju dat je tehnički opis brodske prevodnice „Kucura“ koja je uzeta za primer. Na osnovu ovog tehničkog opisa je kreiran SCADA sistem sa ugrađenim fazi ekspertskim sistemom za upravljanje brodom prevodnicom. Prevodnicu čine dva predpristaništa i komora. Između predpristaništa i komore se nalaze dvokrilna vrata sa po dve klinkete (ventila) na svakom krilu koje služe za izjednačenje nivoa u komori i pred-pristaništu. Zadatak prevodnice je prevođenje plovnih objekata radi savlađivanja vodne stepenice nastale izgradnjom brane.

Pogon vrata, klinketa i brava je elektro-hidraulični iz dve pumpne stanice sa po tri pumpna agregata koje pokreću elektromotori snage 5,5 kW. Svako krilo vrata sa pripadajućim klinketama i bravama ima po dva hidraulična bloka sa elektromagnetnim razvodnicima. Jedan blok je za upravljanje cilindrom krilnih vrata a drugi za upravljanje cilindrima klinketa i cilindrom brave.

Sistem za tehnički nadzor i upravljanje se sastoji od PC računara lociranog u komandnoj kućici i dva PLC-a u prostorijama hidro-agregata. Funkcije sistema su:

- daljinsko merenje, akvizicija (prihvatanje) i obrada procesnih veličina;
- upravljanje i komandovanje radom vrata prevodnice i pripadajućih klinketa i brava;
- zaštite i blokade;
- prikazivanje procesa na monitoru i stanja procesnih veličina;
- signalizacija i alarmiranje poremećaja u procesu kao i kvara opreme.

Nivoi komandovanja po prioritetu su lokalni (viši prioritet) i daljinski (niži prioritet). Izborom lokalnog komandovanja (stavljanjem u odgovarajući položaj preklopnika na vratima ormana na pozicijama uzvodne ili nizvodne glave prevodnice) omogućuje se lokalno komandovanje sa vratima i semaforima dok se daljinsko komandovanje sa PC računara suspenduje. Sa lokalnih ormana komande se zadaju preko tastera smeštenih na prednjoj ploči ormana gde se nalazi i svetlosna signalizacija o stanjima iz procesa upravljanja semaforima i vratima. Ukoliko nije izabrano lokalno upravljanje, onda je omogućeno daljinsko komandovanje sa PC računara posredstvom SCADA aplikacije. Informacije o stanju procesnih veličina operater dobija u grafičkom obliku u oba slučaja komandovanja.

Procesi kojima se upravlja su:

- Položaj krila uzvodne kapije prevodnice – upravljački signali su binarni (digitalni) izlazi PLC-a kojima se deluje na odgovarajuće kontakte motora pumpnih agregata i na pobudne releje elektromagnetnih ventila, koji svi skupa deluju na hidraulične cilindre koji pokreću krila kapije prevodnice.
- Položaj krila nizvodne kapije prevodnice.
- Nivo vode u prevodnici - binarni izlazi iz PLC-a deluju na odgovarajuće kontakte motora pumpnih agregata i na pobudne releje elektromagnetnih ventila, koji svi skupa deluju na hidraulične cilindre koji pokreću klinkete odgovarajuće kapije prevodnice.

Upravljanje je sekvencijalnog tipa u zatvorenoj sprezi. Povratna sprega se zatvara preko analognih merenja nivoa vode u tri tačke duž prevodnice i digitalnih ulaza kojima se prenosi informacija o krajnjim položajima krila kapija i klinketa.

Za vanredne situacije implementiran je taster za prinudno zaustavljanje kompletnog pogona cele prevodnice. Pritiskom na isti isključuju se prekidači snage na glavnim dovodima električne energije, pri čemu je sistem prinudnog isključenja izveden žično, tj. nezavisno od nadzorno-upravljačkog sistema.

Analogna merenja koja se vrše a od interesa su za upravljanje su:

- merenje nivoa gornje vode,
- merenje nivoa donje vode i
- merenje nivoa vode u prevodnici.

Analogna merenja koja se vrše a imaju zaštitnu funkciju su merenje dva međufazna napona na glavnom dovodu električne energije i merenja struje motora hidrauličnih agregata.

Digitalni ulazi koji su od interesa za upravljanje su:

- krajnji položaji krila kapija prevodnice,
- među-položaji krila kapija prevodnice koji se javljaju kada krila kapija dođu u položaj pritvaranja i
- krajnji položaji klinketa.



Ostali digitalni ulazi daju informacije radnih stanja opreme i informacije o kvarovima na istoj i imaju ulogu pri ostvarivanju blokadnih uslova i zaštite.

PLC u ovom sistemu obezbeđuje:

- prihvatanje digitalnih i analognih signala iz procesa,
- odgovarajuću obradu i prenos tih informacija u PC računaru u centralnoj komandi,
- prihvatanje i prosleđivanje dobijenih komandi od PC računara,
- lokalne obrade podataka, u cilju realizovanja regulacionih, upravljačkih i blokadnih algoritama vodeći računa o prioritetima upravljačkih komandi.

PLC čini celinu sistema sa ulaznim modulima koji prihvataju podatke iz objekta u skladu sa vrstom signala kojima se podaci prenose, sa jedne strane, a sa druge strane izlaznim modulima koji izdaju komande izvršnim organima, pomoću signala koji su prihvatljivi za izvršne organe kojima se komanduje.

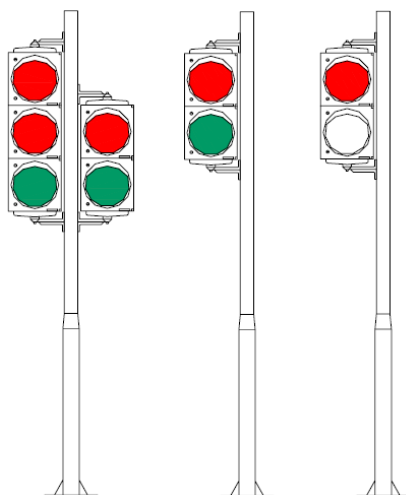
U ormanima u obe prostorije hidro-agregata je implementirana konfiguracija koja se sastoji od procesorske jedinice, modula digitalnih ulaza, modula analognih ulaza, modula digitalnih izlaza i modula napajanja.

Komunikacija između PLC-ova i računarskog sistema je izvedena fiber optičkim kablom, i to za svaki od PLC-ova posebnim komunikacionim pravcem (konfiguracija "zvezda") kako prekid na jednom komunikacionom pravcu ne bi onemogućavao komunikaciju po drugom komunikacionom pravcu. Korišćen je TCP/IP protokol na transportnom i mrežnom nivou.

Audio sistem interfona se koristi za potrebe komunikacije osoblja u stubovima na brani i prevodnici u kojima je smeštena oprema i centralnog komandnog mesta. Koristi se sistem interfona ostvaren preko mreže. Komunikacija između IP telefona se ostvaruje putem interneta korišćenjem VoIP (engl. Voice over IP) tehnologije. Osnovna funkcija VoIP tehnologije je konverzija glasa u skup podataka. Pozivi unutar iste VoIP mreže su besplatni. Preusmeravanje poziva se vrši pomoću IP telefonske centrale.

Semafora signalizacija se sastoji od ulaznih, izlaznih i pred-signalnih semafora (vidi Sl. 4.12). Ulazni semafori se sastoje od jedne trodelne vozačke lanterne prečnika Ø300 mm i jedne dvodelne vozačke lanterne prečnika Ø300 mm. Izlazni semafori se sastoje od jedne dvodelne vozačke lanterne prečnika Ø300 mm. Pred-signal se sastojati od jedne dvodelne vozačke lanterne prečnika Ø300 mm i jedne jednodelne vozačke lanterne prečnika Ø300 mm. Sve lanterne su montirane na stubove visine 3.5m, i u svaku od lanterni ugrađen je odgovarajući broj LED dioda, odgovarajuće boje (crveni, zeleni i beli). LED diode se uključuju putem digitalnih izlaza PLC-a, preko releja galvanskog razdvajanja, i to bilo automatski u skladu sa programom implementiranim u PLC-u, bilo ručno preko grafičkog interfejsa implementiranog u okviru SCADA aplikacije.

Sistem video nadzora za posmatranje vrata na uzvodnoj i nizvodnoj glavi, za kontrolu plovidbe u sektoru brodske prevodnice i za osmatranje nizvodne strane svih polja ustave se sastoji od dve pokretne Web kamere, dva posebna računara namenjena samo za video nadzor (tj. monitoring i snimanje) i potrebne opreme za povezivanje. Kamere su sa računarima u komandnoj sobi povezane Ethernet konekcijom.



Sl. 4.12 Semafori (ulazni, izlazni i pred-signalni sa leva na desno)

#### 4.5.2. Predložen SCADA softver

U centralnoj komandi se, za nadzor postrojenja, koristi računarski sistem sa implementiranim SCADA softverom (WinCC – Windows Control Center) sa funkcijama akvizicije signalizacija, alarma i merenja, obrade podataka, prezentacije obrađenih informacija kroz tekstualne i grafičke prikaze na monitorima. Posredstvom softverskih komponenti implementiranog SCADA softverskog paketa, informacije iz objekata se prihvataju, obrađuju, arhiviraju i prezentuju u pogodnoj formi za operatera, koji na osnovu dobijenih izvornih, i/ili obrađenih informacija, donosi odgovarajuće odluke i izdaje upravljačke naloge za svaki od objekata.

Informacije prikupljene pomoću rečnih informacionih servisa (RIS) mogu se upotrebiti u SCADA sistemu za nadgledanje i upravljanje radom brodske prevodnice na taj način što će podaci o brzini, udaljenosti i pravcu iz kog plovilo dolazi biti upotrebljeni za definisanje ulaznih promenljivih fazi ekspertskog sistema.

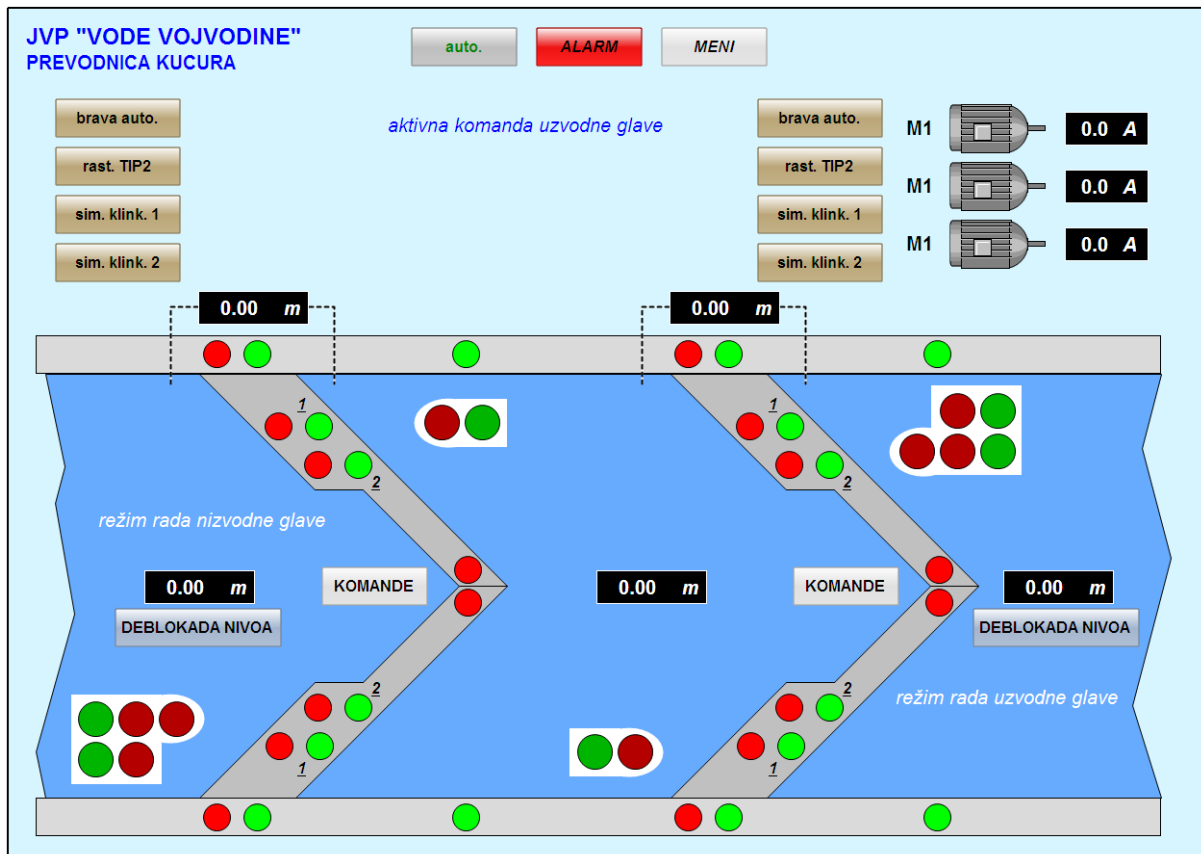
Osnovne funkcije SCADA sistema za upravljanje brodskom prevodnicom su:

- merenje, prikupljanje i obrada podataka
- upravljanje i kontrola rada vrata, pumpi i ventila na brodskoj prevodnici
- obezbeđivanje zaštite
- prikazivanje procesnih veličina i stanja brodske prevodnice
- signalizacija i alarmiranje u slučaju kvarova i grešaka

SCADA softver predstavlja pouzdan sistem za nadgledanje i kontrolu brodske prevodnice. Omogućava prevodničaru lako upravljanje procesom prevođenja plovila. Svi potrebni podaci se po pravilu skladište i čuvaju u bazi podataka. U slučaju kvarova i grešaka u radu brodske prevodnice omogućeno je obaveštavanje prevodničara uz upotrebu definisanog skupa alarmnih poruka.

SCADA softver predložen u ovom radu prati funkcionalnu organizaciju brodske prevodnice. Glavni pregledni ekran (Sl. 4.13) se prikazuje na monitoru računara čim se pokrene aplikacija. Sa ovog ekrana operater može da prati ceo proces. Sl. 4.13 prikazuje ekran SCADA aplikacije na kome se može u potpunosti pratiti stanje brodske prevodnice i proces prevođenja plovila. Operater levim klikom miša na odgovarajuću poziciju na ekranu otvora manji prozor u

kome mu je omogućeno upravljanje odabranom pozicijom (ventilom ili pumpom na primer). Ovaj manji prozor tipično sadrži informacije kao što su tehnološka oznaka pozicije, stanje motornih zaštitnih sklopki, zatim vizuelne i tekstualne indikatore stanja same mašine. Osim toga tu se nalaze i dugmići za pokretanje i zaustavljanje pogona (ili otvaranje i zatvaranje ventila).



Sl. 4.13 Glavni pregledni ekran SCADA aplikacije

Osim glavnog ekrana operater može da posmatra i ekrane sa graficima (trendovi) analognih veličina kao i veličina koje su prikupljane i skladištene u bazi podataka. Zatim, ekran koji prikazuje alarmne poruke, radne sate pojedinih pogona i ekran na kome je predstavljena potrošnja električne energije. U pogonima brodske prevodnice potrošnja električne energije je bitan deo i upravljanje ovom potrošnjom je veoma važno [106].

SCADA softver razvijen u okviru predloženog upravljačkog sistema u kombinaciji sa programom u PLC-u može da se koristi za poluautomatsko ili potpuno automatsko upravljanje posmatranom broskom prevodnicom. Osim toga, može biti korišćen i kao podrška u odlučivanju prilikom upravljanja ili kao poligon za obuku novih operatera.

## **5. KONSTRUKCIJA EKSPERTSKOG SISTEMA I OPTIMIZACIJA PARAMETARA**

Početni parametri ulaznih funkcija pripadnosti (Sl. 5.1 i Sl. 5.2) i tabela pravila (tabela 5-1) su izabrani na osnovu subjektivnih opisa operatera, sa obzirom da princip funkcionisanja fazi zaključivanja oponaša ljudski način razmišljanja. Međutim, postavlja se pitanje, da li su tako dobijeni fazi skupovi najbolji mogući izbor za uspešno upravljanje brodskom prevodnicom, pogotovo u situacijama gušćeg saobraćaja? Može li kompjuter da nađe bolju upravljačku strategiju nego što je nalazi ljudski um? Da li možemo sa nekim promenama u funkcijama pripadnosti da poboljšamo dobijene rezultate? Optimizacija funkcija pripadnosti je u ovom istraživanju rađena da bi se našli odgovori na ova pitanja.

### **5.1. Kriterijum optimalnosti**

Kao što je ranije rečeno, upravljanje brodskom prevodnicom podrazumeva balansiranje između suprotnih interesa broдача i prevodničara. Na osnovu ova dva interesa, moguće je konstruisati dva suprotstavljena kriterijuma za procenu kvaliteta upravljanja prevodnicom [10]:

1. Minimalno vreme čekanja (MVČ) i
2. Minimalan broj prevođenja (MBP).

Osnovni interes broдача je da se prevođenje obavi što pre, odnosno da potroše što manje vremena u zoni prevodnice, čekajući da dođe njihov red na prevođenje. Najpogodnija situacija bi bila kada bi prevođenje počelo momentalno po dolasku plovila. Prvi kriterijum (MVČ) upravo oslikava ovaj cilj, dok MBP predstavlja interese vlasnika i radnika na prevodnici. Što se njih tiče, svaka promena nivoa vode u komori u odsustvu plovila predstavlja nepotrebnu potrošnju energije (za rad postrojenja) i vode (da se napuni komora). Osnovni cilj preduzeća (prevodnice) jeste maksimizacija profita, ali ne i na uštrb brodovlasnika.

Uz pomoć predloženog fazi ekspertskog sistema (FES-a) pokušao je da se nađe kompromis, odnosno efikasnost negde između ova dva ekstremna kriterijuma. Umesto da se upravljački algoritam koncentriše na jednu od dve gore navedene ekstremne varijacije funkcionisanja prevodnice, u ovoj disertaciji se traga za kompromisom iliti boljom strategijom između minimizovanja broja prevođenja i minimizovanja vremena čekanja. Pošto je FES dizajniran po sugestijama eksperata, pretpostavlja se da bi performanse FES-a u prevođenju plovila bile slične performansama iskusnijeg operatera, što i jeste bio slučaj u početnim testiranjima. Kasnije, kada su analizirane akcije FES-a u simulacijama, uočeni su neki nedostaci ovakvog pristupa. Najveći broj prevođenja u test slučajevima je rezultirao aktivacijom samo dva od devet definisanih fazi pravila. Pošto ovo nije bila slučajnost već se dešavalo u većini slučajeva, razmotrena su dodatna prilagođavanja u okviru upravljačke logike. Osnovna ideja je da se parametri funkcija pripadnosti fino podese (optimizuju) da zadovolje određeni kriterijum. Ako smo u mogućnosti da definišemo jedan sveukupni kriterijum za ocenu upravljanja brodskom prevodnicom, onda možemo i da optimizujemo FES da bi dobili optimalne performanse po tom kriterijumu. Pošto razmatramo dva cilja, ovom problemu moramo pristupiti kao više-kriterijumskom problemu (engl. Multi-objective optimization) [107, 108], odnosno kao metodu donošenja odluka na osnovu više kriterijuma [109].

U cilju poređenja funkcionisanja različitih FES-ova, neophodno je formiranje univerzalne procene kvaliteta upravljanja, odnosno univerzalnog kriterijuma optimalnosti. U predstavljenom slučaju kriterijum koji bi obuhvatio oba ranije navedena ekstremna kriterijuma (MVC i MBP) može se posmatrati kao „ekonomski“ kriterijum. Reč ekonomski je izabrana bez pretenzija na bilo kakve ekonomske faktore ili stvarne cene. Međutim, zgodna je jer u suštini oba dela kriterijuma ako nisu zadovoljena nekog nešto koštaju. Ako se sprovede više prevođenja na prazno vlasnik prevodnice će to platiti kroz račun za struju, kroz održavanje opreme, itd. Ako plovila duže čekaju imaće veća kašnjenja u transportu što na kraju krajeva neko mora da plati (vreme je novac).

Kriterijum optimalnosti u ovom istraživanju je formiran kao težinski ponderisana suma broja prevođenja na prazno (BPnP) i srednjeg vremena čekanja (SVČ) po plovilu. Matematički oblik kriterijuma optimalnosti je prikazan u jednačini (5.1):

$$E = A * BPnP + B * SVČ \quad (5.1)$$

, gde su:

$E$  – kriterijum optimalnosti;

$BPnP$  – ukupan broj prevođenja na prazno u posmatranom vremenskom intervalu;

$SVČ$  – srednje vreme čekanja po plovilu u minutima u posmatranom vremenskom intervalu;

$A, B$  – težinski koeficijenti.

Koeficijenti  $A$  i  $B$  su težinski faktori za kriterijum optimalnosti. Koriste se da bi se dala veća ili manja važnost svakoj od dve komponente ekonomskog kriterijuma. Oni odlučuju o tome šta je skuplje, zadržavanje plovila ili potrošnja vode i energije. Menjajući njihove vrednosti (time i odnos između njih) moguće je odabrati šta je „skuplje“, zadržavanje plovila ili rasipanje vode i energije. Ovim je ostavljena mogućnost menjanja kriterijuma optimalnosti od primene do primene, jer je u praksi često teško oceniti koliko košta kašnjenje plovila. U ovom istraživanju je testirano nekoliko varijanti. Inicijalne vrednosti ovih koeficijenata su  $A = B = 1$ ; kasnije su razmatrane vrednosti koje favorizuju jednu ili drugu stranu.

Ako su parametri  $A$  i  $B$  međusobno jednaki to znači da su  $BPnP$  i  $SVČ$  „približno jednake“ važnosti. U brojkama, to znači da jedno prevođenje na prazno godišnje „približno jednako“ košta kao i jedan minut prosečnog vremena zadržavanja plovila. U praksi, svaki put kada operater želi da promeni strategiju (bez obzira koji je razlog), on bi menjao odnos između ova dva parametra a samim tim bi dao i više značaja jednom od dva suprotstavljena kriterijuma. Nakon svake promene u vrednostima ovih parametara proces optimizacije mora biti sproveden iz početka da bi se dobili novi parametri funkcija pripadnosti kao rezultat novog kriterijuma optimalnosti. Tada operater može da prihvati novo dobijene parametre ekspertskog sistema da bi sa njima postigao željenu operativnu strategiju.

## 5.2. Konstrukcija fazi ekspertskog sistema

Prilikom formiranja modela za upravljanje radom brodske prevodnice izabrana je jedna od novih brodskih prevodnica na hidrosistemu Dunav-Tisa-Dunav (brodska prevodnica "Kucura") kao realni sistem. Ova brodska prevodnica predstavlja jednokanalni sistem masovnog opsluživanja sa dva nezavisna stohastička toka zahteva (zahtevi plovila za

prevođenjem) koji se javljaju iz suprotnih smerova, odnosno sa različitim nivoa vodnog ogledala. U prethodnom poglavlju detaljno je analiziran i opisan tehnološki proces rada ovog sistema.

Pri upravljanju brodskom prevodnicom datog tipa osnovni problem predstavlja postizanje kompromisa između smanjenja troškova rada brodske prevodnice i potrošnje vode i interesa brodarica za ostvarivanje što kraćih zadržavanja tokom transportnog procesa (smanjenje vremena tehničkih operacija u putu). Na primer, prilikom više uzastopnih dolazaka plovila sa istog nivoa, potrebno je vršiti promenu nivoa u praznoj komori brodske prevodnice, što skraćuje zadržavanja plovila a povećava troškove rada brodske prevodnice.

Upravljanje procesom rada brodske prevodnice vrši rukovaoc brodske prevodnice ("prevodničar") na osnovu subjektivnih procena, sa ciljem da bude što manje promena nivoa bez plovila u komori, a da pri tom ispuni obavezu prema brodarima da vreme čekanja plovila na prevođenje bude u prihvatljivim granicama. Subjektivne procene rukovaoca, stečene dugogodišnjim iskustvom, su kvalitativne i opisne, i mogu se predstaviti kao fazi skupovi, na osnovu kojih se formiraju fazi logička pravila kojim se opisuje upravljanje tehnološkim procesom prevođenja plovila.

U postupku kreiranja fazi ekspertskog sistema (FES) najveći akcent je stavljen na intervjuisanje operatera koji upravljaju brodskom prevodnicom. Njihove subjektivne, opisne i kvalitativne procene zasnovane na dugogodišnjem iskustvu su preformulisane u duhu fazi zaključivanja. Na osnovu anketiranja rukovalaca brodske prevodnice prikupljeni su polazni podaci za konstruisanje fazi upravljačkog sistema.

Proces konstruisanja fazi ekspertskog sistema za operativno upravljanje procesom prevođenja plovila je podeljen u nekoliko koraka.

### 5.2.1. Definisanje ulaznih i izlaznih varijabli

Prvi korak konstruisanja fazi ekspertskog sistema predstavlja definisanje ulaznih i upravljačkih promenljivih veličina za određena stanja procesa kojim se upravlja i određivanje koje upravljačke akcije će biti primenjene u određenim stanjima procesa. Za vreme rada brodske prevodnice javljaju se dva nezavisna stohastička toka zahteva iz suprotnih smerova. Takođe je bitno navesti i da za vreme rada brodske prevodnice može biti otvorena najviše jedna kapija. Na strani gde je otvorena kapija nivo vode u komori brodske prevodnice jednak je nivou vode u kanalu sa te strane. U slučaju kada brodska prevodnica radi, tj. menja se nivo vode u komori obe kapije su zatvorene. Kod donošenja odluka pri upravljanju radom brodske prevodnice koristi se nekoliko promenljivih. Prva predstavlja trenutno stanje brodske prevodnice i opisuje da li je otvorena gornja ili donja kapija. Druge dve promenljive predstavljaju udaljenost plovila od brodske prevodnice sa strane gde je otvorena kapija i sa strane gde je zatvorena kapija.

Na osnovu trenutnog stanja brodske prevodnice (da li je otvorena kapija sa gornje ili donje strane) operater mora uzeti u obzir dve veličine prilikom donošenja odluke u toku upravljanja procesom prevođenja plovila:

- rastojanje najbližeg plovila od prevodnice sa strane gde je otvorena kapija (*ROK*) i
- rastojanje najbližeg plovila od prevodnice sa strane gde je zatvorena kapija (*RZK*).

