

# Napredni računalni simulacijski model za procjenu učestalosti sudara brodova

---

Čorić, Mirko

Doctoral thesis / Disertacija

2022

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:189758>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-26**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)





Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

Mirko Čorić

**NAPREDNI RAČUNALNI SIMULACIJSKI  
MODEL ZA PROCJENU UČESTALOSTI  
SUDARA BRODOVA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2022.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

Mirko Čorić

**NAPREDNI RAČUNALNI SIMULACIJSKI  
MODEL ZA PROCJENU UČESTALOSTI  
SUDARA BRODOVA**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Sadko Mandžuka

Prof. dr. sc. Anita Gudelj

Zagreb, 2022.



University of Zagreb

Faculty of Transport and Traffic Sciences

Mirko Čorić

**ADVANCED COMPUTER SIMULATION  
MODEL FOR SHIP COLLISION  
FREQUENCY ESTIMATION**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisors:

Prof. dr. sc. Sadko Mandžuka, Ph.D.

Prof. dr. sc. Anita Gudelj, Ph.D.

Zagreb, 2022.

## **PODACI I INFORMACIJE O DOKTORANDU**

1. Ime i prezime: Mirko Čorić
2. Datum i mjesto rođenja: 16.12.1985., Split, Republika Hrvatska.
3. Naziv završenog fakulteta i godina diplomiranja: Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, 2010.
4. Naziv poslijediplomskog doktorskog studija: Tehnološki sustavi u prometu i transportu

## **INFORMACIJE O DOKTORSKOM RADU**

1. Naziv poslijediplomskog doktorskog studija: Tehnološki sustavi u prometu i transportu
2. Naslov disertacije: Napredni računalni simulacijski model za procjenu učestalosti sudara brodova
3. Fakultet na kojem je doktorski rad branjen: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

## **POVJERENSTVA, OCJENA I OBRANA DOKTORSKOG RADA**

1. Datum prijave doktorskog rada:
2. Datum obrane doktorskog rada:
3. Mentori:
  - 1) prof.dr.sc. Sadko Mandžuka
  - 2) prof.dr.sc. Anita Gudelj
4. Povjerenstvo za ocjenu i obranu doktorskog rada:
  - 1) prof. dr. sc. Natalija Kavran, predsjednik
  - 2) prof. dr. sc. Sadko Mandžuka, mentor
  - 3) prof. dr. sc. Anita Gudelj, mentor, (Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet)
  - 4) doc. dr. sc. Tomislav Fratrović, član
  - 5) prof. dr. sc. Zvonimir Lušić, (Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet), vanjski član

## INFORMACIJE O MENTORIMA

**Prof. dr. sc. Sadko Mandžuka** rođen je 1956. godine u Foči, Republika Bosna i Hercegovina. Gimnaziju u Bugojnu završio je 1975. godine, a Elektrotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, smjer automatika, 1980. godine. Magistrirao je 1992. godine, a doktorsku disertaciju obranio je u 2003. godine, sve na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu.

Po završetku studija 1980. godine zapošljava se u UNIS – Bugojno na poslovima razvoja digitalnih sustava upravljanja, a potom 1982. godine u Brodarskom institutu u Zagrebu. Od samog početka u Brodarskom institutu radi na zadacima istraživanja i razvoja raznih sustava upravljanja plovnim objektima. Radio je kao istraživač, samostalni istraživač, voditelj odjela Razvoj sustava upravljanja te direktora Sektora za upravljanje sustavima i procesima. Bio je višegodišnji suradnik na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, Zavod za automatiku i računalno inženjerstvo. Danas je stalno zaposlen kao redoviti profesor na Fakultetu prometnih znanosti, Zavod za inteligentne transportne sustave, gdje obnaša dužnost predstojnika Zavoda. Predaje na preddiplomskom i diplomskom studiju na grupi predmeta Inteligentni transportni sustavi i Operacijska istraživanja. Na doktorskom studiju sudjeluje u nastavi na više kolegija. Jedan je od utemeljitelja Sveučilišnog poslijediplomskog specijalističkog studija Upravljanje krizama gdje je nositelj kolegija Tehnički sustavi potpore upravljanja krizama.

Do sada je objavio preko 100 znanstvenih radova, više stručnih radova i nekoliko preglednih članaka. Član suradnik je Akademije tehničkih znanosti Hrvatske, bio je član Znanstvenog vijeća za promet Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti, član Technical Committee on Transportation and Vehicles systems - Marine Systems (International Federation of Automatic Control – IFAC), utemeljitelj Hrvatskog društva za robotiku, obnaša dužnost predsjednika znanstveno-stručne udruge ITS Hrvatska.

Urednik je i član uredničkog odbora više europskih i hrvatskih znanstvenih časopisa. Bio je član više međunarodnih programskih odbora za kongrese i konferencije u zemlji i inozemstvu. Bio je voditelj i sudjelovao je u više europskih i hrvatskih znanstveno-istraživačkih projekata te je recenzent više znanstvenih i istraživačko-razvojnih projekata u zemljama Europske unije.

Za dosadašnji rad nagrađivan je Medaljom rada (1987), Zahvalnicom Glavnog stožera OS RH (1996) te je dobitnik godišnje državne nagrade (1997) Ministarstva znanosti i tehnologije i Ministarstva obrane za osobit doprinos na području tehničkih znanosti, za znanstveni doprinos u okviru rješenja sustava prostornog upravljanja podmornicom. Dobitnik je Nagrade za posebna postignuća u znanstveno-istraživačkom radu Fakulteta prometnih znanosti (2018) za trogodišnje razdoblje 2016-2018.

**Prof. dr. sc. Anita Gudelj** rođena je u Splitu 1970. godine gdje je završila osnovnu i srednju školu. Diplomirala je 5. studenog 1993. godine na Fakultetu prirodoslovno-matematičkih znanosti i odgojnih područja, Sveučilište u Splitu, smjer Profesor matematike i informatike. U prosincu 1995. godine upisuje poslijediplomski studij iz područja društvenih znanosti, polje informacijske znanosti - smjer: Baze podataka, u organizaciji Fakulteta organizacije i informatike u Varaždinu, Sveučilišta u Zagrebu. Na istom fakultetu u svibnju 2000. godine obranila je magistarski rad pod naslovom „Dizajn i implementacija temporalnih baza podataka“ i stekla znanstveni stupanj magistra informacijskih znanosti. Doktorsku disertaciju pod naslovom "Optimalizacija sustava s diskretnim događajima primjenom Petrijevih mreža i genetskih algoritama", u znanstvenom području društvenih znanosti, polje informacijskih i komunikacijskih znanosti, grana informacijski sustavi i informatologija, obranila je 2. prosinca 2010. na Fakultetu organizacije i informatike u Varaždinu, Sveučilišta u Zagrebu.

Stalno je zaposlena kao redoviti profesor na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Splitu. Nositelj je i izvođač na više kolegija na preddiplomskom, diplomskom studiju Pomorskog fakulteta u Splitu, na integriranom studijskom programu Vojno pomorstvo te na predmetu *Modeliranje i optimiranje pomorskih prometnih sustava* na poslijediplomskom studiju. Osmislila je i izradila program predavanja te je sunositelj modula "Integration Quality Management System ISO 9001 and Quality Assurance System" koji se izvodi u okviru Split Summer School, University of Split.

Prof. dr. sc. Anita Gudelj objavila je više od osamdeset publikacija (znanstvenih i stručnih članaka) te je sudjelovala je na većem broju domaćih i stranih konferencija. Dobitnica je nagrade "Distinguished Scholarship Award for outstanding scholarship that significantly contributes to and advances knowledge in the field of decision technology", koju je dodijelio: The International Institute for Advanced Studies in Systems Research and Cybernetics, Baden - Baden, 2. kolovoza 2018.

Sudjelovala je u više znanstveno-istraživačkih i stručnih projekata. Trenutno je voditeljica ERASMUS+ projekta "MareMathics–Inovativni pristup učenju matematike za studente pomorskih studija" i član je CEKOM istraživačkog projekta.

Članica je istraživačke skupine "Primjena obnovljivih izvora pomorstvu" na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Splitu (područje istraživanja: razvijanje metoda za upravljanje i optimiranje raspodjele energije u sustavima s obnovljivim izvorima energije).

Obnašala je i obnaša brojne odgovorne dužnosti na Pomorskom fakultetu u Splitu. Od 2011. do rujna 2018. bila je šefica Katedre za opće i zajedničke predmete. Od 2011. predsjednica je Odbora za unaprjeđenje kvalitete, zamjenica ravnateljice Centra za kvalitetu na Fakulteta i ECTS koordinator te član Centra za kvalitetu Sveučilišta u Splitu. Od 2018. je ISVU koordinator na Pomorskom fakultetu u Splitu.



*Sinu Mateu, supruzi Nini i mojim roditeljima*

## SAŽETAK

Sudari brodova pripadaju visoko rizičnim incidentnim događajima u pomorskom prometu koji mogu izazvati značajne ljudske, ekonomske i ekološke gubitke. Očekivani porast pomorskog prometa na globalnoj razini ne ide u prilog smanjenju ovog rizika, zbog čega je u posljednjem desetljeću zabilježen i porast interesa spram istraživanja u području procjene rizika sudara u pomorskom prometu. Kako je rizik ovisan o vjerojatnosti pojave incidentnog događaja i očekivane (troškovne) posljedice tog događaja, procjena vjerojatnosti i učestalosti nesreća u pomorskom prometu izrazito je važna.

Analizom dosadašnjih istraživanja uočeno je da postojeći analitički modeli za procjenu učestalosti sudara brodova nisu prikladni kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i za promjene smjera protezanja plovidbenog puta. Nadalje, postojeći simulacijski modeli i modeli temeljeni na obradi AIS podataka pretežno su razvijeni za specifična plovidbena područja, te izravno ovise o realnim podacima praćenja brodova. Time je otežana primjena nad ostalim plovidbenim područjima, kao i testiranje hipotetskih scenarija. U ovom istraživanju razvijen je novi računalni simulacijski model za procjenu učestalosti sudara brodova koji se sastoji od dva zasebna modula, odnosno modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta. Razvijeni model integriran je u računalnu aplikaciju s korisničkim sučeljem i 2D vizualizacijom simuliranih plovidbenih situacija te koristi novu modelsku logiku i pristup za simuliranje spomenutih plovidbenih situacija. Model se može okarakterizirati kao mikrosimulacijski model stohastičke prirode temeljen na simulaciji diskretnih događaja. Validacija razvijenog modela izvršena je uz pomoć postojećih analitičko-numeričkih metoda i programskog paketa IWRAP (engl. IALA Waterway Risk Assessment Program). Također su istražene i unaprijeđene postojeće analitičko-numeričke metode za procjenu učestalosti sudara brodova korištenjem razvijenog računalnog simulacijskog modela. Točnije, rezultati računalnog simulacijskog modela za model slučajno distribuirane plovidbe brodova validirani su pomoću postojećeg matematičkog modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod križanja kursova koji je modificiran i prilagođen za opis modela slučajno distribuirane plovidbe brodova. Prethodna istraživanja unaprijeđena su i proširena novim plovidbenim situacijama čime je omogućena potpunija procjena učestalosti sudara brodova u analiziranim plovidbenim područjima. Razvijeni računalni simulacijski

model primjenjiv je u različitim plovidbenim područjima uz upotrebu realnih ili pretpostavljenih podataka o prometu brodova.

**Ključne riječi:** *učestalost sudara brodova, procjena rizika, kvantitativni modeli, računalni simulacijski model*

## **EXTENDED ABSTRACT**

Ship collisions are among the high-risk maritime incidents that can cause significant human, economic, and environmental losses. The expected increase in maritime traffic on a global scale is not conducive to reducing this risk, which is why interest in research on maritime collision risk assessment has increased over the past decade. As the risk depends on the probability of an incident and the expected (cost) consequences of the event, the assessment of the probability and frequency of maritime accidents is extremely important.

As an introduction, this research explains the basic concepts of ship collision risk assessment and addresses the importance of risk assessment by evaluating the frequency of ship collisions.. Quantitative models are highlighted as the leading method for estimating the frequency of ship collisions, and the classification and review of existing quantitative models used for this purpose is presented along with a description and analysis of the basic model properties of each model. In addition, possible approaches to modeling and simulation of transportation systems are discussed, and a general categorization of models is provided, focusing on computer simulations and an object-oriented approach to modeling, which represents the basic methodological concept used in this dissertation.

Based on the conducted research, it was noted that existing analytical models for ship collision frequency estimation are not suitable for random sailing directions and bend of waterway. Furthermore, the existing simulation models and AIS data-processing based models are predominantly developed for specific navigation areas and are directly dependent on real ship tracking data. This makes it difficult to apply to other navigation areas, as well as to test hypothetical scenarios. In accordance with the set goal and hypotheses in this research, a new computer simulation model for ship collision frequency estimation is developed, which consists of two separate modules, namely the ship collision frequency estimation model for the random sailing direction scenario and ship collision frequency estimation model for bend of waterway scenario. The developed model is integrated into a computer application with user interface and 2D visualization of the simulated navigation situations, uses a new modeling approach to simulate the addressed navigation situations, and can be characterized as a microsimulation model of stochastic nature based on discrete event simulation. The developed model is applicable in different navigation areas with the use of real or assumed ship traffic data.

Additionally, existing analytical-numerical methods for estimating the frequency of ship collisions using a developed computer simulation model are investigated and improved.

More specifically, ship collision frequency estimation model for the random sailing direction scenario is developed as a first module. The importance of considering the aforementioned navigation scenario is emphasized, and detailed model properties based on an object-oriented modeling approach are presented. The model is tested and validated by running simulations for multiple hypothetical examples of the random sailing direction scenario and by comparing the results with analytical model used for the ship collision frequency estimation in the crossing scenario. A strong linear correlation is found between the developed computer simulation model for ship collision frequency estimation in the random sailing direction scenario and the aforementioned analytical model. Using the existing analytical model for ship collision frequency estimation in the crossing scenario and regression analysis, a new modified analytical model suitable for estimating the frequency of ship collisions in the random sailing direction scenario is derived.

As a second module, ship collision frequency estimation model for bend of waterway scenario is developed. An explanation of the addressed navigation scenario and the detailed modeling features is given. The model uses an analogous object-oriented modeling approach as the first module. The model is tested and validated by running simulations for multiple hypothetical examples of the bend of waterway scenario and comparing the results with IWRAP (IALA Waterway Risk Assessment Program ) software. The differences in model properties between the developed computer simulation model and the IWRAP software are discussed and the analysis of the results is presented. Validation of the developed computer simulation model is also performed on a case study, i.e., a realistic example of a band of waterway scenario, by comparing and analyzing the results of the developed computer simulation model with the results of the IWRAP software.

**Key words:** ship collision frequency, risk assessment, quantitative models, computer simulation model

## SADRŽAJ:

1.	UVOD .....	1
1.1.	Cilj, hipoteze i znanstveni doprinosi istraživanja .....	1
1.2.	Pregled dosadašnjih istraživanja .....	2
1.3.	Struktura disertacije .....	2
2.	OSNOVNI KONCEPTI KOD PROCJENE RIZIKA SUDARA BRODOVA ....	5
3.	KVANTITATIVNI MODELI ZA PROCJENU UČESTALOSTI SUDARA BRODOVA .....	8
3.1.	Temeljni znanstveni pristup analizi rizika u pomorskom prometu .....	8
3.2.	IWRAP analitički modeli .....	10
3.3.	Ostali analitički modeli .....	12
3.4.	Modeli temeljeni na obradi AIS podataka .....	16
3.5.	Simulacijski modeli .....	20
3.6.	Modeli utjecaja manevra izbjegavanja sudara .....	25
4.	MODELIRANJE I SIMULIRANJE PROMETNIH SUSTAVA.....	29
4.1.	Mogući pristupi.....	29
4.2.	Računalne simulacije i objektno orijentirani pristup modeliranju prometnih sustava .....	31
5.	PREDSTAVLJENI RAČUNALNI SIMULACIJSKI MODELI .....	33
5.1.	Uvodna razmatranja i pretpostavke kod razvoja računalnih simulacijskih modela .....	33
5.2.	Model slučajno distribuirane plovidbe brodova .....	34
5.3.	Računalni simulacijski model za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova.....	37
5.4.	Testne simulacije i validacija modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova.....	43
5.4.1.	Hipotetski primjer scenarija i metodologija izvođenja simulacija.....	43
5.4.2.	Analitički model za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i validacija rezultata računalnog simulacijskog modela .....	47

5.5.	Plovidba kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta.....	56
5.6.	Računalni simulacijski model za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta .....	57
5.7.	Testne simulacije i validacija modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta .....	64
5.7.1.	Hipotetski primjer scenarija i metodologija izvođenja simulacija.....	64
5.7.2.	Validacija računalnog simulacijskog modela uz pomoć programskog paketa IWRAP i analiza rezultata .....	71
5.7.3.	Validacija računalnog simulacijskog modela na primjeru realističnog plovidbenog scenarija i pripadajućih AIS podataka uz pomoć programskog paketa IWRAP – studija slučaja .....	80
5.7.4.	Zaključno razmatranje provedene validacije .....	89
5.8.	Programska realizacija relevantnijih komponenti modela.....	89
5.9.	Karakteristike razvijenog modela .....	94
6.	ZAKLJUČAK .....	97
7.	LITERATURA .....	99
8.	POPIS ILUSTRACIJA.....	110
9.	POPIS TABLICA.....	112
10.	POPIS KRATICA .....	113
11.	ŽIVOTOPIS AUTORA.....	114

# 1. UVOD

## 1.1. Cilj, hipoteze i znanstveni doprinosi istraživanja

Cilj istraživanja ove disertacije može se iskazati kao:

- Razviti računalni simulacijski model za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i za promjene smjera protezanja plovidbenog puta, kao i istražiti mogućnosti primjene postojećih analitičko-numeričkih metoda za procjenu učestalosti sudara brodova.

Sukladno postavljenom cilju, očekivane znanstvene hipoteze ove disertacije su sljedeće:

- Računalnim simulacijskim modelom moguće je simulirati promet brodova i procijeniti učestalost sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i za promjene smjera protezanja plovidbenog puta.
- Postojeće analitičko-numeričke metode za procjenu učestalosti sudara brodova će se unaprijediti korištenjem računalnih simulacijskih modela.

Na temelju postavljenog cilja i hipoteza ostvareni su sljedeći znanstveni doprinosi:

- Razvoj računalnog simulacijskog modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i za promjene smjera protezanja plovidbenog puta.
- Unapređenje postojećih analitičko-numeričkih metoda procjene rizika sudara brodova.



## **1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja**

Detaljan pregled dosadašnjih istraživanja prikazan je kroz drugo, treće i četvrto poglavlje u ovoj disertaciji. U drugom poglavlju objašnjeni su osnovni koncepti, definicije i pojmovi korišteni kod procjene rizika sudara brodova, a koji su nužni za razumijevanje same disertacije.

Treće poglavlje iznosi sveobuhvatan pregled postojećih kvantitativnih modela i njihovih različitih kategorija, kao i prikaz osnovnih modelskih karakteristika pojedinih modela. Ovim pristupom omogućena je detaljna identifikacija nedostataka i mogućih poboljšanja, a na temelju čega je i ostvaren doprinos u okviru provedenog istraživanja u ovoj disertaciji. U četvrtom poglavlju iznesen je generalan pregled mogućih pristupa modeliranju i simuliranju prometnih sustava.

Pregledom istraživanja u trećem i četvrtom poglavlju omogućena je precizna kategorizacija modela razvijenog u okviru ove disertacije, kao i identifikacija pripadajućih mu modelskih karakteristika. Detalji se nalaze u Poglavlju 5.1 i Poglavlju 5.9.

## **1.3. Struktura disertacije**

U drugom poglavlju objašnjeni su osnovni koncepti korišteni kod procjene rizika sudara brodova, kao i važnost evaluacije rizika kroz procjenu učestalosti sudara brodova. Izneseni su različiti načini procjene učestalosti sudara brodova, a upotreba kvantitativnih modela u navedenu svrhu istaknuta je kao vodeća metoda današnjice. Objasnen je koncept identifikacije tzv. kandidata za sudar, tj. opasnih situacija koje potencijalno mogu rezultirati sudarom, a koji se primjenjuje kod većine današnjih modela za procjenu učestalosti sudara brodova.

U trećem poglavlju iznesena je klasifikacija i pregled postojećih kvantitativnih modela za procjenu učestalosti sudara brodova uz opis i analizu osnovnih modelskih karakteristika pojedinih modela. Također je razmotrena i osnovna klasifikacija znanstvenih pristupa pri analizi rizika u pomorskom prometu.

Mogući pristupi modeliranju i simuliranju prometnih sustava razmotreni su u četvrtom poglavlju. Prikazana je opća kategorizacija modela i različite vrste klasifikacije simulacijskih modela s naglaskom na računalne simulacije i objektivno orijentirani pristup modeliranju

prometnih sustava koji ujedno predstavlja i osnovni metodološki koncept korišten u okviru istraživanja ove doktorske disertacije.

U petom poglavlju kroz nekoliko potpoglavlja iznesen je sveobuhvatan prikaz razvijenih modula računalnog simulacijskog modela, tj. modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta.

