

# Model maritimnog ustroja pomorsko-prometnog toka na prilaznim plovnim putovima

---

**Frančić, Vlado**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2012**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:188:222729>

*Rights / Prava:* [Attribution-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-07**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka Library - SVKRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

**MR.SC. VLADO FRANČIĆ**

**MODEL MARITIMNOG USTROJA POMORSKO-  
PROMETNOG TOKA NA PRILAZNIM PLOVNIM  
PUTOVIMA**

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

**Rijeka, 2012.**

Doktorska disertacija pod naslovom „Model maritimnog ustroja pomorsko-prometnog toka na prilaznim plovnim putovima“ obranjena je na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci 28. lipnja 2012. godine pred stručnim povjerenstvom u sastavu:

1. Dr.sc. Robert Mohović, redoviti profesor Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci
2. Dr.sc. Damir Zec, redoviti profesor Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci
3. Dr.sc. Toni Bielić, docent Pomorskog odjela Sveučilišta u Zadru.

## Sažetak

Osnovna svrha i cilj istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji s naslovom „Model maritimnog ustroja pomorsko-prometnog toka na prilaznim plovnim putovima“ je opis i kvantificiranje sigurnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima te određivanje optimalnog maritimnog ustroja pomorsko-prometnog toka. Navedeni cilj je ostvaren izradom konceptualnog modela maritimnog ustroja pomorsko-prometnog toka.

Modelom je sigurnost plovidbe prikazana funkcijom sigurnosti kao kombinacijom funkcije opće sigurnosti i funkcije povećane opasnosti. Prva funkcija opisuje opće prometno stanje na plovnom putu, a druga sigurnost plovidbe pri povećanoj opasnosti.

Funkcija sigurnosti je definirana elementima sigurnosti plovidbe te koeficijentima sigurnosti koji ovise o karakteristikama pomorskog prometa na plovnom području. Promjenom vrijednosti koeficijenata sigurnosti postiže se univerzalnost modela, odnosno mogućnost korištenja modela u različitim plovnim područjima. Pri istim vrijednostima koeficijenata, funkcija sigurnosti omogućuje usporedbu razine sigurnosti plovidbe različitog pomorskog prometa.

Testiranje modela je napravljeno pomoću dinamičkog simulacijskog modela korištenjem stvarnih podataka pomorskog prometa. Rezultati simulacije dokazuju mogućnost korištenja modela za određivanje optimalnog maritimnog ustroja pomorskog prometa na prilaznim plovnim putovima i posljedično za povećanje sigurnosti plovidbe i djelotvornosti pomorsko-prometnog toka.

Vrijednost predloženog modela ogleda se u mogućnosti njegove praktične primjene pri uspostavljanju odgovarajućih mjera i aktivnosti s ciljem poboljšanja sigurnosti plovidbe, prvenstveno kroz optimiziranje rada službi nadzora i upravljanja pomorskim prometom.

**Ključne riječi:** sigurnost plovidbe, pomorsko-prometni tok, model maritimnog ustroja, prilazni plovní putovi, funkcija sigurnosti.

## Summary

The basic purpose and objective of the research in this doctoral thesis entitled "Model of marine traffic flow organization in the approaching waterways" is to describe and quantify the safety of navigation in the approaching waterways and to determine the optimal organization of marine traffic flow. The objective is achieved by creating a conceptual model of marine traffic flow organization.

In this model, the safety of navigation is represented by the function of safety as the combination of general safety function and the function of increased risk. The first function describes the general state of marine traffic in the waterway, while the second one describes the safety of navigation in increased risk.

Function of safety is defined by elements of the safety of navigation and safety coefficients that depend on the characteristics of the marine traffic in the navigable area. By changing the value of safety coefficients the universality of the model is achieved, resulting in the possibility of using the model in different navigable areas. While using the same values of the coefficients, the safety function allows comparison of various levels of the safety of navigation in different marine traffic situations.

Testing of the model was performed by means of a dynamic simulation model using real data on marine traffic. Simulation results support the possibility of using the model for determining the optimal marine traffic flow organization in the approaching waterways and consequently for increasing safety of navigation and efficiency of marine traffic flow.

The significance of the proposed model lies in the possibility of its practical application for the establishment of appropriate measures and activities aimed at improving safety of navigation, primarily through optimization of the vessel traffic services.

**Key words:** safety of navigation, marine traffic flow, model of marine traffic flow organization, approaching waterways, function of safety

# SADRŽAJ

Sažetak .....	i
Summary .....	ii
<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>iii</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBRAZLOŽENJE TEME DOKTORSKE DISERTACIJE I DEFINIRANJE PROBLEMA ISTRAŽIVANJA .....	1
1.2 CILJEVI ISTRAŽIVANJA I RADNE TEZE .....	1
1.3 DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA .....	3
1.4 STRUKTURA DOKTORSKE DISERTACIJE .....	4
<b>2. OSNOVNA OBILJEŽJA POMORSKE PLOVIDBE .....</b>	<b>6</b>
2.1 MARITIMNA SVOJSTVA BRODOVA .....	7
2.1.1 Veličina i dimenzije broda .....	7
2.1.2 Manevarska obilježja broda .....	11
2.1.3 Brzina broda .....	16
2.1.4 Vrste brodova .....	18
2.2 OBILJEŽJA PRILAZNIH PLOVNIH PUTOVA .....	25
2.2.1 Hidrografska obilježja .....	27
2.2.2 Navigacijska obilježja plovnog puta .....	30
2.2.3 Meteorološki i oceanološki uvjeti na plovnom području .....	31
2.2.3.1 Meteorološki elementi .....	32
2.2.3.2 Oceanološki elementi .....	33
2.3 OBILJEŽJA POMORSKOG PROMETA I POMORSKO-PROMETNOG TOKA .....	36
<b>3. ORGANIZACIJSKO-SIGURNOSNI USTROJ POMORSKO-PROMETNOG TOKA..</b>	<b>39</b>
3.1 PARAMETRI POMORSKO-PROMETNOG TOKA .....	39
3.1.1 Gustoća pomorskog prometa .....	39
3.1.2 Brzina pomorsko-prometnog toka .....	41
3.1.3 Količina pomorskog prometa .....	41
3.2 SUDARNI PARAMETRI .....	44
3.3 TEHNOLOŠKA I ORGANIZACIJSKA PODRŠKA BRODOVIMA U PLOVIDBI .....	46
3.3.1 Sustav nadzora i upravljanja pomorskom plovidbom .....	46
3.3.2 Sustav usmjerene plovidbe kao dio plovnog puta .....	49
<b>4. MODEL MARITIMNOG USTROJA POMORSKOG PROMETA NA PRILAZNIM     PLOVNIM PUTOVIMA .....</b>	<b>51</b>
4.1 MARITIMNI USTROJ POMORSKOG PROMETA .....	51

4.1.1	Opće pretpostavke.....	51
4.1.2	Organizacija sigurnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima.....	52
4.2	FUNKCIJA SIGURNOSTI PLOVIDBE.....	57
4.2.1	Opća sigurnost plovidbe.....	60
4.2.1.1	<i>Funkcija prostornog zauzeća plovidbenog područja.....</i>	<i>61</i>
4.2.1.2	<i>Funkcija prostorne razdiobe brodova.....</i>	<i>67</i>
4.2.1.3	<i>Međusobni odnos brodova.....</i>	<i>71</i>
4.2.2	Sigurnosti plovidbe pri povećanoj opasnosti.....	73
4.3	ANALIZA FUNKCIONALNE ZAVISNOSTI ELEMENATA SIGURNOSTI PLOVIDBE.....	77
4.3.1	Granične vrijednosti sudarnih parametara.....	77
4.3.2	Koeficijenti opće funkcije sigurnosti.....	78
4.3.2.1	<i>Koeficijenti funkcije prostornog zauzeća.....</i>	<i>78</i>
4.3.2.2	<i>Koeficijenti funkcije prostorne razdiobe brodova.....</i>	<i>81</i>
4.3.2.3	<i>Koeficijent najmanje udaljenosti mimoilaženja.....</i>	<i>84</i>
4.3.3	Koeficijenti funkcije povećane opasnosti.....	85
<b>5.</b>	<b>FUNKCIONALNA ANALIZA SIGURNOSTI PLOVIDBE.....</b>	<b>87</b>
5.1	KARAKTERISTIČNA STANJA POMORSKOG PROMETA NA PLOVNOM PUTU.....	87
5.2	ANALIZA FUNKCIJA SIGURNOSTI.....	87
5.2.1	Prikaz funkcije prostornog zauzeća.....	88
5.2.2	Prikaz funkcije prostorne razdiobe.....	91
5.2.3	Prikaz funkcije međusobnih odnosa.....	92
5.2.4	Prikaz funkcije povećane opasnosti.....	93
<b>6.</b>	<b>SIMULACIJSKI MODEL POMORSKOG PROMETA NA PRILAZNIM PLOVNIM PUTOVIMA.....</b>	<b>96</b>
6.1	ULAZNI PARAMETRI I ALGORITAM SIMULACIJE.....	96
6.2	EVALUACIJA I VREDNOVANJE REZULTATA SIMULACIJE.....	99
<b>7.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>106</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>108</b>
	<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>114</b>
	<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>116</b>
	<b>POPIS SIMBOLA.....</b>	<b>117</b>
	<b>PRILOZI.....</b>	<b>120</b>
	PROGRAMSKI KOD SIMULACIJSKOG MODELA.....	120
	ANKETNI UPITNIK.....	126

# 1. UVOD

## 1.1 OBRAZLOŽENJE TEME DOKTORSKE DISERTACIJE I DEFINIRANJE PROBLEMA ISTRAŽIVANJA

U svjetskom gospodarskom razvitku uloga prometa je danas od iznimne važnosti. Najveće količine tereta prevoze se morskim putem što znači da je neophodno osigurati efikasan i siguran pomorski promet. Veliko povećanje količine pomorskog prometa u zadnjem desetljeću te njegova koncentracija na određenim pravcima, neposredno je dovela do potrebe unapređenja organizacije pomorskog prometa. U tom pogledu potreba optimalnog ustroja pomorskog prometa u ograničenim područjima, kao što su prilazni plovni putovi prema lukama, ishodišnim točkama pomorskog prometa, ili u područjima velike gustoće prometa, postaje od izuzetne važnosti.

Djelotvoran i siguran pomorski promet ovisi o obilježjima pomorsko-prometnog toka kojeg definiraju brojni čimbenici povezani sa sigurnom plovidbom brodova, bilo da se radi o plovidbi neograničenim područjima ili područjima prilaznih plovnih putova. Kapacitet prilaznih plovnih putova, odnosno trenutno prometno opterećenje neposredno utječe na sigurnost plovidbe. Povećano prometno opterećenje povećava rizik pojave nezgode, a smanjuje razinu sigurnosti plovidbe.

U tom smislu, jedan od važnih uvjeta djelotvorne organizacije pomorsko-prometnog toka na prilaznim plovnim putovima predstavlja utvrđivanje prometnog opterećenja i posljedično utvrđivanje odgovarajuće razine sigurnosti plovidbe. Sigurnost plovidbe ovisi o većem broju zavisnih čimbenika koji su povezani s obilježjima prilaznog plovnog puta, pomorskog prometa te obilježjima brodova u plovidbi. Analizom i istraživanjem međuzavisnosti navedenih čimbenika i njihovih utjecaja na plovidbu moguće je odrediti vrijednost koja će predstavljati razinu sigurnosti plovidbe na određenom plovnom putu. S obzirom da se sigurnost plovidbe može promatrati s različitih aspekata potrebno je utvrditi i načela sigurnosti koja će na najbolji način definirati prometno opterećenje s ciljem određivanja razine sigurnosti plovidbe.

Na temelju izloženog predmeta istraživanja, a u svezi s izabranim problemom, postavljena je sljedeća znanstvena hipoteza doktorske disertacije: *„Kvantificiranjem sigurnosti plovidbe temeljem prometnog opterećenja, analizirajući obilježja plovnog puta, pomorskog prometa i brodova u plovidbi, moguće je odrediti optimalan maritimni ustroj pomorskog prometa na prilaznim plovnim putovima, te time povećati sigurnost plovidbe i djelotvornost pomorsko-prometnog toka“.*

## 1.2 CILJEVI ISTRAŽIVANJA I RADNE TEZE

Osnovna tema ove disertacije je analiza pomorskog prometa na prilaznim plovnim putovima u cilju pronalaženja optimalnog maritimnog ustroja prometa sa stajališta sigurnosti plovidbe. Ako se pretpostavi da je kriterij optimalnosti razina



sigurnosti plovidbe, onda optimalan maritimni ustroj podrazumijeva stanje pomorskog prometa uz zadane uvjete pri kojima je razina sigurnosti plovidbe najveća.

Iz navedenog proizlazi potreba znanstvenog definiranja načela sigurnosti pomorskog prometa te određivanja osnovnih čimbenika koji će opisati pojam sigurnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima.

Kao rezultat znanstvenoistraživačkog rada definiran je konceptualni model kojim se omogućilo kvantificiranje razine sigurnosti plovidbe u funkciji vremena, s obzirom na definirane sigurnosne čimbenike i načela. Osim prikaza konceptualnog modela, u cilju praktične primjene rezultata rada u poboljšanju sigurnosti plovidbe, prikazan je simulacijski model. Simulacijskim modelom prezentirane su i verificirane postavke konceptualnog modela. U svakodnevnoj primjeni model se može koristiti za određivanje trenutnih i vršnih prometnih opterećenja na plovnom putu kao i kapaciteta pri projektiranju i izgradnji novih luka i prilaznih plovnih putova.

Sažimanjem navedenog, temeljni cilj istraživanja jest ocjena elemenata, utvrđivanje načela sigurnosti pomorskog prometa te određivanje konceptualnog modela u svrhu definiranja optimalnog maritimnog ustroja na prilaznim plovnim putovima. Da bi se došlo do vjernog i smislenog modela koji mjeri razinu sigurnosti plovidbe neophodno je bilo definirati parametre sigurnosti plovidbe broda, kao i veličinu njihovog utjecaja na pomorsko-prometni tok. Za ostvarenje ovih ciljeva istraživanja postavljani su sljedeći zadaci:

- sistematizirati i analizirati dosadašnje teorijske i empirijske pristupe određivanja maritimnog ustroja na prilaznim plovnim putovima,
- odrediti čimbenike sigurnosti plovidbe važne za izradu konceptualnog modela kvantificiranja razine sigurnosti plovidbe,
- odrediti načela sigurnosti plovidbe, njihove specifičnosti te utjecaj na sigurno odvijanje plovidbe,
- izraditi opći konceptualni model temeljem međuovisnosti čimbenika sigurnosti i utvrđenih načela sigurnosti plovidbe,
- razviti simulacijski model te ga verificirati stvarnim pomorsko-prometnim tokom,
- primjenom razvijenog modela analizirati mogućnosti korištenja modela pri poboljšanju sigurnosti pomorskog prometa na određenom plovnom putu,
- predložiti mogućnosti daljnjeg istraživanja ovoga područja.

Rezultati znanstvenog istraživanja koji su prezentirani u doktorskoj disertaciji trebali bi implicirati znanstveni doprinos tehničkim znanostima u teorijskom i praktičnom smislu.

### 1.3 DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Organizacija pomorskog prometa na prilaznim plovnim putovima obrađena je u većem broju znanstvene i stručne literature. Dosadašnja istraživanja, u domaćoj i stranoj znanstvenoj i stručnoj literaturi, uglavnom se bave analizom pomorsko-prometnog toka u cilju planiranja komercijalnog djelovanja luke te procjene i analize tehničko-tehnoloških obilježja luke čime se omogućuje efikasnije lučko poslovanje. U tim istraživanjima rijetko se obrađuju sigurnosna obilježja pomorskog prometa. Pomorski promet se obrađuje analitičkim metodama i putem simulacije. Kako analitički modeli ne mogu pružiti potpuno točne rezultate u kompleksnom prometnom sustavu, a zahvaljujući razvoju računalne tehnologije, simulacijsko modeliranje je u tim radovima najčešće.

G.J. van de Ruit, M. van Schuylenburg i J.A. Ottjes (1995) u članku „Simulation of Shipping Traffic Flow in the Maasvlakte Port Area of Rotterdam“ istražuju kako će povećanje pomorskog prometa u luci Rotterdam u razdoblju od sljedećih 15 godina utjecati na zastoje u prometu, duljine zastoja i nastanke uskih grla na prilaznim plovnim putovima. Model kojim se opisuje pomorski promet sastoji se od pojednostavljene mreže točaka križanja putova koji čine sektore u kojim brodovi slijede plovni put. Rezultati istraživanja daju postotke zagušenja pomorskog prometa, odnosno prihvatljivost budućeg planiranog prometa.

Geert F. Thiers i Gerrit K. Janssens (1998) u članku pod nazivom “A Port Simulation Model as a Permanent Decision Instrument“ izradili su simulaciju pomorskog prometa u cilju donošenja odluke o gradnji kontejnerskog terminala. Model se primjenjuje na prilaznim plovnim putovima luci Antwerpen s mogućnošću proširenja i ponovnog korištenja za buduće odluke pri povećanom pomorskom prometu u istoj luci ili planiranju drugih luka. Modelom se simulira pomorski promet na rijeci uključujući interakcije između brodova te brodova i okruženja.

Dimitris Pachakis i Anne S. Kiremidjian (2003) u članku „Ship Traffic Modeling Methodology for Ports“ prezentiraju metodologiju za modeliranje pomorskog prometa. Prikazana metodologija temelji se na kreiranju simulacijskog algoritma koji obuhvaća obilježja kontejnerskog pomorskog prometa u SAD-u. Razvijen je odnos između duljine broda i njegovog gaza te kapaciteta.

Branislav Dragović, Nam Kyu Park i Zoran Radmilović (2006) u članku „Ship-berth Link Performance Evaluation: Simulation and Analytical Approaches“ ocjenjuju efikasnost operacija i procesa u vezi brod-vez analizirajući parametre kao što su iskoristivost veza, prosječan broj čekanja brodova, prosječno vrijeme boravka brodova u luci, itd. Autori predlažu dva modela, prvi temeljen na simulaciji te drugi temeljen na teoriji redova čekanja.

Gi-Tae Yeo, Michael Roe i Sang-Moon Soak (2007) u članku „Evaluation of the Marine Traffic Congestion of North Harbor in Busan Port“ kao i autori u prethodnom članku analiziraju potencijalno zagušenje pomorskog prometa u luci zbog njegovog povećanja i predlažu odgovarajuća rješenja u cilju smanjenja čekanja.

U nešto starijim istraživanjima obrađena je tema određivanja optimalne veličine luke i procjene zastoja i to u člancima Nicolau, S. (1967) „Berth Planning and

Evaluation of Congestion and Cost“ te Noritake M. i Kimura S. (1990) „Optimum Allocation and Size of Seaports“.

U navedenoj literaturi prevladavaju radovi koji tretiraju simulacijski pristup u određivanju elemenata pomorsko-prometnog toka. Međutim, do sada nije bilo radova koji stavljaju naglasak na sagledavanje pomorskog-prometnog toka na prilaznim plovnim putovima uzimajući u obzir elemente sigurnosti plovidbe.

Navedeni razlozi bili su povod da se u ovoj doktorskoj disertaciji obradi tematika kvantificiranja sigurnosti plovidbe, a u cilju pronalazjenja optimalnog maritimnog ustroja pomorskog prometa na prilaznim plovnim putovima. Sustavna obrada uključuje izradu modela koji opisuje funkcionalne veze elemenata sigurnosti na plovnom putu i daje generalne postavke maritimnog ustroja prilaznih plovnih putova sa stajališta sigurnosti plovidbe.

#### **1.4 STRUKTURA DOKTORSKE DISERTACIJE**

Struktura doktorske disertacije s naslovom "*Model maritimnog ustroja pomorsko-prometnog toka na prilaznim plovnim putovima*" proizlazi iz definiranih ciljeva i zadataka, te ocjene dosadašnjih istraživanja. Tekst je grupiran u sedam povezanih dijelova.

U prvom poglavlju definiran je problem i predmet istraživanja, postavljena znanstvena hipoteza te određena svrha i cilj istraživanja. Dodatno, prezentirana su i ocijenjena dosadašnja istraživanja u području sigurnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima te je obrazložena struktura disertacije.

U drugom poglavlju detaljno su opisana obilježja pomorske plovidbe. Naglasak je stavljen na opis obilježja i elemenata pomorskog prometa o kojem neposredno ovisi sigurnost plovidbe. Temelj analize predstavljaju posebnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima obzirom na mogućnost kvantificiranja sigurnosti plovidbe. S obzirom na potrebu unapređenja ustroja pomorske plovidbe nužno je klasificirati utjecajne elemente (dijelove sustava) i to brod, luku te prilazni plovni put. U tom smislu opisana su maritimska svojstva broda, prometno opterećenje na prilaznim plovnim putovima, elementi sigurnosti plovidbe te obilježja prilaznog područja i plovnog puta.

U trećem poglavlju definiran je organizacijsko-sigurnosni ustroj u cilju utvrđivanja optimalnog maritimnog ustroja pomorskog prometa na prilaznim plovnim putovima. Opisani su načini organizacije sigurnosti plovidbe kao i čimbenici sigurnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima. Sigurno odvijanje pomorskog prometa neposredno ovisi o maritimnim obilježjima broda te o raspoloživim plovnim putovima koji u pravilu predstavljaju nepromjenjive uvjete sigurnosti plovidbe. Nasuprot njima, gustoća pomorskog prometa, organizacija i upravljanje prometom te korištenje dodatnih mjera sigurnosti (npr. korištenje tegljača i peljara) prilagodljivi su uvjeti koji utječu na razinu sigurnosti plovidbe, a samim time i na optimalan ustroj pomorskog prometa pri čemu je naglasak stavljen na odvijanje nesmetanog pomorskog prometa na prilaznim plovnim putovima.

U četvrtom poglavlju sukladno pretpostavkama obrađenim u prethodnim poglavljima izrađen je konceptualni model maritimnog ustroja na prilaznim plovnim putovima. Modelom je sigurnost plovidbe prikazana u obliku funkcije koja ovisi o čimbenicima sigurnosti u skladu s unaprijed definiranim načelima. Poznavanje vrijednosti sigurnosti plovidbe kao važnog elementa pomorskog prometa omogućuje utvrđivanje djelotvornog pomorsko-prometnog toka pri čemu najveća vrijednost funkcije predstavlja optimalan maritimni ustroj.

U petom poglavlju izrađena je analiza predloženog modela njegovom primjenom na unaprijed definirana karakteristična stanja pomorskog prometa. Analizom je utvrđena kvaliteta predloženog modela u slučaju uobičajenih stanja pomorskog prometa koja uvjetuju smanjenje sigurnosti plovidbe.

U šestom poglavlju izrađen je simulacijski model pomorskog prometa na prilaznim plovnim putovima. Model se temelji na funkciji cilja i kriterijima obrađenim kroz konceptualni model, a razvijen je za prilazne plovne putove prema luci Rijeka. Kroz model su analizirani čimbenici koji utječu na sigurnost pomorsko-prometnog toka, navedeni su karakteristični pokazatelji i istraženi načini poboljšanja sigurnosti da bi se na kraju pokazalo kako primjena modela razvijenog u ovoj disertaciji vodi ka optimalnom maritimnom ustroju prilaznih plovnih putova.

U sedmom, zaključnom poglavlju, ukratko su istaknuti temeljni zaključci istraživanja i znanstveni doprinos disertacije. Osim toga, u završnom poglavlju predložene su mogućnosti daljnjeg istraživanja u elaboriranom području istraživanja, a koja su se nametnula na temelju saznanja do kojih se došlo tijekom istraživanja prikazanih u ovom radu. Obrazložene su implikacije ovog istraživanja na čimbenike sigurnosti pri odvijanju plovidbe na prilaznim plovnim putovima te su prikazane najznačajnije mogućnosti upotrebe rezultata istraživanja.

## 2. OSNOVNA OBILJEŽJA POMORSKE PLOVIDBE

Plovidba obilježava organizirano i sustavno kretanje plovila bez obzira na namjenu [81]. S obzirom na sredinu po kojoj se plovilo kreće plovidba se dijeli na pomorsku i unutrašnju. Organizirano kretanje plovila temelji se na težnji za određenim ciljem i predstavlja kretanje plovila od polaznog položaja do odredišta (dolazni položaj) u određenom vremenu. Osim vremenske komponente kretanja plovila, plovidbu karakterizira i kretanje na siguran način. Plovidba broda od ishodišta do odredišta predstavlja pomorsko putovanje.

Općenito, pomorsko putovanje predstavlja veći broj djelatnosti s ciljem vođenja broda od ishodišta do odredišta na siguran način u konačnom vremenu. Siguran način vođenja broda, odnosno sigurna plovidba, obuhvaća sigurnost ljudskih života, sigurnost imovine (brod i teret) te zaštitu okoliša.

S obzirom na temeljni cilj rada, obilježja pomorske plovidbe potrebno je sagledati prvenstveno sa stajališta utjecaja na sigurnost plovidbe. Sigurnost plovidbe predstavlja skup mjera, uvjeta i aktivnosti kojim se omogućava izvršenje pomorskog putovanja. Prema [87] sigurnost plovidbe obuhvaća osnovne uvjete kojima moraju odgovarati plovni putovi u unutarnjim morskim vodama i u teritorijalnom moru neke države, luke, pomorski objekti kao i plovni objekti koji plove unutarnjim morskim vodama i teritorijalnim vodama iste države, posada na pomorskim objektima, plovidba i peljarenje na moru.

Pomorsku plovidbu, kao složenu djelatnost, obilježavaju tri temeljna elementa:

- brod,
- plovni put te
- luka.

Uspješnost pomorskog putovanja podrazumijeva mogućnost plovidbe broda odgovarajućim plovnim putom između polazne i dolazne luke. Prije navedena, konačnost vremena i sigurnost, uvjetuju definiranje obilježja pomorske plovidbe. Obilježja pomorske plovidbe imaju neposredan utjecaj na definiranje djelotvornosti, učinkovitosti i opće razine sigurnosti same plovidbe, a generalno obuhvaćaju:

- maritimna (hidrodinamička) svojstva broda,
- navigacijska, meteorološka i hidrografska obilježja plovnog puta,
- obilježja pomorskog prometa na promatranom području (plovnom putu) te
- tehnološku podršku brodovima u plovidbi.

Utjecaj obilježja pomorske plovidbe na sigurnost može se promatrati nezavisno ili u kombinaciji svih obilježja zajedno te pojedinačno ili skupno. Veliki utjecaj na sigurnost plovidbe na prilaznim plovnim putovima imaju luke. Naime, karakteristike lučkog prometa određuju pretežitu vrstu brodova na plovnom putu, broj brodova te raspored dolazaka. Navedeno neposredno uvjetuje način odvijanja pomorskog prometa kao i sigurnost plovidbe.

U nastavku rada opisana su obilježja kojim je određena pomorska plovidba te njihov utjecaj na postupak određivanja i kvantificiranja sigurnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima.

## 2.1 MARITIMNA SVOJSTVA BRODOVA

Maritimna ili hidrodinamička svojstva broda predstavljaju ona tehničko-tehnološka svojstva broda koja neposredno utječu na pomorsku plovidbu određenim plovidbenim područjem, a samim time i na pretpostavljenu razinu sigurnosti plovidbe. Maritimna svojstva prvenstveno određuju manevarske mogućnosti broda. Mogu se podijeliti na maritimna svojstva pri:

- plovidbi otvorenim morem putnom brzinom,
- plovidbi ograničenim područjima, uobičajeno manevarskom brzinom te
- manevriranju.

Maritimna svojstva broda uobičajeno se opisuju osnovnim podacima o brodu, prvenstveno veličinom i mjerama broda, manevarskim svojstvima, porivom te konstrukcijom broda. Mogu biti nepromjenjiva i promjenjiva i kao takva direktno utječu na način plovidbe te manevarske mogućnosti broda. Maritimna svojstva ovise o pretpostavljenim meteorološkim i oceanološkim uvjetima. Nepromjenjiva maritimna obilježja broda jesu:

- dimenzije i tonaža te
- manevarska obilježja.

Ostala maritimna svojstva mogu se svrstati u promjenjiva jer se tijekom plovidbe, odnosno tijekom eksploatacije, broda bitno mijenjaju. Promjene vrijednosti maritimnih svojstava uvelike utječu na sigurnost plovidbe. Promjenjiva maritimna svojstva važna za kvantificiranje sigurnosti plovidbe jesu:

- istisnina ili deplasman broda ( $D_S$ ),
- gaz broda ( $T$ ),
- visina broda ( $H$ ),
- nadvodna i podvodna površina broda,
- brzina broda ( $v$ ).

Maritimna svojstva, kako nepromjenjiva tako i promjenjiva, uvelike ovise o vrsti broda. Karakteristične vrijednosti pojedinog maritimnog svojstva opisuju odgovarajuću vrstu broda. Važnost poznavanja vrste brodova pretpostavlja poznavanje brodskih maritimnih svojstava, čime se može odrediti utjecaj na sigurnost plovidbe.

### 2.1.1 Veličina i dimenzije broda

Dimenzije broda koje su nepromjenjive jesu duljina i širina broda. Kod brodova se uobičajeno koriste dvije duljine: duljina između okomica (*Length between perpendiculars* –  $L_{BP}$ ) i duljina preko svega (*Length over all* –  $L_{OA}$ ). Pod pojmom

širine broda podrazumijeva se širina preko svega ( $B$ ) koja predstavlja najveću širina broda sa svim privjescima i nadogradnjama uključujući i teret, ako ga brod prevozi. Utjecaj dimenzija broda na obilježja pomorskog prometa te razinu sigurnosti plovidbe mogu se smatrati stalnim jer se pri eksploataciji broda ne mijenjanju<sup>1</sup>. Pri plovidbi broda ograničenim plovidbenim područjem posebice na prilaznim plovnom putovima kao temeljni ograničavajući faktor za plovidbu broda javljaju se dimenzije broda. Nasuprot tome, pri plovidbi u neograničenim morskim područjima općenito vrijedi pravilo prema kojem je veći (duži i širi brod) sigurniji brod od manjeg, odnosno dimenzije broda nisu ograničavajući faktor u plovidbi.

Tonaža broda koja predstavlja nepromjenjivo maritimno obilježje koristi se u cilju određivanja veličine broda. Tonaža broda odgovara volumenu prostora na brodu, a izražena je bezdimenzionalnim brojem čija se vrijednost izračunava postupkom utvrđenim Međunarodnom konvencijom o baždarenju iz 1969. godine [60]. Razlikuje se bruto i neto tonaža koje odgovaraju volumenu zatvorenog prostora na brodu, odnosno volumenu prostora na brodu namijenjenog prijevozu tereta. Tonaža broda izravno određuje primjenu odredbi pojedinih konvencija, kao i dopušteno područje plovidbe. Iako tonaža broda predstavlja nepromjenjivo maritimno svojstvo za jedan brod, ona se mijenja ovisno o vrsti i namjeni broda. Kao takva nema neposredan utjecaj na sigurnost plovidbe već se njezina važnost kao veličine ogleda u odnosu na druge veličine broda. Tonaža se najčešće praktično koristi pri određivanju naknada za korištenje različitih usluga u luci i plovidbi (naknada za vez, peljarska naknada, naknada za tegljenje, naknada za upotrebu pomorskih svjetala, itd.).

Istisnina broda, gaz broda, visina broda te nadvodna i podvodna površina broda predstavljaju promjenjiva maritimska svojstva broda.

Istisnina broda ili deplasman jednak je masi vode koju brod istisne uranjanjem. Redovito se izražava kao masa broda u tonama. Kao promjenjiva veličina koja se tijekom iskorištavanja broda kontinuirano i bitno mijenja ima jedan od najznačajnijih utjecaja na plovidbu broda. Istisnina broda neposredno djeluje na promjenu brzine broda. Također, ima utjecaj na vrijeme i udaljenost zaustavnog puta te sposobnost okretanja broda. Brodovi veće istisnine imaju zaustavni put veće duljine s dužim vremenom potrebnim za zaustavljanje, a i svi elementi kruga okreta su veći.

Istisnina broda je veličina koja se najviše mijenja u eksploataciji broda te tako neposredno ili posredno utječe na mnoga maritimska svojstva. Gaz i visina broda kao promjenjive veličine neposredno ovise o istisnini broda.

Gaz broda je okomita udaljenost između plovne vodene linije i najniže točke podvodnog dijela broda. Promjenjiva je veličina koja ovisi o trenutnoj nakrcanosti broda (istisnini) i gustoći mora. Ima neposredan utjecaj na brzinu broda te održavanje smjera plovidbe broda. U smislu sigurnosti plovidbe na prilaznom plovnom putu gaz broda treba promatrati u odnosu na dubinu plovnog puta. Iako brod može ploviti s

---

<sup>1</sup> Postoje slučajevi prenamjene ili produljivanja postojećih brodova kada se navedena svojstva mijenjanju. Ovakvi slučajevi ne predstavljaju pravilo već iznimku pa se mogu zanemariti u daljnjem razmatranju.

gazom koji je neznatno manji od trenutne dubine mora, za sigurnu plovidbu moraju se odrediti najmanje dubine preko kojih brod određenog gaza može sigurno ploviti, odnosno odrediti granične vrijednosti slobodnog prostora ispod kobilice za svaki dio plovnog puta. Pri tome se slobodni prostor ispod kobilice određuje uzimajući u obzir vrstu dna (kamenito, muljevito, pjeskovito), brzinu broda, dodatni zagažaj, vrijednosti morskih mijena i ostale vanjske uvjete na plovnom putu kao što su gibanje broda na valovima, brzina i smjer morskih struja, bočni vjetar, itd.

Općenito, valja smatrati da plovidba broda većeg gaza na prilaznom plovnom putu zahtijeva veću pažnju, odnosno da je smanjena sigurnost plovidbe. Navedeno ne vrijedi u svim slučajevima jer je prazan brod znatno više izložen vanjskim utjecajima posebice vjetru, pa se brod s većim gazom može smatrati manje sigurnim samo pri istoj nakrcanosti, odnosno pri istoj nadvodnoj površini. Potrebno je naglasiti da gaz broda neposredno uvjetuje mogućnost plovidbe broda određenim prilaznim plovnim putom te na mogućnost prihvata i priveza broda u luku.

Uz pojam gaza vezuje se i pojam dodatnog zagažaja broda (*Squat*). Dodatni zagažaj broda je pojava dodatnog uranjanja broda u plovidbi, odnosno trenutno povećanje gaza broda. Na mjestima gdje je dubina mora manja od dvostruke vrijednosti gaza broda, javlja se usis između morskog dna i broda. Usis nastaje uslijed veće brzine strujanja čestica vode ispod trupa broda i posljedično smanjenog tlaka na tom mjestu. To uzrokuje pojavu dodatnog uranjanja broda i promjenu manevarskih svojstva broda, posebice upravljivosti broda. Naime, u takvim uvjetima dolazi do promjene dinamičkog ponašanja zbog promjene utjecaja hidrodinamičkih sila i momenata koji na brod djeluju. Ovisno o omjeru dubine i gaza broda dolazi do promjene brzine broda (brzina se smanjuje), promjene radijusa kruga okreta (promjer kruga okreta povećava se 60 do 100 %) i promjene duljine zaustavnog puta. Dodatni zagažaj se povećava s povećanjem duljine i širine broda (oblik trupa broda) i brzine kretanja broda te smanjenjem dubine ispod kobilice i širine kanala. Općenito, vrijednost dodatnog zagažaja kao i mjesto njegove pojave (krma ili pramac) ovise o slobodnom prostoru ispod broda (UKC – *Under keel clearance*), trenutnoj brzini broda te obliku trupa broda. Brodovi punog trupa s velikim blok koeficijentom kao što su tankeri i brodovi za prijevoz rasutih tereta dodatno uranjaju na pramcu, dok se brodovima „finih“ linija s manjim blok koeficijentom kao što su putnički i kontejnerski brodovi dodatni zagažaj javlja na krmi broda.

Približni pojednostavljen empirijski izraz za proračun iznosa dodatnog zagažaja u plovnim područjima neograničene širine je:

$$\Delta T = \frac{C_B \cdot v^2}{100} \quad (1)$$

gdje je:

$\Delta T$  - dodatni zagažaj (m),

$C_B$  - blok koeficijent broda,

$v$  - brzina broda preko dna (čv).



U plovidbi uskim kanalima, plovnim rijekama i prilazima lukama vrijednost dodatnog zagažaja izračunata ovim izrazom poprima dvostruku vrijednost<sup>2</sup>.

Može se zaključiti da dodatni zagažaj ne utječe na plovidbu brodova u neograničenim područjima gdje su dubine plovnog puta mnogostruko veće od gaza broda, već u područjima obalnih i prilaznih plovnih putova gdje su uobičajeno dubine u granicama u kojim njegov utjecaj može neposredno uzrokovati nasukanje broda ili neku drugu nezgodu<sup>3</sup>, odnosno ograničiti plovno područje potrebno za izbjegavanje sudara. Stoga se plovidba brodova s većim gazom u područjima manjih dubina na prilaznim plovnim putovima uobičajeno odvija smanjenim brzinama čime se dodatni zagažaj smanjuje na najmanju moguću mjeru. Uz pravilno upravljanje brodom dodatni zagažaj u pravilu ima mali utjecaj na sigurnost plovidbe.

U neposrednoj vezi s gazom i dimenzijama broda su podvodna i nadvodna površina broda. One ne ovise samo o dimenzijama broda već i vrsti broda. Suvremeni brod za prijevoz generalnog tereta kad je nakrcan ima približno nadvodnu površinu od 7 m<sup>2</sup> po dužnom metru broda. Isti brod u balastu ima nadvodnu površinu približno 11 m<sup>2</sup> po dužnom metru broda dok veliki putnički brodovi mogu imati površine od 20 m<sup>2</sup> ili više po dužnom metru broda [84]. Podvodna površina broda jedan je od parametara koji određuje veličinu utjecaja morske struje na brod, a nadvodna veličinu utjecaja vjetra. Utjecaj morske struje, kao i već spomenuti utjecaj vjetra na nadvodnu površinu, ogleda se u promjeni kursa i brzine broda, s tim da morska struja može imati mnogo veći utjecaj na promjenu brzine broda. Podvodna površina korelira s veličinom gaza broda. Najveći utjecaj na kretanje broda morska struja ima pri djelovanju okomito na smjer kretanja broda jer tada skreće brod sa zadanog plovidbenog puta čime ga dovodi u područja koja mogu predstavljati povećanu opasnost. Općenito, veća podvodna površina (brod s većim gazom) smanjuje razinu sigurnosti plovidbe broda.

Visina broda je udaljenost od gornjeg ruba kobilice do gornjeg ruba sponje, najviše neprekinute palube mjereno u ravnini glavnog rebra. Pod pojmom visina broda može se razmatrati i okomita udaljenost između trenutne plovne vodene linije i najvišeg dijela broda. Navedena udaljenost naziva se visina iznad vodene linije (*Air draft*) i za sigurnost plovidbe ima višestruko veći značaj od visine broda. Visina broda i visina iznad vodene linije ( $H_{MAX}$ ), također predstavljaju promjenjivo maritimno svojstvo broda. U nastavku, pojam visina broda predstavljat će veličinu visine iznad vodene linije.

Visina broda utječe na mogućnost prolaza broda ispod mostova ili visećih kablova koji se uobičajeno nalaze na prilaznim plovnim putovima. Ponekad, kada je

---

<sup>2</sup> Točniji izrazi za izračun dodatnog zagažaja mogu se pronaći u izvještajima Međunarodnog udruženja PIANC (*Permanent International Association of Navigation Congresses*) [65], dok se sažeti pregled metodologija izračuna dodatnog zagažaja može pronaći u [29].

<sup>3</sup> Poznat je slučaj putničkog broda „Crown Princess“ koji je uslijed neprimjerenosti velike brzine u plitkom moru pretrpio naginjanje uslijed kojeg je veliki broj putnika pretrpio ozljede. Neprimjerenost brzine broda negativno je utjecala na upravljivost brodom i mogućnost održavanja kursa broda [85].

moguće, visina broda se u eksploataciji smanjuje na način da se prilagođavaju pomični dijelovi broda ili se povećava gaz balastiranjem. Kako se visina broda vrlo točno može izračunati iz nacрта brodova i poznavanja trenutnog gaza broda, a visine mostova i kablova su poznate (korištenjem pomorskih karata i peljara), pri izboru plovnog puta izbjegava se mogućnost nailaska na mostove čija je visina manja od visine broda čime se gotovo u potpunosti izbjegava utjecaj visine broda na sigurnost plovidbe. Međutim, visina broda u korelaciji je s površinom nadvodnog dijela broda koja je izložena djelovanju vjetru čime utječe na upravljanje brodom. Sila vjetra može uvelike promijeniti kurs, te u manjoj mjeri smanjiti ili povećati brzinu broda pri čemu vjetar ima veći utjecaj pri malim brzinama broda. U skladu s navedenim, načelno vrijedi da je brod veće visine, odnosno s većom nadvodnom površinom izloženiji vanjskim utjecajima i stoga je razina sigurnosti plovidbe manja.

### 2.1.2 Manevarska obilježja broda

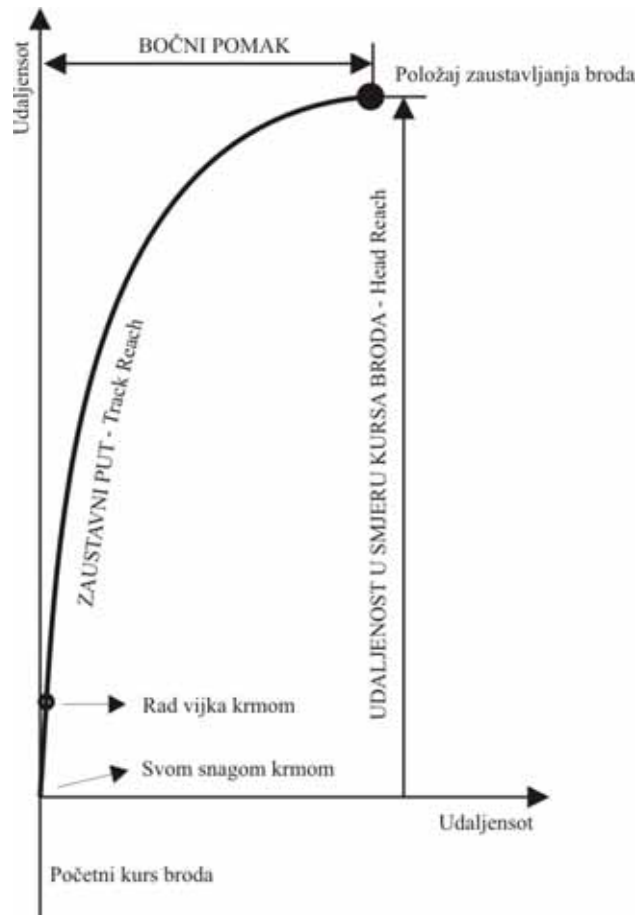
Manevarska obilježja broda, uključujući snagu strojeva, opisuju kretanje i upravljivost broda u plovidbi. S obzirom na sigurnost plovidbe prilaznim plovnim putovima posebno su bitna ona koja utječu na smjer i brzinu broda te na njihove promjene. U tom smislu, za potrebe ovoga rada, osnovna manevarska obilježja broda su:

- sposobnost zaustavljanja broda te
- sposobnost okretanja broda.

Sposobnost zaustavljanja broda je manevarska osobina koja neposredno ovisi o masi broda i predstavlja konstantu vrijednost za odgovarajuću vrijednost mase broda. Sposobnost zaustavljanja okarakterizirana je zaustavnim putom koji predstavlja duljinu puta koji brod prevali nakon zaustavljanja rada strojeva. Zaustavni put može se mjeriti i vremenom potrebnim za zaustavljanje broda. S obzirom na karakteristike rada stroja zaustavni put broda opisuje se.

- slobodnim zaletom broda (*SD*),
- zaletom broda (*TR*).

Slobodni zalet broda (*Stopping distance*) je put koju brod prijeđe od točke na kojoj je stroju dana naredba „stop“ do točke zaustavljanja broda. Zalet broda (*Track reach*) je put koju brod prijeđe od točke na kojoj je stroju dana naredba „svom snagom krmom“ do točke na kojoj se brod zaustavio. Zalet broda može se definirati i kao udaljenost u smjeru kursa broda (*Crash astern stopping distance - Head reach*) koju brod prevali do trenutka zaustavljanja. Ta udaljenost je uvijek manja od duljine stvarno prevaljenog puta pri slobodnom zaletu. Zaustavni put uz korištenje porivnog stroja smatra se zaustavnim putom u nuždi.



**Slika 1 Zalet broda**

Duljine zaustavnih putova su promjenjive i ovise o istisnini broda, porivnoj snazi strojeva te trenutnoj brzini i posebno se izračunavaju za svaki brod.

Općenito, zalet broda predstavlja funkciju omjera snage strojeva pri vožnji krmom i istisnine. Vrijednost zaleta za vrlo velike brodove može se funkcijski prikazati [67]:

$$TR = A \cdot \ln(1 + B) + C \quad (2)$$

gdje je:

$TR$  - zalet broda prikazan u duljinama broda [ $k \cdot L$ ],

$A$  - koeficijent koji ovisi o omjeru mase broda i otpora broda,

$B$  - koeficijent koji ovisi o omjeru otpora prije započinjanja manevra zaustavljanja i otpora pri zaustavljanju broda,

$C$  - koeficijent koji ovisi o vremenu potrebnom da se postigne krmeni poriv i inicijalna brzina broda<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Detaljan opis formula kojim su predloženi izračuni koeficijenta zaleta broda mogu se naći u Revision of the explanatory notes to the standards for ship manoeuvrability – Comments to the proposal for the revision of appendix 3 of MSC/Circ 1053.

Vrijednost koeficijenta A kreće se od 5, za brodove za prijevoz suhih tereta, pa do 16 za vrlo velike brodove za prijevoz sirove nafte. Koeficijent B ovisi o raspoloživoj porivnoj snazi u vožnji krmom te je njegova vrijednost manja, ako je snaga veća. Uobičajena vrijednost za dizelske motore iznosi od 0,6 do 1,0. Vrijednost koeficijenta C je veća za manje brodove te, uz uvjet početne brzine od 15 čvorova i potrebnog vremena za postizanje krmenog poriva od 1 minute, za brodove duljine 100 m iznosi 2,3 dok za brodove duljine 300 m iznosi 0,8 [68].

Manevarska obilježja broda glede sposobnosti zaustavljanja trebala bi zadovoljiti sljedeće kriterije [71]:

- $TR < 15 * L$ ,
- $TR < 20 * L$  (za brodove velikih istisnina uz dopuštenje administracije).

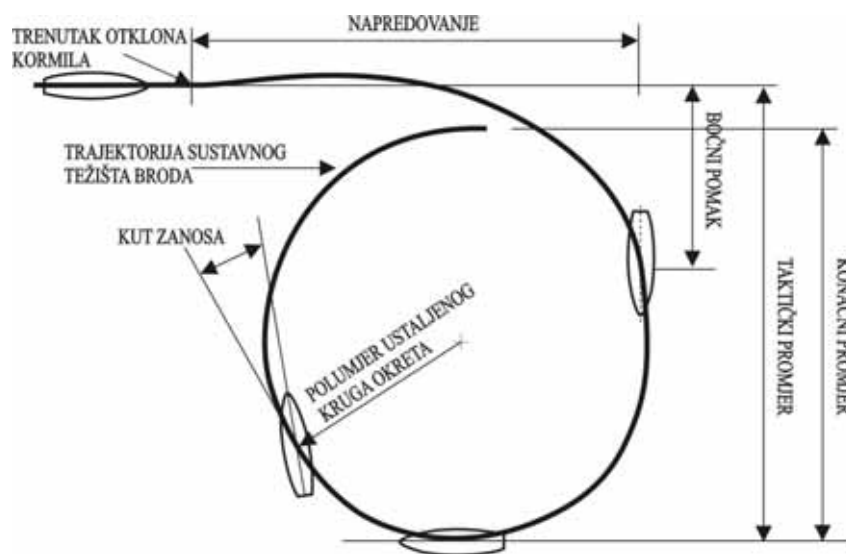
Navedeni standardi za brodove vrijede u uvjetima dubokog mora i neograničenog akvatorija, dobrih vremenskih prilika, potpuno nakrcanog broda na ravnoj kobilici i ustaljene brzine broda u trenutku započinjanja testa.

Uobičajeno se zaustavni putovi prikazuju za stanje potpuno nakrcanog broda (*Loaded condition*) i broda u balastu (*Ballast condition*). Poznavanje zaustavnog puta od iznimne je važnosti pri procjeni rizika pojave pomorske nezgode, prvenstveno pri kvaru stroja, ali i kod drugih nezgoda, kao što su sudar ili nasukanje. U tim okolnostima, brod se zbog inercije dobivene u plovidbi nastavlja kretati kroz vodu te u zavisnosti od blizine kopna, navigacijskih opasnosti ili drugih brodova i objekata na moru, predstavlja opasnost na plovnom putu i smanjuje sigurnost plovidbe.