Operater tada odlučuje da li treba promeniti trenutno stanje prevodnice ili ne na osnovu ove dve udaljenosti. Njegova odluka se takođe zasniva i na trenutnom stanju brodske prevodnice, odnosno koja kapija je otvorena iliti sa kog nivoa plovila imaju slobodan ulaz. Ove

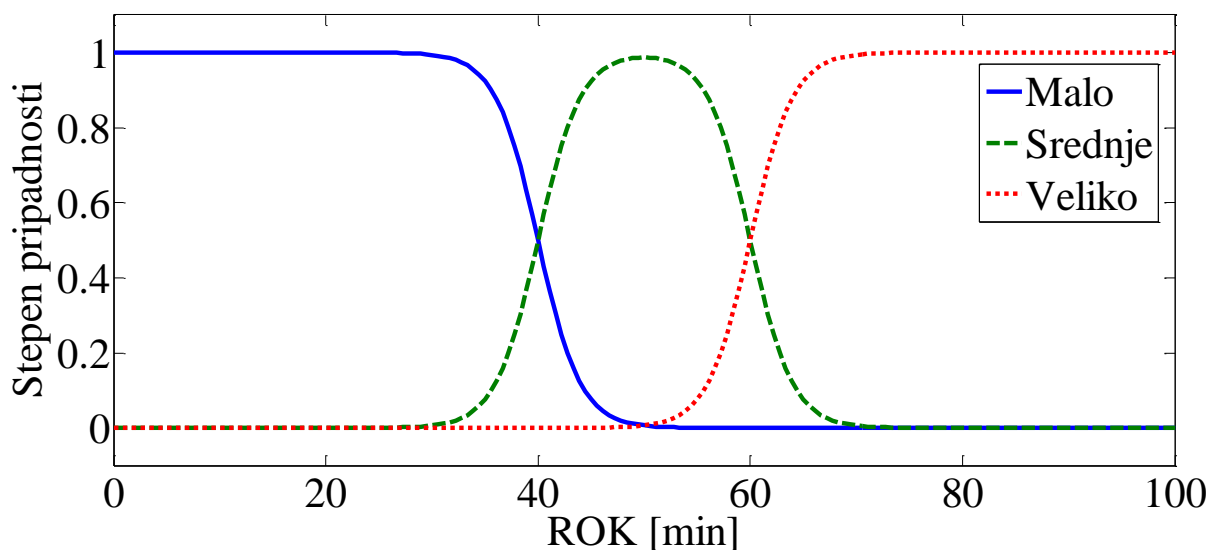
dve veličine su uzete u obzir pri izboru ulaznih promenljivih za FES. Prevodničar donosi odluke na osnovu subjektivnih procena udaljenosti plovila od prevodnice. Rastojanje između plovila koje se kreće i prevodnice se ne može precizno odrediti. S tim u vezi, uska zona u neposrednoj okolini plovila se može smatrati kao domen plovila [97, 110]. Dakle, izbor fazi skupova za opis rastojanja plovila kroz ulazne fazi varijable je u skladu sa istraživanjima koja definišu domen plovila kao fazi vrednost [111].

### 5.2.2. Fazifikacija i funkcije pripadnosti

Pri upravljanju radom brodske prevodnice odabrane su tri subjektivno procenjene kategorije vezane za rastojanje plovila od brodske prevodnice: „Malo“, „Srednje“ i „Veliko“ [10]. Ove tri kategorije su iskorišćene za definisanje fazi skupova za dve ulazne promenljive. Na Sl. 5.1 i Sl. 5.2 prikazane su kreirane funkcije pripadnosti za ova tri fazi skupa za dve ulazne promenljive *ROK* i *RZK*, respektivno.

Sa slika se može videti da su za funkcije pripadnosti odabrane funkcije Gausovog tipa (sigmoide). Parametri su odabrani tako da se funkcije pripadnosti preklapaju u vrednostima koje su početno postavljene na osnovu iskustva operatera.

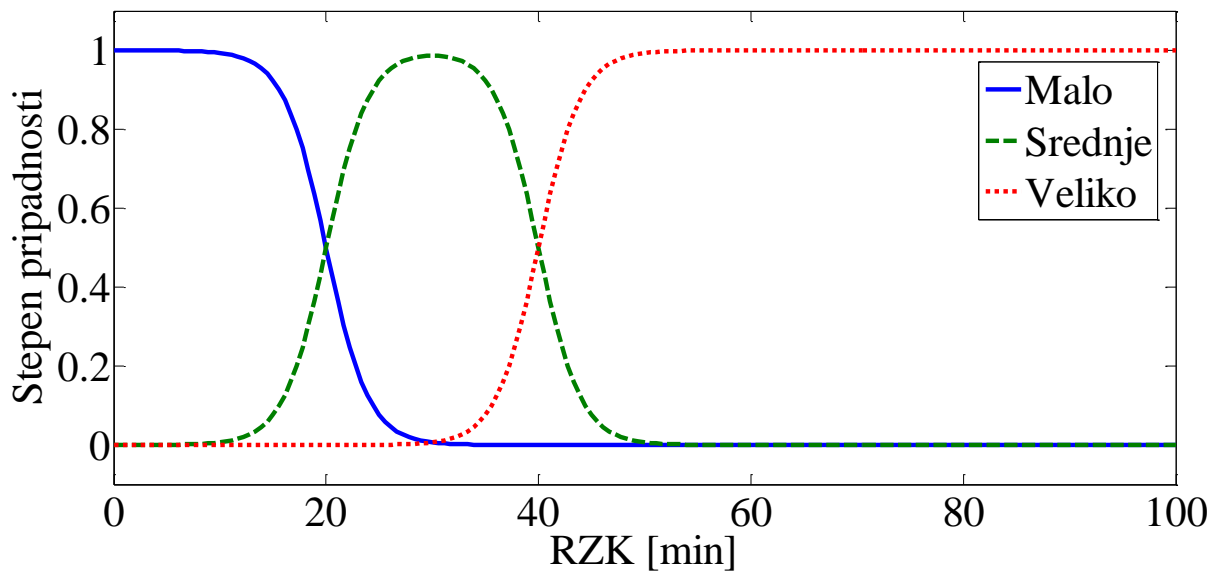
Odluka operatera je da li treba menjati stanje prevodnice ili ne pa su na osnovu toga kreirane tri subjektivne kategorije „Promeni“, „Ne menjaj“ i „Neodređen“. FES po prirodi ima jednu izlaznu promenljivu „promena stanja prevodnice“ (*PSP*) koja je kreirana na osnovu ove tri kategorije (Sl. 5.3).



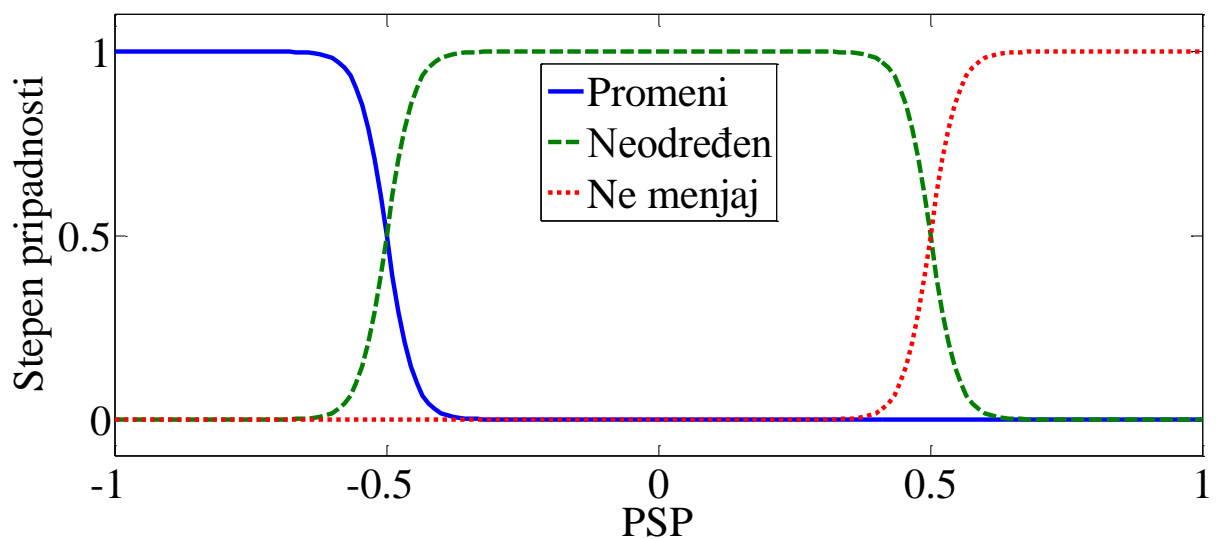
Sl. 5.1 Funkcije pripadnosti ulazne promenljive *ROK* (rastojanje sa strane otvorene kapije)

Rastojanja plovila od prevodnice na ulaznim promenljivama (Sl. 5.1 i Sl. 5.2) su izražena u minutima koje su potrebne plovilu da dođe do prevodnice. Ove mere se mogu izračunati na osnovu informacija dobijenih od rečnog informacionog servisa (na osnovu udaljenosti i brzine plovila) [10] ili se mogu predvideti [34]. Osim toga, za primenu u FES-u pogodnije je koristiti vremenski interval na ulazu nego fizičku udaljenost. Odabran je vremenski interval od 0 do 100 minuta jer je procenjeno da plovila koja će pristići do brodske prevodnice za više od 100 minuta ne utiču značajno na odluku da li trenutno stanje prevodnice treba menjati. Izlazna veličina posle defazifikacije je izražena u univerzalnim jedinicama. Ova univerzalna vrednost iz

intervala  $[-1,1]$  se poredi sa graničnom vrednošću (u ovoj disertaciji fiksiranoj na nulu) i kao rezultat poređenja daje binarnu odluku („promeni“ ili „ne menjaj“).



Sl. 5.2 Funkcije pripadnosti ulazne promenljive RZK (rastojanje sa strane zatvorene kapije)



Sl. 5.3 Funkcije pripadnosti izlazne promenljive PSP (promena stanja prevodnice)

Uz pomoć fazifikacije, subjektivne procene operatera brodske prevodnice, kao promenljive veličine stanja sistema, su određene kao fazi skupovi. Za funkcije pripadnosti u ulaznim i izlaznim fazi skupovima odabrane su kontinualne funkcije opisane logističkom krivom (odnosno S-krivom ili sigmoidom), kao dokazano najkvalitetnijem preslikavanju kada se žele postići „glatki“ prelazi [11, 41, 84, 79]. Važna osobina sigmoide je da je diferencijabilna u svakoj tački na celom opsegu i na taj način je odnos između stepena pripadnosti i posmatranih veličina dobro definisan, po pretpostavci da plovilo i njegov domen nisu jedna tačka, već površina. Promene stepena pripadnosti određenom skupu na osnovu realnih zapažanja u ovom slučaju mnogo su bolje prikazane ako se koriste krive (sigmoide) umesto pravih linija (kao na primer kod trapeza). Osnovna Gausova funkcija pripadnosti od dva parametra  $\sigma$  i  $c$  i opisana je



jednačinom (4.13) i prikazana na Sl. 4.4. Ovakva funkcija pripadnosti pored svih dobrih osobina o kojima je bilo reč ima i jednu manu. Ima maksimum uvek u jednoj tački i stepen pripadnosti opada simetrično za vrednosti lavo i desno od te tačke. Za potrebe razvoja ekspertskog sistema predloženog u ovoj disertaciji odabrana je izmenjena verzija Gausove funkcije pripadnosti koja se u stvari sastoji od dve osnovne Gausove funkcije pripadnosti od kojih je uzeta leva polovina od jedne i desna od druge. Na taj način je omogućeno nezavisno zadavanje nagiba funkcije pripadnosti i prevojne tačke za levu i desnu stranu funkcije pripadnosti. Logistička kriva koja opisuje ovu izmenjenu Gausovu funkciju pripadnosti kombinacije od dva parametra  $\sigma$  i  $c$ . Prva funkcija, specificirana sa  $\sigma_1$  i  $c_1$  definiše oblik levog dela krive. Druga funkcija, specificirana sa  $\sigma_2$  i  $c_2$  definiše oblik desnog dela krive.

Parametri funkcija pripadnosti su izabrani tako da najviše odgovaraju deskriptivnim objašnjenjima operatera. Na primer, parametri funkcije pripadnosti fazi skupu „Veliko“ prve ulazne varijable ROK su odabrani tako da sva plovila koja stižu do prevodnice sa strane otvorene kapije za vreme kraće od 50 minuta uopšte ne pripadaju tom fazi skupu, da plovila koja stižu između 50 i 60 minuta više pripadaju fazi skupu „Srednje“ nego fazi skupu „Veliko“, plovila koja stižu između 60 i 70 minuta više pripadaju skupu „Veliko“ nego „Srednje“, dok plovila koja stižu do prevodnice za vreme veće od 70 minuta pripadaju samo fazi skupu „Veliko“ (vidi Sl. 5.1).

### 5.2.3. Kreiranje upravljačkih pravila (razvoj algoritma fazi zaključivanja)

Nakon što su osmišljene i kreirane funkcije pripadnosti ulaznih i izlaznih fazi varijabli, dolazi korak konstruisanja fazi verbalnih pravila. Ovo podrazumeva da se definiše koja će se pravila primenjivati i pod kojim uslovima [79]. Postoji više načina za definisanje fazi pravila. Najčešći tip su pravila I (engl. AND) tipa. U potpuno definisanom fazi sistemu zaključivanja I tipa pravilima se pokrivaju sve moguće situacije. U našem slučaju imamo dve ulazne promenljive sa po tri fazi skupa pripadnosti. Dakle, da bi pokrili sve moguće situacije, potrebno nam je  $3 \times 3 = 9$  fazi pravila. Svako pravilo u procesu fazi rasuđivanja je fazi relacija i može biti prezentovano lingvistički. Treba napomenuti da fazi pravila koja su kreirana u ovoj disertaciji nisu bila deo problema optimizacije koja je kasnije sprovedena. Tabela 5-1 prikazuje ovih 9 fazi pravila [10]. Prvo pravilo po tabeli 5-1, na primer, glasi:

AKO JE rastojanje plovila od brodske prevodnice sa strane otvorene kapije – **Malo**  
 I AKO JE rastojanje plovila od brodske prevodnice sa strane zatvorene kapije – **Malo**  
 TADA JE promena stanja prevodnice – **Ne menjaj**.

Tabela 5-1 Fazi pravila

ROK	RZK		
	Malo	Srednje	Veliko
Malo	Ne menjaj	Ne menjaj	Ne menjaj
Srednje	Neodređen	Ne menjaj	Ne menjaj
Veliko	Promeni	Neodređen	Ne menjaj

#### 5.2.4. Defazifikacija

Rezultat algoritma fazi zaključivanja su fazi skupovi sa određenim stepenom pripadnosti izlaznoj fazi upravljačkoj varijabli „*Promena stanja prevodnice*“. Da bi dobili preciznu odluku (stvaranje upravljačke akcije) neophodno je odabrati jednu vrednost upravljačke varijable.

Fazi mehanizam zaključivanja je proces koji se sastoji od tri faze: implikacija, agregacija i defazifikacija [80, 82, 86]. Izbor metoda kojima će biti implementirane ove tri faze može da ima značajan uticaj na dobijene rezultate i brzinu algoritma. U većini praktičnih implementacija fazi sistema brzina izvršavanja algoritma igra veoma značajnu ulogu. Zato je i većina takvih aplikacija zasnovana na Takagi-Sugeno tipu [82, 49, 34] fazi zaključivanja. Međutim, u našem slučaju, proces prevođenja plovila kroz prevodnicu je po prirodi veoma spor, pa brzina izvršavanja algoritma nije toliko važna. To je osnovni razlog zašto je u ovoj primeni korišćen osnovni Mamdani tip FES-a. To podrazumeva sledeće metode:

- I metod: minimizacija
- implikacija: minimizacija
- agregacija: maksimizacija
- defazifikacija: centar mase

Ova kombinacija metoda je prilično uobičajena u inženjerskim aplikacijama gde brzina ne igra veliku ulogu [86]. Ipak i druge kombinacije metoda su uzete u obzir prilikom istraživanja da bi se videlo da li neka kombinacija daje bolje rezultate. Ovo mini istraživanje je pokrilo 19 eksperimenata sa test podskupom i različitim metodama za pomenute faze. Rezultati ovih eksperimenata su prikazani u narednom poglavlju. Predstavljena kombinacija je dala najbolje rezultate u svim test slučajevima.

Metod minimuma odabran za implikaciju podrazumeva da za svako pravilo stepen pripadnosti izlaznom fazi skupu će biti manja vrednost od dva stepena pripadnosti ulaznim fazi skupovima. Na primeru prvog pravila postupak implikacije je predstavljen sledećom formulom:

$$\mu_{NeMenja_j}(ROK, RZK) = \min\{\mu_{Malo}(ROK), \mu_{Malo}(RZK)\} \quad (5.2)$$

Sistem predstavljen u ovoj disertaciji ima 9 pravila i zahteva agregaciju, odnosno akumulaciju, tih pravila u jedan izlazni fazi skup. Agregacija pravila je proces dobijanja sveukupne posledice (konsekvence) od individualnih konsekvenci dobijenih svakim pojedinačnim pravilom iz baze pravila metodom implikacije. Metod maksimuma odabran za fazu agregacije podrazumeva formiranje izlazne funkcije pripadnosti na takav način da se za svaku vrednost izlazne promenljive stepen pripadnosti računa kao najveća (maksimalna) vrednost svih stepena pripadnosti (za svih 9 pravila) u funkcijama pripadnosti dobijenim metodom implikacije za tu vrednost izlazne promenljive i za svako  $x$  iz izlaznog domena može se opisati sledećom formulom:

$$\mu_{out}(x) = \max\{\mu_1(x), \mu_2(x), \dots, \mu_9(x)\} \quad (5.3)$$

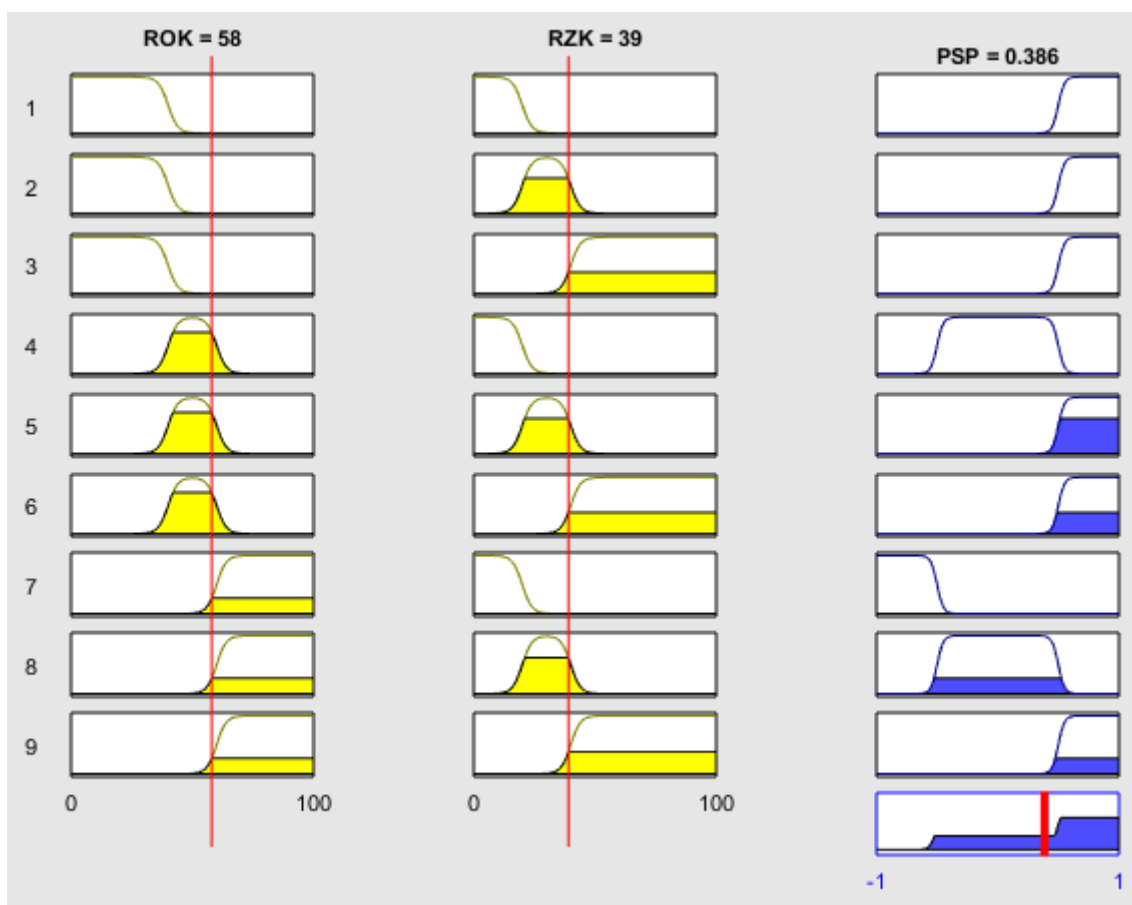
, gde su:

$\mu_{out}$  – stepen pripadnosti sveukupnoj izlaznoj funkciji pripadnosti;

$\mu_1, \dots, \mu_9$  – Stepeni pripadnosti dobijeni svakim od 9 fazi pravila.

Tehnika odabrana za tip defazifikacije je centar mase (površine), takođe poznata kao i centar gravitacije. Ona se koristi za određivanje upravljačke akcije, vrednosti koja odgovara centru gravitacije izlaznog fazi skupa odluke, u svrhu dobijanja ne-fazi upravljačke akcije.

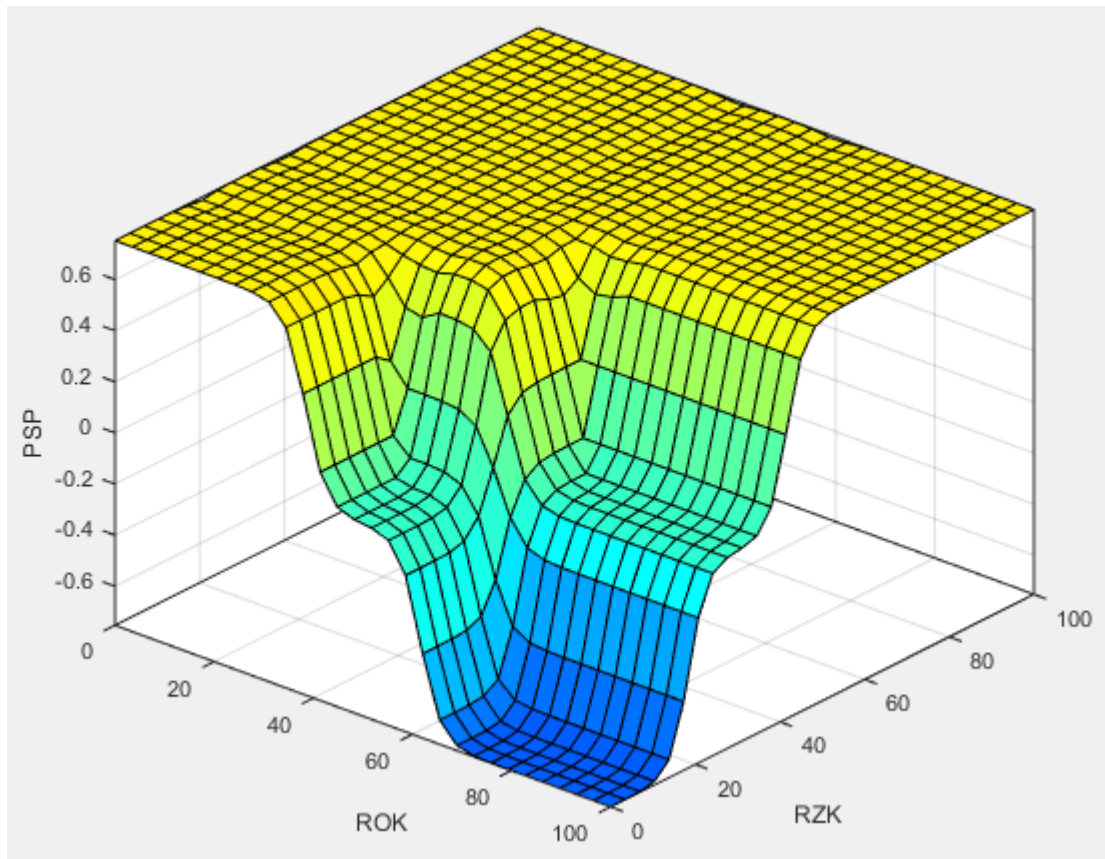
Na Sl. 5.4 grafički je prikazan mehanizam aproksimativnog zaključivanja i fazi odlučivanja za konstruisani fazi ekspertski sistem. Izlazna vrednost (desna kolona) se određuje na osnovu dve ulazne vrednosti (leva i srednja kolona). Prvih 9 vrsta predstavljaju grafički prikaz pravila definisanih tabelom 5-1. Deseta vrsta prikazuje formiranje akumuliranog fazi skupa dobijenog agregacijom.



Sl. 5.4 Grafički prikaz fazi mehanizma odlučivanja

Sa Sl. 5.4 se može videti primer izračunavanja izlaza fazi mehanizma odlučivanja za date ulazne vrednosti. Vidi se da u slučaju da prvo plovilo koje prilazi prevodnici sa strane otvorene kapije stiže za 58 minuta, a prvo plovilo koje prilazi prevodnici sa strane zatvorene kapije stiže za 39 minuta u predloženom fazi mehanizmu odlučivanja se aktiviraju pravila pod rednim brojevima 5, 6, 8 i 9 što rezultira odgovarajućim izlaznim fazi skupovima koji će biti akumulirani (plavo na slici). Kada se na akumulirani fazi skup primeni metod defazifikacije vidi se da se dobije izlazna nefazi vrednosti 0,386 koja pošto je veća od praga ( $0,386 > 0$ ) generiše preporuku da trenutno stanje prevodnice nije potrebno menjati.