U prvom potpoglavlju petog poglavlja dana su razmatranja iz prethodnih autorovih istraživanja s identificiranim nedostacima i mogućnostima poboljšanja kvantitativnih modela za procjenu učestalosti sudara brodova kao temelj za razvoj računalnog simulacijskog modela u okviru ovog istraživanja.

U potpoglavljima od 5.2 do 5.4 petog poglavlja prikazan je prvi modul, tj. računalni simulacijski model za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova. Istaknuta je važnost i potreba razmatranja plovidbene situacije koja se odnosi na model slučajno distribuirane plovidbe brodova. Opisana je i objašnjena modelska logika razvijenog računalnog simulacijskog modela, kao i metodologija izvođenja testnih simulacija i validacije razvijenog računalnog simulacijskog modela pomoću postojećeg analitičkog modela. Izveden je novi analitički izraz kojim je moguće vršiti procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova.

U potpoglavljima od 5.5 do 5.7 petog poglavlja prikazan je drugi modul, tj. računalni simulacijski model za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta. Opisana je plovidbena situacija promjene smjera protezanja plovidbenog puta, te modelska logika razvijenog računalnog simulacijskog modela. Prikazana je metodologija izvođenja testnih simulacija, validacija razvijenog računalnog simulacijskog modela pomoću programskog paketa IWRAP, te analiza rezultata. Validacija razvijenog modela provedena je i na studiji slučaja, tj. realističnom primjeru plovidbene situacije promjene smjera protezanja plovidbenog puta koristeći programski paket IWRAP i AIS podatke razmatranog plovidbenog područja.

Potpoglavlje 5.8 petog poglavlja iznosi detaljnu implementaciju nekih relevantnijih komponenti računalnog simulacijskog modela, dok potpoglavlje 5.9 daje pregled tehničkih i aplikativnih karakteristika razvijenog modela.

U kontekstu dokazanih hipoteza, ostvarenog cilja i doprinosa, u šestom poglavlju iznesena su zaključna razmatranja i spoznaje nastale tijekom provedenog istraživanja. Završno su navedene smjernice za potencijalna buduća istraživanja i nadogradnje modela.

## 2. OSNOVNI KONCEPTI PROCJENE RIZIKA SUDARA BRODOVA

Unatoč napretku tehnologije, pomorske nesreće događaju se i dalje uzrokujući ekonomske i ekološke štete te gubitke ljudskih života. Statistički podaci pokazuju da je u posljednjem desetljeću došlo do porasta pomorskih nesreća [1, 2]. Prema istraživanjima sudari čine ukupno 16% svih pomorskih nesreća, a s nasukavanjima i požarima spadaju u najčešće pomorske nesreće [3, 4]. U pomorskim nesrećama rizik  $R$  se uobičajeno definira kao umnožak vjerojatnosti pojave neželjenog događaja  $P$  i posljedice tog događaja  $C$ , odnosno [5, 6, 7]:

$$R = P \cdot C \quad (1)$$

U procjenama rizika kod pomorskih nesreća umjesto konvencionalnog načina iskazivanja vjerojatnosti najčešće se koristi koncept broja neželjenih događaja u određenom vremenskom periodu (učestalost), npr. broj sudara u jednoj godini [6]. K tomu u prilog ide i činjenica da je u metodologiji Međunarodne pomorske organizacije (engl. International Maritime Organization – IMO) koja se naziva Formal Safety Assessment (FSA) rizik definiran kao „učestalost pojave neželjenih događaja i ozbiljnosti posljedice“ [8]. FSA je vodeća metodologija za analizu pomorskog rizika i formuliranje pomorske regulatorne politike [9]. Posljedica može biti npr. broj izgubljenih ljudskih života u jednoj godini ili cijena uklanjanja naftnih onečišćenja u jednoj godini. Poznato je da je praktičan i isplativ način smanjenja rizika upravo smanjenje vjerojatnosti nastanka neželjenog događaja, a navedeno se postiže prethodnim poznavanjem te iste vjerojatnosti [10]. U prilog spomenutom pristupu ide i činjenica da su u usporedbi s istraživanjima i kvantitativnim modelima za procjenu frekvencije i vjerojatnosti sudara brodova, istraživanja i kvantitativni modeli za procjenu posljedica sudara brodova u manjini, iako je nužno naglasiti da su obje komponente definicije rizika podjednako važne za ispravnu procjenu rizika [11, 12]. Učestalost sudara brodova može se procjenjivati uz pomoć statističkih podataka, mišljenja stručnjaka i modela [12, 13]. Pristup koji se oslanja na statistiku pomorskih nesreća (npr. sudari brodova) često nije pogodno rješenje, te ima niz nedostataka. Primjerice, stanje pomorskog prometa iz prošlosti na nekom geografskom području ne mora odgovarati trenutnom ili budućem stanju prometa na tom istom području s obzirom na to da na nekom pomorskom putu može doći do promjene strukture i volumena prometa ili primjene novih sigurnosnih pravila i regulativa. U tom slučaju statistika sudara brodova iz prošlosti nije pouzdana za procjenu učestalosti sudara brodova u budućnosti. Nadalje, primjena novih tehnologija u pomorskom prometu implicira da korištenje povijesnih

statističkih podataka o sudarima u svrhu procjene učestalosti sudara u budućnosti također može biti neprikladno. Osim toga, mnoga plovidbena područja imaju nedostatnu količinu povijesnih podataka za valjanu procjenu rizika, dok potencijalni novi plovni putovi uopće nemaju podataka. Nadalje, veliki problem statistike pomorskih nesreća je nedostatak standarda za pohranu informacija o pomorskim nesrećama. Zbog toga je upotreba kvantitativnih modela dominantan i općenito najprihvaćeniji način za procjenu učestalosti sudara brodova, čime se uklanjaju gore navedeni nedostaci [14]. Kvantitativno-temeljena analiza rizika sudara brodova privlači sve veću pozornost znanstvenika i akademske zajednice budući da pruža mjerljive kvantitativne rezultate za procjenu i metode za ublažavanje rizika u kombinaciji s procjenom posljedica. Valja naglasiti da obje terminologije (kvantitativna analiza rizika i vjerojatnosna analiza rizika) označavaju jedan te isti pristup analizi rizika, te je odabir terminologije stvar preferencije autora [5]. Osnovni koncept, usvojen u većini današnjih modela za procjenu učestalosti sudara, podrazumijeva da se najprije identificiraju kandidati za sudar (engl. collision candidates) [14, 15], tj. brodovi na takvim kursovima gdje je sudar neizbježan ako se ne poduzme nikakva radnja za izbjegavanje sudara [14, 16, 17, 18, 19]. Spomenuti koncept može se iskazati na sljedeći način:

$$N_{sudara} = N_a \cdot P_c \quad (2)$$

gdje je  $N_{sudara}$  očekivani broj sudara,  $N_a$  broj kandidata za sudar, a  $P_c$  tzv. korekcijski čimbenik (engl. causation factor) tj. vjerojatnost neuspješnog izbjegavanja sudara u situaciji gdje postoje kandidati za sudar. Ovakav način izračunavanja učestalosti sudara brodova naziva se još i „pristup sintetiziranom procjenom“ (engl. synthetic estimation approach) [14]. Osim izraza poznatog kao kandidati za sudar, u literaturi se može pronaći još nekoliko terminologija, od kojih se neke razlikuju po definiciji, ali slijede isti opći koncept [20]. Neke od srodnih terminologija na engleskom jeziku su: near miss [21, 22], traffic conflict [23], dangerous encounters [24], itd. U istraživanju [20] sve navedene terminologije stavljene su pod zajednički okvir poznat kao „kritični događaji koji nisu rezultirali nesrećom“ (engl. non-accident critical events). Kritični događaji koji nisu rezultirali nesrećom trebaju se razmatrati kao opasni događaji koji su prema određenim kriterijima bili blizu nastanka stvarne nesreće stoga zahtijevaju pozornost [20]. U nastavku ovog rada korištena je terminologija „kandidati za sudar“ jer prikladno opisuje općeniti koncept. Korekcijski čimbenik koristi se kako bi se nerealno velik broj kandidata za sudar sveo na realan očekivani broj sudara. Korekcijski čimbenik odnosi se na vjerojatnost sudara koja nastaje zbog različitih razloga, kao npr. ljudski i organizacijski čimbenici, meteorološki uvjeti, mehanički kvarovi, itd. Ljudski i organizacijski

čimbenici najčešći su uzrok nastanka pomorskih nesreća [25, 26, 27]. Takvi čimbenici su primjerice, pogreške pri odlučivanju, kršenje pravila, umor, itd. Vrijednosti korekcijskih čimbenika variraju, te prema literaturi obično najviše ovise o plovidbenom području i plovidbenoj situaciji sudara (sudar kod pretjecajnih kursova, sudar pri križanja kursova, itd.) za koju se procjenjuje vjerojatnost sudara broda [12, 17, 19, 28].

### **3. KVANTITATIVNI MODELI ZA PROCJENU UČESTALOSTI SUDARA BRODOVA**

#### **3.1. Temeljni znanstveni pristup analizi rizika u pomorskom prometu**

Kod analize rizika valja razlikovati tri osnovna znanstvena pristupa: realistički, konstruktivistički i proceduralistički pristup [29, 30, 31, 32]. Realistički pristup razmatra rizik kao fizički atribut nekog sustava ili tehnologije koji se može okarakterizirati objektivnim činjenicama, a rizik karakteriziraju kvantitativne informacije povezane s incidentnim događajima ili posljedicama [29]. Ostale dimenzije koje se ponekad pripisuju riziku, poput mogućnosti kontrole, dobrovoljne izloženosti, straha i različitih psihometrijskih čimbenika smatraju se slučajnim dimenzijama, te nisu dio rizika. Realistički pristup nastoji što točnije izmjeriti i kvantitativno izraziti rizik.

Konstruktivistički pristup rizik razmatra kao društvenu tvorevinu koja se pripisuje sustavu ili tehnologiji, ali nije dio iste [31]. U ovom slučaju analiza rizika temelji se na mišljenju eksperata. U nekim varijacijama konstruktivističkog pristupa rizik se može procjenjivati kvantitativnim informacijama vezanim uz incidentne događaje ili posljedice tih događaja u kombinaciji sa spomenutim dimenzijama mogućnosti kontrole, dobrovoljne izloženosti, straha i ostalih psihometrijskih čimbenika. Općenito govoreći, konstruktivistički pristup usmjeren je na kognitivne i društvene dimenzije znanja o riziku, te se u obzir uzima i aspekt „nesigurnosti“ pri analizi rizika [30]. U realističkom i konstruktivističkom pristupu analiza rizika ima prvenstveno cilj da se znanje znanstvenika i eksperata prenese do donositelja odluka i dionika (engl. stakeholders). U proceduralističkom pristupu, različiti dionici, poput znanstvenika, eksperata, osoba koje rade pod utjecajem rizika i političara, sudjeluju u procesu procjene rizika kroz zajedničko razumijevanje, činjenice i vrijednosti.

U posljednjem desetljeću zabilježen je porast interesa za metode kojima se analiziraju rizici u pomorskom prometu u toj mjeri da i međunarodne organizacije (primjerice, IMO) izdaju odgovarajuće preporuke o korištenju specifičnih matematičkih alata za analizu i upravljanje rizikom [29, 33]. U praksi je često prisutno različito poimanje samog koncepta rizika i njegove znanstvene teorijske pozadine. Sličan problem identificiran je i u pomorskom prometu, gdje je provedeno opsežno istraživanje temeljnih pitanja analize rizika u pomorskom prometu [29]. Analizirane su različite definicije, klasifikacije i znanstveni pristupi procjeni rizika u

pomorskom prometu te je uočeno da u većini modela za analizu rizika nedostaje jasnoće po pitanju znanstvenog definiranja korištenog pri analizi rizika. Prema istom istraživanju koncept učestalosti i vjerojatnosti korišten je kao temelj većine modela. Također je uočeno da većina modela koristi realistički znanstveni pristup u analizi rizika koji uključuje kvantitativno modeliranje.

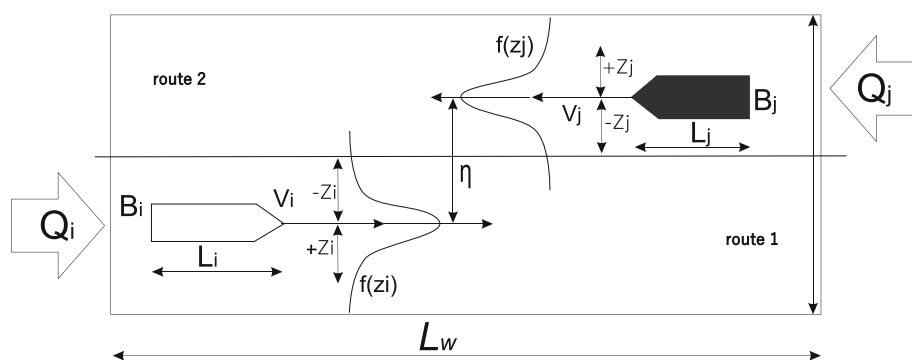
Općenito prihvaćena definicija rizika u pomorskom prometu rizik definira kao umnožak vjerojatnosti neželjenog incidentnog događaja i njegove posljedice. Stoga se kvantitativni modeli za procjenu rizika sudara brodova mogu podijeliti na [19]: modele za procjenu učestalosti sudara brodova, koji su ujedno i razmatrani u ovom preglednom dijelu rada te modele za procjenu posljedica. Veza učestalosti sudara brodova i posljedice u kontekstu procjene rizika prikazana je u radu [11]. Kao što je ranije objašnjeno, većina modela za procjenu učestalosti sudara brodova slijedi okvir prema kojemu je potrebno u obzir uzeti dvije komponente (vidjeti izraz (2) u Poglavlju 2), što znači da je potrebno izračunavanje ukupnog broja kandidata za sudar i vjerojatnosti da će dva broda koja čine kandidat za sudar stvarno rezultirati sudarom. Ovaj pristup (pristup sintetiziranom procjenom) dominantan je među istraživačima, a objedinjuje pomorske prometne informacije (npr. dinamičke informacije o kretanjima brodova) i korekcijski čimbenik (npr. različiti ljudski, organizacijski i vanjski čimbenici koji se uzimaju u obzir) [14]. Slijedi klasifikacija i pregled kvantitativnih modela za procjenu učestalosti sudara brodova.



### 3.2. IWRAP analitički modeli

IWRAP (engl. IALA Waterway Risk Assessment Program) je trenutno jedan od najkorištenijih računalnih simulacijskih programa za izračunavanje frekvencije sudara i nasukavanja brodova u pomorskom prometu koji je podržan od Međunarodnog udruženja uprava pomorske signalizacije (IALA) i Međunarodne pomorske organizacije (IMO) [33, 34]. Program je nastao u suradnji s brojnim sveučilištima i pomorskim institucijama diljem svijeta te je u posljednje vrijeme korišten u mnogim istraživanjima [35, 36, 37]. Sam program IWRAP temelji se na pristupu sintetiziranom procjenom, tj. konceptu prikazanom u izrazu (2) iz uvodnog poglavlja, te ne razmatra posljedice incidentnih događaja. IWRAP izračunava broj kandidata za sudar na temelju izraza (2) koji se potom množi s nekim od postojećih korekcijskih čimbenika iz literature ovisno o vrsti sudara [28, 33]. Analitički modeli integrirani unutar programa IWRAP prikazani su u nastavku ovog poglavlja. IWRAP razlikuje sljedeće plovidbene situacije u kojima dolazi do sudara brodova [28, 38]: a) sudare kod nasuprotnih kursova, b) sudare kod pretjecajnih kursova, c) sudare pri križanju kursova, d) sudare pri spajanju kursova, e) sudare kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta, f) sudare kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova. IWRAP plovidbene situacije sudara brodova d), e) i f) aproksimativno simulira situacijama a), b) i c) čiji opis slijedi u nastavku.

Pomorski promet na nekom dijelu plovidbenog puta i plovidbena situacija uslijed koje dolazi do sudara kod nasuprotnih i pretjecajnih kursova može se predočiti Slikom 1.



Slika 1: Plovidbena situacija nastanka sudara kod nasuprotnih i pretjecajnih kursova [28, 39]

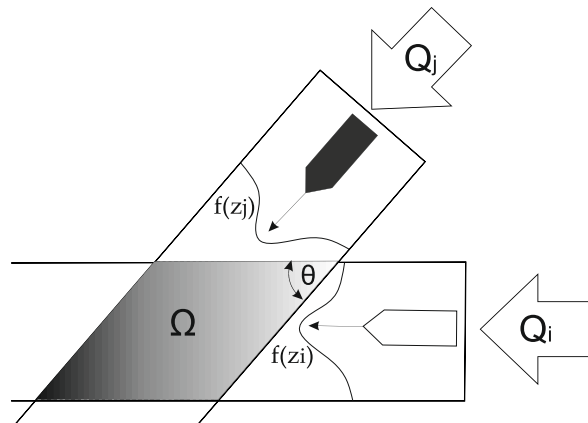
Vjerojatnost da se putanje (kursne linije) dvaju brodova koji si dolaze u susret preklapaju ovisi o distribuciji brodova duž širine plovidbenog puta iz svakog smjera plovidbenog puta (manja vrijednost varijable  $\eta$  znači veću vjerojatnost sudara). Broj kandidata

za sudar kod nasuprotnih kursova  $N_a$  u promatranom vremenu  $\Delta t$  dobiva se pomoću sljedećeg izraza [28, 40]:

$$N_a = L_w \cdot \sum_i \sum_j \frac{Q_i^{(1)} \cdot Q_j^{(2)}}{V_i^{(1)} \cdot V_j^{(2)}} \cdot (V_i^{(1)} + V_j^{(2)}) \cdot (B_i^{(i)} + B_j^{(j)}) \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot (\sigma_i^2 + \sigma_j^2)}} \cdot e^{-\frac{\eta^2}{2 \cdot (\sigma_i^2 + \sigma_j^2)}} \cdot \Delta t \quad (3)$$

gdje su parametri opisani kako slijedi:  $L_w$  je dužina rute,  $Q_i^{(1)}$  je broj prolazaka brodova klase I u jedinici vremena na ruti 1,  $Q_j^{(2)}$  je broj prolazaka brodova klase J u jedinici vremena na ruti 2,  $V_i^{(1)}$  je prosječna brzina brodova klase I na ruti 1,  $V_j^{(2)}$  je prosječna brzina brodova klase J na ruti 2,  $B_i^{(i)}$  označava širinu brodova klase I,  $B_j^{(j)}$  označava širinu brodova klase J,  $\eta$  je udaljenost između središnjih linija plovidbenih ruta, a  $\sigma$  označava prosječno odstupanje brodova prilikom plovidbe od središnjih linija plovidbenih ruta. Slika 1 također opisuje i situaciju nastanka pretjecajnih sudara koji podrazumijeva kretanje brodova u samo jednom smjeru, a broj geometrijskih kandidata  $N_a$  izračunava se tako da se u izrazu (3) zbroj prosječnih brzina  $(V_i^{(1)} + V_j^{(2)})$  zamjeni razlikom tih brzina  $(V_i^{(1)} - V_j^{(2)})$ , uz uvjet da je  $V_i^{(1)} - V_j^{(2)} > 0$  (Naime, ako je  $V_i^{(1)} - V_j^{(2)} < 0$ , brodovi klase I neće moći preteći brodove klase J i izazvati sudar). U praktičnoj implementaciji ovog modela koristi se apsolutna vrijednost razlike tih brzina  $|(V_i^{(1)} - V_j^{(2)})|$  kako bi se izračunao broj geometrijskih kandidata za sudar koji nastaju kao rezultat situacija u kojima brodovi klase J pretječu brodove klase I.

Za plovidbenu situaciju uslijed koje dolazi do sudara pri križanju kursova IWRAP koristi model autora P.T. Pedersen [28, 40] koji spada među najkorištenije modele za procjenu učestalosti sudara u brojnim studijama [35, 36, 37, 41, 42, 43, 44]. Situacija se može predočiti Slikom 2.



Slika 2: Plovidbena situacija nastanka sudara pri križanju kursova [28, 39]

Odstupanje brodova na plovidbenim putovima od središnjih linija plovidbenih putova ravna se također po normalnoj distribuciji kao u prethodnoj situaciji. Broj kandidata za sudar pri križanju kursova  $N_a$ , u promatranom vremenu  $\Delta t$  dobiva se pomoću sljedećeg izraza [28, 40]:

$$N_a = \sum_i \sum_j \frac{Q_i^{(1)} \cdot Q_j^{(2)}}{V_i^{(1)} \cdot V_j^{(2)}} \cdot V_{ij}^{(1,2)} \cdot D_{ij}^{(1,2)} \cdot \frac{\Delta t}{\sin \vartheta} \quad (4)$$

gdje su parametri opisani kako slijedi:  $Q_i^{(1)}$  je broj prolazaka brodova klase I u jedinici vremena na plovidbenom putu 1,  $Q_j^{(2)}$  je broj prolazaka brodova klase J u jedinici vremena na plovidbenom putu 2,  $V_{ij}^{(1,2)}$  je relativna brzina približavanja broda klase I s plovidbenog puta 1 prema brodu klase J s plovidbenog puta 2. Valja napomenuti da za razliku od plovidbene situacije sudara kod nasuprotnih i pretjecajnih kursova, distribucija brodova duž širine plovidbenog puta nije relevantna za sudare pri križanju kursova.  $D_{ij}^{(1,2)}$  je dijametar sudara dvaju brodova koji se približavaju različitim kursovima,  $\vartheta$  je kut križanja plovidbenih putova (kut  $\vartheta$  je iz praktičnih razloga limitiran na raspon između  $10^\circ$  i  $170^\circ$ ). Dijametar sudara  $D_{ij}^{(1,2)}$  predstavlja minimalnu udaljenost mimoilaženja ispod koje je sudar neizbježan. Za detalje izračunavanja dijametara sudara  $D_{ij}^{(1,2)}$  i relativne brzine  $V_{ij}^{(1,2)}$  potrebno je pogledati izvore [28, 40].