Sposobnost okretanja broda definirana je veličinom kruga okreta broda (*Turning circle*). Krug okreta definira mogućnost sigurnog okreta broda na plovnom putu i jedan je od važnih čimbenika izbjegavanja sudara ili sprječavanja nasukanja. Širina plovnog puta potrebnog za sigurnu plovidbu na svakom dijelu plovnog puta trebala bi iznositi najmanje onoliko koliko iznosi promjer kruga okreta broda pri najnepovoljnijim uvjetima plovidbe uz dodatak odgovarajuće rezerve. Podaci o veličini kruga okreta broda dobivaju se na osnovi poznavanja elemenata koji opisuju određeni krug okreta. Elementi kruga okreta su:

- napredovanje (*Advance*) – prevaljeni put težišta broda u smjeru prvobitnog kursa od trenutka otklona kormila na stranu do trenutka kada je kurs promijenjen za 90° u odnosu na prvobitni kurs;
- maksimalno napredovanje (*Maximal advance*) – najveći prevaljeni put težišta broda u smjeru prvobitnog kursa od trenutka otklona kormila;
- taktički promjer (*Tactical diameter*) – udaljenost između prvobitnog kursa i protukursa (promjena kursa od 180°);
- konačni promjer (*Final diameter*) – promjer okreta broda pri kojem brod s nepromijenjenim otklonom kormila prijeđe puni krug od 360°. U pravilu je manji od taktičkog promjera;

- bočni pomak ili zanošenje (*Transfer*) – udaljenost između prvobitnog kursa i težišta broda u trenutku promjene kursa za  $90^\circ$  u odnosu na prvobitni kurs;
- maksimalno zanošenje (*Maximal transfer*) – najveća udaljenost između trenutnog i prvobitnog kursa tijekom okretanja broda, a ova vrijednost veća je od taktičkog promjera;
- kut zanosa (*Drift angle*) – kut između uzdužnice broda i tangente na putanju težišta;
- polumjer ustaljenog kruga okreta (*Steady turn radius*) – stalni polumjer kruga okreta nakon što brod poprimi stalnu brzinu i kut zanosa tijekom okretanja.



Slika 2 Osnovni elementi kruga okreta broda

Manevarska obilježja broda glede kruga okreta smatraju se zadovoljavajuća [71], ako:

- tijekom pokusa okretanja broda (kut otklona kormila  $35^\circ$ ) napredovanje ne prijeđe 4,5 duljine broda, a taktički promjer ne smije biti veći od 5 duljina broda;
- tijekom pokusa početne sposobnosti okretanja broda (kut otklona kormila  $10^\circ$  u desno/lijevo) brod ne prevali više od 2,5 duljine broda do trenutka kad mu se kurs promjeni  $10^\circ$ .

Na određenom prilaznom plovnom putu uobičajeno plovo brodovi različitih manevarskih obilježja i veličina, međutim bez obzira na različitost pojedinih brodova i skupine brodova, dosadašnja istraživanja su pokazala da se može definirati funkcionalni odnos između jedne nezavisne i preostalih veličina kao zavisnih varijabli. Najveći stupanj korelacije pokazao se uzimanjem za nezavisnu varijablu duljinu između okomica. U sljedećoj tablici prikazani su odnosi duljine broda i nekih manevarskih obilježja.

**Tablica 1 Odnosi duljine između okomica te manevarskih obilježja i veličine broda [26]**

Obilježje broda	Funkcionalni odnos
Bruto tonaža	$\log BT = 2,65 * \text{Log} (L_{BP}) - 1,70 \pm 0,08$
Zalet broda	$\log TR = 1,46 * \text{Log} (L_{BP}) + 0,01 \pm 0,18$
Napredovanje (otklon kormila 35°)	$\log DA = 1,03 * \text{Log} (L_{BP}) + 0,43 \pm 0,01$
Bočni pomak (otklon kormila 35°)	$\log DT = 1,01 * \text{Log} (L_{BP}) + 0,17 \pm 0,14$

Može se zaključiti da veće vrijednosti osnovnih elemenata kruga okreta utječu na smanjenje sigurnosti plovidbe broda. Da bi se postigla ista razina sigurnosti plovidbe brodova većih vrijednosti osnovnih elemenata kruga okreta, plovidba se mora odvijati plovnom putom većih dimenzija (širina, dubina mora, udaljenost najbližeg kopna) ili pomorski promet na plovnom putu mora biti manjeg intenziteta.

Manevarska obilježja vezana za sposobnost zaustavljanja broda uobičajeno svoju primjenu imaju u slučaju izvanrednih okolnosti, dok se elementi okreta broda koriste pri plovidbi broda putnom brzinom. Za sigurnu plovidbu broda, osim poznavanja osnovnih manevarskih obilježja broda, potrebno je ta obilježja promatrati u međudjelovanju s vanjskim čimbenicima koji na njih imaju utjecaj, prvenstveno meteorološkim i oceanološkim čimbenicima. Vrednovanje opasnosti na dijelovima plovnog puta moguće je i uspoređivanjem manevarskih obilježja s elementima plovnog puta koji utječu na sigurnost plovidbe. Tako se širina prilaznog plovnog puta može usporediti s bočnim pomakom ili taktičkim promjerom, a sigurna duljina dijela plovnog puta s najmanjim zaustavnim putom ili napredovanjem.

Općenito, pri određivanju razine sigurnosti plovidbe manevarska obilježja broda mogu se neposredno koristiti pri procjeni opasnosti od sudara ili nasukanja na plovnom putu na način da veličine sposobnosti zaustavljanja i okretanja broda opisuju

prostor oko broda u kojem brod može nesmetano ploviti i u slučaju kvara porivnog stroja ili uređaja za održavanje smjera.

### 2.1.3 Brzina broda

Brzina broda predstavlja jedno od najvažnijih maritimnih svojstava broda i direktno utječe na razinu sigurnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima. Brzina broda prvenstveno je određena snagom pogonskih strojeva te otporom broda. Općenito, može se reći da brzina broda ovisi o porivnoj snazi i otporu broda, odnosno da je u funkciji efektivne porivne snage i ukupnog otpora kretanju broda.

$$P_E = R_T \cdot v \quad (3)$$

gdje je:

$P_E$  - efektivna porivna snaga (W),

$R_T$  - ukupni otpor broda (N),

$v$  - brzina broda (m/s).

Ukupan otpor kretanju broda sastoji se od otpora kretanju u mirnoj vodi te otporima koji nastaju vanjskim utjecajem kao što je otpor valova ili otpor zbog kretanja broda i pritiska vjetra. Za postizanje odgovarajuće brzine porivna snaga mora nadvladati silu ukupnog otpora. U odnosu na veličinu broda, brzina trgovačkih brodova izražena u čvorovima gotovo nikad ne prelazi vrijednost drugog korijena njihove dužine izražene u stopama, odnosno uobičajeno za trgovačke brodove vrijedi [20]:

$$\frac{v}{\sqrt{L}} < 1 \quad (4)$$

Prema [36] moguće je predočiti međuovisnost porivne snage odgovarajuće vrste broda i njegovih dimenzija uključujući i brzinu broda. Predloženim regresijskim izrazima porivna snaga je prikazana kao funkcija duljine, širine, gaza te brzine broda.

**Tablica 2 Regresijski izrazi odnosa porivne snage i brzine broda [36]**

Vrsta broda	Regresijski izraz
Tankeri i brodovi za prijevoz rasutih tereta	$P_E = 0,00303 \cdot L^{0,251} \cdot B^{0,633} \cdot T^{0,571} \cdot C_B^{1,26} \cdot v^{3,63}$
Kontejnerski brodovi	$P_E = 0,00303 \cdot L^{0,265} \cdot B^{0,897} \cdot T^{0,466} \cdot C_B^{2,11} \cdot v^{4,39}$
Ro-Ro brodovi	$P_E = 0,003215 \cdot L^{0,212} \cdot B^{0,942} \cdot T^{0,428} \cdot C_B^{2,42} \cdot v^{4,33}$

Pri plovidbi otvorenim morem brod uobičajeno plovi putnom brzinom (*Service speed*), dok na prilaznim plovnim putovima plovi različitim manevarskim brzinama (*Manoeuvring speed*). Općenito, na prilaznim plovnim putovima brod plovi smanjenim režimom rada strojeva, odnosno smanjenim brojem okreta brodskog vijka,

ploveći manevarskom brzinom. Za potrebe procjene odnosa putne i manevarske brzine može se koristiti sljedeći izraz [26]:

$$v_M = v_P \cdot 0,994 \cdot \left( \frac{N_M}{N_P} \right)^{0,854} \quad (5)$$

gdje je:

$v_M$  - manevarska brzina,

$v_P$  - putna brzina,

$N_M$  - broj okretaja vijka pri manevarskoj brzini broda,

$N_P$  - broj okretaja vijka pri putnoj brzini broda.

Utjecaj brzine broda na sigurnost plovidbe može se promatrati sa stajališta:

- utjecaja na maritimna svojstva broda te
- upravljanja broda od strane časnika u straži.

Svaka promjena brzine mijenja manevarska obilježja broda. Veća brzina broda povećava zaustavni put i napredovanje broda i time smanjuje sigurnost plovidbe. Nasuprot tome, smanjenjem brzine, upravljivost broda se smanjuje, a time i sigurnost plovidbe. Upravljivost broda pri malim brzinama posebice je smanjena pri nepovoljnim meteorološkim prilikama.

Način upravljanja brodom i reagiranje časnika u straži direktno ovisi o brzini broda. Najvažniji utjecaj brzine na upravljanje brodom ogleda se u odlukama časnika u straži pri izbjegavanju sudara na moru u situacijama kada je neophodna promjena kursa ili brzine broda. Veća brzina broda podrazumijeva kraće vrijeme za izbjegavanje sudara što zahtijeva brže donošenje odluka od časnika u straži. Na taj način se smanjuje sigurnost plovidbe.

Za određivanje razine sigurnosti plovidbe veliku ulogu ima i relativna brzina broda. Relativna brzina predstavlja odnos kretanja jednog broda u odnosu na drugi brod. Može se prikazati izrazom:

$$\vec{v}_R = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 \quad (6)$$

Onda se apsolutna vrijednost relativne brzine može odrediti iz izraza:

$$v_R = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2 \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot \cos(K_2 - K_1)} \quad (7)$$

gdje je:

$v_R$  - relativna brzina,

$K$  - kut između osi  $x$  i vektora brzine.



Za potrebe određivanja modela maritimnog ustroja pomorskog prometnog toka može se smatrati da veća relativna brzina brodova smanjuje razinu sigurnosti plovidbe.

#### **2.1.4 Vrste brodova**

Brodovi kao izuzetno složeni tehnički objekti posjeduju mnoga različita tehničko-tehnološka obilježja. Ta obilježja uvjetuju vrlo složenu strukturu podjele brodova. Općenito, podjela brodova može se odrediti s obzirom na više kriterija koji pokazuju osnovnu namjenu broda, djelatnost koju obavljaju, vrstu te oblik i stanje tereta koji prevoze, tehničko-tehnološko obilježje broda, područje plovidbe ili vlasništvo broda.

Podjela brodova najčešće se određuje s obzirom na namjenu. Osim podjele prema namjeni u literaturi se brodovi najčešće dijele prema:

- području plovidbe,
- materijalu od kojeg su izgrađeni i
- vrsti pogona.

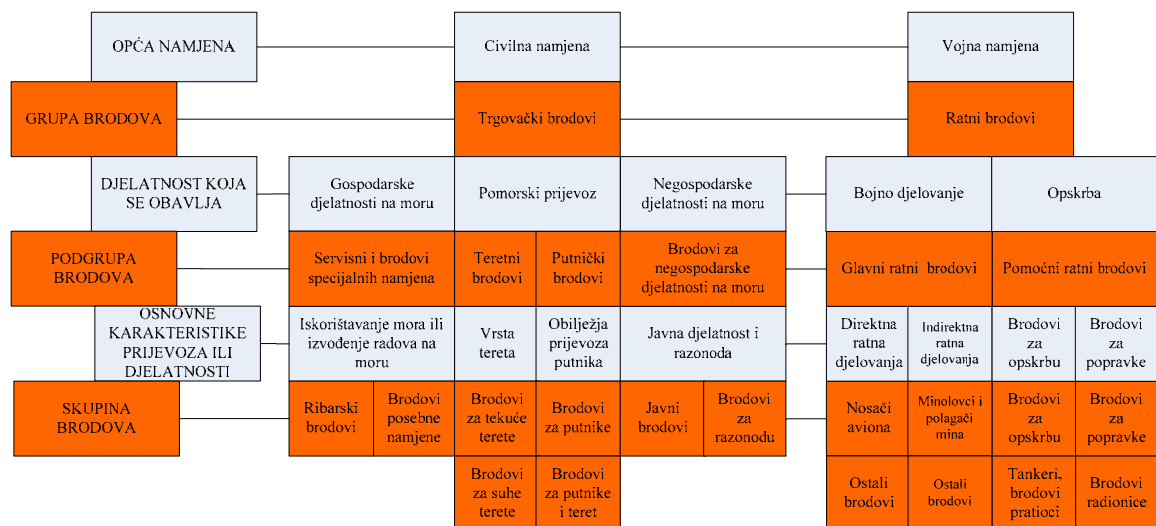
Uobičajeno, temeljna podjela brodova je izvedena na način da se brodovi dijele u dvije grupe s obzirom na opću namjenu i to na:

- trgovačke i
- ratne brodove,

odnosno na brodove koji se koriste za civilne te vojne potrebe.

Pomorski promet na prilaznim plovnim putovima u velikoj većini predstavlja promet trgovačkih brodova. Trgovački brodovi svojim veličinama, a posebno brojem uvelike premašuju broj ratnih brodova. Njihova plovidba svjetskim morima, a tako i prilaznim plovnim putovima je uređena odgovarajućim propisima i pravilima struke što se ne može utvrditi za ratne brodove. Stoga se za analizu sigurnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima plovidba ratnih brodova neće uzimati u razmatranje.

Daljnja podjela brodova u podgrupe određena je djelatnošću koju brod obavlja. Temeljne djelatnosti koju trgovački brodovi obavljaju jesu prijevoz tereta i putnika, obavljanje gospodarskih djelatnosti na moru te održavanje sigurnosti plovidbe i zaštite okoliša. Nastavak podjele brodova odnosi se na njihovo svrstavanje u skupine prema osnovnim karakteristikama tereta koje prevoze, obilježjima prijevoza putnika, vrstama gospodarskih i negospodarskih djelatnosti koje brodovi obavljaju.



Slika 3 Opća struktura podjele brodova

Izvor: Izradio autor

Na priloženoj slici prikazana je opća podjela brodova kojom se definiraju tri podgrupe trgovačkih brodova i to:

- teretni i putnički brodovi,
- specijalni i servisni brodovi te
- brodovi koji ne obavljaju gospodarsku djelatnost.

Teretni i putnički brodovi predstavljaju sve brodove čija je namjena prijevoz tereta i/ili ljudi. Kod teretnih brodova, namjena ovisi o vrsti i posebnim obilježjima tereta koji brod prevozi, kod putničkih brodova namjena je određena načinom prijevoza putnika i/ili tereta, dok je kod ostalih brodova namjena određena poslom koji brod obavlja.

Specijalni i servisni brodovi su brodovi namijenjeni za posebne poslove i zadatke te iskorištavanje morskih resursa, a uključuju ribarske brodove, tegljače, ledolomce, brodove za opskrbu, brodove za polaganje kabela, brodove dizalice, itd.

Osnovna skupina brodova za negospodarsku djelatnost jesu javni brodovi. To su brodovi u vlasništvu države ili nekog drugog tijela ovlaštenog od države s osnovnom namjenom održavanja sigurnosti plovidbe i zaštite okoliša od onečišćenja. U tu skupinu se uvrštavaju brodovi lučke kapetanije, policijski brodovi i slično. Važno je naglasiti da nerijetko javni brodovi obavljaju određene poslove<sup>5</sup>, ali se zbog nadležnosti države nad tim poslovima oni uvrštavaju u skupinu javnih brodova. Većina brodova za rasonodu predstavljaju plovila nautičkog turizma i to prvenstveno

<sup>5</sup> Najčešći primjer javnih brodova koji obavljaju različite djelatnosti jesu brodovi na održavanju plovinih putova.

jahte<sup>6</sup>. Sve veći broj ovih plovila kao i povećanje njihovih dimenzija<sup>7</sup> ima sve veći utjecaj na sigurnost plovidbe na prilaznim plovnim putovima.

Nadalje, s obzirom na specifična tehnološka rješenja brodova pojedine vrste brodovi se dijele na podvrste i to prema specifičnosti pojedinog tereta koji prevoze, načinu prijevoza i prekrcaja tereta i/ili putnika te posebnostima pojedinih aktivnosti i poslova za koji su namijenjeni.

U sljedećim tablicama prikazana je detaljna struktura podjele trgovačkih brodova kao i sve vrste i podvrste brodova.

---

<sup>6</sup> Jahta je plovni objekt za sport i razonodu, neovisno koristi li se za osobne potrebe ili za gospodarsku djelatnost, a čija je duljina veća od 12 metara i koji je namijenjen za dulji boravak na moru, te koji je pored posade ovlašten prevoziti ne više od 12 putnika [63].

<sup>7</sup> Duljina najveće jahte na svijetu iznosi 164 m [89].

**Tablica 3 Strukturalna podjela teretnih i putničkih brodova**

GRUPA BRODOVA	PODGRUPA BRODOVA	SKUPINA BRODOVA	VRSTA BRODOVA	PODVRSTA BRODOVA
TRGOVAČKI BRODOVI	Teretni brodovi	Brodovi za prijevoz suhih tereta	Brodovi za prijevoz generalnog tereta	Klasični brodovi za prijevoz generalnog tereta
				Višenamjenski brodovi
				Brodovi za prijevoz rashlađenih tereta
				Brodovi za posebne vrste generalnog tereta (drvo, pulpa,...)
			Kontejnerski brodovi	Potpuno kontejnerski brodovi
				Ro-Ro kontejnerski brodovi
			Brodovi za prijevoz rasutih tereta	Brodovi za prijevoz rasutih tereta
				Brodovi za prijevoz rude
				Brodovi za prijevoz ulja, rasutih tereta i rude (OBO brodovi)
				Brodovi za prijevoz cementa
			Ro-Ro brodovi	Brodovi za prijevoz ostalih rasutih tereta (urea, šećer,...)
				Brodovi za prijevoz vozila
				Brodovi za prijevoz automobila
		Brodovi za prijevoz teških tereta	Brodovi za prijevoz željezničkih vagona	
			Klasični brodovi za prijevoz teških tereta	
			Poluuronjivi brodovi za prijevoz teških tereta	
		Brodovi za prijevoz stoke	Poluuronjivi brodovi za prijevoz jahti	
		Brodovi za prijevoz tekućih tereta	Tankeri za prijevoz sirove nafte	Tankeri za prijevoz sirove nafte
				Tankeri za prijevoz sirove nafte i produkata
			Tankeri za prijevoz naftnih derivata	Tankeri za prijevoz naftnih derivata
				Tankeri za prijevoz asfalta i bitumena
			Tankeri za prijevoz kemikalija	Tankeri za prijevoz kemikalija
				Tankeri za prijevoz naftnih derivata i/ili kemikalija
			LNG tankeri	LNG tankeri
			LPG tankeri	CNG tankeri
				LPG tankeri
			Tankeri za prijevoz kemijskih plinova	Tankeri za prijevoz LPG i kemikalija
				Tankeri za prijevoz kemijskih plinova
			Tankeri za prijevoz ostalih tekućina	Etilen tankeri
				Tankeri za prijevoz vina
				Tankeri za prijevoz jestivih i biljnih ulja
		Tankeri za prijevoz latexa		
		Tankeri za prijevoz voćnog soka		
	Tankeri i teglenice za prijevoz vode			
	Specijalizirani tankeri za prijevoz tekućina (pivo, melasa,...)			
	Putnički brodovi	Brodovi za prijevoz putnika	Putnički brodovi za krstarenja	
			Putnički brodovi	
		Brodovi za prijevoz putnika i tereta	Klasični putnički brodovi	
			Vrlo brzi putnički brodovi (HSC brodovi)	
			Ro-Ro putnički brod za prijevoz kamiona	
			Ro-Ro putnički brod za prijevoz putnika i vozila	
			Vrlo brzi Ro-Ro putnički brodovi	
	Putničko-teretni brodovi			

**Tablica 4 Strukturalna podjela specijalnih i servisnih brodova te brodova za negospodarske djelatnosti**

GRUPA BRODOVA	PODGRUPA BRODOVA	SKUPINA BRODOVA	VRSTA BRODOVA	PODVRSTA BRODOVA		
TRGOVAČKI BRODOVI	Specijalni i servisni brodovi	Ribarski brodovi	Kočari	Kočari – tvornice Kočari		
			Plivaričari	Plivaričari Tunolovci		
			Specijalizirani ribarski brodovi	Ribarski brodovi za ulov kitova Ribarski brodovi za ulov tuljana		
				Namjenski ribarski brodovi	Brodovi za preradu ribe Brodovi za prijevoz ribe Brodovi za prijevoz žive ribe	
			Pomoćni ribarski brodovi		Pomoćni brodovi za ribarske farme Brodovi za istraživanje ribe Brodovi za traženje ribe	
					Brodovi za opskrbu platformi	Brodovi za opskrbu i prijevoz posada Brodovi za opskrbu Brodovi za prijevoz cijevi
				Ostali brodovi za odobalne djelatnosti		Brodovi za bušenje Brodovi za polaganje cijevi Brodovi za testiranje proizvodnje Brodovi za preradu i skladištenje nafte ili plina (FPSO) Brodovi za sigurnost
			Tegljači			Lučki tegljači Tegljači za sidrenje platformi (AHTS) Tegljači za opskrbu platformi
					Jaružara	„Bucket“ jaružari Usisni jaružari Jaružari s grabilicom
						Brodovi posebne namjene
			Javni brodovi			
				Brodovi za razonodu	Jahte Jedrenjaci Brodovi različitih namjena (knjižnica, izložbe...)	

Trgovački brodovi koji pripadaju kategoriji brodova u međunarodnoj plovidbi podliježu obvezi zadovoljavanja odredbi konvencija i drugih pravila Međunarodne pomorske organizacija (*International Maritime Organization - IMO*). Te obveze prvenstveno se odnose na primjenu odredaba *SOLAS*, *MARPOL*, *STCW*, *LOADLINE* te *TONNAGE* konvencija<sup>8</sup> koje uređuju sigurnost plovidbe brodova, sprječavanje onečišćenja mora s brodova te obrazovanje i broj članova posade brodova u međunarodnoj plovidbi. Odredbe *SOLAS* konvencije prvenstveno se odnose na trgovačke brodove čija je bruto tonaža veća od 500. Preostali dio brodova koji plovi isključivo u nacionalnoj plovidbi unutar granica pojedine države moraju dodatno zadovoljiti i nacionalne propise.

Svjetska flota trgovačkih brodova sastoji se od približno 100.000 brodova čija je bruto tonaža veća od 100<sup>9</sup>. U taj broj uključeni su i određeni brodovi koji ne plove u međunarodnoj plovidbi već isključivo u nacionalnoj. Može se smatrati da trgovački brodovi bruto tonaže između 100 i 500 uobičajeno plove u nacionalnoj plovidbi, ali koriste luke namijenjene međunarodnom prometu, dok manji brodovi koriste specijalizirane luke namijenjene isključivo nacionalnom prometu.

U sljedećoj tablici prikazan je broj brodova svjetske trgovačke flote prema vrstama brodova. Prikazani podaci ukazuju da su ribarski brodovi najbrojnija vrsta brodova s 23% udjela u cijeloj floti, a zatim slijede brodovi za prijevoz generalnog tereta s 15% udjela. Prema veličini uočljivo je da teretni brodovi predstavljaju najveće plovne jedinice s gotovo 90% udjela bruto tonaže pri čemu je udio broja brodova 40%. Potrebno je naglasiti da ribarski brodovi kao najbrojnija vrsta brodova uobičajeno koriste specijalizirane ribarske luke, a njihova plovidba nema pravilnosti pa u manjoj mjeri koriste prilazne plovne putove prema trgovačkim lukama. Nasuprot tome brodovi za generalni teret, kao i svi teretni i putnički brodovi isključivo plove prema trgovačkim lukama pa je njihov utjecaj na pomorski promet na prilaznim plovnim putovima najznačajniji.

---

<sup>8</sup> Međunarodna konvencija o sigurnosti ljudskih života na moru (*SOLAS - The International Convention for the Safety of Life at Sea*), Međunarodna konvencija o sprječavanju onečišćenja mora s brodova (*MARPOL - International Convention for the Prevention of Pollution From Ships*), Međunarodna konvencija o standardima za obuku, izdavanju svjedodžbi i držanju straže pomoraca (*STCW - The International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers*), Međunarodna konvencija o teretnim vodenim linijama (*LOADLINE - International Convention on Load Lines*), Međunarodna konvencija o baždarenju brodova (*TONNAGE - International Convention on Tonnage Measurement of Ships*).

<sup>9</sup> Prema podatku od 31. 12. 2007. ukupan broj brodova čija je bruto tonaža veća od 100 BT iznosi 97.504 [86].

**Tablica 5 Razdioba brodova svjetske trgovačke flote [86]**

Podgrupa brodova	Vrsta broda	Broj brodova	Bruto tonaža
Teretni brodovi	Tankeri za prijevoz sirove nafte ( <i>Crude Oil tankers</i> )	2.080	160.322.152
	Tankeri za prijevoz naftnih derivata ( <i>Oil products tankers</i> )	4.966	30.202.483
	Tankeri za prijevoz kemikalija ( <i>Chemical tankers</i> )	3.793	36.760.304
	Brodovi za prijevoz ukapljenih prirodnih plinova ( <i>LNG tankers</i> )	253	23.157.420
	Brodovi za prijevoz ukapljenih naftnih plinova ( <i>LPG tankers</i> )	1.099	10.662.837
	Brodovi za prijevoz ostalih tekućina ( <i>Other liquids tankers</i> )	163	87.265
	Brodovi za generalni teret ( <i>General cargo ships</i> )	16.872	55.057.831
	Brodovi za prijevoz rashlađenih tereta ( <i>Reefer Ships</i> )	1.236	6.179.701
	Kontejnerski brodovi ( <i>Container ships</i> )	4.278	124.920.855
	Ro-Ro brodovi ( <i>Ro-Ro ships</i> )	2.416	38.079.947
	Brodovi za prijevoz rasutih tereta ( <i>Bulk carriers</i> )	7.380	215.093.307
	Brodovi za prijevoz ulja, rasutih tereta i rude ( <i>Oil-Bulk-Ore carriers</i> )	97	2.535.691
	Brodovi za prijevoz ostalih suhih tereta ( <i>Other dry cargo ships</i> )	214	2.467.830
	<b>UKUPNO – TERETNI BRODOVI</b>	<b>44.847</b>	<b>705.527.623</b>
Putnički brodovi	Putnički brodovi za krstarenja ( <i>Cruise Ships</i> )	485	13.400.752
	Klasični putnički brodovi ( <i>Passenger ships</i> )	3.031	1.515.551
	Ro-Ro putnički brodovi ( <i>Ro-Ro passenger ships</i> )	2.837	16.328.214
	Putničko-teretni brodovi ( <i>Passenger-Cargo ships</i> )	338	538.221
	<b>UKUPNO – PUTNIČKI BRODOVI</b>	<b>6.691</b>	<b>31.782.738</b>
Ostali brodovi	Ribarski brodovi	23.809	11.511.001
	Tegljači	11.958	3.377.473
	Opskrbni brodovi za „odobalne“ djelatnost	4.200	4.642.841
	Ostali brodovi za „odobalne“ djelatnost	665	9.845.687
	Istraživački brodovi	891	1.446.158
	Jaružala	1.140	2.609.498
	Ostali brodovi posebnih namjena	3.303	4.193.489
<b>UKUPNO – OSTALI BRODOVI</b>	<b>45.966</b>	<b>37.626.147</b>	
	<b>UKUPNO – TRGOVAČKI BRODOVI</b>	<b>97.504</b>	<b>774.936.508</b>

Važnost predstavljene podjele trgovačkih brodova s gledišta procjene sigurnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima ogleda se u poznavanju maritimnih svojstava pojedine vrste brodova. Različiti brodovi posjeduju karakteristična maritima svojstava kako u pogledu veličine tako i u pogledu manevarskih obilježja. S obzirom na poznavanje odgovarajuće vrste brodova koji plove na prilaznim plovnim putovima moguće je unaprijed odrediti granične vrijednosti njihovih maritimnih svojstava. Na taj način razina sigurnosti plovidbe može se odrediti za najnepovoljnije ili najpovoljnije stanje pomorskog prometa na plovnom putu. Također, sigurnost plovidbe može se odrediti za planirani pomorski promet temeljem maritimnih svojstava brodova koji se predviđaju da će ploviti na plovnom putu. U tom slučaju određeno maritimno svojstvo broda može se odrediti korištenjem odgovarajuće statističke razdiobe.

## 2.2 OBILJEŽJA PRILAZNIH PLOVNIH PUTOVA

Pomorski plovni put (*Waterway*) je morski pojas dovoljno dubok i širok za plovidbu brodova, koji je po potrebi i obilježen [82]. Uobičajeno se naziva i plovidbeni put, iako plovidbeni put (*Fairway*)<sup>10</sup> podrazumijeva dio plovnog puta kojim plovilo stvarno plovi. Razlikovanje ovih dvaju pojmova je važno sa stajališta pravnog uređenja plovidbe. Tako, u sustavu odijeljenog prometa, brodovi su dužni upotrebljavati određene plovidbene putove, a obalna država (ili države) brinuti o sigurnosti cjelokupnoga plovnog puta što podrazumijeva plovni put u širem značenju od plovidbenog puta [42].

Može se reći da plovni putovi predstavljaju «morske prometnice», a obilježja pojedinog plovnog područja određena su pretežitim obilježjima plovnih putova koji prolaze tim plovnim područjem.

Svako morsko područje može predstavljati plovni put, ako zadovolji opće uvjete i to uvjete dovoljne širine i dubine te postojanje dovoljne duljine koja omogućuje plovidbu odgovarajuće vrste i veličine broda. Međutim, pri izboru odgovarajućeg plovnog puta namijenjenog plovidbi brodova, osim zadovoljenja općih uvjeta, neophodno je zadovoljiti i uvjet sigurne plovidbe. Jedno od najvažnijih mjerila pogodnosti plovnog puta jesu granice plovnog puta unutar kojih se može odvijati sigurna plovidba brodova odgovarajućih veličina.

Načelno prema geografskom položaju, plovni putovi dijele se na:

- oceanske plovne putove,
- obalne plovne putove i
- lučke (prilazne) plovne putove.

Oceanski plovni putovi smješteni su u morskom području u kojem vizualno određivanje položaja pomoću objekata na kopnu nije moguće, a plovidba brodova se odvija dovoljno daleko od obale čime je opasnost pojave nezgoda smanjena na najmanju moguću mjeru. Opasnost od nasukanja je zanemariva (dubine su višestruko veće od najvećeg gaza broda), dok je opasnost od sudara s obzirom na ogromno morsko područje i relativno malu gustoću brodova zanemariva.

Obalni plovni putovi obuhvaćaju plovne putove unutar obalnog područja u blizini obale, otočnog područja ili kanala na kojem se odvija obalna navigacija, a gdje je moguće korištenje vizualnih, radarskih i drugih sredstava u određivanju položaja broda. Prema [83] obalno područje obuhvaća morsko područje unutar 50 M udaljenosti od obale ili granice kontinentalnog šelfa (do 200 metara dubine), odnosno što je veće.

Lučki plovni putovi smatraju se plovni putovi na prilazima i ulazima u luke, lučka područja, zaljeve, sidrišta, uplovljavanje u rijeke, označene kanale, itd. Zbog

---

<sup>10</sup> Pojam *Waterway* se odnosi na morsko područje na kojem se može odvijati plovidba, dok se pojam *Fairway* odnosi na glavni dio *Waterwaya* gdje brodovi plovi. Zbog toga je pojam *Waterwaya* (plovni put) širi od pojma *Fairwaya* (plovidbeni put) [3].



svog položaja na prilazima kopnu, uobičajeno se nazivaju i prilazni plovni putovi. Predstavljaju područje plovidbe u kojem postoji veći broj navigacijskih opasnosti, veća gustoća pomorskog prometa, vjerojatnost pojave nasukanja i/ili sudara je veća, a brodovi nerijetko plove smanjenom servisnom brzinom ili manevarskom brzinom za vrijeme manevriranja.

Prilazni plovni putovi mogu se također podijeliti na vanjske (plovidba do sidrišta ili mjesta započinjanja manevriranja) i unutrašnje (plovidba od sidrišta ili mjesta započinjanja manevriranja do pristana) pri čemu su uvjeti plovidbe na vanjskim prilaznim plovnim putovima bliži uvjetima primjerenim obalnim putovima, dok se plovidba unutrašnjim putovima po svojim svojstvima može se svrstati u manevriranje brodom. Pri tome treba razlikovati manevriranje brodom bez peljara i korištenja tegljača, odnosno manevriranje s peljarom i korištenjem tegljača. U unutarnje plovne putove ubrajaju se i kanali te plovne rijeke.

Nadalje, jedna od važnijih podjela prilaznih plovnih putova je podjela prema toku plovidbe. Ako prilazni plovni put završava na pristanu govori se o terminalnom plovnom putu, a ako plovni put ima karakter «prolaznog» onda se govori o tranzitnom plovnom putu. Naime, pri plovidbi na prilaznom plovnom putu postoje dijelovi plovnog puta kroz koji brod plovi servisnom brzinom, odnosno njegov završni dio koji završava na pristanu pri čemu se način i obilježja plovidbe na tim dijelovima mogu bitno razlikovati. Osnovno obilježje terminalnih plovnih putova je nemogućnost veće promjene položaja tijekom vremena za razliku od tranzitnih koji neposredno ovise o hidrografskim i navigacijskim obilježjima, kao i obilježjima broda, koja pri izboru plovnog puta imaju neposredan utjecaj te samim time određuju položaj tranzitnih plovnih putova.

Na oceanskim plovnim putovima ne postoji potreba posebnog označavanja plovnog puta. Nasuprot tome, obalni, a posebno prilazni plovni putovi su u najvećem broju slučajeva obilježeni s većim brojem navigacijskih oznaka, odnosno s objektima sigurnosti plovidbe. Obilježenost plovnog puta ovisi o geografskom položaju, odnosno o širini i dubini plovnog puta stoga na oceanskim plovnim putovima uobičajeno nema nikakvih ograničenja ili prepreka za razliku od obalnih i prilaznih koji uobičajeno predstavljaju područje povećane opasnosti plovidbe i zahtijevaju odgovarajuće označavanje i obilježavanje. U tom smislu svaka država u svom dijelu obalnog mora propisuje načine označavanja plovnih putova i to posebice glede:

- bočnih granica i sredine plovnih putova,
- prirodnih opasnosti za plovidbu (pličine, prolazi i sl.),
- navigacijskih prepreka za plovidbu (podrtine i sl.) te
- ostalih važnih mjesta za sigurnost plovidbe prvenstveno na prilaznim plovnim putovima (prilazi i ulazi u luke, pristaništa, itd.).

Objekti sigurnosti plovidbe na plovnim putovima mogu biti postavljeni na kopnu ili na moru. Uključuju optičke, zvučne, električne, elektroničke, radio, radarske kao i druge objekte i uređaje. Prvenstveno su to svjetionici, a zatim i plutače te druge oznake. Postavljanje i održavanje objekata sigurnosti plovidbe na plovnim putovima obalnih država jedan je od temeljnih zadataka nacionalnih organizacija za održavanje

sigurnosti plovidbe. Osim toga hidrografski uredi obavljaju i detaljne izmjere dubina mora te održavanje dubina.

Obilježja plovnih putova koja su bitna sa stajališta sigurnosti plovidbe jesu ona obilježja koja imaju direktan utjecaj na omogućavanje plovidbe brodova bilo da pri tome smanjuju ili povećavaju sigurnost. Generalno, plovni putovi su određeni svojim prirodnim obilježjima koja su u većini slučajeva nepromjenjiva te ona definiraju osnovne parametre sigurnosti plovidbe. S obzirom na suvremene potrebe sigurne navigacije uobičajeno se na plovnim putovima, posebice prilaznim, mijenjaju obilježja na način da se osigura veća razina sigurnosti plovidbe i to produbljivanjem, širenjem, dodatnim označavanjem, uvođenjem nadzora i upravljanja plovidbom te drugim sličnim mjerama i aktivnostima.

U nastavku rada prikazana su obilježja na prilaznim plovnim putovima koja uređuju sigurnu plovidbu brodova.

### 2.2.1 Hidrografska obilježja

Hidrografija je znanost mjerenja i opisa karakteristika koja imaju utjecaj na navigaciju, a uključuje opis dubina mora, obalnih linija, morskih mijena, morskih struja, vrsta dna te podvodnih prepreka [3].

U pomorskoj plovidbi se pod hidrografskim obilježjima plovnog puta uobičajeno podrazumijevaju izmjeri i detaljan opis fizičkih karakteristika plovnih površina zemlje na kojima se nalazi odnosni plovni put (uključujući i obalna područja i otoke) sa svrhom postizanja zadovoljavajuće razine sigurnosti plovidbe i vođenja broda. Posebno su važni podaci koji opisuju sljedeća obilježja:

- dubina mora te prirodne osobine morskog dna,
- hidrografska istraženost,
- duljina i širina plovnog puta,
- prostorni raspored kopna i otoka,
- morskim mijenama i strujama.

Dubina mora ( $D_M$ ) je osnovno hidrografsko obilježje. Definirana je kao vertikalna udaljenost između morskog dna i trenutne razine mora. S gledišta sigurnosti plovidbe od temeljne je važnosti dubina koja je navedena na pomorskim kartama (*Chart Depth*), koja u pravilu, predstavlja dubinu mora pri najnižoj razini mora. Iznimno, javljaju se slučajevi kada je trenutna dubina mora manja od dubine navedene na karti. Način utvrđivanja razine mora od koje se mjere i prikazuju dubine na karti opisan je na svakoj pomorskoj karti, a naziva se hidrografska nula (*Chart Datum*). Kao ograničavajući faktor, dubina mora na cjelokupnom prilaznom plovnom putu neposredno utječe na određenje mogućnosti plovidbe brodova odgovarajućeg gaza. Nerijetko se u plovidbi odabiru mnogo duži prilazni plovni putovi radi nedovoljnih dubina na najkraćem plovnom putu, posebice pri plovidbi vrlo velikih brodova čiji gaz uobičajeno prelazi 20 metara. Prirodne osobine morskog dna nemaju veći utjecaj na sigurnost plovidbe brodova, međutim, te osobine uvelike mogu utjecati na posljedice eventualne nezgode. To posebno dolazi do izražaja pri nasukanju na

tvrdi ili kamenito dno pri čemu uobičajeno može doći do posljedičnog izljeva i onečišćenja.

Pojam hidrografske istraženosti u uskoj je vezi s dubinom mora. Predstavlja vjerojatnost da na određenom morskom području postoje mjesta na kojima je dubina manja od one navedene na pomorskoj karti. Hidrografska istraženost, odnosno stupanj hidrografske istraženosti, može se približno procijeniti na temelju broja i razdiobe oznaka dubine mora označenih na pomorskoj karti. Zadovoljavajući stupanj hidrografske istraženosti određenog područja jedan je od uvjeta uspostavljanja sustava ili nekih od mjera sustava usmjerene plovidbe koji se uobičajeno uspostavljaju na prilaznim plovnim putovima. Manji stupanj hidrografske istraženosti plovnog puta često zahtijeva veću širinu plovnog puta. Današnja tehnička i tehnološka razvijenost hidrografskih ureda u svijetu omogućuje vrlo velik broj preciznih mjerenja dubina, a samim time i visoku razinu pouzdanosti izmjerenih dubina, odnosno visok stupanj hidrografske istraženosti gotovo svih plovnih područja, a posebice prilaznih plovnih putova.

Veličina prilaznog plovnog puta drugo je najvažnije hidrografsko obilježje plovnog puta. Pod veličinom se podrazumijevaju duljina te širina plovnog puta. Kako plovni put ne predstavlja pravilan oblik to se pod duljinom i širinom plovnog puta može smatrati određeni dio ili segment plovnog puta na kojem postoje slični uvjeti plovidbe te je širina približno stalna. Uobičajeno je ukupna duljina prilaznog plovnog puta podijeljena na segmente pri čemu širina pojedinog segmenta može predstavljati najveću ili najmanju širinu između navigacijskih prepreka (obala), odnosno najveću ili najmanju širinu plovnog puta na kojem brod može sigurno ploviti s obzirom na dubinu. Segment prilaznog plovnog puta često predstavlja dio plovnog puta, odnosno plovidbeno područje, na kojem brod ne mijenja kurs. U tom smislu i prostorni raspored kopna i otoka utječe na odabir plovidbenog područja i prilaznog plovnog puta. Plovni put uobičajeno longitudinalno slijedi obalu, a otoci su prirodne navigacijske prepreke koje otežavaju plovidbu na tom putu i često, zbog nedovoljnih dubina oko njih, imaju utjecaj na povećanje dužine prilaznog plovnog puta.

Navedena hidrografska obilježja prilaznog plovnog puta u pravilu su poznata i ne mijenjaju se tijekom vremena osim u slučaju radova na plovnom putu<sup>11</sup>. Ostala hidrografska obilježja uvelike se mijenjaju tijekom vremena, u pravilu ne ograničavaju, već imaju veći ili manji utjecaj na plovidbu brodova.

Morske mijene su periodično podizanje i spuštanje razine mora. Nastaju uslijed utjecaja sile gravitacije Mjeseca i Sunca, a veličina i vrijeme pojave ovisi o relativnom položaju navedenih nebeskih tijela. U pravilu, tijekom jednog dana pojavljuju se dvije maksimalne i dvije minimalne vrijednosti razine mora (poludnevne morske mijene). Također, mogu se pojaviti jedna maksimalna i jedna minimalna vrijednost razine mora (dnevne morske mijene) ili se visine i broj dnevnih ekstrema mijenjaju tijekom dužeg razdoblja (morske mijene mješovitog tipa). Bez obzira na tip

---

<sup>11</sup> Nerijetko se na prilaznim plovnim putovima obavljaju radovi na produbljivanju ili proširenju postojećeg puta s ciljem omogućavanja prihvaćanja brodova većih dimenzija, odnosno povećanja sigurnosti plovidbe pri čemu se mijenjaju osnovna hidrografska obilježja plovnog puta.

morskih mijena one neposredno utječu na trenutnu dubinu mora te time i na izbor vremena plovidbe ili plovnog puta. U pojedinim područjima svijeta poprimaju značajne vrijednosti<sup>12</sup> pa je plovidba prilaznim plovnim putovima u tim područjima nerijetko vremenski ograničena na razdoblja dana s plimom, odnosno visokom vodom.

Morske struje predstavljaju vodoravno transliranje vodenih masa. Načelno nastaju zbog više uzroka te se mogu podijeliti na:

- geostrofičke struje (stalne morske struje),
- struje generirane vjetrom,
- struje nagiba.

Osim ovih triju vrsta morskih struja postoje i morske struje izazvane utjecajem sile teže Mjeseca i Sunca koje mijenjaju smjer i brzinu morskih struja približno jednako promjeni razine mora uslijed pojave morskih mijena. Brzina ove vrste morskih struja može poprimiti veće vrijednosti, posebice u obalnim i ograničenim morskim područjima, gdje mogu imati veliki utjecaj na plovidbu broda.

Geostrofičke struje nastaju nejednakom raspodjelom gustoće koja uvjetuje pojavu horizontalne komponente gradijenta hidrostatskog tlaka pod čijim se utjecajem razvija horizontalno gibanje vodenih čestica. Zbog toga se još i nazivaju gradijentne struje, struje gustoće ili relativne struje. Gustoća morske vode određena je dubinom na kojoj se voda nalazi, temperaturom i slanošću. Razne okolnosti, od kojih su najvažniji klimatski uvjeti u nekom području te utjecaji obližnjeg kopna, uvjetuju pojavu morskih područja s relativno stalnim razlikama u gustoći mora čija je posljedica razlika u razini mora (može iznositi do 0,5 metara na udaljenosti od 40 nautičkih milja). Posljedica razlike u razini mora je kretanje vode iz područja više razine prema području niže razine, odnosno pojava stalne morske struje čija je brzina približno proporcionalna gradijentu gustoće morske vode i uobičajeno je malih promjena s prosječnim vrijednostima od 0,5 čvorova.

Morske struje generirane vjetrom ili struje potiska nastaju trenjem vjetra i morske površine pri kojem se energija kretanja čestica zraka prenosi na čestice vode. Brzine kod ovih struja su najveće na površini, a kako se ide u dubinu, one se smanjuju. Dubina vjetrom pokrenutog morskog sloja ovisna je o mnogim utjecajima. Brzina morske struje generirana vjetrom na otvorenom moru može približno iznositi do 2% brzine vjetra na visini 10 m iznad morske površine, a procjenjuje se da se javlja već pri 12 sati neprekinutog puhanja vjetra približno istog smjera. Ove struje mogu uzrokovati i pojavu stalnih struja i to na područjima stalnih vjetrova (npr. pasati).

Struje nagiba ili denivelacije mora su također morske struje posredno uvjetovane puhanjem vjetra. Naime, vjetar nagomilava vodu na obalu ili je potiskuje od obale, te tako nastaje nagib površine mora što uvjetuje pojavu horizontalne komponente gradijenta hidrostatskog tlaka koja generira horizontalno gibanje vodenih čestica.

---

<sup>12</sup> U zaljevu Fundy u Kanadi izmjerena je najveća amplituda morskih mijena od 19,6 metara.

Bez obzira na uzrok nastanka morskih struja na određenom plovnom putu one utječu na plovidbu broda točnije na promjenu kursa i brzine broda. Morske struje čiji je smjer okomit na uzdužnicu broda mijenjaju kurs broda, dok struje koje djeluju paralelno s uzdužnicom broda ubrzavaju ili usporavaju brod. Utjecaj struja na promjenu i održavanje kursa broda na prilaznim plovnim putovima može biti značajan te zahtijeva posebnu pažnju posade brodova. Posebno se to odnosi na plovne putove gdje je širina pojedinih segmenata relativno mala u odnosu na veličinu broda.

### **2.2.2 Navigacijska obilježja plovnog puta**

Navigacijska obilježja plovnog puta jesu obilježja koja omogućavaju orijentaciju na moru, odnosno omogućavaju određivanje položaja broda u svim uvjetima, upravljanje i nadzor kretanja brodova, balisažu, itd. S obzirom na stalnost u određenom razdoblju uvjetno se mogu podijeliti u dvije skupine:

- statička,
- dinamička obilježja plovnog puta.

U statička navigacijska obilježja ubrajaju se ona obilježja i čimbenici koji nisu podložni značajnim promjenama u kraćim vremenskim razmacima dok su dinamička obilježja ona koja su u većoj ili manjoj mjeri podložna promjenama tijekom vremena. Bez obzira na vrstu navigacijskog obilježja, njihov utjecaj mora se promatrati u odnosu na tehničko-tehnološka svojstva odnosnog broda te u odnosu na kvalitetu njegove navigacijske opreme.

Kao osnovno navigacijsko obilježje plovnog puta može se promatrati pokrivenost plovnog puta ili cjelokupnog područja navigacijskim sredstvima namijenjenim određivanju položaja brodova. Karakteristike navigacijskih sredstava neposredno utječu na očekivane točnosti izračunatog položaja, posebice u obalnoj navigaciji, te time određuju razinu sigurnosti plovidbe i mogućnost pojave pojedinih nezgoda, prvenstveno nasukanja. Određivanje položaja brodova moguće je korištenjem neke od metoda terestričke navigacije, radarske navigacije ili sustava satelitske navigacije s tim da današnja suvremena pomorska navigacija podrazumijeva istovremenu upotrebu primarnog i sekundarnog načina određivanja položaja, odnosno provjeru položaja dobivenog jednim načinom. Navigacijska sredstva na prilaznom plovnom putu uključuju odgovarajuća svjetlosna, zvučna i elektronička sredstva koja su postavljena na obali ili moru. Prilazni plovni put je uobičajeno definiran te se označava lateralnim (bočnim) oznakama, dok se odgovarajuće navigacijske prepreke označavaju kardinalnim (osnovnim) oznakama, oznakama usamljene opasnosti, oznakama sigurne vode te posebnim oznakama.

Na sigurnost plovidbe na plovnom putu kao jedno od njegovih obilježja, utječe i vrijeme dostupnosti pojedinog načina određivanja položaja broda. Pod pojmom dostupnosti podrazumijeva se omjer vremena u kojem je određen način moguće koristiti sa zadovoljavajućom točnošću u odnosu na ukupno vrijeme plovidbe tim plovnim putom.