Ako bi na osnovu ovog mehanizma zaključivanja izračunali izlaznu vrednost za veliki opseg ulaznih vrednosti mogli bi vizuelno da prikazemo upravljačku površ fazi sistema (Sl. 5.5).



Sl. 5.5 Upravljačka površ fazi ekspertskog sistema

Verifikacija modela vršena je anketiranjem, u vidu razgovora, rukovalaca brodske prevodnice "Kucura" na hidrosistemu Dunav-Tisa-Dunav. Pretpostavljene su različite udaljenosti plovila od brodske prevodnice, na oba nivoa pri različitim stanjima brodske prevodnice, a operateri su, na osnovu iznetih pretpostavki, iskazivali koje bi odluke donosili u pojedinim situacijama.

#### 5.2.5. Izbor metoda fazi odlučivanja

Ranije u ovom poglavlju je bilo reči o različitim metodama koje se mogu koristiti u različitim fazama mehanizma aproksimativnog zaključivanja. Prvobitni fazi sistem odlučivanja je kreiran sa metodom minimuma za fazu implikacije, metodom maksimuma za fazu agregacije i metodom centar mase za fazu defazifikacije i u skladu sa tim su kreirane funkcije pripadnosti i baza pravila. Ova kombinacija metoda predstavlja uobičajenu kombinaciju koja se koristi u većini praktičnih primera. Međutim, vršena su dodatna istraživanja drugih kombinacija metoda radi provere i eventualnog pronalaženja kombinacije koja daje bolje rezultate. Vršene su simulacije na istom test skupu dolazaka plovila za različite kombinacije pomenutih metoda i u tabeli 5-2 su prikazani merodavni rezultati (broj prevođenja na prazno i srednje prosečno vreme čekanja plovila na prevođenje u minutima). Žutom bojom su osenčene kombinacije metoda koje su dale najkraće srednje vreme čekanja, dok su sivom bojom osenčene kombinacije metoda koje su dale najmanji broj prevođenja na prazno. Takođe se iz dobijenih rezultata može videti da nijedna testirana kombinacija metoda nije dala kraće vreme čekanja od inicijalno odabrane kombinacije. Tri kombinacije su dale manji broj prevođenja na prazno ali na uštrb izuzetno

velikih vremena čekanja pa su zbog toga odbačene kao neprikladne. Na osnovu ovih rezultata odlučeno je da se inicijalna kombinacije metoda (prvi red u tabeli) zadrži kao najbolja kombinacija za dalja istraživanja.

Tabela 5-2 Ispitivanje kombinacija metoda fazi odlučivanja

Implikacija	Agregacija	Defazifikacija	Br. prevođenja na prazno	Prosečno vreme čekanja [min]
<b>Minimum</b>	<b>Maksimum</b>	<b>Centar mase</b>	<b>38</b>	<b>69.21</b>
Minimum	Maksimum	Bisekcija površi	38	77.59
Minimum	Maksimum	Sredina maksimuma	38	83.14
Minimum	Maksimum	Najveći maksimum	38	83.14
Minimum	Maksimum	Najmanji maksimum	31	788.95
<b>Minimum</b>	<b>Suma</b>	<b>Centar mase</b>	<b>38</b>	<b>69.21</b>
Minimum	Suma	Bisekcija površi	38	78.00
Minimum	Suma	Sredina maksimuma	31	788.95
Minimum	Suma	Najmanji maksimum	31	788.95
<b>Minimum</b>	<b>PROBOR</b>	<b>Centar mase</b>	<b>38</b>	<b>69.21</b>
<b>Proizvod</b>	<b>Maksimum</b>	<b>Centar mase</b>	<b>38</b>	<b>69.21</b>
Proizvod	Maksimum	Bisekcija površi	38	74.94
Proizvod	Maksimum	Sredina maksimuma	38	83.14
<b>Proizvod</b>	<b>Suma</b>	<b>Centar mase</b>	<b>38</b>	<b>69.21</b>
Proizvod	Suma	Bisekcija površi	38	78.00
<b>Proizvod</b>	<b>PROBOR</b>	<b>Centar mase</b>	<b>38</b>	<b>69.21</b>
Proizvod	PROBOR	Bisekcija površi	38	78.00
Proizvod	PROBOR	Sredina maksimuma	38	83.14
Proizvod	PROBOR	Najmanji maksimum	38	83.14

### 5.3. Izbor metoda optimizacije

Prilikom izbora metoda optimizacije mora se uzeti u obzir priroda sistema koji se optimizuje. Fazi ekspertski sistem predstavljen u poglavlju 5.2 je u suštini fazi sistem odlučivanja i kao takav je veoma komplikovan i opisan visoko nelinearnim i logičkim funkcijama. Izuzetno je teško razviti model ovakvog sistema koji bi bio opisan analitičkim izrazima. Čak i kada bi se mogao razviti precizan analitički model, problem optimizacije takvog sistema bi i dalje bio ne-konveksan problem optimizacije sa više lokalnih optimalnih rešenja. Iz ovih razloga, izbor metoda optimizacije se sveo na globalne numeričke algoritme optimizacije, koji pružaju detaljnu pretragu prostora rešenja i, kao što se pokazalo u sličnim primenama, pouzdanije rešenje od onog dobijenog nekim klasičnim analitičkim pristupom. Tri globalna algoritma optimizacije iz grupe evolucionih algoritama i algoritama zasnovanih na inteligenciji jata su odabrana za optimizaciju fazi ekspertskog sistema predloženog u okviru disertacije: genetski algoritam (GA); algoritam zasnovan na roju čestica (PSO, engl. Particle Swarm Optimization) i algoritam zasnovan na veštačkoj koloniji pčela (ABC, engl. Artificial Bee Colony). Ova tri algoritma predstavljaju tehnike optimizacije koje se veoma često koriste u inženjerskim aplikacijama.

### 5.3.1. Struktura jedinke (čestice)

Struktura jedinki (čestica) je takva da su kodirane sa 4 vrednosti (koordinata u prostoru rešenja). Te vrednosti su u stvari parametri koji jednoznačno određuju pozicije sigmoidnih funkcija pripadnosti skupova ulaznih promenljivih fazi ekspertskeg sistema (FES-a). Struktura jedinke je prikazana u tabeli 5-3:

Tabela 5-3 Struktura jedinke (čestice)

$X_{ROK}$	$Y_{ROK}$	$X_{RZK}$	$Y_{RZK}$
-----------	-----------	-----------	-----------

Prve dve promenljive,  $X_{ROK}$  i  $Y_{ROK}$ , određuju pozicije funkcija pripadnosti ulazne fazi promenljive ROK (rastojanje najbližeg plovila od prevodnice sa strane otvorene kapije). Druge dve promenljive,  $X_{RZK}$  i  $Y_{RZK}$ , određuju oblik i poziciju funkcija pripadnosti ulazne fazi promenljive RZK (rastojanje najbližeg plovila od prevodnice sa strane zatvorene kapije). Kao što je ranije prikazano na slikama Sl. 5.1 i Sl. 5.2, ulazne fazi promenljive ROK i RZK su definisane sa po tri sigmoidne funkcije. Svaki nagib se po pravilu definiše sa po dva parametra (intenzitet nagiba i njegova pozicija). Funkcija pripadnosti skupu „Srednje“ sadrži u svojoj definiciji dva nagiba, dok ostale dve funkcije pripadnosti („Malo“ i „Veliko“) su definisane sa samo jednim nagibom, sa obzirom da su granične funkcije. Tako da sve u svemu imamo 4 nagiba koja treba definisati sa  $4 \times 2 = 8$  parametara. U našem slučaju su intenziteti nagiba fiksirani na unapred zadate jednake vrednosti za sve ulazne fazi skupove, pa smo time smanjili broj parametara na 4 (pozicije nagiba, odnosno ukrštanja) po ulaznoj promenljivoj. Fazi skupovi su u našem slučaju definisani tako da se međusobno preklapaju i dopunjuju do potpune pripadnosti. Time je dovoljno da definišemo poziciju skupa „Srednje“ sa dva parametra i po automatizmu ta dva ista parametra će biti korišćeni i za pozicije ostalih skupova te ulazne promenljive, jer se njihove funkcije pripadnosti mogu posmatrati kao inverzne funkcije. Time smo dobili situaciju da sa dva promenljiva parametra možemo jednoznačno da odredimo poziciju i oblik sve tri funkcije pripadnosti jedne promenljive. Pošto u našem FES-u imamo dve ulazne promenljive sve njihove fazi skupove možemo da opišemo sa 4 parametra i to su promenljivi parametri koji su prikazani u tabeli 5-3.

Obično, kada se optimizuju fazi sistemi zaključivanja, uzimaju se u obzir i ulazne i izlazne varijable. U ovom istraživanju, optimizovani su samo parametri ulaznih funkcija pripadnosti jer se pokazalo da promene u izlaznoj varijabli ne utiču na konačnu odluku.

Parametri  $X_{ROK}$ ,  $Y_{ROK}$ ,  $X_{RZK}$  i  $Y_{RZK}$  koji predstavljaju strukturu jedinke su ograničeni u opsegu realnih brojeva  $[0, 100]$  što odgovara opsegu ulaznih fazi varijabli u minutima. Prilikom generisanja početne populacije (generacije, kolonije) oni su slučajno generisani na opsegu  $[10, 90]$  da bi se postigla centralizovana raspodela unutar prostora pretrage. Pravo značenje vrednosti 10 je to da svako rastojanje manje od 10 minuta bi više trebalo da pripada fazi skupu „Malo“ nego „Srednje“. Isto tako, značenje vrednosti 90 je da svako rastojanje veće od 90 minuta treba više da pripada fazi skupu „Veliko“ nego „Srednje“.

### 5.3.2. Veštački život i algoritmi optimizacije

Izraz veštački život (engl. Artificial life) koristi se da opiše istraživanja mnogih sistema koje su napravili ljudi a koji poseduju neke od ključnih osobina života.

Postoje dve glavne grane ovih istraživanja [45]:

1. Kako računarske tehnologije mogu da pomognu pri istraživanju bioloških fenomena?
2. Kako biološke tehnike mogu da pomognu pri rešavanju računarskih problema?

Druga grana istraživanja o veštačkom životu između ostalog pokriva i istraživanja vezana za globalne metode optimizacije kao što su evolutivne metode (GA) i metode bazirane na inteligenciji jata (PSO i ABC) koje spadaju u grupu istraživanja o veštačkoj (računarskoj) inteligenciji.

Jedna od prvih računarskih tehnika koja je bila inspirisana biološkim sistemima jesu veštačke neuronske mreže – pojednostavljen model ljudskog mozga.

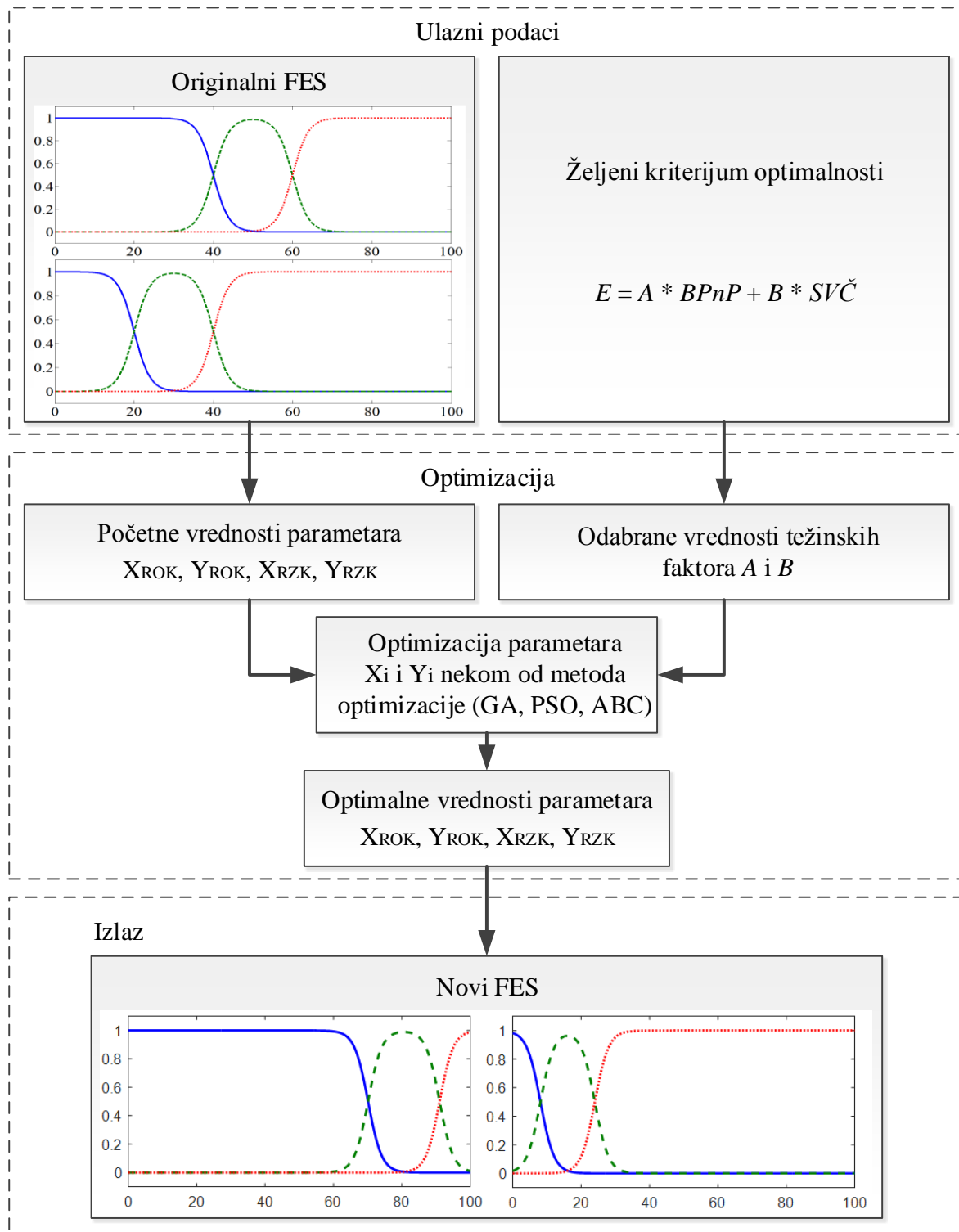
Prva metoda optimizacije koja bi se mogla svrstati u granu veštačkog života je definitivno genetski algoritam. GA je nastao 1970-tih godina [112] i osnovna ideja je bila da se oponaša Darwinova teorija evolucije, po kojoj najprilagođenije jedinke opstaju i razmnožavaju se. GA upravo oponaša ovaj proces kako bi u velikom broju generacija došao do najboljih jedinki koja u problemu optimizacije predstavljaju optimalna rešenja.

I u literaturi se najčešće mogu sresti genetski algoritmi kao metoda optimizacije koja se koristi za optimizaciju fazi sistema [113], ali je umesto toga kao prva ideja odabrana optimizacija zasnovana na roju čestica (engl. Particle Swarm Optimization - PSO), jer ona konvergira brže i mnogo lakše ka optimalnim vrednostima parametara funkcija pripadnosti. Osim toga, u toku izvršavanja GA nad kriterijumom sa više optimuma može doći do izvesnih komplikacija [114]. Genetski algoritmi su globalni algoritam optimizacije koji oponaša proces biološke evolucije da bi našao najbolje rešenje [115]. Za razliku od GA, PSO je stohastička optimizaciona tehnika koja se zasniva na populaciji i funkcioniše po principu inspirisanom socijalnim ponašanjem jata ptica ili riba [116, 115, 117]. Poređenje performansi PSO i GA algoritama je objavljeno u [117, 115]. Iako je PSO relativno novi algoritam optimizacije, neke njegove pod-varijante su se već pokazale kao veoma povoljne za više-kriterijumsku optimizaciju fazi sistema [115, 42].

U slučaju PSO u pitanju je sociološki sistem, tj. društveno ponašanje jednostavnih individua koje su u interakciji sa drugim individuama i sa okruženjem. Ovakvi sistemi se generalno nazivaju inteligencija jata (engl. Swarm intelligence). PSO tehnika je vrlo slična evolutivnim tehnikama kao što su na primer genetski algoritmi (GA). Za razliku od genetskih algoritama, PSO nema evolutivne operacije kao što su ukrštanje i mutacija. U PSO tehnici, potencijalna rešenja, nazvana čestice, kreću se kroz prostor problema prateći trenutno optimalne čestice. Za razliku od GA, PSO se lakše implementira i ima manje parametara za podešavanje. Simulacije PSO sistema modeluju nepredvidivu grupnu dinamiku i socijalno ponašanje [118], i uz pomoć takvog ponašanja pojedinaca dolaze do boljih rešenja u različitim primenama. Postoji nekoliko popularnih računarskih modela inteligencije jata: kolonija mrava (ACO, engl. Ant Colony Optimization) jata ptica ili riba (PSO, engl. Particle Swarm Optimization) rojevi pčela (ABC, engl. Artificial Bee Colony) i dr. ACO se uspešno koristi u rešavanju diskretnih optimizacionih problema. PSO je nastao iz simulacije pojednostavljenih socijalnih sistema. Prvobitna namena bila je da se grafički simulira koreografija ptičijeg ili ribljeg jata. Ubrzo je primećeno da PSO može veoma uspešno da se koristi za optimizaciju.

U slučaju veštačke kolonije pčela, algoritam pokušava da oponaša kretanje i komunikaciju u koloniji pčela prilikom pretrage livade u potrazi za hranom [16]. U računarskoj varijanti, livada je prostor rešenja a lokacija gde ima najviše hrane je najbolje (optimalno) rešenje.

Koja god metoda optimizacije da se koristi za optimizaciju parametara FES-a za upravljanje brodskom prevodnicom, procedura koja se primenjuje je ista. Prvo nam je potreban originalni FES sa početnim vrednostima parametara. Zatim nam treba odabrani kriterijum optimalnosti. Nakon toga se izvršava algoritam optimizacije koji kao rezultat vraća optimalne vrednosti parametara FES-a. Sl. 5.6 prikazuje korake u postupku optimizacije fazi ekspertskog sistema za upravljanje procesom prevođenja plovila.



Sl. 5.6 Šematski prikaz procedure optimizacije FES-a za upravljanje brodskom prevodnicom



Tri dobro poznate i popularne globalne tehnike optimizacije su korišćene u ovoj disertaciji kako bi se našle optimalne vrednosti parametara ekspertskog sistema: GA, PSO i ABC. Ovi algoritmi spadaju u grupu evolucionih algoritama i algoritama baziranim na „inteligenciji jata“. Kratak opis ovih algoritama je dat u nastavku.

#### **5.4. Genetski algoritam (GA)**

Genetski algoritam (GA) je evolucionarna tehnika optimizacije inspirisana Darwinovom teorijom prirodne evolucije vrsta. Prvi put je predložen 1970-tih od strane Džona Holanda [112] i menjan i poboljšavan tokom godina od strane brojnih drugih istraživača [119]. U ovoj tehnici, populacija kandidata za rešenja (zvanih individue ili jedinke) problema optimizacije evoluira ka boljim rešenjima. Svaki kandidat za rešenje poseduje skup osobina (hromozom ili genotip) koji tokom evolucije mutira i menja se.

Evolucija obično počinje populacijom slučajno generisanih jedinki i nastavlja kao iterativan proces. Populacija u svakoj iteraciji se zove generacija. Vrednost kriterijumske funkcije (funkcije prilagođenosti, engl. Fitness) svake jedinke u populaciji se procenjuje u svakoj generaciji. Najprilagođenije jedinke se selektuju iz trenutne populacije i genom svake jedinke se menja (rekombinacijom i eventualno nasumičnom mutacijom) da bi se na taj način formirala naredna generacija. Nova generacija kandidata za rešenja se tada koristi u sledećoj iteraciji algoritma. Prilikom formiranja nove populacije koriste se mehanizmi evolucije kao što su selekcija, ukrštanje i mutacija imitirajući time proces prirodne evolucije. Uobičajeno se algoritam završava kada je proizveden maksimalni broj generacija ili je dostignut zadovoljavajući nivo funkcije prilagođenosti (kriterijuma optimalnosti) unutar populacije.

S obzirom da se genetski algoritmi često koriste u mnogim oblastima primene, postoji veliki broj varijanti ovih metoda optimizacije objavljenih u literaturi, koje uvode različite mehanizme i tehnike za poboljšanje performansi procedure optimizacije. Kod genetskog algoritma je veoma važno odabrati način kodiranja genoma jedinke kako bi se ostalim mehanizmima dobila što efikasnija pretraga prostora rešenja. Pošto se GA koristi za rešavanje veoma širokog spektra optimizacionih problema, kodiranja mogu takođe biti veoma različita. Najčešće se koristi binarno kodiranje gde se jedinka, odnosno potencijalno rešenje, predstavlja nizom binarnih vrednosti (bita) ili kodiranje vektorom realnih vrednosti. S obzirom da je u našem problemu prostor pretrage realni prostor u četiri dimenzije odabrano je kodiranje vektorom realnih vrednosti. Veličina populacije igra veoma veliku ulogu. Neke od preporuka su da se koristi oko 50-ak jedinki za probleme sa 5 ili manje varijabli a oko 200 jedinki za probleme sa više varijabli. U našem slučaju je korišćeno 30 jedinki da bi algoritam mogao da se poredi sa PSO i ABC. U svakoj populaciji jedinke se rangiraju gde se rang, ili skaliranje prilagođenosti, računa na različite načine: redni broj (rang), proporcionalno, linearno, itd. Tipovi selekcije takođe utiču značajno na izvršavanje algoritma i najčešće se koriste: slučajna uniformna (stohastička univerzalna), rulet i turnirska selekcija. Elitizam je jedan veštački alat reprodukcije koji je u računarski algoritam dodat, iako ne postoji u prirodnoj evoluciji, kako bi najbolje jedinke preživljavale i direktno se prosleđivale u narednu generaciju. Obično se oko 5% populacije bira za elitne jedinke. Mutacija je mehanizam koji obezbeđuje slučajne nove gene u postojeću grupu hromozoma. Najčešće se koristi uniformna mutacija sa faktorom mutacije koji govori kolika je verovatnoća da će se desiti ili Gausova mutacija. Ukrštanje je mehanizam kojim se od dva roditelja dobijaju potomci za novu generaciju. Često se koriste ukrštanje u jednoj tački, ukrštanje u dve tačke, u više tačaka, uniformno ukrštanje, aritmetičko

ukrštanje i dr. Nelinearna ograničenja se najčešće rešavaju uvećanim Lagranžijanom ili penalima. Kriterijum zaustavljanja može biti maksimalan broj generacija (na primer 100 puta više od broja varijabli), vremensko ograničenje izvršavanja algoritma, dostignuta željena vrednost kriterijumske funkcije, sporo napredovanje populacije kroz zadati broj generacija ili drugi.

U ovom istraživanju primenjena je varijanta GA sa lineranim rangiranjem, stohastičkom univerzalnom selekcijom, uniformnom mutacijom i uniformnim ukrštanjem, sa vrednostima parametara koje su preporučene u literaturi [119].

## 5.5. Optimizacija zasnovana na roju čestica (PSO)

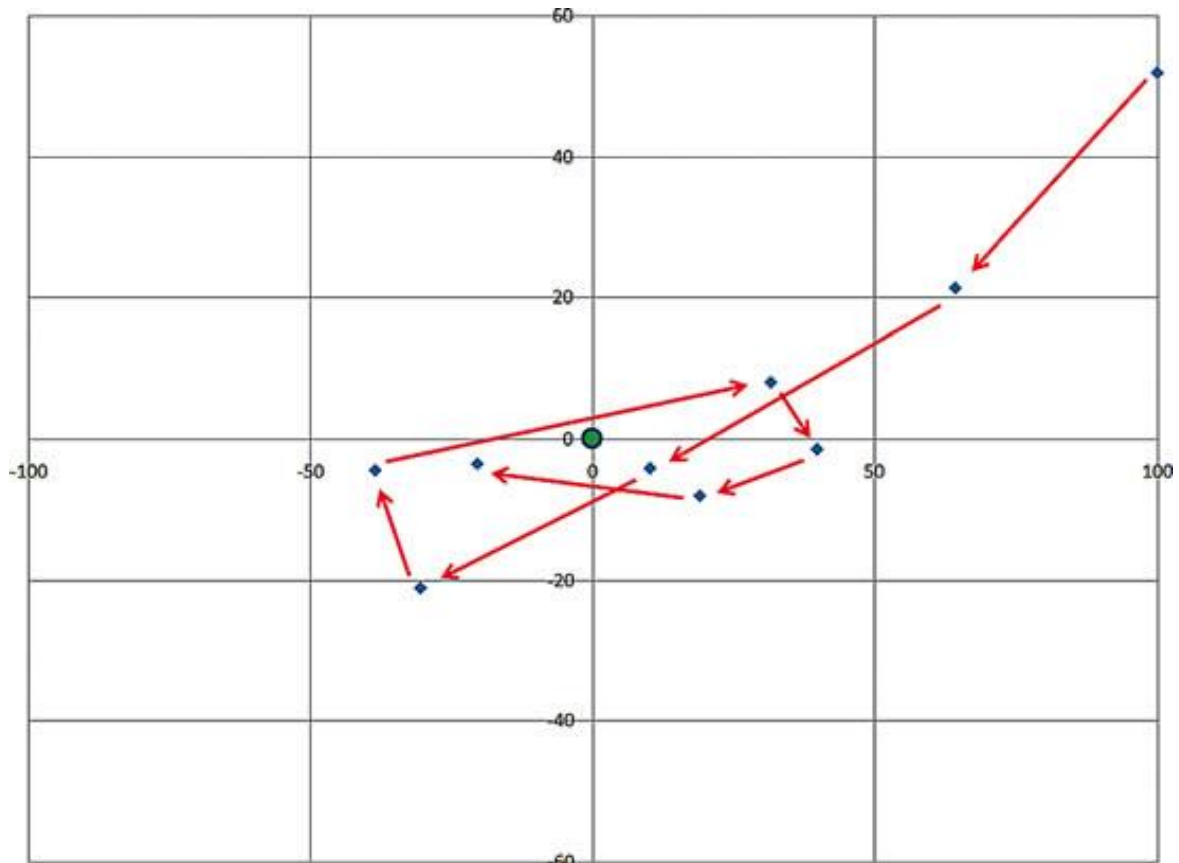
Algoritam optimizacije zasnovan na roju (jatu) čestica (PSO – engl. Particle Swarm Optimization) je stohastička optimizaciona tehnika bazirana na populaciji koju su razvili Dr. Russell Eberhart i Dr. James Kennedy [116]. Algoritam je inspirisan socijalnim ponašanjem životinja koje se kreću u velikim grupama (posebno ptica) [116, 120]. Jedna od osnovnih ideja je bila da se opiše sociološki sistem jednostavnih jedinki koje reaguju i komuniciraju sa drugim jedinkama i okruženjem. Sistem se inicijalizuje skupom čestica (populacijom slučajnih rešenja, odnosno kandidata za rešenja) koje se naziva jato. Jato pretražuje prostor rešenja i kroz iteracije se traži jedinka unutar populacije čija pozicija predstavlja optimalno rešenje [116].