### 3.3. Ostali analitički modeli

Model utemeljen na teoriji sudara molekula [17], odnosi se na plovidbenu situaciju sudara brodova pri križanju kursova. Brodovi na plovidbenom putu homogena su skupina, istih su dimenzija, te plove istim brzinama. Razmatra se brod koji se približava nekom plovidbenom putu kojeg svojom kursnom linijom siječe pod kutom  $\vartheta$ , te se definira srednja slobodna udaljenost koju brod može u prosjeku prevaliti prije nego se sudari s jednim od brodova koji se nalazi na plovidbenom putu. Prema ovom modelu geometrijska vjerojatnost sudara definira se kao:

$$P_{sudar} = \frac{X \cdot L}{D^2} \cdot \frac{\sin(\vartheta/2)}{925} \quad (5)$$

gdje je  $D$  prosječna udaljenost između brodova,  $X$  stvarna duljina puta koja se promatra za pojedinačni brod,  $L$  prosječna duljina brodova, a vrijednost 925 konstanta koja predstavlja približno pola nautičke milje. Model podrazumijeva kretanje svih brodova istom brzinom  $V$  (uključujući i promatrani pojedinačni brod).

U [45] se razmatraju tzv. paralelni sudari (pretjecajni i nasuprotni sudari) i sudari pri križanju kursova. Učestalost kontakata dvaju brodova (brod 1 i brod 2) na jednom segmentu plovnog puta definira se kao:

$$P_T = L \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot \left| \frac{V_1 - V_2}{V_1 \cdot V_2} \right| \quad (6)$$

gdje je  $L$  duljina razmatranog segmenta plovnog puta,  $N_1$  i  $N_2$  godišnji broj prolazaka broda 1 i broda 2 na razmatranom segmentu plovnog puta, a  $V_1$  i  $V_2$  su brzine broda 1 i broda 2. Geometrijska vjerojatnost sudara tih dvaju brodova se računa kao:

$$P_G = \frac{B_1 + B_2}{c} \quad (7)$$

gdje je  $c$  širina razmatranog segmenta plovnog puta, a  $B_1$  i  $B_2$  su širine razmatranog broda 1 i broda 2 (model vrijedi ako je širina razmatranog segmenta plovnog puta značajno veća od širine brodova). U slučaju dva broda na jednom segmentu plovnog puta procijenjena godišnja učestalost sudara iznosi:

$$P_x = P_T \cdot P_G \cdot P_c \cdot k_{RR} \quad (8)$$

gdje su  $P_T$  i  $P_G$  prethodno opisani parametri,  $P_c$  je korekcijski čimbenik, a  $k_{RR}$  čimbenik za smanjenje rizika. Prema ovom modelu, sudar dvaju brodova koji se ne nalaze na istom plovodbenom putu definira se kao sudar pri križanju kursova. Učestalost ovakvih sudara se računa na temelju vrste križanja plovodbenih putova, intenziteta prometa, duljine, širine i brzine brodova, kuta križanja, korekcijskog čimbenika  $P_c$  i vjerojatnosti da se kursne linije dvaju brodova sijeku. Godišnja učestalost ovakvih sudara se računa na sljedeći način:

$$P_x = P_I \cdot P_G \cdot P_c \cdot k_{RR} \quad (9)$$

gdje je  $P_I$  vjerojatnost da se kursna linija broda 1 siječe s kursnom linijom broda 2,  $P_G$  godišnja geometrijska učestalost sudara ( $P_G \approx N_1 \cdot N_2 \cdot \Delta t$ , gdje su  $N_1$  i  $N_2$  prethodno opisani parametri iz izraza (6), a  $\Delta t$  kritični vremenski interval),  $P_c$  korekcijski čimbenik, a  $k_{RR}$  čimbenik za smanjenje rizika.

Model [46] računa učestalost sudara brodova na nekoj zadanoj geografskoj lokaciji u nekom zadanom vremenu (najčešće 1 godina). Računa se učestalost susreta (engl. encounter situation),  $n_{co}$ . U modelu se susret definira kao situacija u kojoj su dva broda došla na udaljenost od pola nautičke milje jedan od drugog. Učestalost susreta je zbroj parova brodova (koji se nalaze na međusobnoj udaljenosti od pola nautičke milje) na svim plovidbenim putovima koji postoje na razmatranoj geografskoj lokaciji. Učestalost susreta se množi s vjerojatnošću sudara po susretu,  $p_{co}$ , kako bi se izračunala učestalost sudara,  $f_{co}$ . Model omogućava izračun ukupne učestalosti sudara svih brodova, ali i izračun učestalosti sudara određenog tipa brodova. Učestalost sudara na određenoj lokaciji računa se kao:

$$f_{co} = n_{co} \cdot (P_c \cdot p_{co,c} + P_f \cdot p_{co,f}) \quad (10)$$

gdje je  $P_c$  vjerojatnost normalne vidljivosti,  $P_f$  vjerojatnost smanjene vidljivosti,  $p_{co,c}$  vjerojatnost sudara kod susreta pri normalnoj vidljivosti (korekcijski čimbenik pri normalnoj vidljivosti),  $p_{co,f}$  vjerojatnost sudara kod susreta pri smanjenoj vidljivosti (korekcijski čimbenik pri smanjenoj vidljivosti). Navedeni korekcijski čimbenici se u ovom modelu računaju pomoću analize stabla grešaka (engl. Fault Tree Analysis – FTA).

U radu [47] predloženi su modeli za procjenu učestalosti sudara brodova koji vrše predviđanje za dva različita scenarija. Jedan od scenarija razmatra morsku površinu u obliku kruga u kojem se brodovi kreću nasumično, dok drugi scenarij razmatra morsku površinu u obliku kvadrata kojim se brodovi kreću unaprijed zadanim nepromjenjivim smjerovima. Neka je  $r$  radijus jako malog kruga (područje unutar kojeg je moguće smjestiti brod prosječnih dimenzija) koji je zanemarive veličine u odnosu na razmatranu morsku površinu koja je predstavljena krugom ili kvadratom. Oba modela računaju broj tzv. „opasnih susreta“. Ako je udaljenost između dva broda manja od radijusa  $r$  smatra se da je došlo do „opasnog susreta“. Za scenarij morske površine u obliku kruga gdje se brodovi kreću nasumičnim smjerovima, broj „opasnih susreta“  $\lambda_c$ , jednog odabranog broda s ostalim brodovima koji plove na razmatranoj morskoj površini u vremenu  $T$  računa se kao:

$$\lambda_c = \frac{4 \cdot \rho \cdot V \cdot r \cdot T}{\pi} (1 + \alpha) \cdot E \left( \frac{2 \cdot \sqrt{\alpha}}{1 + \alpha} \right), \quad (11)$$

$$E \left( \frac{2 \cdot \sqrt{V_0 \cdot V}}{V + V_0} \right) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \frac{4 \cdot V_0 \cdot V}{V + V_0} \cdot \sin^2 \theta} d\theta, \quad (12)$$

gdje je  $\rho$  prosječan broj brodova koji plove na razmatranoj morskoj površini,  $V_0$  je brzina jednog odabranog broda,  $V$  je brzina ostalih brodova,  $\alpha = \frac{V_0}{V}$ ,  $\theta$  je kut između smjerova plovidbe jednog odabranog broda i smjerova plovidbe ostalih brodova. Za scenarij morske površine u obliku kvadrata gdje se brodovi kreću unaprijed zadanim nepromjenjivim smjerovima, broj „opasnih susreta“  $\lambda_c$ , jednog odabranog broda s ostalim brodovima koji plove na razmatranoj morskoj površini u vremenu  $T$  računa se kao:

$$\lambda_c = \rho \cdot V \cdot 2 \cdot r \cdot T \cdot \sqrt{1 + \alpha^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \cos \theta} \quad (13)$$

Valja istaknuti da navedeni modeli pretpostavljaju da je gustoća brodova koji plove na razmatranim morskim površinama uniformna, tj. model podrazumijeva da svaki dio morske površine ima podjednaku vjerojatnost da se na njoj nalazi neki brod. Zbog toga su ovi modeli prikladniji za upotrebu na otvorenim morima nego na ograničenim uskim plovidbenim putovima.

U radu [7] opisani su modeli za izračun broja kandidata za sudar brodova, i to za plovidbenu situaciju nasuprotnih i pretjecajnih sudara, sudara pri križanju kursova, te plovidbenu situaciju sudara kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova. Model podrazumijeva uniformnu distribuciju prometa brodova duž širine plovidbenih putova. Broj kandidata za nasuprotni sudar  $N_a$ , u promatranom vremenu  $\Delta t$  dobiva se pomoću sljedećeg izraza:

$$N_a = \frac{D \cdot \Delta t}{W} \sum_{i,j} \frac{Q_i^{(1)} \cdot Q_j^{(2)}}{V_i^{(1)} \cdot V_j^{(2)}} \cdot (B_i^{(i)} + B_j^{(j)}) \cdot (V_i^{(1)} + V_j^{(2)}) \quad (14)$$

gdje je  $D$  duljina promatranog plovidbenog puta za koji se računa broj sudara,  $W$  širina promatranog plovidbenog puta, dok je značenje svih ostalih parametara jednako značenju istoimenih parametara koji se pojavljuju u izrazu (3) iz Poglavlja 3.2. Za pretjecajnu situaciju koristi se izraz:

$$N_a = \frac{D \cdot \Delta t}{W} \sum_{i,j} \frac{Q_i^{(1)} \cdot Q_j^{(2)} \cdot (B_i^{(i)} + B_j^{(j)})}{V_i^{(1)} \cdot V_j^{(2)}} \cdot |V_i^{(1)} - V_j^{(2)}| \quad (15)$$

Model istoimenog autora za situaciju križanja kursova iskazan je na sljedeći način:

$$N_a = \sum_{i,j} d_{ij}^{(1,2)} \cdot \frac{Q_i^{(1)} \cdot Q_j^{(2)}}{V_i^{(1)} \cdot V_j^{(2)}} \cdot \left( \frac{V_j^{(2)}}{\sin \theta} - \frac{V_i^{(1)}}{\operatorname{tg} \theta} + V_i^{(1)} \right) \quad (16)$$

gdje je  $\theta$  kut križanja plovidbenog puta 1 i plovidbenog puta 2,  $d_{ij}^{(1,2)}$  tzv. dijametar sudara (može biti jednak promjeru kružnice koja opisuje brod, tj. dužinu broda), dok je značenje ostalih parametara jednako značenju istoimenih parametara iz izraza (14). Model je ograničen na kut:  $10^\circ \leq \theta \leq 170^\circ$ .

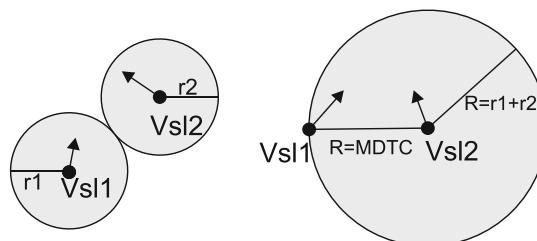
### 3.4. Modeli temeljeni na obradi AIS podataka

U posljednje vrijeme u literaturi je moguće pronaći velik broj modela koji su temeljeni na obradi povijesnih AIS podataka uz primjenu različitih kriterija kojima se određuju kandidati za sudar. Valja naglasiti da navedeni modeli najčešće izravno ovise o specifičnim plovidbenim područjima i AIS podacima prometa brodova koji predstavljaju ulazne parametre modela.

U radu [44] predstavljen je model za izračun očekivanog broja sudara brodova na obalama Portugala koristeći AIS podatke. Uz pomoć vlastitog razvijenog računalnog programa izvršena je obrada AIS podataka (dekodiranje, vizualizacija i analiza istih). Na temelju AIS podataka okarakteriziran je pomorski promet na obalama Portugala te je napravljena statistička analiza pomorskog prometa. Vizualizacija je ostvarena tako da je razmatrano geografsko područje koje je omeđeno s dvije paralele i dva meridijana predstavljeno matricom čiji elementi predstavljaju piksele na slici razmatranog geografskog područja (intenzitet boje piksela varira u ovisnosti o intenzitetu prometa na toj geografskoj lokaciji). Korišteni pristup izračunava broj kandidata za sudar direktno iz dekodiranih AIS poruka i koncepta dijametara sudara  $D_{ij}^{(1,2)}$  (vidjeti Poglavlje 3.2) [40]. Ovim pristupom izračunava se broj kandidata za sudar tako što se izračunavaju buduće pozicije brodova i njihove međusobne udaljenosti na temelju pozicija, kursova i brzina sadržanih u AIS porukama, te se udaljenosti među brodovima uspoređuju s dijametrom sudara. Ako je udaljenost između bilo koja dva broda manja od dijametara sudara tih dvaju brodova, par se smatra kandidatom za sudar (izračun se odvija u intervalima od 30 sekundi). Koncept dijametara sudara koristi se za plovidbenu situaciju nasuprotnih i pretjecanih sudara, te sudara pri križanju kursova (plovidbene situacije nasuprotnih i paralelnih kursova mogu se promatrati kao specijalni slučaj matematičkog modela autora P.T. Pedersen za situaciju križanja kursova [40]). Model grafički prikazuje distribuciju identificiranih kandidata za sudar

na razmatranom geografskom plovidbenom području. Koriste se vrijednosti korekcijskih čimbenika iz drugih studija kako bi se dobio stvarni očekivani broj sudara.

U modelu [48] umjesto dijametra sudara koristi se koncept tzv. „minimum distance to collision“ (MDTC) koji se izračunava pod pretpostavkom da oba broda poduzimaju manevar za izbjegavanje sudara u situaciji gdje su isti i kandidati za sudar. Kandidat za sudar nastaje ako udaljenost između brodova nije dovoljna za poduzimanje manevra za izbjegavanje sudara. Udaljenost i vrijeme potrebno za poduzimanje manevra za izbjegavanje ovise prvenstveno o hidrodinamičkim i manevarskim osobinama tipa broda. Implementacija manevra za izbjegavanje sudara u modelu za procjenu vjerojatnosti nastanka sudara prvi se put pojavljuje u istraživanju [49], no taj je model bio ograničen na samo jedan tip brodova, te situaciju nasuprotnih i paralelnih kursova. Ovaj model uključuje 4 tipa brodova različitih veličina, uz pretpostavku da se brodovi kreću svojim maksimalnim brzinama, plove na otvorenom moru, te istovremeno započinju manevar za izbjegavanje sudara. Kao temelj ovog modela koristi se model sudara molekula koji je korišten u zračnom prometu za procjenu broja sudara zrakoplova [50]. Brod je predstavljen točkom u sredini kruga koji predstavlja područje u kojem se ne smije pojaviti nikakav drugi objekt (brod), tzv. „no-go area“ (Slika 3).



Slika 3: Brod predstavljen točkom u sredini kruga i definicija sudara [48]

Kandidatom za sudar proglašavaju se dva broda u situaciji gdje dolazi do preklapanja krugova tih dvaju brodova tako da točka jednog kruga uđe u područje kruga čiji je radijus jednak sumi radijusa dvaju originalnih krugova. Vrijednost promjera kruga sa Slike 3 je MDTC vrijednost koja nije fiksna, te se pojedinačno izračunava za svaki tip broda i susreta. Ako je udaljenost između dvije točke (dva broda) manja od MDTC vrijednosti, sudar je neizbježan bez obzira na poduzete manevre za izbjegavanje istog, te model proglašava kandidat za sudar. Model se također oslanja direktno na AIS podatke, a testiran je na geografskom plovidbenom području „Gulf of Finland“. Korišteni su postojeći korekcijski čimbenici iz literature.

Kasnije je u radu [24] upotrijebljen MDTC koncept [48] u svrhu izračuna učestalosti sudara brodova u nekoliko važnijih lučkih prilaza na području Singapura. U ovom radu krug



broda (opisano u [48]) formuliran je kao matematička funkcija kuta između kursnih linija dvaju brodova, tipova brodova i prosječne dužine dvaju brodova. Uz pomoć spomenute funkcije kvantitativno je izražena povezanost između kruga broda, te nekih karakteristika broda (dužina broda, tip broda, kut presijecanja kursne linije drugog broda). Pronađena je zadovoljavajuća podudarnost rezultata ovog istraživanja (učestalosti sudara) i povijesnih statističkih podataka o sudarima brodova na području Singapurske luke.

Opsežni podaci prikupljeni od nacionalne mreže Obalne straže SAD-a korišteni su u modelu [51] za identifikaciju kandidata za sudar. Kandidati za sudar određeni su iterativnom obradom AIS podataka i korištenjem izmijenjene tzv. kvaternionske brodske domene (engl. quaternion ship domain) [52]. Izračunata je korelacija između detektiranih kandidata za sudar i stvarnih sudara iz baze podataka, a rezultati su pokazali nedostatnu statističku korelaciju između detektiranih kandidata za sudar i broja stvarnih sudara. Autori su navedene rezultate pripisali različitim ostalim čimbenicima koji nisu uključeni u model (geometrija plovidbenog puta, vremenski uvjeti, regulative, ljudski čimbenik itd.). Na temelju okvira (2) ovaj model uvodi dodatan korekcijski čimbenik pod nazivom vjerojatnost izbjegavanja sudara, te je istog potrebno odrediti pomoću ekspertnog znanja na temelju percipirane vjerojatnosti izbjegavanja drugog broda koji se približava u nekoj hipotetskoj situaciji.

Drugi model [53] koji koristi vlastitu dinamičku brodsku domenu razvijen je i testiran koristeći AIS podatke područja ušća rijeke Yangtze. Predložena brodska domena u obzir uzima neke vanjske čimbenike iz okoliša (vidljivost i meteorološke uvjete) koji utječu na vjerojatnost sudara brodova, što je rijetkost među ovakvim modelima općenito. Navedeni model nastoji iz makroskopske perspektive, na temelju protoka prometa, gustoće prometa i brzine prometa, kao i vidljivosti, širine plovidbene rute i vremenskih uvjeta, pronaći vezu između ovih varijabli i učestalosti sudara u područjima ušća rijeke Yangtze koristeći AIS podatke. Autori su modelirali učestalost sudara brodova kao vjerojatnosnu funkciju utjecajnih čimbenika koji uključuju prometne karakteristike i gore spomenute uvjete okoliša. Kako bi kvantificirali i kalibrirali učinke ovih čimbenika koji utječu na radijus brodske domene, u istraživanju je sudjelovalo više od 200 ljudi, uključujući kapetane brodova i glavne časnike. Korišteni su korekcijski čimbenici iz drugih studija. Rezultati su uspoređeni sa stvarnom statistikom sudara tog plovidbenog područja.

Razvijeni model za kvantitativnu procjenu rizika [11] korišten je za procjenu rizika sudara brodova u Singapurskom tjesnacu, uključujući učestalost i posljedice sudara brodova. U

istraživanju su obrađeni AIS podaci i detektirani kandidati za sudar koristeći brodsku domenu temeljenu na [48]. Rezultati su uspoređeni sa stvarnim sudarima u singapurskom tjesnacu uz korištenje posuđenih korekcijskih čimbenika iz literature. Autori ističu da izračun učestalosti sudara s ovim modelom daje uvid u trenutno stanje rizika na plovidbenom putu, a ne uvid u razinu rizika koja bi nastupila ako bi na plovidbenom putu došlo do primjene novih prometnih pravila i propisa radi povećanja sigurnosti. U skladu s navedenim nedostatkom, autori predlažu strategiju prema kojoj bi se ovaj model dodatno ugradio u simulacijski model broskog prometa gdje bi se umjetno generirao brodski promet, te određivala učestalost sudara brodova u hipotetskim scenarijima.

Susreti brodova klasificirani su u Sjevernom moru pomoću razvijenog modela temeljenog na obradi AIS podataka [54]. U modelu su korišteni TCPA (engl. Time to the Closest Point of Approach) i DCPA (engl. Distance of the Closest Point of Approach) kao indikatori za otkrivanje susreta brodova s nestandardnim obrascima susreta, te je model razlikovao i klasificirao nestandardne pretjecajne i nasuprotne susrete, te susrete pri križanju kursova na temelju prikupljenih AIS podataka dvogodišnjeg razdoblja. Ova studija pokrenuta je zbog potrebe evaluacije rizika na novim rutama unutar plovidbenog područja, napravljena je usporedba novih i starih struktura ruta na plovidbenom području (AIS podaci obuhvaćali su oba razdoblja), te su identificirane opasne lokacije unutar analiziranog plovidbenog područja.