Jedno od važnih navigacijskih obilježja plovnog puta je prostorna rasprostranjenost prirodnih i umjetnih navigacijskih prepreka. Tu se prvenstveno misli

na broj, raspored i razinu označenosti dijelova kopna čija obilježja ne dopuštaju prolaz brodova određenih tehničko-tehnoloških veličina ili ugrožavaju njihovu sigurnu plovidbu, kao i izolirane objekte u moru koje sprječavaju plovidbu. Dijelovi kopna mogu biti izolirani otoci, otočići, hridi, dok objekti u moru mogu biti pojave santi leda, položaji podrtina brodova ili odobalni objekti.

U cilju povećanja sigurnosti plovidbe na pojedinim prilaznim plovnim putovima uvode se preporučene i obvezne plovidbene rute. Takve plovidbene rute dijelovi su sustava usmjerene plovidbe i posebno su definirani i označeni na pomorskim kartama. Najčešće u tim područjima, osim sustava namijenjenih pozicioniranju brodova uspostavljeni su i sustavi nadzora i upravljanja pomorskim prometom (*Vessel Traffic Management System*) te sustavi obveznog javljanja brodova (*Mandatory Ship Reporting Systems*). Cilj takvih sustava je navođenje brodova na korištenje dijelova prilaznog plovnog puta na kojem će biti veća sigurnost plovidbe odgovarajućeg broda te manji rizik pojave nezgode.

### **2.2.3 Meteorološki i oceanološki uvjeti na plovnom području**

U izrazito promjenjiva obilježja plovnog puta mogu se svrstati meteorološki i oceanološki uvjeti. Njihova stalnost i ponovljivost može se promatrati samo u dužem razdoblju dok se kratkotrajno uvelike mijenjaju i utječu na sigurnost plovidbe. Opći meteorološki uvjeti koji prevladavaju na određenom plovnom putu određeni su meteorološkim elementima i to: temperaturom zraka, atmosferskim tlakom, vjetrom, gustoćom i vlažnošću zraka, vidljivošću ili pojavama magle, oblacima, oborinama, električnim pojavama u atmosferi, dok su oceanološki uvjeti određeni temperaturom, slanošću, gustoćom, prozirnošću i bojom mora, elementima morskih valova, struja i morskih mijena i dr. Na odvijanje sigurne plovidbe na plovnom putu direktan utjecaj imaju samo neki od navedenih elemenata te se mogu pojedinačno promatrati kao čimbenici sigurnosti plovidbe broda. Između pojedinih elemenata postoji velika međuzavisnost<sup>13</sup>. Važna karakteristika navedenih elemenata je njihova stohastičnost u određenom periodu.

Kako su meteorološki, te u manjoj mjeri oceanološki elementi, vremenski i prostorno vrlo promjenjivi pri vrednovanju njihovih utjecaja na plovidbu broda trebaju se uzeti vrijednosti koje imaju najveći utjecaj na sigurnost plovidbe. Također, apsolutne vrijednosti pojedinih elemenata treba promatrati u odnosu na maritimna svojstva broda. Naime, veličina utjecaja pojedinih elemenata ovisi o maritimnim obilježjima broda i generalno vrijedi da na brod većih dimenzija i boljih manevarskih svojstava meteorološki i oceanološki uvjeti imaju manji ili ponekad i zanemarivi utjecaj.

---

<sup>13</sup> Pojava vjetra neposredno ovisi o temperaturnim i razlikama tlaka zraka na nekom području dok je nastajanje valova posljedica puhanja vjetra.

### 2.2.3.1 Meteorološki elementi

Osnovni meteorološki element koji uvjetuje sigurnost plovidbe broda na plovnom putu je vjetar. Njegov osnovni utjecaj očituje se u potiskivanju broda u smjeru puhanja čime prvenstveno mijenja smjer kretanja broda, odnosno mogućnost održavanja broda na plovidbenom putu. Nadalje, djelovanje vjetra očituje se i u naginjanju broda čime vjetar posredno utječe i na smanjenje slobodnog prostora ispod kobilice.

Općenito, utjecaj vjetra na brod pri plovidbi putnom brzinom je relativno mali i primjećuje se tek nakon dužeg razdoblja u obliku većeg ili manjeg zanošenja, zakretanja broda te na promjeni brzine. Nasuprot tome znatno važniji izravan utjecaj vjetar ima na brod tijekom plovidbe smanjenom ili manevarskom brzinom, kao što je to uobičajeno u plovidbi broda prilaznim plovnim putovima, posebice, ako je to plovidba u kanalima, uskim prolazima ili tijekom pristajanja, odnosno tijekom isplavljenja iz luke.

Djelovanje vjetra na brod ovisi o veličini i smjeru sile vjetra. Veličinu sile vjetra na brod prikazuje sljedeći izraz:

$$F_W = C_V \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_A \cdot v_W^2 \cdot A_{WS} \quad (8)$$

gdje veličine u formuli predstavljaju sljedeće:

$F_W$  – sila vjetra (N),

$C_V$  – bezdimenzionalni koeficijent lateralnog otpora broda (određuje se eksperimentalno),

$\rho_A$  – gustoća zraka ( $\text{kg/m}^3$ ),

$v_W$  – brzina vjetra (m/s),

$A_{WS}$  – površina broda izložena djelovanju vjetra ( $\text{m}^2$ ).

Prethodni izraz pokazuje da sila vjetra na brod najviše ovisi o kvadratu brzine vjetra i obliku nadvodnog dijela broda koji ovisi o vrsti broda. Naravno, površinu nadvodnog dijela broda treba odrediti zavisno od smjera djelovanja vjetra. Uobičajeno se promatraju frontalne i lateralne nadvodne površine brodova, a kako je lateralna površina veća, najveća sila na brod javlja se u slučajevima izloženosti broda jakom vjetru koji dolazi bočno, donosno okomito na uzdužnicu broda. Utjecaj je dodatno povećan pri plovidbi smanjenom brzinom kada je održavanje kursa broda otežano zbog slabije mogućnosti djelovanja kormila. Takvo djelovanje vjetra može uzrokovati potiskivanje broda od zadane plovidbene staze što brodu, na ograničenim i uskim prilaznim plovnim putovima, smanjuje raspoloživi plovidbeni put te povećava vjerojatnost ulaska broda u područja povećanih navigacijskih opasnosti. Nasuprot tome djelovanje vjetra u smjeru uzdužnice broda proizvodi mnogo manju silu koja ima zanemariv utjecaj na zanošenje i zakretanje broda. Takvo djelovanje vjetra djeluje samo na promjenu brzine broda koja je uobičajeno zanemariva.

Veličine nadvodnih lateralnih površina veće su kod duljih i viših brodova, a najveći utjecaj vjetar ima na putničke brodove za kružna putovanja te na kontejnerske brodove<sup>14</sup> čije su nadvodne površine općenito najveće.

Od ostalih meteoroloških elemenata važnu ulogu pri plovidbi broda ima vidljivost. Vidljivost se definira kao najveća udaljenost na kojoj motritelj zdravog vida golim okom može razabrati neki predmet u raznim uvjetima plovidbe. Čimbenici vidljivosti na nekom području su pojava magle i oborina. Vidljivost se može označiti kao iznimno dobra vidljivost kada je ograničena isključivo daljinom horizonta motriteljeva oka, zatim ograničena vidljivost kad je horizontalna vidljivost između 1 i 10 km (sumaglica) i slaba vidljivost kad je horizontalna vidljivost ispod 1 km (magla) [27]. Uobičajeno, sigurnost plovidbe je smanjena pri pojavi magle i ograničene vidljivosti. Ovisno o stupnju smanjivanja vidljivosti može se razlikovati slaba (vidljivost 0,5 M), umjerena (vidljivost 500 metara), jaka (vidljivost 200 metara) i gusta magla (vidljivost 50 metara) [27], ali za sigurnost plovidbe vidljivost se mora promatrati s obzirom na veličinu i manevarska svojstva broda. Osim pojave magle smanjenu vidljivost mogu uzrokovati i jake oborine kada je vidljivost smanjena u kratkom razdoblju i na ograničenom području. Također, za određivanje utjecaja vidljivosti na prilaznom plovnom putu vrijednosti najveće vidljivosti moraju se promatrati u odnosu na veličinu plovnog područja, odnosno na duljinu i širinu plovnog puta.

Pojava magle, odnosno smanjene vidljivosti, neposredno utječe na smanjenje sigurnosti plovidbe na prilaznom plovnom putu jer se plovidba odvija u uvjetima koji otežavaju uočavanje objekata te međusobno brodova. Smanjena vidljivost može dovesti do krivih procjena i odluka te nepoduzimanja uobičajenih radnji u cilju sigurnog upravljanja brodom, posebice pri izbjegavanju sudara na moru.

Uobičajeno, razina sigurnosti plovidbe i mogućnost plovidbe brodova odgovarajućih maritimnih svojstava na prilaznim plovnim putovima procjenjuje se na osnovi podataka o učestalosti pojave meteorološkog elementa. Učestalost se najčešće opisuje ukupnim godišnjim brojem dana u kojima se određena meteorološka pojava dogodila. Sa stajališta opasnosti koje prijete brodu u plovidbi važan podatak predstavlja broj dana s maglom te broj dana s vjetrovima pri kojima plovidba neće biti moguća ili će zahtijevati dodatnu sigurnost (npr. smanjenje brzine plovidbe, korištenje tegljača ili peljara).

### **2.2.3.2 Oceanološki elementi**

Oceanološki elementi koji imaju neposredan utjecaj na plovidbu broda na prilaznom plovnom putu jesu:

- valovi,
- morske struje te
- morske mijene.

---

<sup>14</sup> Utjecaj vjetra na kontejnerske brodove je izrazito velik kada su nakrcani do najvećeg kapaciteta.



Osnovni oceanološki element koji utječe na sigurnost plovidbe su valovi. Valovi predstavljaju proces periodičnog kolebanja slobodne morske površine koja nastaje osciliranjem vodenih čestica pod utjecajem uzbudnih sila, primjerice vjetra, i umirujućih sila kao što je površinska napetost vodene mase [82]. Jedan od najznačajnijih generatora, odnosno uzroka pojave valova je vjetar. Valovi koji su posljedica trenutno prevladavajućeg vjetra nazivaju se valovima živog mora, a valovi koji ostaju prisutni nakon što vjetar prestane puhati ili promijeni smjer nazivaju se valovima mrtvog mora.

Osnovni elementi valova su visina ( $H_W$ ), duljina ( $L_W$ ) te period širenja ( $T_W$ ). Pravilni valovi uobičajeno se predstavljaju oblikom trohoide, dok se valovi manjih visina u odnosu na duljinu zadovoljavajuće točno prikazuju sinusoidom. Osnovni elementi vala u slučajevima kada je dubina mora veća od polovice valne duljine ( $d > L_W / 2$ ) mogu se opisati sljedećim izrazima:

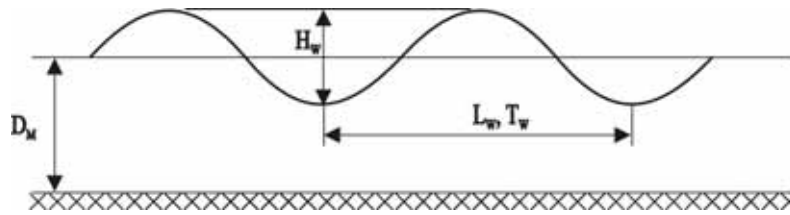
$$L_W = \frac{2 \cdot \pi \cdot g}{\omega}, \quad H_{WMAX} = 0,46 \cdot \sqrt{D_W}, \quad T_W = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}. \quad (9)$$

gdje veličine u izrazu predstavljaju sljedeće:

- $L_W$  – valna duljina (m),
- $H_{WMAX}$  – najveća visina vala (m),
- $T_W$  – period širenja vala (s),
- $D_W$  – duljina privjetrišta (m),
- $g$  – ubrzanje sile teže ( $m/s^2$ ),
- $\omega$  – valna frekvencija (rad/s).

Valna duljina je vodoravan razmak između dva vrha susjednih valnih brjegovova. Valovi mrtvog mora imaju stvarnu duljinu nešto manju od duljine dobivene navedenim izrazom, dok valna duljina za valove živog mora iznosi oko dvije trećine vrijednosti dobivene izrazom.

Valna visina je vertikalni razmak vrha valnog brijega i najniže točke susjednog dola istog vala. Razlikuju se srednja visina valova (srednja visina jedne trećine najviših valova) koja se uobičajeno naziva značajna (signifikantna) visina vala i najveća visina vala. Prosječna visina valova približno je jednaka 0,64 značajne visine, dok najviši valovi dostižu vrijednosti 1,87 puta veće od značajnih valova. Navedeni izraz za najveću visinu vala je empirijski izraz iz kojeg je vidljivo da visina valova ovisi o duljini privjetrišta čime se neposredno pokazuje da su na oceanskim područjima mogući mnogo viši valovi nego na obalnim i prilaznim plovnim putovima posebice, ako vjetar puše s kopna, a plovni put se nalazi blizu i usporedno s kopnom. U stvarnosti omjer najveće visine i duljine vala rijetko prelazi 1/10 nakon čega dolazi do loma vala.



Slika 4 Osnovni elementi sinusoidalnog vala

Period širenja vala je vremenski razmak između dvije uzastopne pojave vrha valnog grebena na istom mjestu (točki).

Osnovni utjecaj elemenata valova na sigurnost plovidbe na prilaznim plovnim putovima, prvenstveno valne visine i duljine, očituje se u utjecaju na maritimna svojstva broda u plovidbi. Općenito, uslijed gibanja broda na valovima koje je okarakterizirano zastajanjem ili ubrzanjem, posrtanjem ili poniranjem, ljuljanjem i zanošenjem te zaošijanjem dolazi do promjene smjera i brzine plovidbe. Odvojeno se može promatrati utjecaj valova koji djeluju u smjeru uzdužnice broda koji utječu na promjenu brzine i smjera (posrtanje) broda te utjecaj valova kada oni dolaze iz smjera okomitog na smjer kretanja broda kada oni uzrokuju valjanje broda. Uslijed gibanja broda kao posljedica valova dolazi do povećanja trenutnog gaza broda čime se na prilaznim plovnim putovima uvelike smanjuje slobodan prostor ispod kobilice. Osim navedenih utjecaja, valovi mogu smanjiti upravljivost broda i to u slučajevima kada dolaze po krmi ili kada im je pretežiti smjer kretanja istog smjera kao i kretanje broda.

Općenito utjecaj valova na brod ovisi o maritimnim svojstvima broda jer se utjecaj valova, mnogo manjih visina i duljina, u odnosu na dimenzije broda, može gotovo u potpunosti zanemariti. To je čest slučaj u zatvorenim morima pri plovidbi velikih brodova ( $L_{OA} > 200 \text{ m}$ ) na prilaznim plovnim putovima gdje je utjecaj valova zanemariv na kretanje broda.

Djelovanje morskih struja na kretanje broda ima vrlo sličan utjecaj kao i djelovanje vjetera. Ono uzrokuje promjenu smjera ili brzine kretanja broda. Nasuprot djelovanju valova, djelovanje struja na brod pri plovidbi putnim brzinama može biti značajno jer su struje općenito jače u obalnim i oceanskim područjima za razliku od lučkih područja. Međutim, utjecaj struje na smjer kretanja broda, kao i kod utjecaja vjetera, je najveći pri smanjenim i manevarskim brzinama. Za razliku od vjetera koji uobičajeno nije stalan i u manjoj mjeri predvidljiv, stalne morske struje su predvidljive i relativno stalnih vrijednosti.

Bez obzira na uzrok nastanka struje njezin utjecaj na brod može se približno prikazati sljedećim izrazom:

$$F_C = C_C \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot v_C^2 \cdot A_C \quad (10)$$

gdje veličine u izrazu predstavljaju sljedeće:

$F_C$  – sila morske struje (N),

$C_C$  – koeficijent otpora broda izloženog djelovanju morske struje (određuje se eksperimentalno),

$\rho_w$  – gustoća morske vode u kojoj se nalazi brod ( $\text{kg/m}^3$ ),

$v_C$  – brzina morske struje (m/s),

$A_C$  – bočna površina podvodnog dijela broda ( $\text{m}^2$ ).

Kao i kod sile vjetra, sila morske struje najviše ovisi o brzini te površini na koju djeluje. Dodatno, veliki utjecaj na veličinu sile morske struje ima dubina mora čiji utjecaj mijenja koeficijent otpora broda. Pri dubinama mora koje su približno dvostruko veće od gaza broda, koeficijent otpora broda nekoliko puta je veći od koeficijenta pri plovidbi broda otvorenim morem s neograničenim dubinama.

Uobičajeno, najveći utjecaj imaju stalne morske struje koje se javljaju na širokim morskim područjima i uobičajeno prate brod na cijelom plovnom putu. Kako su brzine i smjerovi stalnih morskih struja predvidljivi i stalni za pojedini plovni put (uobičajeno su smjerovi i brzine morskih struja ucrtani na pomorskim kartama i peljarima) njihov utjecaj na sigurnost plovidbe može se dobro unaprijed procijeniti.

Djelovanje morskih mijena, kao čimbenika sigurnosti plovidbe na plovnom putu se ogleda u promijeni trenutne dubine mora. Kako dubinu mora treba promatrati u odnosu na gaz broda, tako i utjecaj morskih mijena ovisi o gasu broda. Vrijednosti morskih mijena odnosno visina i vremena nastupa visokih i niskih voda, su veličine koje se prognoziraju tablicama morskih mijena (*Tide tables*), stoga se i njihov najveći utjecaj na promjenu dubine mora može vrlo točno unaprijed izračunati.

Na sigurnu plovidbu brodova oceanskim i obalnim plovnim putovima, utjecaj morskih mijena, koji se ogleda u smanjenju trenutne dubine mora, može se zanemariti jer su dubine mora u pravilu višestruko veće od gaza broda. Navedeno vrijedi čak i na plovnim putovima na kojima se javljaju najveće vrijednosti morskih mijena. Nasuprot tome, plovidba prilaznim plovnim putovima se odvija u područjima manjih dubina gdje utjecaj morskih mijena može imati za posljedicu pojavu trenutne dubine koja ugrožava sigurnu plovidbu broda. Općenito, veće amplitude morskih mijena na dijelovima plovnog puta s malim dubinama utječu na smanjenje sigurnosti plovidbe.

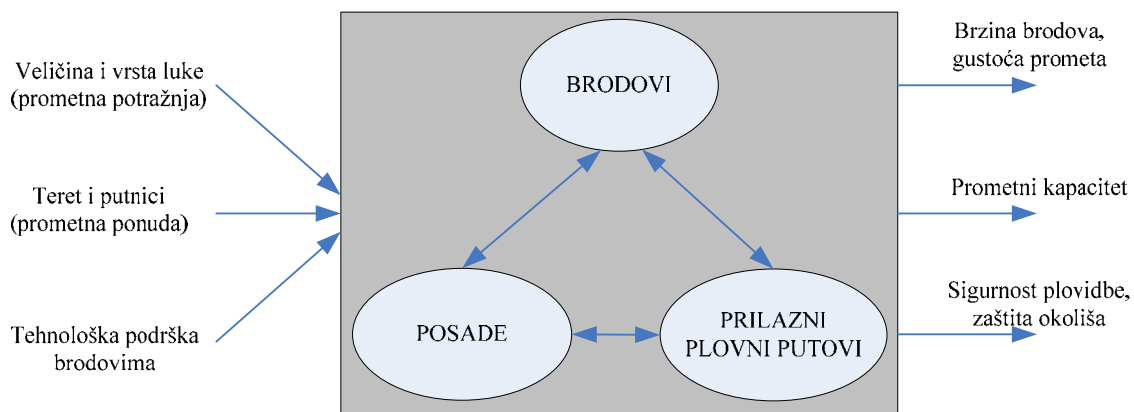
Utjecaj oceanografskih čimbenika na sigurnost plovidbe je različit. Dok je utjecaj valova najvažniji, utjecaj morskih struja, a posebice morskih mijena često ne pridonosi većem ugrožavanju sigurnosti plovidbe. Utjecaj valova uobičajeno se promatra kao vrijednost ponovljivosti pojavljivanja (u postocima) valova određene valne visine i smjera. Slično se opisuje i utjecaj morskih struja pri čemu važnu ulogu imaju brzina i smjer struja.

### **2.3 OBILJEŽJA POMORSKOG PROMETA I POMORSKO-PROMETNOG TOKA**

Pomorski promet može se promatrati kao sustav koji predstavlja integralnu cjelinu u sklopu kojeg se događaju odgovarajući procesi. Unutar takvog sustava pojavljuju se podsustavi i elementi između kojih postoje veze i korelacije. Pomorski prometni sustav može se okarakterizirati kao dinamičan, stohastičan, otvoren i kompleksan sustav.

Dinamičnost se ogleda u kontinuiranoj promjeni elemenata njihovih veza i veličina tijekom vremena. Stohastičnost pomorskog prometnog sustava proizlazi iz pojava koje se mogu, ali i ne moraju ostvariti te se događaji i pravila djelovanja unutar sustava u budućnosti teško mogu predvidjeti. Pomorsko-prometni sustav je potpuno otvoren sustav jer ima brojne veze s okolinom s kojom razmjenjuje informacije, energiju, djeluje i odgovara na promjene ili im se prilagođava te je uvelike kompleksan jer se sastoji od ogromnog broja elemenata, a između elemenata postoje mnogobrojne uzajamne veze te pravila interakcije.

Kao i sustav, podsustav koji čini dio sustava, može se ograničiti granicom te prikazati ulaznim i izlaznim veličinama te kao takav imati karakteristike i biti shvaćen manjim sustavom. Jedan od podsustava pomorskog prometnog sustava predstavlja pomorsko-prometni tok na prilaznim plovnim putovima. Sastoji se od međusobno povezanih elemenata, može se ograničiti te posjeduje ulazne i izlazne parametre. Veličina takvog podsustava ovisi o većem broju vanjskih elemenata, prvenstveno o veličini prilaznog plovnog puta, veličini i obilježjima luke te obilježjima brodova. Općenito, pomorsko-prometni tok predstavlja istodobno kretanje više brodova na plovnom putu ili plovnom području<sup>15</sup>.



**Slika 5 Organizacijska struktura sustava pomorsko-prometnog toka**

Temeljni element podsustava pomorsko-prometnog toka jesu brodovi sa svojim obilježjima, a temeljni proces predstavlja plovidba broda na plovnom putu koja ovisi o ulaznim veličinama i elementima. Za modeliranje prometnog toka od najveće važnosti je pravilna analiza izlaznih parametara koji određuju razinu sigurnosti plovidbe. Posada broda, odnosno časnici u straži te zapovjednik broda, kao važan element pomorsko-prometnog toka neposredno utječu na proces plovidbe svojim odlukama pri upravljanju brodom [49].

Tok se može predstaviti i kao posebno obilježje plovnog puta koje je izravna posljedica promjene prometnog opterećenja na tom putu. Načelno, prometno opterećenje jest obilježje kojim se opisuje trenutno stanje prometa na pojedinom

<sup>15</sup> Slično kao u cestovnom prometu, gdje prometni tok predstavlja istodobno kretanje više prometnih entiteta (automobila, vlakova ili pješaka) u istom smjeru po prometnoj infrastrukturi (cesti, željezničkoj pruzi ili pješačkim stazama).

plovnom putu ili prometnom području u odnosu na neko granično stanje pri kojem određeni uvjeti, prvenstveno sigurnosni, više nisu zadovoljeni.

Na plovnom putu brodovi uobičajeno plove slobodno bez utjecaja vanjskih elemenata koji bi prouzročili prekid plovidbe. Također, na plovnom putu plove različite vrste brodova, a brzina, smjer plovidbe te plovidbeni putovi se mijenjaju. Zbog navedenog za pomorsko-prometni tok vrijedi da je neprekinut, nehomogen i nestacionaran. Na nekim prilaznim plovnim putovima<sup>16</sup> može se javiti i idealan prometni tok koji će se sastojati od brodova iste vrste, istih dimenzija i istih karakteristika.

Osnovni parametri prometnog toka su brzina ( $v$ ), gustoća ( $\delta$ ) i kapacitet prometnog toka ( $q$ ). Obilježja pomorsko-prometnog toka imaju utjecaj na pojavu svih vrsta pomorskih nezgoda, odnosno na razinu sigurnosti plovidbe, a kao primarni utjecaj mogu se promatrati pri razmatranju opasnosti od sudara brodova.

---

<sup>16</sup> Predstavljaju prilazne plovne putove prema specijaliziranim terminalima, najčešće za rasuti i tekući teret.

### 3. ORGANIZACIJSKO-SIGURNOSNI USTROJ POMORSKO-PROMETNOG TOKA

#### 3.1 PARAMETRI POMORSKO-PROMETNOG TOKA

##### 3.1.1 Gustoća pomorskog prometa

Parametar koji najbolje opisuje pomorsko-prometni tok i prometno opterećenje na nekom plovnom putu je gustoća prometa (*Traffic density*). Gustoća prometa određena je trenutnim brojem brodova (plovila) po jedinici površine. Kako se broj brodova na pojedinom području relativno brzo mijenja tijekom vremena, tako se i vrijednost gustoće u promatranoj vremenskoj jedinici može odrediti kao prosjek većeg broja promatranja, odnosno prosjek većeg broja trenutnih gustoća. Tako dobivena gustoća ustvari predstavlja vrijednost srednje gustoće pomorskog prometa i izražena je izrazom:

$$\delta = \frac{n_s}{A_w} \quad (11)$$

gdje je:

$\delta$  – gustoća pomorskog prometa,

$n_s$  – prosječni broj brodova,

$A_w$  – površina plovnog područja na plovnom putu.

Kao mjera gustoće prometa može se koristiti i izravno broj brodova pri čemu se raspoloživa površina smatra jediničnom te se ne uzima u obzir. Navedena mjera gustoće prometa može se koristiti u slučaju prilaznih plovnih putova gdje su nedvosmisleno određene granice, primjerice u obliku zona odijeljenog prometa, u slučajevima kada je plovno područje nepravilnog oblika te kada je plovno područje koje koriste pojedine vrste brodova unutar određene zatvorene navigacijske cjeline.

Općenito, gustoća prometa je određena jednodimenzionalnom (linearnom), dvodimenzionalnom (površinskom) ili trodimenzionalnom (prostornom) jedinicom mjere. U pomorskom prometu na prilaznim plovnim putovima s određenim granicama plovidbe koristi se linearna gustoća, dok se kod manje ograničenih prilaznih plovnih putova može koristiti i površina područja kao jedinica mjere. Veća gustoća prometa na određenom području ukazuje na smanjenu razinu sigurnosti plovidbe.

Gustoća prometa opisuje prostornu koncentraciju brodova ne uzimajući u obzir vrstu, veličinu ili ostala svojstva brodova u plovidbi. Zbog toga sam broj brodova ne određuje stvarnu sigurnost plovidbe. Da bi se dobila realnija slika sigurnosti plovidbe prostorna koncentracija brodova na nekom plovnom području može se odrediti pomoću prostornog zauzeća brodova u plovidbi. Naime, svaki brod u plovidbi određenim plovnom putom „zauzima“ neko veće područje u kojem kretanje drugih brodova ili položaj drugih objekata sa stajališta sigurnosti nije prihvatljivo. To područje naziva se domena broda (*Ship Domain*). Tradicionalno, domena se definira

kao područje oko broda koju drugi brodovi moraju izbjegavati ili kao područje oko broda koje časnik palube želi zadržati slobodnim od drugih brodova i stacionarnih objekata [35]. Domena se uobičajeno opisuje različitim geometrijskim oblicima čiji su elementi u korelaciji s duljinom i širinom broda (npr. elipsom ili kružnicom) ili se određuje prema parametrima koji ukazuju na razinu sigurnosti plovidbe (npr. udaljenost između brodova)<sup>17</sup>.

U suvremenom pristupu, geometrijski oblik domene određuje se korištenjem statističkih metoda, procjenom navigacijske situacije ili korištenjem simulatora. Geometrijski oblik domene postaje kompleksniji, domena poprima dinamički karakter, a razina sigurnosti plovidbe se određuje temeljem veličine domene [41].

Domena broda može se definirati i sa stajališta nadzora i upravljanja plovidbom kao jedna od mjera određivanja sigurnosti plovidbe. Prema [72] domena broda je operativni prostor oko broda u kojem ulazak drugog nepomičnog ili pomičnog objekta ili druge domene može rezultirati reakcijom ili procesom. Navedena definicija ukazuje da će potencijalna opasnost nastati kada se povrijedi domena jednog broda bilo drugim brodom ili nekim fiksnim objektom. Drugim riječima sigurnost plovidbe neposredno ovisi o prostornom zauzeću plovnog područja i veličinama domena brodova. Veličina domene može se razlikovati ovisno o veličini broda, brzini broda, manevarskim obilježjima, gustoći prometa, dimenzijama i obilježjima plovnog puta.

Na definiranu domenu broda veliki utjecaj ima brzina broda. Veličina slobodnog prostora oko broda mora biti veća pri većim brzinama brodova jer tada brodovi u istom vremenu prelaze veću udaljenost čime se zahtijeva veći slobodni prostor oko broda. Općenito, pri većim brzinama časnik u straži mora reagirati ranije, odnosno na većoj udaljenosti, a praćenje pomorskog prometa od strane VTS<sup>18</sup> operatera je kompleksnije. Posljedično, brži brodovi istih veličina neupitno zahtijevaju veću slobodnu površinu od brodova manjih brzina.

Osnovna karakteristika zauzetosti prometne površine, kao mjere prometnog opterećenja, jest da ona pokazuje ponajprije učinke velikih brodova na iskorištavanje određenog prometnog područja, dok kretanja malih brodova (posebice brodica) ostaju nezabilježena jer su površine za nekoliko redova veličine manje od onih koje zauzimaju veliki brodovi. Ovaj nedostatak moguće je donekle otkloniti istodobnom usporedbom s gustoćom prometa, odnosno s cjelokupnom kvantitativnom ocjenom stanja prometa. U stajanju, površina dodijeljena brodu uobičajeno iznosi pola površine dodijeljene brodu u plovidbi, i uključuje područje u koje, ponajprije zbog sigurnosnih razloga, drugi brodovi ili plovne jedinice ne bi trebale zalaziti.

---

<sup>17</sup> Detaljni pregled dosadašnjih istraživanja oblika, veličine i mogućnosti primjene domene broda može se pronaći u [45].

<sup>18</sup> Engl. *Vessel Traffic Service*.

### 3.1.2 Brzina pomorsko-prometnog toka

Brzina pomorsko-prometnog toka (*Traffic speed*) je srednja brzina kretanja brodova ( $v_{AV}$ ) u nekom području, a predstavlja aritmetičku sredinu trenutnih vrijednosti brzina ( $v_i$ ) svih brodova ( $n$ ) na plovnom putu.

$$v_{AV} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i \quad (12)$$

Uobičajeno je koristan podatak na plovnim područjima gdje promet slijedi približno isti smjer, odnosno na unaprijed definiranim prilaznim plovnim putovima. Iskustveno je poznato da porastom gustoće pomorskog prometa opada brzina toka. Dakle općenito vrijedi:

$$v_{AV} = f\left(\frac{1}{\delta}\right) \quad (13)$$

Predstavljeni funkcionalan odnos gustoće i brzine kod idealnog prometnog toka je linearan dok u stvarnosti uobičajeno poprima različite eksponencijalne vrijednosti.

### 3.1.3 Količina pomorskog prometa

Prethodno navedeni elementi pomorsko-prometnog toka određuju količinu prometa (*Traffic volume*). Količina prometa je proporcionalna broju brodova koji u jedinici vremena prođu crtom poprečnom na osnovni smjer prometnog toka određene širine [26]:

$$q = W \cdot v_{AV} \cdot \delta \quad (14)$$

gdje veličine u izrazu predstavljaju sljedeće:

- $q$  – količina pomorskog prometa,
- $W$  – širina plovnog puta,

Za analizu pomorskog prometa na prilaznom plovnom putu od značaja je i veličina koja predstavlja najveću količinu prometa. Ta veličina naziva se kapacitet plovnog puta (*Traffic capacity*). Za jednosmjerni plovni put izražava se sljedećim izrazom [26]:

$$C_W = c \cdot W \cdot v_{AV} \cdot \delta_{MAX} \quad (15)$$

gdje veličine u izrazu predstavljaju sljedeće:

- $C_W$  – kapacitet plovnog puta,
- $c$  – koeficijent ( $c < 1$ ),
- $W$  – širina plovnog puta,
- $\delta_{MAX}$  – najveća prihvatljiva gustoća prometa.



Važno je naglasiti da pri najvećoj gustoći prometa razmak između brodova je smanjen na najmanju mjeru pri kojoj se može odvijati plovidba, zbog čega brzina prometnog toka postaje minimalna. U takvim uvjetima nastaje zagušenje prometa, prometno opterećenje je granično te se dostiže kapacitet plovnog puta. Zagušenje pomorskog prometa u stvarnosti je vrlo teško očekivati izuzev na prilaznim plovnim putovima i u uskim kanalima, posebice u slučajevima smanjene vidljivosti. U slučaju zagušenja pomorskog prometa ugrožena je sigurnost brodova, stoga brzina prometnog toka mora u svim uvjetima poprimiti vrijednosti koje omogućavaju nesmetano i sigurno odvijanje plovidbe.

Za utvrđivanje kapaciteta prilaznog plovnog puta, odnosno najveće prihvatljive gustoće prometnog toka pri kojoj je zadovoljena sigurna plovidba brodova može se koristiti domena brodova. U tom slučaju najveći broj brodova koji može sigurno ploviti plovnim putom ovisi o najmanjoj domeni brodova koji se mogu pojaviti na plovnom putu, a brzina ovisi o najvećoj brzini prometnog toka koja zadovoljava sigurnu plovidbu. Ta brzina može se nazvati sigurnosna brzina plovidbe, a predstavlja najmanju brzinu broda najlošijih manevarskih obilježja pri kojoj taj brod može održavati kurs<sup>19</sup>. Uobičajeno, sigurnosna brzina plovidbe trgovačkih brodova nije manja od 5 čvorova. Veća brzina prometnog toka od sigurnosne brzine može se smatrati slobodnom brzinom plovidbe.

Ako se ukupna površina plovnog puta predstavi kao umnožak najmanje domene i broja brodova izraz za kapacitet plovnog puta na kojima promet slijedi jedan smjer poprima sljedeći izraz:

$$C_S = \frac{v_s}{D_{MIN}} \cdot W \quad (16)$$

gdje su veličine u izrazu:

- $C_S$  - kapacitet plovnog puta pri plovidbi sigurnosnom brzinom,
- $v_s$  - sigurnosna brzina prometnog toka,
- $D_{MIN}$  - najmanja domena očekivanih brodova na plovnom putu.

Koristeći istu analogiju može se odrediti i količina prometa na plovnom putu koja nastaje isključivo pri plovidbi brodova najvećih domena. Ta količina pomorskog prometa predstavlja kapacitet plovnog puta za plovidbu najvećih brodova koji se mogu očekivati na plovnom putu (kapacitet najveće domene –  $C_{DMAX}$ ).

U stvarnosti prometni tok na prilaznim plovnim putovima je nehomogen što znači da se na njima odvija plovidba brodova različitih maritimnih svojstava pri čemu su njihove domene različite. Ponekad, veličine domena najvećih brodova koji plove određenim plovnim putom su višestruko veće od najmanje domene s kojom je izračunat kapacitet plovnog puta. Stoga se za dobivanje realnije slike kapaciteta plovnog puta moraju uzeti u obzir veličine domena svih brodova s učestalošću ili

---

<sup>19</sup> U cestovnom prometu ta brzina naziva se kritična brzina i predstavlja brzinu pri kojoj je maksimalni protok i jednak je propusnoj moći prometnice.

matematičkom razdiobom njihove pojave. Na plovnim putovima s poznatim razdiobama dolazaka pojedine vrste brodova kapacitet plovnog puta može se odrediti s puno većom točnošću. Takav kapacitet plovnog puta može se nazvati stvarni kapacitet i izraziti sljedećim izrazom:

$$C_R = \frac{v_s}{D_R} \cdot W \quad , \quad (17)$$

gdje su veličine u izrazu:

$C_R$  – stvarni kapacitet plovnog puta,

$v_s$  – sigurnosna brzina prometnog toka,

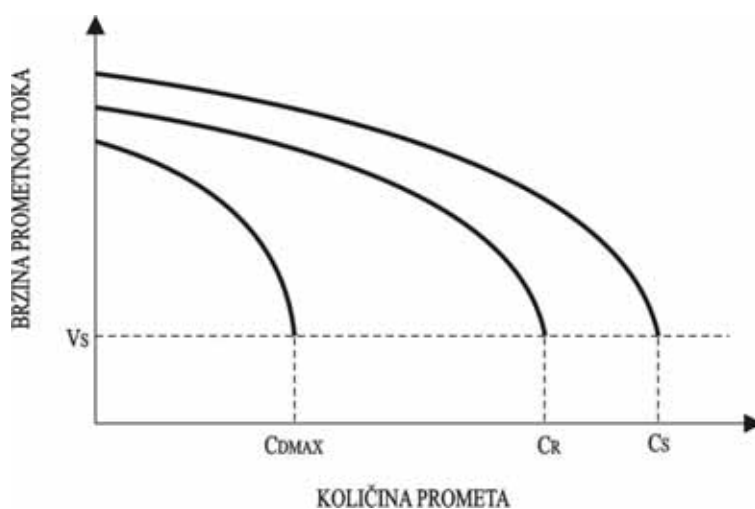
$n_s$  – broj različitih vrsta brodova u plovidbi,

$D_R$  – prosječna domena.

Pri čemu se vrijednost  $D_R$  može odrediti kao:

$$D_R = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n_s} \quad ili \quad D_R = E[X]_{f(x)} \quad (18)$$

Vrijednost stvarnog kapaciteta plovnog puta uvijek je manja od kapaciteta pri plovidbi sigurnosnom brzinom, a kako se izračunava korištenjem vjerojatnosti pojave određenih brodova, količina prometa može poprimiti i veće vrijednosti od stvarnog kapaciteta. S obzirom na uobičajeno veću učestalost manjih brodova stvarni kapacitet je svojom vrijednošću bliži najvećem kapacitetu plovnog puta nego kapacitetu najveće domene.



Slika 6 Odnosi između glavnih parametara pomorsko-prometnog toka

Količina prometa na plovnom putu je veličina koja u usporedbi s kapacitetom plovnog puta prikazuje trenutnu razinu sigurnosti plovidbe. Omjer trenutne količine prometa i unaprijed definiranog kapaciteta plovnog puta predstavlja bezdimenzionalni koeficijent čija je vrijednost uvijek manja od 1. Koeficijent prikazuje veličinu

slobodnog prostora za plovidbu brodova, odnosno ukazuje na mogućnost slobodne plovidbe, te se stoga može nazvati koeficijentom protočnosti ( $c_f$ ). Koeficijent protočnosti izražava se sljedećim izrazom:

$$c_f = \frac{v_{AV} \cdot \delta \cdot D_{MIN}}{v_s} \quad (19)$$

Na plovnom području gdje postoji više prilaznih plovnih putova na kojima brodovi ne slijede približno isti smjer plovidbe, protočnost pomorskog prometa može se predstaviti i odnosom domena svih brodova na plovnom putu i ukupne površine plovnog područja. U tom slučaju domena mora poprimiti dinamička obilježja koja će ovisiti o brzini broda, a sama mjera protočnosti je predstavljena prostornim zauzećem plovidbenog područja.

Prometni tok na prilaznim terminalnim plovnim putovima u stvarnosti uobičajeno je dodatno smanjen zbog ograničenih kapaciteta luka. Naime, manji prometni kapacitet luke od kapaciteta prilaznog plovnog puta dovodi do zagušenja prometa, odnosno povećanja broja brodova na sidrištu i čekanja. Navedeno je od posebne važnosti na terminalnim prilaznim plovnim putovima prema lukama s velikim brojem pristajanja i relativno kratkim zadržavanjem brodova što je uobičajeno kod kontejnerskih terminala i trajektnih pristaništa. Također, prometni kapacitet može biti bitno umanjen u slučaju plovidbe plovila s neuobičajenim maritimnim obilježjima (npr. platforme, teglenice).

### 3.2 SUDARNI PARAMETRI

Definiranje opasnosti pojave sudara ovisi o međusobnom položaju dva broda u plovidbi. Opasnost se može predstaviti sudarnim parametrima ili indikatorima sudara i to:

- najmanjom udaljenosti mimoilaženja brodova ( $d_{CPA}$  – *Distance at closest point of approach*),
- vrijeme do najmanje udaljenosti mimoilaženja brodova ( $t_{CPA}$  – *Time to closest point of approach*).

Vrijednosti sudarnih parametara mijenjaju se promjenom brzine i/ili kursa brodova u plovidbi. Ako se kretanje brodova prikaže u kartezijevom pravokutnom koordinatnom sustavu onda vrijedi:

$$\begin{aligned} A_x &= x_0^A + v_A \cdot \cos(K_A) \cdot (t - t_0) \\ A_y &= y_0^A + v_A \cdot \sin(K_A) \cdot (t - t_0) \end{aligned} \quad (20)$$

odnosno:

$$\begin{aligned}
\Delta x &= x_0^B - x_0^A \\
\Delta y &= y_0^B - y_0^A \\
\Delta v_x &= v_B \cdot \sin(K_B) - v_A \cdot \sin(K_A) \\
\Delta v_y &= v_B \cdot \cos(K_B) - v_A \cdot \cos(K_A)
\end{aligned}
\tag{21}$$

gdje su veličine u izrazu:

- $A_X, A_Y$  – koordinate broda u trenutku  $t$ ,  
 $x_0^A, x_0^B$  – koordinate broda u trenutku  $t=0$ ,

Tada se udaljenost  $d$  između dva broda A i B može prikazati izrazom :

$$d = \sqrt{(B_X - A_X)^2 + (B_Y - A_Y)^2} \tag{22}$$

Uvođenjem vremenske komponente gibanja brodova izraz za udaljenost postaje:

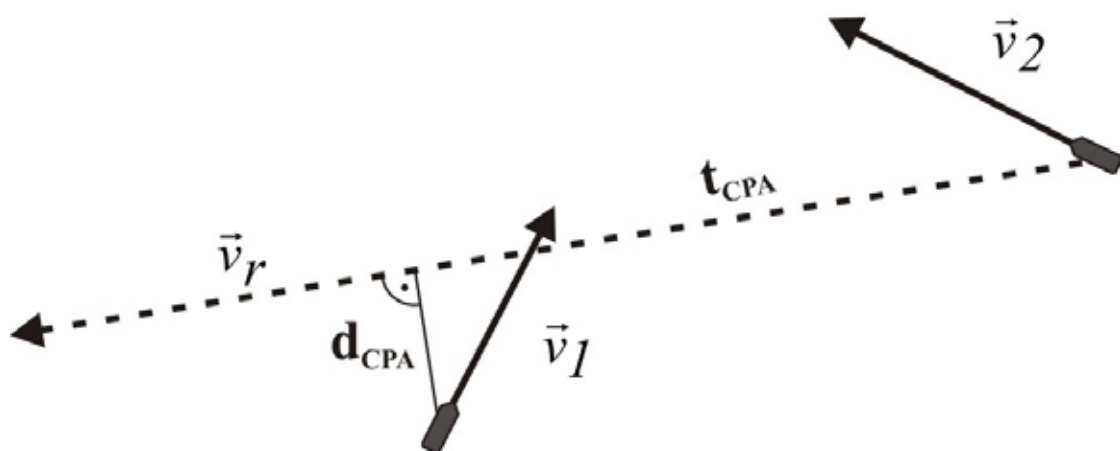
$$d(t) = \sqrt{\Delta x^2 - \Delta y^2 + 2 \cdot t \cdot (\Delta x \cdot \Delta v_x + \Delta y \cdot \Delta v_y) + t^2 \cdot (\Delta v_x^2 + \Delta v_y^2)} \tag{23}$$

Onda trenutak pojave najmanje udaljenosti mimoilaženja predstavlja izraz:

$$t_{CPA} = -\frac{\Delta x \cdot \Delta v_x + \Delta y \cdot \Delta v_y}{\Delta v_x^2 + \Delta v_y^2} \quad \text{za} \quad \frac{\partial d}{\partial t} = 0 \tag{24}$$

Uvrštavanjem u formulu za udaljenost dobije se:

$$d(t_{CPA}) = d_{CPA} = \frac{|\Delta x \cdot \Delta v_y + \Delta y \cdot \Delta v_x|}{\sqrt{\Delta v_x^2 + \Delta v_y^2}} \tag{25}$$



Slika 7 Sudarni parametri i kretanje brodova

U trenutku kada su sudarni parametri manji od minimalno definiranih vrijednosti pojedinog parametra smatra se da postoji potreba promjene brzine i/ili kursa jednog ili oba broda u cilju otklanjanja sudara. Minimalno definirane vrijednosti sudarnih parametara predstavljaju efikasnu mjeru mjerenja rizika razvoja opasnosti sudara [73].

Za potrebe modela maritimnog ustroja pomorskog toka vrijednost sudarnih parametara može se koristiti pri definiranju zona, odnosno područja moguće povećane opasnosti od sudara na plovnom putu (*PAD - Predicted Area of Danger*).

### **3.3 TEHNOLOŠKA I ORGANIZACIJSKA PODRŠKA BRODOVIMA U PLOVIDBI**

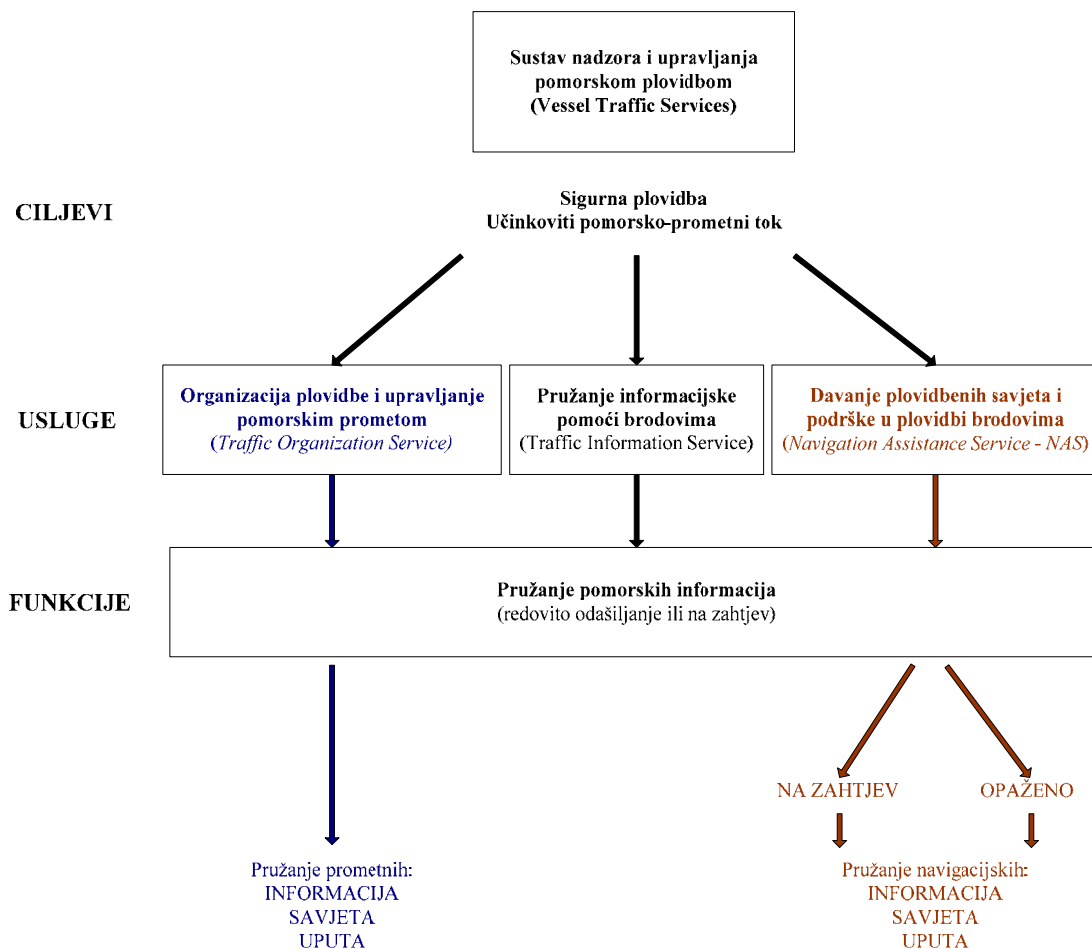
U cilju osiguranja veće sigurnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima, plovidba broda nezamisliva je bez podrške s kopna. Ta podrška može biti usmjerena prema neposrednom i sustavnom djelovanju na način plovidbe brodova ili kao sredstvo pomoći i informiranja pri plovidbi. Osnovna tehnološka podrška brodovima na prilaznim plovnim putovima sastoji se u uspostavi sustava nadzora i upravljanja pomorskom plovidbom. Na taj sustav nadovezuju se i ostali organizacijski elementi plovidbe kao što su sustavi usmjerene plovidbe, tegljenje i peljarenje.