Osnovna varijanta PSO algoritma optimizacije se zasniva na jatu (roju, grupi) čestica (partikula), bez zalaženja u paralelizam sa prirodnim grupama. Osnovna ideja je da se čestice (potencijalna rešenja) kreću kroz prostor problema sledeći trenutno najbolje čestice.

PSO se uspešno koristi za rešavanje različitih tipova problema: optimizacija funkcija [121], obuka veštačkih neuronskih mreža, fazi klasifikacioni problemi i drugi [39]. Jedna od prednosti PSO-a je ta što ne koristi diferencijale u traženju optimuma [122], ali nisu retke ni kombinacije PSO-a sa gradijentnim algoritmima [123] ili evolucijom diferencijala [124]. Ipak, PSO algoritam ne garantuje pronalaženje globalnog optimuma već u najboljem slučaju nalazi dobro lokalno rešenje. PSO je poželjni algoritam optimizacije kada su u pitanju više-kriterijumski problemi optimizacije [125] i često se koristi u kombinaciji sa fazi logikom [40].

Postoji više različitih mišljenja o tome na koji način PSO može da vrši optimizaciju. Uobičajeno mišljenje među istraživačima je da ponašanje jata varira između dva oblika [46]. Prvi oblik ponašanja je istraživačko ponašanje, tj. pretraživanje granica prostora u kojem se traže rešenja. Drugi oblik ponašanja je eksploatacijsko ponašanje koje predstavlja lokalno orijentisanu pretragu i kretanje ka optimalnom rešenju (kao što je prikazano na Sl. 5.7 na kojoj je ilustrovano kretanje jedne čestice), koje može biti globalnog ali i lokalnog karaktera. PSO algoritam i njegovi parametri moraju biti tako odabrani da su podjednako zastupljena oba oblika ponašanja, kako bi se izbegla prerana konvergencija ka nekom lokalnom optimumu, a u isto vreme da bi se zadržala mogućnost pronalaska globalnog optimuma i dobra brzina kretanja ka njemu.

Drugo mišljenje zastupa ideju da ponašanje PSO i jata nije dovoljno dobro poznato u smislu kako izbor algoritma i parametara utiče na performanse optimizacije, naročito u problemima koji se tiču višedimenzionalnih i/ili nekontinualnih prostora pretrage, zatim problemima koji su puni raznih smetnji i vremenski promenljivi. U ovom slučaju cilj je naći PSO algoritam i parametre koji postižu dobre performanse bez obzira na to kakvo je ponašanje jata, da li je istraživačko ili eksploatacijsko. Ovo mišljenje vodi ka kreiranju pojednostavljenih PSO algoritama.



Sl. 5.7 Kretanje čestice ka optimalnom rešenju - konvergencija

### 5.5.1. Konvergencija

U slučaju PSO reč konvergencija obično ima jedno od dva značenja, i često nije razjašnjeno koja definicija se koristi i zbog toga se često smatra da su identične.

1. Konvergencija može da se odnosi na približavanje (konvergenciju) jata najboljoj poznatoj poziciji (rešenju) bez obzira na ponašanje jata.
2. Konvergencija može da se odnosi na kolaps jata, u kojem sve čestice konvergiraju ka određenoj tački u prostoru pretrage koja može ali ne mora da bude optimum [46].

U literaturi postoji više matematičkih analiza PSO konvergencije [118]. Ove analize daju uputstva za odabir PSO parametara za koje se veruje da prouzrokuju konvergenciju, divergenciju ili oscilaciju čestica jata, i predlažu nekoliko različitih varijanti PSO algoritma.

### 5.5.2. Algoritam

PSO algoritam pripada širem skupu algoritama koji je dobio opšte prihvaćeno ime „inteligencija jata“ (engl. Swarm Intelligence). Postoji nekoliko varijanti ovih algoritama optimizacije uključujući insekte (pčele i mrave sa feromonima), zglavkare, pa čak i vodene kapi, itd. Simulacije ovakvih sistema su u stanju da modeluju relativno nepredvidivu dinamiku grupe i socijalna ponašanja [118], a takva ponašanja mogu voditi do boljih rešenja. Takođe, postoji i nekoliko pod-varijanti PSO algoritma. Na primer, postoje brojni različiti načini za inicijalizaciju čestica i brzina (npr. početak sa nultom brzinom čestice umesto neke vrednosti),

kako da se menja brzina u toku računanja, na koji način da se biraju koeficijenti za posebne iteracije i za posebne dimenzije (umesto da se koriste konstantne vrednosti tokom optimizacije), izbor vremena kada će se vršiti ažuriranje, korišćenje podskupa jata (okolina, komšiluk) itd. [116].

Konstantno se stvaraju novi i prefinjeniji PSO algoritmi u pokušaju da se poboljšaju performanse optimizacije. Postoje određeni trendovi u istraživanju koji se bave kreiranjem hibridnih optimizacionih metoda u kojima se PSO kombinuje sa drugim metodima, ili PSO algoritama u kojima se vrši adaptacija parametara ponašanja jata za vreme optimizacije.

Kao što je već rečeno PSO simulira na primer ponašanje jata ptica. Ako imamo sledeći scenario: jato ptica traga za hranom u određenom području, tako što svaka jedinka traga na slučajan način, tj. ima neku slučajnu poziciju i kreće se u slučajnom pravcu. Postoji samo jedno parče hrane u tom području. Sve ptice ne znaju gde je hrana, ali znaju koliko je udaljena tokom vremena. U tom slučaju najbolja strategija za pronalaženje hrane bi bila praćenje ptice koja je najbliža toj hrani.

PSO se zasniva na ovakvom scenariju i koristi se za rešavanje optimizacionih problema. Svako rešenje predstavljeno je jednom „pticom“ u prostoru rešenja. Ove „ptice“ se u opštom smislu nazivaju čestice (engl. Particles) [126]. Sve čestice imaju određene vrednosti koje se računaju pomoću funkcije prilagođenosti (kriterijuma) i imaju težine koje određuju smer i brzinu kretanja čestica. Čestice se kreću kroz prostor rešenja prateći trenutno optimalne čestice (rešenja) [127]. Teorijski, sve čestice bi posle beskonačnog broja iteracija trebalo da se skupe oko jedne čestice, tj. optimalnog rešenja [128].

Postoji nekoliko varijacija osnovnog PSO algoritma koje su predložili različiti autori. Na primer u [129] je predložen „ko-evolucionni“ PSO sa Gausovom raspodelom koeficijenata ubrzanja. Varijantu PSO algoritma izabranu za primenu u ovom istraživanju su prvi put predložili Rapaić i Kanović 2009. godine [130] i generalizovali je kasnije u [18] i [131]. Nadalje u radu kada bude korišćena skraćenica PSO misliće se na ovu varijantu PSO algoritma.

PSO se inicijalizuje skupom slučajno generisanih rešenja (roj čestica) u dozvoljenim granicama. Trenutna pozicija čestice u prostoru rešenja predstavlja jedno rešenje. Svaka čestica u roju (populaciji) je u svakom trenutku predstavljena svojom pozicijom ( $x$  u jednačinama (5.4) i (5.5)) i brzinom ( $v$  u jednačinama (5.4) i (5.5)). Pozicija svake čestice je potencijalno rešenje i najbolja pozicija koju je svaka čestica postigla tokom celog procesa optimizacije se pamti. U svakom koraku algoritma pozicija i brzina svake čestice se ažurira sa dve „najbolje“ vrednosti. Prva predstavlja najbolje rešenje koje je ta čestica postigla dosad ( $p$  u jednačini (5.4)). Druga vrednost predstavlja globalno najbolje rešenje (pogodnost) koje je postigla bilo koja čestica u populaciji ikada ( $g$  u jednačini (5.4)) [47]. Kada su sračunate te dve najbolje vrednosti ( $p$  i  $g$ ), brzina  $v$  i nova pozicija  $x$  se u  $k$ -toj iteraciji preračunavaju po jednačinama:

$$v(k + 1) = w * v(k) + cp * rp(k) * (p(k) - x(k)) + cg * rg(k) * (g(k) - x(k)) \quad (5.4)$$

$$x(k + 1) = x(k) + v(k + 1) \quad (5.5)$$

, gde su:

$v(k)$  – brzina čestice u iteraciji  $k$ ;

$x(k)$  – pozicija čestice (rešenje) u iteraciji  $k$ ;

$p(k)$  – lično najbolje rešenje čestice;  
 $g(k)$  – globalno najbolje rešenje, u celoj populaciji;  
 $rp$  i  $rg$  – pseudo-slučajni brojevi u opsegu  $[0, 1]$ ;  
 $w$ ,  $cp$ ,  $cg$  – težinski faktori.

Težinski faktori  $cp$  i  $cg$  u jednačini (5.4) predstavljaju faktore ubrzanja i utiču na relativni uticaj ličnog (lokalnog) i zajedničkog (globalnog) znanja na kretanje svake čestice. Često se kaže da oni predstavljaju kognitivnu (saznajnu) i socijalnu komponentu, tim redom. U stvari faktori ubrzanja određuju koliko brzo će se čestice kretati prema optimalnom rešenju i koliki će uticaj imati  $p(k)$  i  $g(k)$ . Faktor inercije  $w$  koji je prvi put uveden u [132] održava jato na okupu i sprečava ga od preterane diversifikacije koja bi umanjila dobre osobine PSO algoritma i pretvorila ga u čistu slučajnu pretragu. Slučajni brojevi  $rp$  i  $rg$  su međusobno nezavisni i uniformno raspoređeni na opsegu  $[0, 1]$ .

U nastavku je prikazan pseudo kod osnovne varijante PSO algoritma.

- 1) Za svaku česticu
  - a. Postavi početne vrednosti čestice (inicijalizacija)
- 2) Ponavljaj
  - a. Za svaku česticu
    - i. Izračunaj vrednost kriterijumske funkcije
    - ii. Ako je vrednost kriterijumske funkcije bolja od najbolje vrednosti te čestice do sada ( $p$ ), postavi trenutnu vrednost kao novo  $p$
  - b. Ako je najbolja vrednost kriterijumske funkcije u populaciji bolja od globalne najbolje do sada ( $g$ ), postavi novo  $g$
  - c. Za svaku česticu
    - i. Izračunaj brzinu čestice na osnovu jednačine brzine (5.4)
    - ii. Primeni ograničenja brzine
    - iii. Ažuriraj poziciju čestice na osnovu jednačine pozicije (5.5)
    - iv. Primeni ograničenja pozicije
- 3) dok nije dostignut maksimalan broj iteracija ili nađena željena minimalna granica kriterijuma.

Prve dve linije ( 1) a. ) koda koriste se za inicijalizaciju roja čestica. Za svaku od čestica se po nekom algoritmu (ili na slučajan način) biraju početne vrednosti parametara. 2) predstavlja početak glavne petlje programa. Program se izvršava dok se ne dostigne maksimalni zadati broj iteracija ili se zadovolji neki drugi kriterijum zaustavljanja koji se zadaje na početku izvršavanja programa. 2) a. predstavlja početak petlje u kojoj se nalazi deo koda za računanje kriterijumske funkcije za svaku jedinku ( 2) a. i. ). Posle toga se vrši poređenje izračunate kriterijumske funkcije sa najboljom ranije izračunatom vrednošću za određenu česticu ( 2) a. ii. ) i ukoliko je nova vrednost bolja od stare postavlja se kao najbolja do sad. Ova vrednost predstavlja lično najbolje rešenje čestice. U 2) b. se među najboljim ličnim rešenjima bira najbolje globalno u toj iteraciji i postavlja kao nova globalna najbolja vrednost. 2) c. predstavlja početak petlje u kojoj se za svaku česticu pojedinačno vrši izračunavanje nove brzine ( 2) c. i. ) i nove pozicije ( 2) c. iii. ). Ove dve vrednosti se računaju na osnovu gore navedenih formula (5.4) i (5.5).

Postoji mnogo modifikacija PSO algoritma prezentovanih u literaturi. Rani koncept PSO algoritma je podrazumevao konstantni skup parametara ( $cp$ ,  $cg$  i  $w$ ) dok neke novije modifikacije uvode promenljiv skup parametara algoritma u cilju poboljšanja ukupnih performansi algoritma [18, 133, 130]. U prvom delu istraživanja je korišćena varijanta PSO-a sa konstantnim faktorima ubrzanja i promenljivim faktorom inercije, a u drugom delu

istraživanja (poređenje različitih tehnika optimizacije) korišćena je PSO varijanta sa svim promenljivim parametrima (tabela 5-4). Faktor inercije  $w$  je smanjivan u toku algoritma od 0,95 do 0,4 omogućujući detaljnu pretragu prostora.

Tabela 5-4 Parametri PSO algoritma

Naziv parametra	Početno istraživanje	Drugi deo istraživanja (poređenje metoda)
Veličina populacije	100	30
Maksimalni broj iteracija	10	15
Maksimalna brzina čestice $v_{max}$	0,4	0,4
Minimalna brzina čestice $v_{min}$	0,05	0,05
Faktor ubrzanja $cp$	1,1	2,5 -> 0,5
Faktor ubrzanja $cg$	1,2	0,5 -> 2,5
Faktor inercije $w$	0,95 -> 0,4	0,95 -> 0,4

U prvom delu istraživanja generisano je sto individua (čestica) i proces traženja najboljeg rešenja je trajao 10 iteracija. 10 iteracija se pokazalo sasvim dovoljno jer već posle 9-10 iteracija algoritam konvergira (sve čestice konvergiraju) ka određenom optimumu. Veličina populacije (broj čestica) utiče na raznovrsnost početnih varijabli (parametara), odnosno bolju raspodelu po prostoru rešenja, što dalje povlači i raznovrsnost pravaca u kojima će se kretati čestice i raznovrsnost brzina kojima će se kretati, pa samim tim utiče i na brzinu konvergencije algoritma i pronalaženja boljih rešenja. Međutim, velika populacija takođe značajno prolongira dužinu izvršavanja algoritma. U našem istraživanju, algoritam je izvršavan na prosečnom PC računaru (Intel Core i3, 4 GB RAM) i vreme potrebno za samo jednu iteraciju sa 100 jedinki je prosečno bilo 25 minuta, dok je u test slučaju za 200 jedinki ceo algoritam trajao skoro 10 sati (nešto manje od sata po iteraciji).

Koordinate jedinki (tabela 5-3) su u početnoj iteraciji generisane kao slučajne realne vrednosti iz opsega [10, 90]. Time su postavljena početna ograničenja da sva plovila koja stižu za manje od 10 minuta do prevodnice sigurno potpadaju pod fazi skup „Malo“ rastojanje i sva plovila koja stižu za više od 90 minuta sigurno potpadaju pod fazi skup „Veliko“ rastojanje. U koji od tri skupa će pripasti plovila koja stižu za više od 10 minuta a za manje od 90 minuta je ostavljeno algoritmu optimizacije da da odgovor. Ove vrednosti koje predstavljaju rastojanje u minutima su relativno veliki brojevi i shodno tome njihovo kretanje kroz prostor rešenja je veoma dinamično. Male vrednosti težinskih faktora nam u tom slučaju omogućavaju sporije kretanje i lakšu konvergenciju ka optimalnom rešenju. Dodatno, smanjivanje faktora inercije ( $w$  u jednačini (5.4)) kroz iteracije (smanjivan je sa 0,95 na 0,4) poboljšava konvergenciju. Maksimalna i minimalna brzina čestice  $v_{max}$  i  $v_{min}$  su određene eksperimentalno kao fiksne vrednosti u toku procesa optimizacije koje obezbeđuju ni previše brzo ni previše sporo kretanje čestica u prostoru pretrage. Faktori ubrzanja  $cp$  i  $cg$  (vidi jednačinu (5.4)) su izabrani tako da je socijalna komponenta neznatno uticajnija od kognitivne, odnosno da na kretanje jedinki kroz prostor rešenja više utiče globalno najbolje rešenje nego lokalno [131]. Izabrane vrednosti ( $cp = 1,1$ ;  $cg = 1,2$ ) su dale najbolje performanse PSO algoritmu u test slučajevima.

Vrednosti parametara, koje predstavljaju pozicije čestica su relativno veliki brojevi pa je samim tim kretanje čestica u prostoru rešenja veoma dinamično. Male vrednosti težinskih faktora omogućuju sporiju i jednostavniju konvergenciju ka optimalnom rešenju.

U drugom delu istraživanja performanse PSO algoritma su poređene sa performansama GA i ABC algoritma i zbog fer poređenja korišćeni su drugi parametri PSO algoritma (na primer 30 jedinki kroz 15 iteracija). Kognitivni faktor  $cp$  je takođe smanjivan u toku pretrage od 2,5 do 0,5 zbog bolje pretrage dok je socijalni faktor  $cg$  povećavan 0,5 do 2,5 omogućujući bolju eksploataciju „znanja“ svake jedinke [134].

## 5.6. Optimizacija zasnovana na veštačkoj koloniji pčela (ABC)

Algoritam zasnovan na veštačkoj koloniji pčela (engl. Artificial Bee Colony – ABC ili Bee Colony Optimization - BCO) je još jedan relativno novi numerički algoritam optimizacije zasnovan na ponašanju jata, preciznije na simulaciji kretanja roja pčela u potrazi za hranom [16, 135, 136]. U ovom algoritmu pozicija izvora hrane predstavlja moguće rešenje problema optimizacije a količina nektara u izvoru hrane odgovara vrednosti kriterijuma optimalnosti u tom rešenju. Kolonija se sastoji od tri grupe pčela: pčele radilice, posmatrači i skauti [137]. Broj pčela radilica ili posmatrača je jednak broju rešenja u populaciji. U prvom koraku ABC generiše inicijalnu populaciju sa slučajnom raspodelom  $P(G=0)$  od  $SN$  rešenja (pozicija izvora hrane), gde  $SN$  predstavlja veličinu populacije. Svako rešenje  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,SN$ ) je  $D$ -dimenzioni vektor, gde je  $D$  broj varijabli u kriterijumu optimalnosti. Nakon inicijalizacije, populacija pozicija (rešenja) se podvrgava ponavljajućim ciklusima  $C=1,2,\dots,Cmax$  procesa pretrage. Pčela radilica ili posmatrač na slučajan način pravi modifikaciju pozicije (rešenja) u svojoj memoriji za pretragu novog izvora hrane i testira količinu nektara novog izvora. Dok se u slučaju pravih pčela proizvodnja novih izvora hrane bazira na poređenju izvora hrane u regionu u zavisnosti od informacija koje pčela vizuelno prikuplja, u ABC modelu veštačke pčele ne koriste nikakve informacije za poređenje. One na slučajan način biraju poziciju izvora hrane i proizvode modifikaciju na onu koja postoji u njihovoj memoriji uz pomoć izraza:

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij} \times (x_{ij} - x_{kj}) \quad (5.6)$$

, gde su  $k \in \{1,2,\dots,BN\}$  i  $j \in \{1,2,\dots,D\}$  slučajno izabrani indeksi,  $BN$  je broj pčela radilica a  $\phi$  je slučajan broj iz opsega  $[-1, 1]$ .

U slučaju da je količina nektara novog izvora veća od one iz prethodnog pčela pamti novu poziciju i zaboravlja staru. Inače, čuva poziciju prethodnog izvora. Kada sve pčele radilice završe proces pretrage one dele informacije o nektaru na izvorima hrane i informacije o njihovim pozicijama sa pčelama posmatračima na plesnom prostoru. Pčela posmatrač procenjuje informacije o nektaru koje dobija od svih pčela radilica i bira izvor hrane sa verovatnoćom koja je u vezi sa njegovom količinom nektara. Kao i u slučaju pčele radilice, ona stvara modifikaciju pozicije u svojoj memoriji i proverava količinu nektara izvora kandidata. U slučaju da je njegova količina nektara veća od one iz prethodnog izvora, pčela pamti novu poziciju i zaboravlja staru.

Pčela posmatrač bira izvor hrane na osnovu verovatnoće povezane sa tim izvorom hrane  $p_i$  koja se računa po sledećem izrazu:

$$p_i = \frac{f(x_i)}{\sum_{n=1}^{SN} f(x_n)} \quad (5.7)$$

, gde je  $f(x_i)$  vrednost kriterijuma optimalnosti rešenja  $i$  procenjena od strane njene pčele radilice, a  $SN$  je broj izvora hrane koji je jednak broju pčela radilica ( $BN$ ). Na ovaj način pčele radilice razmenjuju svoje informacije sa posmatračima.

Pčele radilice čija rešenja se ne mogu poboljšati tokom predodređenog broja pokušaja, zvanog limit, postaju skauti i njihova rešenja se odbacuju. Tada, skauti počinju da traže nova rešenja na slučajan način. Tako se oni izvori koji su inicijalno loši ili su postali loši tokom eksploatacije napuštaju.

Opisani proces pretrage se sprovodi dok se ne zadovolji kriterijum zaustavljanja, na primer maksimalan broj ciklusa ili maksimalno vreme pretrage.



## 6. REZULTATI I DISKUSIJA

### 6.1. Kriterijumi za procenu rezultata

Kao što je ranije napomenuto u radu, pri prevođenju plovila kroz brodsku prevodnicu imamo interese dve strane: prve koja želi da se prevođenje obavi što brže (brodari) i druge koja želi da se obavi što manje promena nivoa vode u komori prevodnice bez plovila (rukovaoci prevodnicom) [23]. Na osnovu ova dva preovlađujuća stava konstruisani su osnovni kriterijumi za ocenjivanje rezultata rada fazi ekspertskog sistema.

#### 6.1.1. Kriterijum minimalnog vremena čekanja

U interesu brodarka je da se prevođenje obavi što pre tj. da se što manje vremena provede čekajući u zoni brodske prevodnice. Prvi kriterijum ima upravo taj cilj – minimizacija vremena čekanja. U daljem tekstu koristiće se i skraćeni naziv za ovaj kriterijum – MVČ (minimalno vreme čekanja).

Moguće je konstruisati upravljačku strategiju MVČ koja u nekoj meri zadovoljava ovaj kriterijum na taj način da pravo na prevođenje ima plovilo koje je najranije stiglo do prevodnice, bez obzira na to da li je plovilo stiglo sa strane gde je kapija brodske prevodnice zatvorena ili otvorena. Očekivani rezultati sa ovakvom upravljačkom strategijom su vrlo malo ukupno i srednje vreme čekanja po plovilu, ali i veliki broj prevođenja na prazno.

#### 6.1.2. Kriterijum minimalnog broja prevođenja

Kriterijum minimalnog broja prevođenja na prazno zastupa interese vlasnika i radnika na brodskoj prevodnici. Svako menjanje nivoa vode u komori bez plovila predstavlja dodatno trošenje energije za rad pumpi, i vode kojom se puni komora.

Za zadovoljenje ovog kriterijuma konstruisana je upravljačka strategija MBP (minimalni broj prevođenja). MBP strategija je realizovana na taj način što se prevođenja vrše naizmenično. Ukoliko sa jedne strane prevodnice dođe više plovila za redom, čeka se na isti broj plovila sa druge strane kako bi se prevođenje u potpunosti obavilo.

Ovo je pomalo ekstremna upravljačka logika. U slučaju da se simulacija vrši sa konačnim brojem plovila ali broj plovila sa jedne strane prevodnice nije jednak broju plovila sa druge strane prevodnice, broj prevođenja na prazno će otprilike biti jednak razlici ova dva broja plovila. Ovakvom upravljačkom strategijom se definitivno dobija minimalni broj prevođenja na prazno, ali su ukupno i prosečno vreme čekanja po plovilu izuzetno veliki, naročito u slučaju neravnomernog prispeća plovila do prevodnice, kada se dešava da sa jedne strane stigne više plovila nego sa druge pa dolazi i do akumuliranja vremena čekanja.

### 6.2. Prikaz inicijalnih rezultata

Inicijalna testiranja su vršena da bi se ocenila predložena upravljačka strategija sa fazi sistemom odlučivanja. Početni fazi ekspertski sistem (FES) je kreiran na osnovu preporuka operatera koji imaju dugogodišnje iskustvo. Na osnovu toga su formirani parametri funkcija

pripadnosti za ulazne fazi promenljive. Ovako kreirani FES je uporedno testiran sa dve ekstremne upravljačke strategije opisane u prethodnom poglavlju (6.1). Vršene su simulacije za različite gustine saobraćaja (od prosečno 5 plovila na dan do prosečno 50 plovila na dan) sa ukupnim trajanjem simulacije od 30 dana. Za svaki prosečan broj plovila simulacija je ponovljena 10 puta i uzete su srednje vrednosti dobijenih rezultata. Ovo je rađeno da bi se smanjio uticaj neravnomerne raspodele dolazaka plovila na konačne rezultate, sa obzirom da je vreme trajanja simulacije bilo relativno malo.

Tabela 6-1 prikazuje sumirane rezultate simulacija za sve posmatrane gustine saobraćaja (5 do 50 plovila na dan) i sve tri upravljačke strategije (MVČ, MBP i FES). Rezultati su poređeni po kriterijumima: broj prevođenja na prazno (BPnP) u toku perioda simulacije (30 dana) i srednje vreme čekanja (SVČ) po plovilu u minutima.