U istraživanju [55], umjesto koncepta brodske domene, u okviru modela je razvijen i korišten tzv. VCRO (engl. Vessel Conflict Ranking Operator) za detekciju i rangiranje kandidata za sudar iz AIS podataka sjevernog Baltičkog mora. Najviše rangirani susreti (najopasniji susreti) brodova evaluirani su od strane eksperata o tome jeli takvi susreti predstavljaju kandidate za sudar ili ne. Izrađena je matematička formulacija VCRO operatora na temelju intervjua stručnjaka, gdje su uključeni sljedeći utjecajni čimbenici: udaljenost između dvaju brodova, brzina promjene udaljenosti određena relativnom brzinom dvaju brodova i relativna orijentacija dvaju brodova određena razlikom između njihovih kursova. Područja pojave kandidata za sudar uspoređena su s poznatim kritičnim područjima iz stvarnog svijeta utvrđenim na temelju mišljenja stručnjaka i povijesti nesreća. Pronađena je podudarnost rezultata s kritičnim područjima koja su otkrivena analitičkim modelima u sjevernom Baltičkom moru u okviru jedne od prethodno provedenih studija [56].

U okviru istraživanja [57] razvijen je model za procjenu učestalosti sudara brodova u geografskom plovidbenom području Sabine-Neches Waterway (SNWW) smještenom u

jugoistočnom Teksasu. Model se oslanja direktno na prikupljene AIS podatke na temelju kojih uz pomoć teorije domene brodova (domene predstavljene krugovima i elipsama) [58, 59] procjenjuje učestalost sudara brodova, te ujedno pronalazi lokacije s najvećim rizikom od nastanka sudara. U osnovi modela nalazi se algoritam za detekciju kandidata za sudar koji uspoređuje podatke (relevantne za detekciju sudara, npr. pozicija broda u nekom vremenskom trenutku) svake AIS poruke (svakog pojedinog broda) s podacima svih ostalih AIS poruka, ako postoji vremensko-prostorna podudarnost podataka koji se uspoređuju unutar AIS poruka. Zbog velike procesorske zahtjevnosti korišteni su AIS podaci prikupljeni unutar dva mjeseca.

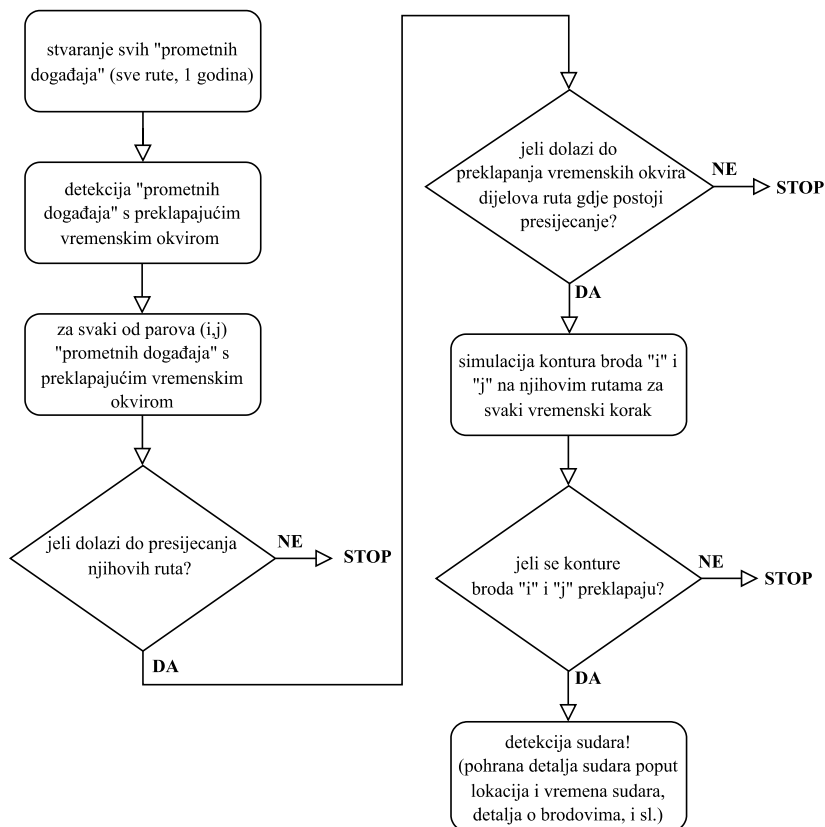
Model za izračunavanje učestalosti sudara temeljen na inovativnom algoritmu za detekciju kandidata za sudar, tzv. “Time Discrete Non-linear Velocity Obstacle (TD-NLVO)” predstavljen je u istraživanju [15]. Korišteni su AIS podaci s područja luke Aarhus u Danskoj. Za razliku od većine modela u kojima se detekcija kandidata za sudar vrši pomoću prostorno-vremenske povezanosti između brodova u određenim vremenskim trenucima gdje su zadovoljeni određeni uvjeti za nastanak sudara (npr. preklapanje domena dvaju brodova), u ovom modelu se kandidat za sudar definira kao par brodova koji se nalazi u “procesu susreta” koji traje određeno vrijeme i unutar kojeg je brzina jednog od brodova postala izjednačena s nekom od prethodno izračunatih brzina iz određenog skupa brzina. Spomenuti skup brzina računa se pomoću TD-NLVO algoritma, koji u obzir uzima i promjenjivu kinematiku brodova koji se nalaze u “procesu susreta”. Naknadno su autori razvili unaprijeđenu verziju algoritma koja iz AIS podataka detektira kandidate za sudar u situacijama gdje u susretu sudjeluje više brodova [60].

### **3.5. Simulacijski modeli**

Većina modela temeljenih na računalnim simulacijama i ostalim tehnikama simulacijskog modeliranja prilagođena je specifičnim plovidbenim područjima uz upotrebu AIS podataka, te se temelji na konceptu izračunavanja broja kandidata za sudar, koji je opisan u uvodnom poglavlju.

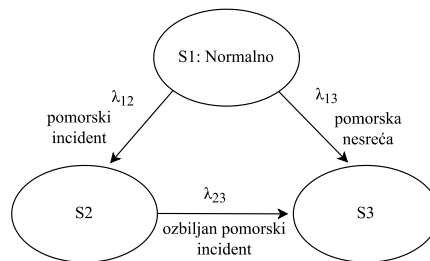
Model [41, 61] razvijen je u svrhu procjene učestalosti sudara brodova, uz istovremeno predviđanje lokacije i vremena nastanka sudara unutar simuliranog vremenskog razdoblja. Model se temelji na mikrosimulaciji prometa brodova unutar geografskog plovidbenog područja „Gulf of Finland“ uz korištenje Monte Carlo simulacijske tehnike. Model određuje broj kandidata za sudar i lokacije takvih sudara, te se koriste postojeći korekcijski čimbenici iz

literature. Plovidba svakog individualnog broda simulirana je u vremenskoj domeni. Ulazni podaci za simulaciju, poput ruta, strukture i broja brodova na pojedinim rutama, vremena plovidbe, te dimenzija i brzina brodova, prikupljeni su iz AIS podataka plovidbenog područja „Gulf of Finland“. Model koristi koncept tzv. „prometnog događaja“. Plovidba svakog individualnog broda s pripadajućim karakteristikama (dužina, širina i tip broda, vrijeme isplovljavanja, plovidbena ruta, te brzina broda) od polazišta do odredišta naziva se „prometnim događajem“. Simulirano vrijeme je jedna godina, a za svaku pojedinu rutu generiraju se „prometni događaji“ čiji broj odgovara volumenu godišnjeg prometa na toj ruti. Pripadajuće karakteristike svakog pojedinog „prometnog događaja“ nasumično se odabiru na temelju ulaznih distribucija koje su generirane uz pomoć AIS podataka. Jedan skup generiranih „prometnih događaja“ predstavlja jednu moguću prometnu situaciju tijekom godine dana (jedna reprezentacija stohastičkog procesa). Kandidati za sudar se predviđaju na temelju generiranog skupa „prometnih događaja“ uz pretpostavku da brodovi ne poduzimaju nikakve manevre za izbjegavanje sudara. Algoritam za predviđanje sudara analizira jednu reprezentaciju stohastičkog procesa u svrhu pronalaska onih kombinacija „prometnih događaja“ kojima se u barem jednom vremenskom trenutku preklapaju konture brodova – brodovi se nalaze istovremeno na identičnoj lokaciji, te model proglašava sudar. Algoritam za detekciju sudara prikazan je na Slici 4.



Slika 4: Ilustracija algoritma za detekciju sudara [41, 61]

U istraživanju [62] predstavljen je model za utvrđivanje učestalosti pomorskih nesreća u slučaju nedostatka ili ograničenja podataka koji sadrže podatke relevantne za procjenu rizika. Ovaj je model univerzalan i prikladan za sve vrste pomorskih nesreća i ne zahtijeva veliku količinu podataka za analizu (npr. AIS podaci). Pristup se temelji na Markovljevom modeliranju i tzv. „Markov Chain Monte Carlo“ (MCMC) simulaciji. Markovljev model s tri stanja koristi se kako bi se pohranile i procijenile učestalosti pomorskih nesreća i njihove vjerojatnosti. Autori u modelu razlikuju tri vrste događaja (različiti stupnjevi ozbiljnosti događaja): pomorska nesreća, pomorski incident i ozbiljan pomorski incident. Sukladno navedenom, u modelu je predložen graf s tri stanja koji je primjenjiv za bilo koju vrstu pomorske nesreće (Slika 5).



Slika 5: Markovljev model pomorskih nesreća [62]

Tri stanja u modelu su: S1 – Normalno, S2 – Blizu nesreće i S3 – Nesreća.  $\lambda_{12}$  je stopa prelazaka iz stanja 1 u stanje 2,  $\lambda_{13}$  je stopa prelazaka iz stanja 1 u stanje 3, i  $\lambda_{23}$  je stopa prelazaka iz stanja 2 u stanje 3. Koristeći „slice sampling algorithm“ (jednu od metoda MCMC simulacije koja generira slučajne brojeve iz distribucije) autori su procijenili učestalosti pojavljivanja pomorskih nesreća, pomorskih incidenata i ozbiljnih pomorskih incidenata. MCMC simulacija zahtijeva inicijalne podatke (nepotpune ili ograničene) učestalosti pomorskih nesreća Markovljevog modela u svrhu procjene rizika. Podaci i izvješća tijela Australian Transport Safety Bureau (ATSB) iz 2011. godine korišteni su u simulaciji. Rezultati su pokazali da na simulirane učestalosti nesreća nisu bitno utjecale stvarne učestalosti nesreća iz inicijalnih podataka, a simulirana učestalost nesreća u periodu od 5 godina bilježi blagi pad.

Grupa istraživača s tri američka sveučilišta (The George Washington University, Rensselaer Polytechnic Institute i Virginia Commonwealth University), tzv. GWU-RPU-VCU grupacija, razvila je dinamički računalni simulacijski model za brojanje kandidata za sudar s ciljem procjene rizika sudara brodova u “Washington state ferry“ (WSF) sustavu [63].

Za svaki par brodova model računa CPA (engl. Closest Point of Approach – CPA) [64], kut susreta, i vrijeme nastanka CPA na temelju kojih se klasificiraju, te broje kandidati za sudar. Model koristi vlastite korekcijske čimbenike koji su određeni na temelju statističkih podataka. Opseg ovog modela i istraživanja nije bio ograničen samo na procjenu rizika sudara brodova, već je uključivao i procjenu rizika ostalih incidenata u pomorskom prometu (nasukavanja, eksplozije, vatra, itd.) uz upotrebu ekspertnog znanja.

Autori iz grupacije GWU-RPU-VCU kasnije su razvili sličan dinamički računalni simulacijski model za brojanje kandidata za sudar koji je prilagođen za geografsko plovidbeno područje “San Francisco Bay“ [65]. Model je razvijen zbog planiranja uvođenja novih plovidbenih ruta u samom zaljevu i potrebe poznavanja profila rizika nakon uvođenja istih. Simulacijski model je izrađen na temelju detaljnog poznavanja strukture pomorskog prometa i svih pripadajućih karakteristika, rasporeda plovidbe i vidljivosti. Informacije su prikupljene iz statističkih podataka i konzultacija s posadom i kapetanima (npr. brzine brodova u područjima s određenim stupnjem vidljivosti). Geografsko plovidbeno područje i plovidbene rute su vizualno predstavljene računalom, a geografsko plovidbeno područje podijeljeno je na ćelije gdje svaka ćelija posjeduje određeni stupanj vidljivosti. Brodovi su predstavljeni trokutima, a kandidati za sudar se određuju na temelju CPA, tj. analogno kao u radu [63]. Svaki par koji je kandidat za sudar zapisuje se u bazu podataka (tip broda, vrijeme susreta, kut susreta, lokacija susreta, vidljivost na lokaciji susreta), te se potom grafički iscrtava geografsko područje s ćelijama u bojama. Boje ćelija ovise o broju kandidata za sudar koji je detektiran na svakoj pojedinoj ćeliji. Tako su identificirane potencijalno opasne geografske lokacije koje zahtijevaju posebnu pozornost.

Simulacijski model za procjenu rizika različitih vrsta pomorskih nesreća u geografskom plovidbenom području “Strait of Istanbul“ predstavljen je u radu [66]. Plovidbeno područje dijeli se na ćelije, te se za svaku ćeliju procjenjuje rizik (razmatraju se različite vrste pomorskih nesreća, npr. sudari, nasukavanja, vatra, itd.) pri ulasku svakog novog broda u ćeliju. Model najprije procjenjuje u kojoj mjeri novi brod koji ulazi u ćeliju doprinosi nastanku pomorske nesreće, potom procjenjuje doprinose svih ostalih brodova u ćeliji, te naposljetku računa kumulativni doprinos svih postojećih brodova u ćeliji. Model pri procjeni rizika uzima u obzir niz čimbenika, kao što su: detaljna struktura prometa brodova, raspored isplovljavanja, vidljivost, morske struje, težina navigacije na pojedinim područjima kanala. Rizik se procjenjuje uz pomoć vlastite brojčane ljestvice stupnja rizika.

Simulacijski model temeljen na celularnim automatima (engl. Cellular Automata) za procjenu broja sudara brodova u geografskom području "Singapore Strait" predstavljen je u radu [67]. Modeli diskretnih događaja koriste se za generiranje brodova nekoliko kategorija i brzina iz četiri važnija smjera unutar kanala. Također se koristi i 15 pravila (na temelju ekspertnog znanja i intervjuiranja kapetana) kako bi se simulirao odgovor pomorca na različite navigacijske scenarije, a koji se očituje u promjeni brzine i kretanja broda. Kandidati za sudar mogu se detektirati uz pomoć kriterija prema kojemu se udaljenost od pola nautičke milje i vrijeme susreta od pet minuta između dva broda smatra kritičnom situacijom, no autori ističu da je moguće implementirati i neke druge kriterije.

Simulacijski model koji procjenjuje broj kandidata za sudar u portugalskim vodama, tj. u području „Tagus River Estuary“, opisan je unutar istraživanja [68]. Simulacija kretanja brodova postignuta je korištenjem Artificial Potential Field (APF) metode i Monte Carlo simulacijskom tehnikom, a detekcija kandidata za sudar izvršena je uz pomoć koncepta „domene broda“ [69]. Ulazni podaci za model prikupljeni su iz AIS podataka spomenutog područja. Na temelju AIS podataka definirane su rute i pripadajuće prometne karakteristike svake rute. Trajektorije brodova dobivene su na temelju simulacije prometa u trajanju od 30 dana, te je izvršena usporedba putanja dobivenih simulacijom i putanja izvedenih iz AIS podataka. U svrhu detekcije kandidata za sudar definirane su brodske domene za svaki brod na temelju njihovih položaja u svakom vremenskom trenutku. Ako je došlo do preklapanja domena dvaju brodova, taj par je definiran kao kandidat za sudar, a mjesto susreta je snimljeno. Rezultati simulacije uspoređeni su s rezultatima dobivenim direktnom obradom AIS podataka. Ovaj model predstavlja poboljšanu verziju autorove prethodne verzije modela [72] budući da ova verzija uzima u obzir distribuciju prometa duž širine plovidbenog puta, distribuciju brzine za različite vrste brodova i promjene brzine koje se događaju duž glavnih ruta.

### 3.6. Modeli utjecaja manevra izbjegavanja sudara

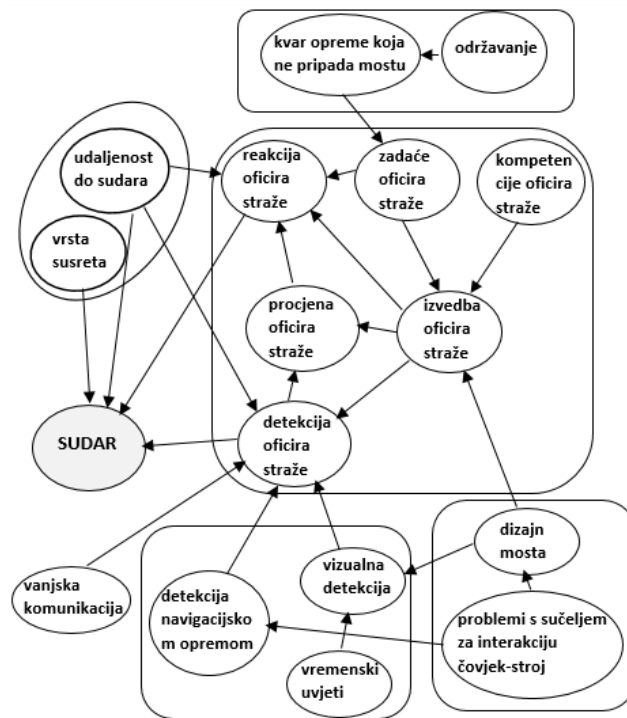
Modeli utjecaja manevra izbjegavanja sudara, tj. modeli pomoću kojih se računaju korekcijski čimbenici mogu se promatrati kao modeli komplementarni s analitičkim modelima [70]. Vjerojatnost da susret koji je kandidat za sudar rezultira stvarnim sudarom predstavlja neizostavan element pri procjeni učestalosti sudara brodova. Kao što je već spomenuto u uvodnom poglavlju, vjerojatnost neuspješnog izbjegavanja sudara u situaciji gdje postoje geometrijski kandidati za sudar, tj. vjerojatnost neuspješnog manevra za izbjegavanje sudara naziva se još i korekcijski čimbenik, a označava kao  $P_c$  (2). U nastavku je dan kratak opis metoda koje se koriste za izračunavanje korekcijskog čimbenika, a to su: izračun korekcijskog čimbenika pomoću statističkih podataka o broju sudara na nekom plovidbenom području, izračun korekcijskog čimbenika pomoću analize stabla grešaka (engl. Fault Tree Analysis – FTA) i izračun korekcijskog čimbenika pomoću Bayesove mreže (engl. Bayesian network) [14, 42, 71]. Valja naglasiti da je većina postojećih modela različitih plovidbenih područja i različitih autora realizirana uz pomoć navedenih metoda (modelska logika je analogna, no podaci korišteni u modelima se razlikuju). Izračun korekcijskog čimbenika pomoću povijesnih statističkih podataka je najjednostavniji pristup gdje se korekcijski čimbenik za neko područje izračunava iz omjera broja stvarnih zabilježenih sudara i procijenjenog broja geometrijskih kandidata za sudar na tom području [72]. Primjeri takvih modela mogu se naći u radovima [16, 17], a od novijih istraživanja u radu [72]. Ovakav pristup zahtjeva dostupnost i točnost povijesnih statističkih podataka o sudarima što može predstavljati problem. Nadalje, uvid u detaljne uzroke nastanka sudara nije moguć ovakvim pristupom, a to znači da je otežano i donošenje mjera za smanjenje rizika od sudara [71]. Modeli izrađeni pomoću analize stabla grešaka i Bayesove mreže češće su korišten pristup u novije vrijeme, te osim iznosa vrijednosti korekcijskog čimbenika, pružaju uvid i u niz (lanac) događaja koji je rezultirao sudarom.

Stablo grešaka je logički dijagram uz pomoć kojeg se u pomorskom prometu može određivati vjerojatnost nesreće koristeći Booleovu logiku (engl. Boolean logic) koja kombinira niz “događaja” niže razine i njihove uzročne veze, a koji mogu dovesti do sudara (npr. kvar radara, umor pomorca) [14, 42]. Analiza stabla grešaka se općenito provodi na temelju uzročno-posljedične analize izvještaja o nesrećama ili ekspertnog znanja stručnjaka na tom području. Spomenuti “događaji” se smještaju u različite skupine na temelju prepoznatih uzročno-posljedičnih odnosa u obliku Booleovih vrata (npr. I, ILI, itd.), te se formira struktura u obliku “stabla” kako bi se grafički ilustrirali utjecaji „događaja“ niže razine na glavni „događaj“, tj.



sudar brodova. Vjerojatnost svakog pojedinog „događaja“ niže razine određuje se pomoću statističke analize, intervjuiranja stručnjaka, upitnika, itd., a vjerojatnost glavnog „događaja“, tj. sudara brodova izračunava se pomoću Booleove logike. Ovaj način izračunavanja korekcijskog čimbenika kod sudara brodova uz istovremenu analizu uzroka koji su doveli do nesreće preporučen je i od strane IMO organizacije u okviru Formal Safety Assessment (FSA) metodologije [73]. Analiza stabla grešaka za izračunavanje korekcijskog čimbenika korištena je i u jednom od najpoznatijih modela [40]. U radu [25], uz pomoć stabla grešaka opisan je opsežan model za izračunavanje korekcijskog čimbenika sudara tankera, a naglasak je stavljen na detaljnu analizu ljudskih pogrešaka koje doprinose nastanku sudara. Slično istraživanje pomoću stabla pogrešaka, a koje se odnosi na sudare tankera opisano je i u radu [74], dok je u radu [75] prikazan model za izračunavanje korekcijskog čimbenika za sudare RoPax brodova. Rad [46] daje prikaz generalnog modela za računanje korekcijskog čimbenika sudara brodova pri dobroj vidljivosti.