#### **3.3.1 Sustav nadzora i upravljanja pomorskom plovidbom**

Sustav nadzora i upravljanja pomorskom plovidbom (*Vessel Traffic Service – VTS*) predstavlja službu uspostavljenu od strane nadležnih vlasti s ciljem unapređenja sigurnosti i učinkovitosti pomorsko-prometnog toka te zaštite morskog okoliša [68]. Poglavlje V. SOLAS konvencije opisuje sustav nadzora i upravljanja plovidbom kao sustav koji doprinosi sigurnosti ljudskih života na moru, sigurnosti i učinkovitosti plovidbe i zaštiti morskog okoliša, zaštiti obalnih područja, odobalnih postrojenja od mogućeg negativnog utjecaja pomorskog prometa. Sustavi se u načelu uspostavljaju od strane nadležnih vlasti država na plovnim područjima gdje količina pomorskog prometa i stupanj rizika pojave nezgode opravdava uspostavu takvog sustava.

Osnovni poslovi VTS službe mogu se podijeliti na:

- prikupljanje podataka o pomorskim objektima i pomorskom prometu,
- praćenje i nadzor primjene propisa koji se odnose na plovidbu broda,
- pružanje informacijske podrške brodovima (*Information service–IS*),
- davanje plovidbenih savjeta i podrške u plovidbi brodovima (*Navigation Assistance Service - NAS*),
- organizacija plovidbe i upravljanje pomorskim prometom (*Traffic Organization Service - TOS*).



**Slika 8 Usluge i funkcije VTS sustava**

Različitost definiranih poslova unutar pojedinih VTS službi može biti velika. Postoje sustavi koji su namijenjeni razmjeni jednostavnih poruka, ali i sustavi čiji je zadatak složeno upravljanje i organizacija pomorskog prometa na plovnim putovima.

Na današnjim razinama tehnološkog razvoja sredstava za nadzor brodova te obilježjima pomorskog prometa, sustav nadzora uobičajeno obuhvaća upravljanje i organizaciju pomorskog prometa s prikupljanjem, obradom i distribucijom prikupljenih informacija i podataka o prometu. Svrha sustava je pružanje dodatnih funkcija neovisno o postojećem VTS sustavu u cilju objedinjavanja svih službi koje su uključene u pomorsku trgovinu i prijevoz tereta. Takav sustav naziva se VTMS sustav (*Vessel Traffic Management and Information System*), a može se definirati kao skup mjera koje u određenom području i pod određenim okolnostima smanjuju rizike plovidbe i onečišćenja okoliša, a istovremeno povećavaju sigurnost plovidbe i protočnost pomorsko-prometnog toka [64]. Općenito, glavni ciljevi dobro organiziranog VTMS sustava jesu uspostavljanje učinkovitog pomorsko-prometnog toka u unaprijed definiranim plovnim područjima i prilaznim plovnim putovima temeljem učinkovite razmjene informacija o pomorskom prometu.

Funkcije VTMS sustava nerijetko mogu biti i komercijalne pa stoga sustav često prerasta u mrežu sustava kojima je svrha pružanje informacija na zahtjev korisnika.

**Tablica 6 Usluge koje pruža VTMS sustav**

VTMS						
Osnovne VTS usluge			Dodatne usluge			
Informacije	Navigacijska pomoć	Organizacija prometa	Odredbe	Hitnost	Komercijalne operacije	Podrška
Prometne informacije	Podaci o poziciji i kretanju vlastitog broda	Provođenje prometnih pravila	Pravne odredbe	Traganje i spašavanje	Lučke operacije	Peljarenje
Prometno stanje na plovnom putu	Informacije o identitetu i kretanju drugih brodova	Uspostava usmjerene plovidbe	HAZMAT	Nadzor okoliša	Rad terminala	Tegljenje
Meteorološki i podaci	Upozorenja određenim brodovima	Uspostava sustava javljanja	Lučka uprava	Postupci protiv zagađenja	Intermodalni transportni lanac	
Hidrografski podaci	Peljarenje s kopna	Dodjeljivanje manevarskog prostora	Pomorska policija	Protupožarna zaštita	Operacije održavanja i opskrbljivanja brodova	
NAVTEX		Planiranje kretanja	Lučka kapetanija	Zaštita ljudskih života		
		Dodjeljivanje plana plovidbe određenim brodovima	Zdravstvena kontrola			
<b>Suradnja s ostalim VTMS sustavima</b>						

Bez obzira koji sustav nadzora i upravljanja pomorskom plovidbom je implementiran na nekom plovnom području njihovo djelovanje unapređuje sigurnost plovidbe na plovnom putu. Nerijetko, na plovnim putovima gdje postoji uspostavljen sustav, povećanjem pomorskog prometa razina sigurnosti plovidbe se može održati istom ili čak unaprijediti.

Općenito, organizacija sustava nadzora i upravljanja pomorskom plovidbom ovisi o navigacijskim i hidrografskim obilježjima područja, gustoći i obilježjima pomorskog prometa te vrsti usluga koje će se pružiti korisnicima. S obzirom na najveće gustoće pomorskog prometa na prilaznim plovnim putovima korištenje VTS sustava se nameće kao pravilo, a očekivani doprinos ogleda se u mogućnosti unapređenja sigurnosti plovidbe i zaštite mora informiranjem brodova u plovidbi, pružanjem navigacijskih savjeta i uputa s ciljem otklanjanja mogućih prijetnji sigurnosti plovidbe.

Poznavanje razine sigurnosti plovidbe uvelike može koristiti učinkovitom planiranju uspostave VTS sustava na plovnom području, posebice u definiranju područja i sektora nadzora i upravljanja plovidbom te određivanju potrebnog broja operatera.

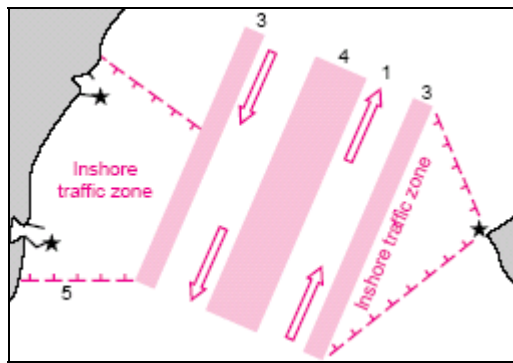
### 3.3.2 Sustav usmjerene plovidbe kao dio plovnog puta

Plovidba brodova određenim plovnim područjima obuhvaća plovidbu po proizvoljno izabranim plovidbenim putovima svakog pojedinačnog broda koji plovi tim područjem.

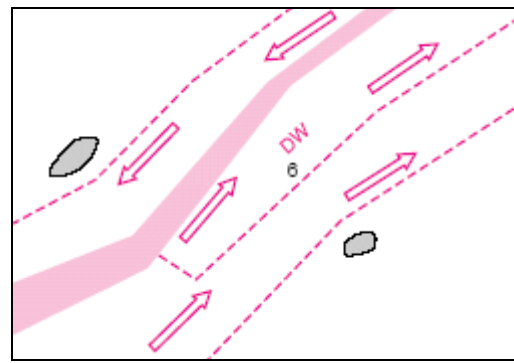
U cilju povećanja sigurnosti plovidbe te zaštite morskog okoliša i smanjenja broja pomorskih nezgoda uobičajeno se u nekom području pomorska plovidba prostorno «organizira». Osnovno obilježje te «organizacije» je postavljanje preporučenih ili obveznih mjera usmjeravanja pomorske plovidbe na dijelovima plovnih putova u skladu s odredbama Konvencije SOLAS, poglavlje V. i pravila 10 Međunarodnih pravila za izbjegavanje sudara na moru. Osnovni cilj uspostavljanja mjera, odnosno sustava usmjerene plovidbe (*Routeing Systems*) je poboljšanje sigurnosti plovidbe u područjima konvergencije plovidbenih pravaca, u područjima velike gustoće prometa ili u područjima gdje je sloboda kretanja brodova smanjena ograničenim manevarskim prostorom, postojanjem navigacijskih pomagala, ograničenom dubinom ili nepovoljnim meteorološkim uvjetima [69]. Drugim riječima cilj usmjeravanja plovidbe je smanjivanje međusobnih opasnih približavanja brodova, izbjegavanje područja povećanog navigacijskog rizika ili područja manjih dubina, odnosno općenito smanjenje opasnosti od nezgoda, prvenstveno sudara i nasukanja.

Mjere usmjerene plovidbe obuhvaćaju sustav odijeljenog prometa (*Traffic separation scheme – TSS*), područje priobalnog prometa (*Inshore traffic zone*), područje povećana opreza (*Precautionary area*), kružni tok (*Roundabout*), dvosmjerni plovidbeni pravac (*Two-way route*), preporučeni plovidbeni pravci (*Recommended route*), plovidbeni pravci za brodove duboka gaza (*Deep water route*) te područja koja treba izbjegavati (*Area to be avoided*).





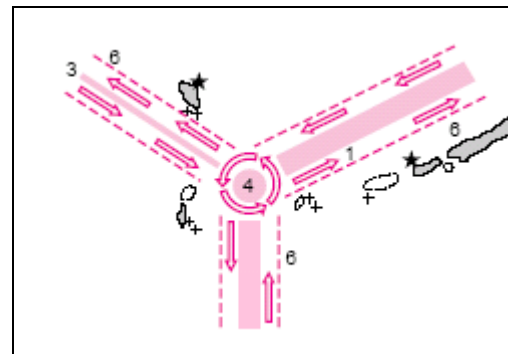
Sustav odijeljenog prometa s područjem priobalnog prometa



Plovidbeni pravci za brodove duboka gaza



Preporučeni plovidbeni pravci



Kružni tok

**Slika 9** Pojedine mjere usmjerene plovidbe

Prema navedenim ciljevima uspostavljanja mjera usmjerene plovidbe vidljivo je da su one primjerene u obalnom području, odnosno na obalnim i prilaznim plovnim putovima. Stoga je i najveći broj tih mjera uspostavljen neposredno uz obalu ili na prilazima lukama gdje postoji najveći broj navigacijskih prepreka i gušći promet brodova. Može se pretpostaviti da na oceanskim plovnim putovima ne dolazi do gustoće prometa ili postojanja opasnih križanja pravaca koje bi, za uobičajene postupke pri upravljanju brodom, zahtijevale uspostavljanje pojedinih mjera usmjerene plovidbe.

Kao i kod sustava upravljanja i nadzora plovidbe, uspostavljanje sustava usmjerene plovidbe doprinosi povećanju sigurnosti plovidbe na određenom području. Naime, u sustavima usmjerene plovidbe broj brodova koji plove u nasuprotnim kursovima na istom plovidbenoj ruti je smanjen, a udaljenost mimoilaženja tih brodova je povećana.

## 4. MODEL MARITIMNOG USTROJA POMORSKOG PROMETA NA PRILAZNIM PLOVNIM PUTOVIMA

### 4.1 MARITIMNI USTROJ POMORSKOG PROMETA

#### 4.1.1 Opće pretpostavke

Odvijanje pomorske plovidbe na prilaznim plovnim putovima predstavlja najstrožiji dio pomorskog pothvata. Brodovi su izloženi najvećoj opasnosti [75], a zbog ograničenog plovnog područja i uobičajeno veće gustoće prometa, vjerojatnost pojave nezgode, prvenstveno sudara i nasukanja, je najveća. Dodatno, na prilaznim plovnim putovima plovidba se uobičajeno odvija pod posebnim nadzorom, a sigurnost plovidbe određena je većim brojem elemenata sigurnosti.

U cilju kvantificiranja razine sigurnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima, pomorski promet može se opisati maritimnim ustrojem. Za potrebe rada, pojam maritimnog ustroja predstavljen je modelom kojim se opisuje pomorsko-prometni tok na prilaznim plovnim putovima. Definiranje navedenog modela maritimnog ustroja pomorskog prometa neposredno ovisi o odabiru elemenata kojim se određuje sigurna plovidba. Osnovno polazište za kvantificiranje sigurnosti plovidbe je analiza stanja pomorskog prometa s obzirom na gustoću prometa, raspored brodova i općenito s obzirom na postojanje opasnosti od sudara.

Modelom maritimnog ustroja pomorskog prometa opisuje se plovidba brodova na prilaznom plovnom putu, pri čemu se smatra da na takvom plovnom putu plovidba obuhvaća:

- plovidbu od otvorenog mora do sidrišta, u lukama gdje se sidrište nalazi u neposrednoj blizini priveza te
- plovidbu od sidrišta do priveza u lukama gdje je sidrište udaljeno od mjesta priveza brodova.

Ovako definiran prilazni plovni put obuhvaća plovidbeno područje na prilazu luci gdje nije uobičajeno korištenje tegljača i peljara, odnosno plovidbu broda prije faze manevriranja. U takvim uvjetima manevriranje se u pravilu smatra plovidba broda nakon prihvata peljara i tegljača ili plovidbu broda manevarskom brzinom u neposrednoj blizini pristaništa za brodove koji nemaju obvezu korištenja peljara ili tegljača. Pojam sidrišta u neposrednoj blizini luke definira se kao mjesto gdje započinje manevriranje, odnosno prihvat peljara i tegljača. U praksi prihvat peljara i tegljača započinje u području sidrišta ili neposredno pokraj njega.

U predloženom modelu, pomorsko-prometni tok, odnosno plovidba brodova, promatra se kao proces koji se odvija u odgovarajućem vremenu ( $t$ ), na unaprijed definiranom plovidbenom području.

Nadalje, maritimni ustroj pomorskog prometa na prilaznim plovnim putovima prikazuje se u ovisnosti o različitim elementima sigurnosti. Ti elementi mogu ukazivati na veći broj opasnosti koje prijete brodu u plovidbi, a načelno se mogu povezati s:

- plovnim putem,
- obilježjima pomorsko-prometnog toka (dinamički elementi),
- vanjskim utjecajima.

Obilježja plovnog puta koji imaju utjecaj na sigurnost plovidbe predstavljaju mjere plovnog puta i to duljina, širina i dubina. Obilježja pomorsko-prometnog toka obuhvaćaju one elemente sigurnosti koji su povezani s plovidbom brodova, a to su obilježja brodova, gustoća prometa, razdioba dolazaka i slično.

Vanjski utjecaji koji se prvenstveno odnose na utjecaj meteoroloških i oceanoloških elemenata na plovidbu broda, u prikazu modela maritimnog ustroja nisu neposredno uzeti u razmatranje. Vanjski utjecaji, prvenstveno vremenske prilike nedvojbeno utječu na razinu sigurnosti plovidbe, stoga je taj utjecaj u modelu opisan posredno, prilagođavanjem vrijednosti pojedinih koeficijenata sigurnosti, veličini i učestalosti vanjskih utjecaja.

Sigurnost plovidbe na prilaznom plovnom putu može se povezati s pojavom različitih pomorskih nezgoda (udar, sudar ili nasukanje). S obzirom na povećanu gustoću plovidbe te specifičnosti plovidbe u ograničenom plovnom području smatra se da opasnost koja najbolje prikazuje razinu sigurnosti plovidbe je opasnost od sudara. Zbog toga, model maritimnog ustroja se opisuje onim elementima sigurnosti koji neposredno određuju opasnost od sudara. Druge opasnosti koje prijete brodu na plovnom putu, prvenstveno mogućnost nasukanja, neposredno se ne razmatraju.

Međuzavisnost elemenata sigurnosti prikazuje ukupno stanje pomorsko-prometnog toka i omogućuje kvantificiranje sigurnosti plovidbe u skladu s navedenim pretpostavkama.

#### **4.1.2 Organizacija sigurnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima**

Organizacija sigurnosti plovidbe obuhvaća sve aspekte djelovanja i mjere kojima se umanjuje opasnost za brodove u plovidbi. Općenito, organizacija sigurnosti plovidbe na prilaznim plovnim putovima može se grupirati prema mjerama i aktivnostima koje određuju sigurnost plovidbe i to na:

- pravne odredbe,
- organizacijska načela,
- ekološka načela.

Pravne odredbe važne za organizaciju sigurnosti plovidbe odnose se na mjere koje su propisane međunarodnim i nacionalnim propisima te pravilnicima luka. Obuhvaćaju unaprijed definirane posebne odredbe i pravila s ciljem povećanja sigurnosti plovidbe i uređenja organizacije plovidbe na određenom plovnom području te mogu imati obvezujući ili samo preporučeni karakter. Na prilaznim plovnim putovima uobičajeno postoji uređeni sustav usmjerene plovidbe kao i obveza korištenja tegljača i peljara pri manevriranju za određene vrste brodova. Dodatno mogu biti uspostavljena ograničenja brzine plovidbe, ograničenja najveće duljine, širine ili najvećeg gaza broda, ograničenja razdoblja dozvoljene plovidbe kao i drugi

režimi plovidbe (pravo prednosti prolaza, zabrane plovidbe, i sl.). Potrebno je naglasiti da bez obzira na posebna pravila plovidbe brodova na prilaznim plovničkim putovima, brodovi moraju ploviti u skladu s Međunarodnim pravilima za izbjegavanje sudara na moru [74].

Dolazak brodova na određeno prilazno plovidbeno područje prvenstveno je uvjetovan postojanjem luke i njezinim obilježjima. Dolazak i odlazak brodova neposredno su ovisni o veličini, vrsti, organizaciji i komercijalnom radu luke. Jedan od najvažnijih elemenata na kojem se temelji maritimni ustroj plovidbe na prilaznim plovničkim putovima predstavlja broj i raspored, te vrsta brodova u dolasku, odnosno odlasku. Općenito je poznato da je sigurnost plovidbe veća što je manji broj brodova na nekom plovničkom putu i obrnuto. Broj i raspored dolazaka i odlazaka brodova, odnosno ulazaka brodova iz područja neograničene plovidbe u područje prilaznih plovničkih putova uobičajeno slijedi neku statističku razdiobu. Prema dosadašnjim istraživanjima [43] na više plovidbenih područja s različitim prometnim obilježjima, za neredovite dolaske brodova u područja prilaznih putova i luka, primjena Poissonove razdiobe pokazuje najmanja odstupanja od stvarnosti.

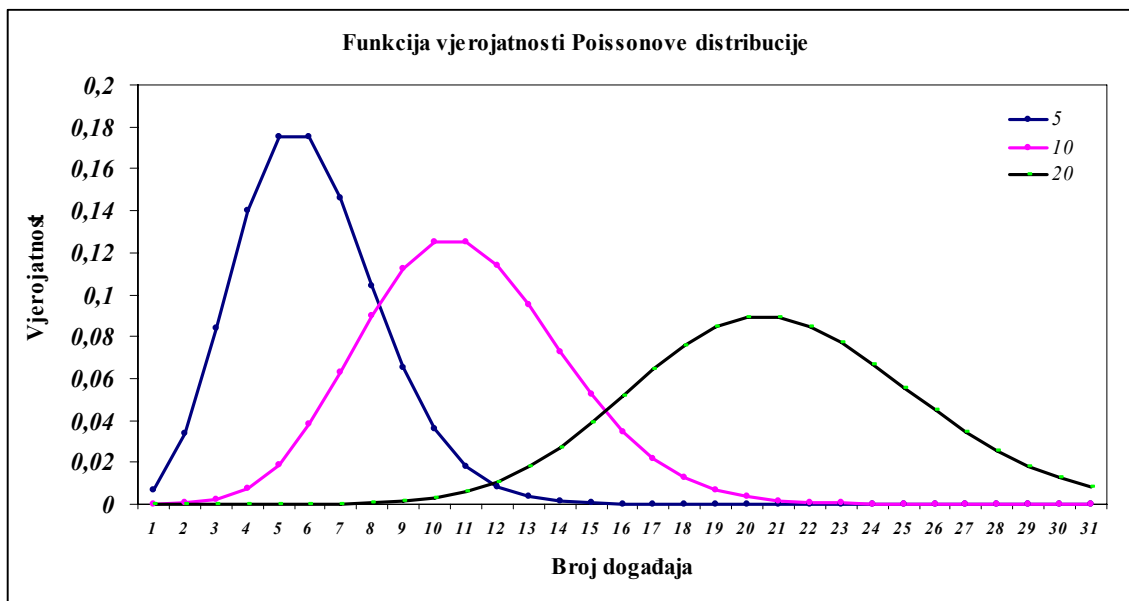
Poissonova razdioba je diskretna funkcija vjerojatnosti koja određuje vjerojatnost pojave događaja u određenom vremenu. Poissonova slučajna varijabla predstavlja broj događaja koji se zbivaju neovisno i slučajno u vremenu s prosječnom frekvencijom. Ako je  $\lambda$  očekivani broj događaja u određenom vremenu, onda vjerojatnost da slučajna varijabla  $X$  s Poissonovom distribucijom poprimi vrijednost  $k$  je jednaka:

$$P(X = k) = f(k; \lambda) = \frac{\lambda^k \cdot e^{-\lambda}}{k!} \quad (26)$$

pri čemu je  $\lambda \in [0, +\infty]$ , a  $k \in \{0, 1, 2, \dots\}$ .

Poissonova razdioba se primjenjuje na događaje za koje vrijede sljedeći uvjeti:

- događaji se mogu brojati nenegativnim cijelim brojevima
- događaji su međusobno nezavisni,
- prosječan broj pojave događaja u zadanom vremenu je poznat i konstantan.



Slika 10 Poissonova funkcija vjerojatnosti za različite vrijednosti  $\lambda$

Dolasci brodova na plovnom putu zadovoljavaju navedene uvjete pa se razdioba koja opisuje dolaske brodova može prikazati modificiranim izrazom za Poissonovu distribuciju:

$$f(n; k \cdot t) = P_n(t) = \frac{(k \cdot t)^n \cdot e^{-(k \cdot t)}}{n!} \quad (27)$$

gdje veličine u izrazu predstavljaju sljedeće:

- $P_n(t)$  - vjerojatnost pojave  $n$  brodova u vremenu  $t$ ,
- $k \cdot t$  - prosječni broj brodova u vremenu  $t$ .

Prikladno razdoblje koje opisuje dolaske brodova iznosi 24 sata, pa se kao ulazni parametar u modelu za prikazani izraz može uzeti prosječni broj dolazaka brodova u jednom danu.

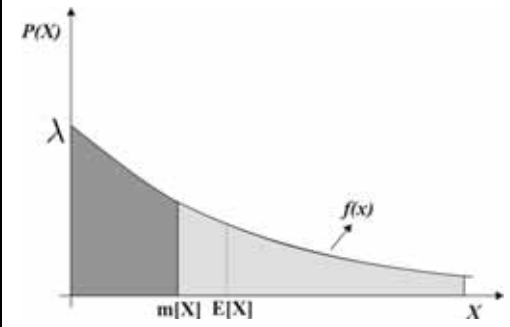
Osim broja dolazaka brodova, za maritimni ustroj važan je i podatak o proteklom vremenu između dolazaka dvaju brodova u područje prilaznih plovnih putova. Kao i kod određivanja broja dolazaka brodova, prethodno navedena istraživanja pokazala su da se vrijeme između dvaju dolazaka broda u pravilu raspoređuje prema eksponencijalnoj razdiobi.

Eksponencijalna razdioba predstavlja statističku razdiobu koja je opisana neprekinutom slučajnom varijablom  $X$  za koju je funkcija gustoće vjerojatnosti zadana izrazom:

$$f(x; \lambda) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases} \quad (28)$$

Slučajna varijabla prikazuje vrijeme između događaja u Poissonovom procesu, odnosno u procesu koji se pojavljuje kontinuirano i neovisno sa stalnim prosječnim brojem koji je opisan parametrom  $\lambda$ .

Numeričke karakteristike eksponencijalne razdiobe	Vrijednost
Matematičko očekivanje	$E[X] = 1 / \lambda$
Varijanca	$V[X] = 1 / \lambda^2$
Medijan	$m[X] = \ln 2 / \lambda$



**Tablica 7 Obilježja eksponencijalne razdiobe**

Kako se eksponencijalna razdioba koristi za mjerenje vremena uzastopnih pojava događaja onda se vrijeme između dvaju dolazaka broda može prikazati izrazom za eksponencijalnu razdiobu:

$$f(t) = k_t \cdot e^{-k_t \cdot t}, \quad t \geq 0 \quad (29)$$

gdje  $k_t$  predstavlja prosječno vrijeme između dvaju dolazaka broda u područje prilaznog plovnog puta. Parametar  $k_t$  može se odrediti temeljem prosječnog broja dolazaka brodova u jednom danu.

Navedene razdiobe moguće je koristiti na plovnim putovima na kojima ne postoje obrađeni statistički podaci, ali i na plovnim putovima gdje su poznati ti podaci. Neovisno od toga, kada su na raspolaganju vjerodostojni podaci o obilježjima pomorskog prometa u dužem razdoblju, broj i raspored dolazaka brodova moguće je opisati i nekom drugom statističkom razdiobom koja će bolje odgovarati stvarnim podacima o pomorskom prometu<sup>20</sup>. Nasuprot tome, u slučaju ograničenog uzorka ili oskudnih i nestalnih podataka moguće je koristiti trokutnu razdiobu.

Trokutna razdioba predstavlja statističku razdiobu koja je opisana neprekinutom slučajnom varijablom  $X$  za koju je funkcija gustoće vjerojatnosti zadana izrazom:

<sup>20</sup> Prema [43] moguće je da vrijeme između dolaska dvaju brodova slijedi Erlangovu razdiobu.

$$f(x|a,b,c) = \begin{cases} \frac{2 \cdot (x-a)}{(b-a) \cdot (c-a)} & a \leq x \leq c \\ \frac{2 \cdot (b-x)}{(b-a) \cdot (b-c)} & c \leq x \leq b \\ 0 & x < a \wedge x > b \end{cases} \quad (30)$$

odnosno  $T(a,c,b)$  za koju vrijedi:

- $a : a \in (-\infty, \infty)$  – najmanja vrijednost slučajne varijable  $X$ ,
- $b : b > a$  – najveća vrijednost slučajne varijable  $X$ ,
- $c : a \leq c \leq b$  – najveća frekvencija slučajne varijable  $X$  (mod).

Tablica 8 Obilježja trokutne razdiobe

Numeričke karakteristike trokutne razdiobe	Vrijednost	
Matematičko očekivanje	$E[X] = (a+b+c) / 3$	
Varijanca	$V[X] = (a^2+b^2+c^2-ab-ac-bc) / 18$	
Mod	$M[X] = c$	

Trokutna razdioba temelji se na poznavanju najmanje, najveće i najvjerojatnije vrijednosti varijable, a najčešće se koristi u slučajevima kada se druge distribucije ne mogu koristiti posebice pri simulacijama. Stoga se za analizu pomorskog prometa u plovidbenim područjima gdje su podaci o pomorskom prometu nestalni, nedostadni ili ne odgovaraju drugim razdiobama, kao dobra nadopuna može koristiti trokutna razdioba.

Današnje poimanje sigurnosti plovidbe obuhvaća i definiranje elemenata zaštite mora i morskog okoliša. S tim u svezi, ekološka načela organizacije plovidbe obuhvaćaju mjere i aktivnosti koje kroz povećanje sigurnosti plovidbe smanjuju vjerojatnost onečišćenja mora. Općenito, može se smatrati da su sve mjere koje su usmjerene prema povećanju sigurnosti povezane, te da utječu na sprječavanje onečišćenja jer umanjuju vjerojatnost nezgode te posljedično i onečišćenja. U cilju smanjenja vjerojatnosti onečišćenja, na prilaznim plovnim putovima najčešće mjere vezane za organizaciju plovidbe odnose se na ograničenja plovidbe određene vrste brodova, odnosno općenito utvrđivanja posebnih pravila plovidbe. Ograničenja plovidbe odnose se prvenstveno na brodove koji prevoze ulja i ukapljene plinove te na brodove koji prevoze veće količine opasnih tereta.

## 4.2 FUNKCIJA SIGURNOSTI PLOVIDBE

Model maritimnog ustroja pomorskog prometa ima za cilj određivanje mjere sigurnosti plovidbe na prilaznom plovnom putu definiranjem funkcije sigurnosti. Funkcija sigurnosti predstavlja mjeru sigurnosti plovidbe pri čemu vrijednost funkcije u trenutku  $t$  prikazuje odgovarajuću razinu sigurnosti plovidbe. S obzirom da se funkcijom određuje razina sigurnosti plovidbe, funkcija se može promatrati kao opis maritimnog ustroja pomorskog prometa sa stajališta sigurnosti, odnosno kao opis prometnog stanja na plovnom području.

Definiranje funkcije sigurnosti ovisi o pomorskom prometu na prilaznim plovnim putovima. Osnovno polazište za određivanje parametara funkcije je podjela sigurnosti plovidbe u dva dijela i to na:

- opću sigurnost plovidbe na plovnom putu,
- sigurnost plovidbe pri povećanoj opasnosti.

Opća sigurnost na plovnom putu podrazumijeva opće prometno stanje na plovnom putu dok povećana opasnost predstavlja stanje pomorskog prometa kada se dva ili više brodova nalaze u međusobnom položaju koji se može okarakterizirati kao položaj pri kojem postoji opasnost pojave sudara, odnosno vrijeme u kojem postoji opasnost od sudara. Potrebno je naglasiti da se u opisu modela maritimnog ustroja neće uzimati u obzir druge opasnosti koje prijete brodu na plovnom putu, prvenstveno mogućnost nasukanja.

Za funkciju sigurnosti vrijede sljedeća obilježja sigurnosti plovidbe:

- opća sigurnost plovidbe ovisi o zauzeću plovidbenog područja, rasporedu i međusobnom odnosu brodova,
- sigurnost pri povećanoj opasnosti ovisi o sudarnim parametrima,
- osnovni čimbenici koji utječu na promjenu razine sigurnosti plovidbe su brzine brodova, veličine brodova te sudarni parametri,
- relativno smanjenje razine sigurnosti plovidbe je najveće pri povećanoj opasnosti.

U skladu s osnovnom podjelom i navedenim obilježjima sigurnosti plovidbe, funkcionalni opis sigurnosti plovidbe definiran je s obzirom na elemente sigurnosti koji određuju sudarnu opasnost. Sudarna opasnost determinirana je međusobnim odnosom brodova, odnosno ovisi o elementima kretanja brodova, i to brzinama, kursovima i odgovarajućim relativnim brzinama.

Funkcijom sigurnosti plovidbe odvojeno se opisuje opća sigurnost i sigurnost pri povećanoj opasnosti. Kriteriji pri opisu funkcije sigurnosti su odnosi vrijednosti sudarnih parametara brodova i unaprijed definiranih:

- granične vrijednosti najmanje udaljenosti mimoilaženja ( $d_{CPAL}$ ), te
- vremena do granične vrijednosti najmanje udaljenosti mimoilaženja ( $t_{CPAL}$ ).



U priloženoj tablici navedeni su kriteriji funkcionalnog opisa pojedine plovidbene okolnosti s obzirom na vrijednosti sudarnih parametara.

**Tablica 9 Opis sigurnosti plovidbe ovisno o plovidbenoj situaciji**

KRITERIJ	OPIS PLOVIDBENE SITUACIJE	OKOLNOSTI O KOJIMA OVISI SIGURNOST PLOVIDBE	OPIS SIGURNOSTI PLOVIDBE
$d_{CPA} > d_{CPAL}$ $t_{CPA} > t_{CPAL}$	NE POSTOJI OPASNOST OD SUDARA	<b>PROSTORNO ZAUZEĆE PLOVIDBENOG PODRUČJA PROSTORNA RAZDIOBA BRODOVA</b>	OPĆA SIGURNOST PLOVIDBE
$d_{CPA} < d_{CPAL}$ $t_{CPA} > t_{CPAL}$	OPASNOST OD SUDARA SE RAZVIJA	<b>MEĐUSOBNI ODNOS BRODOVA</b>	
$d_{CPA} < d_{CPAL}$ $t_{CPA} \leq t_{CPAL}$	OPASNOST SUDARA POSTOJI	<b>PODRUČJE OPASNIH BLIZINA<sup>21</sup></b>	POVEĆANA OPASNOST

Sigurnost plovidbe je određena s četiri plovidbene okolnosti. Svaka od navedenih plovidbenih okolnosti bit će opisana zasebno funkcijom od kojih tri funkcije daju opis opće sigurnosti plovidbe, a jedna opisuje sigurnost plovidbe pri povećanoj opasnosti.

Uzimajući u obzir do sada navedeno, za funkciju sigurnosti plovidbe može se predložiti sljedeći izraz:

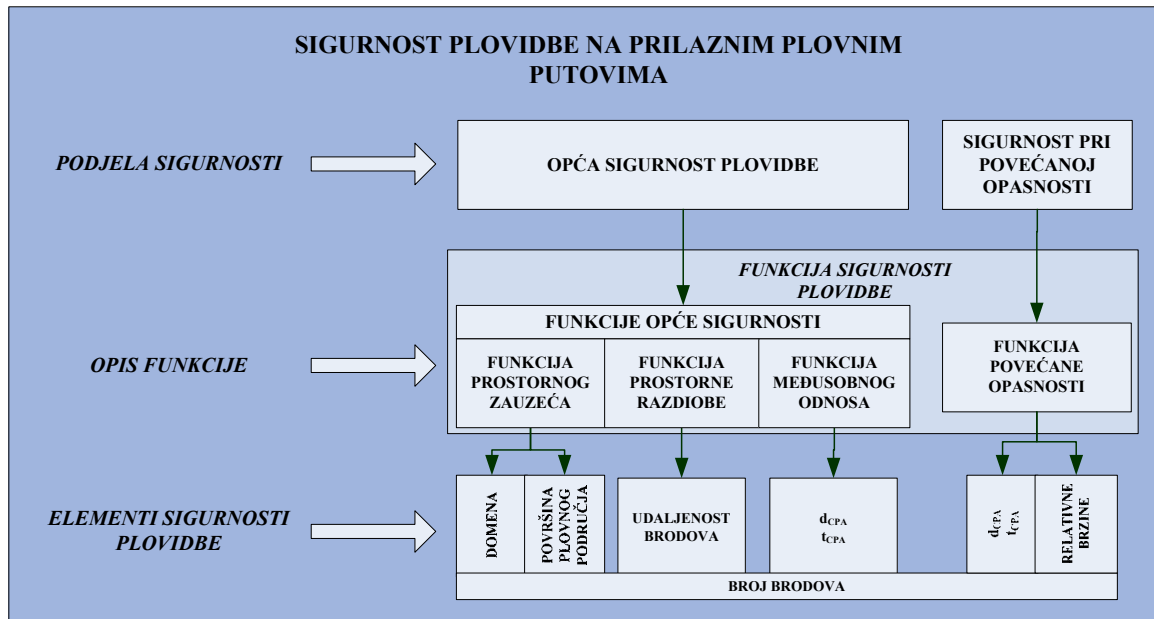
$$W_S(t) = A_{GW}(t) \cdot A_{CD}(t) \quad (31)$$

gdje je:

- $W_S$  – funkcija sigurnosti plovidbe,
- $A_{GW}$  – funkcija opće sigurnosti,
- $A_{CD}$  – funkcija povećane opasnosti.

Funkcija sigurnosti je predstavljena bezdimenzionalnom veličinom, a može poprimiti vrijednosti između 0 i 1. Najveća vrijednost funkcije predstavlja trenutak kada na plovnom putu nema brodova, odnosno opasnosti. Nasuprot tome, najmanju vrijednost funkcija poprima u trenutku kada se dostigne kapacitet plovnog puta, odnosno kada se dostigne unaprijed definirana granica prihvatljivosti prometnog opterećenja i sigurnosti plovidbe, ili kada međusobni odnos dvaju ili više brodova ukazuje na neminovni nastup sudara.

<sup>21</sup> Pod pojmom „Područje opasnih blizina“ smatra se područje, odnosno odgovarajuće vrijeme u kojem međusobni odnos brodova ukazuje na povećanu opasnost od sudara, odnosno povećani rizik sudara (engl. *Area where risks of collision exist*) [37].



**Slika 11 Opis maritimnog ustroja pomorskog prometa na prilaznim plovnim putovima pomoću funkcije sigurnosti plovidbe**

Funkcija opće sigurnosti ( $A_{GW}$ ), predstavlja funkcionalni odnos triju nezavisnih funkcija opće sigurnosti i to:

- funkcije prostornog zauzeća plovidbenog prostora, koja ovisi o broju, veličini brodova te veličini plovnog područja
- funkcije prostorne razdiobe brodova, koja ovisi o rasporedu brodova na plovnom putu te
- funkcije međusobnih odnosa brodova koja ovisi o međusobnom odnosu brodova na plovnom putu.

Funkcija povećane opasnosti ( $A_{CD}$ ) ukazuje na povećanu opasnost na plovnom putu kada se dva ili više brodova nalaze u sudarnoj opasnosti. Funkcija ovisi o sljedećim elementima:

- najmanjoj udaljenosti mimoilaženja brodova,
- vremenu do najmanje udaljenosti mimoilaženja brodova, te
- relativnim brzinama brodova.

Vrijednosti obje funkcije također su normirane u rasponu od 0 do 1 čime je svakoj funkciji pridodan određeni utjecaj na sigurnost plovidbe. Smanjenje vrijednosti bilo koje funkcije smanjuje vrijednost funkcije sigurnosti, odnosno razinu sigurnosti plovidbe. U slučaju da vrijednost bilo koje funkcije postane 1 njezin utjecaj na sigurnost plovidbe ne postoji.

Funkcija povećane opasnosti ima utjecaj na razinu sigurnosti plovidbe samo kada se sudarni parametri dvaju ili više brodova nalaze unutar unaprijed definiranih graničnih vrijednosti. To znači da u ostalim slučajevima funkcija povećane opasnosti ima vrijednost 1 te da razina sigurnosti plovidbe ovisi isključivo o vrijednosti funkcija

opće sigurnosti na plovnom putu, odnosno tada vrijedi  $W(t) = A_{GW}(t)$ . Broj brodova, kao element sigurnosti mijenja svaku od navedenih funkcija, dok ostali elementi mijenjaju samo funkciju koja ovisi o tom elementu.

U nastavku se detaljno opisuje pojedinačno svaka funkcija te se obrazlažu elementi sigurnosti o kojim ovise njihove vrijednosti.

#### 4.2.1 Opća sigurnost plovidbe

Funkcija opće sigurnosti ( $A_{GW}$ ) opisuje stanje sigurnosti plovidbe kada na plovnom putu ne postoji neposredna opasnost sudara te se može poistovjetiti s opisom općeg prometnog stanja na plovnom putu.

Za funkciju opće sigurnosti na plovnom putu predlaže se sljedeći izraz:

$$A_{GW}(t) = A_O(t) \cdot A_{SD}(t) \cdot A_{CPA}(t) \quad (32)$$

gdje je:

- $A_O$  – funkcija prostornog zauzeća plovidbenog područja,
- $A_{SD}$  – funkcija prostorne razdiobe brodova,
- $A_{CPA}$  – funkcija međusobnog odnosa brodova.

Funkcija prostornog zauzeća plovidbenog područja opisana je elementima koji ne mijenjaju vrijednost funkcije za cijelo vrijeme plovidbe zadanog broja brodova plovnim područjem, i to:

- brojem brodova,
- veličinom brodova,
- površinom plovnog područja.

Elementi sigurnosti koji mijenjaju vrijednost funkcije uslijed kretanja brodova na plovnom putu su brzina i kurs broda. Oni mijenjaju vrijednosti međusobnih udaljenosti brodova, kao i međusobni odnos brodova, a u funkciji opće sigurnosti opisani su funkcijom prostorne razdiobe i funkcijom međusobnih odnosa.

Općenito, promjena vrijednosti funkcije opće sigurnosti uvjetovana je ulaskom ili izlaskom broda ili brodova iz plovnog područja ili promjenom položaja brodova. Ulaz ili izlaz brodova mijenja vrijednost funkcije prostornog zauzeća, promjena međusobnih udaljenosti brodova mijenja vrijednost funkcije prostorne razdiobe brodova, a promjenom brzine ili kursa broda mijenja se vrijednost funkcije međusobnih odnosa brodova.

Utjecaj pojedine funkcije opće sigurnosti na sigurnost plovidbe može se opisati na sljedeći način.

- funkcija prostornog zauzeća plovidbenog područja ukazuje na smanjenje razine sigurnosti pri plovidbi brodova veće domene;
- funkcija prostorne razdiobe brodova ukazuje na površinski raspored brodova pri čemu gušći raspored brodova smanjuje vrijednost funkcije;

- funkcija međusobnog odnosa brodova ukazuje na povećanu opasnost u plovidbi brodova čija je najmanja udaljenosti mimoilaženja manja od granične, pri čemu je vrijednost funkcije manja kada je manji  $d_{CPA}$ .

Svaka od funkcija ovisi o jednom ili većem broju koeficijenata koji reguliraju utjecaj elemenata sigurnosti plovidbe na vrijednost funkcija.

#### 4.2.1.1 Funkcija prostornog zauzeća plovidbenog područja

Funkcija prostornog zauzeća plovidbenog područja ( $A_O$ ) definira se kao omjer sume slobodnih površina oko brodova u plovidbi potrebnih za sigurnu plovidbu<sup>22</sup> i ukupne površine plovnog puta ( $A_W$ )<sup>23</sup>. Određena je sljedećim izrazom:

$$A_O(t) = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n(t)} D_i(t)}{A_W} & \sum_{i=1}^{n(t)} D_i(t) < A_W \\ 0 & \sum_{i=1}^{n(t)} D_i(t) \geq A_W \end{cases} \quad (33)$$

gdje je:

$D$  – domena broda ( $m^2$ ),

$A_W$  – površina plovnog puta (plovidbenog područja),

$n$  – broj brodova na plovnom putu u trenutku  $t$ .

Funkcija poprima vrijednost 1 kada na plovnom putu nema brodova te se proporcionalno smanjuje prema 0 povećanjem broja brodova, odnosno povećanjem sume njihovih domena. Veličine domena brodova i površina plovidbenog područja izražene su u jedinici površine, npr.  $M^2$  ili  $km^2$ . Kako brodovi za sigurnu plovidbu trebaju odgovarajući slobodni prostor navedeni izraz ukazuje da će utjecaj funkcije na smanjenje sigurnosti plovidbe biti veći što su veće domene brodova ili se broj brodova povećava. Također, kod kraćih i užih plovnih putova, odnosno općenito kod putova manje plovidbene površine, utjecaj funkcije na sigurnost plovidbe će biti veći<sup>24</sup>. Kada funkcija zauzeća plovidbene površine dostigne vrijednost 0 može se smatrati da je dostignut kapacitet plovnog puta. U stvarnosti kapacitet plovnog puta može biti i veći jer brodovi mogu ploviti pri manjim stvarnim domenama od vrijednosti koje se za funkciju mogu prihvatiti kao najmanje, odnosno granično prihvatljive za sigurnu plovidbu. Tada će na plovnom putu ploviti veći broj brodova, a prihvatljiva sigurnost plovidbe bit će dostignuta pri vrijednosti funkcije većoj od 0.

<sup>22</sup> U nastavku rada za opis funkcije sigurnosti, slobodno područje oko broda potrebno za sigurnu plovidbu nazivat će se domena.

<sup>23</sup> Kao mjera zauzeća plovnog područja može se uzeti i gustoća pomorskog prometa. Međutim, gustoća prometa ne odražava kvalitetno stanje prometa na plovnim područjima gdje je rijedak promet.

<sup>24</sup> Navedeno vrijedi za plovidbu brodova jednakih veličina i brzina.

Uzimajući u obzir obilježja domene i njezin utjecaj na promjenu razine sigurnosti plovidbe, za potrebe ovoga rada veličina domene može se odrediti zadovoljavanjem uvjeta:

$$D = f(L, B, D_s, v) \quad (34)$$

pri čemu se vrijednosti  $L$ ,  $B$  i  $D$  smatraju konstantnim, a  $v$  promjenjivom veličinom za vrijeme plovidbe određenog broda plovnom putom.

Za domenu broda predlaže se sljedeći izraz:

$$D(t) = \pi \cdot [\alpha_{LB} \cdot L \cdot B + a_{\Delta} \cdot LD' \cdot v^2(t)] \cdot [\alpha_{LB} \cdot L \cdot B + \beta_{\Delta} \cdot BD' \cdot v^2(t)] \quad (35)$$

Sumiranjem navedenog izraza za  $n$  brodova dobije se:

$$\sum_{i=1}^n D_i(t) = n(t) \cdot \pi \cdot \alpha_{LB} \cdot \sum_{i=1}^n [L_i \cdot B_i + a_{\Delta} \cdot LD'_i \cdot v_i^2(t)] \cdot [L_i \cdot B_i + \beta_{\Delta} \cdot BD'_i \cdot v_i^2(t)] \quad (36)$$

gdje veličine u izrazu predstavljaju sljedeće:

- $a_{LB}$  – koeficijent dimenzije broda ( $1/m^2$ )
- $a_{\Delta}$  – koeficijent duljine domene ( $s^2/m$ ),
- $\beta_{\Delta}$  – koeficijent širine domene ( $s^2/m$ ),
- $LD'$  – utjecaj duljine i istisnine broda,
- $BD'$  – utjecaj širine i istisnine broda,
- $v$  – brzina broda (m/s),

pri čemu je:

$$LD' = \frac{L}{L_n} + \frac{D}{D_n} \quad i \quad BD' = \frac{B}{B_n} + \frac{D}{D_n} \quad (37)$$

odnosno:

- $L_n$  – normalizirana duljina broda na plovnom putu,
- $B_n$  – normalizirana širina broda na plovnom putu,
- $D_n$  – normalizirana istisnina broda na plovnom putu<sup>25</sup>.

Normalizirane vrijednosti veličina broda predstavljaju uobičajene vrijednosti na plovnom putu, a ovisno o obilježjima pomorskog prometa mogu se definirati

---

<sup>25</sup> S obzirom da AIS podaci ne uključuju podatke o istisninama brodova, za korištenje podataka prikupljenih putem AIS sustava pri automatskoj obradi približna vrijednost istisnine može se odrediti korištenjem podataka o duljini, širini i gazu pojedine vrste broda, kao i koeficijentu punoće istisnine.

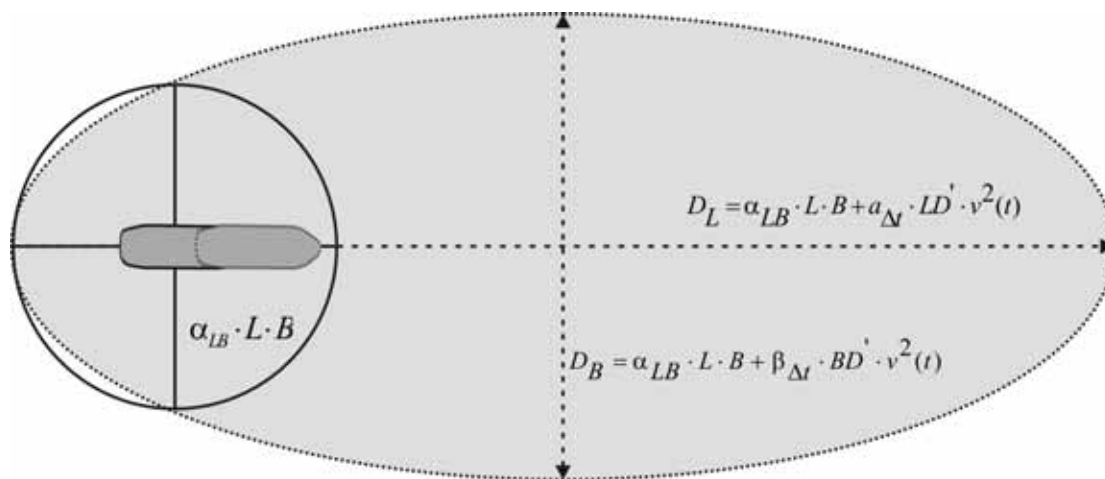
numeričkim karakteristikama odgovarajuće statističke razdiobe, primjerice aritmetičkom sredinom ili modom.

U predloženoj funkciji broj brodova i površina plovnog područja predstavljeni su cjelobrojnim vrijednostima pri čemu je površina konstantna, a broj brodova se mijenja ulaskom ili izlaskom broda iz plovnog područja. Nasuprot tome, domena brodova opisana je izrazom koji funkcionalno ovisi o promjenjivim i konstantnim varijablama. Duljina, širina i istisnina broda za potrebe modela predstavljaju statičke varijable koje ne mijenjaju domenu za vrijeme plovidbe broda dok se brzina broda može smatrati dinamičkom varijablom čijom se promjenom mijenja i veličina domene. Potrebno je naglasiti da se u stvarnosti i istisnina broda u plovidbi može mijenjati (potrošnja goriva, balastiranje), ali te promjene su uobičajeno relativno male i nemaju primarni utjecaj na promjenu vrijednosti domene i funkcije opće sigurnosti.