Na Sl. 6.1 prikazan je grafik prosečnog vremena čekanja u minutima po plovilu. Plavom bojom (tačkicama) prikazano je prosečno vreme čekanja kada je prevodnicom upravljano sa strategijom MVČ, zelenom bojom (crtice) prikazano je prosečno vreme čekanja sa strategijom MBP, dok je crvenom bojom (puna linija) prikazano prosečno vreme čekanja dobijeno korišćenjem fazi ekspertskeg sistema (FES).

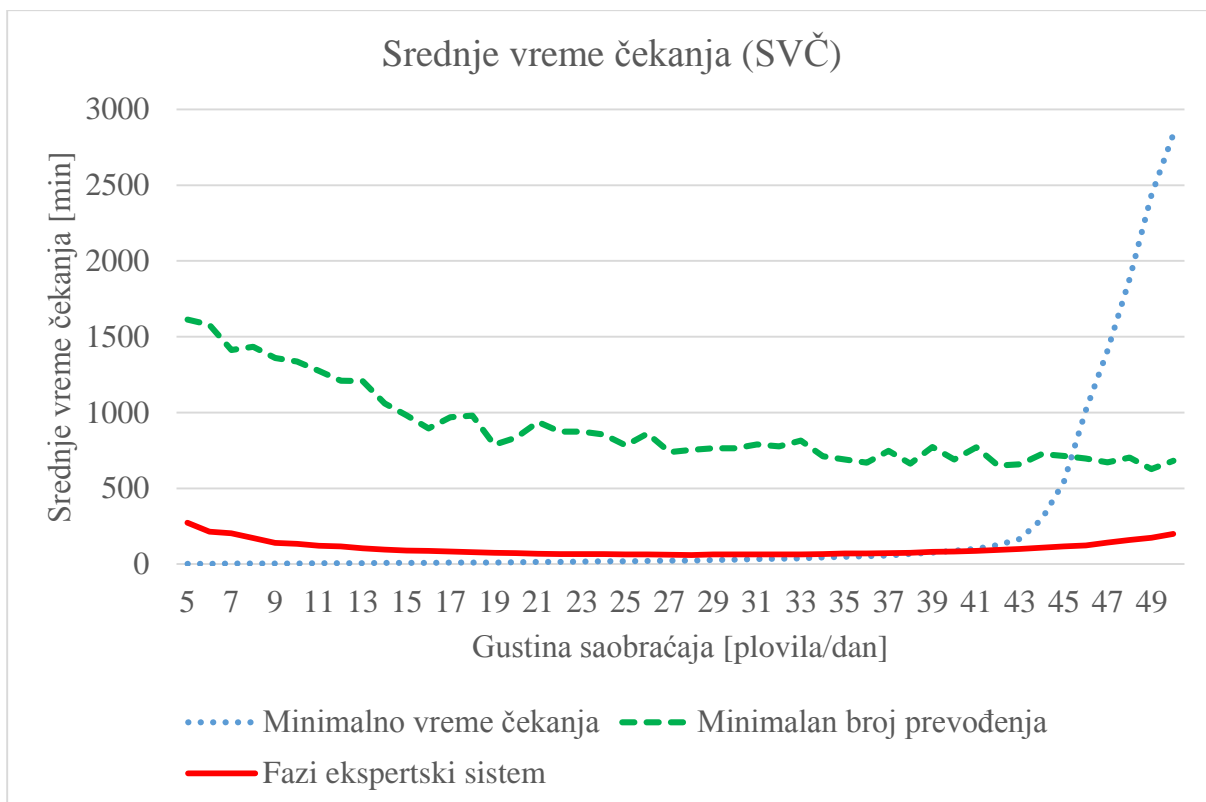
Sa Sl. 6.1 se vidi da je za male gustine saobraćaja najbolja upravljačka strategija upravo ona kojoj je za cilj da minimizuje vreme čekanja, dok je najgora po ovom kriterijumu strategija MBP, što se moglo i očekivati. Strategija upravljanja zasnovana na FES-u je po ovim performansama negde između dve ekstremne strategije. Kako raste gustina saobraćaja tako se rezultati po strategiji MBP malo poboljšavaju, ali su i dalje daleko lošiji od druge dve strategije. Ono što je veoma zanimljivo primetiti ovde to je da se rezultati dobijeni strategijama MVČ i FES približavaju jedni drugima. Srednje vreme čekanja po strategiji MVČ raste sa gustinom saobraćaja dok po strategiji FES opada i na gustini od 40 plovila na dan se ukrštaju. Ovo je veoma značajno, jer se iz ovih rezultata vidi da FES strategija daje bolje rezultate čak i od MVČ strategije po kriterijumu SVČ, što se nije moglo očekivati. Postoji objašnjenje za ovaj fenomen. Strategija MVČ je pravljena daje prioritet plovilima koja najduže čekaju i zbog toga vrši prevođenja na prazno, čak i kada ne mora. Ove situacije su svakako zanimljive samo teorijski u okviru simulacija, jer u praksi ovako nerealno visoke gustine saobraćaja koje su iznad projektovanog kapaciteta prevodnice ne postoje. Ova granična gustina saobraćaja od oko 40 plovila na dan nikako nije stroga već varira od slučaja do slučaja, tj. od rasporeda dolazaka plovila do brodske prevodnice i vremena potrebnog za obavljanje prevođenja. U svakom slučaju ovo su veoma velike gustine saobraćaja koje se teško mogu očekivati u realnim uslovima na plovnim kanalima u Srbiji, ali su iz znatiželje autora ipak testirane da bi se videlo ponašanje predloženog upravljačkog sistema u uslovima ekstremne gustine navigacije.

Sl. 6.2 prikazuje ukupan broj prevođenja na prazno u toku simulacije za različite gustine saobraćaja. Plavom bojom (tačkicama) prikazan je broj prevođenja na prazno dobijen sa upravljačkom strategijom MVČ, zelenom bojom (crticama) prikazan je broj prevođenja na prazno sa strategijom MBP, dok je crvenom bojom (punom linijom) prikazan ukupan broj prevođenja na prazno dobijen korišćenjem fazi ekspertskeg sistema (FES).

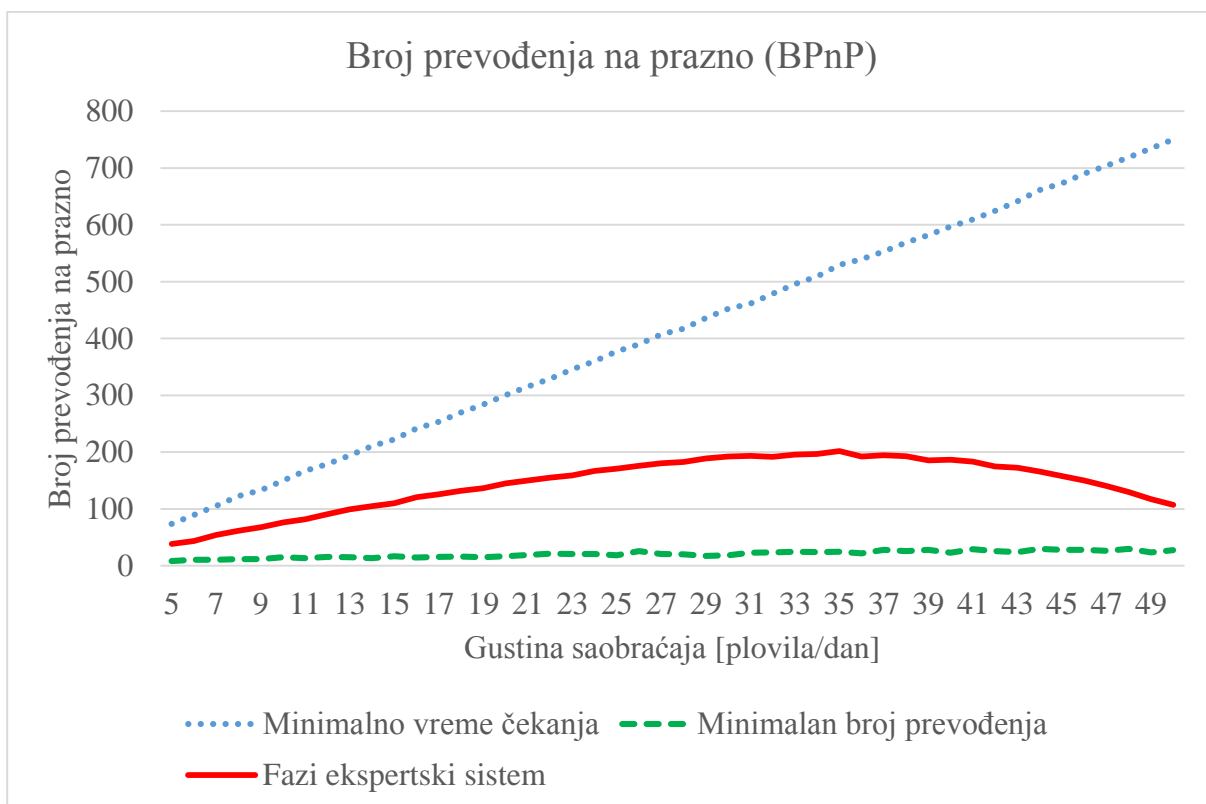
Kao i kod prethodnog kriterijuma, i po broju prevođenja na prazno performanse FES strategije su negde između performansi ekstremnih strategija. Međutim dok broj prevođenja na prazno po MVČ strategiji konstantno raste sa gustinom saobraćaja, po FES strategiji ono počinje da opada kada gustina saobraćaja nadmaši kapacitet prevodnice i počnu da se stvaraju veliki redovi čekanja.

Tabela 6-1 Uporedni rezultati simulacija sa različitim gustinama saobraćaja

Prosečan broj plovila	Broj prevođenja na prazno (BPnP)			Srednje vreme čekanja (SVČ) [min]		
	MVC	MBP	FES	MVC	MBP	FES
5	73,8	8,6	38,5	2,1	1614,3	273,5
6	89,5	10,8	43,8	2,6	1580,0	214,8
7	105,3	10,8	54,5	3,0	1411,7	202,8
8	122,6	11,6	61,6	3,7	1433,7	171,5
9	133,0	12,0	68,0	3,9	1358,7	140,7
10	149,7	15,1	76,2	4,6	1337,1	134,9
11	167,0	13,4	82,0	5,0	1275,7	120,8
12	179,1	15,6	91,1	5,8	1209,3	116,0
13	194,2	15,5	99,5	6,7	1207,7	103,4
14	210,6	13,4	104,9	7,4	1060,0	96,4
15	222,5	16,9	109,9	8,0	980,8	89,1
16	241,3	14,4	120,9	9,0	896,2	87,8
17	253,2	15,7	125,9	9,4	968,6	82,7
18	269,7	16,5	132,2	10,5	980,3	78,8
19	283,9	15,4	136,5	11,3	787,3	74,1
20	300,1	16,9	145,3	12,6	834,7	73,5
21	315,3	19,4	149,8	13,9	937,1	69,1
22	328,9	21,2	155,1	15,1	874,4	66,6
23	345,8	20,6	159,0	16,6	873,8	67,0
24	360,1	20,8	167,2	17,7	854,3	66,1
25	377,2	18,7	171,1	18,9	783,8	63,8
26	389,5	25,9	176,0	21,2	860,9	63,6
27	406,9	20,8	180,3	22,9	737,9	62,3
28	417,1	20,5	182,8	23,9	752,6	59,9
29	436,1	17,4	189,0	27,6	764,9	63,7
30	452,3	18,4	192,1	29,7	764,5	63,3
31	461,4	23,3	193,2	32,5	789,7	63,5
32	478,9	23,5	191,6	36,0	776,5	63,2
33	495,5	24,7	195,8	38,4	814,8	64,5
34	509,0	24,3	196,9	43,2	712,1	66,1
35	529,3	25,0	201,8	48,3	689,6	71,1
36	539,3	21,9	192,2	53,1	670,1	70,8
37	552,9	28,1	194,7	57,5	747,4	72,5
38	568,7	26,2	192,7	67,1	662,6	74,7
39	581,5	28,3	185,8	75,8	772,4	81,2
40	597,0	22,9	186,5	89,3	690,6	83,7
41	609,4	29,0	183,3	102,0	770,3	87,9
42	624,8	25,9	174,6	125,8	650,5	93,0
43	641,2	24,0	172,4	167,5	658,1	100,4
44	660,9	29,6	166,0	296,6	726,7	107,5
45	672,8	27,9	157,8	545,2	714,0	117,2
46	689,8	27,9	150,0	1013,8	695,8	122,9
47	703,9	26,5	140,7	1407,7	670,7	141,3
48	718,7	29,9	129,6	1880,6	702,7	158,7
49	734,5	23,6	117,4	2432,4	626,6	173,4
50	750,1	27,8	107,1	2838,7	682,3	200,2



Sl. 6.1 Prosečno vreme čekanja po plovilu za različite gustine saobraćaja



Sl. 6.2 Broj prevođenja na prazno za različite gustine saobraćaja

Ako se uporede rezultati sa prethodne dve slike može se zaključiti da se za manje gustine saobraćaja FES ponaša u skladu sa očekivanjima, to jest performanse su mu između performansi dve ekstremne upravljačke strategije. Ono što ide u korist fazi ekspertskeg sistema su rezultati za srednje i veće gustine saobraćaja. FES ima oko 6-7 puta veći broj prevođenja na prazno od strategije MBP ali zato ima 10-15 puta manje prosečno vreme čekanja. Isto tako FES ima 2 do 3 puta manji broj prevođenja na prazno od strategije MVČ dok su vremena čekanja na sličnom nivou (za ekstremno velike gustine čak i kraća).

### **6.3. Prikaz rezultata nakon optimizacije parametara ekspertskeg sistema**

Rezultati iz poglavlja 6.2 prikazuju kako se predloženi fazi ekspertskeg sistem (FES) ponaša u poređenju sa ekstremnim upravljačkim strategijama: minimalno vreme čekanja (MVČ) i minimalni broj prevođenja (MBP). Namena tog prvog dela istraživanja je bila da se uoče performanse upravljačke strategije koju bi koristio operater (uz pretpostavku da bi akcije operatera bile slične akcijama FES-a sa obzirom da je FES kreiran na osnovu iskustva i znanja operatera). Simulacije su vršene veliki broj puta za različite gustine saobraćaja (po 10 puta za 46 različitih gustina) i shodno tome je ukupno vreme trajanja svake simulacije bilo relativno kratko (30 dana).

Sada se postavlja pitanje da li je upravljačka strategija realizovana sa FES-om najbolja moguća sa obzirom na želje koje su opisane kriterijuma za ocenjivanje? Takođe, da li operater, ma koliko iskusan bio, može uvek i u svakom trenutku da donese ispravnu odluku? Odnosno konačno pitanje: Da li bi se nekom promenom u parametrima FES-a mogla dobiti još bolja upravljačka strategija? Bolja po kom kriterijumu? Da bi se dobili odgovori na ova pitanja razmatrane su tri metode optimizacije zasnovane na računarskoj inteligenciji: genetski algoritam, optimizacija zasnovana na roju čestica i optimizacija na osnovu ponašanja kolonije pčela. Metode su detaljno opisane u poglavljima 5.4, 5.5 i 5.6.

Da bi mogli da uporedimo rad različitih fazi ekspertskeg sistema (fazi sistemi sa različitim parametrima) potrebno je da formiramo ocenu, tj. univerzalni kriterijum. Kriterijum optimalnosti korišćen u ovom delu istraživanja je opisan u poglavlju 5.1. U ovom slučaju takav kriterijum se naziva ekonomski kriterijum, i računa se na osnovu broja prevođenja na prazno i prosečnog vremena čekanja po plovilu po jednačini (5.1).

Pošto odabrane metode optimizacije zahtevaju izuzetno veliki broj simulacija u toku algoritma, isključena su ponavljanja simulacija sa istim parametrima kao i sprovođenje simulacija za različite gustine saobraćaja. Usvojena je gustina od prosečno 10 plovila na dan (što je nominalno opterećenje prevodnice na godišnjem nivou), a za trajanje simulacije je odabran period od godinu dana. Na osnovu ovoga za potrebe optimizacije generisan je jedinstveni skup dolazaka plovila do prevodnice od ukupno 2786 plovila koji detaljno predstavljen u poglavlju 3.4.

Pošto su definisani svi parametri fazi ekspertskeg sistema i kreirani dodatni kriterijumi za ocenjivanje rada FES-a, generisan reprezentativan uzorak plovila, izvršena je simulacija rada brodske prevodnice za dati uzorak. Rezultati su prikazani u tabeli 6-2 i obuhvataju rezultate dobijene pomoću oba ekstremna upravljačka algoritma MVČ i MBP i pomoću fazi ekspertskeg sistema.

Na osnovu dobijenih rezultata vidi se da je upravljanje broskom prevodnicom pomoću fazi ekspertskeg sistema po performansama između dve ekstremne upravljačke strategije što se

i očekivalo. Upravljanje sa strategijom MVC dalo je izuzetno malo prosečno vreme čekanja od samo 4.2 minuta po plovilu. Sa druge strane, izvršeno je 1410 prevođenja na prazno. Ili, ako bi ovo bio realni sistem sa raspodelom dolazaka plovila kakva je korišćena u ovoj simulaciji, ako bi radnici brodske prevodnice ispunjavali želje broдача za što brži prolazak kroz prevodnicu, plovila bi prosečno čekala 4 minuta i 11 sekundi pre nego što počne prevođenje. Drugačije rečeno, velika većina plovila bi bila prevedena odmah po dolasku a samo mali broj bi morao da čeka, i to u najvećem broju slučajeva samo da se obavi prevođenje na prazno. Ako se uzme u obzir da je u simulaciji učestvovalo 2786 plovila a obavljeno je 1410 prevođenja na prazno, ispada da je u proseku posle prevođenja svakog drugog plovila izvršeno menjanje nivoa vode u praznoj komori. Na osnovu poznatog vremena menjanja nivoa vode u komori bez plovila koje je 15 minuta ovo može još i da se interpretira tako da je brodska prevodnica imala 21.150 minuta ili 14,7 dana rada na prazno (pola meseca).

*Tabela 6-2 Rezultati simulacije rada brodske prevodnice*

Upravljački algoritam	Broj prevođenja na prazno	Prosečno vreme čekanja po plovilu (u minutima)
Minimalno vreme čekanja	1410	4.2
Minimalni broj prevođenja	50	3090.9
Fazi ekspertski sistem	768	138.0

Ako se pogledaju rezultati dobijeni strategijom MBP, vidi se da je izvršeno ukupno 50 prevođenja na prazno. Ako se uzme u obzir da je razlika između broja plovila sa gornje i donje strane prevodnice tačno 50 plovila, znači da je izvršen apsolutni minimum ovih prevođenja. U slučaju da su ovo rezultati dobijeni u radu realnog sistema, u kojem je apsolutni imperativ vlasnika brodske prevodnice da što više uštede na vodi iz kanala i energiji potrebnoj za rad pumpi i otvaranje i zatvaranje ventila imali bi situaciju da su plovila čekala na prevođenje prosečno 3.091 minut ili 2,15 dana. Odatle se zaključuje da se vremena čekanja u slučaju nesimetričnog broja dolazaka do prevodnice akumuliraju vrlo brzo i da je ova upravljačka strategija nerealna u praksi.

Kod upravljanja pomoću FES-a imamo kompromis između ove dve ekstremne strategije. Dobijeno je 768 prevođenja na prazno, što je 15 puta više nego kod kriterijuma koji minimizuje broj prevođenja na prazno, ali je vreme koje su plovila provela čekajući na prevođenje 22 puta manje nego kod ovog kriterijuma. Sa druge strane, ako se gleda odnos između FES-a i MVC, vidi se da su plovila po FES strategiji upravljanja 33 puta duže čekali na prevođenje nego po kriterijumu koji minimizuje čekanje, dok je broj prevođenja na prazno kod FES-a samo 1,83 puta manji nego kod ovog kriterijuma (brodska prevodnica je radila na prazno 7 dana kraće u godini).

Ovakvi rezultati se mogu objasniti time što u bazi pravila fazi ekspertskeg sistema postoje dva pravila od devet čiji izlaz je neodređen. Neodređen izlaz znači da su ovim pravilima pokrivena situacije kada je FES neodlučan da li treba ili ne promeniti stanje prevodnice. Ukoliko se desi ovakva upravljačka akcija postoje dve osnovne mogućnosti za upravljanje prevodnicom. Prva je da se prevođenje ne izvrši ukoliko kapija brodske prevodnice nije otvorena sa strane na kojoj se nalazi najbliže plovilo koje prvo čeka na prevođenje. Ovakva akcija odgovara kriterijumu za minimiziranje broja prevođenja na prazno. Druga akcija je da se prevođenje najbližeg plovila izvrši bez obzira na stanje prevodnice. Ova akcija odgovara prvom kriterijumu koji minimizuje vreme čekanja na prevođenje. S obzirom da je na osnovu tabele

fazi pravila upravljački izlaz iz FES-a neodređen samo u slučaju kada je plovilo koje dolazi do zatvorene kapije brodske prevodnice bliže od onog koje dolazi sa strane gde je otvorena kapija, primena druge akcije će dovesti i do prevođenja na prazno. Iako neodređena upravljačka akcija rezultuje aktiviranjem samo dva pravila od devet, ovaj slučaj nije redak i može se iskoristiti za dodatno podešavanje rada prevodnice u interesu broдача ili vlasnika prevodnice.

Iz dobijenih rezultata vidi se da FES ima svojih prednosti u odnosu na druge dve upravljačke strategije. Fazi pravila nastala su na osnovu subjektivnih opisa a princip rada je takav da oponaša ljudsko zaključivanje. Onda se ne treba čuditi što rezultati koji su dobijeni predstavljaju kompromis između dve ekstremne strategije, kao što i odluke prevodničara predstavljaju kompromis između želja vlasnika prevodnice i broдача. Ali postavlja se pitanje da li su kreirani fazi skupovi najbolji i da li je moguće nekim izmenama na fazi skupovima poboljšati dobijene rezultate. Odgovor na ovo pitanje donose algoritmi optimizacije.

Pošto su odabrane metode optimizacije i kriterijum optimalnosti, postavlja se sledeće logičko pitanje: Koji parametri FES-a bi mogli eventualno biti promenjeni da bi se dobili kvalitetniji rezultati? Sa obzirom da je fazi ekspertski sistem zasnovan na fazi sistemu odlučivanja on poseduje čitav niz različitih parametara koji bi se mogli optimizovati. Za početak tu su parametri samog mehanizma fazi zaključivanja, kao što su metod implikacije, agregacije i defazifikacije. Zatim broj ulaznih promenljivih. Nakon toga broj i tip funkcija pripadnosti kojima će biti definisane fazi vrednosti, korespondentna pravila i na kraju sami parametri funkcija pripadnosti. Sa obzirom da su različite kombinacije metoda mehanizma fazi zaključivanja već testirane na test skupu i odabrane one koje su dale najbolje rezultate one su isključene iz problema optimizacije. Dalje, broj ulaznih promenljivih, broj i tip funkcija pripadnosti i tabela pravila su odabrani na osnovu konsultacija sa operaterima i usvojeni su kao dobri. To nam smanjuje izbor na same parametre funkcija pripadnosti za čije odabrane početne vrednosti postoje i najveće sumnje ali i najveća očekivanja u mogućem napretku nakon sprovedene optimizacije.

Sa obzirom da FES poseduje dve ulazne promenljive sa po tri fazi skupa i jednu izlaznu promenljivu sa takođe tri fazi skupa i da su svi fazi skupovi opisani kombinovanim Gausovim funkcijama pripadnosti koje se definišu sa po dva (krajnji fazi skupovi) ili četiri (središnji fazi skupovi) parametra, ukupan broj parametara svih funkcija pripadnosti je  $(2 + 1) \times (2 + 4 + 2) = 24$ . Pošto je konačna odluka fazi ekspertskog sistema u suštini binarna (da li treba promeniti stanje prevodnice ili ne?), pretpostavljeno je da vrednosti parametara izlaznih funkcija pripadnosti neće značajno uticati na konačnu odluku. Ova pretpostavka je kasnije potvrđena u eksperimentima. Na osnovu ovoga broj parametara je smanjen na 16 (samo parametri ulaznih funkcija pripadnosti). Od ovih 16 parametra jedna polovina (8 parametara) definiše nagib funkcija pripadnosti a druga polovina pozicije funkcija pripadnosti. U slučaju optimizacije problema koji je opisan sa 16 varijabli, metoda optimizacije mora da pretražuje 16-dimenzioni prostor rešenja, što je zaista komplikovan problem optimizacije i pokazalo se da najčešće u praksi vodi ka lošim rešenjima. Iz tog razloga, da bi se smanjio broj varijabli (dimenzija problema optimizacije), nagibi funkcija pripadnosti su fiksirani na unapred zadate vrednosti: 0,5 za sve ulazne funkcije pripadnosti i 40 za sve izlazne funkcije pripadnosti. Time je broj parametara koji su ostali nepoznati smanjen na 8. Na osnovu preporuka o uzajamnom preklapanju susednih funkcija pripadnosti (pripadnost jednom fazi skupu treba da bude recipročna pripadnosti susednom ukoliko se preklapaju) neki od parametara su vezani jedni za druge. Pozicija funkcije pripadnosti „Malo“ je vezana za levu poziciju funkcije pripadnosti „Srednje“, a pozicija funkcije pripadnosti „Veliko“ je vezana za desnu poziciju funkcije

pripadnosti „Srednje“. To važi za obe ulazne fazi promenljive. Tako je problem optimizacije sveden na 4 nepoznata parametra  $X_{ROK}$ ,  $Y_{ROK}$ ,  $X_{RZK}$  i  $Y_{RZK}$  (vidi poglavlje 5.3.1 i tabelu 5-3). Početne vrednosti ovih parametara su odabrane na osnovu razgovora sa operaterima i prikazane su u tabeli 6-3.