Nedostaci korištenja stabla grešaka kod ovakvih modela očituju se kroz eksponencijalni rast strukture stabla pri dodavanju „događaja“ koji se uzimaju u obzir pri utjecaju na nastanak sudara [71]. Drugi nedostatak stabla grešaka je Booleova logika koja stanja komponenti opisuje binarno, te ne omogućava postojanje više od dva stanja [14]. Bayesova mreža eliminira spomenute nedostatke, a upotreba iste za procjenu rizika u pomorskom prometu u značajnom je porastu kroz posljednje desetljeće [21, 71]. Bayesova mreža je struktura sastavljena od usmjerenih acikličkih grafova koji se sastoje od čvorova (predstavljaju varijable), lukova (predstavljaju ovisnosti među varijablama), te tablice uvjetnih vjerojatnosti koja sadrži uvjetne vjerojatnosti pojave svakog stanja varijable. Kaže se da za svaku varijablu  $A$  koja ima roditeljske čvorove  $B_1, \dots, B_n$  postoji tablica uvjetnih vjerojatnosti  $P(A|B_1, \dots, B_n)$ , a ako varijabla  $A$  nema roditeljskih čvorova pridružena joj je vjerojatnost  $P(A)$ . Dakle, čvorovi su varijable koje mogu imati konačan broj različitih stanja, a svako stanje može imati neku vjerojatnost pojave. Primjerice, čvor „Vremenski uvjeti“ može imati stanja „Dobro“ i „Loše“. Na vjerojatnosti pojave stanja čvora mogu utjecati i drugi čvorovi (predstavljeno lukovima). Za identifikaciju relevantnih čvorova i ovisnosti među njima, te izradu tablice uvjetnih vjerojatnosti, mogu se koristiti povijesni statistički podaci i znanje stručnjaka (ili kombinacija jednog i drugog). Više detalja o Bayesovim mrežama moguće je pronaći u radu [76]. Generički oblik Bayesove mreže za modeliranje i izračun korekcijskog čimbenika sudara brodova prikazan je na Slici 6 [77].



Slika 6: Generički oblik Bayesove mreže za procjenu rizika sudara brodova [65]

Brojni su primjeri upotrebe Bayesove mreže u svrhu procjene rizika sudara brodova. U studiji slučaja [78] predstavljen je model temeljen na Bayesovoj mreži za procjenu rizika sudara RoPax brodova na otvorenom moru (provjeren na plovidbenom području Gulf of Finland), te generalni okvir na temelju kojeg je preporučeno vršiti procjenu rizika u pomorskom prometu općenito. U [64] korištena je Bayesova mreža i metoda procjene ljudske pouzdanosti (engl. Human Reliability Analysis – HRA) u svrhu izrade modela za analizu rizika sudara naftnih tankera. U radu je također demonstrirana mogućnost kombiniranja Bayesove mreže i stabla grešaka. Rad [79] opisuje generalni model za procjenu rizika u pomorskom prometu, a naglasak je stavljen na ljudske i organizacijske čimbenike. U radovima [40] i [43] korišteni su modeli temeljeni na Bayesovoj mreži kako bi se izračunali korekcijski čimbenici za različite scenarije sudara brodova (npr. pretjecajne sudare, nasuprotne sudare, sudare pri križanju kursova). Također je u svrhu razvoja računalnog programa IWRAP (vidjeti Poglavlje 3.2) u radu [28] korištena Bayesova mreža za izračunavanje korekcijskog čimbenika. U radu [80] opisan je model temeljen na Bayesovoj mreži za izračun korekcijskog čimbenika područja luke Chittagong (najveća luka u Bangladešu). Kao što je prethodno objašnjeno, korekcijski čimbenici koriste se kako bi se nerealan broj kandidata za sudar sveo na realan očekivani broj sudara, a postojeći korekcijski čimbenici nekih geografskih plovidbenih područja i situacija prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1: Pregled postojećih korekcijskih čimbenika nekih plovidbenih područja i situacija

[28]

(x 10 <sup>-4</sup> )	Situacija i plovidbeno područje
5,18	Dover Strait, nasuprotni kursovi bez odvajanja plovidbenog smjera
3,15	Dover Strait, nasuprotni kursovi s odvajanjem plovidbenog smjera
0,27	Oresund - Denmark, nasuprotni kursovi
0,49	Japanese Straits, nasuprotni kursovi
1,23	Japanese Straits, križanje kursova
1,11	Dover Strait, križanje kursova bez odvajanja plovidbenog smjera
0,95	Dover Strait, križanje kursova s odvajanjem plovidbenog smjera
1,2	Strait of Gibraltar, nema specifikacije
1,1	Japanese Straits, pretjecajni kursovi
1,3	Great Belt - Denmark, promjena smjera protezanja plovidbenog puta
0,5	IWRAP software-default, nasuprotni kursovi
1,3	IWRAP software-default, križanje kursova i promjena smjera protezanja plovidbenog puta
1,1	IWRAP software-default, pretjecajni kursovi
1,5	IWRAP software-default, model plovidbe brodova distribuiranih na slučajan način

## 4. MODELIRANJE I SIMULIRANJE PROMETNIH SUSTAVA

### 4.1. Mogući pristupi

Simulacija prometnog sustava uključuje prethodno modeliranje sustava, tj. izradu modela koji predstavlja pojednostavljenu verziju stvarnog prometnog sustava. Zbog kompleksnosti prometnih sustava ne postoji jedinstvena teorija na temelju koje se sustav modelira. Većina modela mogu se kategorizirati kao empirijski, analitički i simulacijski modeli [81]. Empirijski modeli predviđaju ponašanje sustava na temelju relacija dobivenih primjenom statističkih metoda na većem uzorku mjernih podataka. Analitički modeli su razvijeni na temelju teoretskih razmatranja, a parametri modela su vrednovani na temelju terenskih podataka. Dok su analitički i empirijski modeli determinističke prirode, simulacijski modeli su najčešće stohastičke prirode. Deterministički modeli prilikom svakog istog ulaznog podatka imaju jednak izlazni podatak, te je izlazni podatak uvijek isti bez obzira na to koliko se puta pojavi isti ulazni podatak. Stohastički modeli za svaki ulazni podatak (pa i ponovljeni) gotovo sigurno neće imati jednak izlazni podatak. Stohastički modeli koriste slučajne varijable i algoritme pomoću kojih definiraju prometni tok u prostoru i vremenu na takav način da modeliraju kretanje svakog vozila i njihovu međusobnu interakciju, te se pokazatelji potrebni za vrednovanje pojedinog rješenja mjere iz simuliranog toka [82]. Simulacijski modeli u prometu koriste se u velikoj mjeri u područjima istraživanja, planiranja, odlučivanja, demonstracija i razvoja prometnih sustava. Mogu se klasificirati kao [83]:

- Statički/Dinamički: Dinamički modeli uzimaju u obzir vremensku komponentu, dok statički ne uzimaju.
- Kontinuirani/Diskretni: Kod kontinuiranih modela stanje sustava se kontinuirano mijenja kroz vrijeme, dok se kod diskretnih modela stanje sustava mijenja samo u određenim vremenskim instancama.
- Deterministički/Stohastički: Stohastički modeli uključuju slučajne varijable i distribucije vjerojatnosti za razliku od determinističkih.

Simulacijski modeli se također mogu klasificirati prema razini detalja koju uzimaju u obzir [83]:

- Mikroskopski modeli: Entiteti sustava i njihove interakcije opisane su uz visoku razinu detalja. Drugim riječima, mikroskopski modeli polaze od promatranja zakonitosti

kretanja pojedinih prometnih entiteta, tj. pojedinih vozila, brodova i sl., te njihovih interakcija.

- Makroskopski modeli: Entiteti, njihove aktivnosti i interakcije opisane su globalnim funkcijskim varijablama. Drugim riječima, makroskopski modeli promatraju prometni tok kao funkciju prosječne vrijednosti brzine, gustoće i intenziteta toka.
- Mezoskopski modeli: Entiteti sustava su opisani kao pojedinačni prometni entiteti, dok su njihove aktivnosti i interakcije opisane globalnim varijablama. Drugim riječima, mezoskopski modeli objedinjuju makroskopski i mikroskopski pristup.

Odabir vrste modela ovisi o prirodi problema koji se rješava. Lako je uočiti da su mikroskopski simulacijski modeli najbliži realističnim scenarijima te daju direktan uvid u ponašanje pojedinih prometnih entiteta. Visoko-pouzdana mikroskopski modeli mogu vjerno rekonstruirati stvarnost, no mogu biti skupi za razvoj i rad zbog složenosti logičkih odnosa i broja parametara. Mikroskopski pristup je najčešće računalno vrlo zahtjevan jer svaki entitet (npr. vozilo, brod) i sve njegove interakcije moraju biti razmatrane u svakom koraku simulacije [84]. S povećanjem broja entiteta raste kompleksnost sustava i računalna zahtjevnost. Nadalje, analitički matematički mikroskopski modeli zahtjevni su za evaluaciju, a kao rješenje tog problema koriste se mikroskopske računalne simulacije. Kod takvih mikroskopskih računalnih simulacija, prometni entiteti (npr. vozila, brodovi) tretiraju se kao diskretne entitetne jedinice koje se kreću u računalno simuliranom okolišu, te su u međusobnoj interakciji (razvijeni modeli predstavljani u ovom doktorskom radu posjeduju upravo ove karakteristike).

## **4.2. Računalne simulacije i objektno orijentirani pristup modeliranju prometnih sustava**

U ovom poglavlju prikazan je osnovni metodološki koncept korišten u ovom istraživanju pri razvoju modela.

Općenito govoreći, računalna simulacija je simulacija pokrenuta na jednom računalu ili mreži računala, u svrhu reproduciranja ponašanja nekog sustava. Takva simulacija koristi apstraktni model kako bi simulirala stvarni sustav. Apstrakcija je ključ za konstruiranje modela koji će se koristiti u simulacijskom procesu [85]. Apstrakcija je proces koji se odnosi na metodu ili algoritam koji je primijenjen u modelu kako bi se smanjila kompleksnost modela, a pri tom očuvala njegova validnost. Računalna simulacija nekog sustava se može opisati kao pokretanje modela tog sustava na računalu.

Objektno orijentirani pristup, metode, i tehnike uspješno se primjenjuju u opisu ponašanja različitih informacijskih, transportnih, komunikacijskih i drugih kompleksnih sustava [86].

Objektno orijentiranja paradigma građena je na vrlo snažnoj metafori objekta. Objekt je bilo koja stvarna ili zamišljena posebnost u prostoru i vremenu s jedinstvenom identifikacijom. Prema sustavskom inženjerskom objašnjenju, objekt je apstrakcija realnog svijeta koja obuhvaća skup varijabli koje odgovaraju njegovom aktualnom ponašanju [87]. U ovom doktorskom radu naglasak je stavljen na razumijevanje objektno orijentiranog pristupa u kontekstu softverskog inženjerstva i objektno orijentiranog programiranja.

OOP (objektno – orijentirano programiranje) je dizajn filozofija. OOP koristi raznoliki skup programskih jezika, kao što su: C#, C++, Java, Visual Basic.NET itd.. U OOP sve je grupirano u samoodržive „objekte“ [88]. Omogućeno je stvaranje veza i odnosa među objektima (npr. objekti mogu naslijediti karakteristike drugih objekata). Glavne prednosti OOP tehnike omogućavaju programerima da stvore module koji se ne trebaju mijenjati ako se novi tip objekta doda u program (uz poštivanje principa OOP). Novi objekt može naslijediti mnoga svojstva iz postojećih objekata. Zbog toga je objektno orijentirane programe lako modificirati. Objektno orijentirani jezici su posebno učinkoviti i snažni zahvaljujući bibliotekama klasa. Biblioteka klase je preprogramirana kolekcija objektno orijentiranih programskih predložaka [89]. Biblioteke klasa pospješuju ponovnu upotrebu koda tako da implementiraju programske

radnje koje se često koriste, te se zbog toga aplikacije ne trebaju razvijati „od nule“. Različite biblioteke klasa su razvijene za različite svrhe. Kako bi se poboljšalo i ubrzalo programiranje simulacija, razvijane su i različite simulacijske biblioteke za objektno orijentirane programske jezike (npr. SharpSim je biblioteka u C# jeziku razvijena za simulaciju diskretnih događaja). Preporuka je da se moderni objektno orijentirani programski jezici razmatraju kao primarni alat kod izrade simulacija, poglavito kod simulacija diskretnih događaja [90].

## **5. PREDSTAVLJENI RAČUNALNI SIMULACIJSKI MODELI**

### **5.1. Uvodna razmatranja i pretpostavke kod razvoja računalnih simulacijskih modela**

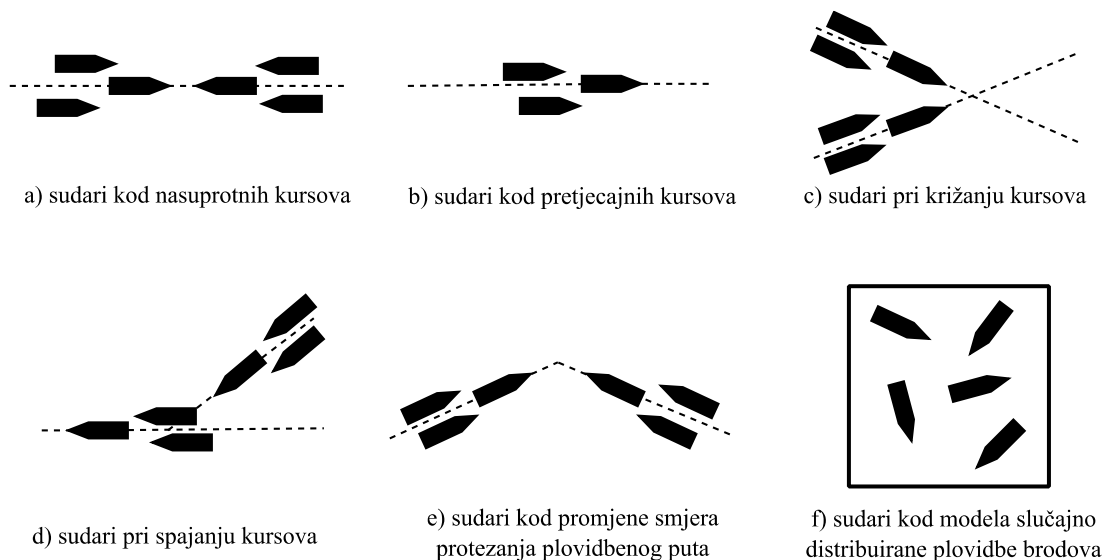
Uočeno je da se većina kvantitativnih modela za procjenu učestalosti sudara brodova temelji na konceptu detekcije kandidata za sudar čiji je broj potom potrebno reducirati na broj realnih očekivanih sudara ili na neki način dovesti u korelaciju s realnim nesrećama [91]. Konvencionalni pristup provodi redukciju koristeći korekcijski čimbenik, tj. vjerojatnost da će kandidat za sudar rezultirati stvarnim sudarom, dok drugi manje konvencionalni pristupi često određuju kandidate za sudar bez pružanja izravne veze sa stvarnom statistikom sudara koristeći ekspertno znanje u svrhu validacije procijenjenog rizika. Prema gore navedenom istraživanju modele je moguće klasificirati kao modele temeljene na obradi AIS podataka, simulacijske modele i analitičke modele. Iako modeli temeljeni na obradi AIS podataka generalno mogu realnije prikazati trenutne prostorno-vremenske prometne obrasce i situacije te pružiti točnije rezultate za sadašnje situacije u usporedbi sa simulacijskim i analitičkim modelima, isti nisu prikladni za testiranje mogućih budućih hipotetskih situacija (npr. promjena volumena i strukture prometa, promjena pravila i regulativa, itd.). Većina modela temeljenih na obradi AIS podataka i simulacijskih modela izravno ovisi o realnim podacima praćenja brodova i usko je vezana uz određeno geografsko plovidbeno područje s vlastitim specifičnim karakteristikama, a primjena istih nad ostalim područjima je otežana. Nadalje, analitički modeli još uvijek su u širokoj upotrebi zbog njihove robusnosti i lakoće primjene nad različitim geografskim plovidbenim područjima. Iako složene navigacijske scenarije ne mogu opisati podjednako dobro kao ostale dvije kategorije modela, analitički modeli zbog lakoće korištenja, te višestruke validacije njihovih rezultata i pripadajućih korekcijskih čimbenika predstavljaju važan doprinos ovom području. Na temelju provedenog autorovog istraživanja utvrđeno je da za model slučajno distribuirane plovidbe brodova i za promjene smjera protezanja plovidbenog puta ne postoje odgovarajući analitički modeli, stoga se simulacijski model nameće kao moguće rješenje [91]. Ključan korak svakog modela je sama metoda detekcije kandidata za sudar, a zbog složenosti situacija susreta brodova i utjecajnih čimbenika koji dovode do sudara u literaturi je prisutan velik broj različitih kriterija za detekciju kandidata za sudar, dok općenito najbolji kriterij još nije utvrđen. Iz navedenih razloga i činjenice da vodeće pomorske organizacije (IMO i IALA) podržavaju pristup iz kategorije „Izravan/gotovo izravan kontakt



brodova i dijamer sudara“ [33, 34, 91], ovo istraživanje usmjereno je na razvoj računalnih simulacijskih modela koji pripadaju navedenoj kategoriji i odnose se na procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i za promjene smjera protezanja plovidbenog puta.

## 5.2. Model slučajno distribuirane plovidbe brodova

Moguće plovidbene situacije u kojima dolazi do sudara brodova (navedene u Poglavlju 3.2) prikazane su na Slici 7.

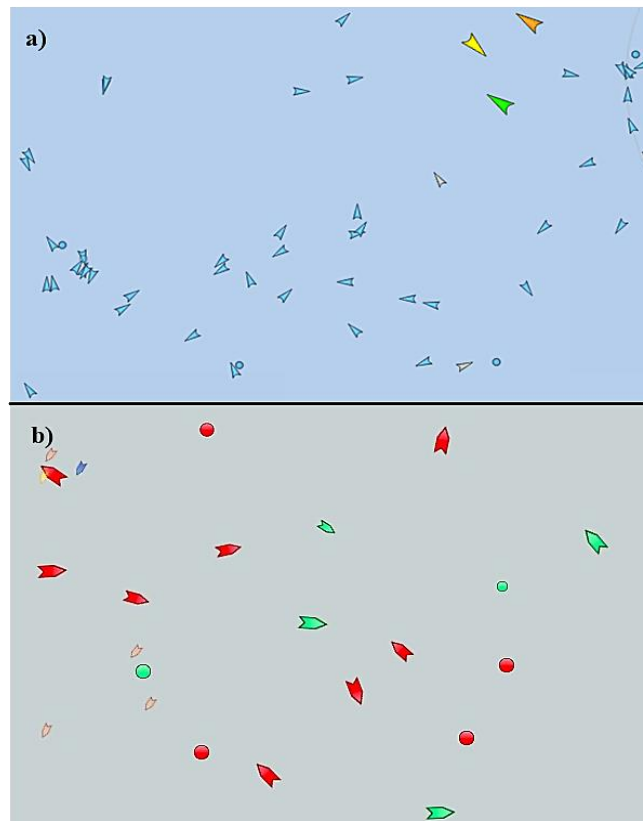


Slika 7: Moguće plovidbene situacije nastanka sudara brodova [19, 28, 38]

Valja istaknuti da Slika 7 prikazuje klasifikaciju sudara brodova prema različitim plovidbenim situacijama (6 situacija) u kojima se sudari događaju, a svaki nastali sudar (neovisno kojoj od 6 situacija pripada) je sudar brodova nastao pod kutom  $180^\circ$ ,  $0^\circ$  ili sudar nastao pod kutom između  $0^\circ$  i  $180^\circ$ . Primjerice, u situaciji f) dva broda mogu se sudariti pod kutom od  $180^\circ$ , no prema gore preuzetoj klasifikaciji taj sudar se neće klasificirati kao sudar situacije a) već kao sudar situacije f).

Model slučajno distribuirane plovidbe brodova ilustriran je situacijom f), a podrazumijeva plovidbu kod koje brodovi ne plove propisanom definiranom pomorskom rutom već proizvoljno odabranim smjerovima. Postojeći modeli za procjenu učestalosti sudara brodova u situacijama a), b) i c) nisu pogodni za situaciju f) zbog nepostojanja ustaljenih pravilnih plovidbenih ruta i pripadajućeg pomorskog toka [71]. Na Slici 8 prikazan je primjer

situacije f) uz pomoć AIS podataka s web servisa VesselFinder [92] i MarineTraffic [93], a koji se odnosi na spomenutu situaciju u talijanskom dijelu Jadranskog mora i istočnom dijelu Mramornog mora.