Sa stajališta određivanja domene broda pri promjeni brzine značajna su sljedeća obilježja funkcije:

- smanjenje vrijednosti funkcije nije linearno za različite brzine brodova istih veličina,
- nelinearnost funkcije pri promjeni brzine prikazana je kvadratnom funkcijom,
- za jednake brzine brodova funkcija je linearna.

Predloženi izraz definira zahtijevanu domenu kao površinu odgovarajuće elipse. Poluosi elipse su proporcionalne širini, duljini i istisnini broda kao statičkim elementima domene broda, dok brzina broda dinamički mijenja veličinu domene.



**Slika 12 Domena broda u funkciji prostornog zauzeća plovidbenog područja**

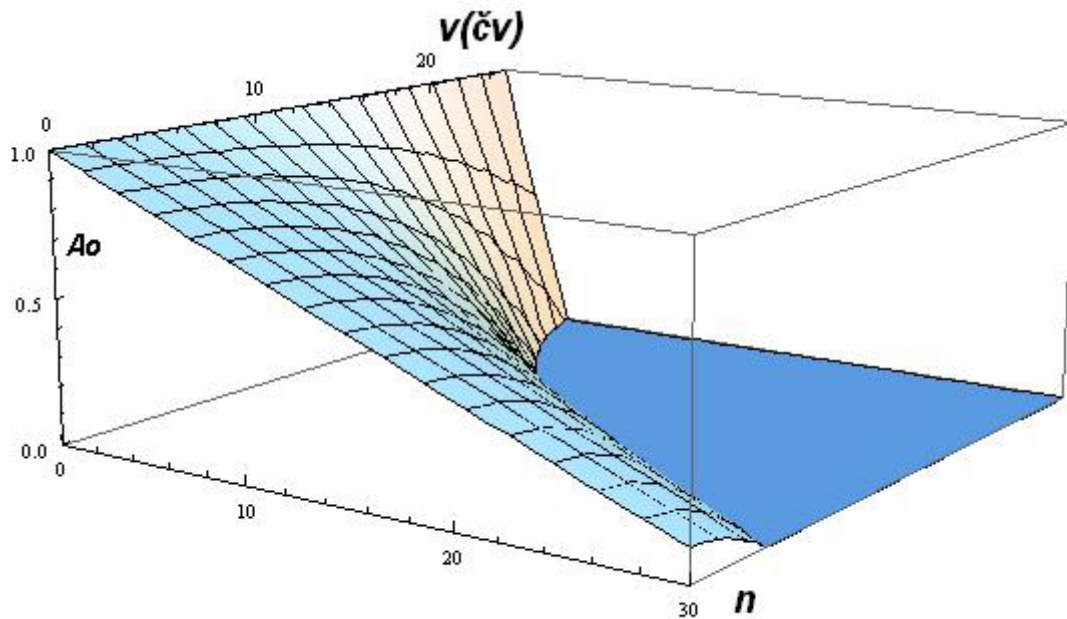
Opisana domena uvjetno se sastoji od dvije površine. Površina koja odgovara brodu u mirovanju ovisi o veličinama broda, poprima oblik kružnice i može se definirati kao „statička“ domena. Povećanjem brzine broda povećava se pripadajuća površina na način da se funkcionalno povećavaju „duljina“ i „širina“ kružnice pretvarajući kružnicu u elipsu čime domena poprima dinamički karakter. Svako povećanje brzine broda povećava „duljinu“ ( $D_L$ ) i „širinu“ ( $D_B$ ), odnosno poluosi

elipse  $a$  i  $b$ , pri čemu se povećava površina domene eliptičnog oblika. Relativna promjena vrijednosti pojedine poluosi elipse nije jednaka što se regulira koeficijentima utjecaja brzine  $\alpha_{\Delta t}$  i  $\beta_{\Delta t}$ . S obzirom da se u opisu funkcije prostornog zauzeća domena koristi samo kao površina, stvarni položaj broda unutar područja domene nije potrebno točno odrediti.

Potrebno je naglasiti da u slučaju kada je brzina broda 0, veličina slobodne površine ovisi isključivo o dimenzijama broda i u stvarnosti je veća od zahtijevane slobodne površine pri sidrenju broda („lazni krug“). Naime, funkcija prostornog zauzeća određuje sigurnost plovidbe na plovnom putu gdje su brzine pomorsko-prometnog toka veće nego na sidrištu pa je potreban i veći slobodan prostor oko broda. Stoga navedeni izraz nije prikladan za određivanje prostornog zauzeća brodova za vrijeme boravka na sidrištu, već samo u plovidbi broda.

Zauzetost površine kao mjera prometnog opterećenja ponajprije ukazuje na učinak velikih brodova na iskorištavanje prometnog područja. To proizlazi iz činjenice da su domene malih brodova, posebice brodica, zanemarivo male u odnosu na domene velikih brodova. Primjerice, predložena domena eliptičnog oblika *Panamax* broda duljine 225 m i širine 32 m pri istim brzinama plovidbe približno je 25 puta veća od domene obalnog teretnog broda peterostruko manje tlocrtne površine.

Vrijednosti koeficijenta dimenzije broda te koeficijenta utjecaja brzine ovisi o posebnostima obilježja pomorskog prometa te se može smatrati da su različiti za svaki plovni put. Plovni putovi s većom prosječnom gustoćom prometa imat će pridružen manji koeficijent dok će plovidba brodova slabijih manevarskih karakteristika ukazivati na potrebu definiranja većeg koeficijenta. Općenito, koeficijent dimenzije predstavlja konstantu koja određuju veličinu potrebne kružnice za brod koji se ne kreće. Nasuprot tome, koeficijent utjecaja brzine može se promatrati kao veličina koja ukazuje na dodatno prostorno zauzeće broda u plovidbi brzinom ( $v$ ). Koeficijent predstavlja proporcionalnu vrijednost vremenu ( $\Delta t$ ) koja je potrebna brodu za prelazak zahtijevane slobodne površine, odnosno potrebnu širinu površine. Detaljna analiza vrijednosti koeficijenata prikazana je u poglavlju 4.3.2.



**Slika 13 Funkcija prostornog zauzeća u ovisnosti o broju brodova i brzini**

Na prethodnoj slici prikazana je funkcija prostornog zauzeća za jednake veličine brodova i pretpostavljenu jediničnu površinu plovnog puta. Za odgovarajući plovni put smanjenje vrijednosti funkcije je polaganije pri plovidbi sporijih brodova, odnosno obrnuto, pri plovidbi bržih brodova domena se povećava, a vrijednost funkcije se brže smanjuje, čime utječe na smanjenje ukupne razine sigurnosti plovidbe.

Promjena brzine broda ima najveći utjecaj na promjenu veličine domene i posljedično na funkciju prostornog zauzeća. Ako se promatra vrijednost funkcije za dvije različite vrijednosti brzine  $v_1 > v_0$  onda vrijedi:

$$A_{o_{v_1}}(t) < A_{o_{v_0}}(t) \quad (38)$$

Tada se može definirati omjer funkcije prostornog zauzeća ( $R_v$ ) za različite brzine uz zadani broj brodova  $n$ :

$$R_v(n) = \frac{A_{o_{v_0}}(t)}{A_{o_{v_1}}(t)} \quad (39)$$

pri čemu uz  $k \in \{1, 2, 3, \dots\}$  i  $r \in \mathbb{R}$ ,  $r > 1$  vrijedi:

$$R_v(n+k) = r \cdot R_v(n) \quad (40)$$

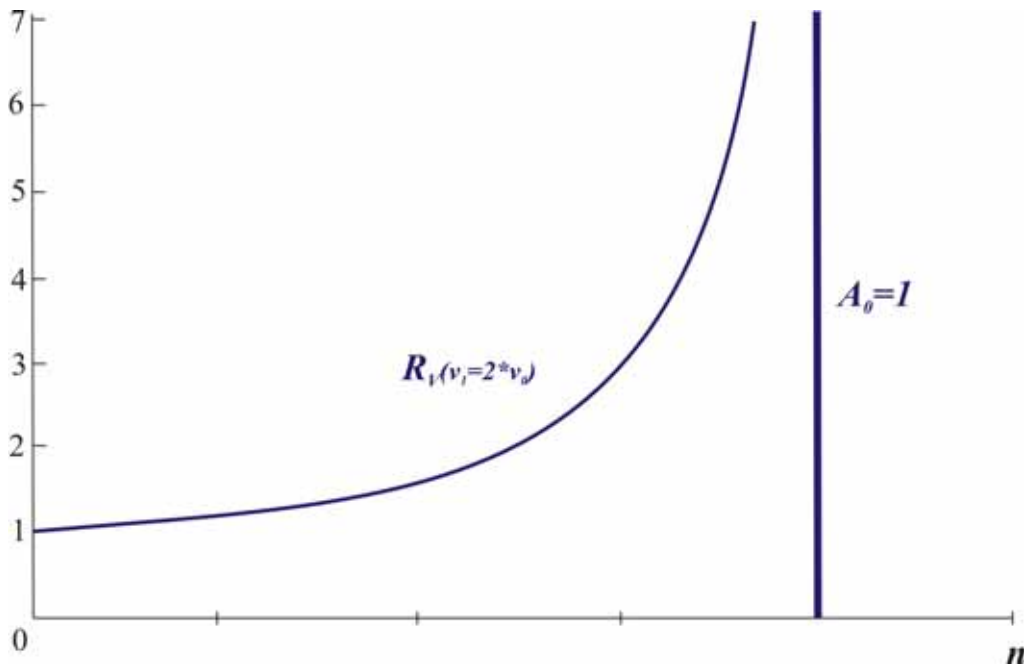
Navedeno ukazuje da brži brodovi pri povećanju gustoće pomorskog prometa imaju veći utjecaj na smanjenje sigurnost plovidbe.



**Tablica 10** Vrijednost funkcije prostornog zauzeća za različite brzine brodova<sup>26</sup>

BROJ BRODOVA NA PLOVNOM PUTU ( $n$ )	BRZINA BRODOVA $V(\text{čv})$	VRIJEDNOST FUNKCIJE PROSTORNOG ZAUZEĆA ( $A_0=100 \text{ M}^2$ ) $\alpha_{LB}=0,04, \alpha_{AI}=7,4, \beta_A=0,09$	$R_V$
20	10	0.958012	1.15
	20	0.835249	
40	10	0.916024	1,37
	20	0.670499	
80	10	0.832048	2,44
	20	0.340998	
110	10	0.769065	8,19
	20	0.093872	

Iz prikazane tablice vidi se promjena vrijednosti funkcije prostornog zauzeća za različite vrijednosti domena te odnos utjecaja funkcije prostornog zauzeća na sigurnost plovidbe pri istom broju brodova na plovnom putu, a pri različitim brzinama. Omjer vrijednosti funkcije različitih domena brodova eksponencijalno se povećava kako se povećava broj brodova na plovnom putu, odnosno kako se povećava gustoća pomorskog prometa.



**Slika 14** Omjer funkcije prostornog zauzeća za različite brzine brodova u ovisnosti o broju brodova uz pretpostavljene koeficijente

Slika pokazuje koliko puta je veći utjecaj funkcije na opću sigurnost plovidbe pri plovidbi brodova istih veličina, ali različitih brzina. Uočava se da pri dvostruko većoj brzini plovidbe brodova uz uvjet relativno male gustoće prometa na plovnom putu<sup>27</sup>, povećanje broja brodova nema značajniji utjecaj na povećanje vrijednosti  $R_V$

<sup>26</sup> U izračun vrijednosti funkcije uzete su pretpostavljene vrijednosti koeficijenata za koje domena brodova poprima smislene vrijednosti, a normalizirane vrijednosti  $L_m$ ,  $B_n$  i  $D_n$  odgovaraju pretpostavljenim veličinama odnosno broda pri čemu vrijedi  $LD'=BD'=2$ .

<sup>27</sup> Relativno mala gustoća prometa može se smatrati gustoća manja od 50% kapaciteta plovnog puta.

za razliku od slučaja kada se broj brodova približava kapacitetu plovnog puta ( $A_O \rightarrow I$ ). Prvi slučaj ukazuje da pri dovoljno velikom slobodnom prostoru na plovnom putu (približno do 50% slobodnog prostora) veličina  $R_V$  ima približno linearan rast u odnosu na povećanje brzine brodova i broja brodova, dok se pri većoj zauzetosti plovnog područja taj rast pretvara u eksponencijalni.

Navedeno ukazuje da se funkcijom prostornog zauzeća naglašava utjecaj brzine plovidbe kao jednog od najvažnijih elemenata sigurnosti i to tako da se pri velikoj gustoći prometa vrijednost funkcije naglo smanjuje povećanjem brzine brodova, odnosno povećanjem brzine prometnog toka.

#### 4.2.1.2 Funkcija prostorne razdiobe brodova

Funkcija prostorne razdiobe brodova opisuje sigurnost plovidbe uslijed promjene rasporeda brodova na plovnom putu, odnosno pri promjeni međusobnih udaljenosti brodova. Poznato je da časnici palube na brodu teže plovidbi sa što manjim prostornim ograničenjem, a sa stajališta zapovjednika broda najprihvatljiviji slučaj izvedbe plana putovanja je putovanje bez ometanja, tj. putovanje oskudno događajima [31]. Stoga se povećanjem međusobnih udaljenosti brodova povećava i sigurnost plovidbe, a smanjuje prometno opterećenje. S obzirom na činjenicu da pri jednakoj gustoći prometa te jednakom prostornom zauzeću plovnog puta, raspored brodova, odnosno međusobne udaljenosti brodova mogu biti bitno različite, funkcija prostorne razdiobe može se smatrati korektorom vrijednosti razine sigurnosti plovidbe za stvarni raspored brodova na plovnom putu<sup>28</sup>.

Za funkciju prostorne razdiobe brodova predlaže se sljedeći izraz:

$$A_{SD}(t) = \begin{cases} 1 - \alpha_{SD} \cdot e^{-\alpha_{AV} \cdot \bar{d}(t) \cdot n^{-1}(t)} & n > 1 \\ 1 & n \leq 1 \end{cases} \quad (41)$$

gdje veličine predstavljaju sljedeće:

- $\alpha_{SD}$  – koeficijent utjecaja prostorne razdiobe,
- $\alpha_{AV}$  – koeficijent prosječne udaljenosti (1/m),
- $\bar{d} = d_{AV}$  – prosječna udaljenost između svih brodova (m).

Ako je  $n$  broj brodova na plovnom putu, a  $k$  ukupan broj udaljenosti između brodova, onda za  $n > 1$  vrijedi:

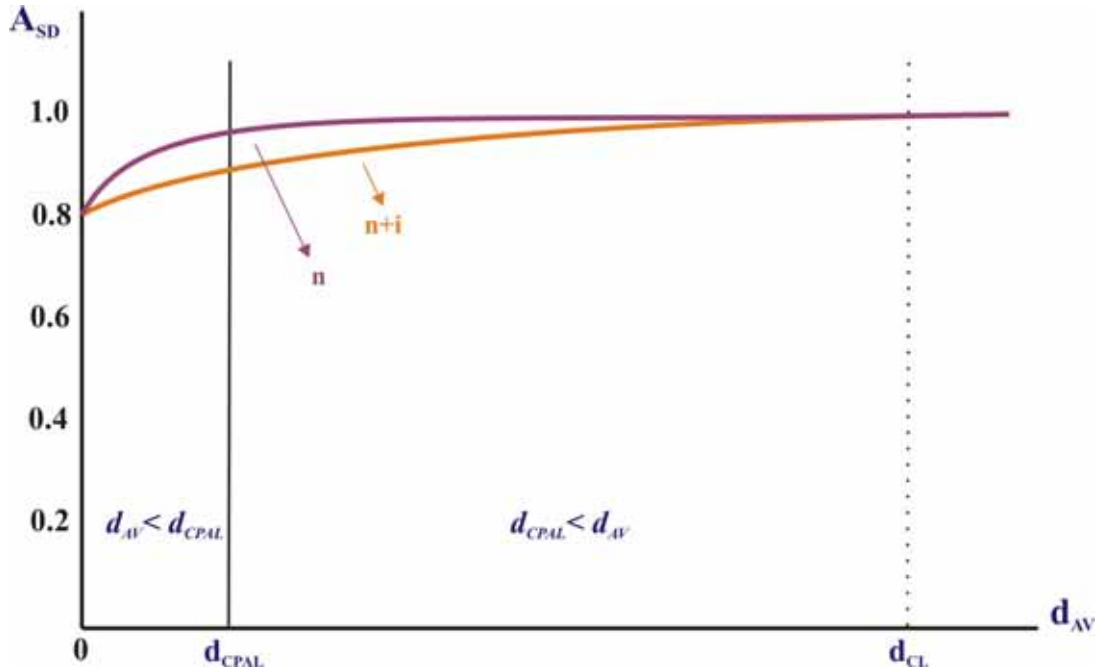
$$k = \frac{n \cdot (n-1)}{2} \quad (42)$$

Iz navedenog proizlazi:

---

<sup>28</sup> Različiti raspored brodova na plovnom putu ne utječe na promjenu vrijednosti funkcije prostornog zauzeća plovidbenog područja.

$$\bar{d} = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^k d_i}{n \cdot (n-1)} \quad (43)$$



Slika 15 Funkcija prostorne razdiobe ovisno o broju brodova ( $i \in N$ )

Za funkciju prostorne razdiobe vrijedi:

$$\begin{aligned} \bar{d}_1 < \bar{d}_2 &\Rightarrow A_{SD_{\bar{d}_1}}(t) < A_{SD_{\bar{d}_2}}(t) \\ \bar{d} > d_{CL} &\Rightarrow A_{SD} \rightarrow 1 \\ A_{SD_{n,d_{AV}}} &> A_{SD_{n+1,d_{AV}}} \end{aligned} \quad (44)$$

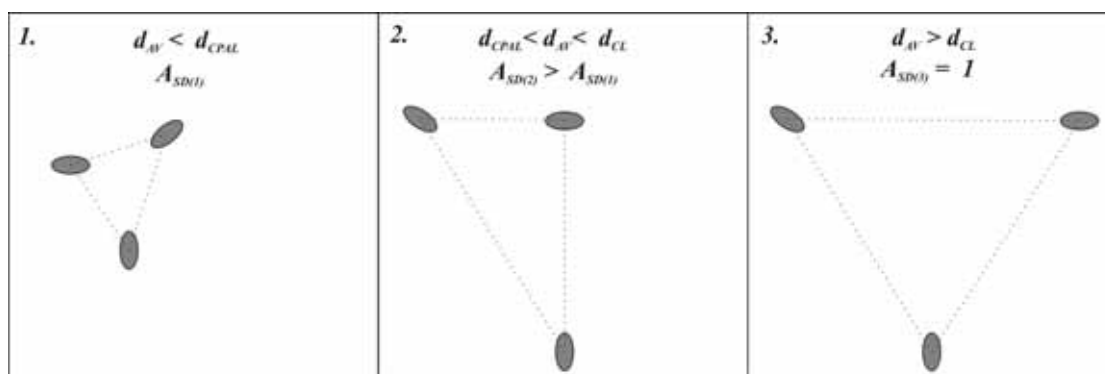
Udaljenost ( $d_{CL}$ ) predstavlja graničnu prosječnu udaljenost između brodova koja ukazuje na odgovarajuću povećanu opasnost na plovnom putu. Može se smatrati da plovidba brodova na manjoj prosječnoj udaljenosti ukazuje na povećanu koncentraciju brodova pri čemu vrijednost funkcije prostorne razdiobe postaje manja od 1.

U svim uvjetima plovidbe vrijedi:

$$d_{CL} > d_{CPAL} \quad (45)$$

Povećana koncentracija brodova ne mora neminovno ukazivati i na neposrednu opasnost od sudara već samo na smanjenje sigurnosti plovidbe pri istom broju brodova, ali različitog prostornog razmještaja. Vrijednost udaljenosti  $d_{CL}$  ovisi o obilježjima plovnog puta i pomorskog prometa. Drugim riječima, gušći prostorni raspored zadanog broja brodova ukazivat će na manju sigurnost plovidbe, a pri dovoljno velikoj raspršenosti brodova na plovnom putu, prostorni raspored brodova neće imati utjecaj na sigurnost plovidbe. Međusobnim približavanjem brodova

manjuje se sigurnost plovidbe te se smanjuje i vrijednost funkcije. Funkcija se smanjuje i u slučaju povećanja broja brodova uz uvjet jednakih vrijednosti prosječnih međusobnih udaljenosti.



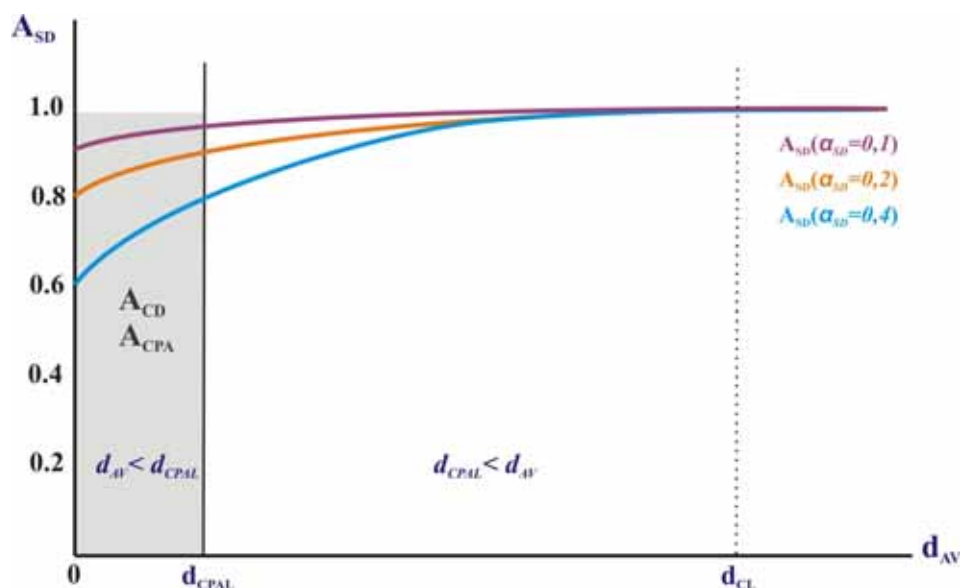
Slika 16 Položaj brodova o kojima ovisi vrijednost funkcije prostorne razdiobe

Vrijednost funkcije prostorne razdiobe brodova i njezin učinak na mjeru sigurnosti plovidbe regulira se:

- koeficijentom utjecaja prostorne razdiobe ( $\alpha_{SD}$ ) te
- koeficijentom prosječne udaljenosti ( $\alpha_{AV}$ ).

Koeficijent utjecaja prostorne razdiobe ( $\alpha_{SD}$ ) mijenja najmanju vrijednost funkcije. Dodatno, koeficijent određuje vrijednost funkcije kada je  $d_{AV} = d_{CPAL}$ .

Koeficijent prosječne udaljenosti brodova ( $\alpha_{AV}$ ) regulira početak i brzinu pada funkcije. Početak pada funkcije približno odgovara trenutku kada prosječna udaljenost brodova postane manja od granične udaljenosti povećane koncentracije brodova ( $d_{AV} < d_{CL}$ ). Potrebno je naglasiti da početak pada funkcije dodatno ovisi i o broju brodova. Za veći broj brodova i konstantu vrijednost koeficijenta pad funkcije počinje pri većim vrijednostima  $d_{AV}$ .



Slika 17 Funkcija prostorne razdiobe za različite vrijednosti koeficijenta utjecaja prostorne razdiobe ( $\alpha_{AV} = const, n = const$ )

Vrijednosti koeficijenta potrebno je odrediti za svaki plovni put ovisno o obilježjima plovidbe i plovnog puta. Može se smatrati da na plovnim putovima, manje površine i pri plovidbi brzih i većih brodova, povećana koncentracija brodova nastaje pri većim prosječnim udaljenostima te da funkcija prostorne razdiobe mora imati veći utjecaj na smanjenje sigurnosti plovidbe pri većim prosječnim udaljenostima. Nasuprot tome, na plovnim putovima gdje postoje sustavi nadzora pomorskog prometa i sustavi usmjerene plovidbe te druge posebne odredbe koje uređuju plovidbu, gušći raspored brodova ne mora podrazumijevati manju opću sigurnost plovidbe, pa funkcija može biti položajna.

Navedeno je prikazano na prethodnoj slici gdje se položaj funkcije mijenja promjenom  $\alpha_{SD}$ , odnosno korigira se vrijednost funkcije pri najmanjoj graničnoj udaljenosti mimoilaženja, približno od 0,8 do 0,97.

Funkcija prostorne razdiobe brodoma prvenstveni utjecaj na sigurnost plovidbe i na promjenu vrijednosti opće funkcije sigurnosti ima pri:

- plovidbi brodova na međusobnim udaljenostima pri kojima ne postoji neposredna opasnost sudara između brodova, odnosno kada je:

$$d_{CPA} > d_{CPAL} \wedge t_{CPA} > t_{CPAL} \quad (46)$$

- plovidbi brodova kada su međusobne udaljenosti između brodova ili barem većina njih veće od granične najmanje udaljenosti mimoilaženja, a manje od granične udaljenosti povećane koncentracije brodova, odnosno kada je:

$$d_{CPAL} < d_{AV} < d_{CL} \quad (47)$$

Funkcija prostorne razdiobe također ima odgovarajuću utjecaj na smanjenje funkcije opće sigurnosti i u vremenu kada je:

$$d_{AV} < d_{CPAL} \quad (48)$$

tada vrijedi:

$$\bar{d}_{CPA} < d_{CPAL} \quad (49)$$

pri čemu:

$$\bar{d}_{CPA} = \frac{\sum_{i=1}^k d_{CPAi}}{k} \quad (50)$$

Međutim, u navedenom vremenu primarni utjecaj na sigurnost plovidbe ima funkcija povećane opasnosti ( $A_{CD}$ ) koja je opisana u nastavku. U stvarnosti smanjenje prosječne međusobne udaljenosti brodova ispod najmanje udaljenosti mimoilaženja predstavlja stanje pomorskog prometa kada se svi ili većina brodova na plovnom putu

nalaze u neposrednoj opasnosti od sudara, pri čemu najveći utjecaj na promjenu vrijednosti funkcije sigurnosti ima funkcija povećane opasnosti.

#### 4.2.1.3 Međusobni odnos brodova

Osim navedene dvije funkcije koje opisuju opći raspored brodova, pri određivanju opće sigurnosti plovidbe potrebno je uzeti u obzir i međusoban odnos dvaju brodova na plovnom putu. Stoga se za dobivanje općeg stanja sigurnosti plovidbe, model mora proširiti funkcijom koja će uključiti i utjecaj međusobnog odnosa brodova.

Funkcija međusobnog odnosa brodova ( $A_{CPA}$ ) određuje dodatnu promjenu vrijednosti funkcije sigurnost plovidbe kada vrijedi:

$$d_{CPAi} < d_{CPAL} \wedge t_{CPAi} > 0 \quad (51)$$

Funkcijom se opisuje povećana opasnost na plovnom putu zbog brodova koji se nalaze na udaljenosti pri kojoj nije potrebno poduzimati mjere u cilju izbjegavanja sudara ili mjere povećane pažnje, ali ukoliko ne dođe do promjene parametara kretanja bilo kojeg broda, te mjere će se morati poduzeti. Povećana opasnost na plovnom putu koja se opisuje funkcijom međusobnog odnosa brodova nastaje kada je vrijednost  $d_{CPA}$  manja od granične, a međusobne udaljenosti brodova veće od onih za koje se može smatrati postojanje sudarne opasnosti. U takvim se okolnostima može smatrati da se opasnost sudara razvija (*Risk of collision is developing*), odnosno da brodovi imaju dovoljno vremena za poduzimanje pravovremene i sigurne radnje sukladno pravilima za izbjegavanje sudara na moru te da stvarna neposredna sudarna opasnost ne postoji.

Za funkciju međusobnih odnosa brodova predlaže se sljedeći izraz:

$$A_{CPA}(t) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \alpha_{CPA} \cdot k_{CPA}^2(t)} & t_{CPA} \geq 0 \\ 1 & t_{CPA} < 0 \end{cases} \quad (52)$$

gdje veličine predstavljaju:

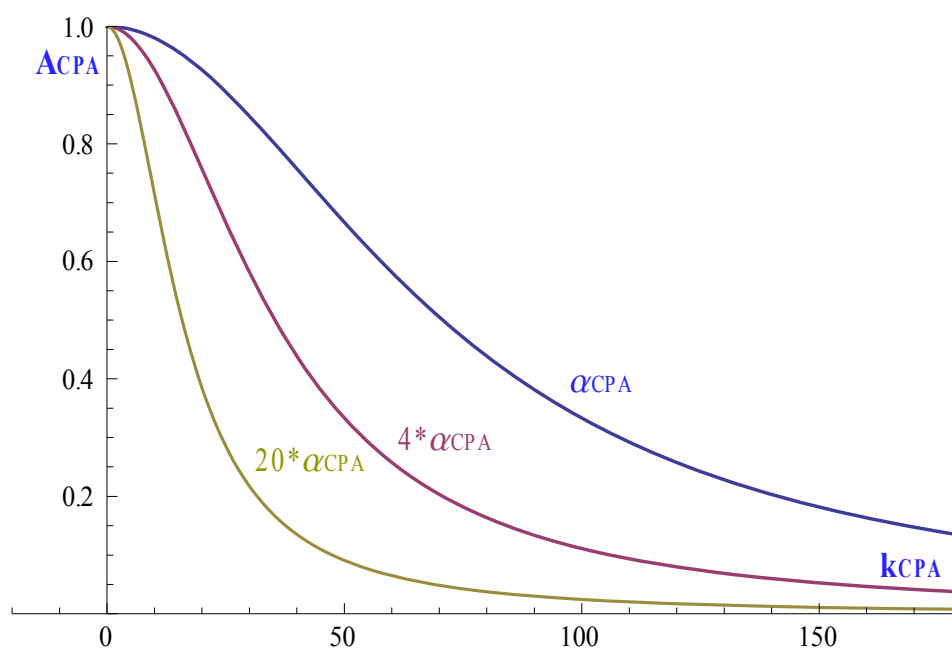
- $\alpha_{CPA}$  – koeficijent najmanje udaljenosti mimoilaženja,
- $k_{CPA}$  – broj udaljenosti između brodova za koje vrijedi da je najmanja udaljenost mimoilaženja manja od granične ( $d_{CPA} < d_{CPAL}$ ) te da je vrijeme do najmanje udaljenosti mimoilaženja veće od 0 ( $t_{CPA} > 0$ ).

Funkcija mijenja razinu sigurnosti plovidbe jedino u slučaju kada na plovnom putu plove brodovi čiji je  $d_{CPA}$  manji od graničnog.

Povećanjem broja brodova koji zadovoljavaju navedeni uvjet sigurnost plovidbe na plovnom putu se smanjuje što se pokazuje smanjenjem vrijednosti funkcije prema 0. Povećanje broja brodova utječe na funkciju dvojako. Ako je broj

brodova na plovnom putu velik i približava se broju brodova koji odgovara kapacitetu plovnog puta, smanjenje sigurnosti će biti sporije. Naime, približavanjem broja brodova kapacitetu plovnog puta, složenost plovidbe, odnosno sigurnost plovidbe neće se bitno promijeniti povećanjem broja brodova. Pri velikoj količini prometa dodatni brod na plovnom putu nema značajan utjecaj na smanjenje sigurnosti plovidbe. Nasuprot tome, pri malim količinama prometa, odnosno malom broju brodova na plovnom putu čiji međusobni odnosi ukazuju na pojavu povećane opasnosti, povećanjem broja brodova sigurnost plovidbe se smanjuje puno brže, a pad funkcije je strmiji.

Položenost funkcije, odnosno brzina pada funkcije, ovisi o koeficijentu najmanje udaljenosti mimoilaženja ( $\alpha_{CPA}$ ) čija se vrijednost može odrediti ovisno o površini plovnog puta te obilježjima pomorskog prometa.



**Slika 18 Funkcija međusobnih odnosa brodova ( $A_{CPA}$ ) za različite vrijednosti koeficijenta najmanje udaljenosti mimoilaženja**

Potrebno je naglasiti da funkcija nema utjecaj na promjenu razine sigurnosti plovidbe u vremenu nakon mimoilaženja brodova kada je  $t_{CPA} < 0$ . Tada se udaljenost između brodova povećava, a stvarna opasnost od sudara više ne postoji.

KOEFICIJENT NAJMANJE UDALJENOSTI MIMOILAŽENJA ( $a_{CPA}$ )	BROJ MEĐUSOBNIH UDALJENOSTI $k_{CPA} (d_{CPA} < d_{CPAL} \wedge t_{CPA} > 0)$	VRIJEDNOST FUNKCIJE MEĐUSOBNE UDALJENOSTI ( $A_{CPA}$ )
$2 \cdot 10^{-4}$	5	0,995025
	10	0,980392
	15	0,956938
	20	0,925926
$5 \cdot 10^{-4}$	5	0,987654
	10	0,952381
	15	0,898876
	20	0,833333
$4 \cdot 10^{-3}$	5	0,909091
	10	0,714286
	15	0,526316
	20	0,384615

Tablica 11 Vrijednosti funkcije međusobne udaljenosti brodova za različite ulazne parametre<sup>29</sup>

Općenito, osnovni utjecaj funkcije međusobnog odnosa brodova na sigurnost plovidbe postoji u vremenu kada se na plovnom putu pojave brodovi čiji  $d_{CPA}$  ukazuje da će se približavanjem brodova pojaviti neposredna opasnost sudara, odnosno položaj opasnih blizina, ukoliko se ne poduzmu radnje izbjegavanja sudara od strane bilo kojeg broda. Kao što je navedeno, pri položaju brodova u području opasnih blizina, razina sigurnosti plovidbe primarno je određena funkcijom povećane opasnosti  $A_{CD}$ .

#### 4.2.2 Sigurnosti plovidbe pri povećanoj opasnosti

Drugi dio izraza koji opisuje mjeru sigurnosti plovidbe opisuje utjecaj položaja brodova na sigurnost plovidbe, kada se nalaze u području opasnih blizina. U tom slučaju sigurnost plovidbe dodatno će se odrediti funkcijom povećane opasnosti sudara ( $A_{CD}$ ). U području opasnih blizina, opasnost od sudara je najveća, a časnici u straži, trebaju poduzeti odgovarajuću radnju s ciljem izbjegavanja sudara u skladu s Međunarodnim pravilima za izbjegavanje sudara na moru.

Funkcijom povećane opasnosti prikazuje se smanjenje sigurnosti plovidbe zbog plovidbe brodova za koje vrijedi:

$$t_{CPAi} \leq t_{CPAL} \wedge d_{CPAi} \leq d_{CPAL} \quad (53)$$

Zadovoljenjem navedenog uvjeta funkcija poprima vrijednosti manje od 1. Ako uvjet nije zadovoljen smatrat će se da se plovidba odvija bez povećane opasnosti od sudara pri čemu funkcija poprima vrijednost 1 te nema utjecaj na promjenu sigurnosti plovidbe. Tada sigurnost plovidbe ovisi isključivo o općoj funkciji sigurnosti plovidbe ( $A_{GW}$ ).

<sup>29</sup> U izračunu su uzete pretpostavljene vrijednosti koeficijenta najmanje udaljenosti mimoilaženja za koje funkcija poprima smislene vrijednosti.



Elementi o kojima ovisi sigurnost plovidbe pri povećanoj opasnosti su sljedeći:

- najmanja udaljenost mimoilaženja brodova ( $d_{CPA}$ ),
- vrijeme do najmanje udaljenosti mimoilaženja ( $t_{CPA}$ ) te
- relativna brzina između brodova ( $v_R$ ).

Za opis utjecaja navedenih elemenata na sigurnost plovidbe pri povećanoj opasnosti te za definiranje funkcije povećane opasnosti sudara predlaže se sljedeći izraz:

$$A_{CD}(t) = \begin{cases} 1 & ; \quad m = 0 \\ \prod_{i=1}^m [1 - e^{-A_{VRELi}(t) \cdot [\alpha_{TCPA} \cdot TCPA_i(t) + \gamma R_i(t)]}] & ; \quad m > 0 \wedge TCPA \geq 0 \\ \prod_{i=1}^m [1 - e^{A_{VRELi}(t) \cdot [\beta_{TCPA} \cdot TCPA_i(t) - \gamma R_i(t)]}] & ; \quad m > 0 \wedge TCPA < 0 \end{cases} \quad (54)$$

gdje veličine predstavljaju sljedeće:

$A_{CD}$  – funkcija povećane opasnosti sudara,

$m_{(t_{CPAi} \leq t_{CPAL} \wedge d_{CPAi} \leq d_{CPAL})}$  – broj međusobnih odnosa brodova koji ispunjavaju uvjet da su njihove trenutne vrijednosti  $t_{CPA}$  i  $d_{CPA}$  manje ili jednake graničnim,

$\alpha_{TCPA}$  – koeficijent korekcije  $t_{CPA}$  ( $t_{CPA} \geq 0$ ),

$\beta_{TCPA}$  – koeficijent korekcije  $t_{CPA}$  ( $t_{CPA} < 0$ ),

$v_R$  – relativna brzina između dva broda,

$A_{VRELi}$  – utjecaj relativne brzine,

$\gamma R$  – koeficijent najmanje udaljenosti mimoilaženja brodova,

pri čemu je:

$$A_{VRELi}(t) = \frac{1}{1 + \alpha_{VR} \cdot v_{Ri}^2(t)}, \quad \gamma R_i(t) = \frac{d_{CPAi}(t)}{d_{CPAL}} \cdot k_{DCPA} \quad i \quad TCPA_i(t) = \frac{t_{CPAi}(t)}{t_{CPAL}}, \quad (55)$$

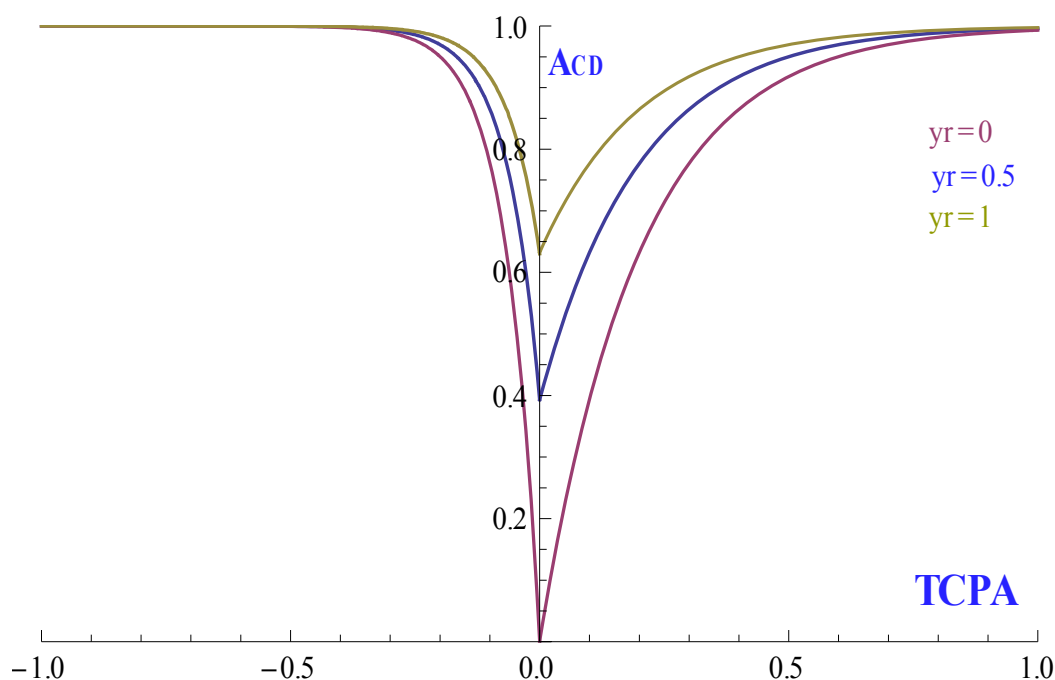
odnosno:

$\alpha_{VR}$  – koeficijent korekcije relativne brzine ( $s^2/m^2$ ),

$k_{DCPA}$  – korekcija najmanje udaljenosti mimoilaženja.

Za navedenu funkciju vrijedi:

$$A_{CD_{MIN}} = f\left(\frac{d_{CPA}}{d_{CPAL}}, v_R, k_{DCPA}\right) \quad (56)$$



Slika 19 Funkcija povećane opasnosti

Na slici 19 prikazana je funkcija povećane opasnosti za različite granične vrijednosti najmanje udaljenosti mimoilaženja brodova. Ako se promatra plovidba broda kao kretanje koje započinje s desne strane grafa ( $TCPA = 1$ ) i nastavlja se prema lijevoj strani ( $TCPA \rightarrow -1$ ), vrijednost funkcije se mijenja ulaskom broda u granično područje kada postaje  $t_{CPA} \leq t_{CPAL}$ . Eksponencijalno se smanjuje približavanjem trenutku najmanje udaljenosti mimoilaženja ( $TCPA = 0$ ) ovisno o koeficijentu korekcije  $\alpha_{TCPA}$ , dok se eksponencijalno povećava nakon tog trenutka ovisno o koeficijentu korekcije  $\beta_{TCPA}$ . Rast funkcije nakon trenutka mimoilaženja bit će strmiji od pada prije mimoilaženja. Naime, nakon mimoilaženja brodova, kada je  $t_{CPA} < 0$ , sudarna opasnost više ne postoji te se utjecaj na smanjenje sigurnosti plovidbe naglo smanjuje. Funkcija povećane opasnosti gotovo linearno raste prema vrijednosti 1 čime se pokazuje da povećana opasnost od sudara više ne postoji<sup>30</sup>.

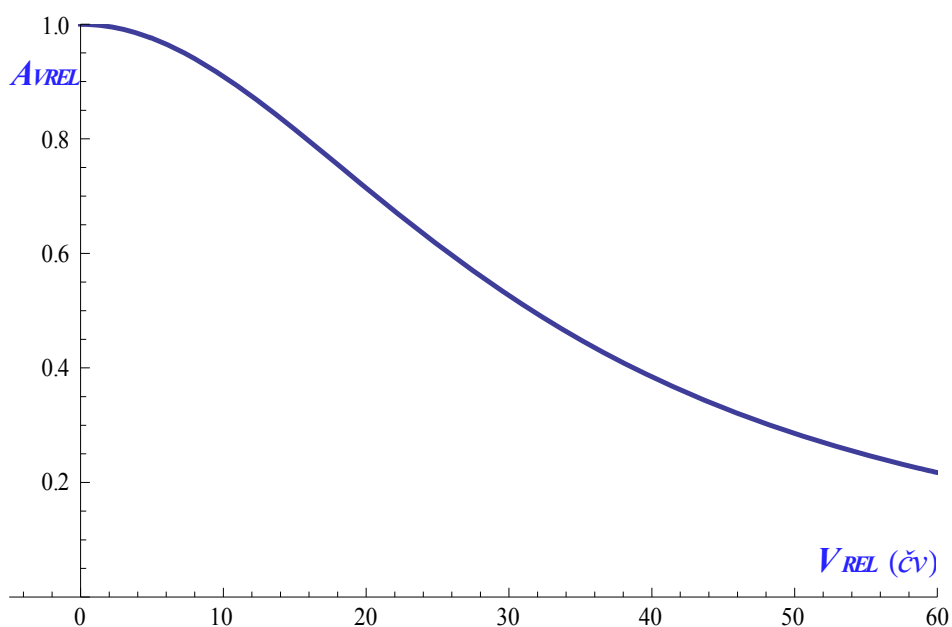
Utjecaj relativne brzine na funkciju povećane opasnosti opisan je kvadratnom funkcijom ( $A_{VREL}$ ) i ogleda se u:

- brzini pada ili rasta funkcije te
- definiranju minimuma funkcije.

<sup>30</sup> Stvarna opasnost od sudara teoretski nestaje trenutkom mimoilaženjem brodova, međutim može se smatrati da je sigurnost plovidbe smanjena i u kratkom periodu vremena nakon mimoilaženja.

Relativna brzina brodova određuje razliku sigurnosti plovidbe za različita kretanja parova brodova. Pri većim relativnim brzinama pad funkcije nastupa ranije. Uz jednake brzine plovidbe relativna brzina je najveća kada se dva broda nađu u protukursu. Tada je područje opasnosti prostorno najveće te je utjecaj relativne brzine na smanjenje sigurnosti plovidbe najveće.

Ovako definiran utjecaj relativne brzine ne uzima u obzir razliku promjene sigurnosti plovidbe za različite plovidbene situacije, primjerice za protukurs, križanje kurseva ili pretjecanje. Naime, poznato je da časnici u straži neke plovidbene situacije smatraju kompleksnijim od drugih bez obzira na vrijednost relativne brzine<sup>31</sup>. S obzirom da je osnovna namjena funkcije prikaz razine sigurnosti plovidbe, a ne mjerenje kompleksnosti načina izbjegavanja sudara prikazani utjecaj relativne brzine može se smatrati zadovoljavajuće točnim za prikaz funkcije povećane opasnosti sudara.



**Slika 20 Utjecaj relativne brzine na funkciju povećane opasnosti uz pretpostavljeni konstantni koeficijent korekcije relativne brzine**

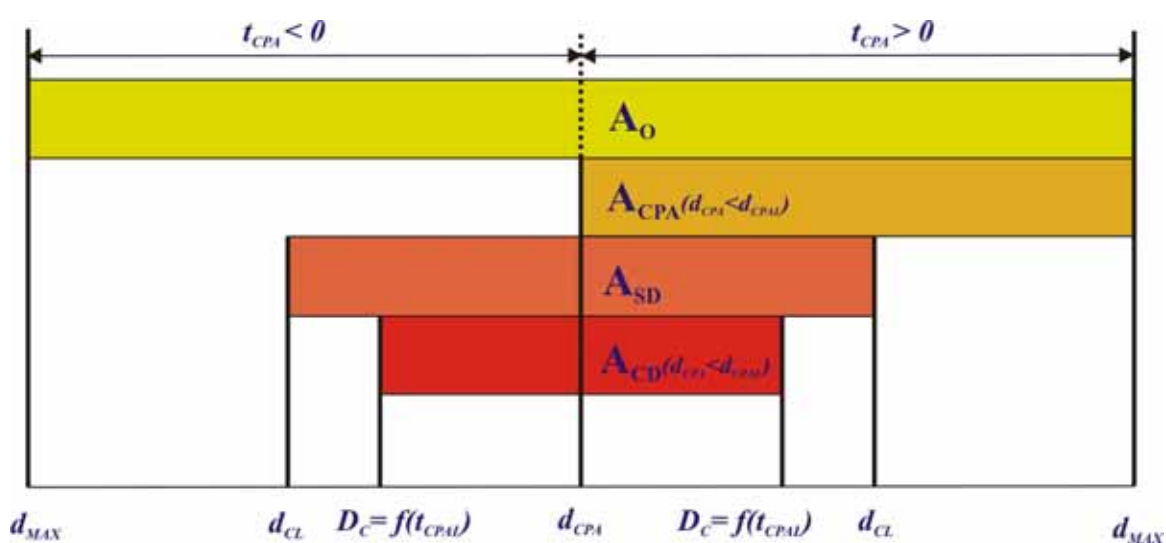
Postojanje sudarne opasnosti pretpostavlja naglo smanjenje sigurnosti plovidbe pa funkcija povećane opasnosti sudara ima relativno najveći utjecaj na promjenu razine sigurnosti plovidbe. Općenito, trenutak minimuma funkcije povećane opasnosti odgovara trenutku minimuma cjelokupne funkcije sigurnosti plovidbe.

<sup>31</sup> Mimoilaženje s lijeve strane, križanje kurseva ili pretjecanje uz male razlike brzina.

### 4.3 ANALIZA FUNKCIONALNE ZAVISNOSTI ELEMENATA SIGURNOSTI PLOVIDBE

Kvaliteta i točnost opisanih funkcija sigurnosti ovisi o pravilnom odabiru vrijednosti koeficijenta utjecaja. U stvarnosti, prvenstveno, opća sigurnost plovidbe kao veličina je subjektivna i vrlo ju je teško mjeriti i odrediti objektivnim mjerama. Koeficijenti unutar funkcija imaju za cilj povećati objektivnost izmjerene vrijednosti sigurnosti uzimajući u obzir osnovne elemente na kojima se temelji promjena sigurnosti plovidbe. Koeficijentima se ocjenjuje stanje sigurnosti na plovnom putu.

Predložene funkcije mijenjaju sigurnost plovidbe od trenutka ulaska broda u plovno područje do trenutka izlaza pri čemu je utjecaj određene funkcije definiran međusobnom udaljenošću brodova.



Slika 21 Područje utjecaja predloženih funkcija na sigurnost plovidbe

U nastavku će se opisati načini mogućeg određivanja koeficijenta, kao i elementi o kojim oni ovise.