Tabela 6-3 Početne vrednosti parametara FES-a

$X_{ROK}$	$Y_{ROK}$	$X_{RZK}$	$Y_{RZK}$
40	60	20	40

Vrednosti u tabeli 6-3 se mogu posmatrati kao granična rastojanja plovila od prevodnice u minutima koja određuju kom fazi skupu će trenutno rastojanje pripasti sa najvećim stepenom pripadnosti. Takođe su u toku intervjuja operatera određene granice u kojima bi trebalo ovi parametri da se kreću: 10 minuta i 90 minuta rastojanja. Ove granice su poštovane u toku kreiranja početnih populacija za sve tri metode optimizacije.

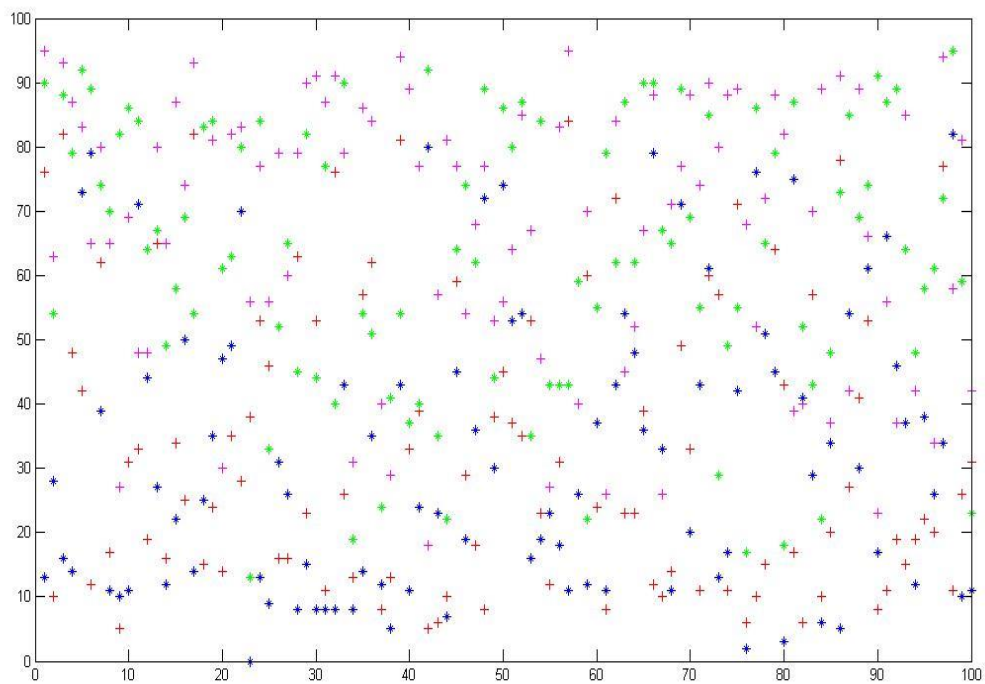
Sa obzirom da u odabranom kriterijumu optimalnosti  $E = A * BPnP + B * SVČ$  (5.1) figurišu ponderišući faktori  $A$  i  $B$ , njihov izbor zavisi od toga kojem delu kriterijuma želimo da damo veću važnost. Predviđeno je da se ovi ponderi biraju na osnovu procene stepena važnosti kriterijuma i da variraju oko 1 (manje od 1 ako nam je kriterijum manje bitan, a više od 1 ako nam je bitniji). U početnoj fazi optimizacije odabrane su vrednosti  $A=B=1$ .

Prvi pokušaj poboljšanja dobijenih rezultata je bio optimizacijom funkcija pripadnosti pomoću algoritma zasnovanog na roju čestica (PSO algoritma). Za primenu PSO algoritma korišćeno je 100 jedinki (čestica). Proces “traženja” najboljeg rešenja trajao je 10 iteracija. Pre nego što se došlo do ove kombinacije broja jedinki i broja iteracija vršene su test simulacije i istraživanja i sa drugim brojevima koji obuhvataju raspon broja jedinki od 20 do 200 i iteracija od 5 do 50. Primećeno je da algoritam već posle 9-10 iteracija iskonvergira ka određenom optimumu. Broj jedinki utiče na raznolikost početnih promenljivih što utiče na brzinu konvergencije i pronalaženje kvalitetnijeg rešenja. Sa druge strane broj jedinki znatno produžava vreme izvršavanja programa. Svaka jedinka sadrži četiri vrednosti. Ove vrednosti predstavljaju parametre koji definišu oblik i poziciju sigmoidnih funkcija pripadnosti koje određuju fazi skupove.

Nakon 10 iteracija PSO algoritma uočeno je da se čestice okupljaju oko određenih vrednosti, što po pravilu označava da algoritam neće više napredovati i da te vrednosti predstavljaju najbolje rešenje koje je PSO algoritam uspeo da nađe.

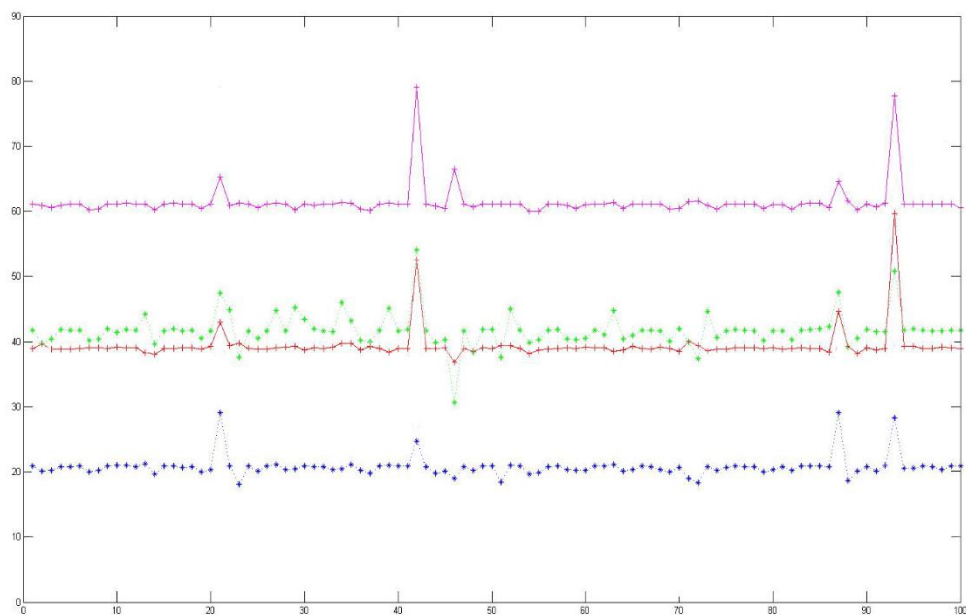
Vrednosti promenljivih za svaku jedinku su slučajno generisani brojevi u intervalu [0,100]. Za vrednosti težinskih faktora odnosno brzina učenja uzete su vrlo male vrednosti kao što je opisano u poglavlju 5.5.2. Vrednosti parametara jedinki veoma su velike pa je i kretanje u prostoru rešenja dosta dinamično. Male vrednosti težinskih faktora vrše usporavanje kretanja i lakšu konvergenciju ka optimalnom rešenju. Uz to, smanjenje vrednosti težinskih faktora u toku optimizacije dodatno poboljšava konvergenciju. Faktori učenja su odabrani tako da je socijalna komponenta uticajnija od sazajne, tj. na kretanje jedinke kroz prostor rešenja globalno najbolje rešenje ima veći uticaj od lokalnog (vidi poglavlje 5.5.2). Na Sl. 6.3 prikazan je prostor rešenja pre početka izvršavanja PSO algoritma. Na horizontalnoj osi date su vrednosti rednih brojeva jedinki u populaciji. Na vertikalnoj osi prikazana su četiri parametra koji formiraju svaku jedinku. Vrednosti ovih parametara prikazane su različitim bojom i oblikom.  $X_{ROK}$  je predstavljena sa + (crveni krstić),  $Y_{ROK}$  sa + (roze krstić),  $X_{RZK}$  sa \* (plava zvezdica) i  $Y_{RZK}$  sa \* (zelena zvezdica).





Sl. 6.3 Početne pozicije parametara jedinki PSO algoritma

Na kraju izvršavanja algoritma (posle 10 iteracija) dobijeno je rešenje prikazano na Sl. 6.4.



Sl. 6.4 Krajnje pozicije parametara jedinki PSO algoritma

Kao što se vidi sa Sl. 6.4, vrednosti parametara jedinki grupisale su se oko određenih vrednosti. Najbolje globalno rešenje je postigla čestica sa vrednostima parametara prikazanim u tabeli 6-4:

Tabela 6-4 Parametri najbolje jedinice po PSO algoritmu

$X_{ROK}$	$Y_{ROK}$	$X_{RZK}$	$Y_{RZK}$
38,89	61,94	22,31	44,2

Zanimljivo je primetiti da su optimalne vrednosti parametara dobijene pomoću PSO algoritma jako blizu vrednosti parametara koje su definisane bez bilo kakve optimizacije, samo na osnovu razgovora sa operaterima prevodnice (40; 60; 20; 40).

Tabela 6-5 prikazuje rezultate simulacije dobijene sa originalnim fazi ekspertskim sistemom (FES-om), zatim rezultate dobijene sa novim optimizovanim FES-om i poredi ih sa rezultatima dobijenim korišćenjem upravljačkih logika minimalno vreme čekanja (MVČ) i minimalan broj prevođenja (MBP).

Tabela 6-5 Uporedni rezultati simulacije posle PSO optimizacije

Upravljački algoritam	Broj prevođenja na prazno	Srednje vreme čekanja po plovidu [min]	Ekonomski kriterijum ( $A = B = 1$ )
Originalni FES	768	138,0	906,0
FES optimizovan sa PSO	<b>744</b>	<b>135,6</b>	<b>879,6</b>
Minimalno vreme čekanja	1410	4,2	1.414,2
Minimalni broj prevođenja	50	3.090,9	3.140,9

Iako se parametri funkcija pripadnosti dobijeni optimizacijom razlikuju od originalnih za svega nekoliko minuta primetno je značajno poboljšanje u kvalitetu upravljanja kako po sveukupnom ekonomskom kriterijumu tako i po pojedinačnim kriterijumima. Na osnovu rezultata u tabeli 6-5 može se zaključiti da su pomoću PSO optimizacije fazi sistema odlučivanja postignuta unapređenja i na broju prevođenja na prazno i na vremenu čekanja plovidla (podebljane vrednosti u tabeli). Broj prevođenja na prazno sa optimizovanim FES-om je za 24 manji od broja prevođenja na prazno kod originalnog FES-a. Ukupno vreme čekanja je skraćeno za 6.720 minuta, tj. za 2,41 minut prosečno po plovidlu. Ne sme se zaboraviti da su dobijeni rezultati u velikoj zavisnosti od generisanog skupa plovidla i intenziteta dolazaka plovidla do brodske prevodnice.

Veoma je zanimljivo primetiti da su dobijene vrednosti parametara funkcija pripadnosti fazi skupovima ulaznih promenljivih optimizovanog FES-a dosta bliske početnim vrednostima originalnog FES-a. Da bi se dodatno ispitala ova zanimljivost vršene su simulacije i pretrage prostora rešenja u za različit broj jedinki i broj iteracija i vršene su mnogobrojne pretrage sa različitim početnim generisanim skupovima jedinki. Na osnovu ovih pretraga zaključeno je da na krajnje rezultate veliki uticaj ima razlika vrednosti  $Y_{ROK}$  i  $X_{RZK}$ . U slučajevima u kojima je ova razlika bila nešto manja od 40 dobijeni su rezultati koji su po ekonomskom kriterijumu bili bolji nego rezultati upotrebom neoptimizovanog FES-a. Drugim rečima, poboljšanja su primećena u svim slučajevima kada je ova razlika bila blizu 40 bez obzira na poziciju funkcija

pripadnosti na intervalu [0,100]. U praksi, ova razlika između  $Y_{ROK}$  i  $X_{RZK}$  predstavlja slučaj kada je plovilo koje je sa strane gde je zatvorena kapija 40 minuta bliže prevodnici od plovila koje je sa strane gde je otvorena kapija. Tih oko 40 minuta je otprilike neko vreme kada se odluka „lomi“ oko toga da li da se izvrši prevođenje plovila sa strane gde je zatvorena kapija uz prevođenje na prazno pre nego što stigne drugo plovilo tako da ni jedno ni drugo plovilo ne čekaju kod prevodnice ili da jedno plovilo malo sačeka u korist jednog manje prevođenja na prazno. Dobijeno rešenje svakako predstavlja optimalno rešenje na osnovu ekonomskog kriterijuma koji je korišćen kao kriterijum optimalnosti.

Rezultati vezani za ekonomski kriterijum (poslednja kolona u tabeli 6-5) su dobijeni za slučaj ekonomskog kriterijuma sa težinskim faktorima  $A = 1$  i  $B = 1$  (vidi jednačinu (5.1)). Težinski faktori  $A$  i  $B$  mogu da uzmu i druge numeričke vrednosti, u zavisnosti od važnosti pojedinačnih kriterijuma od kojih se sastoji ekonomski kriterijum: broj prevođenja na prazno (BPnP) i srednje vreme čekanja (SVČ). Da bi uzeli u obzir i druge slučajeve i razumeli varijacije rezultata i pozicija funkcija pripadnosti, razmatrana su dva dodatna slučaja. Prvi slučaj je ekonomski kriterijum sa težinskim faktorima  $A = 2$  i  $B = 0,5$  i drugi slučaj sa  $A = 0,5$  i  $B = 2$ . Prvi slučaj predstavlja ekonomski kriterijum u kojem je važnije smanjiti broj prevođenja na prazno nego srednje vreme čekanja. Drugi slučaj adresira suprotnu situaciju, odnosno SVČ je važnije minimizovati nego BPnP. U inicijalnom ekonomskom kriterijumu odnos između  $A$  i  $B$  je 1:1, dok je u nova dva slučaja taj odnos 4:1 za prvi slučaj, odnosno 1:4 za drugi slučaj.

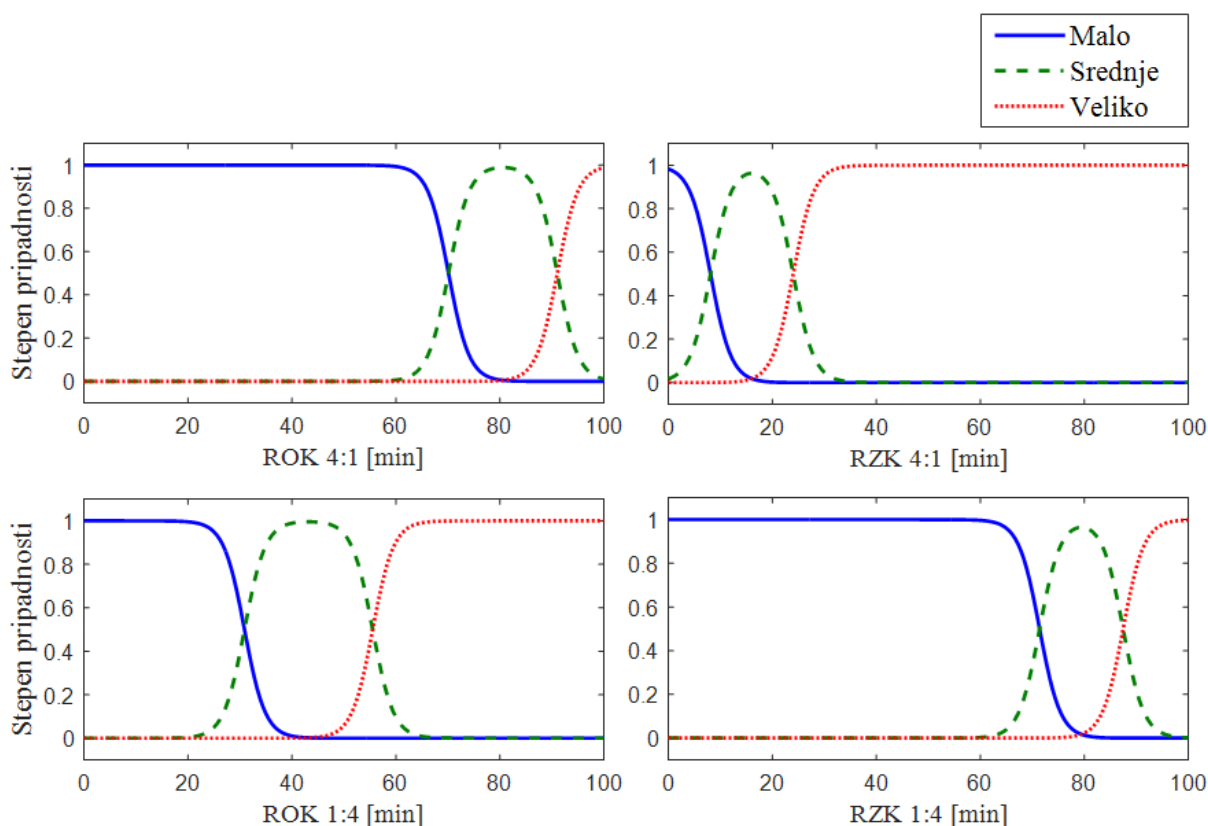
Nakon primene PSO algoritma sa novim kriterijumima optimalnosti (sa novim koeficijentima  $A$  i  $B$ ), dobijeni su novi parametri funkcija pripadnosti koji u najboljoj meri zadovoljavaju novo kreirane kriterijume. Tabela 6-6 prikazuje vrednosti ovih parametara kod originalnog FES-a, zatim FES-a optimizovanog po prvoj varijanti ekonomskog kriterijuma, i na kraju FES-ova optimizovanih po dva nova slučaja ekonomskog kriterijuma u kojima su koeficijenti  $A$  i  $B$  različiti od 1.

Tabela 6-6 Uporedni pregled parametara FES-a dobijenih po različitim formama ekonomskog kriterijuma

Parametar	Originalni	Optimizovani	Optimizovani	Optimizovani
FES-a	FES	FES 1:1	FES 4:1	FES 1:4
$X_{ROK}$	40	38,89	70,11	30,87
$Y_{ROK}$	60	61,94	91,03	55,53
$X_{RZK}$	20	22,31	8,10	71,39
$Y_{RZK}$	40	44,20	24,00	87,46

Funkcije pripadnosti ulaznih fazi promenljivih konstruisane na osnovu vrednosti parametara iz poslednje dve kolone u tabeli 6-6 su prikazane na Sl. 6.5.

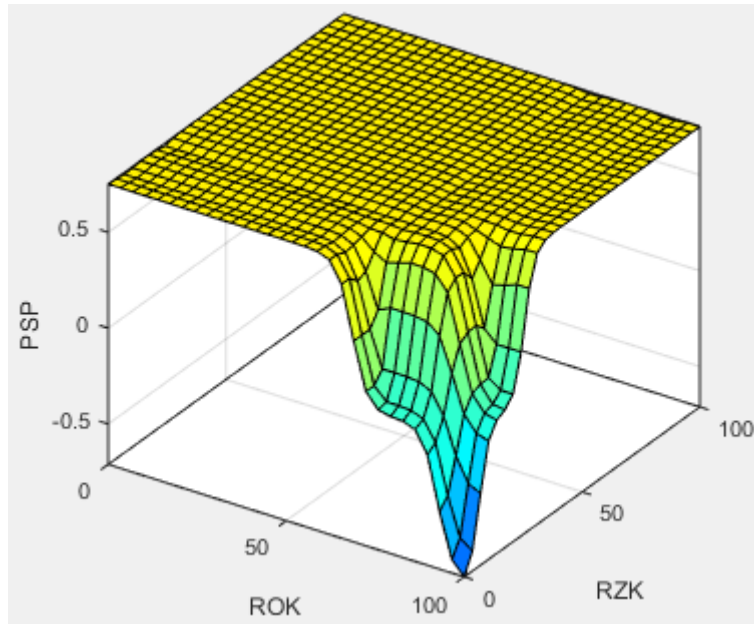
Gornja dva grafika na Sl. 6.5 prikazuju funkcije pripadnosti promenljivih „rastojanje sa strane otvorene kapije“ (ROK) i „rastojanje sa strane zatvorene kapije“ (RZK) u FES-u koji je optimizovan sa koeficijentima  $A = 2$  i  $B = 0,5$  u kriterijumu optimalnosti. Donja dva grafika na Sl. 6.5 prikazuju funkcije pripadnosti ulaznih promenljivih u FES-u koji je optimizovan sa koeficijentima  $A = 0,5$  i  $B = 2$ . Sa Sl. 6.5 se vidi da postoje značajne razlike u pozicijama funkcija pripadnosti u odnosu na originalni FES (Sl. 5.1 i Sl. 5.2). Tabela pravila (tabela 5-1) nije bila deo optimizacije i ista je kao u originalnom FES-u.



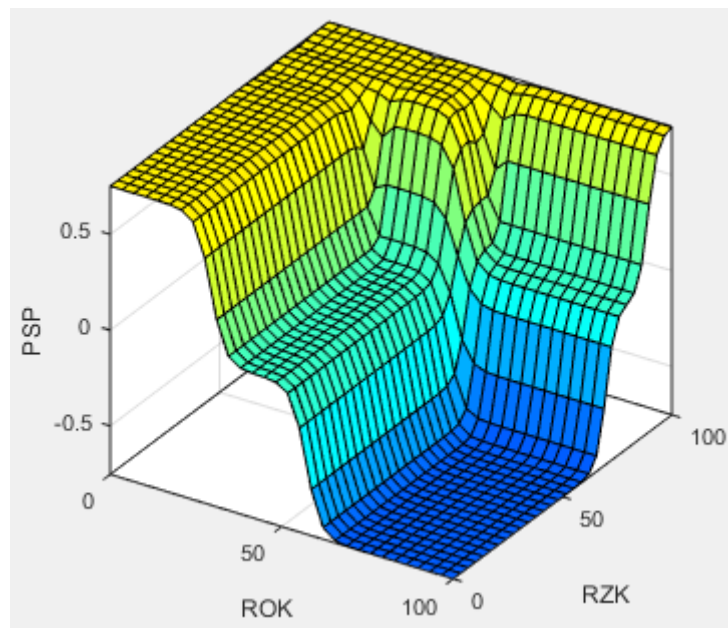
Sl. 6.5 Funkcije pripadnosti ulaznih fazi promenljivih sa parametrima dobijenim različitim ekonomskim kriterijumima

U prvom slučaju ( $A = 2$  i  $B = 0,5$ ) data je veća važnost delu ekonomskog kriterijuma koji se odnosi na broj prevođenja na prazno. Prevođenje na prazno nastaje kao rezultat samo jednog pravila iz baze pravila, kada je ROK „Veliko“ i RZK „Malo“ (vidi pravila u tabeli 5-1). U ovom slučaju, sudeći po gornja dva grafika (Sl. 6.5a i Sl. 6.5b), ovo pravilo se odnosi na situaciju kada plovilo prilazi prevodnici sa strane otvorene kapije na razdaljini većoj od 90 minuta, dok je plovilo koje prilazi prevodnici sa strane zatvorene kapije na razdaljini manjoj od 10 minuta. Razlika ovih vremena (80 minuta) je dva puta veća nego razlika istih parametara u osnovnom FES-u, što nam govori da će se po ovom kriterijumu prevođenje na prazno dogoditi samo u ekstremnim slučajevima, što je i bio cilj postavljanjem takvih parametara u ekonomski kriterijum. Ovim se smanjuje broj prevođenja na prazno jer se primenjuju stroži uslovi. U drugom slučaju ( $A = 0,5$  i  $B = 2$ ) data je veća važnost prosečnom vremenu čekanja na prevođenje. Sa donjih grafika na Sl. 6.5 se vidi da su pozicije fazi skupova (prevojne tačke funkcija pripadnosti) „Veliko“ za „ROK“ i „Malo“ za „RZK“ veoma bliske. Upravljačke površine fazi ekspertske sistema za varijante 4:1 i 1:4 koje se dobijaju uz pomoć gore predstavljenih funkcija pripadnosti su prikazane na Sl. 6.6 i Sl. 6.7, respektivno.

Rezultati simulacija sa novim ekspertskim sistemima čiji parametri su podešeni na osnovu ekonomskih kriterijuma sa različitim odnosom parametara  $A$  i  $B$  su upoređeni sa rezultatima originalnog FES-a i kriterijumi za poređenje su prikazani u tabeli 6-7 (navedeni odnos u tabeli kod optimizovanih FES-ova predstavlja odnos parametara  $A$  i  $B$ ).



Sl. 6.6 Upravljačka površ fazi ekspertskog sistema za varijantu 4:1



Sl. 6.7 Upravljačka površ fazi ekspertskog sistema za varijantu 1:4

Tabela 6-7 Rezultati simulacije dobijeni različitim ekspertskim sistemima

Fazi ekspertski sistem	Broj prevođenja na prazno u toku godine (BPnP)	Srednje vreme čekanja (SVČ) [min]
Originalni	768	138,0
Optimizovani 1:1	744	135,6
Optimizovani 4:1	670	144,2
Optimizovani 1:4	842	112,5

U tabeli 6-7 su prikazani rezultati dobijeni za četiri različite varijante FES-a: originalni i tri varijante gde su parametri funkcija pripadnosti optimizovani različitim kriterijumima. Kao što je već ranije prikazano u ovom poglavlju u tabeli 6-5 rezultati simulacije korišćenjem optimizovanog fazi ekspertskeg sistema pokazuju bolje rezultate u odnosu na one dobijene sa originalnim FES-om i po broju prevođenja na prazno i po prosečnom vremenu čekanja.