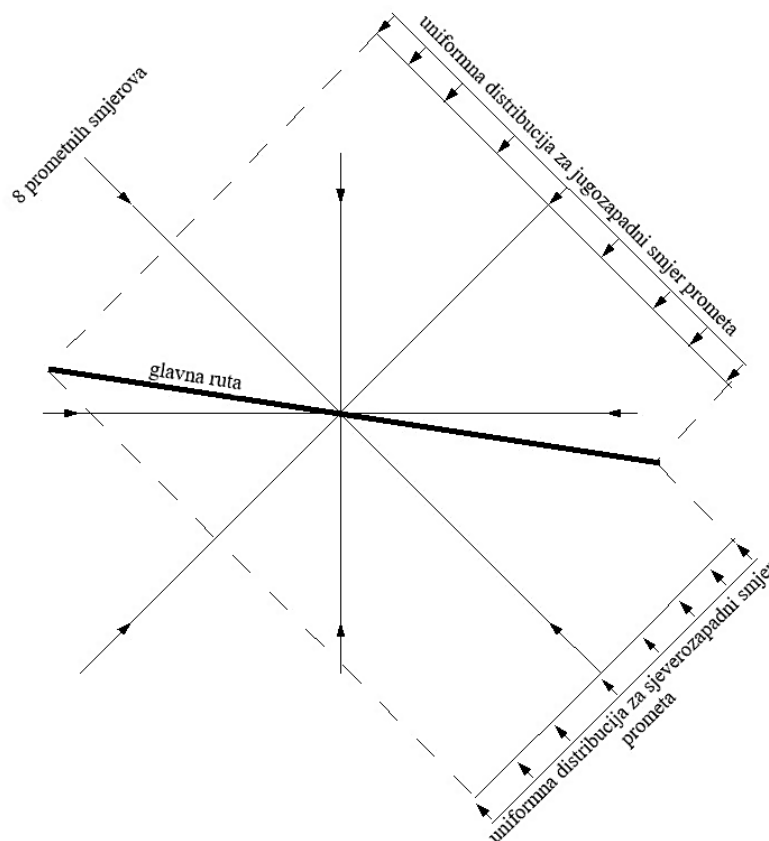


Slika 8: AIS podaci brodova – model slučajno distribuirane plovidbe brodova u a) talijanskom dijelu Jadranskog mora [92] i b) istočnom dijelu Mramornog mora [93]

Ovakav model plovidbe brodova karakterističan je za ribarske brodove, ali i za nautička plovila i jahte. Slika 8b prikazuje da navedeni plovidbeni obrasci mogu uključivati i ostale vrste brodova u određenim plovidbenim područjima (istočni dio Mramornog mora nasuprot tjesnaca Bospor). Važnost razmatranja ovakvog scenarija najbolje se očituje u činjenici da je npr. u vodama Južne Koreje (područje naziva „Wando waters“) 80% svih sudara brodova u razdoblju od 2010 do 2015 godine uključivalo ribarske brodove [94].

Također, valja naglasiti da računalni program IWRAP u nedostatku prikladnog modela za procjenu učestalosti sudara u situaciji f) koristi aproksimacijsku metodologiju koja navedenu situaciju pojednostavljuje koristeći situaciju a) i c) u svrhu simulacije situacije f) [95]. Točnije, IWRAP situaciju f) simulira uvođenjem 8 plovidbenih ruta koje sijeku glavnu rutu. Rute su označene kao sjeverna, sjeveroistočna, istočna, jugoistočna, južna, jugozapadna, zapadna i

sjeverozapadna. Otklon između svake od tih 8 ruta je  $45^\circ$ . Distribucija prometa brodova duž širine svake od ruta je uniformna. Ilustracija ovog modela nalazi se na Slici 9.

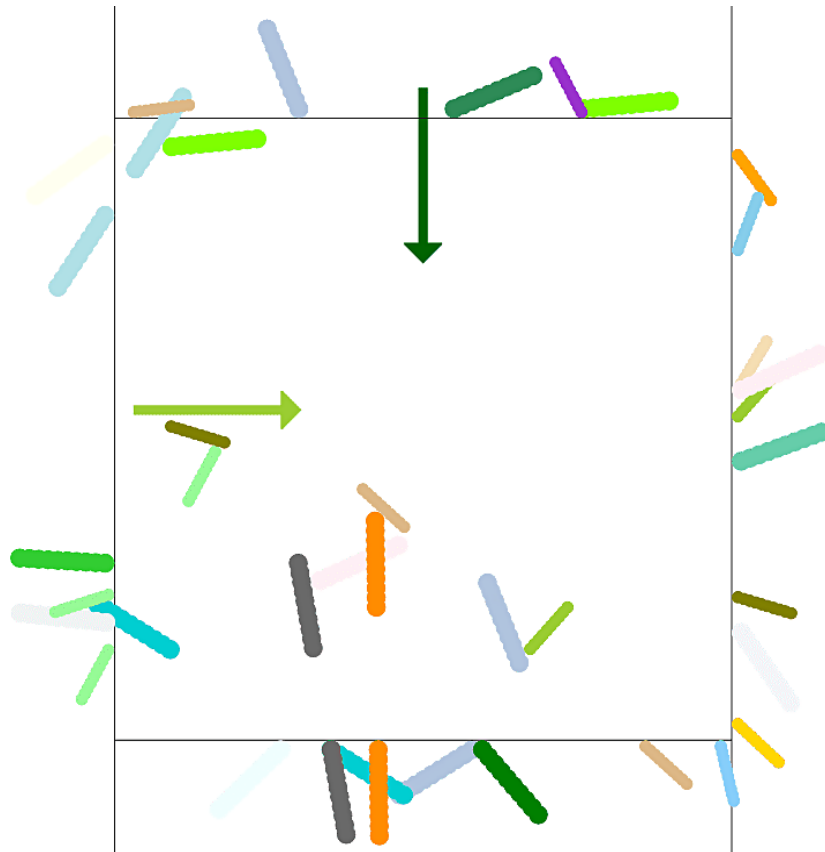


Slika 9: IWRAP model za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova [95]

Dakle, situacija f), odnosno situacija prikazana na Slici 7 u kojoj brodovi u razmatrano plovidbeno područje očigledno ulaze iz svih mogućih kutova, u ovom modelu je pojednostavljena, tj. limitirana na samo 8 mogućih kutova ulaska u razmatrano plovidbeno područje. Upravo je situacija f) u fokusu ovog istraživanja, te se predlaže novi model (računalni simulacijski model) za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova.

### 5.3. Računalni simulacijski model za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova

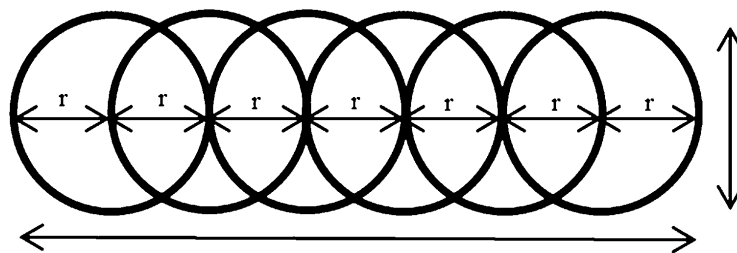
Razvijeni računalni simulacijski model na intuitivan način prikazuje i modelira razmatranu plovidbenu situaciju sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova, a integriran je unutar WPF (engl. Windows Presentation Foundation) računalne aplikacije koja je izrađena u modernom objektno orijentiranom jeziku – C# (Slika 10).



Slika 10: Vizualni modul računalnog simulacijskog modela za procjenu učestalosti sudara kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova

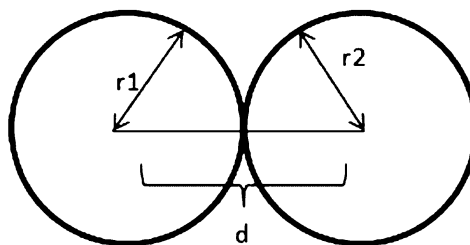
Drugim riječima, kompletna modelska logika implementirana je unutar razvijene C# aplikacije koja sadrži korisničko sučelje za unos ulaznih podataka modela i grafičku vizualizaciju simuliranog scenarija (grafički prikaz razmatranog plovidbenog područja, plovidbu brodova, sudare brodova). Model je razvijen tako da koristi iste ulazne podatke kao i najkorišteniji „state of the art“ analitički modeli koji su integrirani u računalnom programu IWRAP (Poglavlje 3.2). Model određuje broj i lokacije kandidata za sudar koristeći koncept „slijepe navigacije“, tj. nepostojanja manevara i mehanizama za izbjegavanje sudara (Poglavlje 2). S obzirom na to da je model realiziran kao aplikacija razvijena u objektno orijentiranom

jeziku, sve u modelu tretira se kao objekt (u terminologiji OOP). Objekti su u međusobnoj interakciji za vrijeme trajanja simulacije. Kako bi se pojednostavnio sam proces programiranja, te istodobno zadržala točnost računanja broja kandidata za sudar, stvarni brodovi (i njihove fizičke karakteristike) zamijenjeni su geometrijskim krugovima. Geometrijski krug je objekt koji nosi sve informacije o stanju broda (dimenzije, pozicija, smjer plovidbe, brzina plovidbe) u simuliranom vremenskom periodu. Valja naglasiti da je širina kruga simulirana promjerom kruga, dok je dužina broda simulirana spajanjem više krugova u jedan izduženi oblik na način koji je prikazan na Slici 11.



Slika 11: Simulacija dužine i širine broda

Kretanje brodova je simulirano diskretiziranim pomicanjem krugova u simuliranom vremenskom periodu (krugovi se u svakom sljedećem trenutku stvaraju na novim lokacijama). Mjerna jedinica brzine u ovom modelu simulirana je pikselom po iteraciji (tj. m/s simuliran je kao piksel/iteraciji). Vrijeme je simulirano programskom petljom čiji broj iteracija ovisi o vremenskom periodu kojeg se želi simulirati. Plovidbeno područje je predstavljeno 2D koordinatnim sustavom. Preklapanje dvaju krugova u simuliranom vremenskom periodu model proglašava sudarom. Drugim riječima, sudar će se dogoditi ako je udaljenost  $d$  između dvaju centara krugova manja ili jednaka sumi obaju radijusa tih dvaju krugova ( $r_1 + r_2$ ), gdje je  $r_1$  radijus prvog, a  $r_2$  radijus drugog kruga (Slika 12).

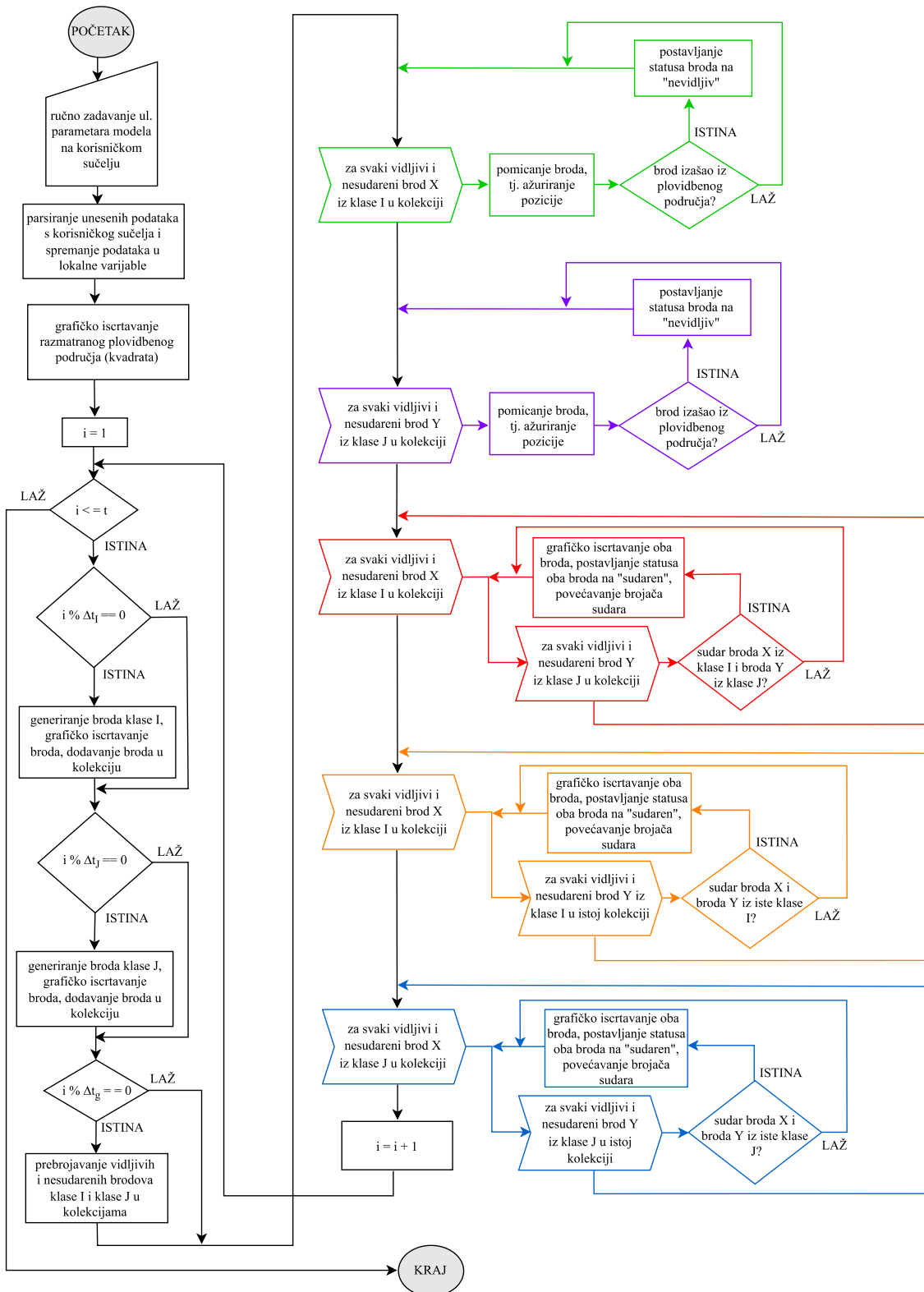


Slika 12: Situacija koju model proglašava sudarom

Model razmatra dvije različite klase (grupe) brodova. Svaka klasa brodova dobiva svoj zasebni skup parametara kao što slijedi:

- broj brodova u klasi,
- dimenzije brodova za svaku klasu (prosječna širina i dužina brodova svake klase) i
- brzina (prosječna) za svaku klasu brodova.

Zajednički parametar za svaku klasu brodova je simulirani vremenski period i razmatrano geografsko plovidbeno područje (plovidbena površina). Simulirani vremenski period se zadaje u sekundama. Razmatrano geografsko plovidbeno područje u ovom modelu je kvadrat proizvoljno odabrane površine. Kvadrat se definira zadavanjem dužine stranice kvadrata u metrima. Brodovi iz obje klase brodova generiraju se linearno u simuliranom vremenskom periodu duž stranica kvadrata (duž rubova plovidbene površine) tako da se zadani vremenski period dijeli s brojem brodova određene klase brodova kako bi se dobio vremenski razmak između generiranja dvaju brodova određene klase brodova. Uniformna distribucija koristi se kod obje klase brodova prilikom generiranja brodova duž stranica kvadrata (duž rubova plovidbene površine), tj. brodovi se generiraju nasumično (slučajno) duž stranica kvadrata. Generiranje broda na stranici kvadrata predstavlja trenutak ulaska broda u razmatrano geografsko plovidbeno područje unutar kojeg se želi procijeniti vjerojatnost nastanka sudara u nekom vremenskom periodu. Nakon generiranja broda, brod se nastavlja kretati pravocrtno i diskretizirano slučajno odabranim smjerom unutar razmatranog plovidbenog područja (kvadrata). Odabir smjera kretanja broda događa se tako da se brod generira na stranici kvadrata pod kutom između  $0^\circ$  i  $180^\circ$  (slučajno odabrani kut između  $0^\circ$  i  $180^\circ$ ) u odnosu na tu stranicu kvadrata. Slijedi prikaz dijagrama toka i UML „sequence“ dijagrama razvijene modelske logike, tj. algoritma računalnog simulacijskog modela (Slika 13 i Slika 14).

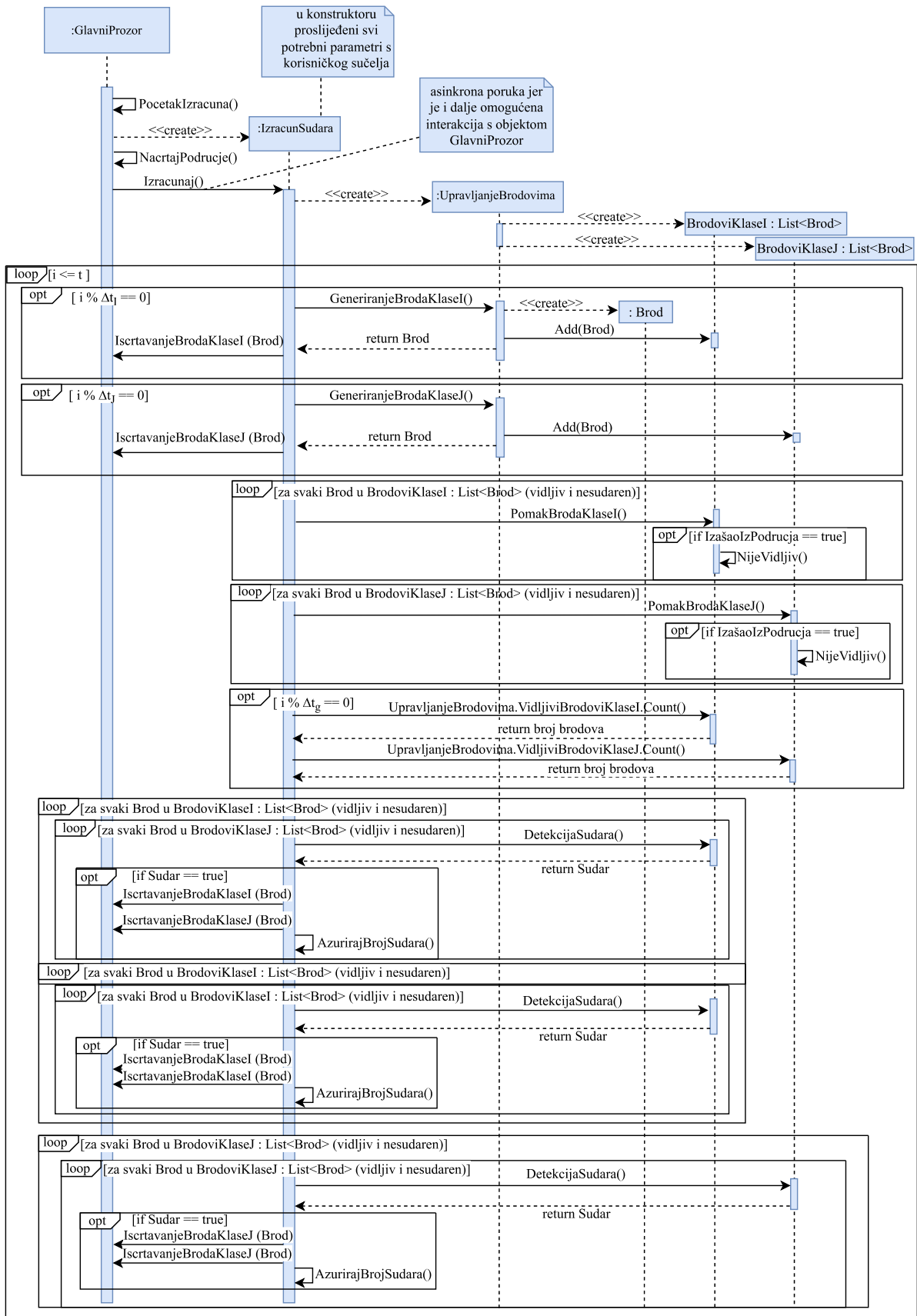


Slika 13: Modelska logika (dijagram toka) – model slučajno distribuirane plovidbe brodova

Objašnjenja parametara sa Slike 13 su sljedeća:

- Vidljivi brod – brod koji se nije sudario i nalazi se unutar razmatranog plovidbenog područja (kvadrata).
- Kolekcija brodova – kolekcija objekata (u kontekstu OOP) koji predstavljaju brodove.
- $t$  – ukupno simulirano vrijeme.
- $\Delta t_I$  – vremenski interval između generiranja brodova klase I.
- $\Delta t_J$  – vremenski interval između generiranja brodova klase J.
- $\Delta t_g$  – vremenski interval između brojanja vidljivih i nesudarenih brodova klase I i J unutar razmatranog plovidbenog područja.
- $\Delta t_I = \frac{t}{\text{ukupan broj brodova klase I}}$
- $\Delta t_J = \frac{t}{\text{ukupan broj brodova klase J}}$





Slika 14: Modelska logika (UML sequence dijagram)

## 5.4. Testne simulacije i validacija modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova

U ovom poglavlju opisana je metodologija izvođenja testnih simulacija i validacije razvijenog računalnog simulacijskog modela uz pomoć analitičkog modela, te je predstavljen novi modificirani analitički model izveden iz postojećeg analitičkog modela i regresijske analize koji je prikladan za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova.