#### 4.3.1 Granične vrijednosti sudarnih parametara

Granične vrijednosti sudarnih parametara  $d_{CPAL}$  i  $t_{CPAL}$  nisu unificirane stoga ih je za svaki plovni put moguće dodijeliti. Načelno, vrijednosti ovise o sljedećim elementima:

- veličini i obilježjima plovnog puta,
- vrsti i veličini brodova u plovidbi te
- drugim mjerama uspostavljenim na plovnom putu u cilju povećanja sigurnosti plovidbe.

Prihvatljive granične vrijednosti  $d_{CPAL}$  i  $t_{CPAL}$  za neki plovni put mogu se smatrati one koje omogućuju neometanu plovidbu brodova. Granična vrijednost najmanje udaljenosti mimoilaženja općenito je veća za plovne putove većih površina i za plovne putove na kojima je prosječna gustoća plovidbe manja, a uspostavljene su odgovarajuće mjere nadzora plovidbe.

Granična najmanja udaljenost mimoilaženja  $d_{CPAL}$  može se odrediti u ovisnosti o širini domena brodova i to na način da vrijedi:

$$d_{CPAL} = f(D_{B_{MAX}}) \quad (57)$$

Može se smatrati da granična vrijednost definirana za brod s najvećom domenom zadovoljava uvjet pojave povećane opasnosti i za sve druge brodove. Na taj način se određuje najveća rezerva sigurnosti. Funkcionalni odnos prihvatljive najmanje udaljenosti mimoilaženja i najveće domene mora zadovoljiti uvjet da uobičajene vrijednosti granične najmanje udaljenosti mimoilaženja na prilaznim plovnim putovima iznose najviše do 2 M. Navedeno odgovara općem stavu da su granične vrijednosti na otvorenom moru veće nego u ograničenim plovnim područjima, a za graničnu vrijednost najmanje udaljenosti mimoilaženja na otvorenom moru uobičajeno se uzima upravo dvije nautičke milje.

Vrijednost  $t_{CPAL}$  određuje veličinu područja u kojem postoji sudarna opasnost, odnosno duljinu prijeđenog puta broda u području povećane opasnosti ( $D_C$ ). Prema [37] područje u kojem postoji sudarna opasnost na otvorenom moru određeno je za vrijednost  $t_{CPAL} = 18 \text{ min}$  i dodatno ovisi o relativnoj brzini brodova.

$$D_C = t_{CPAL} \cdot v_R \quad (58)$$

U slučaju položaja protukursa pri brzinama brodova od 25 čvorova područje povećane opasnosti, odnosno međusobna udaljenost brodova u trenutku nastupa sudarne opasnosti, iznosi 15 M. S obzirom da se prilazni plovni putovi nalaze u ograničenim plovnim područjima nerijetko duljina manjih od 15 M, za  $t_{CPAL}$ , može se odrediti i manja vrijednost od 18 minuta.

Definiranje graničnih vrijednosti sudarnih parametara neposredno utječe na vrijednost funkcije sigurnosti prvenstveno na period u kojem će sigurnost plovidbe biti smanjena.

### **4.3.2 Koeficijenti opće funkcije sigurnosti**

#### ***4.3.2.1 Koeficijenti funkcije prostornog zauzeća***

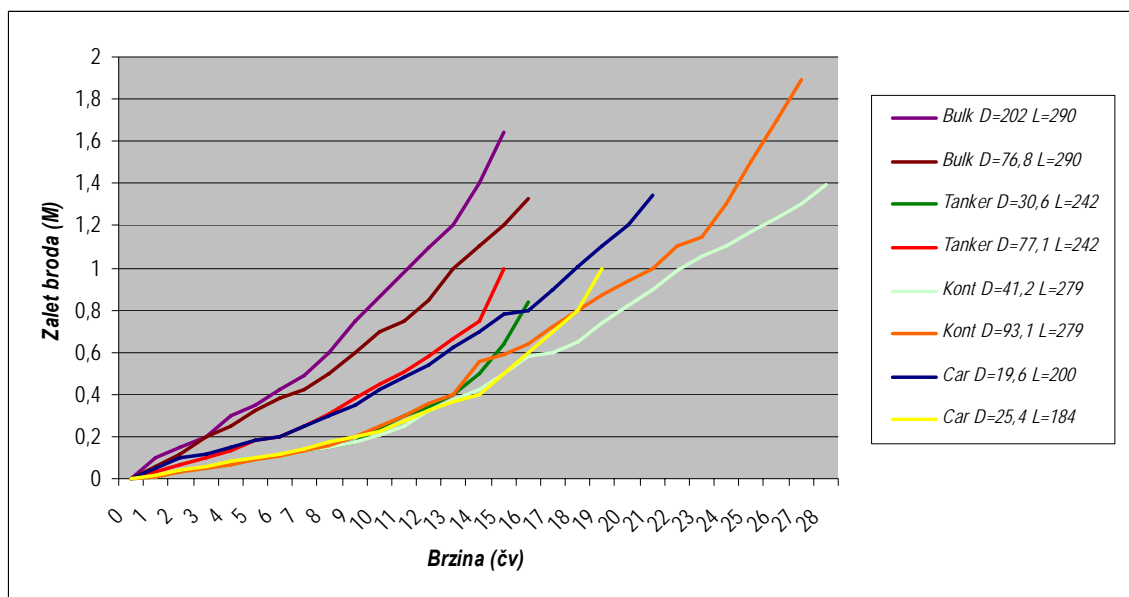
Koeficijenti funkcije prostornog zauzeća predstavljaju konstante koje zajedno s nezavisnim varijablama funkcije determiniraju vrijednost funkcije. U funkciji prostornog zauzeća koeficijenti određuju veličinu domene broda.

Koeficijent duljine domene ( $\alpha_M$ ) određuje „duljinu“ elipse kada je brzina broda veća od 0. Kao pokazatelj funkcionalne promjene „duljine“ domene u funkciji prostornog zauzeća može se uzeti odgovarajuće manevarsko obilježje broda i to napredovanje ili zalet. Napredovanje broda ukazuje na potrebni prostor ispred broda prije promjene kursa dok zalet ukazuje na područje ispred broda potrebno za zaustavljanje bez promjene kursa.

Kako funkcionalna zavisnost elemenata zaleta broda približno odgovara predloženoj funkcionalnoj zavisnosti „duljine“ domene, predlaže se uzeti zalet kao osnovni element pri određivanju vrijednosti koeficijenta duljine domene, odnosno kao pokazatelj promjene „duljine“ domene broda:

$$\alpha_{\Delta t} = f(TR) \quad (59)$$

Naime, zalet broda izražen kao udaljenost ili vrijeme približno je proporcionalan duljini i istisnini broda, snazi strojeva te kvadratu brzine [48]. Povećanjem duljine i istisnine broda zalet se približno povećava linearno, dok se povećanjem brzine zalet broda povećava približno prema kvadratnoj funkciji.



Slika 22 Zalet broda u ovisnosti o vrsti broda, duljini, istisnini i brzini broda ( $D$  u 000 tona)

Izvor: Izradio autor na temelju podataka [88]

Dodatno, pri određivanju koeficijenta duljine domene potrebno je uzeti u razmatranje obilježja plovnog područja i pomorskog prometa i to:

- raspoloživost prostora za izbjegavanje brodova,
- prosječna gustoća prometa,
- postojanje shema odvojene plovidbe,
- postojanje VTS službe.

Prema provedenom anketnom upitniku (prilog 2) među časnicima palube i zapovjednicima vrijednost produljenja velike poluosi elipse bit će približno do 10 puta veća od duljine broda.

Koeficijent širine domene ( $\beta_{\Delta t}$ ) povećava „širinu“ domene s obzirom na povećanje brzine. Sa stajališta sigurnosti plovidbe i izbjegavanja sudara potrebna „širina“ domene broda može se smatrati udaljenost potrebna da brod u području

domene izvrši izbjegavanje. Veličine kojim se približno može opisati navedena udaljenost jesu:

- bočni pomak broda, odnosno
- taktički promjer.

Uzimanje jedne od navedenih veličina ovisit će o obilježjima plovnog puta i pomorskog prometa. Na plovnim putovima ili područjima gdje se većina pomorskog prometa odvija daleko od područja opasnosti i najveću opasnost predstavljaju međusobna mimoilaženja brodova dobar pokazatelj širine domene bit će bočni pomak, dok na plovnim područjima na kojima se plovidba odvija u blizini opasnosti pokazatelj širine domene bit će taktički promjer. Naime, kod izbjegavanja sudara uobičajena praksa časnika u straži je promjena kursa i to ne veća od  $90^\circ$  što znači da širina domene mora odgovarati dvostrukoj vrijednosti bočnog pomaka. Nasuprot tome pri plovidbi u blizini opasnosti sigurno područje oko broda trebalo bi odgovarati mogućnosti da brod napravi cijeli krug, odnosno dvostrukom taktičkom promjeru. Utjecaj na povećanje širine domene ima i dubina mora jer se u plitkim morima vrijednosti bočnog pomaka i taktičkog promjera povećava. Potrebno je naglasiti da prema suvremenim stajalištima širina domene nije jednaka s lijeve i desne strane broda već se veći slobodni prostor zahtijeva s desne strane broda, međutim za potrebe modela te određivanja vrijednosti funkcije prostornog zauzeća, važno je poznavati samo ukupnu širinu elipse, odnosno površinu domene.

Prema navedenom, koeficijent utjecaja brzine za širinu broda u modelu se može odrediti u ovisnosti o vrijednosti bočnog pomaka ili taktičkog promjera broda pri čemu te vrijednosti moraju odgovarati najvećoj brzini broda i maksimalnom otklonu kormila<sup>32</sup>. Veća vrijednost koeficijenta povećava površinu domene čime daje veću rezervu sigurnosti plovidbe.

Uobičajene vrijednosti bočnog pomaka u dubokoj vodi iznose približno 10 širina broda, dok su vrijednosti taktičkog promjera približno 2,2 puta veće. Brodovi finijih linija i većih brzina kao što su kontejnerski i putnički brodovi imaju veće vrijednosti bočnog pomaka (približno do 13 širina broda), dok kod brodova klasičnih linija s manjim brzinama, kao što su brodovi za prijevoz rasutih tereta i tankeri, vrijednost bočnog pomaka dostiže do 10 širina broda [88].

Općenito, vrijednosti svih koeficijenata mogu se odrediti uzimajući u obzir dva principa:

- princip najveće vrijednosti,
- princip najveće frekvencije.

Princip najveće vrijednosti pretpostavlja definiranje koeficijenta s obzirom na maritimna svojstva najvećeg broda koji se može očekivati na plovnom putu, dok princip najveće frekvencije pretpostavlja definiranje koeficijenta s obzirom na maritimna svojstva statistički najvjerojatnijih brodova na plovnom putu. Prvi princip

---

<sup>32</sup> Uobičajeni najveći otklon kormila za koji se računaju bočni pomak i taktički promjer iznosi  $35^\circ$ .

daje najveću rezervu sigurnosti i može se koristiti na plovnim područjima s plovidbom brodova bitno različitih maritimnih svojstava, dok se drugi može koristiti na plovnim područjima gdje je uobičajena plovidba brodova sličnih maritimnih svojstava.

**Tablica 12 Veličine domena za karakteristične brodove ovisno o koeficijentima duljine i širine domena ( $\alpha_{LB} = 0,04$ )**

		UKUPNA DULJINA/ŠIRINA DOMENE ( $2 \cdot D_L / 2 \cdot D_B$ )		
KOEFICIJENT DULJINE/ŠIRINE DOMENE	BRZINA (čv)	<b>BROD 1</b> $L=L_n=225 \text{ m}, B=B_n=32 \text{ m}$ $D=D_n=80.000$	<b>BROD 2</b> $L=260 \text{ m}, B=32 \text{ m}$ $D=65.000$	<b>BROD 3</b> $L=290 \text{ m}, B=32 \text{ m}$ $D=202.000 \text{ t}$
7,4 / 0,93	10	4,76*L / 12,08*B	4,24*L / 13,19*B	6,99*L / 15,84*B
	14	8,10*L / 15,03*B	7,07*L / 15,87*B	11,93*L / 19,91*B
	20	15,21*L / 21,31*B	13,11*L / 21,55*B	22,42*L / 28,56*B
		<b>BROD 1</b> $L=225 \text{ m}, B=32 \text{ m}$ $D=80.000 \text{ t}$	<b>BROD 2</b> $L=L_n=260 \text{ m}, B=B_n=32 \text{ m}$ $D=D_n=65.000$	<b>BROD 3</b> $L=290 \text{ m}, B=32 \text{ m}$ $D=202.000 \text{ t}$
7,4 / 0,93	10	4,93*L / 12,43*B	4,30*L / 13,48*B	7,54*L / 6,70*B
	14	8,43*L / 15,72*B	7,19*L / 16,43*B	13,02*L / 11,37*B
	20	15,87*L / 22,72*B	13,33*L / 22,70*B	24,65*L / 21,29*B
		<b>BROD 1</b> $L=225 \text{ m}, B=32 \text{ m}$ $D=80.000 \text{ t}$	<b>BROD 2</b> $L=260 \text{ m}, B=32 \text{ m}$ $D=65.000 \text{ t}$	<b>BROD 3</b> $L=L_n=290 \text{ m}, B=B_n=32 \text{ m}$ $D=D_n=202.000 \text{ t}$
14,8 / 1,48	10	5,34*L / 11,67*B	4,95*L / 12,89*B	7,24*L / 15,00*B
	14	9,24*L / 14,24*B	8,47*L / 15,28*B	12,43*L / 18,28*B
	20	17,52*L / 19,69*B	15,95*L / 20,35*B	23,45*L / 25,22*B

Osim opisanog povećanja domene u plovidbi broda, kada je brzina broda veća od 0, slobodno područje oko broda treba odrediti i za brod u mirovanju. Slobodno područje u mirovanju određeno je kružnicom čiji je radijus:

$$D_{v=0} = \alpha_{LB} \cdot f(L, B) \quad (60)$$

Koeficijent dimenzija broda ( $\alpha_{LB}$ ) u načelu se može smatrati veličinom koja određuje slobodni prostor oko broda potreban za sigurnu plovidbu drugih brodova. Njegovim povećanjem linearno će se povećati radijus kružnice slobodnog područja. Ako se primjeni prethodno opisano načelo određivanja koeficijenta duljine i širine domene, vrijednost koeficijenta dimenzija broda ovisit će o vrijednosti bočnog pomaka ili taktičkog promjera drugih brodova u plovidbi plovnim putom.

Slobodno područje oko broda u mirovanju predstavlja statičku domenu i njegov utjecaj na ukupnu sigurnost je višestruko manji od utjecaja dinamičke domene kada brodovi plove uobičajenim brzinama.

#### 4.3.2.2 Koeficijenti funkcije prostorne razdiobe brodova

Funkcija prostorne razdiobe ovisi o koeficijentima utjecaja prostorne razdiobe ( $\alpha_{SD}$ ) i prosječne udaljenosti brodova ( $\alpha_{AV}$ ). Vrijednost koeficijenata mora zadovoljiti obilježje funkcije sigurnosti da se najveće smanjenje sigurnosti plovidbe pojavljuje



kada na plovnom putu plove brodovi za koje postoji povećana opasnost sudara. Navedeno podrazumijeva manji relativni utjecaj funkcije prostorne razdiobe na sigurnost plovidbe od utjecaja funkcije povećane opasnosti.

Za koeficijent prostorne razdiobe vrijedi:

$$\alpha_{SD} = 1 - ASD_{MIN} \quad (61)$$

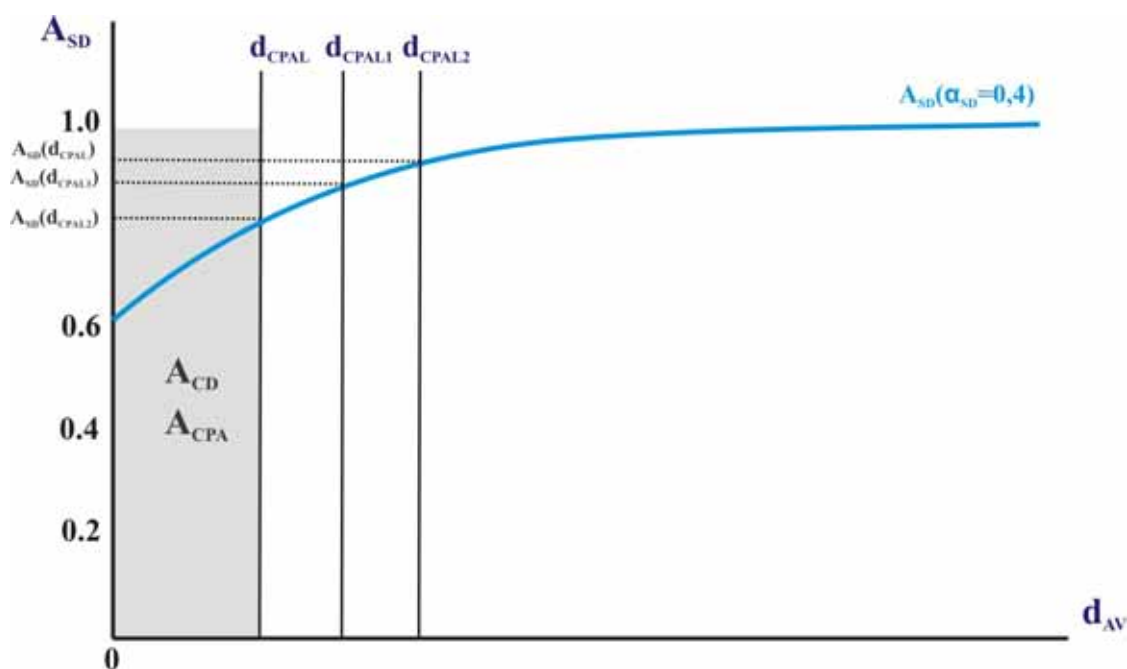
$$ASD_{\bar{d}=d_{CPAL}} = f(\alpha_{SD})$$

Relativno smanjenje sigurnosti plovidbe u trenutku kada prosječna udaljenost brodova postane jednaka graničnoj najmanjoj udaljenosti mimoilaženja vrlo je teško objektivno utvrditi stoga se za određivanje vrijednosti funkcije u tom trenutku i posljedično za definiranje odgovarajuće vrijednosti koeficijenta utjecaja prostorne razdiobe može uzeti ekspertno mišljenje za pojedino plovno područje. Elementi o kojima primarno ovisi definiranje koeficijenta utjecaja prostorne razdiobe u predloženom modelu jesu:

- vrijednost granične najmanje udaljenost mimoilaženja,
- opće stanje pomorskog prometa.

Za različite vrijednosti  $d_{CPAL}$  vrijedi:

$$d_{CPAL1} > d_{CPAL2} \Rightarrow ASD_{d_{CPAL1}} > ASD_{d_{CPAL2}} \quad (62)$$



Slika 23 Vrijednosti funkcije prostorne razdiobe u zavisnosti od granične vrijednosti najmanje udaljenosti mimoilaženja

Opće stanje pomorskog prometa može se objasniti obilježjima pomorskog prometa na plovnom putu. Elementi koji obilježavaju pomorski promet, a važni su za definiranje koeficijenta utjecaja prostorne razdiobe jesu:

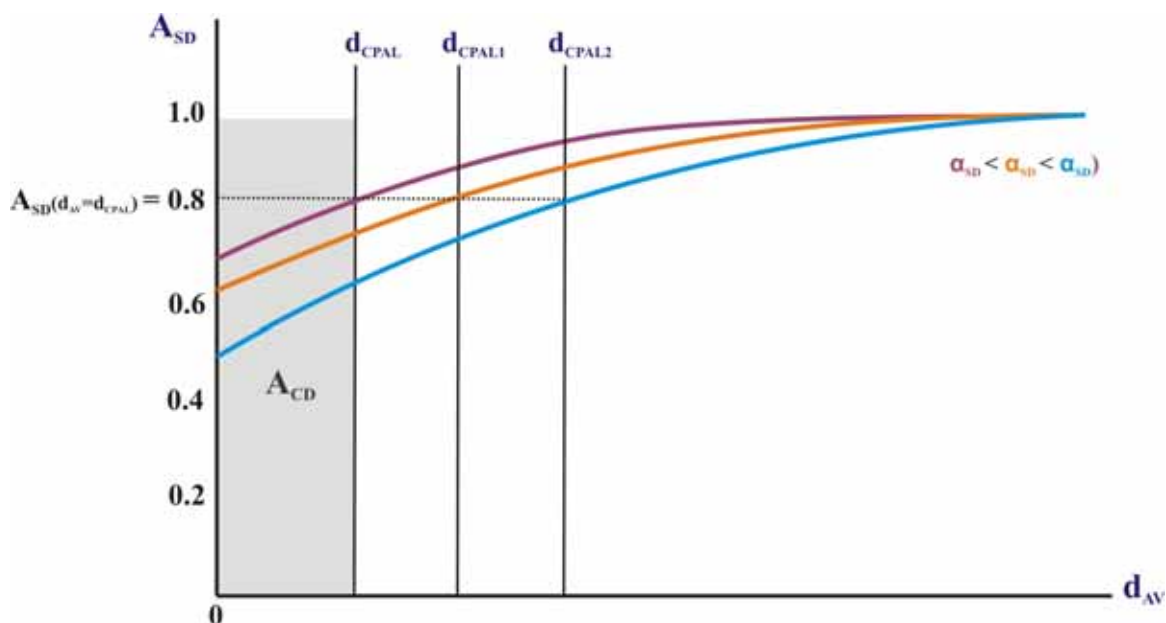
- prosječni broj brodova,
- veličina i vrsta brodova.

Za potrebe modela može se utvrditi da će na područjima s relativno rijetkim pomorskim prometom najmanja vrijednost funkcije biti manja od područja gdje je uobičajeni gušći promet. Pri rjeđem pomorskom prometu povećanje broja brodova, kao i njihovo međusobno približavanje uz smanjenje prosječne udaljenosti, obilježava subjektivni dojam većeg smanjenja sigurnosti plovidbe. U drugom slučaju kada je gustoća plovidbe velika s relativno malim prosječnim udaljenostima, povećanje broja brodova i smanjenje prosječne udaljenosti neće dati dojam značajne promjene sigurnosti plovidbe. Prema navedenom, vrijednost koeficijenta prostorne razdiobe mora biti veća na plovnim putovima s rjeđim pomorskim prometom.

Za primjenu u modelu može se predložiti da vrijednost funkcije u trenutku kada je  $d_{AV} = d_{CPAL}$  iznosi približno 0,8 i to za plovne putove gdje je uobičajeno relativno rijedak promet. Predložena vrijednost ovisi o definiranoj graničnoj najmanjoj udaljenosti mimoilaženja pa prvo treba utvrditi tu vrijednost, a tek onda i koeficijent prostorne razdiobe brodova. Dodatno koeficijent se mora odrediti uz unaprijed poznati prosječni broj brodova na plovnom putu.

**Tablica 13 Približne vrijednosti koeficijenta prostorne razdiobe za  $A_{SD}(\bar{d} = d_{CPAL}) = 0.8$**

	$d_{CPAL}=0,5 \text{ M}$	$d_{CPAL}=1 \text{ M}$	$d_{CPAL}=1,5 \text{ M}$	$d_{CPAL}=2 \text{ M}$
$n=10, \alpha_{AV}=0,004$	0,30	0,40	0,55	0,7
$n=5, \alpha_{AV}=0,002$	0,27	0,35	0,50	0,65



**Slika 24 Funkcija prostorne razdiobe ovisno o vrijednostima koeficijenta prostorne razdiobe i ulaznim parametrima**

Koeficijent prosječne udaljenosti definira vrijednost prosječne međusobne udaljenosti brodova pri kojoj funkcija dostiže približnu vrijednost 1. Granična udaljenost koja ukazuje na povećanu koncentraciju brodova  $d_{CL}$  može se smatrati ona udaljenost pri kojoj časnici u straži poduzimaju dodatnu pažnju u odnosu na drugi brod bez obzira postoji li prijetnja pojave sudarne opasnosti. Dodatna pažnja, podrazumijeva vizualno praćenje te praćenje putem uređaja za automatsko radarsko plotiranje okolnih brodova od strane časnika palube. Određivanje vrijednosti udaljenosti ovisi o sljedećim elementima:

- veličini i vrsti brodova na plovnom putu,
- manevarskim obilježjima brodova,
- veličini plovnog područja.

**Tablica 14 Približne udaljenosti povećane koncentracije brodova u ovisnosti o koeficijentima prosječne udaljenosti brodova ( $n=10, \alpha_{SD}=0,3$ )**

PRIBLIŽNA UDALJENOST POVEĆANE KONCENTRACIJE BRODOVA – $D_{CL}$ (M)	VRIJEDNOST KOEFICIJENTA PROSJEČNE UDALJENOSTI ( $A_{AV}$ )
10,8	0,002
6,5	0,004
4,3	0,006
3,2	0,008
2,7	0,01
1,3	0,02

Veći broj brodova sa slabijim manevarskim karakteristikama na plovnim putovima manje površine zahtijevat će definiranje veće udaljenosti  $d_{CL}$ . Za potrebe modela, može se smatrati da vrijedi sljedeće:

$$\begin{aligned} D_{CL} &> v_{RMAX} \cdot t_{CPAL} \\ D_{CL} &> 2 \cdot D_{LMAX} \end{aligned} \quad (63)$$

Bez obzira kojim se principom vodi pri određivanju udaljenosti povećane koncentracije brodova, ona bi trebala biti određena za najnepovoljniji slučaj.

#### 4.3.2.3 Koeficijent najmanje udaljenosti mimoilaženja

Koeficijent najmanje udaljenosti mimoilaženja ( $\alpha_{CPA}$ ) određuje brzinu pada funkcije međusobnih odnosa brodova. Za funkciju međusobnih odnosa brodova vrijedi:

$$\alpha_{CPA1} > \alpha_{CPA2} \Rightarrow (A_{CPA1})_{\alpha_{CPA1}, k_{CPA}} < (A_{CPA1})_{\alpha_{CPA2}, k_{CPA}} \quad (64)$$

Kao generalni kriterij odabira odgovarajuće vrijednosti koeficijenta može se predložiti mogućnost praćenja brodova od strane VTS operatera<sup>33</sup>. Najveći broj brodova koji operater može odjedanput pratiti može se poistovjetiti s radnim opterećenjem operatera. Naime, može se smatrati da smanjenje sigurnosti plovidbe neće biti značajnije, ako VTS operater može pratiti i nadzirati sve brodove na plovnom putu, odnosno da će se sigurnost početi značajno smanjivati povećanjem broja brodova iznad vrijednosti najvećeg broja brodova koji VTS operater može istovremeno pratiti.

Mogućnost praćenja brodova od strane VTS operatera uvelike ovisi o površini plovnog puta, kao i obilježjima brodova. Općenito, na plovnom području manje površine i pri plovidbi brodova slabijih manevarskih obilježja, većih dimenzija ili brodova za koje se zahtijevaju dodatne mjere sigurnosti broj brodova koje VTS operater može pratiti je manji. Također, takva plovidbena situacija ukazuje na manju sigurnost plovidbe što pretpostavlja definiranje veće vrijednosti koeficijenta. Mogućnost praćenja brodova od strane VTS operatera, odnosno radno opterećenje operatera, ovisi o broju i značajkama brodova te složenosti promatranog sektora plovidbe koji ovisi o razvedenosti obale, udaljenosti plovnog područja od obale i pličina, postojanju odgovarajuće tehnologije praćenja brodova i pravnoj uređenosti plovidbe [38].

Rezultati provedenog anketnog upitnika (prilog 2) pokazuju da je na plovidbenoj površini od 100 M<sup>2</sup> moguće istovremeno praćenje približno 10 brodova. Za navedeni broj brodova odgovarajuća vrijednost koeficijenta najmanje udaljenosti mimoilaženja iznosila bi  $\alpha_{CPA}=0,01$ .

### 4.3.3 Koeficijenti funkcije povećane opasnosti

Koeficijenti funkcije povećane opasnosti određuju:

- brzinu pada i rasta funkcije, te
- minimum funkcije.

Pad funkcije označava period kada se sigurnost plovidbe smanjuje zbog približavanja brodova. Taj period traje do trenutka mimoilaženja brodova na najmanjoj udaljenosti kada je sigurnost plovidbe najmanja. Nastavkom plovidbe brodovi se udaljuju, sigurnost plovidbe se povećava, a funkcija počinje rasti.

Koeficijenti korekcije vremena  $\alpha_{TCPA}$  i  $\beta_{TCPA}$  definiraju brzinu pada i rasta funkcije. Za koeficijente vrijedi:

$$\alpha_{TCPA} < \beta_{TCPA} \quad (65)$$

Valjane vrijednosti koeficijenta mogu se odrediti uzimajući u obzir ukupno stanje pomorskog prometa, odnosno statističku raspodjelu brodova na plovnom putu. Ako prometno stanje ukazuje na plovidbu brodova većih dimenzija, pad funkcije

---

<sup>33</sup> Osim sposobnosti VTS operatera može se uzeti i sposobnost praćenja brodova časnika u straži na brodu.

mora biti brži, a funkcija će biti sličnija pravcu. Takav pad se postiže definiranjem manje vrijednosti koeficijenta  $\alpha_{TCPA}$ , Nasuprot tome rast funkcije nakon trenutka mimoilaženja će biti sporiji što se postiže definiranjem, također manje vrijednosti koeficijenta  $\beta_{TCPA}$ . Za primjenu u modelu predlažu se sljedeće vrijednosti koeficijenata:

$$5 < \alpha_{TCPA} < 10 \text{ i } \beta_{TCPA} > 20 \quad (66)$$

Koeficijent najmanje udaljenosti mimoilaženja brodova  $\gamma R$  određuje najmanju vrijednost funkcije. Minimum funkcije nastaje u trenutku kada je  $t_{CPA} = 0$ , a vrijednost funkcije u tom trenutku ovisi o omjeru vrijednosti  $d_{CPA}$  i  $d_{CPAL}$ , koeficijentu korekcije  $k_{DCPA}$  te relativnoj brzini. Općenito, vrijedi sljedeće:

$$\begin{aligned} \frac{d_{CPA1}}{d_{CPAL}} < \frac{d_{CPA2}}{d_{CPAL}} &\Rightarrow \min(ACD)_{d_{CPA1}, v_R, k_{DCPA}} < \min(ACD)_{d_{CPA2}, v_R, k_{DCPA}} \\ k_{DCPA1} < k_{DCPA2} &\Rightarrow \min(ACD)_{k_{DCPA1}, d_{CPA}, v_R} < \min(ACD)_{k_{DCPA2}, d_{CPA}, v_R} \\ v_{R1} < v_{R2} &\Rightarrow \min(ACD)_{v_{R1}, k_{DCPA}, d_{CPA}} < \min(ACD)_{v_{R2}, k_{DCPA}, d_{CPA}} \end{aligned} \quad (67)$$

Prema provedenom anketnom upitniku pri dvostruko manjoj vrijednosti  $d_{CPA}$  od granične  $d_{CPAL}$ , najmanja vrijednost funkcije trebala bi iznositi približno 0,5.

Tablica 15 Vrijednosti koeficijenta korekcije za različite relativne brzine ( $d_{CPAL} = 2 * d_{CPA}$ )

$v_R$ ( $\alpha_{VR} = 0.0016$ )	$k_{DCPA}$ ( $ACD_{MIN} = 0,5$ )	$k_{DCPA}$ ( $ACD_{MIN} = 0,4$ )	$k_{DCPA}$ ( $ACD_{MIN} = 0,3$ )
10	1,44	1,91	0,74
20	1,62	1,19	0,83
30	1,91	1,41	0,98
40	2,32	1,71	1,20
50	2,85	2,10	1,47

Valja naglasiti da je najmanju vrijednost funkcije moguće korigirati definiranjem neke druge eksponencijalne veze u funkciji. Primjerice, zamjenom vrijednosti baze prirodnog logaritma  $e$  u funkciji drugom cjelobrojnom vrijednošću, minimum funkcije će se povećati pri većoj cjelobrojnoj vrijednosti od vrijednosti  $e$ . Takav korigirani izraz funkcije povećane opasnosti također je moguće koristiti za mjerenje razine sigurnosti plovidbe.

## 5. FUNKCIONALNA ANALIZA SIGURNOSTI PLOVIDBE

### 5.1 KARAKTERISTIČNA STANJA POMORSKOG PROMETA NA PLOVNOM PUTU

Kvantiteta i kvaliteta pomorskog prometa definiraju stanje sigurnosti na odgovarajućem plovnom putu. Promjena razine sigurnosti uvjetovana je ulaskom brodova i njihovim kretanjem unutar plovnog područje. Prikaz odnosa prethodno opisane funkcije sigurnosti i razine sigurnosti plovidbe na plovnom putu moguće je objasniti usporedbom odgovarajućih položaja brodova. Pri svakom položaju brodova funkcija sigurnosti mora poprimiti vrijednost zadovoljavajući postavljena načela sigurnosti. Modelom maritimnog ustroja pomorskog prometa moguće je funkcionalno uspoređivati razinu sigurnosti plovidbe kod različitih plovidbenih situacija.

Međusobni odnos dva broda moguće je opisati trima karakterističnim položajima, i to:

- položajem protukursa,
- pretjecanjem,
- presijecanjem kurseva.

Ako se pretpostavi da je sigurnost plovidbe manja pri većoj relativnoj brzini između brodova onda najmanja sigurnost plovidbe odgovara položaju protukursa. Veća relativna brzina brodova ukazuje da će područje povećane opasnosti, odnosno područje u kojem je sigurnost plovidbe najmanja, biti prostorno najveće. Period u kojem će brodovi biti u povećanoj opasnosti bit će jednak za sva tri karakteristična položaja samo što pri manjim relativnim brzinama pojava povećane opasnosti nastupa kasnije.

### 5.2 ANALIZA FUNKCIJA SIGURNOSTI

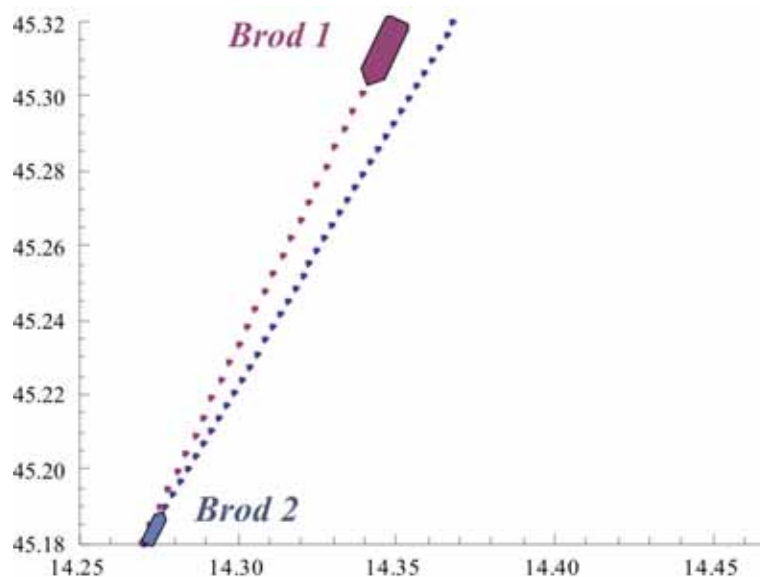
U analizi funkcija sigurnosti plovidbe pretpostavlja se plovidba dvaju brodova u nasuprotnim kursovima na plovnom području približne površine  $96 M^2$  u vremenu  $t$  s jediničnom podjelom vremena od jedne minute.

Tablica 16 Pretpostavljena maritimna svojstva brodova

	BROD 1	BROD 2
$L$ (m)	100	225
$B$ (m)	15	32
$D_S(t)$	15.000	80.000
$v$ (čv)	15	20
$K$	$35^\circ$	$210^\circ$

Dodatno, pretpostavlja se da se ulazak brodova u plovno područje odvija sa zakašnjenjem od  $t_1=0,2$  i  $t_2=0,4$  sati<sup>34</sup>.

<sup>34</sup> Radi boljeg objašnjenja, pri analizi pojedinih funkcija korištene su i druge vrijednosti ulaznih parametara koje su tada navedene

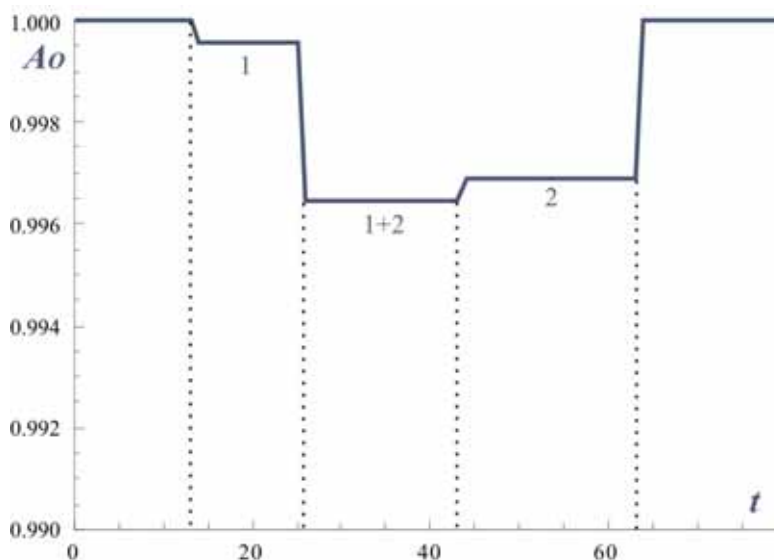


Slika 25 Plovidba brodova plovnim područjem<sup>35</sup>

U nastavku rada uspoređuju se funkcije opće sigurnosti i funkcija povećane opasnosti mijenjanjem odgovarajućih varijabli i koeficijenata pojedine funkcije. Analiza funkcija napravljena je u ograničenom vremenu koji ovisi o brzinama brodova.

### 5.2.1 Prikaz funkcije prostornog zauzeća

Funkcija prostornog zauzeća predstavlja diskontinuiranu funkciju čija se vrijednost mijenja ulaskom ili izlaskom broda iz predviđenog plovnog područja.



Slika 26 Funkcija prostornog zauzeća s vremenima plovidbe brodova

<sup>35</sup> Veličine na osi x i y predstavljaju geografske koordinate.

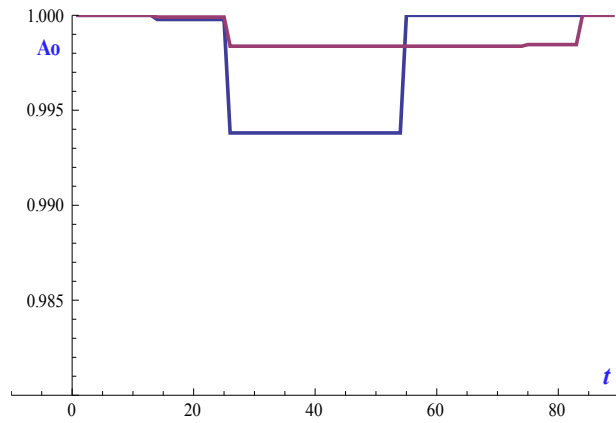
Na prethodnoj je slici prikazana promjena funkcije pri plovidbi brodova pretpostavljenih maritimnih svojstava<sup>36</sup> uz sljedeće vrijednosti koeficijenata  $\alpha_{LB} = 0,04$ ,  $\alpha_{\Delta T} = 7,4$  te  $\beta_{\Delta T} = 0,9$ .

Promjenom brzine, dimenzija broda ili koeficijenata koji opisuju domenu broda mijenja se i vrijednost funkcije. Veće vrijednosti navedenih elemenata smanjuju vrijednost funkcije. Brzina broda dodatno mijenja vrijeme u kojem je vrijednost funkcije različita od 1, odnosno vrijeme u kojem funkcija ima utjecaj na promjenu razine sigurnosti plovidbe.

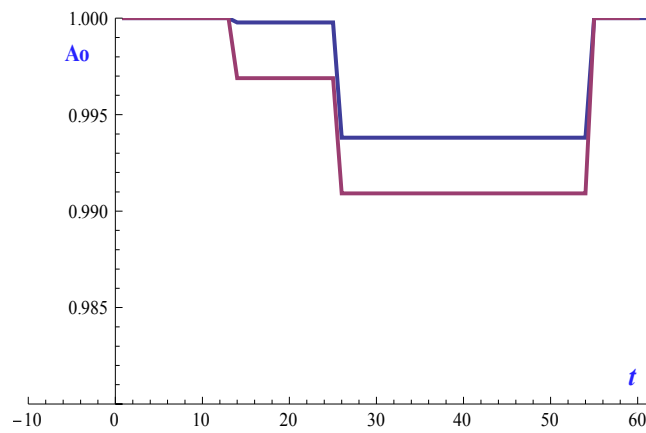
---

<sup>36</sup> Radi boljeg prikaza funkcije korištene su brzine brodova  $v_1 = v_2 = 10$  čv.



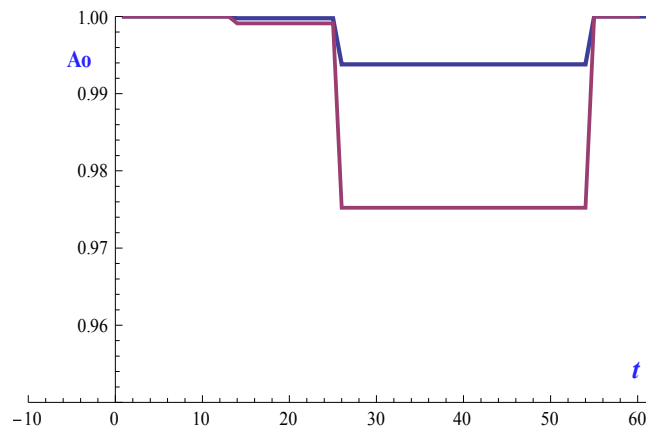


$$v_1=15 \text{ čv}, v_2=20 \text{ čv}; v_1=10 \text{ čv}, v_2=10 \text{ čv}$$



$$L_1=100 \text{ m}, B_1=15 \text{ m}, D_1=15.000 \text{ t}; L_2=225 \text{ m}, B_2=32 \text{ m}, D_2=80.000 \text{ t}$$

$$L_1=L_2=225 \text{ m}, B_1=B_2=32 \text{ m}, D_1=D_2=80.000 \text{ t}$$



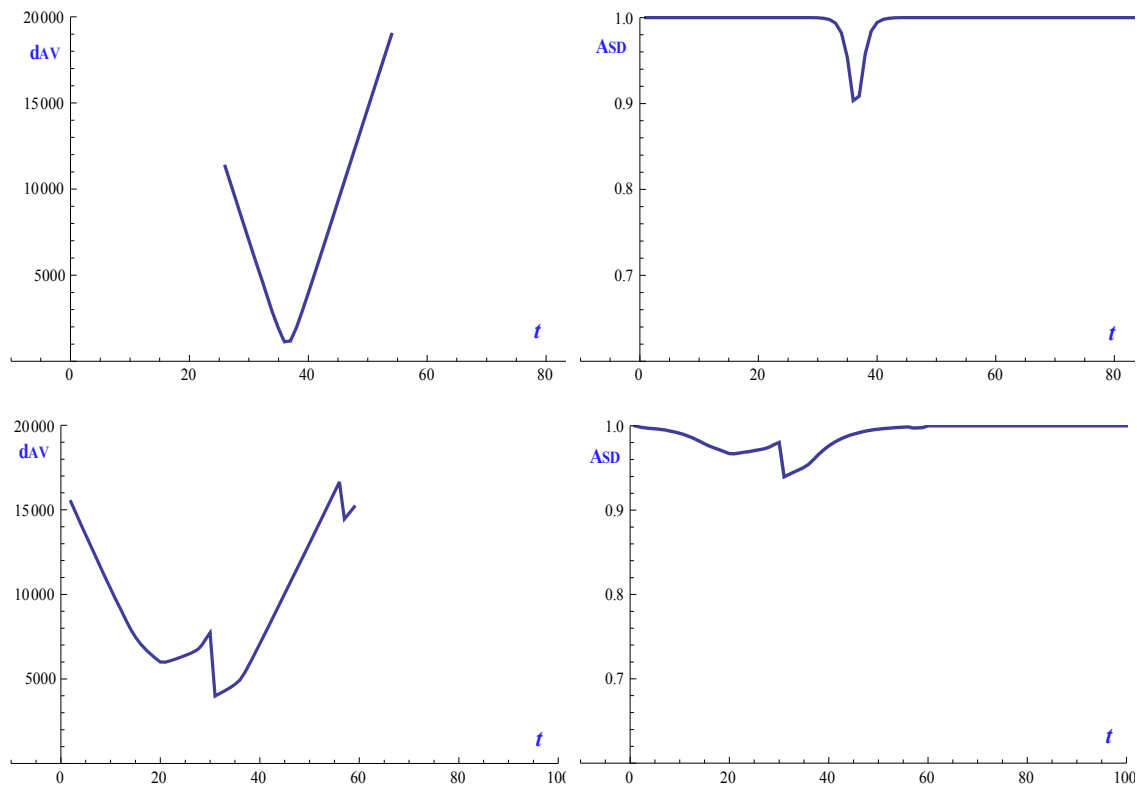
$$\alpha_{LB} = 0,04 \quad \alpha_{\Delta T} = 7,4 \quad \beta_{\Delta T} = 0,9$$

$$2^* \alpha_{LB} \quad 2^* \alpha_{\Delta T} \quad 2^* \beta_{\Delta T}$$

Slika 27 Funkcija prostornog zauzeća za različite ulazne parametre

### 5.2.2 Prikaz funkcije prostorne razdiobe

Vrijednost funkcije prostorne razdiobe mijenja se promjenom udaljenosti brodova. Približavanjem brodova vrijednost funkcije se smanjuje. Pri analizi funkcije korištene su sljedeće vrijednosti koeficijenata i to  $\alpha_{SD} = 0,3$  i  $\alpha_{AV} = 0,002$ .

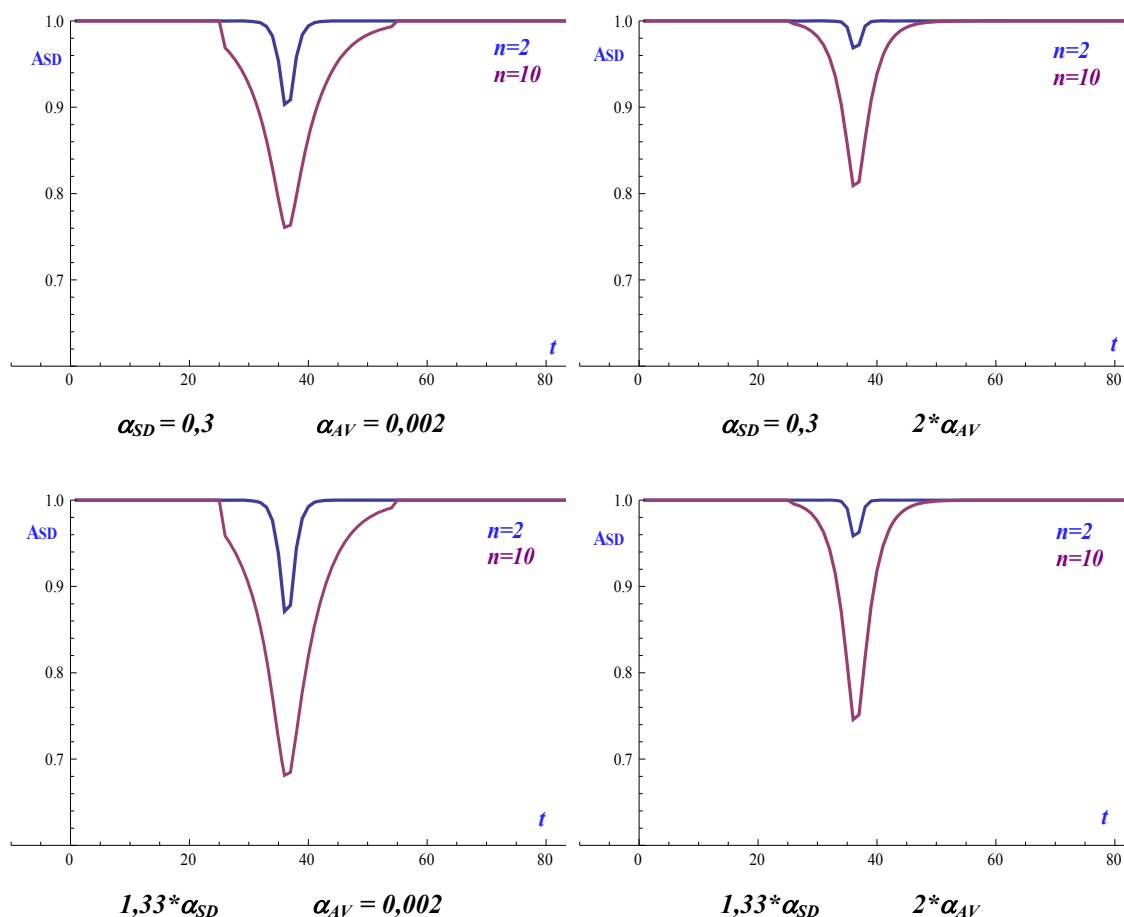


Slika 28 Medusobna udaljenost brodova i funkcija prostorne razdiobe ( $n=2$  i  $n=4$ )

Promjenom prosječne udaljenosti brodova mijenja se vrijednost funkcije pri čemu vrijedi:

$$n_1(t) > n_2(t) \Rightarrow (A_{SD})_{n_1, d_{AV}}(t) < (A_{SD})_{n_2, d_{AV}}(t) \quad (68)$$

Time se pokazuje da veći broj brodova na plovnom putu uz isti prostorni raspored smanjuje razinu sigurnosti plovidbe.