U slučaju kada su parametri odabrani kao  $A = 2$  i  $B = 0,5$  (Optimizovani 4:1 red u tabeli 6-7.) može se videti da je broj prevođenja na prazno, svega 670, smanjen za čitavih 98 u poređenju sa brojem dobijenim uz pomoć originalnog FES-a i manji za 74 u poređenju sa brojem prevođenja dobijenim pomoću prvo optimizovanog FES-a. Međutim, smanjen broj prevođenja na prazno je u ovom slučaju plaćen nešto većim vremenom čekanja (144,2 minuta) što je povećanje od 6,2 minuta, odnosno 8,6 minuta u poređenju sa vremenima dobijenim pomoću originalnog i prvo optimizovanog FES-a, tim redom. Ovi rezultati pokazuju da smanjenje broja prevođenja na prazno vodi do povećanja u srednjem vremenu čekanja, što je u skladu sa selekcijom parametara ekonomskog kriterijuma i logikom funkcionisanja brodske prevodnice. Sa druge strane, kada su odabrani koeficijenti  $A = 0,5$  i  $B = 2$  (kraća vremena čekanja su prioritet) u tom slučaju je dobijeno 842 prevođenja na prazno, što je više za 74 ili 98 u poređenju sa odgovarajućim rezultatima u prethodnim FES-ovima, dok je srednje vreme čekanja 112,5 minuta, što je za 25,5, odnosno 23,1 minuta manje.

Ovi rezultati su još zanimljiviji ako se posmatraju u procentima smanjenja, odnosno povećanja (videti tabelu 6-8). Prva kolona u tabeli predstavlja oznaku korišćenog fazi ekspertskeg sistema (dobijeni optimizacijama sa različitim odnosom kriterijuma). Pozitivne vrednosti predstavljaju poboljšanja (smanjenje) u odnosu na rezultate dobijene sa originalnim FES-om. Zanimljivo je videti da i u jednom i u drugom slučaju određeno procentualno poboljšanje po jednom kriterijumu prouzrokuje 2-3 puta manje procentualno pogoršanje po drugom kriterijumu. Narodskim jezikom i u jednom i drugom slučaju više dobijamo nego što gubimo.

Tabela 6-8 Relativne promene u rezultatima optimalnih FES-ova u poređenju sa originalnim FES-om

Fazi ekspertskeg sistem (FES)	Broj prevođenja na prazno (BPnP) [%]	Srednje vreme čekanja (SVČ) [%]
FES 1:1	+3.13	+1.75
FES 4:1	+12.76	-4.48
FES 1:4	-9.64	+18.49

### 6.3.1. Analiza, procena i izbor parametara kriterijuma optimalnosti

Iz predstavljenih rezultata se vidi da se sa dobrim izborom parametara kriterijuma optimalnosti mogu dobiti rešenja koja zadovoljavaju kriterijum kvalitetnog upravljanja. Ono što je ovde od velike važnosti je dobra procena koliko šta vredi na osnovu koje se mogu podesiti parametri  $A$  i  $B$  u ekonomskom kriterijumu. Rezultati prikazani u tabeli 6-8 pokrivaju tri slučaja, odnosno tri različita odnosa između koeficijenata  $A$  i  $B$  (težinski faktori za komponente kriterijuma optimalnosti). Prvi slučaj (1:1) je slučaj kada su  $BPnP$  i  $SVČ$  približno jednako važni, a druga dva slučaja (4:1 i 1:4) pokrivaju dve situacije kada je jedan kriterijum važniji od drugog. Faktori 0,5 i 2 su izabrani da definišu te odnose u istraživanju koje je prezentovano u ovoj disertaciji. U praktičnoj upotrebi, operater je taj koji mora da izabere ove koeficijente. Postavljaju se pitanja o tome kako analizirati, proceniti i usvojiti ovaj odnos u praksi. Prvo,

operater mora da analizira šta je važnije: potrošnja, odnosno štednja, vode i energije ili vremena zadržavanja plovila u zoni brodske prevodnice. Ovo je praktično veoma teško analizirati jer zavisi od puno nepredvidivih faktora. Potrošnja energije koja je potrebna za rad prevodnice zavisi isključivo od broja prevođenja. Međutim, značaj potrošnje vode zavisi od pozicije brodske prevodnice (otvoreni tok ili reka/kanal). Ako se prevodnica nalazi na kanalu, snabdevanje vodom je gravitaciono (uticanjem) ili se voda ubacuje pumpama. Poslednja opcija je, naravno, najskuplja. I ne samo to, na taj način osim što se troši voda troši se i energija za rad pumpi. Osim toga, ako se kanal koristi za više namena, u nekim periodima, voda se mora čuvati za snabdevanje stanovništva, naselja ili industrije. Onda na primer, u letnjim periodima se voda koristi za navodnjavanje i javlja se povećano isparavanje, kao i povećana potrošnja vode za razne druge namene. Sve ovo zavisi od slučaja do slučaja. Da bi se valjano analizirala situacija i donele procene mora se izvršiti i ekonomska analiza: cene električne energije, kubika vode, itd. Svi ovi faktori zahtevaju veoma kompleksnu analizu. Nakon sprovedene analize operater može da izabere šta je važnije i u kojoj meri. Na osnovu toga može da unese željene vrednosti parametara na ekranu nadzorno upravljačkog sistema. Te nove vrednosti se za početak posmatraju kao nove procene odnosa između dva koeficijenta i moguće je sprovesti novi proces optimizacije sa novim kriterijumom optimalnosti. Nakon završetka optimizacije, operater bi dobio povratnu informaciju u vidu dve vrednosti: procenjenu vrednost broja prevođenja na prazno tokom godine i procenjeno srednje vreme čekanja po plovilu u minutima. Ukoliko je operater zadovoljan ovim rezultatima, on može da ih prihvati i tada novi parametri funkcija pripadnosti ekspertskog sistema postaju aktivni, ili ako nije zadovoljan, ceo proces optimizacije može biti ponovljen sa novim koeficijentima  $A$  i  $B$ .

Koeficijenti  $A$  i  $B$  u suštini predstavljaju ekonomsku cenu prevođenja na prazno i cenu čekanja respektivno, i mogu se posmatrati na takav način. Ako je uprava brodske prevodnice u stanju da definiše troškove svakog dela kriterijuma tada se mogu odabrati optimalne vrednosti parametara  $A$  i  $B$ , i predstavljeni FES može biti optimizovan za taj određeni cilj. I na kraju, operateri se mogu nadati mnogo boljim performansama u procesu prevođenja plovila.

#### **6.4. Uporedni pregled metoda optimizacije: GA, PSO i ABC**

Dodatno istraživanje je vršeno kako bi se pronašla najbolja metoda za određivanje parametara FES-a. Poređene su tri široko rasprostranjene i veoma poznate globalne tehnike optimizacije: genetski algoritam (GA), optimizacija zasnovana na roju čestica (PSO) i optimizacija zasnovana na veštačkoj koloniji pčela (ABC). Populacija u svakom od ova tri algoritma se sastojala od ukupno 30 jedinki (čestica, pčela). Proces optimizacije je vršen u 15 iteracija (generacija). Broj iteracija je usvojen na osnovu empirijske analize, koja je pokazala da se nakon 15 iteracija ne uočavaju značajna poboljšanja za sva tri algoritma, što implicira da sve metode konvergiraju najmanje ka neposrednoj okolini optimalnog rešenja [138]. Svaka jedinka (čestica, pčela) se sastojala od četiri vrednosti (koordinate). Te vrednosti su parametri koji određuju položaj funkcija pripadnosti u fazi skupovima na način na koji je već opisano u poglavlju 5.2. Takođe su ovim istraživanjem uzete u obzir različite varijante ekonomskog kriterijuma sa različitim koeficijentima  $A$  i  $B$  (vidi jednačinu (5.1)). Koeficijenti  $A$  i  $B$  naglašavaju značaj svake komponente u kriterijumu optimalnosti (broj prevođenja na prazno i srednje vreme čekanja po plovilu). Ovi koeficijenti se mogu podesiti u skladu sa željenim ekonomskim performansama celokupnog sistema, definisanih od strane rukovodstva [139]. Na osnovu ovako definisanog kriterijuma fazi ekspertski sistem može biti podešen da obezbedi

željeno ponašanje sistema i da omogući kontrolu učinka, što je bio jedan od ciljeva ove disertacije. Kada bi rukovodstvo prevodnice moglo da proceni ekonomske troškove prevođenja na prazno i troškove kašnjenja (vremena zadržavanja) tada bi se koeficijenti  $A$  i  $B$  mogli podesiti spram tih procena. Odnosi koeficijenata u ovoj disertaciji su odabrani da daju različit značaj jednom i drugom delu ekonomskog kriterijuma. Tri varijante ekonomskog kriterijuma su uzete u obzir, sa različitim vrednostima koeficijenata  $A$  i  $B$ . U prvoj varijanti oba koeficijenta su bila jednaka 1, pružajući time jednak značaj i broju prevođenja na prazno i srednjem vremenu čekanja po plovilu. Druga varijanta je imala vrednosti  $A = 2$  i  $B = 0,5$  favorizujući broj prevođenja na prazno u odnosu 4:1 a treća  $A = 0,5$  i  $B = 2$  favorizujući srednje vreme čekanja po plovilu u odnosu 1:4.

Optimalne vrednosti parametara FES-a dobijene uz pomoć sva tri algoritma optimizacije prikazane su u tabeli 6-9. Može se primetiti da su sva tri algoritma konvergirala ka sličnim vrednostima parametara za svaku varijantu kriterijuma. Takođe, treba napomenuti da pozicije funkcija pripadnosti značajno variraju za različite varijante kriterijuma. Na osnovu toga se zaključuje da fazi parametri u velikoj meri zavise od željenog ponašanja sistema.

Tabela 6-9 Vrednosti parametara FES-a dobijene različitim formama ekonomskog kriterijuma

FES parametar	Originalni FES	Optimizovani FES 1:1			Optimizovani FES 4:1			Optimizovani FES 1:4		
		GA	PSO	ABC	GA	PSO	ABC	GA	PSO	ABC
$X_{ROK}$	40	48,10	49,94	49,28	70,55	70,11	71,22	32,11	31,92	33,65
$Y_{ROK}$	60	69,82	69,94	69,27	91,31	91,03	90,24	59,91	60,23	61,88
$X_{RZK}$	20	17,21	16,00	18,23	8,21	8,10	9,21	69,86	68,54	66,28
$Y_{RZK}$	40	46,62	48,32	47,43	25,04	24,00	25,32	89,72	88,31	89,73

Tabela 6-10 prikazuje rezultate simulacije dobijene korišćenjem upravljačkih strategija MVČ i MBP, zatim originalnog fazi sistema i novog, optimizovanog fazi sistema, za sva tri algoritma optimizacije. Broj prevođenja na prazno (BPnP), srednje vreme čekanja (SVČ) po plovilu i vrednost ekonomskog kriterijuma su prikazane za svaku upravljačku strategiju i za svaku varijantu kriterijuma.

Tabela 6-10 Uporedni prikaz rezultata simulacije za različite upravljačke strategije i ekonomske kriterijume

		Upravljačka strategija					
		MVČ	MBP	Originalni FES	Optimizovani FES		
						GA	PSO
Kriterijum 1:4	BPnP	1.410	50	746	824	822	802
	SVČ [min]	4,2	3.090,9	137,3	114,2	114,6	115,9
	Vrednost kriterijuma	713,4	6.206,7	647,6	640,3	640,3	<b>632,9</b>
Kriterijum 1:1	BPnP	1.410	50	746	726	720	726
	SVČ [min]	4,2	3.090,9	137,3	137,9	140,5	137,8
	Vrednost kriterijuma	1.414,2	3.140,9	883,3	863,9	<b>860,5</b>	863,8
Kriterijum 4:1	BPnP	1.410	50	746	670	670	676
	SVČ [min]	4,2	3.090,9	137,3	144,2	144,2	144,4
	Vrednost kriterijuma	2.822,1	1.645,4	1.560,7	<b>1.412,1</b>	<b>1.412,1</b>	1.424,2



Rezultati su poređeni po dobijenoj vrednosti ekonomskog kriterijuma definisanog u (5.1), za različite varijante težinskih faktora  $A$  i  $B$ . Najbolji rezultati za svaku varijantu kriterijuma su podebljani (naznačeni podebljanim fontom).

Može se primetiti da su najlošije vrednosti po svim varijantama ekonomskog kriterijuma dobijene korišćenjem MVČ i MBP, jer ove upravljačke strategije optimizuju samo jedan od dva pod-kriterijuma, odnosno prosečno vreme čekanja po plovilu i broj prevođenja na prazno, respektivno. Značajno poboljšanje vrednosti kriterijuma je postignuto korišćenjem originalnog (neoptimizovanog) FES-a, koji uzima u obzir oba pod-kriterijuma. Međutim, lako se vidi da su najbolje vrednosti kriterijuma u svim varijantama dobijene sa optimizovanim FES-ovima. U varijanti kriterijuma koja favorizuje srednje vreme čekanja (1:4) ABC je pokazao najbolje rezultate, dok ga GA i PSO prate dobijenim istim vrednostima kriterijuma. U slučaju jednake važnosti broja prevođenja na prazno i srednjeg vremena čekanja (varijanta 1:1), PSO je dao najbolju vrednost kriterijuma, dok su vrednosti dobijene uz pomoć GA i ABC gotovo iste. U varijanti kriterijuma 4:1, koja favorizuje broj prevođenja na prazno, GA i PSO su konvergirale ka istoj vrednosti, dok je ABC ostvario blago lošiji rezultat. Stoga, nije moguće izdvojiti jedan algoritam optimizacije kao najbolji za univerzalnu primenu. Može se samo zaključiti da su sva tri algoritma dala najbolje rešenje u nekoj varijanti kriterijuma i na osnovu toga da svaki od njih može biti uspešno primenjen u sličnim problemima.

Na kraju ovog poglavlja treba napomenuti još jednom da na algoritam optimizacije ne utiču vrednosti parametara postavljene u originalnom FES-u. Početne populacije (generacije) u sva tri algoritma su kreirane na potpuno slučajan način. Osim toga, prvobitni parametri funkcija pripadnosti su konstruisani na osnovu opisnih informacija proisteklih iz intervjua sa operaterima brodske prevodnice.

## 7. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

Jedna od osnovnih karakteristika i mana plovidbe na unutrašnjim veštačkim vodnim putevima je ograničena propusna sposobnost. Ovo ograničenje naročito dolazi do izražaja na plovnim kanalima na kojima postoje brodske prevodnice. Brodske prevodnice obično predstavljaju "usko grlo" na vodnom putu. U ovoj disertaciji definisan je metod za konstrukciju fazi ekspertskog sistema koji može da se primeni kao pomoć prevodničarima pri odlučivanju i upravljanju prevodnicom ili kao platforma za obuku novih operatera.

U prvom delu rada dat je osvrt na teorijska znanja potrebna za kreiranje fazi ekspertskog sistema. Drugi deo se bavi konstrukcijom jednog takvog sistema. Tu spadaju: određivanje fazi skupova, ulaznih fazi promenljivih, lingvističkih pravila i metoda implikacije, agregacije i defazifikacije. Na osnovu vremena potrebnog za prevođenje i ulaznog skupa plovila dobijeni su rezultati koji su upoređeni sa dva ekstremna kriterijuma – minimizacija broja prevođenja na prazno i minimizacija vremena čekanja. Izvršena je dodatna optimizacija fazi ekspertskog sistema upotrebom globalnih numeričkih algoritama i novi dobijeni rezultati su upoređeni sa prethodnim.

Upravljanje broskom prevodnicom zahteva analizu podataka iz stvarnog okruženja i donošenje odluka na osnovu tih podataka u realnom vremenu. Podaci neophodni za donošenje odluke su neprecizni i zasnovani su na trenutnom stanju nivoa vode u komori brodske prevodnice, stanju otvorenosti kapija i položaju ostalih upravljačkih organa i na procenama operatera. Rad u okviru ove disertacije se bavi problemom upravljanja u realnom vremenu jednostavnim procesom prevođenja plovila kao alternativa klasičnom upravljanju. Osnovna hipoteza – mogućnost primene fazi ekspertskog sistema je dokazana.

Definisan je postupak kreiranja FES-a koji može biti korišćen kao podrška u donošenju odluka ili kao poligon za obuku novih operatera za operativno upravljanje broskom prevodnicom. FES za upravljanje broskom prevodnicom se može direktno koristiti (sa ponovljenim proverama i verifikacijama) samo na određenom sistemu koji je modelovan (brodska prevodnica „Kucura“). U pitanju je jednostavan, nezavisan sistem prevođenja plovila u osnovnom tipu brodske prevodnice (jednokanalna brodska prevodnica sa dva suprotna stohastička toka zahteva za prevođenje). Kompletna procedura, od intervjuisanja operatera do razvoja FES-a, mora biti ponovljena u bilo kom drugom slučaju. Sistem koji je razvijen se može kod brodskih prevodnica koristiti kao:

- komponenta upravljačkog sistema sa automatskim ili poluautomatskim upravljanjem
- podrška u odlučivanju u klasičnom upravljanju
- poligon za obuku novih operatera.

U prvoj varijanti, FES može direktno da upravlja operacijama brodske prevodnice, smanjujući time verovatnoću grešaka nastalih ljudskim faktorom. U drugoj varijanti, FES bi se koristio kao sistem za podršku u odlučivanju koji bi pomagao operaterima, dok bi konačne odluke donosili operateri. Treća varijanta predstavlja softver za obuku prevodničara početnika.

Fazi ekspertski sistemi se projektuju za konkretne sisteme u konkretnom okruženju. To znači da razvijeni model nije moguće direktno primeniti pri upravljanju svim brodskim prevodnicama. Iako posmatrani objekat, brodska prevodnica "Kucura", čini jednu od 12 novih

brodskih prevodnica na hidrosistemu Dunav-Tisa-Dunav, potrebno je izvršiti identičnu analizu procesa za svaki sistem i formirati pravila upravljanja posebno za svaki sistem.

Moguće je proširivanje modela uvođenjem većeg broja kontrolisanih promenljivih, koje bi opisivale: denivelaciju, veličinu plovila i dr.; a moguće je i uvođenje stepena neizvesnosti koji bi uzimao u obzir hidrometeorološke uslove.

Promenom osnovnih postavki modela, sprovođenjem detaljne analize utroška vode i energije i troškova zadržavanja plovila, moguće je formiranje opštijeg modela upravljanja. U okviru novog modela, pored udaljenosti plovila od brodske prevodnice, uticaj na konačnu odluku - intenzitet želje za menjanje postojećeg stanja, u zavisnosti od stepena neizvesnosti, vršile bi i sledeće promenljive: utrošak energije, utrošak vode, denivelacija i dimenzije plovila.

U disertaciji je prezentovan novi pristup u polju upravljanja plovnim saobraćajem u zoni brodske prevodnice, što predstavlja retku primenu računarske inteligencije u vodnom saobraćaju. Osnovne karakteristike predloženog sistema su: prilagodljivost i fleksibilnost.

Ekspertski sistem predstavljen u ovoj disertaciji je kreiran za osnovni tip brodske prevodnice: dvosmerna brodska prevodnica sa jednom komorom. Shodno tome, ulazne fazi promenljive su prilično jednostavne. Dalji razvoj (istraživanje) bi mogao teći u dva smera. Prvi smer bi bio veća kompleksnost u funkcionisanju prevodnice. Umesto prevodnice sa jednom komorom, može se razmatrati upravljanje prevodnicom sa više komora. U realnim sistemima ova kompleksnost nije redak slučaj; prevodnice se često sastoje od dve komore koje rade u paraleli, a postoje prevodnice sa više komora povezanih na red ili paralelu (višekanalne prevodnice). Upravljanje ovim složenijim sistemima bi zahtevalo kompleksnije fazi ulazne promenljive i fazi pravila. Drugi smer budućih istraživanja bi mogao da bude istraživanje u cilju poboljšanja upravljanja kada imamo plovila različitih prioriteta i dimenzija (slučaj kod prevodnica koje mogu da opsluže više plovila istovremeno). Vojna, servisna, komercijalna i privatna plovila u realnim sistemima nemaju isti prioritet; određene klase plovila imaju veći prioritet u korišćenju prevodnice nego ostale. Takođe je moguće uspostaviti nivo fazi nepreciznosti koji bi razmatrao hidro-meteorološke uslove i neke druge specifične kvalitete. Ovo bi zahtevalo uvođenje dodatnih ulaznih promenljivi i dodatnih fazi pravila. Dobro dizajniran fazi ekspertski sistem bi u ovom slučaju služio kao veoma dragocena pomoć pri izboru upravljačke akcije u situaciji kada postoji puno zahteva za prevođenje od strane više plovila različitih prioriteta, dimenzija i udaljenosti od prevodnice.

Na osnovu rezultata prikazanih u disertaciji, može se zaključiti da primena algoritama optimizacije pruža značajna poboljšanja u kvalitetu upravljanja i što se tiče broja prevođenja na prazno i što se tiče srednjeg vremena čekanja plovila na prevođenje. Godišnji broj prevođenja na prazno sa optimizovanim FES-om je za 24 manji (u test simulaciji) nego broj dobijen pomoću originalnog FES-a, dok je prosečno vreme čekanja po plovilu skraćeno za 2,41 minut. Pokazano je da se sa dobrim izborom parametara može značajno poboljšati funkcionisanje sistema, pa se time optimizacioni pristup pokazao zadovoljavajući. Treba napomenuti da dobijeni rezultati zavise u mnogome od gustine i raspodele saobraćaja (dolazaka plovila do prevodnice). Predstavljeni ekspertski sistem je kreiran prema postojećim pravilima saobraćaja (maksimalna dozvoljena brzina plovidbe) i tehničkim karakteristikama brodske prevodnice (trajanje punjenja/praznjenja komore i trajanje ostalih operacija u zoni prevodnice). U slučaju da se trenutna situacija (pravila ili karakteristike) promeni, ekspertski sistem mora biti kreiran iz početka.

Parametri FES-a su optimizovani pomoću tri popularne globalne metode optimizacije sa ciljem da se minimizuju tri različite varijante ekonomskog kriterijuma optimalnosti. Prikazani

rezultati pokazuju da svi algoritmi, sa malim varijacijama u rezultatima, obezbeđuju poboljšanje performansi, odnosno smanjenje broja prevođenja na prazno i srednjeg vremena čekanja, u odnosu na prvobitno predloženi fazi ekspertske sistem. Prema tome, može se zaključiti da se svi ovi algoritmi mogu uspešno primeniti u ovoj vrsti upravljanja - problem planiranja saobraćaja.

Prema preporukama saobraćajne komisije za unutrašnje vodotokove [74], FES predložen u ovoj disertaciji je kreiran da bude u potpunosti kompatibilan sa rečnim informacionim servisima, koji se u širokoj meri koriste kako bi poboljšali upravljanje saobraćajem na unutrašnjim vodnim putevima.

Gore opisani upravljački metod ima praktični značaj jer omogućava podršku u odlučivanju u toku realnog vremena. Osim toga u disertaciji je predstavljena praktična interpretacija ovog metoda.

Predloženi fazi model takođe predstavlja osnovu koja se lako može integrisati u nadzorno upravljački sistem brodske prevodnice.

## 8. LITERATURA

- [1] S. Dragović, L. Maksimović, S. Pantelić and P. Pantelić, "History of Drainage and Irrigation in Vojvodina - The Province of Serbia and Montenegro," in *Proc. on ICID 21st European Regional Conference 2005: Integrated Land and Water Resources Management: Towards Sustainable Rural Development*, 2005.
- [2] B. L. McCartney, J. George, B. K. Lee, M. Lindgren and F. Neilson, "Inland Navigation: Locks, Dams, and Channels," ASCE - American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 1998.
- [3] B. W. Wiegmans and R. Konings, "Strategies and innovations to improve the performance of barge transport," *European Journal of Transport and Infrastructure Research - EJTIR*, vol. 7, no. 2, pp. 145-161, 2007.
- [4] R. R. Negenborn, Z. Lukszo and H. Hellendoorn, *Intelligent Infrastructures*, Delft, The Netherlands: Springer Science+Business Media B.V., 2010.
- [5] C. Willems and N. Schmorak, "River Information Services on the Way to Maturity," in *32nd PIANC International Navigation Congress*, Liverpool, United kingdom, 2010.
- [6] U. Kiencke, L. Nielsen, R. Sutton, K. Schilling, M. Papageorgiou and H. Asama, "The impact of automatic control on recent developments in transportation and vehicle systems," *Annual Reviews in Control*, vol. 30, no. 1, pp. 81-89, 2006.
- [7] H. W. Partenscky, *Inland waterways: Lock Installations (Binnenverkehrswasserbau: Schleusenanlagen - u originalu)*, Berlin: Springer, 1986.
- [8] S.-L. Wang and P. Schonfeld, "Scheduling Interdependent Waterway Projects through Simulation and Genetic Optimization," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 131, no. 3, pp. 89-97, 2005.
- [9] T. Bačkalić, *Upravljanje saobraćajem na veštačkim plovnim putevima ograničenih dimenzija u funkciji njihove propusne sposobnosti - Doktorska disertacija*, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 2001.
- [10] V. D. Bugarski, T. Bačkalić and U. Kuzmanov, "Fuzzy decision support system for ship lock control," *Expert Systems with Applications: An International Journal*, vol. 40, no. 10, pp. 3953-3960, 2013.
- [11] L. D. Smith, D. C. Sweeney II and J. F. Cambell, "Simulation of Alternative Approaches to Relieving Congestion at Locks in a River Transportation System," *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 60, no. 4, pp. 519-533, 2009.