### 5.4.1. Hipotetski primjer scenarija i metodologija izvođenja simulacija

Pomorski scenarij kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova testiran je na sljedećem primjeru prometa brodova i plovidbenog područja:

- Promatrani vremenski period  $\Delta t$  iznosi 365 dana.
- Površina plovidbenog područja iznosi  $2000 \text{ m} \times 2000 \text{ m}$ .

Brodovi klase I:

- $Q_i = 40150 / (365 \cdot 24 \cdot 3600) \text{ s}$ ,
- $V_i = 1,1 \text{ m/s}$ ,
- $B_i = 16 \text{ m}$ ,
- $L_i = 64 \text{ m}$ .

Brodovi klase J:

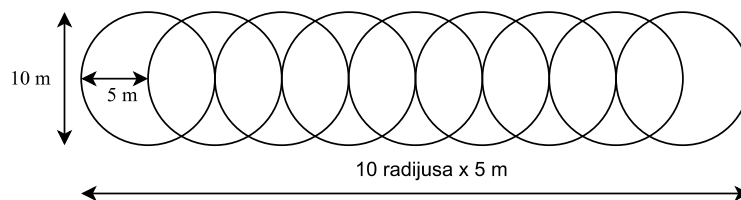
- $Q_j = 54750 / (365 \cdot 24 \cdot 3600) \text{ s}$ ,
- $V_j = 4,9 \text{ m/s}$ ,
- $B_j = 10 \text{ m}$ ,
- $L_j = 50 \text{ m}$ .

Značenja svih gore navedenih ulaznih parametara modela su sljedeća (objašnjeno u Poglavlju 3.2):

- $Q_i$  i  $Q_j$  predstavljaju broj prolazaka brodova klase I i klase J u jedinici vremena na razmatranoj plovidbenoj površini.

- $V_i$  i  $V_j$  predstavljaju prosječne brzine brodova klase I i klase J na razmatranoj plovidbenoj površini.
- $B_i$  i  $B_j$  označavaju širine brodova klase I i klase J.
- $L_i$  i  $L_j$  označavaju dužine brodova klase I i klase J.

Svi ulazni parametri uneseni su u računalni simulacijski model. Širina broda simulirana je promjerom kruga koji odgovara širini klase brodova za koju se vrši simulacija. Dužina broda je simulirana spajanjem određenog broja takvih krugova u izduženi oblik čija dužina odgovara dužini klase brodova za koju se vrši simulacija. Slika 15 ilustrira simulaciju dužine od 50 m i širine od 10 m za brodove klase J iz ovog primjera.



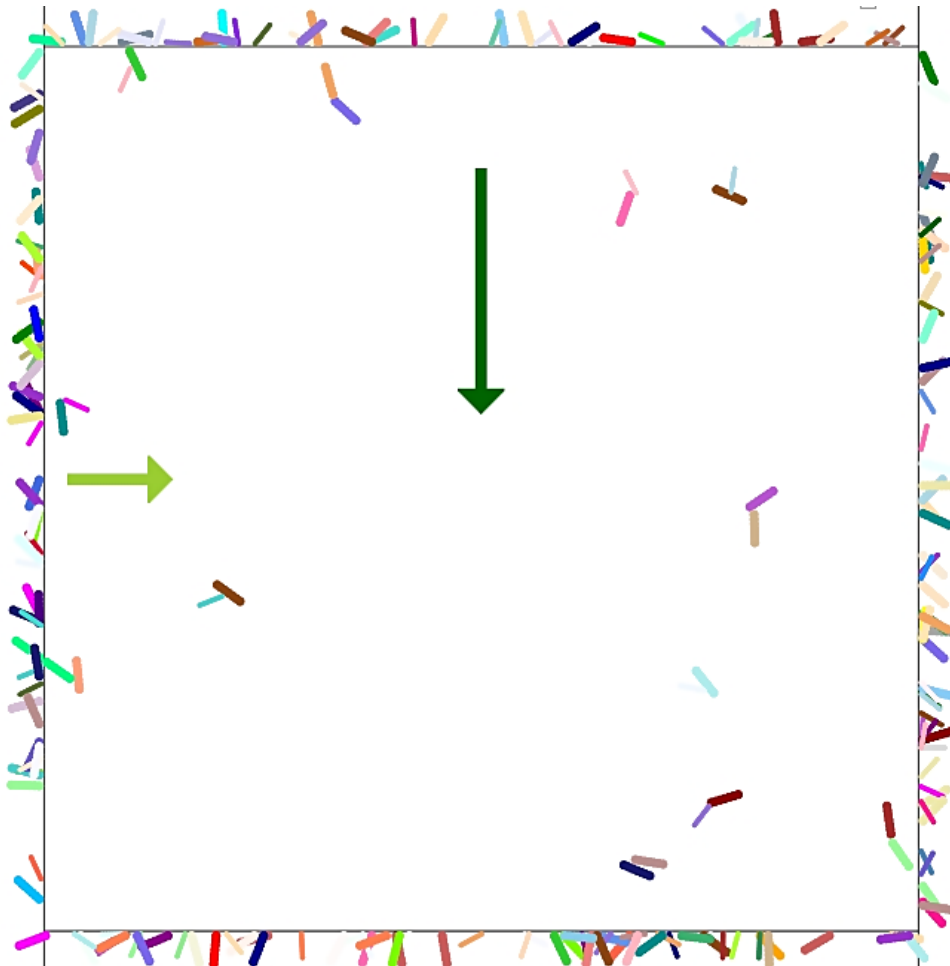
Slika 15: Simulacija broda dužine 50 m i širine 10 m

Ako spajanjem krugova nije moguće postići točnu traženu dužinu broda tada se aproksimativno simulira tražena dužina, tj. krugovi se spajaju tako da što približnije odgovaraju željenoj dužini broda (točnost procjene kandidata za sudar time nije narušena što je i dokazano u Poglavlju 5.7.2. i Poglavlju 5.7.3). Simulacija je potom pokrenuta 55 puta kako bi rezultati bili statistički značajni (razvijeni model je stohastičke prirode). Na taj način je testiran i utvrđen potreban broj izvođenja simulacija pri kojem srednja vrijednost dobivenog broja kandidata za sudar konvergira, tj. pokretanjem dodatnih simulacija srednja vrijednost dobivenog broja kandidata za sudar ne mijenja se više od neke odabrane vrijednosti praga (engl. „threshold value“) [96]. Svaka pokrenuta simulacija predstavlja jednu stohastičku reprezentaciju simuliranog scenarija za koju model određuje broj kandidata za sudar. Po uzoru na „state of the art“ modele iz Poglavlja 3.2, model podrazumijeva iste prometne uvjete na razmatranom području tijekom cijele godine, te je zbog toga ali i zbog povećanja brzine izvođenja simulacija odabrano simulirano vrijeme u ovom primjeru jedan dan (model omogućava proizvoljan odabir vremena). Rezultati, tj. brojevi kandidata za sudar svake od 55 pokrenutih simulacija su sljedeći:

5, 3, 5, 7, 8, 6, 6, 4, 12, 8, 5, 10, 9, 2, 10, 6, 6, 4, 10, 7, 6, 12, 8, 6, 7, 6, 5, 6, 9, 6, 7, 6, 5, 9, 9, 8, 4, 5, 8, 6, 7, 10, 14, 6, 5, 6, 7, 6, 6, 9, 7, 9, 4

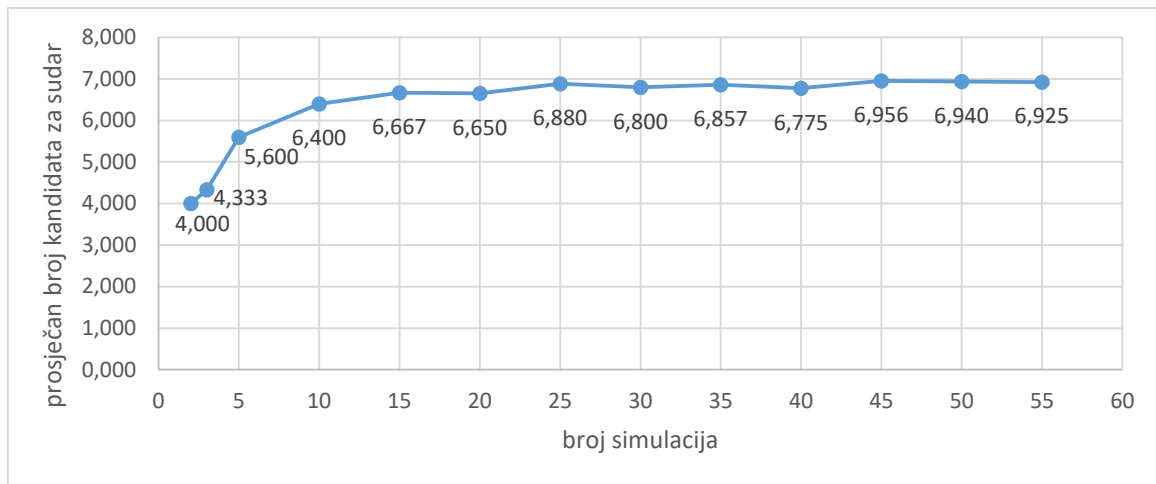
Na temelju rezultata 55 simulacija dobiven je prosječan očekivani broj kandidata za sudar u jednom danu  $N_a = 6,925$ , odnosno prosječan očekivani broj kandidata za sudar u jednoj godini  $N_a = 2527,453$ .

Simulirani scenarij navedenog primjera u računalnom simulacijskom modelu prikazan je na Slici 16.



Slika 16: Primjer scenarija sudara kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova – vizualni modul računalnog simulacijskog modela

Stvarni broj očekivanih sudara moguće je dobiti množenjem dobivenog broja kandidata za sudar s korekcijskim čimbenikom  $P_c$  (opisano u Poglavlju 3.6). Korekcijski čimbenik kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova iznosi  $P_c = 1,5 \cdot 10^{-4}$  (Tablica 1). Dakle, stvarni broj očekivanih sudara u ovom primjeru iznosi:  $N_{sudara} = 2527,453 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 0,379$  sudara godišnje. Drugim riječima, može se očekivati sudar svake 2,63 godine. Graf na Slici 17 prikazuje konvergenciju rezultata nakon određenog broja simulacija.



Slika 17: Broj kandidata za sudar u ovisnosti o broju simulacija

Na temelju rezultata iz Slike 17 vidljivo je da se već nakon petnaestak simulacija dobivaju zadovoljavajući rezultati s obzirom na stohastičku prirodu ovakvih modela i prihvatljivost većih oscilacija rezultata (Poglavlje 3). Odabrana vrijednost praga (engl. „threshold value“) iznosi 5%, a rezultati na Slici 17 pokazuju da se nakon 15 izvršenih simulacija dodavanjem dodatnih simulacija prosječan broj kandidata za sudar ne mijenja za više od 5%. U nastavku ovog istraživanja kod daljnjih testova odabrani broj simulacija po testu je 30. Pored gore navedene metode, pouzdanost odabranog broja simulacija dodatno je potvrđena i standardnom jednadžbom za interval pouzdanosti  $CI$  [96]:

$$CI = M \pm z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (17)$$

gdje je  $M$  srednja vrijednost uzorka (srednja vrijednost rezultata 30 simulacija, tj. 6,88),  $z_{\alpha/2}$  koeficijent pouzdanosti procjene (1,96 za 95% pouzdanosti i 30 uzoraka),  $\sigma$  standardna devijacija (vrijednost praga 5%, tj. 0,34),  $n$  broj uzoraka (odabrani broj simulacija, tj. 30).

Uvrštavanjem navedenih vrijednosti u izraz (17) dobiva se interval pouzdanosti  $CI = 6,88 \pm 0,12$ . Drugim riječima, vjerojatnost da s 30 pokrenutih simulacija prosječan broj kandidata za sudar bude unutar intervala između vrijednosti 6,76 i 7 iznosi 95%,  $P\{6,76 \leq 6,88 \leq 7\} = 0,95$ .

### 5.4.2. Analitički model za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i validacija rezultata računalnog simulacijskog modela

U ovom poglavlju predstavljen je analitički model kojim je moguće validirati razvijeni računalni simulacijski mode. Predloženi analitički model proizašao je iz hipoteze da je postojeći analitički model za procjenu učestalosti sudara brodova pri križanju kursova uz regresijsku analizu moguće prilagoditi za model slučajno distribuirane plovidbe brodova.

Kao podsjetnik, analitički model za procjenu učestalosti sudara brodova pri križanju kursova iskazan je u (4):

$$N_a = \sum_i \sum_j \frac{Q_i^{(1)} \cdot Q_j^{(2)}}{V_i^{(1)} \cdot V_j^{(2)}} V_{ij}^{(1,2)} D_{ij}^{(1,2)} \frac{\Delta t}{\sin \vartheta}$$

gdje je opis svih parametara prethodno iznesen u Poglavlju 3.2.

Relativna brzina približavanja broda klase I s plovidbenog puta 1 prema brodu klase J s plovidbenog puta 2,  $V_{ij}^{(1,2)}$ , jedan je od parametara analitičkog modela za procjenu učestalosti sudara brodova pri križanju kursova (izraz (4), Poglavlje 3.2), a računa se na način [28, 40]:

$$V_{ij}^{(1,2)} = \sqrt{\left(V_i^{(1)}\right)^2 + \left(V_j^{(2)}\right)^2 - 2V_i^{(1)}V_j^{(2)} \cos \vartheta} \quad (18)$$

gdje je  $V_i^{(1)}$  prosječna brzina brodova klase I na plovidbenom putu 1, a  $V_j^{(2)}$  prosječna brzina brodova klase J na plovidbenom putu 2.

Nadalje, dijametar sudara  $D_{ij}^{(1,2)}$  također je parametar istog modela iz izraza (4), te predstavlja minimalnu udaljenost mimoilaženja ispod koje je sudar neizbježan, a računa se na način [28, 40]:

$$D_{ij}^{(1,2)} = \frac{L_i^{(1)}V_j^{(2)} + L_j^{(2)}V_i^{(1)}}{V_{ij}^{(1,2)}} \sin \vartheta + B_j^{(2)} \left\{ 1 - \left( \sin \vartheta \frac{V_i^{(1)}}{V_{ij}^{(1,2)}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + B_i^{(1)} \left\{ 1 - \left( \sin \vartheta \frac{V_j^{(2)}}{V_{ij}^{(1,2)}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

gdje je  $B_i^{(1)}$  širina brodova klase I na plovidbenom putu 1,  $B_j^{(2)}$  širina brodova klase J na plovidbenom putu 2,  $L_i^{(1)}$  dužina brodova klase I na plovidbenom putu 1, te  $L_j^{(2)}$  dužina brodova klase J na plovidbenom putu 2.

Kod modela za procjenu učestalosti sudara molekula plinova [97, 98] uočeno je da se pri izračunavanju relativne brzine molekula u odnosu na druge molekule pri sudarima kao srednja vrijednost kuta uzima kut od  $90^\circ$  (srednja vrijednost kuta pri sudaru molekula na dovoljno velikom broju sudara bit će  $\approx 90^\circ$ ). Može se uočiti da je navedena analogija primjenjiva i kod sudara brodova u modelu slučajno distribuirane plovidbe brodova (vidjeti Sliku 10 i Sliku 16).

Uvrštavanjem kuta  $\vartheta = 90^\circ$  u izraze (4), (18) i (19) dobiva se specijalni slučaj modela (4) kojim se procjenjuje učestalost sudara pri križanju kursova za kut križanja od  $90^\circ$ :

$$N_a = \sum_i \sum_j \frac{Q_i^{(1)} \cdot Q_j^{(2)}}{V_i^{(1)} \cdot V_j^{(2)}} \cdot (L_i^{(1)} V_j^{(2)} + L_j^{(2)} V_i^{(1)} + B_j^{(2)} V_j^{(2)} + B_i^{(1)} V_i^{(1)}) \Delta t \quad (20)$$

Validacija računalnog simulacijskog modela pomoću modela (20) i prilagodba istog za model slučajno distribuirane plovidbe brodova izvršena je metodologijom opisanom u nastavku poglavlja.

U svrhu utvrđivanja korelacije između analitičkog modela (20) i računalnog simulacijskog modela, odabrano je 30 hipotetskih scenarija modela slučajno distribuirane plovidbe brodova. Prvih 10 hipotetskih scenarija odabrano je koristeći testni kriterij poznat kao „svi parovi“ (engl. „all-pairs“ ili „pairwise“ testing) [99], što je u računarskim znanostima kombinatorna metoda testiranja softvera koja za svaki par ulaznih parametara sustava (najčešće softverski algoritam) testira sve moguće diskretne kombinacije tih parametara. Ovom metodom značajno je smanjen broj kombinacija koje je potrebno testirati, a pouzdanost je očuvana. Kako bi navedeno testiranje bilo moguće ulazni parametri modela: broj brodova, brzina brodova, dužina brodova i širina brodova, podijeljeni su u dvije kategorije („manja“ i „veća“) kako je prikazano u Tablici 2.

Tablica 2: Podjela ulaznih parametara modela u dvije kategorije – model slučajno distribuirane plovidbe

manja kategorija broja brodova godišnje 0-16000	veća kategorija broja brodova godišnje > 16000
manja kategorija brzine 0-6 m/s	veća kategorija brzine > 6 m/s
manja kategorija dužine brodova 0-70 m	veća kategorija dužine brodova > 70 m
manja kategorija širine brodova 0 – 10 m	veća kategorija širine brodova > 10 m

Vrijednost svakog ulaznog parametra modela pripada kategoriji „manja“ ili „veća“ i proizvoljno je odabrana za svaku kategoriju. Prvih 10 kombinacija kojima je zadovoljen testni kriterij „svi parovi“ prikazano je u Tablici 3.

Tablica 3: Kombinacije prema testnom kriteriju „svi parovi“ – model slučajno distribuirane plovidbe brodova

Rb.	Broj "I" brodova	Brzina "I" brodova	širina "I" brodova	Dužina "I" brodova	Broj "J" brodova	Brzina "J" brodova	Širina "J" brodova	Dužina "J" brodova
1	manja	manja	manja	manja	manja	manja	manja	manja
2	manja	veća	veća	veća	veća	veća	veća	veća
3	veća	veća	manja	veća	manja	veća	manja	veća
4	veća	manja	veća	manja	veća	manja	veća	manja
5	x	veća	manja	manja	veća	veća	x	manja
6	x	manja	veća	veća	manja	manja	x	veća
7	x	veća	manja	veća	manja	manja	veća	x
8	x	manja	veća	manja	veća	veća	manja	x
9	x	veća	x	veća	x	x	x	manja
10	x	manja	x	manja	x	x	x	veća

Broj svih kombinacija s 8 ulaznih parametara modela, od kojih svaki može poprimiti jednu od dvije vrijednosti („manja“ ili „veća“), iznosi 256. Testnim kriterijem „svi parovi“ taj broj se svodi na 10 kombinacija. S navedenih 10 kombinacija postignuto je da su uparivanjem bilo koja dva stupca (parametra modela) zastupljene sve moguće diskretne kombinacije ta dva stupca. Primjerice, stupac „Broj "I" brodova“ i stupac „Brzina "I" brodova“ sadrže sve međusobne kombinacije već unutar prve 4 kombinacije iz Tablice 3 (manji broj "I" brodova – manja brzina "I" brodova, manji broj "I" brodova – veća brzina "I" brodova, veći broj "I" brodova – veća brzina "I" brodova, veći broj "I" brodova – manja brzina "I" brodova). Znak „x“ u poljima Tablice 3 predstavlja redundantna polja na kojima je moguće proizvoljno odabrati neku vrijednost iz bilo koje od dvije kategorije („manja“ ili „veća“) bez narušavanja testa „svi parovi“.

Dakle, od 30 odabranih hipotetskih scenarija, s prvih 10 scenarija zadovoljen je testni kriterij „svi parovi“, dok je preostalih 20 scenarija odabrano proizvoljno. Broj od 30 hipotetskih scenarija odabran je sukladno metodologiji opisanoj u prethodnom Poglavlju 5.4.1, a svi scenariji i ulazni parametri svakog od njih prikazani su u Tablici 4. Dostatnost broja od 30 hipotetskih testnih scenarija podržana je i nedavnim istraživanjem [100] u kojemu je za utvrđivanje korelacije i razvoj linearnog regresijskog modela između sredine (centralne linije)



plovidbenog puta i kursa broda korišteno upravo 30 hipotetskih simulacija prolaska broda na plovidbenom putu.