Slika 29 Funkcija prostornog zauzeća za različite vrijednosti koeficijenata

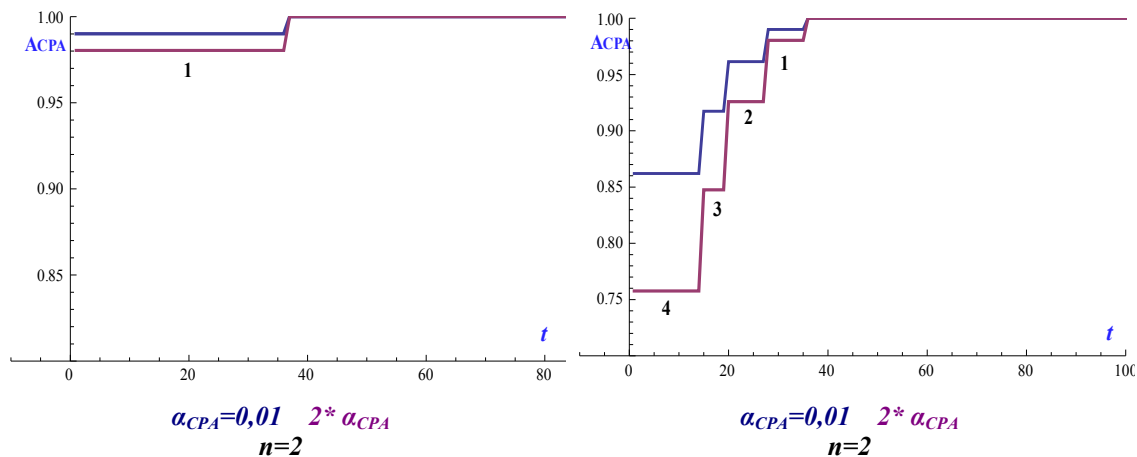
Na prethodnoj slici prikazana je funkcija prostorne razdiobe za plovidbu različitog broja brodova uz iste vrijednosti prosječnih udaljenosti i  $d_{AVmin}=0,6 M$ . Promjenom vrijednosti koeficijenta prostorne razdiobe mijenja se minimum funkcije pri čemu vrijedi:

$$\min(A_{SD}) = A_{SD}(t_1) \wedge \min(d_{AV}) = d_{AV}(t_2) \Rightarrow t_1 = t_2 \quad (69)$$

Promjenom koeficijenta prosječne udaljenosti smanjuje se minimum funkcije, a povećava utjecaj plovidbe većeg broja brodova. Naime, tada je udaljenost povećane koncentracije brodova manja pa utjecaj udaljenosti brodova na smanjenje razine sigurnosti nastupa pri manjoj vrijednostima prosječne udaljenosti.

### 5.2.3 Prikaz funkcije međusobnih odnosa

Vrijednost funkcije međusobnih odnosa brodova predstavlja diskontinuiranu krivulju koja se mijenja ovisno o broju parova brodova  $k_{CPA}$ .



Slika 30 Funkcija međusobnih odnosa za različite vrijednosti  $k_{CPA}$

U trenutku promjene broja parova brodova funkcija se skokovito mijenja pri čemu vrijedi:

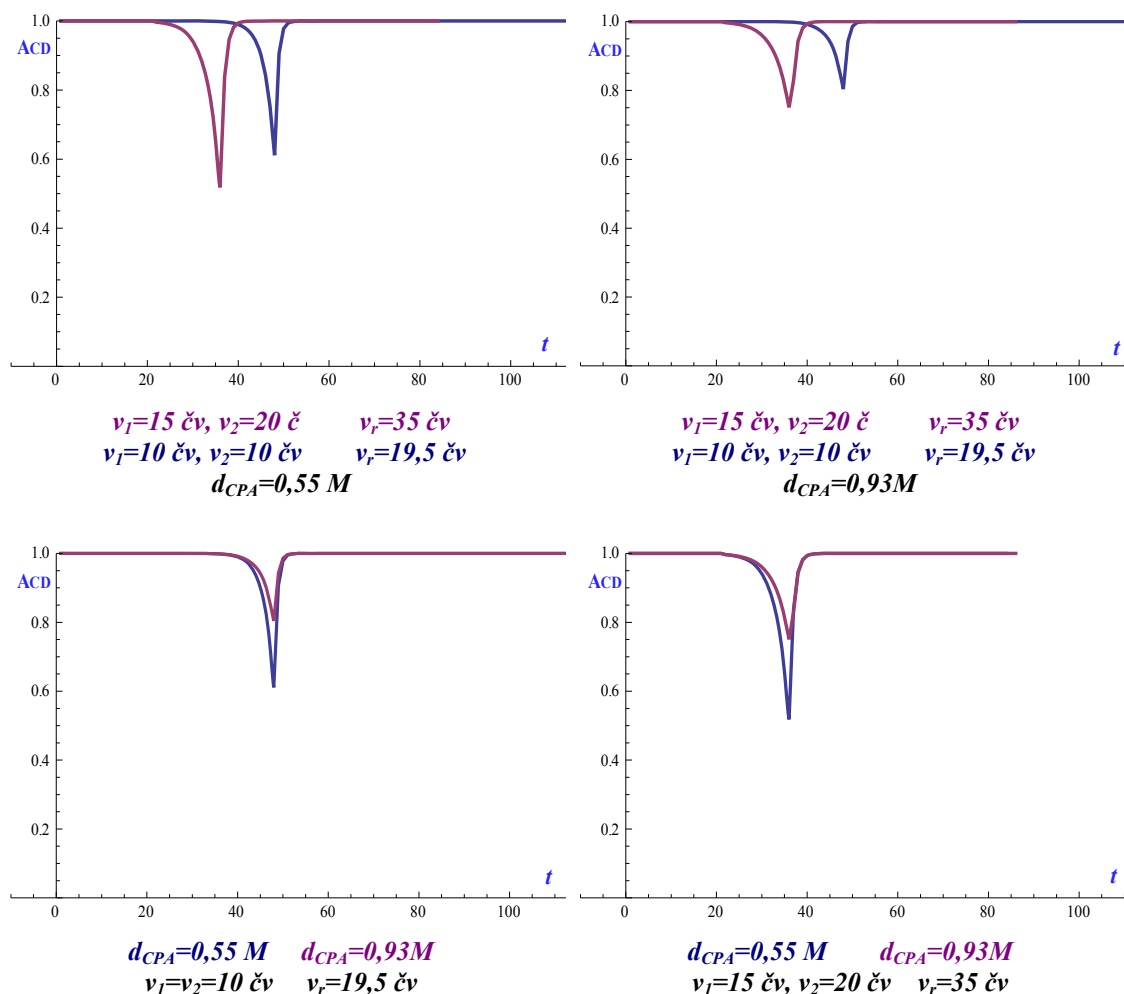
$$k_{CPA1} < k_{CPA2} < k_{CPA3} \Rightarrow \frac{(A_{CPA})_{k_{CPA3}}}{(A_{CPA})_{k_{CPA2}}} > \frac{(A_{CPA})_{k_{CPA2}}}{(A_{CPA})_{k_{CPA1}}} \quad (70)$$

Utjecaj povećanja koeficijenta najmanje udaljenosti mimoilaženja ogleda se u smanjenju funkcije.

#### 5.2.4 Prikaz funkcije povećane opasnosti

Funkcija povećane opasnosti mijenja razinu sigurnosti plovidbe promjenom vrijednosti najmanje udaljenosti mimoilaženja i relativnih brzina brodova pri čemu relativno najveća promjena ovisi o vrijednostima  $d_{CPA}$ . Dodatno, funkcija ovisi o koeficijentima koji mijenjaju najmanju vrijednost funkcije i položenost.

Pri analizi funkcije korištene su sljedeće vrijednosti koeficijenata i to  $\alpha_{TCPA}=7$ ,  $\beta_{TCPA}=25$ ,  $\alpha_{VR}=0,0016$  i  $k_{DCPA}=2$ .



**Slika 31 Funkcija povećane opasnosti od sudara za različite ulazne parametre**

Utjecaj promjene relativne brzine i najmanje udaljenosti mimoilaženja na funkciju može se okarakterizirati sljedećim izrazima:

$$\min(A_{CD})_{v_{r1}} = (A_{CD})_{vr1}(t_1) \wedge \min(A_{CD})_{vr2} = (A_{CD})_{vr1}(t_2) \Rightarrow \quad (71)$$

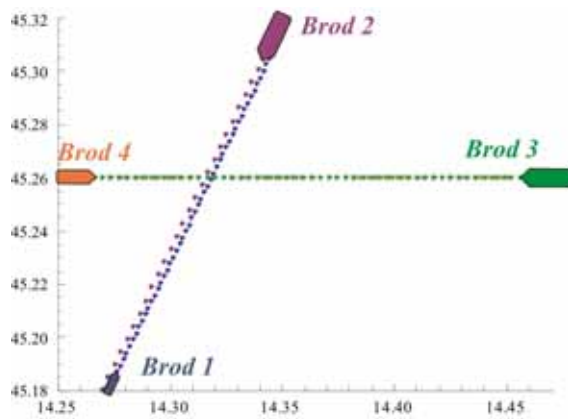
$$v_{r1} < v_{r2} \Rightarrow t_1 > t_2 \wedge (A_{CD})_{vr1}(t_1) < (A_{CD})_{vr1}(t_2)$$

odnosno vrijedi:

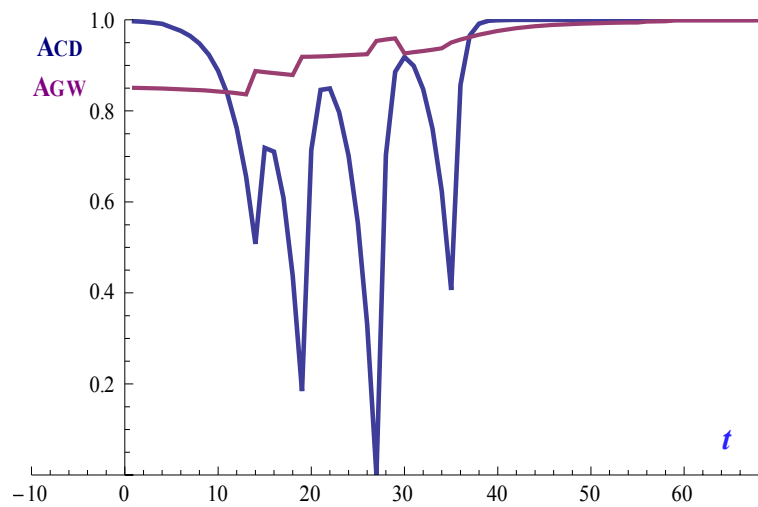
$$\frac{v_{r1}}{v_{r2}} = \frac{d_{CPA1}}{d_{CPA2}} \wedge v_{r1} > v_{r2} \wedge d_{CPA1} > d_{CPA2} \Rightarrow \frac{\min(A_{CD})_{d_{CPA1}, v_{r2}}}{\min(A_{CD})_{d_{CPA1}, v_{r1}}} < \frac{\min(A_{CD})_{d_{CPA2}, v_{r2}}}{\min(A_{CD})_{d_{CPA2}, v_{r1}}} \quad (72)$$

S obzirom da opasnost pri mimoilaženju prvenstveno ovisi o najmanjoj udaljenosti mimoilaženja, pri jednakim plovidbenim situacijama najveći relativni utjecaj na smanjenje razine sigurnosti plovidbe ima vrijednost  $d_{CPA}$ , dok se povećanjem relativne brzine razina sigurnosti blago mijenja.

Ako se funkcija povećane opasnosti usporedi s funkcijom opće opasnosti može se uočiti da je njezin utjecaj na razinu sigurnosti plovidbe višestruko veći.



	BROD 1-2	BROD 1-3	BROD 2-4	BROD 3-4
POLOŽAJ	Protukurs	Križanje kurseva	Križanje kurseva	Protukurs
$d_{CPA}(M)$	0,15	0,30	0,60	0
$t_{CPA}(min)$	19	35	14	27
$v_r$ (čv)	30	20	29,6	27
$Min(A_{CD})$	0,19	0,41	0,58	0



Slika 32 Usporedba funkcije povećane opasnosti i funkcije opće opasnosti ( $n=4$  i  $d_{CPAL}=1M$ )<sup>37</sup>

Za par brodova čiji je  $d_{CPA}=0$ , funkcija sigurnosti u trenutku  $t_{CPA}=0$  poprima vrijednost 0. U tom trenutku može se smatrati da je došlo do sudara, a razina sigurnosti plovidbe je najmanja.

<sup>37</sup> Za međusobne odnose brodova 1-4 i 2-3 vrijedi  $d_{CPA} > d_{CPAL}$  pa je vrijednost funkcije povećane opasnosti jednaka 1.

## 6. SIMULACIJSKI MODEL POMORSKOG PROMETA NA PRILAZNIM PLOVNIM PUTOVIMA

Za testiranje opisanog modela maritimnog ustroja pomorsko-prometnog toka korišten je namjenski programski alat kojim je simuliran pomorski promet ispred luke Rijeka. Simulacija je provedena korištenjem diskretnog simulacijskog modela.

Simulirano područje smatra se ravninom<sup>38</sup>, a geografske koordinate granica područja pretvorene su u pravokutne koordinate u ravnini projekcije ( $x$  i  $y$ ) korištenjem Gauss-Krügerove projekcije.

Radi dobivanja reprezentativnosti rezultata, odnosno dobivanja dovoljno točnih izračuna srednjih vrijednosti pretpostavljeni scenarij simulacije izvršen je s ukupno 5 replikacija.

### 6.1 ULAZNI PARAMETRI I ALGORITAM SIMULACIJE

Osnovni ulazni parametri u pretpostavljeni dinamički model jesu:

- smještaj plovnog područja,
- položaji odredišta,
- obilježja brodova,
- obilježja pomorskog prometa.

Promatrano plovno područje je područje Riječkog zaljeva ispred luke Rijeka ukupne površine 96 M<sup>2</sup>.

U simulaciji se pretpostavljaju sljedeća odredišta u Riječkom zaljevu

- Odredište 1 - svi lučki bazeni i brodogradilišta u Rijeci (Brodogradilište 3. maj, Riječki lučki bazen, Sušački lučki bazen, Brajdica te Brodogradilište Viktor Lenac,
- Odredište 2 – sva pristaništa u Bakarskom zaljevu, Brodogradilište Kraljevica, te naftni terminal u Omišlju i Sepenu.

---

<sup>38</sup> Plovno područje do udaljenosti od približno 60 M može se aproksimirati ravninom (u stvarnosti sferna ploha) [39][11]. Navedeno slijedi iz Legendreovog poučka „Sferni trokut, kojemu su stranice veoma male u usporedbi s polumjerom kugle na kojoj se on nalazi, može se bez osjetljivije pogreške zamijeniti s ravnim trokutom, kojemu su stranice po duljini jednake stranicama sfernog trokuta; površine tih dvaju trokuta skoro su jednake; a svaki kut ravnog trokuta manji je od odgovarajućeg kuta sfernog trokuta za trećinu ekscesa tog trokuta“.



**Granične koordinate područja**

$$\varphi_1=45.18^\circ \quad \varphi_2=45.32^\circ$$

$$\lambda_1=14.25^\circ \quad \lambda_2=45.52^\circ$$

**Slika 33 Promatrano plovno područje**

Brodovi u plovidbi podijeljeni su s obzirom na dimenzije u četiri kategorije.

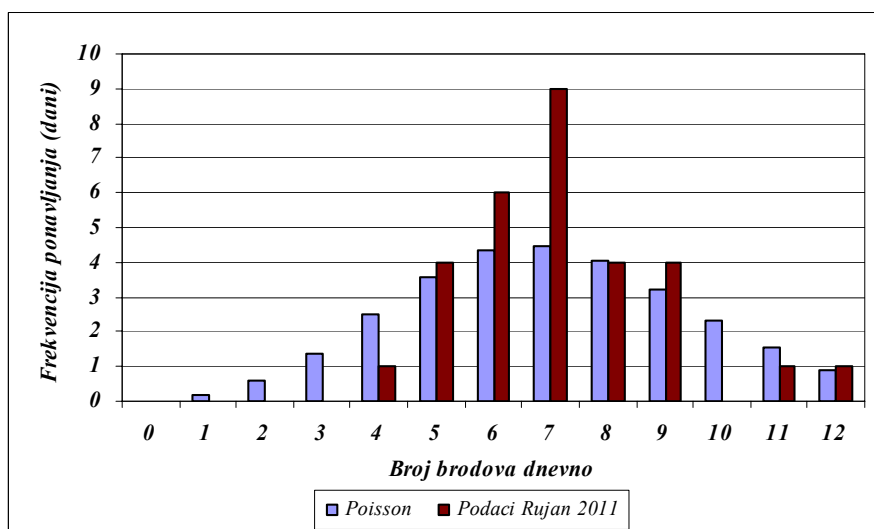
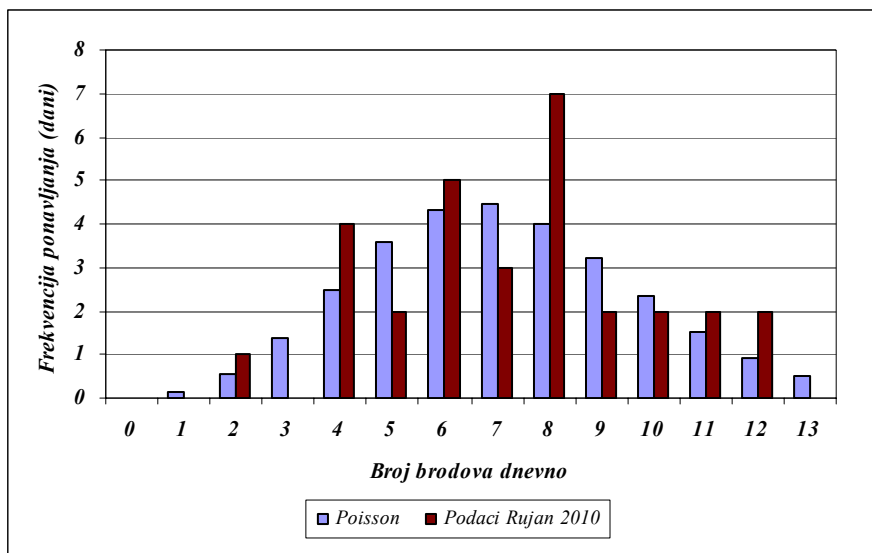
**Tablica 17 Obilježja brodova**

	Kategorija 1	Kategorija 2	Kategorija 3	Kategorija 4
<i>Širina (m)</i>	12 – 25	20 – 40	12 – 18	28 – 47
<i>Duljina (m)</i>	90 - 140	150 – 300	90 – 120	170 – 300
<i>Istisnina (t)</i>	4.000 – 25.000	40.000 – 70.000	4.000 – 20.000	50.000 – 170.000

Brzine brodova su slučajno odabrane vrijednosti između 10 i 28 čvorova te su za vrijeme boravka brodova u plovnom području konstantne.

Simulacijska logika izrađena je na temelju obilježja pomorskog prometa u Riječkom zaljevu prema podacima o prometu za 2010. i 2011. godinu.





Slika 34 Usporedba dolazaka brodova

Vrijednosti prometa modelirane su prema pomorskom prometu u mjesecu rujnu i pretpostavljaju sljedeće:

- brodovi dolaze prema *Poissonovoj* razdiobi s prosječno 7 brodova dnevno u razdoblju od 7 dana;
- vrijeme između dvaju dolazaka brodova određeno je eksponencijalnom razdiobom s parametrom koji ima recipročnu vrijednost prosječnog vremena između dvaju dolazaka brodova;
- položaj ulazaka brodova u plovnom području Velih vrata je na geografskoj širini  $\varphi=45,18^\circ$  sa slučajnim odabirom geografske dužine između  $\lambda_1=14,275^\circ$  i  $\lambda_1=14,30^\circ$ ;
- razdioba brodova prema odredištima slijedi zakonitost da 75% svih brodova plovi prema odredištu 1;

- prema odredištu 1 u slučajno odabranim kursevima između 29° i 35° plovi 70% brodova, ostali brodovi plovi u slučajno odabranim kursevima između 35° i 39°<sup>39</sup>;
- prema odredištu 2 u slučajno odabranim kursevima između 63° i 65° plovi 70% brodova; ostali brodovi plovi u slučajno odabranim kursevima između 65° i 70°<sup>40</sup>;
- prema odredištu 1 slučajnim odabirom plovi 60% brodova kategorije 1 i 40% brodova kategorije 2,
- prema odredištu 2 slučajnim odabirom plovi 60% brodova kategorije 3 i 40% brodova kategorije 4;
- vrijeme boravka brodova u odredištu slijedi eksponencijalnu razdiobu s prosječnom vrijednošću od 24 sati;
- položaj izlaska 70% brodova iz odredišta 1 je na geografskoj širini  $\varphi=45,32^\circ$  sa slučajnim odabirom geografske dužine između  $\lambda_l=14,38^\circ$  i  $\lambda_l=14,41^\circ$ ; položaj izlaska ostalih brodova je na geografskoj širini  $\varphi=45,32^\circ$  sa slučajnim odabirom geografske dužine između  $\lambda_l=14,41^\circ$  i  $\lambda_l=14,46^\circ$ ;
- položaj izlaska 70% brodova iz odredišta 2 je na geografskoj dužini  $\varphi=14,52^\circ$  sa slučajnim odabirom geografske širine između  $\lambda_l=45,23^\circ$  i  $\lambda_l=45,24^\circ$ ; položaj izlaska ostalih brodova je na geografskoj dužini  $\varphi=14,52^\circ$  sa slučajnim odabirom geografske širine između  $\lambda_l=45,24^\circ$  i  $\lambda_l=45,27^\circ$ ;
- plovidba brodova iz odredišta 1 prema izlasku iz plovnog područja odvija se prema slučajno odabranim kursevima između 209° i 215°;
- plovidba brodova iz odredišta 2 prema izlasku iz plovnog područja odvija se prema slučajno odabranim kursevima između 246° i 252°.

Vremensko određenje simulacije odnosi se na pomorski promet koji se ostvaruje u razdoblju od 7 dana što podrazumijeva da se jedna replikacija približno sastoji od 5.040 koraka uz vrijeme između koraka od 2 minute.

## 6.2 EVALUACIJA I VREDNOVANJE REZULTATA SIMULACIJE

Rezultati simulacije pretpostavljeni su za sljedeće vrijednosti ulaznih parametara funkcija sigurnosti plovidbe:

---

<sup>39</sup> Podrazumijeva se da 70% brodova plovi prema Riječkom i Sušačkom bazenu.

<sup>40</sup> Podrazumijeva se da 70% brodova plovi prema lukama u Bakarskom zaljevu i Brodogradilištu Kraljevica.

Koeficijent dimenzije broda ( $1/m^2$ )	$\alpha_{LB} = 0,04$
Koeficijent duljine domene ( $s^2/m$ )	$\alpha_{\Delta t} = 7,4$
Koeficijent širine domene ( $s^2/m$ )	$\beta_{\Delta t} = 0,09$
Normalizirana duljina broda na plovnom putu (m)	$L_n = 150$
Normalizirana širina broda na plovnom putu (m)	$B_n = 20$
Normalizirana istisnina broda na plovnom putu (t)	$D_n = 30.000$
Koeficijent utjecaja prostorne razdiobe	$\alpha_{SD} = 0,2$
Koeficijent prosječne udaljenosti ( $1/m$ )	$\alpha_{AV} = 0,0012$
Koeficijent najmanje udaljenosti mimoilaženja	$\alpha_{CPA} = 0,01$
Koeficijent korekcije $t_{CPA}$ , ( $t_{CPA} \geq 0$ )	$\alpha_{TCPA} = 7$
Koeficijent korekcije $t_{CPA}$ , ( $t_{CPA} < 0$ )	$\beta_{TCPA} = 25$
Koeficijent korekcije relativne brzine ( $s^2/m^2$ )	$\alpha_{VR} = 0,0016$
Korekcija najmanje udaljenosti mimoilaženja	$k_{DCPA} = 2$

Pretpostavlja se da povećana opasnost nastaje uz sljedeće granične sudarne parametre:

- $d_{CPAL} = 0,5 M$ ,
- $t_{CPAL} = 24$  minute.

Prema navedenim ulaznim parametrima i pretpostavkama u nastavku su opisani srednji rezultati 5 replikacija simulacije<sup>41</sup> te grafički prikaz reprezentativne replikacije. U reprezentativnoj replikaciji ukupni broj brodova u plovidbi iznosi 46.

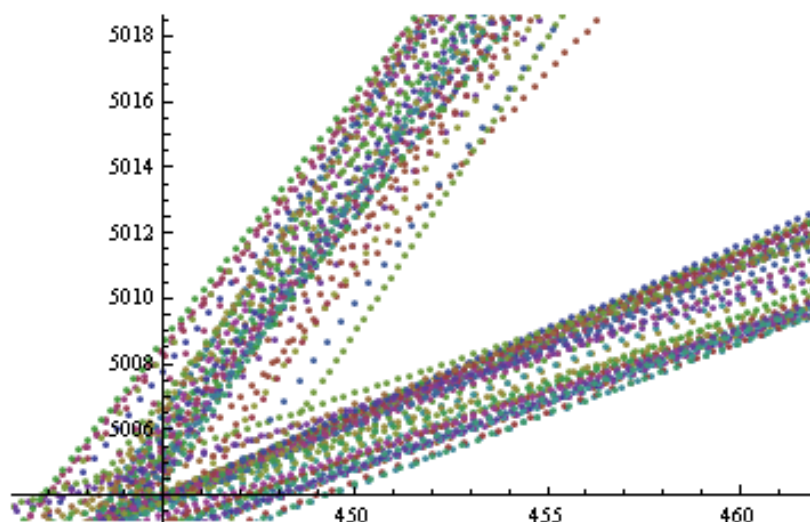
---

<sup>41</sup> Pri korištenju simulacije u stvarnim uvjetima, za dobivanje stalnosti rezultata, simulacija mora biti provedena s većim brojem replikacija.

Tablica 18 Odabrani rezultati simulacije

		REPLIKACIJA					Min	Max	Prosjek
		1	2 <sup>42</sup>	3	4	5			
Vrijeme simulacije (sati)		305	318	207	265	238	207	318	<b>267</b>
Najveći broj brodova u plovidbi		4	3	4	3	4	3	4	<b>3,6</b>
Vremenska zauzetost plovnog područja (%/sati)	Bez brodova	75,2	65,33	53,81	74,74	64,77	53,81	75,2	<b>66,77</b>
		229	207	111	197	154	111	229	<b>180</b>
	1 brod	15,8	27,53	30,82	21,79	25,44	15,8	30,82	<b>24,28</b>
		48	88	64	58	61	48	88	<b>64</b>
	2 broda	7,73	5,89	12,55	3,32	7,25	3,32	12,55	<b>7,35</b>
		24	19	26	9	17	9	26	<b>19</b>
	3 broda	1,13	1,25	2,57	0,15	2,06	0,15	2,57	<b>1,43</b>
		3	4	5	0	5	0	5	<b>4</b>
	4 broda	0,16	0	0,24	0	0,47	0	0,47	<b>0,17</b>
		0	0	0	0	1	0	1	<b>0</b>
Prosječno prostorno zauzeće (%)		0,10	0,14	0,15	0,17	0,16	0,1	0,17	<b>0,14</b>
Najveće prostorno zauzeće (M <sup>2</sup> )		0,57	0,52	0,55	0,66	0,68	0,52	0,68	<b>0,60</b>
Najveće prostorno zauzeće (%)		0,60	0,65	0,57	0,69	0,71	0,57	0,71	<b>0,64</b>
min (A <sub>O</sub> )		0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99	<b>0,99</b>
Najmanja prosječna udaljenost (M)		0,17	0,23	0,1	0,02	0,16	0,02	0,23	<b>0,14</b>
Broj brodova u trenutku Min(d <sub>AV</sub> )		2	2	2	2	2	2	2	<b>2</b>
min (A <sub>SD</sub> )		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	<b>0,8</b>
Broj brodova (d <sub>CPA</sub> <d <sub>CPAL</sub> )		12	10	10	6	7	6	12	<b>9</b>
Istovremeni broj parova brodova (d <sub>CPA</sub> <d <sub>CPAL</sub> )		2	2	2	1	3	1	3	<b>2</b>
Vremenska zauzetost plovnog područja za d <sub>CPA</sub> <d <sub>CPAL</sub> (%)	Bez parova brod.	95,71	97,23	96,12	98,69	96,71	95,71	98,69	<b>96,89</b>
	1 par brodova	4,06	2,35	3,5	1,31	2,53	1,31	4,06	<b>2,75</b>
	2 para brodova	0,23	0,42	0,37	0	0,69	0	0,69	<b>0,34</b>
	3 para brodova	0	0	0	0	0,57	0	0,57	<b>0,11</b>
Vremenska zauzetost za d <sub>CPA</sub> <d <sub>CPAL</sub> (sati)		13,1	8,8	8,03	5,07	7,83	5,07	8,80	<b>8,57</b>
Vremenska zauzetost za d <sub>CPA</sub> <d <sub>CPAL</sub> (% ukupnog vremena simulacije)		4,29	2,77	3,87	1,31	3,29	1,31	4,29	<b>3,11</b>
min (A <sub>CPA</sub> )		0,96	0,96	0,96	0,99	0,92	0,92	0,99	<b>0,96</b>
Brodovi u području povećane opasnosti		12	10	10	6	7	6	12	<b>9</b>
v <sub>r</sub> (čv) – min (A <sub>CD</sub> )		14,57	15,11	13,49	1,63	15,65	1,63	15,65	<b>12,09</b>
min (d <sub>CPA</sub> )		0,12	0,17	0,05	0,01	0,1	0,01	0,17	<b>0,09</b>
min (A <sub>CD</sub> )		0,48	0,54	0,16	0,27	0,46	0,16	0,54	<b>0,38</b>
min (W <sub>S</sub> )		0,36	0,41	0,12	0,21	0,33	0,12	0,41	<b>0,29</b>

<sup>42</sup> Reprezentativna replikacija.

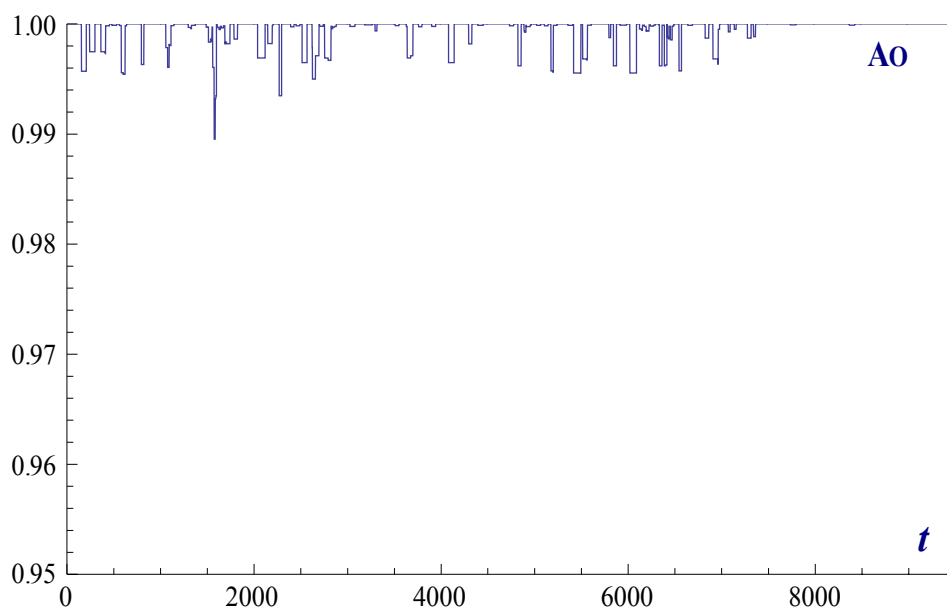


Slika 35 Simulirane putanje kretanja brodova u plovnom području

**Funkcija prostornog zauzeća** - Najveći broj brodova u istovremenoj plovidbi plovnom područjem je 3. Ukupno vrijeme simulacije iznosi 318,16 sati. Brodovi su plovili plovnom područjem prema sljedećoj razdiobi:

Tablica 19 Vremenska razdioba plovidbe brodova u plovnom području

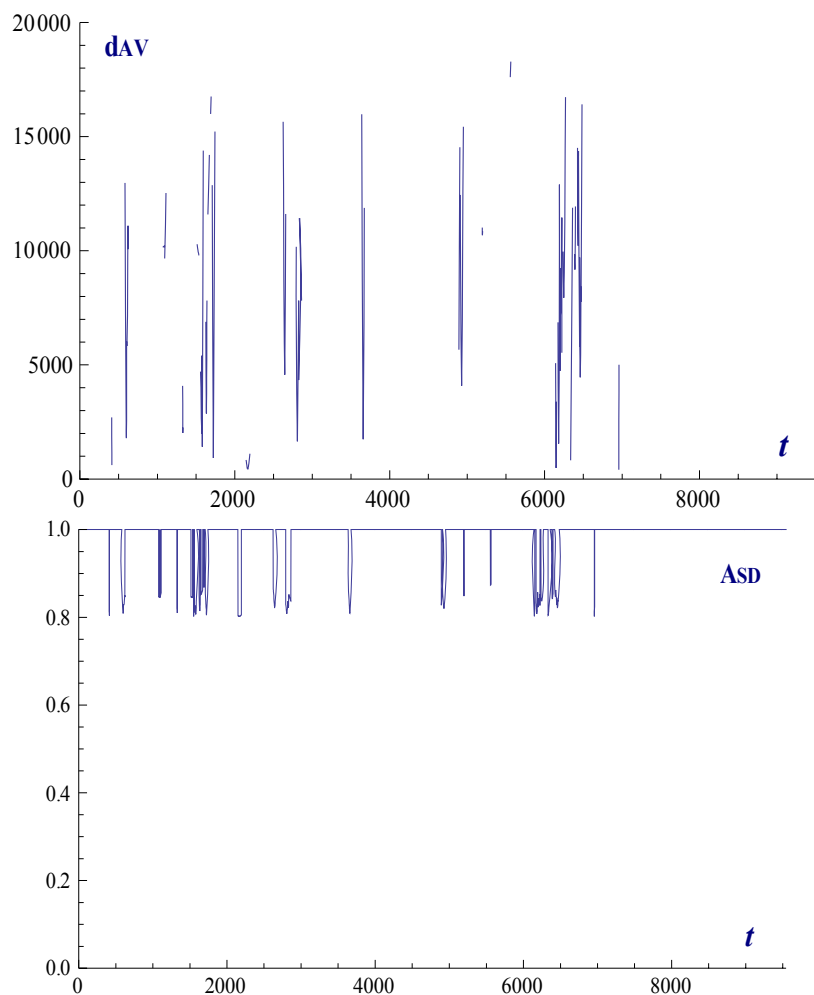
Broj brodova	Vrijeme (%)	Sati
0	65,33	207,87
1	27,53	87,60
2	5,81	18,73
3	1,25	3,97



Slika 36 Funkcija prostornog zauzeća

Najveće prostorno zauzeće plovnog područja iznosi 0,65%, a prosječno zauzeće 0,14 %. Najmanja vrijednost funkcije prostornog zauzeća iznosi 0,99.

**Funkcija prostorne razdiobe** – Najmanja prosječna udaljenost između brodova u određenom trenutku simulacije iznosi 0,23 M što se dogodilo za vrijeme plovidbe 2 broda plovnim područjem. U tom trenutku vrijednost funkcije je najmanja, i iznosila je 0,80.

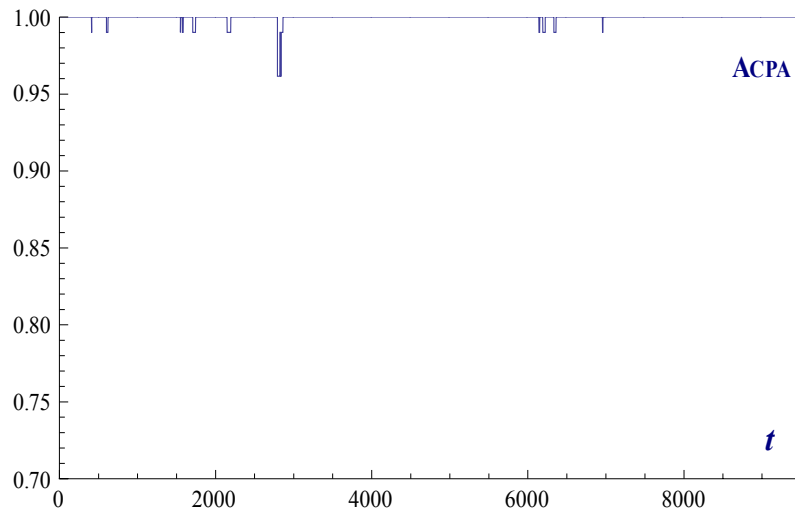


**Slika 37 Funkcija prostornog zauzeća i vremenska razdioba prosječnih međusobnih udaljenosti brodova**

**Funkcija međusobnih odnosa brodova** – Najveći broj parova brodova u plovidbi za koje vrijedi  $d_{CPA} < d_{CPAL}$  je 2 para, dok je u promatranom vremenu ukupno plovilo 10 parova brodova.

**Tablica 20 Vremenska razdioba parova brodova koji zadovoljavaju uvjet  $d_{CPA} < d_{CPAL}$ .**

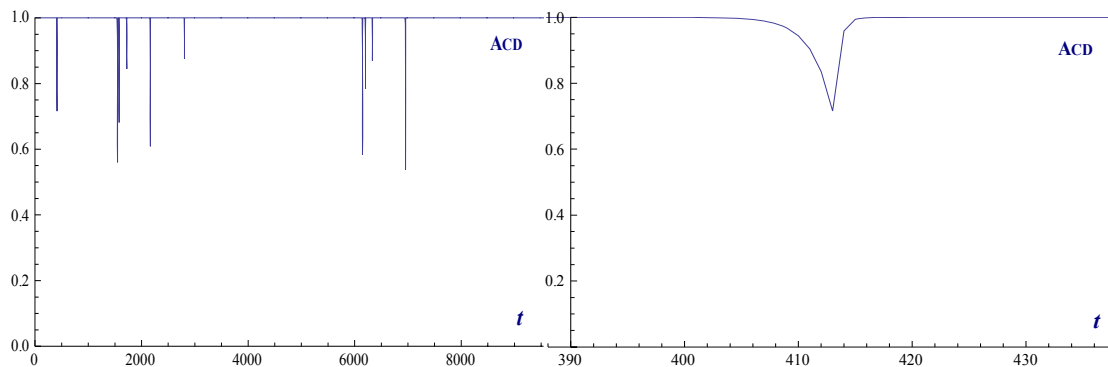
Broj brodova	Vrijeme (%)	Sati
0	97,23	8,56
1	2,35	0,21
2	0,42	0,04
	<b>Ukupno</b>	<b>8,8</b>



Slika 38 Funkcija prostornog zauzeća

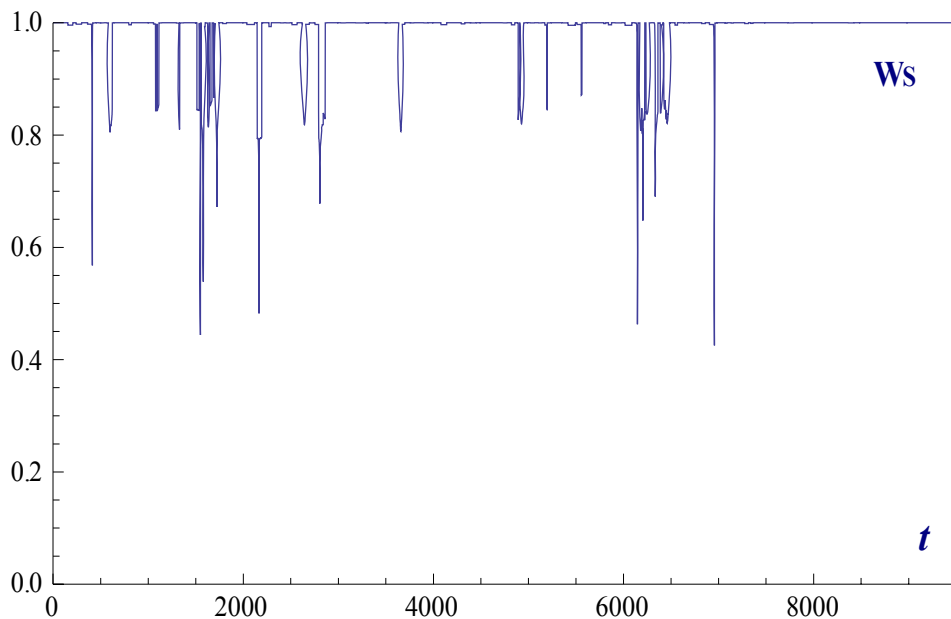
Ukupno vrijeme u kojem su ti brodovi plovili iznosilo je 8,8 sati, odnosno 2,77 % ukupnog vremena. Najmanja vrijednost funkcije iznosi 0,96.

**Funkcija povećane opasnosti** – Broj parova brodova koji su plovili u području povećane opasnosti iznosi 10. Najmanja vrijednost  $d_{CPA}$  iznosi 0,17 M, a vrijednost funkcije u tom trenutku 0,54. Relativna brzina između para brodova u trenutku najmanje vrijednosti funkcije iznosi 15,11 čvorova.



Slika 39 Funkcija prostornog zauzeća i prvi minimum funkcije

Na temelju vrijednosti pojedinačnih funkcija određena je funkcija sigurnosti plovidbe s najmanjom vrijednosti  $W_S=0,41$ .



Slika 40 Funkcija sigurnosti plovidbe

Rezultati simulacije mogu se usporediti sa stvarnim stanjem pomorskog prometa u Riječkom zaljevu. Kako ne postoji kontinuirano prikupljanje podataka o prometu usporedbu je teško realno izvršiti. Jedini podaci o pomorskom prometu u Riječkom zaljevu koji su kontinuirano prikupljeni su podaci o kretanju brodova tijekom mjeseca rujna 2008. godine. Podaci su prikupljeni korištenjem AIS<sup>43</sup> prijemnika u Nacionalnoj središnjoj za usklađivanje traganja i spašavanja u Rijeci.

Prema navedenim podacima na području Riječkog zaljeva dogodilo se jedno mimoilaženje brodova pri kojem je  $d_{CPA} < 1M$ , odnosno 5 mimoilaženja s  $d_{CPA} < 5 M$ . Navedeni rezultati ukazuju da je pojava povećane opasnosti bio izuzetno rijedak događaj.

Veći broj pojava povećane opasnosti u simulaciji može se objasniti činjenicom da simulirani promet brodova uključuje sve brodove koji plove Riječkim zaljevom, uključujući i one koji nisu opremljeni AIS uređajem. Dodatno, pretpostavljeni promet ne slijedi u potpunosti pretpostavljenu Poissonovu razdiobu, a nisu uzeti ni stvarni podaci o razdiobi dolazaka brodova, već je pretpostavljena eksponencijalna razdioba dolazaka.

<sup>43</sup> Sustav za automatsku identifikaciju brodova (*Automatic Identification System*).



## 7. ZAKLJUČAK

U doktorskoj disertaciji sustavno je obrađen i istražen pomorsko-prometni tok na prilaznim plovnim putovima. Istraživanjem je opisan maritimni ustroj pomorsko-prometnog toka s ciljem kvantificiranja sigurnosti plovidbe. Maritimni ustroj određen je konceptualnim modelom ustroja pomorsko-prometnog toka u kojem se sigurnost plovidbe opisuje funkcijom sigurnosti.

Poznavanjem mjera, uvjeta i aktivnosti kojima je opisana sigurnost plovidbe definiran je kompleksan postupak kvantificiranja sigurnosti plovidbe koji ovisi o obilježjima pomorske plovidbe i organizacijsko-sigurnosnom ustroju pomorsko-prometnog toka.

Funkcija sigurnosti definirana je parametrima koji se odnose na opću sigurnost plovidbe i sigurnost plovidbe pri povećanoj opasnosti, odnosno pri plovidbi brodova čiji međusobni odnos ukazuje postojanje sudarne opasnosti. Na ovaj način procjena prometnog stanja određena je za sve uvjete plovidbe. Parametri funkcije opće sigurnosti određuju prostorno zauzeće plovnog područja, prostornu razdiobu brodova te međusobni odnos brodova, dok parametri funkcije sigurnosti povećane opasnosti definiraju stanje povećane opasnosti na plovnom putu.

S obzirom da sigurnost plovidbe ovisi o kombinaciji većeg broja mjerljivih čimbenika, kao i o subjektivnim mjerilima, vrijednost funkcije u određenom trenutku dodatno je korigirana koeficijentima sigurnosti. Vrijednost funkcije sigurnosti određena je promjenom vrijednosti koeficijenata i prilagođavanjem njihovih vrijednosti karakteristikama plovnog područja i obilježjima pomorskog prometa. Time je omogućena veća vjerodostojnost i kvaliteta rezultata funkcije te primjena funkcije i cjelokupnog modela na bilo koje plovno područje. Uz iste vrijednosti koeficijenata sigurnosti, modelom maritimnog ustroja pomorsko-prometnog toka moguća je usporedba razine sigurnosti plovidbe na raznim plovnim područjima.

Opisani dinamički simulacijski model prikazuje vrijednosti funkcije sigurnosti u realnom vremenu. Analizom rezultata simulacije omogućeno je utvrđivanje optimalnog maritimnog ustroja pomorskog prometa sa stajališta sigurnosti plovidbe uzimajući u obzir unaprijed zadane kriterije optimalnosti i zadane uvjete sigurnosti plovidbe. Poznavanjem optimalnog maritimnog ustroja stvaraju se preduvjeti za povećanje sigurnosti plovidbe promjenom obilježja pomorsko-prometnog toka.

Model se može koristiti kao objektivno mjerilo stanja pomorskog prometa na plovnom području pri planiranju uspostava mjera i aktivnosti s ciljem poboljšanja sigurnosti plovidbe. Osnovna praktična primjena rezultata predstavlja korištenje razvijenog simulacijskog modela u VTS službama. Mogućnost korištenja može biti u realnom vremenu radi prikupljanja podataka o potrebi djelovanja operatera u trenutku povećane opasnosti ili radi utvrđivanja prometnog opterećenja na plovnom području u cilju dimenzioniranja ljudskih i materijalnih resursa VTS službe. Dodatno, model se može koristiti za simuliranje razine sigurnosti plovidbe pri planiranom povećanju pomorskog prometa u cilju definiranja odgovarajućih mjera.

Primjena predloženog modela u praksi neupitno bi pozitivno utjecala na sustav nadzora i upravljanja pomorskom plovidbom, a dodatno bi ga mogle koristiti državne službe zadužene za pomorsku sigurnost kao i lučki centri upravljanja pomorskim prometom, te privatni korisnici kao što su peljarska društva, službe tegljenja i drugi.

Daljnje istraživanje predstavljenih rezultata rada može obuhvatiti definiranje kriterija određivanja vrijednosti koeficijenata sigurnosti za odgovarajuća obilježja pomorsko-prometnog toka. Također, moguće je utvrditi optimalne vrijednosti razina sigurnosti plovidbe s obzirom na pretpostavljena obilježja pomorskog prometa što bi omogućilo kvalitetniju usporedbu rezultata modela. Dodatno, rezultati ovog istraživanja čine dobar temelj i daju smjernice za daljnja istraživanja kvantificiranja sigurnosti plovidbe.

S obzirom na sve veće zahtjeve međunarodne pomorske zajednice i stremljenje prema kontinuiranom povećanju sigurnosti plovidbe, predstavljeni model maritimnog ustroja pomorsko-prometnog toka predstavlja praktičan doprinos unapređenju sigurnosti plovidbe i efikasnosti pomorskog prometa.