- [12] Z. Radmilović, V. Maraš and S. Jovanović, "Ship Lock as General Queuing System with Batch Arrivals and Batch Service," *Promet - Traffic & Transportation*, vol. 19, no. 6, pp. 343-352, 2007.
- [13] D. Bailey and E. Wright, *Practical SCADA for Industry*, Burlington, MA: Newnes-Elsevier, 2003.
- [14] S. A. Boyer, *SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition (2nd Edition)*, North Carolina, USA: ISA - Instrument Society of America, 2009.
- [15] M. G. Yunusoglu and H. Selim, "A fuzzy rule based expert system for stock evaluation and portfolio construction: An application to Istanbul Stock Exchange," *Expert Systems with Applications, An International Journal*, vol. 40, no. 3, pp. 908-920, 2013.
- [16] D. Teodorović, P. Lučić, G. Marković and M. Dell'Orco, "Bee Colony Optimization: Principles and Applications," in *8th Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering, NEUREL 2006*, Belgrade, Serbia & Montenegro, 2006.
- [17] Q. He and L. Wang, "An effective co-evolutionary particle swarm optimization for constrained engineering design problems," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 20, no. 1, pp. 89-99, 2007.
- [18] Ž. Kanović, M. R. Rapaić and Z. D. Jeličić, "Generalized particle swarm optimization algorithm - Theoretical and empirical analysis with application in fault detection," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 217, no. 24, pp. 10175-10186, 2011.
- [19] C. Ting and P. Schonfeld, "Effects of Tow Sequencing on Capacity and Delay at a Waterway Lock," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 122, no. 1, pp. 16-26, 1996.
- [20] C. Ting and P. Schonfeld, "Efficiency versus Fairness in Priority Control: Waterway Lock Case," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 127, no. 2, pp. 82-88, 2001.
- [21] C.-J. Ting and P. Schonfeld, "Control Alternatives at a Waterway Lock," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 127, no. 2, pp. 89-96, 2001.
- [22] J. F. Campbell, L. D. Smith, D. C. Sweeney II, R. Mundy and R. M. Nauss, "Decision Tools for Reducing Congestion at Locks on the Upper Mississippi River," in *Proceedings of the 40th Hawaii International Conference on System Sciences*, Waikoloa, HI, 2007.
- [23] L. D. Smith, D. C. Sweeney and J. F. Campbell, "A Simulation Model to Evaluate Decision Rules for Lock Operations on the Upper Mississippi River," in *Proceedings of the 40th Hawaii International Conference on System Sciences*, Waikoloa, Hawaii, 2007.
- [24] L. A. Zadeh, "The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning," *Information Sciences*, vol. 8, pp. 199-249, 1975.

- [25] L. A. Zadeh, *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers by Lotfi A. Zadeh*, River Edge, NJ, USA: World Scientific Publishing Co., Inc., 1996.
- [26] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications* (3rd edition), Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2010.
- [27] E. H. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 121, no. 12, pp. 1585-1588, 1974.
- [28] V. Bugarski, F. Kulić, J. Đurđulov and V. Vasić, "Realization of Induction Machine Speed Controller using Dual mamdani Fuzzy Logic Controller," *PTEP - časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi*, vol. 13, no. 3, pp. 235-238, 2009.
- [29] S. D. Kaehler, "Fuzzy Logic Tutorial," Encoder - The Newsletter of the Seattle Robotics Society, March 1998. [Online]. Available: <http://www.seattlerobotics.org/encoder/mar98/fuz/flindex.html>. [Accessed 16 April 2015].
- [30] C. V. Altrock, *Fuzzy Logic and Neuro Fuzzy Applications Explained*, Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall; Pap/Dis edition (April 17, 1995), 1995.
- [31] L.-X. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Michigan, USA: Prentice Hall PTR, 1997.
- [32] L. H. Tsoukalas and R. E. Uhrig, *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*, New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [33] D. Teodorović and K. Vukadinović, *Traffic Control and Transport Planning: A Fuzzy Sets and Neural Networks Approach*, Norwel, MA: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [34] Y. Zhang and H. Ge, "Freeway Travel Time Prediction Using Takagi–Sugeno–Kang Fuzzy Neural Network," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 28, no. 8, pp. 594-603, 2013.
- [35] E. Onieva, V. Milanés, J. Villagrà, J. Pérez and J. Godoy, "Genetic optimization of a vehicle fuzzy decision system for intersections," *Expert Systems with Applications: An International Journal*, vol. 39, no. 18, pp. 13148-13157, 2012.
- [36] N. Siddique and H. Adeli, *Computational Intelligence: Synergies of Fuzzy Logic, Neural Networks and Evolutionary Computing*, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [37] H. Shavandi and H. Mahlooji, "A fuzzy queuing location model with a genetic algorithm for congested systems," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 181, no. 1, pp. 440-456, 2006.

- [38] S. Bouallegue, J. Haggege, M. Ayadi and M. Benrejeb, "PID-type fuzzy logic controller tuning based on particle swarm optimization," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, no. 3, pp. 484-493, 2012.
- [39] C.-C. Chen, "Design of PSO-based Fuzzy Classification Systems," *Tamkang Journal of Science and Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 63-70, 2006.
- [40] J.-q. Li and Y.-x. Pan, "A hybrid discrete particle swarm optimization algorithm for solving fuzzy job shop scheduling problem," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 66, no. 1-4, pp. 583-596, 2013.
- [41] G. Camps-Valls, J. D. Martin-Guerrero, J. L. Rojo-Alvarez and E. Soria-Olivas, "Fuzzy Sigmoid Kernel for Support Vector Classifiers," *Neurocomputing*, vol. 62, pp. 501-506, 2004.
- [42] P. Tapkan, L. Ozbakir and A. Baykasoglu, "Solving fuzzy multiple objective generalized assignment problems directly via bees algorithm and fuzzy ranking," *Expert Systems with Applications, An International Journal*, vol. 40, no. 3, pp. 892-898, 2013.
- [43] K. Michels, F. Klawonn, R. Kruse and A. Nürnberger, *Fuzzy Control: Fundamentals, Stability and Design of Fuzzy Controllers*, Berlin: Springer, 2006.
- [44] R. C. Eberhart and S. Yuhui, "Particle swarm optimization: Developments, applications and resources," in *IEEE Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation*, Seoul, 2001.
- [45] H. Xiaohui, „Particle Swarm Optimization,“ August 2010. [Na mreži]. Available: <http://www.swarmintelligence.org/index.php>. [Poslednji pristup 19 April 2015].
- [46] M. Clerc, *Particle Swarm Optimization*, John Wiley & Sons, 2010.
- [47] J. McCaffrey, "Artificial Intelligence: Particle Swarm Optimization," *MSDN Magazine - The Microsoft Journal for Developers*, vol. 2011, no. August, 2011.
- [48] K. M. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, Menlo Park, California 94025: Addison Wesley Longman, Inc., 1998.
- [49] T. Terano, K. Asai and M. Sugeno, *Applied fuzzy systems*, San Diego, CA, USA: Academic Press Professional, Inc., 1994.
- [50] A. F. Voloshyn, G. N. Gnatienco and E. V. Drobot, "Fuzzy membership functions in a fuzzy decision making problem," *International Journal "Information Theories & Applications"*, vol. 10, no. 4, pp. 243-247, 2001.
- [51] J. Garcia-Nieto, E. Alba and A. Carolina Olivera, "Swarm intelligence for traffic light scheduling: Application to real urban areas," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, no. 2, pp. 274-283, 2012.



- [52] R. M. Nauss, "Optimal sequencing in the presence of setup times for tow/barge traffic through a river lock," *European Journal of Operational Research*, vol. 187, no. 3, pp. 1268-1281, 2008.
- [53] V. Kecman, *Learning and Soft Computing: Support Vector Machines, Neural Networks, and Fuzzy Logic Models (Complex Adaptive Systems)*, Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2001.
- [54] B. Kosko, *Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic*, New York: Hyperion, 1993.
- [55] T. Comes, M. Hiete, N. Wijngaards and F. Schultmann, "Decision maps: A framework for multi-criteria decision support under severe uncertainty," *Decision Support Systems*, vol. 52, no. 1, pp. 108-118, 2011.
- [56] M. J. P. Castanho, F. Hernandez, A. M. De Re, S. Rautenberg and A. Billis, "Fuzzy expert system for predicting pathological stage of prostate cancer," *Expert Systems with Applications, An International Journal*, vol. 40, no. 2, pp. 466-470, 2013.
- [57] D. Dasgupta and Z. Michalewicz, *Evolutionary Algorithms in Engineering Applications*, Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- [58] P. Nikolić, F. Kulić, Bugarski Vladimir / D. Matić, „Centralizovano prikupljanje podataka u pogonima procesne industrije sa osvrtom na praktično rešenje,“ u *Zbornik radova regionalne konferencije industrijske energetike i zaštite životne sredine u zemljama Jugoistočne Evrope - IEEP*, Zlatibor, Srbija, 2010.
- [59] V. Bugarski, P. Nikolić, D. Matić and I. Kamenko, "Benefits of SCADA Systems with Examples in Agriculture," *Journal on Processing and Energy in Agriculture (former PTEP)*, vol. 15, no. 2, pp. 98-102, 2011.
- [60] P. Nikolić, D. Matić, V. Bugarski and I. Kamenko, "Using Web Technology in the Control and Supervision of Energy Consumption," *Journal on Processing and Energy in Agriculture (former PTEP)*, vol. 15, no. 2, pp. 103-105, 2011.
- [61] V. Bugarski, P. Nikolić and I. Kamenko, "Summarized information from multiple plants in one monitoring system: Advantages and disadvantages on example of boilers," *Journal on Processing and Energy in Agriculture (former PTEP)*, vol. 18, no. 1, pp. 22-24, 2014.
- [62] V. Bugarski, L. Francuski / F. Kulić, „Realizacija nadzorno upravljačkog sistema hladnjače,“ u *Zbornik radova regionalne konferencije industrijske energetike i zaštite životne sredine u zemljama Jugoistočne Evrope - IEEP*, Zlatibor, Srbija, 2008.
- [63] V. D. Bugarski, P. D. Nikolić, L. Ž. Francuski, F. J. Kulić / Z. D. Jeličić, „Nadzorno-upravljački sistemi u hladnjačama,“ *TERMOTEHNIKA - naučno-stručni časopis Društva termičara Srbije*, t. XXXV, br. 1, pp. 9-19, 2009.

- [64] P. Nikolić, V. Bugarski, D. Matić and F. Kulić, "Modern supervisory control system in a pneumatic transport system," *Journal on Processing and Energy in Agriculture (former PTEP)*, vol. 18, no. 2, pp. 91-93, 2014.
- [65] P. Nikolić, V. Bugarski, F. Kulić and Đ. Oros, "The Practical Example of Connecting the Plant Processing Industry into a Single Supervisory and Control System," *Journal on Processing and Energy in Agriculture (former PTEP)*, vol. 14, no. 2, pp. 109-111, 2010.
- [66] R. Temple, *The Genius of China: 3,000 Years of Science, Discovery, and Invention*, London: Inner Traditions, 2007.
- [67] I. Kovačević, „Dunavska strategija EU i Srbija; Plovidba i prevoz; Plovni putevi,“ Javna ustanova "Jugoslovenski pregled", 2011. [Na mreži]. Available: <http://www.dunavskastrategija.rs/sr/?p=45>. [Poslednji pristup 5 decembar 2013].
- [68] Javno vodoprivredno preduzeće "Dunav, Novi Sad", *Pravilnik o načinu i uslovima korišćenja vodoprivrednih objekata osnovne kanalske mreže hidrosistema Dunav-Tisa-Dunav za plovidbu*, Novi Sad: Javno vodoprivredno preduzeće "Dunav, Novi Sad", 1992.
- [69] B. d. Clercq, P. Bayart and R. Adams, "A New Numerical Lock Model Applied to a Lock Capacity Analysis of the Upper Scheldt," in *6th European Inland Waterway Navigation Conference, 10-11. June*, Baja, Hungary, 2010.
- [70] M. D. Dai and P. Schonfeld, "Metamodels for estimating waterway delays through series of queues," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 32, no. 1, pp. 1-19, 1998.
- [71] D. Pachakis and A. S. Kiremidjian, "Ship Traffic Modeling Methodology for Ports," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 129, no. 5, pp. 193-202, 2003.
- [72] J. C. Khisty, "Waterway traffic analysis of the Chicago River and lock," *Maritime Policy & Management*, vol. 23, no. 3, pp. 261-270, 1996.
- [73] G. Praetorius and M. Lützhöft, "Decision support for vessel traffic service (VTS): user needs for dynamic risk management in the VTS.," *Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation*, vol. 41, no. 1, pp. 4866-4872, 2012.
- [74] Inland Navigation Commission, "Guidelines and Recommendations for River Information Services," PIANC Secrétariat Général (The World Association for Waterborne Transport Infrastructure), B-1000 Bruxelles, Belgique, 2011.
- [75] PLATINA II project funded by the European Union (DG MOVE) under the 7th Framework Programme for RTD, "River Information Services Portal," [Online]. Available: <http://www.ris.eu/home>. [Accessed 18 April 2015].

- [76] Government of Serbia, Ministry of Transport (Directorate for Inland Waterways), "Implementation of River Information Services in Serbia," Danube Region Strategy, Belgrade, Republic of Serbia, 2009.
- [77] W. Filipowicz, "Vessel Traffic Control Problems," *Journal of Navigation*, vol. 57, no. 01, pp. 15-24, 2004.
- [78] P. Subašić, Fazi logika i neuronske mreže, Beograd: Tehnička knjiga, 1997.
- [79] H.-J. Zimmermann, Fuzzy Set Theory: And Its Applications (fourth edition), Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [80] J.-S. R. Jang, C.-T. Sun and E. Mizutani, Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, Prentice Hall, 1997.
- [81] L. Reznik, Fuzzy Controllers, Oxford: Newnes Butterworth-Heinemann, 1997.
- [82] H. T. Nguyen and M. Sugeno, Fuzzy Systems: Modeling and Control, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [83] K. Tanaka and H. O. Wang, Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach, New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [84] R. R. Yager and D. P. Filev, Essentials of Fuzzy Modeling and Control, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [85] J. Jantzen, „Design Of Fuzzy Controllers,“ Technical University of Denmark, Department of Automation, Bldg 326, DK-2800 Lyngby, Denmark, 1998.
- [86] J. Jantzen, Foundations of Fuzzy Control: A Practical Approach, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Ltd., 2013.
- [87] G. Feng, "A Survey on Analysis and Design of Model-Based Fuzzy Control Systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 14, no. 5, pp. 676-697, 2006.
- [88] D. Matić, V. Bugarski, F. Kulić / Z. Jeličić, „Jedna realizacija Fuzzy regulatora brzine elektromotornog pogona,“ u *Zbornik radova regionalne konferencije industrijske energetike i zaštite životne sredine u zemljama Jugoistočne Evrope - IEEP*, Zlatibor, Srbija, 2008.
- [89] R. Babuska and E. Mamdani, "Fuzzy control," Scholarpedia (the peer-reviewed open-access encyclopedia), 21 October 2011. [Online]. Available: [http://www.scholarpedia.org/article/Fuzzy\\_control](http://www.scholarpedia.org/article/Fuzzy_control). [Accessed 18 April 2015].
- [90] V. Bugarski, F. Kulić, J. Đurđulov and V. Vasić, "Speed Control of Induction Machine using Dual Fuzzy Logic Controller," in *roceedings of 50th International Symposium ELMAR 2008*, Zadar, Croatia, 2008.
- [91] V. Bugarski, P. Nikolić and F. Kulić, "Realization of Control of Pneumatic System for Positioning of Nozzle Based on Fuzzy Logic," in *Proceedings of Ninth Symposium on*

*Neural Network Applications in Electrical Engineering - NEUREL 2008*, Belgrade, Serbia, 2008.

- [92] D. Matić, B. Dumnić, F. Kulić and V. Bugarski, "Minimal Configuration PI Fuzzy Gain Scheduling Speed Controller in Indirect Vector Controls Scheme," in *Proceedings of the 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and drives - PEMD 2010*, Brighton, UK, 2010.
- [93] T. Bačkalić and V. Škiljaica, "Fuzzy approach to modeling of the control of the ship locking process," in *European Inland Waterway Navigation Conference*, Szeged, Hungary, 2005.
- [94] M. Inoue, K. Lindow, R. Stark, K. Tanaka, Y.-E. Nahm and H. Ishikawa, "Decision-making support for sustainable product creation," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 26, no. 4, pp. 782-792, 2012.
- [95] D. Teodorović / S. Kikuchi, *Fuzzy skupovi i primene u saobraćaju*, Beograd: Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, 1994.
- [96] V. Bugarski, D. Matić, P. Nikolić and I. Kamenko, "Controlling ship lock with fuzzy expert system," *Journal on Processing and Energy in Agriculture (former PTEP)*, vol. 16, no. 4, pp. 162-164, 2012.
- [97] Z. Pietrzykowski and J. Uriasz, "The Ship Domain - A Criterion of Navigational Safety Assessment in an Open Sea Area," *Journal of Navigation*, vol. 62, no. 01, pp. 93-108, 2009.
- [98] S.-L. Kao, K.-T. Lee, K.-Y. Chang and M.-D. Ko, "A Fuzzy Logic Method for Collision Avoidance in Vessel Traffic Service," *The Journal of Navigation*, vol. 60, pp. 17-31, 2007.
- [99] Inland Navigation Commission. Working Group 24, Permanent Working Group 1, Guidelines and recommendations for river information services, International Navigation Association, 2004.
- [100] G. Clarke, D. Reynders and E. Wright, *Practical Modern SCADA Protocols: DNP3, 60870.5 and Related Systems (IDC Technology)*, Burlington, Great Britain: Newnes, Elsevier, 2004.
- [101] P. Nikolić, V. D. Bugarski, F. Kulić / Đ. Oros, „Praktični primer povezivanja pogona procesne industrije u jedinstveni nadzorno upravljački sistem,“ *Journal on Processing and Energy in Agriculture (former PTEP)*, t. 14, br. 2, pp. 109-111, 2010.
- [102] V. D. Bugarski, F. Kulić, Z. Jeličić, V. Vasić and Đ. Oros, "Conception and realization of system for remote supervision and control of mineral fertilizer production," *Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi / PTEP*, vol. 11, no. 4, pp. 187-190, 2007.

- [103] V. D. Bugarski, F. Kulić, L. Francuski and V. Vasić, "The implementation of a distributed system for supervision and control of cold storages," *Časopis za procesnu tehniku i enrgetiku u poljoprivredi / PTEP*, vol. 12, no. 3, pp. 168-170, 2008.
- [104] V. D. Bugarski, P. D. Nikolić, L. Ž. Francuski, F. J. Kulić and Z. D. Jeličić, "Supervisory and control systems of cooling plants," *Termotehnika*, vol. 35, no. 1, pp. 9-19, 2009.
- [105] V. D. Bugarski, P. Nikolić and F. Kulić, "Modern SCADA systems in production of soy flour and grits and textured soy proteins," *Journal on Processing and Energy in Agriculture (former PTEP)*, vol. 14, no. 2, pp. 85-89, 2010.
- [106] P. Nikolić, V. Bugarski, F. Kulić / Z. Jeličić, „Upravljanje potrošnjom električne energije u kompresorskoj stanici hladnjače,“ u *Zbornik radova regionalne konferencije industrijske energetike i zaštite životne sredine u zemljama Jugoistočne Evrope - IEEP*, Zlatibor, Srbija, 2008.
- [107] Y. Collette and P. Siarry, *Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies (Decision Engineering)*, Springer, 2013.
- [108] V. R. Rao and V. Patel, "Multi-objective optimization of two stage thermoelectric cooler using a modified teaching-learning-based optimization algorithm," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26, no. 1, pp. 430-445, 2013.
- [109] K. Mela, T. Tiainen and M. Heinisuo, "Comparative study of multiple criteria decision making methods for building design," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 26, no. 4, pp. 716-726, 2012.
- [110] N. Wang, X. Meng, Q. Xu and Z. Wang, "A Unified Analytical Framework for Ship Domains," *Journal of Navigation*, vol. 62, no. 04, pp. 643-655, 2009.
- [111] Z. Pietrzykowski, "Ship's Fuzzy Domain – a Criterion for Navigational Safety in Narrow Fairways," *Journal of Navigation*, vol. 61, no. 03, pp. 499-514, 2008.
- [112] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*, Cambridge, MA: The MIT Press, 1975.
- [113] M.-C. Tsou, S.-L. Kao and C.-M. Su, "Decision Support from Genetic Algorithms for Ship Collision Avoidance Route Planning and Alerts," *Journal of Navigation*, vol. 63, no. 01, pp. 167-182, 2010.
- [114] H. Aytug and G. J. Koehler, "The effect of multiple optima on the GA run-time complexity," *European Journal of Operational Research*, vol. 178, no. 1, pp. 27-45, 2007.
- [115] B. K. Panigrahi, Y. Shi and M.-H. Lim, *Handbook of Swarm Intelligence: Concepts, Principles and Applications (Adaptation, Learning and Optimization)*, Berlin: Springer, 2011.

- [116] J. Kennedy and R. C. Eberhart, *Swarm intelligence: collective, adaptive*, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, Academic Press, 2001.
- [117] M. Ankur, D. Debanjan, S. P. Mehta, Shalivahan and B. B. Bhattacharya, "PSO vs. GA vs. VFSA: A comparison of performance, accuracy and resolution with respect to inversion of SP data," in *Proceedings on Japan Geoscience Union Meeting*, Makuhari, Chiba, Japan, 2011.
- [118] F. van den Bergh, *An Analysis of Particle Swarm Optimizers* (PhD thesis), Pretoria, South Africa: University of Pretoria, Faculty of Natural and Agricultural Science, 2001.
- [119] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs* (3rd edition), Berlin: Springer, 1999.
- [120] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," in *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 1995.
- [121] Y. Shafahi and M. Bagherian, "A Customized Particle Swarm Method to Solve Highway Alignment Optimization Problem," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 28, no. 1, pp. 52-67, 2013.
- [122] Y. Ren, G.-y. Cao and X.-j. Zhu, "Particle Swarm Optimization based predictive control of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)," *Journal of Zhejiang University - Science A: Applied Physics & Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 458-462, 2006.
- [123] V. Plevris and M. Papadrakakis, "A Hybrid Particle Swarm—Gradient Algorithm for Global Structural Optimization," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 48-68, 2011.
- [124] A. Sedki and D. Ouazar, "Hybrid particle swarm optimization and differential evolution for optimal design of water distribution systems," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 26, no. 3, pp. 582-591, 2012.
- [125] G. Xu, Z.-t. Yang and G.-d. Long, "Multi-objective optimization of MIMO plastic injection molding process conditions based on particle swarm optimization," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 5-8, pp. 521-531, 2012.
- [126] S. Ebbesen, P. Kiwitez and L. Guzzella, "A generic particle swarm optimization Matlab function," in *American Control Conference (ACC)*, Montreal, QC, 2012.
- [127] A. K. Kordon, *Applying Computational Intelligence: How to Create Value*, Berlin: Springer, 2010.
- [128] A. Banks, J. Vincent and C. Anyakoha, "A review of particle swarm optimization. Part II: hybridisation, combinatorial, multicriteria and constrained optimization, and

- indicative applications," *Natural Computing, An International Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 109-124, 2007.
- [129] R. A. Krohling and L. dos Santos Coelho, "Coevolutionary Particle Swarm Optimization Using Gaussian Distribution for Solving Constrained Optimization Problems," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 36, no. 6, pp. 1407-1416, 2006.
- [130] M. R. Rapačić and Ž. Kanović, "Time-varying PSO - convergence analysis, convergence-related parameterization and new parameter adjustment schemes," *Information Processing Letters*, vol. 109, no. 11, pp. 548-552, 2009.
- [131] Ž. S. Kanović, M. R. Rapačić and Z. D. Jeličić, "The Generalized Particle Swarm Optimization Algorithm: Idea, Analysis, and Engineering Applications," in *Swarm Intelligence for Electric and Electronic Engineering*, Portland, OR, Book News Inc., 2013, pp. 237-258.
- [132] Y. Shi and R. C. Eberhart, "Empirical Study of Particle Swarm Optimization," in *Proceedings of the 1999 IEEE International Congress on Evolutionary Computation, CEC 99*, Washington, DC, 1999.
- [133] M. Clerc and J. Kennedy, "The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 1, pp. 58-73, 2002.
- [134] A. Ratnaweera, S. K. Halgamuge and H. C. Watson, "Self-Organizing Hierarchical Particle Swarm Optimizer With Time-Varying Acceleration Coefficients," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 3, pp. 240-255, 2004.
- [135] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization," Erciyes University, Kayseri, Turkey, 2005.
- [136] D. Teodorović and M. Dell' Orco, "Bee colony optimization – a cooperative learning approach to complex transportation problems," in *Proceedings of 16th Mini-EURO Conference and 10th Meeting of EWGT 2005, Advanced OR and AI Methods in Transportation*, Poznań, 2005.
- [137] Ž. Kanović, V. Bugarski, T. Bačkalić, Z. Jeličić, F. Kulić / M. Petković, „Optimizacija rada brodske prevodnice upotrebom tehnika baziranih na imitaciji ponašanja rojeva,“ u *Zbornik radova sa XXVI nacionalne konferencije Procesna Tehnika i Energetika u poljoprivredi - PTEP 2014*, Kladovo, Srbija, 2014.
- [138] Ž. Kanović, V. Bugarski and T. Bačkalić, "Ship Lock Control System Optimization using GA, PSO and ABC: A Comparative Review," *PROMET - Traffic&Transportation*, vol. 26, no. 1, pp. 23-31, 2014.

- [139] Ž. Kanović, V. Bugarski, T. Bačkalić, Z. Jeličić, M. Petković and D. Matić, "Optimization of ship lock control system using swarm-based techniques," *Journal on Processing and Energy in Agriculture (former PTEP)*, vol. 18, no. 1, pp. 30-35, 2014.
- [140] L. P. Rees, J. K. Deane, T. R. Rakes and W. H. Baker, "Decision support for Cybersecurity risk planning," *Decision Support Systems*, vol. 51, no. 3, pp. 493-505, 2011.
- [141] A. J. Trappey, C. V. Trappey and C.-R. Wu, "Genetic algorithm dynamic performance for RFID reverse logistic management," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 11, pp. 7329-7335, 2010.
- [142] P. Kripakaran, B. Hall and A. Gupta, "A genetic algorithm for design of moment-resisting steel frames," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 44, no. 4, pp. 559-574, 2011.



## **KRATKA BIOGRAFIJA AUTORA**

Vladimir Bugarski je rođen 03. januara 1982. godine u Novom Sadu. Završio je osnovnu školu „Vuk Karadžić“ i gimnaziju „Jovan Jovanović Zmaj“, obe u Novom Sadu. Diplomске akademske (integrisane osnovne i master) studije upisao je 2001. godine na studijskom programu Računarstvo i automatika, smer Automatika i upravljanje sistemima Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu koje je završio 2007. godine sa prosekom 9,61. Doktorske studije upisuje 2007. godine. 2009. godine zapošljava se na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu kao saradnik u nastavi, a od 2011. godine kao asistent.