## LITERATURA

### Knjige

- [1] Astle, W. E., *The Safe Port*, London, Fairplay publications Ltd, 1986.
- [2] Biličić, M., *Metodologija znanstvenoistraživačkog rada*, autorizirana predavanja, Rijeka, Pomorski fakultet Rijeka, 1997.
- [3] Bowditch, N., *The American Practical Navigator - An Epitome of Navigation*, 2002 Bicentennial ed., Washington, National Imagery and Mapping Agency, 2002.
- [4] Cahill, Richard A., *Collisions and their Causes*, London, Nautical Institute, 3<sup>rd</sup> ed., 2002.
- [5] Cahill, Richard A., *Strandings and their Causes*, London Nautical Institute, 6<sup>th</sup> ed., 2002.
- [6] Henscher, David A., Kenneth J. Button, *Handbook of Transport Modelling*, Oxford, Pergamon, An Imprint of Elsevier Science, 2000.
- [7] Dolman, Anthony J., Jan Van Ettinger, *Ports as Nodal Points in a Global Transport System*, New York, Pergamon Press Ltd., 1992.
- [8] Dundović, Č., *Pomorski sustav i pomorska politika*, Rijeka, Pomorski fakultet u Rijeci, 2003.
- [9] Gelo, Branko, *Opća i prometna meteorologija*, Zagreb, Školska knjiga, 1994.
- [10] Manning, George C., *Teorija i tehnika projektiranja broda*, Zagreb, Tehnička knjiga, 1967.
- [11] Justijanović J., *Sferna trigonometrija*, Zagreb 1956.
- [12] Kesić, Blanka, *Ekonomika luka*, Rijeka, Pomorski fakultet u Rijeci, 2003.
- [13] Milošević, Š. M., *Osnove teorije broda 1*, Zagreb, Školska knjiga, 1981.
- [14] Munro-Smith, R., *Merchant Ship Types*, London, Marine Media Management Ltd., 1975.
- [15] *Managing Risk in Shipping - A Practical Guide*, London, Nautical Institute, 1999.
- [16] Ortuzar, Juan de Dios, Luis G. Willumsen, *Modelling Transport*, 4<sup>th</sup> ed., West Sussex, John Wiley and Sons, 2011.
- [17] Alderton M. Patrick, *Port Management and Operations*, London, Lloyd's Practical Shipping Guides, 1999.
- [18] Radulić, Ratko, *Manevriranje brodom*, Zagreb, Profil, 2001.
- [19] Rawson, K. J., E. C. Tupper, *Basic Ship Theory (Hydrostatics and Strength)*, Volume 1, 5<sup>th</sup> ed., Oxford, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [20] Rawson, K. J., E. C. Tupper, *Basic Ship Theory (Ship Dynamics and Design)*, Volume 2, 5<sup>th</sup> ed., Oxford, Butterworth-Heinemann, 2001.

- [21] Sciutto, G., C. A. Brebbia, *Maritime Engineering and Ports*, Boston, WIT Press, Computational Mechanics Publications, 1998.
- [22] Swift, A. J., *Bridge Team Management - A Practical Guide*, London, The Nautical Institute, 2000.
- [23] Thoresen, C. A., *Port Design, Guidelines Recommendations*, Trondheim, Tapir Publishers, 1988.
- [24] Thoresen, C. A., *Port Designer's Handbook - Recommendations and Guidelines*, London, Thomas Telford, 2003.
- [25] Tomić, Ivica, *Prometna tehnologija luka*, Zagreb, Centar prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, 1986.
- [26] Zec, Damir, *Planiranje pomorske plovidbe*, Rijeka, Pomorski fakultet u Rijeci, 1997.
- [27] Zec, Damir, *Sigurnost na moru*, Rijeka, Pomorski fakultet u Rijeci, 2001.
- [28] Zečević, T., J. Crnković, *Matematički modeli i metode simulacije*, Rijeka, Fakultet za pomorstvo i saobraćaj, 1987.

#### **Članci, studije, elaborati, priručnici**

- [29] Briggs, J. Michael, *Ship Squat Predictions for Ship/Tow Simulator*, Us Army Corps of Engineers, Coastal and Hydraulics Engineering Technical Notes (CHETN), 2006.
- [30] Dragović, Branislav, Park Nam Kyu, Zoran Radmilović, *Ship-Berth Link Performance Evaluation - Simulation and Analytical Approaches*, *Maritime Policy & Management*, 33 (2006), 3, str. 281-299.
- [31] Filipowicz, W., *Vessel Traffic Control Problems*, *The Journal of Navigation* 57 (2004), 1, str. 15-24.
- [32] Fujii, Y., K. Tanaka, *Traffic Capacity*, *The Journal of Navigation*, 24 (1971), 4, str. 543–552.
- [33] Gardner Bernard M., Peter B. Marlow, *The Marine Electronic Highway in the Straits of Malacca and Singapore - An Assessment of Costs and Key Benefits*, *Maritime Policy & Management*, 33 (2006), 3, str. 187-202.
- [34] Geert, F. Thiers, K. Janssens Gerrit, *A Port Simulation Model as a Permanent Decision Instrument*, *Simulation* 71 (1998), 2, str. 117-125.
- [35] Goodwin, E. M., *A Statistical Study of Ship Domain*, *The Journal of Navigation*, 28 (1975), 3, str. 328–344.
- [36] Gugić, Danko, Marta Pedišić Buča, *Analiza metoda određivanja otpora trgovačkih brodova*, XVI Symposium SORTA, Zagreb, 2004.
- [37] Hilgert, Helmut, Michael Baldauf, *A Common Risk Model for the Assessment of Encounter Situations on Board Ships*, *Deutsche Hydrographische Zeitschrift, German Journal of Hydrography*, 49 (1997), 4.

- [38] Komadina, Pavao, Lovro Maglić, *Influence Factors and Methods for Determining VTS Operator's Workload*, Pomorstvo, Scientific Journal of Maritime Research, 25 (2011), 2, str. 343-369.
- [39] Legendre, Nádeník Z., *Theorem on Spherical Triangles*, Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography, 50 (2004), Publication No. 36., str. 41-48.
- [40] Pachakis, Dimitris, Anne S. Kiremidjian, *Ship Traffic Modeling Methodology for Ports*, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 129 (2003), 5, str. 193-202.
- [41] Pietrzykowski, Zbigniew, Janusz Uriasz, *The Ship Domain – A Criterion of Navigational Safety Assessment in an Open Sea Area*, The Journal of Navigation, 62 (2009), 1, str. 93–108.
- [42] Rudolf, Davorin, *Plovni putovi i plovidbeni putovi na moru, prema Konvenciji UN-a o pravu mora 1982.*, Pomorski zbornik, 23 (1985), str. 355-365.
- [43] Tu-Cheng, Kuo, et al., *A Case Study of Inter-Arrival Time Distributions of Container Ships*, Journal of Marine Science and Technology, 14 (2006), 3, str. 155-164.
- [44] Veenstra, Albert W., Marcel W. Ludema, *The Relationship Between Design and Economic Performance of Ships*, Maritime Policy & Management, 33, (2006), 2, str. 159-171.
- [45] Wang, Ning, *An Intelligent Spatial Collision Risk Based on the Quaternion Ship Domain*, The Journal of Navigation, 63 (2010), 4, str. 733-749.
- [46] Wing-Cheong, Ng, Wong Ching-Sze, *Evaluating the Impact of Vessel-Traffic Interference on Container Terminal Capacity*, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 132 (2006), 2, str. 76-82.
- [47] Yeo, Gi-Tae, Michael Roe, Soak Sang-Moon, *Evaluation of the Marine Traffic Congestion of North Harbor in Busan Port*, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 133 (2007), 2, str. 87-93.
- [48] Yoshimura, Y., *Studies on the Stopping Ability of a Maneuvering Standard*, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 176 (1994), str. 259-265.
- [49] Frančić, V., S. Kos, *Strukturna analiza tehnoloških procesa u pomorskoj površinskoj plovidbi*, Pomorstvo, 18 (2004), str. 191-208.
- [50] G. J. van de Ruit, M. van Schuylenburg, J. A. Ottjes, *Simulation of Shipping Traffic Flow in the Maasvlakte Port Area of Rotterdam*, Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM 1995), June 1995, Prague.
- [51] Zhu, X., H. Xu, J. Lin, *Domain and its Model Based on Neural Networks*, The Journal of Navigation, 103 (2001), str. 54-97.
- [52] Zhao, J., Z. Wu, F. Wang, *Comments on Ship Domains*, The Journal of Navigation, 46 (1993), str. 422–437.

- [53] Zeng, X. M., *Evolution of the safe path for ship navigation*, Applied Artificial Intelligence, 17 (2003), str. 87–104.
- [54] Zhao, J., et. al., *DCPA Simulation Model for Automatic Collision Avoidance Decision Making Systems Using Fuzzy Sets*, IEEE Oceans, 2 (1994), str. 244-249.

### **Konvencije i propisi**

- [55] *British Standard Code of Practice for Maritime Structures*, Part 1. General Criteria, British Standards Institution.
- [56] *IMO MSC/Circ.953, Reports on Marine Casualties and Incidents*, Revised harmonized reporting procedures, Reports required under SOLAS regulation I/21 and MARPOL 73/78 Articles 8 and 12.
- [57] *IMO MEPC/Circ.372, Reports on Marine Casualties and Incidents*, Revised harmonized reporting procedures, Reports required under SOLAS regulation I/21 and MARPOL 73/78 articles 8 and 12.
- [58] *IMO MEPC 37/22*, Paragraph 5.8.
- [59] *STCW – The International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers 1978/1995 (including 2010 amendments)*, London, International Maritime Organization, 2010.
- [60] *International Convention on Tonnage Measurement of Ships 1969*, London, International Maritime Organization, 1969.
- [61] *United Nations Convention on the Law of the Sea 1982*, The Ratification of Maritime Convention, Part II.1 Public International Law, Lloyd's of London Press.
- [62] *SOLAS – Consolidated Edition 2010, Consolidated text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, and its Protocol of 1988: Articles, Annexes and Certificates*, London, International Maritime Organization, 2010.
- [63] *Pomorski zakonik*, Narodne novine 181/04 i njegove izmjene i dopune, NN 76/07, NN 146/08 i NN 61/2011.
- [64] *VTMIS Glossary of Terms*, Annex of the Concerted Action VTMIS, 1998.
- [65] *Approach Channels – A Guide for Design*, Final Report of the Joint PIANC-IAPH Working group II-30 in Cooperation with IMPA and IALA, PIANC-IAPH, 1997.
- [66] *Rezolucija Skupštine IMO-a A.744(18), Guidelines on the Enhanced Programme of Inspections During Surveys of Bulk Carrier*, 1993.
- [67] *Rezolucija Skupštine IMO-a A.751(18), Interim Standards for Ship Maneuverability*, 1993.
- [68] *Rezolucija Skupštine IMO-a A.857(20), Guidelines for Vessel Traffic Services*, 1997.

- [69] *Ship's Routeing*, London, International Maritime Organization, 2010.
- [70] *Cirkular odbora za pomorsku sigurnost MSC/Circ.1053, Explanatory Notes to the Standards for Ship Maneuverability*, London, 2002.
- [71] *Rezolucija Odbora za pomorsku sigurnost MSC.137(76), Standards for Ship Maneuverability*, London, 2002.
- [72] \*\*\**IALA Vessel Traffic Services Manual*, 4<sup>th</sup> ed., 2008.
- [73] Bole, Alan, Bill Dineley, Alan Wall, *ARPA and RADAR Manual*, 2<sup>nd</sup> ed., Oxford, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [74] *Convention on the International Regulations for Preventing Collision at Sea (COLREGS)*, London, International Maritime Organization, 1972.
- [75] \*\*\* *Formal Safety Assessment*, Consolidated Text of the Guidelines Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-making Process (MSC/Circ.1023–MEPC/Circ.392), London, 2007.

**Ostali izvori (enciklopedije, leksikoni, doktorski radovi i drugi izvori)**

- [76] Cvitanić, Damir, *Teorija prometnog toka*, predavanja na poslijediplomskom studiju, Split, Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet.
- [77] Čarapić, Ljubivoje, *Luka kao sistem i modeliranje luka*, doktorska disertacija, Beograd, Lj. Čarapić, 1963.
- [78] Grupa autora, *Studija sigurnosti plovidbe i opterećenja plovnog puta u Gruškom zaljevu*, Rijeka, Pomorski fakultet u Rijeci, voditelj projekta dr. sc. Damir Zec, 2008.
- [79] Grupa autora, *Sigurnost plovidbe tankera jadranskim morem na plovnom putu do luke Omišalj*, Rijeka, Pomorski fakultet u Rijeci, voditelj projekta dr.sc.Damir Zec, 2004.
- [80] Grupa autora, *Mjere maritimne sigurnosti na kontejnerskom terminalu na Zagrebačkoj obali*, Rijeka, Pomorski fakultet u Rijeci, voditelj projekta dr. sc. Pavao Komadina, 2010.
- [81] *Pomorska enciklopedija*, svezak 8, Zagreb, Jugoslavenski leksikografski zavod "Miroslav Krleža", 1990.
- [82] *Pomorski leksikon*, Zagreb, Jugoslavenski leksikografski zavod "Miroslav Krleža", 1990.
- [83] *Federal Radio Navigation Plan 1999.*, Sjedinjene Američke Države.
- [84] Mohović, Robert, *Model manevriranja brodom u ograničenim plovnim područjima u funkciji sigurnosti i zaštite okoliša*, doktorska disertacija, Rijeka, Robert Mohović, 2002.
- [85] *Heeling Accident on M/V "Crown Princess" - Atlantic Ocean off Port Canaveral*, Washington, National Transportation Safety Board, Marine Accident Report, 2006.

- [86] *World Fleet Statistics*, London, Lloyd's Register - Fairplay Ltd. Redhill, 1985.-2007.
- [87] *IALA Guideline No. 1070 on VTS Role in Managing Restricted or Limited Access Areas*, Edition 1, December 2009.
- [88] *Transas Marine Simulator - Maneuvering Booklet - Ship's Mathematical Models*, St. Petersburg, 2006.
- [89] [www.superyachts.com](http://www.superyachts.com)



## POPIS SLIKA

Slika 1	Zalet broda .....	12
Slika 2	Osnovni elementi kruga okreta broda .....	14
Slika 3	Opća struktura podjele brodova .....	19
Slika 4	Osnovni elementi sinusoidalnog vala .....	35
Slika 5	Organizacijska struktura sustava pomorsko-prometnog toka .....	37
Slika 6	Odnosi između glavnih parametara pomorsko-prometnog toka .....	43
Slika 7	Sudarni parametri i kretanje brodova .....	45
Slika 8	Usluge i funkcije VTS sustava .....	47
Slika 9	Pojedine mjere usmjerene plovidbe .....	50
Slika 10	Poissonova funkcija vjerojatnosti za različite vrijednosti $\lambda$ .....	54
Slika 11	Opis maritimnog ustroja pomorskog prometa na prilaznim plovnim putovima pomoću funkcije sigurnosti plovidbe .....	59
Slika 12	Domena broda u funkciji prostornog zauzeća plovidbenog područja .....	63
Slika 13	Funkcija prostornog zauzeća u ovisnosti o broju brodova i brzini .....	65
Slika 14	Omjer funkcije prostornog zauzeća za različite brzine brodova u ovisnosti o broju brodova uz pretpostavljene koeficijente .....	66
Slika 15	Funkcija prostorne razdiobe ovisno o broju brodova ( $i \in \mathbb{N}$ ) .....	68
Slika 16	Položaj brodova o kojima ovisi vrijednost funkcije prostorne razdiobe .....	69
Slika 17	Funkcija prostorne razdiobe za različite vrijednosti koeficijenta utjecaja prostorne razdiobe ( $\alpha_{AV} = const, n = const$ ) .....	69
Slika 18	Funkcija međusobnih odnosa brodova ( $A_{CPA}$ ) za različite vrijednosti koeficijenta najmanje udaljenosti mimoilaženja .....	72
Slika 19	Funkcija povećane opasnosti .....	75
Slika 20	Utjecaj relativne brzine na funkciju povećane opasnosti uz pretpostavljeni konstantni koeficijent korekcije relativne brzine .....	76
Slika 21	Područje utjecaja predloženih funkcija na sigurnost plovidbe .....	77
Slika 22	Zalet broda u ovisnosti o vrsti broda, duljini, istisnini i brzini broda ( $D$ u 000 tona) .....	79
Slika 23	Vrijednosti funkcije prostorne razdiobe u zavisnosti od granične vrijednosti najmanje udaljenosti mimoilaženja .....	82
Slika 24	Funkcija prostorne razdiobe ovisno o vrijednostima koeficijenata prostorne razdiobe i ulaznim parametrima .....	83
Slika 25	Plovidba brodova plovnim područjem .....	88

Slika 26	Funkcija prostornog zauzeća s vremenima plovidbe brodova.....	88
Slika 27	Funkcija prostornog zauzeća za različite ulazne parametre.....	90
Slika 28	Međusobna udaljenost brodova i funkcija prostorne razdiobe ( $n=2$ i $n=4$ ).....	91
Slika 29	Funkcija prostornog zauzeća za različite vrijednosti koeficijenta .....	92
Slika 30	Funkcija međusobnih odnosa za različite vrijednosti $k_{CPA}$ .....	93
Slika 31	Funkcija povećane opasnosti od sudara za različite ulazne parametre .....	94
Slika 32	Usporedba funkcije povećane opasnosti i funkcije opće opasnosti ( $n=4$ i $d_{CPAL}=IM$ ).....	95
Slika 33	Promatrano plovno područje.....	97
Slika 34	Usporedba dolazaka brodova .....	98
Slika 35	Simulirane putanje kretanja brodova u plovnom području.....	102
Slika 36	Funkcija prostornog zauzeća.....	102
Slika 37	Funkcija prostornog zauzeća i vremenska razdioba prosječnih međusobnih udaljenosti brodova .....	103
Slika 38	Funkcija prostornog zauzeća.....	104
Slika 39	Funkcija prostornog zauzeća i minimum funkcije.....	104
Slika 40	Funkcija sigurnosti plovidbe.....	105

## POPIS TABLICA

Tablica 1	Odnosi duljine između okomica te manevarskih obilježja i veličine broda [26].....	15
Tablica 2	Regresijski izrazi odnosa porivne snage i brzine broda [36].....	16
Tablica 3	Strukturalna podjela teretnih i putničkih brodova .....	21
Tablica 4	Strukturalna podjela specijalnih i servisnih brodova te brodova za negospodarske djelatnosti .....	22
Tablica 5	Razdioba brodova svjetske trgovačke flote [86].....	24
Tablica 6	Usluge koje pruža VTMISS sustav .....	48
Tablica 7	Obilježja eksponencijalne razdiobe .....	55
Tablica 8	Obilježja trokutne razdiobe.....	56
Tablica 9	Opis sigurnosti plovidbe ovisno o plovidbenoj situaciji.....	58
Tablica 10	Vrijednost funkcije prostornog zauzeća za različite brzine brodova .....	66
Tablica 11	Vrijednosti funkcije međusobne udaljenosti brodova za različite ulazne parametre .....	73
Tablica 12	Veličine domene za karakteristične brodove ovisno o koeficijentima duljine i širine domene ( $\alpha_{LB} = 0,04$ ) .....	81
Tablica 13	Približne vrijednosti koeficijenta prostorne razdiobe za $A_{SD}(\bar{d} = d_{CPAL}) = 0.8$ .....	83
Tablica 14	Približne udaljenosti povećane koncentracije brodova u ovisnosti o koeficijentima prosječne udaljenosti brodova ( $n=10, \alpha_{SD}=0,3$ ) .....	84
Tablica 15	Vrijednosti koeficijenta korekcije za različite brzine ( $d_{CPAL}=2*d_{CPA}$ ) .....	86
Tablica 16	Pretpostavljena maritimna svojstva brodova .....	87
Tablica 17	Obilježja brodova.....	97
Tablica 18	Odabrani rezultati simulacije .....	101
Tablica 19	Vremenska razdioba plovidbe brodova u plovnom području .....	102
Tablica 20	Vremenska razdioba parova brodova koji zadovoljavaju uvjet $d_{CPA} < d_{CPAL}$ .....	103

## POPIS SIMBOLA

$A, B, C$	–	koeficijenti zaleta broda
$A_C$	–	bočna površina podvodnog dijela broda
$A_{CD}$	–	funkcija povećane opasnosti
$A_{CPA}$	–	funkcija međusobnog odnosa brodova
$A_{GW}$	–	funkcija opće sigurnosti
$A_O$	–	funkcija prostornog zauzeća plovidbenog područja
$A_{SD}$	–	funkcija prostorne razdiobe brodova
$A_{VREL}$	–	utjecaj relativne brzine
$A_W$	–	površina plovnog područja na plovnom putu
$A_{WS}$	–	površina broda izložena djelovanju vjetra
$A_X, A_Y$	–	koordinate broda u pravokutnom koordinatnom sustavu u trenutku $t$
$B$	–	širina broda
$BD'$	–	utjecaj širine i istisnine broda
$B_n$	–	normalizirana širina broda na plovnom putu
$BT$	–	bruto tonaža
$C_B$	–	blok koeficijent broda,
$C_C$	–	koeficijent otpora broda izloženog djelovanju morske struje
$c_f$	–	koeficijent protočnosti
$C_R$	–	stvarni kapacitet plovnog puta
$C_S$	–	kapacitet plovnog puta pri plovidbi sigurnosnom brzinom
$C_V$	–	bezdimenzionalni koeficijent lateralnog otpora broda
$C_W$	–	kapacitet plovnog puta
$D$	–	domena broda
$DA$	–	napredovanje broda
$d_{AV}$	–	prosječna udaljenost između svih brodova
$D_B$	–	širina domene
$D_C$	–	duljinu prijednog puta broda u području povećane opasnosti
$d_{CL}$	–	granična prosječna udaljenost između brodova
$d_{CPA}$	–	najmanja udaljenosti mimoilaženja brodova
$d_{CPAL}$	–	vrijeme do najmanje udaljenosti mimoilaženja brodova
$D_L$	–	duljina domene
$D_M$	–	dubina mora
$D_{MIN}$	–	najmanja domena brodova
$D_n$	–	normalizirana istisnina broda na plovnom putu
$D_S$	–	istisnina broda

$DT$	–	bočni pomak broda
$D_W$	–	duljina privjetrišta
$F_C$	–	sila morske struje
$F_W$	–	sila vjetra
$g$	–	ubrzanje sile teže
$H$	–	visina broda
$H_{MAX}$	–	visina broda iznad vodene linije
$H_W$	–	visina vala
$H_{WMAX}$	–	najveća visina vala
$K$	–	kut između osi $x$ i vektora brzine
$k_{CPA(iCPA>0 \wedge dCPA \leq dCPAL)}$	–	broj udaljenosti između brodova
$k_{DCPA}$	–	korekcija najmanje udaljenosti mimoilaženja
$L$	–	duljina broda
$L_{BP}$	–	duljina između okomica
$LD'$	–	utjecaj duljine i istisnine broda,
$L_n$	–	normalizirana duljina broda na plovnom putu
$L_{OA}$	–	duljina preko svega
$L_W$	–	valna duljina
$m_{(CPA \leq CPAL \wedge dCPA \leq dCPAL)}$	–	broj međusobnih odnosa brodova
$n$	–	broj brodova
$N_M$	–	broj okretaja vijka pri manevarskoj brzini broda
$N_P$	–	broj okretaja vijka pri putnoj brzini broda
$n_S$	–	prosječni broj brodova
$n_s$	–	broj različitih vrsta brodova u plovidbi
$P_E$	–	efektivna porivna snaga
$q$	–	količina pomorskog prometa
$R_T$	–	ukupni otpor broda
$R_V$	–	omjer funkcije prostornog zauzeća
$SD$	–	slobodni zalet broda
$T$	–	gaz broda
$t_{CPA}$	–	granična vrijednosti najmanje udaljenosti mimoilaženja
$t_{CPAL}$	–	vrijeme do granične vrijednosti najmanje udaljenosti mimoilaženja
$TR$	–	zalet broda
$T_W$	–	period širenja vala
$v$	–	brzina broda
$v_{AV}$	–	srednja brzina kretanja brodova
$v_C$	–	brzina morske struje

$v_M$	–	manevarska brzina
$v_P$	–	putna brzina
$v_R$	–	relativna brzina između dva broda
$v_S$	–	sigurnosna brzina prometnog toka
$v_W$	–	brzina vjetra
$W$	–	širina plovnog puta
$W_S$	–	funkcija sigurnosti plovidbe
$x_0^A, x_0^B$	–	koordinate broda u pravokutnom koordinatnom sustavu u trenutku $t=0$
$\alpha_{\Delta t}$	–	koeficijent duljine domene
$\alpha_{AV}$	–	koeficijent prosječne udaljenosti
$\alpha_{CPA}$	–	koeficijent najmanje udaljenosti mimoilaženja
$\alpha_{LB}$	–	koeficijent dimenzije broda
$\alpha_{SD}$	–	koeficijent utjecaja prostorne razdiobe
$\alpha_{TCPA}$	–	koeficijent korekcije $t_{CPA}$ ( $t_{CPA} \geq 0$ )
$\alpha_{VR}$	–	koeficijent korekcije relativne brzine
$\beta_{\Delta t}$	–	koeficijent širine domene
$\beta_{TCPA}$	–	koeficijent korekcije $t_{CPA}$ , ( $t_{CPA} < 0$ )
$\gamma_R$	–	koeficijent najmanje udaljenosti mimoilaženja brodova
$\delta$	–	gustoća pomorskog prometa
$\delta_{MAX}$	–	najveća prihvatljiva gustoća prometa
$\Delta T$	–	dodatni zagažaj
$\rho_A$	–	gustoća zraka
$\rho_W$	–	gustoća morske vode u kojoj se nalazi brod
$\omega$	–	valna frekvencija

# PRILOZI

## PROGRAMSKI KOD SIMULACIJSKOG MODELA

```
1. n=49;
2. korak=2/60//N;
3. brojdana=7;
4. Print["ODABIR LUKE"]
5. (*f1=14.25;f2=14.52;la1=45.18;la2=45.32;*)
6. f1=5003.18;f2=5018.6112;la1=441.073;la2=462.380;
7. Print["RASPORED ULASKA"]
8. brbrodav=n/brojdana//N
9. listapomoc=Table[{p=RandomInteger[PoissonDistribution[brbrodav]],RandomReal[ExponentialDistribution[(1/(24/p))],p]},{i,1,brojdana}]
10. lista=Flatten[listapomoc][[All,2],1]
11. n=Length[lista]
12. Print["LUKA"]
13. luka=Table[If[RandomInteger[{1,100}]<=75,1,2],{n}]
14. l1n=Length@Select[luka,#==1&];l2n=n-l1n;
15. l1n=0; l2n=0;
16. For[l1n=0;l2n=0;i=1,i<=n,i++,If[luka[[i]]==1,++l1n,++l2n]];
17. Print["POLOŽAJ ULAZA BRODA"]
18. p=Table[{RandomReal[{443,444}],5003.18},{n}]
19. Print["BRZINA BRODOVA NA ULAZU VX,VY I V"]
20. brodBLDv=Table[If[luka[[i]]==1,
21. If[
RandomInteger[{1,100}]<=60,{RandomInteger[{12,25}],RandomInteger[{90,130}],RandomInteger[{4000,20000}],RandomInteger[{9,28}]},{RandomInteger[{20,40}],RandomInteger[{150,300}],RandomInteger[{40000,70000}],RandomInteger[{14,22}]},If[
RandomInteger[{1,100}]<=60,{RandomInteger[{12,18}],RandomInteger[{90,120}],RandomInteger[{4000,20000}],RandomInteger[{9,15}]},{RandomInteger[{32,47}],RandomInteger[{170,300}],RandomInteger[{40000,170000}],RandomInteger[{8,14}]},],{i,n}]
22. brodB=brodBLDv[[All,1]]
23. brodL=brodBLDv[[All,2]]
24. brodD=brodBLDv[[All,3]]
25. brodv=brodBLDv[[All,4]]
26. (kut=Table[If[luka[[i]]==1,If[RandomInteger[{1,100}]<=70,RandomReal[{29[Degree],35[Degree]}],RandomReal[{35[Degree],39[Degree]}]],If[RandomInteger[{1,100}]<=70,RandomReal[{63[Degree],65[Degree]}],RandomReal[{65[Degree],70[Degree]}]],{i,1,n}])180^[Pi]
27. {v,{vmodul2}}=Reap[Table[Sow[vv=brodv[[i]]*1.8523;{vv Sin[kut[[i]]],vv Cos[kut[[i]]]},{i,1,n}]]
28. vapsolutna=Sqrt@Total@(#^2)&/@v
29. vmodulev=vmodul2/1.852
30. vmodulms=vmodul2/3.6
31. lista[[1]]
32. tA=Reap[For[s=0;i=1,i<=Length[lista],i++,s+=lista[[i]];Sow[s]]][[2,1]]
33. tAm=tA*60
34. tA//TableForm;
35. g[i_,t_]:=p[[i]]+v[[i]] (t-tA[[i]])
```

```

36. prbrod=Table[g[i,t], {i,1,n}, {t,tA[[i]],tA[[i]]+2,korak}];
37. prbrod//TableForm;
38. b=Table[Append[p[[i]],prbrod[[i]], {i,1,n}];
39. ListPlot[prbrod,PlotRange->{{441.073,462.380},{5003.18,5018.611}}];
40. ListPlot[prbrod,PlotRange->{{441,462},{5003,5019}}]
41. Print["IZLAZAK - PODATAK"]
42. Clear[t]
43. podaci=Table[If[luka[[i]]==1,
44. tB=t/.Solve[g[i,t][[2]]==5018.611,t][[1]],
45. tB=t/.Solve[g[i,t][[1]]==462.380,t][[1]]];
46. {g[i,tB],tA[[i]],tB,i}, {i,1,n}
47. podacizavidjeti=Table[If[luka[[i]]==1,
48. tB=t/.Solve[g[i,t][[2]]==5018.611,t][[1]],
49. tB=t/.Solve[g[i,t][[1]]==462.380,t][[1]]];
50. {g[i,tB],tA[[i]],tB,tB-tA[[i]],vmodul2[[i]],luka[[i]],i}, {i,1,n}
51. brod[i_]:=Table[g[i,t], {t,podaci[[i,2]],podaci[[i,3]],korak}
52. Table[brod[i], {i,1,n}];
53. Print["BRZINA I POZICIJE IZLAZA"]
54. boravak=24;
55. eksponboravak=1/boravak//N;
56. tC=podaci[[All,3]]
57. boravak=RandomReal[ExponentialDistribution[eksponboravak],n]
58. tC=podaci[[All,3]]+boravak
59. pp=Table[If[luka[[i]]==1,If[RandomInteger[{1,100}]<=70,{RandomReal[{451.288,453.573}],5018.611},{RandomReal[{453.573,455.573}],5018.611}],If[RandomInteger[{1,100}]<=70,{462.380,RandomReal[{5009.643,5010.086}]}],{462.380,RandomReal[{5010.086,5012.086}]}]], {i,1,n}
60. vp=Table[kut=If[luka[[i]]==1,RandomReal[{209\Degree,215\Degree}],RandomReal[{246\Degree,252\Degree}]]; {vmodul2[[i]] Sin[kut],vmodul2[[i]] Cos[kut]}, {i,1,n}
61. v=Join[v,vp]
62. p=Join[p,pp]
63. tA=Join[tA,tC]
64. vapsolutna=Sqrt@Total@(#^2)&/@v
65. Print["POLOŽAJ BRODOVA U DRUGOM SMJERU"]
66. Clear[t]
67. podaci1=Table[tD=t/.Solve[g[i,t][[2]]==5003.18,t][[1]];
68. {g[i,tD],tC[[i-n]],tD,i}, {i,n+1,2n}
69. podaci=Join[podaci,podaci1]
70. shipexit=Table[g[i,t], {i,1,n}, {t,tC[[1]],Max[podaci[[All,3]]],0.5}]/TableForm;
71. brodzil[i_]:=Table[g[i,t], {t,podaci[[i,2]],podaci[[i,3]],korak}
72. bx=Table[If[t>podaci[[i,2]]&& t<podaci[[i,3]],g[i,t],Null], {i,1,2n}, {t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}];
73. indbrod=Table[tren[t], {t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}
74. brojkoraka=Length[indbrod]
75. Max[podaci[[All,3]]]
76. Prepend[bx,Table[i, {i,1,brojkoraka}]]/TableForm;
77. Prepend[bx,Table[t, {t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}]]/TableForm;
78. bxprint=Table[If[t>podaci[[i,2]]&& t<podaci[[i,3]],g[i,t],g[i,t]], {i,1,2n}, {t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}];

```



```

79. ListPlot[bxprint,PlotRange->{{441.073,462.380},{5003.18,5018.611}}]
80. Print["DIMENZIJE BRODA - KOEFICIJENT D"]
81. Clear[t]
82. aLB=0.04;aDT=7.4;bDT=0.9;
83. Ln=150;Bn=20;Dn=30000;
84. Print["PRODULJENJE I PROŠIRENJE"]
85. domstat=aLB*brodL*brodB
86. domstatPovrsina=Pi*domstat^2;
87. domprod=aDT*((brodL/Ln)+(brodD/Dn))*(vmodulms)^2
88. dompros=bDT*((brodB/Bn)+(brodD/Dn))*(vmodulms)^2
89. dom=[Pi]*(domstat+domprod)*(domstat+dompros)
90. dom2=dom~Join~dom
91. Print["DOMENA PO TRENUCIMA"]
92. tren[t_]:=Select[podaci,t<#[[3]] && t>#[[2]]&][[All,4]]
93. domenaAkt[t_]:=Total@Table[dom2[[i]],{i,tren[t]}]
94. Table[domenaAkt[t],{t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}];
95. tr=Table[tren[t],{t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}];
96. povrsina=(45.32-45.18)*60*1852*(14.52-14.25)*Cos[45.25\Degree]*60*1852
97. povrsinaM=(45.32-45.18)*60*(14.52-14.25)*Cos[45.25\Degree]*60
98. kdom=Table[(1-domenaAkt[t]/povrsina),{t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}];
99. b=Table[{t,Length[tren[t]]},{t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}];
100. Select[b,#[[1]]>=2&][[All,2]];
101. Select[b,#[[2]]>=2&][[All,1]];
102. Print["PODACI"]
103. maxbrbrodkoraci=Table[Length[tren[t]],{t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}];
104. Postotak=(Table[Length[maxbrod0=Select[Table[Length[tren[t]],{t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}],#==i&],{i,0,n}]/brojkoraka)*100/N
105. Vrijemesbrodovima=(Postotak/100)*brojkoraka/(60*(korak*60))
106. maxbrod=Max@Table[Length[tren[t]],{t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}];
107. (Mean[dom2]/povrsina)*100
108. DomMax=Max[dom2]/(1852*1852)
109. DomMaxPost=(Max[dom2]/povrsina)*100
110. kdomMin=Min[kdom]
111. For[i=1,i<=brojkoraka,i++,If[kdom[[i]]==kdomMin,trenutak=i,0]]
112. trenutak
113. ListLinePlot[kdom,PlotRange->{{0,brojkoraka},{0.95,1}}]
114. ListLinePlot[kdom,PlotRange->{{0,Length[kdom]},{0,1}}];
115. Print["UDALJENOST"]
116. Clear[t]
117. sveUdalj[t_]:=Flatten[Table[Sqrt@Total@((g[i,t]-g[j,t])^2),{i,tren[t]},{j,Complement[tren[t],Range[1,i]]}],1]1000
118. a=Table[sveUdalj[t],{t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}];
119. d[i_,j_,t_]:=Sqrt@Total@((g[i,t]-g[j,t])^2)1000
120. dav=Table[If[Length@#==0,[Infinity],Mean[#]]&@sveUdalj[t],{t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}];
121. ListLinePlot[{dav},PlotRange->{{-10,brojkoraka},{0,20000}}]
122. mdav=Table[If[Length@#==0,[Infinity],Min[#]]&@sveUdalj[t],{t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak}];
123. For[i=2,i<=Length[mdav],i++,If[mdav[[i]]<mdav[[i-1]],int=i,0]]

```

```

124. int;
125. ksd=0.2;kav=0.0012;
126. kasd=1-0.2E^(-dav*n^(-1))*kav)
127. Length[kasd];
128. Print["PODACI"]
129. Min[dav]/1852
130. For[i=1,i<=brojkoraka,i++,If[dav[[i]]==Min[dav],trenutak1=i,0]]
131. trenutak1
132. brbrodtrenutak1=maxbrbrodkoraci[[trenutak1]]
133. kasd[[trenutak1]]
134. ListLinePlot[kasd,PlotRange->{{0,brojkoraka},{0,1}}]
135. k=kdom*kasd;
136. ListLinePlot[k,PlotRange->{{0,brojkoraka},{0,1}}];
137. Clear[t]
138. Print["KOEFIJENT NAJMANJE UDALJENOSTI PROLASKA"]
139. dL[i_,j_]:=Round[If[v[[j]]==v[[i]],d[i,j,0],Sqrt@Total@((p[[j]]-v[[j]]podaci[[All,2]][[j]]-
p[[i]]+v[[i]]podaci[[All,2]][[i]]-(p[[j]]-v[[j]]podaci[[All,2]][[j]]-
p[[i]]+v[[i]]podaci[[All,2]][[i]]).(v[[j]]-v[[i]])/(v[[j]]-v[[i]]).(v[[j]]-v[[i]] (v[[j]]-
v[[i]])^2)*1000,0.00001]
140. a=Table[sveUdalj[t],{t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak};
141. sveMinUdalj[t_]:=Round[Flatten[Table[dL[i,j],{i,tren[t]},{j,Complement[tren[t],Range[1,i]]}],1
],0.000001];
142. w=Table[sveMinUdalj[t],{t,0,Max[podaci[[All,3]]],korak};
143. nbrod=Table[If[Length@#==0,Length[#]&@sveMinUdalj[t],{t,tA[[1]],Max[podaci[[All,3]]],
korak}];
144. dKriticna=926;
145. Clear[t]
146. tmin[i_,j_]:=If[v[[j]]==v[[i]],0,-((p[[j]]-v[[j]]podaci[[All,2]][[j]]-
p[[i]]+v[[i]]podaci[[All,2]][[i]]).(v[[j]]-v[[i]])/(v[[j]]-v[[i]]).(v[[j]]-v[[i]])]
147. kritudaljInd[t_]:=Select[Flatten[Table[{i,j},{i,tren[t]},{j,Complement[tren[t],Range[1,i]]}],1],d
L@@@#<=dKriticna&]
148. podaci
149. parovi=Select[Flatten[Table[{i,j},{i,1,2n},{j,i+1,2n}],1],(temp=tmin@@@)temp>podaci[[#[[1]]
,2]] &&temp<podaci[[#[[1]],3]]&&temp>podaci[[#[[2]],2]]&&temp<podaci[[#[[2]],3]]&]
150. parovid=Select[Flatten[Table[{i,j},{i,1,2n},{j,i+1,2n}],1],(temp=tmin@@@)temp>podaci[[#[[1]]
,2]]
&&temp<podaci[[#[[1]],3]]&&temp>podaci[[#[[2]],2]]&&temp<podaci[[#[[2]],3]]&&dL@@@#
<dKriticna&]
151. Print["TCPA"]
152. tcpa=tmin@@@parovi
153. tcpa=Round[((tmin@@@parovi)*60)]
154. tcpa=Round[((tmin@@@parovi)*60)]/60/N
155. Print["TCPAD"]
156. tcpad=tmin@@@parovid
157. Round[((tmin@@@parovid)*60)]
158. tcpad=Round[((tmin@@@parovid)*60)]/60/N
159. Print["CPA"]
160. cpa=dL@@@parovi
161. cpa=dL@@@parovid
162. brodsudar=Map[Select[#,(#<dKriticna&)]&,w,{1}];

```

```

163. Select[Flatten[w],#<dKriticna&];
164. ind=Table[kritudaljInd[t],{t,0,Max@podaci[[All,3]],korak}]
165. nb=Table[Length[kritudaljInd[t]],{t,0,Max@podaci[[All,3]],korak}];
166. kfcpa=0.01;
167. Print["PODACI"]
168. Length[parovid]
169. Max[nb]
170. brbrodmax=Table[Length[maxbrod0=Select[nb,##==i&]],{i,0,n}]
171. Postotak1=(Table[Length[maxbrod0=Select[nb,##==i&]],{i,0,n}]/brojkoraka)*100/N
172. Vrijemesbrodovima1=(Postotak1/100)*brojkoraka/(60*(korak*60))
173. Length[Select[nb,#>0&]]
174. time=Length[Select[nb,#>0&]]*korak
175. time/(brojkoraka*korak)
176. kcpa=1/(1+kfcpa*nb^2);
177. Min[kcpa]
178. kopci=kdom*kasd*kcpa;
179. ListLinePlot[kcpa,PlotRange->{{-10,brojkoraka},{0.7,1}}]
180. ListLinePlot[kopci,PlotRange->{{-10,brojkoraka},{0,1}}]
181. Print["RELATIVNE BRZINE"]
182. vr[i_j]:=Sqrt@Total@((v[[j]]-v[[i]])^2)/3.6
183. vmodulms
184. vrr[t_]:=Table[vr[i,j],{i,tren[t]},{j,Complement[tren[t],Range[1,i]]}]
185. vrel=Table[vrr[t],{t,tA[[1]],Max@podaci[[All,3]],korak}]
186. vrelativna1=Table[vr[i,j],{i,2n},{j,Complement[Range[1,2n],Range[1,i]]}];
187. Flatten[Table[{i,j},{i,2n},{j,Complement[Range[1,2n],Range[1,i]]},1];
188. vrelativna1=Flatten[Table[vr[i,j],{i,n},{j,Complement[Range[1,n],Range[1,i]]},1];
189. Flatten[Table[{i,j},{i,n},{j,Complement[Range[1,n],Range[1,i]]},1];
190. vapsolutna=Sqrt@Total@(#^2)&/@v
191. vapsolutna=Sqrt@Total@(#^2)&/@v/3.6
192. vvrel=vr@@@parovi
193. vvreld=vr@@@parovid
194. Print["VRIJEME NAJMANJEG PROLAZA"]
195. Clear[t]
196. tmin[i_j]:=If[v[[j]]==v[[i]],0,-((p[[j]]-v[[j]]podaci[[All,2]][[j]]-
p[[i]]+v[[i]]podaci[[All,2]][[i]]).(v[[j]]-v[[i]])/(v[[j]]-v[[i]].(v[[j]]-v[[i]])))]
197. Clear[t]
198. akrel=0.0016;
199. tKriticna=0.4
200. kvvrel1=Table[If[(t<(tcpad[[i]]+tKriticna))&&(t>(tcpad[[i]]-
tKriticna)),1/(1+akrel*vvreld[[i]]^2),1],{i,1,Length[tcpad]},{t,tA[[1]],Max@podaci[[All,3]],korak}]
201. kvvrel=Table[1/(1+akrel*vvreld[[i]]^2),{i,1,Length[tcpad]};
202. koefcpa=2
203. Acpa=7
204. Bcpa=25
205. cpa
206. Round[((tmin@@@parovid)*60)]

```

```

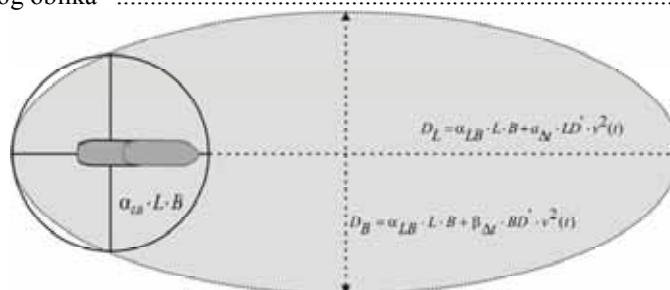
207. tk=Table[If[(t<=tcpad[[i]])&&(t>(tcpad[[i]]-tKriticna)),N[1-E^(kvvrelid[[i]]*(Acpa*((t-
tcpad[[i]])/tKriticna)-
koefcpa*(cpa[[i]]/dKriticna))),2],1],{i,1,Length[tcpad]},{t,0,Max@podaci[[All,3]],korak}];
208. tkneg=Table[If[(t>tcpad[[i]])&&(t<(tcpad[[i]]+tKriticna)),N[1-E^(kvvrelid[[i]]*(-Bcpa*((t-
tcpad[[i]])/tKriticna)-
koefcpa*(cpa[[i]]/dKriticna))),2],1],{i,1,Length[tcpad]},{t,0,Max@podaci[[All,3]],korak}];
209. tablicamin[t_]:=Flatten[Table[tmin[i,j],{i,tren[t]},{j,Complement[tren[t],Range[1,i]]}],1];
210. tcpasvi=Table[tablicamin[t],{t,tA[[1]],Max[podaci[[All,3]],korak}];
211. Acdsvi=tk*tkneg;
212. For[i=2,i<=brojkoraka,i++,If[tk[[1,i]]<tk[[1,i-1]],indt=i,0]]
213. indt
214. tk[[1,indt]];
215. tkneg[[1,indt]];
216. wmin=Table[tcpa[[i]]-tKriticna,{i,1,Length[tcpa]}];
217. wmax=Table[tcpa[[i]]+tKriticna,{i,1,Length[tcpa]}];
218. Print["FUNKCIJA POVEĆANE OPASNOSTI"]
219. Acd=Times@@Acdsvi
220. If[Length[tcpad]<1,Acd=tk*tkneg,Acd=Times@@(tk*tkneg)]
221. AcdMin=Table[Min[Acdsvi[[i,All]]],{i,Length[Acdsvi]}]
222. ListLinePlot[Acd,PlotRange->{{0,brojkoraka},{0,1}}]
223. ListLinePlot[Acd,PlotRange->{{indt-25,indt+25},{0,1}}]
224. Print["PODACI"]
225. Min[cpa]/1852
226. Min[Acd]
227. koef=kopci*Acd
228. ListLinePlot[koef,PlotRange->{{0,brojkoraka},{0,1}}]
229. ListLinePlot[koef,PlotRange->{{indt-25,indt+25},{0,1}}]
230. Table[{i,tk[[1,i]]},{i,1,brojkoraka}];
231. Table[{i,tkneg[[1,i]]},{i,indt-25,indt+25}];
232. koef[[indt]]
233. Table[{i,k[[i]]},{i,indt-25,indt+25}]
234. Table[{i,Acd[[i]]},{i,indt-25,indt+25}]
235. Table[{i,koef[[i]]},{i,indt-25,indt+25}]
236. Print["SIMULACIJA"]
237. luka
238. Clear[t]
239. pocetak=0;kraj=Max[podaci[[All,3]]];
240. Animate[ListPlot[Table[g[i,t],{i,1,2n}],PlotRange-
->{{la1,la2},{f1,f2}},{t,pocetak,kraj,korak},AnimationRunning->False]
241. {Slider[Dynamic[t],{pocetak,kraj,korak}],Dynamic[t]}
242. Dynamic@ListPlot[Table[g[i,t],{i,1,2n}],PlotRange->{{la1-5,la2},{f1-2,f2}}]
243. Dynamic[Table[{i,j,d[i,j,t]},{i,tren[t]},{j,Complement[tren[t],Range[1,i]]}]/MatrixForm]

```

## ANKETNI UPITNIK

Sljedeća pitanja odnose se na brod „Panamax“ veličine (225x32 m) prosječne brzine 14 čv:

1. Slobodna površina oko broda u plovidbi (domena) treba imati oblik:
- a) Elipse .....
  - b) Modificirane elipse .....
  - c) Kružnice .....
  - d) Navedenog oblika .....



- e) Drugog oblika – navedite .....
2. Veličina slobodne površine oko broda u plovidbi (domena) ponajprije ovisi o:
- a) Navedite .....
3. „Duljina“ slobodne površine oko broda u plovidbi za navedeni referentni brod iznosi (iskustveno):
- a) Manje od 500 m .....
  - b) Od 500 m do 1.000 m .....
  - c) Od 1.000 do 1.852 m .....
  - d) Veća od 1.852 m .....
4. Na plovnom području veličine 10·10 M područje povećane opasnosti (potrebna povećana pažnja časnika u straži) javlja se kad je TCPA:
- a) Manji od 60 minuta .....
  - b) Manji od 30 minuta .....
  - c) Manji od 15 minuta .....
  - d) Manji od 7,5 minuta .....
5. Na plovnom području veličine 10·10 M, CPA mora iznositi najmanje:
- a) 0,3 M .....
  - b) 0,5 M .....
  - c) 1 M .....
  - d) 2 M .....
6. Ako sigurnost plovidbe iznosi 1 kada brodovi plove na sigurnoj udaljenosti, na koliko će pasti sigurnost plovidbe u trenutku mimoilaženja, ako je CPA 50 % manji od zahtijevanog CPA iz prethodnog pitanja:
- a) 0,7 .....
  - b) 0,5 .....
  - c) 0,4 .....
  - d) 0,3 .....
  - e) Manje od 0,3 .....
7. Na plovnom području veličine 10·10 M kada će se sigurnost plovidbe smanjiti na pola, uz uvjet da broj brodova s CPA manjim od graničnog iznosi:
- a) 10 .....
  - b) 15 .....
  - c) 20 .....
  - d) 40 .....
  - e) više od 50 .....