Tablica 4: Ulazni parametri modela za svaki hipotetski scenarij – model slučajno distribuirane plovidbe brodova

Rb.	Broj "I" brodova u jednoj godini	Brzina "I" brodova (m/s)	Širina "I" brodova (m)	Dužina "I" brodova (m)	Broj "J" brodova u jednoj godini	Brzina "J" brodova (m/s)	Širina "J" brodova (m)	Dužina "J" brodova (m)
1	11680	2,8	4	16	8760	6	5	25
2	8030	13	20	120	31025	15	30	150
3	27375	9,5	8	128	9855	11	6	108
4	51100	3,2	24	48	36500	2	35	70
5	41975	8,2	5	40	32850	9,1	7	42
6	21900	4	16	128	12775	2	26	208
7	12775	14,2	10	160	16425	3,4	20	80
8	109500	5,5	15	60	73000	8	8	32
9	65700	8	20	100	73000	10	30	60
10	87600	1,5	10	40	146000	4	15	75
11	69350	5	12	54	131400	8	16	90
12	32850	1,2	20	60	47450	0,5	10	45
13	54750	4,2	60	120	109500	6,3	40	100
14	73000	3,1	40	120	127750	7,5	16	80
15	25550	1	100	300	47450	8	10	50
16	54750	1,6	20	60	83950	3,4	40	120
17	109500	6	6	30	146000	12	10	50
18	138700	12	6	30	182500	5	10	50
19	109500	12	10	30	146000	15	8	40
20	102200	3	10	60	65700	0,9	8	40
21	47450	0,7	20	100	65700	1,5	12	60
22	83950	3	16	88	65700	7	25	162
23	83950	8	18	108	109500	6	12	66
24	58400	11	20	140	43800	7	18	108
25	93075	5	16	88	87600	3	18	108
26	47450	4,3	20	80	34675	7	24	120
27	23725	12	50	250	31025	14,3	40	240
28	43800	7	65	325	35770	5	60	360
29	27375	11,5	22	100	20075	13,6	38	190
30	60225	6,4	50	250	51100	3	40	240

Razmatrano vrijeme za svaki scenarij je jedna godina, tj.  $\Delta t = 365$  dana, a razmatrana kvadratna površina za svaki scenarij je  $10\ 000\ m \times 10\ 000\ m$ . Proizvoljno odabrana kvadratna površina je ista za svaki scenarij jer broj kandidata za sudar svakako ne ovisi o veličini razmatrane površine. Također, valja uočiti da neki od prvih 10 scenarija zbog utvrđivanja

pouzdanosti modela i međuovisnosti varijabli testiraju ekstremne vrijednosti koje se inače u stvarnosti ne pojavljuju (npr. scenarij br.3 razmatra brodove nesrazmjerno velike dužine u odnosu na širinu).

Potom je za svaki hipotetski scenarij i pripadajuće parametre iz Tablice 4 izvršen izračun očekivanog broja kandidata za sudar pomoću razvijenog računalnog simulacijskog modela i analitičkog modela (20). Računalnim simulacijskim modelom dobiven je broj kandidata za sudar kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova, dok je analitičkim modelom dobiven broj kandidata za sudar u plovidbenoj situaciji križanja kursova (križanje pod pravim kutom). Potrebno je uočiti da oba modela koriste iste ulazne parametre iako izračunavaju broj kandidata za sudar u različitim plovidbenim situacijama. Uvrštavanjem ulaznih parametara modela svakog hipotetskog scenarija u analitički model (20) dobiveni su deterministički rezultati, dok je za svaki scenarij kod računalnog simulacijskog modela simulacija pokrenuta 30 puta kako bi rezultati bili statistički značajni (po uzoru na metodologiju opisanu u prethodnom Poglavlju 5.4.1). Rezultati oba modela prikazani su u Tablici 5.

Tablica 5: Broj kandidata za sudar prema računalnom simulacijskom modelu kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i prema analitičkom modelu (20) u plovidbenoj situaciji križanja kursova za kut od 90°

Rb.	Broj kandidata za sudar u jednoj godini $N_a$		Rb.	Broj kandidata za sudar u jednoj godini $N_a$	
	Analitički model (križanje kursova, kut 90°)	Računalni simulacijski model (model slučajno distribuirane plovidbe brodova)		Analitički model (križanje kursova, kut 90°)	Računalni simulacijski model (model slučajno distribuirane plovidbe brodova)
1	40	24	16	15110	7830
2	180	48	17	5745	3135
3	210	114	18	11665	6719
4	4314	2387	19	3295	1825
5	476	204	20	16654	8710
6	1334	511	21	21088	10457
7	260	100	22	11047	6669
8	4622	3115	23	8453	4197
9	3688	1857	24	2648	1430
10	23488	13720	25	19020	9826
11	7368	3886	26	2305	1131
12	9308	4672	27	1037	377
13	12070	6509	28	6955	3182
14	17704	9084	29	480	171
15	12638	5557	30	13850	7187

Iz rezultata u Tablici 5 može se uočiti postojanje linearne korelacije između rezultata dobivenih računalnim simulacijskim modelom i rezultata analitičkog modela (20) dvaju različitih plovidbenih situacija. Značajno veći broj kandidata za sudar u plovidbenoj situaciji križanja kursova pod pravim kutom je očekivan i može se objasniti činjenicom da u takvoj situaciji svaki brod prolazi isti put koji je jednak stranici kvadrata razmatranog područja, te se kursne linije (trajektorije) svih brodova međusobno uvijek sijeku promatrano u vremensko prostornoj domeni. Upotrebom programa MS Excel provedena je regresijska analiza, tj. jednostavna linearna regresija kako bi se uspostavio regresijski model kojim je moguće procijeniti broj kandidata za sudar kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova. Teorijski koncepti linearne regresije nisu prikazani u ovom radu, te je iste moguće pronaći u izvoru [101].

Dakle, pretpostavka je da se broj kandidata za sudar kod modela slučajno distribuirane plovidbe (zavisna varijabla) može predvidjeti brojem kandidata za sudar koji nastaje u

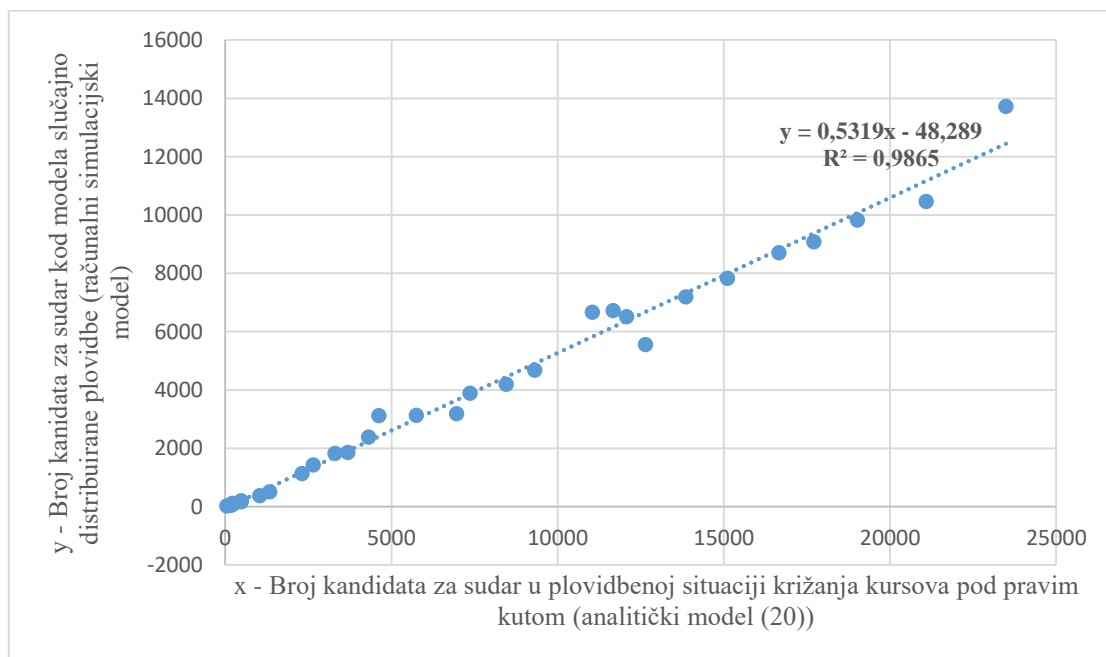
plovidbenoj situaciji križanja kursova pod pravim kutom (nezavisna varijabla – rezultati analitičkog modela (20)). Kod jednostavne linearne regresije potrebno je odrediti jednadžbu pravca koja najbolje opisuje odnos navedenih dviju varijabli. Opći oblik regresijskog pravca glasi:

$$y = ax + b \quad (21)$$

gdje je  $a$  regresijski koeficijent (nagib pravca) koji pokazuje za koliko se u prosjeku mijenja vrijednost zavisne varijable  $y$  za jediničnu promjenu vrijednosti nezavisne varijable  $x$ , a  $b$  (odsječak) vrijednost zavisne varijable u slučaju kada je nezavisna varijabla jednaka nuli. Regresijski pravac u ovom primjeru određen je metodom najmanjih kvadrata [101]. Ključni rezultati regresijske analize dobiveni uz pomoć programa MS Excel prikazani su u Tablici 6 i na Slici 18:

Tablica 6: Rezultati regresijske analize

Pearsonov koeficijent linearne korelacije (R):	0,9932
Koeficijent determinacije ( $R^2$ ):	0,9864
Standardna devijacija regresije:	445,3684
p – vrijednost regresijskog modela:	1,01E-27
Broj testova:	30
Regresijski koeficijent:	0,5318
Odsječak:	-48,2885



Slika 18: Graf raspršenosti i regresijski pravac

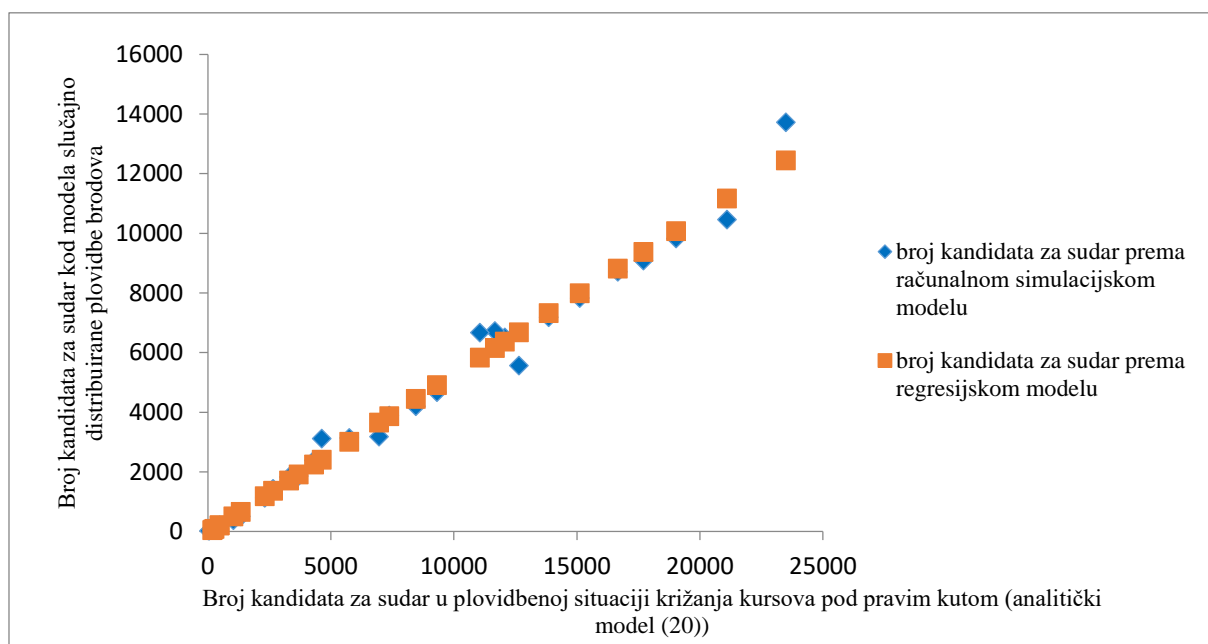
Na temelju rezultata vidljivo je da postoji jaka pozitivna linearna korelacija između dviju varijabli (Pearsonov koeficijent linearne korelacije  $R$ ).  $P$  – vrijednost regresijskog modela je značajno manja od 0,05, stoga se može zaključiti da je regresijski model statistički značajan. Prema rezultatima analize dobivenih kroz MS Excel,  $p$  – vrijednost odsječka značajno je veća od 0,05 i iznosi 0,69, zbog čega se zaključuje da taj parametar nije statistički značajan, te se izostavlja iz modela. Reziduali u ovom slučaju predstavljaju razlike između broja kandidata za sudar koji su predviđeni regresijskim modelom (jednadžba pravca na Slici 18) i broja kandidata za sudar koji su dobiveni računalnim simulacijskim modelom. Reziduali i regresijskim modelom predviđene vrijednosti broja kandidata za sudar kod modela slučajno distribuirane plovidbe za navedenih 30 hipotetskih scenarija prikazani su u Tablici 7.

Tablica 7: Reziduali i broj kandidata za sudar predviđen regresijskim modelom

Test	Predviđeni broj sudara	Reziduali	Standardizirani reziduali
1	-27,01345057	51,01345057	0,116569583
2	47,44941806	0,550581939	0,001258121
3	63,40574705	50,59425295	0,115611685
4	2246,231553	140,7684468	0,32166652
5	204,8851975	-0,885197452	-0,002022743
6	661,2362066	-150,2362066	-0,343301065
7	89,99962871	10,00037129	0,022851603
8	2410,049864	704,9501358	1,610864239
9	1913,276155	-56,2761549	-0,128595259
10	12444,45329	1275,54671	2,914720455
11	3870,585845	15,41415536	0,035222508
12	4902,428453	-230,4284528	-0,526546397
13	6371,474475	137,5255246	0,314256198
14	9368,07306	-284,0730601	-0,649128372
15	6673,580971	-1116,580971	-2,551471749
16	7988,38248	-158,3824799	-0,361915914
17	3007,348446	127,6515539	0,29169343
18	6156,064034	562,935966	1,286351148
19	1704,248245	120,7517549	0,275926869
20	8809,601545	-99,60154542	-0,227597045
21	11167,94697	-710,9469705	-1,624567458
22	5827,363657	841,6363433	1,923202534
23	4447,673077	-250,6730765	-0,57280689
24	1360,123417	69,8765835	0,159673264
25	10068,02403	-242,0240253	-0,553043155
26	1177,689388	-46,68938836	-0,106688774
27	503,2685496	-126,2685496	-0,288533161
28	3650,920382	-468,9203822	-1,071518447

29	207,012708	-36,01270798	-0,082291754
30	7318,216662	-131,2166623	-0,299839972

Iz Tablice 7 vidljivo je da standardizirani reziduali ne prelaze granice intervala od -3 do +3 zbog čega se može zaključiti da niti jedan od 30 rezultata nema značajno statističko odstupanje (anomalija). Graf prikazan na Slici 19 prikazuje usporedbu rezultata, tj. broj kandidata za sudar kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova koji se dobije predloženim regresijskim modelom i razvijenim računalnim simulacijskim modelom.



Slika 19: Broj kandidata za sudar prema regresijskom modelu i računalnom simulacijskom modelu

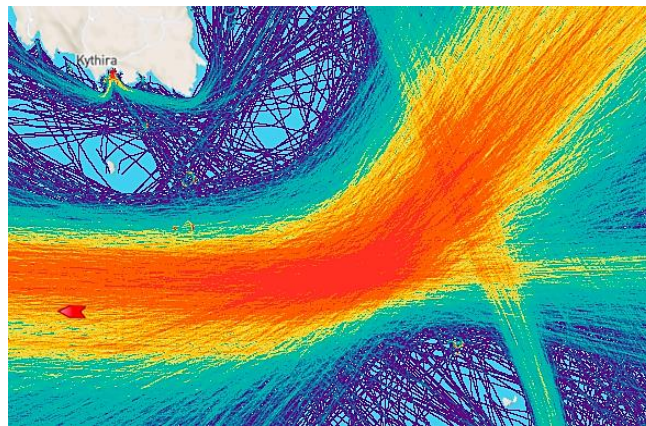
Nezavisna varijabla  $x$  iz regresijskog modela prikazanog jednačbom pravca na Slici 18 izračunava se kao rezultat analitičkog modela (20), stoga je predložena modifikacija analitičkog modela kojom je moguće odrediti broj kandidata za sudar kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova oblika:

$$N_a = 0,53 \cdot \sum_i \sum_j \frac{Q_i^{(1)} \cdot Q_j^{(2)}}{V_i^{(1)} \cdot V_j^{(2)}} \cdot (L_i^{(1)} V_j^{(2)} + L_j^{(2)} V_i^{(1)} + B_j^{(2)} V_j^{(2)} + B_i^{(1)} V_i^{(1)}) \Delta t \quad (22)$$

gdje su svi parametri modela identični parametrima modela (20).

## 5.5. Plovidba kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta

Plovidbena situacija u kojoj nastaju sudari kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta prikazana je na Slici 7 (situacija e)) [19, 28, 38] i odnosi se na sudare brodova iz nasuprotnih smjerova koji nastaju na ruti uslijed promjene smjera protezanja plovidbenog puta (engl. „bend of routes“). Primjer jednog takvog scenarija u Jonskom moru jugoistočno od otoka Kitira (Grčka) prikazan je na Slici 20 uz pomoć AIS podataka s web servisa MarineTraffic [93]. Prikazano područje omeđeno je sljedećim koordinatama: točka 1 (36.1750, 022.9216), točka 2 (36.1573, 023.3219), točka 3 (35.9752, 022.9381), točka 4 (35.9858, 023.3054).



Slika 20: AIS podaci brodova – promjena smjera protezanja plovidbenog puta jugoistočno od otoka Kitira u Jonskom moru [93]

Promjena smjera protezanja plovidbenog puta učestala je karakteristika većine plovidbenih putova, a kandidati za sudar u ovoj situaciji čine značajan udio ukupnog broja kandidata za sudar [19]. Slično kao i kod situacije f), situaciju e) u nedostatku odgovarajućih modela računalni program IWRAP simulira, tj. aproksimira situacijama c) i a). Ovo istraživanje usmjereno je također na situaciju e), te je u nastavku opisan predloženi računalni simulacijski model za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta. Istraživanje je usmjereno prvenstveno na promjene smjera protezanja plovidbenog puta u zonama bez postojanja odvojene plovidbe (engl. traffic separation scheme – TSS) budući da takva plovidba predstavlja znatno veću opasnost od plovidbe u zonama s odvojenom plovidbom. Valja naglasiti da je model razvijen tako da može simulirati obje situacije što je i dokazano u Poglavlju 5.7.2.

## 5.6. Računalni simulacijski model za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta

Navedeni model razvijen je koristeći analogne koncepte modela slučajno distribuirane plovidbe brodova (koncept „slijepa navigacije“, detekciju sudara, način simulacije vremena, gibanja, dužine i širine brodova), no u kontekstu pomorskog scenarija promjene smjera protezanja plovidbenog puta.

Ovaj model razmatra dvije različite klase brodova koje plove iz nasuprotnih smjerova. Svaka klasa brodova dobiva svoj zasebni skup parametara kao što slijedi:

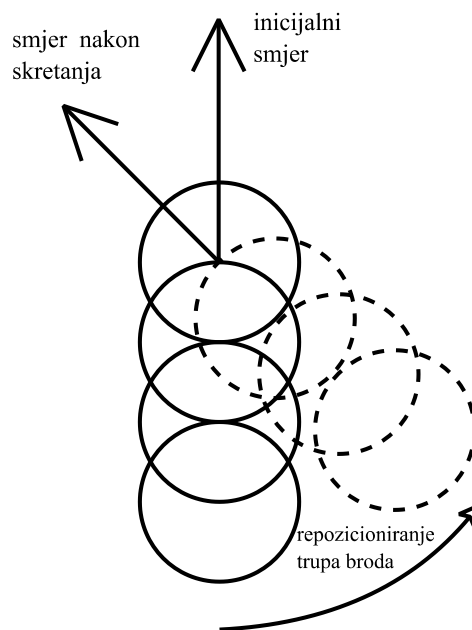
- Broj brodova u klasi.
- Dimenzije brodova za svaku klasu (prosječna širina i dužina brodova svake klase).
- Brzina (prosječna) za svaku klasu brodova.
- Normalna (Gaussova) distribucija svake klase brodova korištena za razmještaj lokacija generiranja brodova na njihovim inicijalnim pozicijama.
- Normalna (Gaussova) distribucija svake klase brodova korištena za razmještaj lokacija skretanja brodova.
- Broj brodova za svaku klasu koji neće izvršiti skretanje (engl. „missed turn“) – ovaj parametar je sporedan, a isti je moguće zadati u slučaju kada je statistika ovakvih propusta poznata za plovidbeno područje nad kojim se vrši procjena rizika.

Zajednički parametar za svaku klasu brodova je simulirani vremenski period i razmatrano plovidbeno područje, tj. dio rute na kojem dolazi do promjene smjera protezanja plovidbenog puta. Ruta s promjenom smjera protezanja plovidbenog puta u modelu se definira zadavanjem širine rute i kuta pod kojim se ruta pregiba. Kut je ograničen na raspon između  $90^\circ$  i  $180^\circ$ , što je u skladu s kutovima koji se pojavljuju na rutama u realnim situacijama. Valja uočiti da u stvarnosti pregib na ruti uglavnom nije pravocrtan, no navedena aproksimacija je moguća (po uzoru na metodologiju u [28]). Za ovaj pomorski scenarij model razmatra brodove koji plove iz nasuprotnih smjerova u plovidbenoj situaciji promjene smjera protezanja plovidbenog puta (situacija e) na Slici 7) i sukladno tome detektira dvije vrste sudara brodova: sudare brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta (engl. „bend“) i sudare kod nasuprotnih kursova (engl. „head on“). Sudari brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta su sudari nastali pod kutom većim od  $0^\circ$  i manjim od  $180^\circ$  analogno sudarima u situaciji c) na Slici 7, a sudari kod nasuprotnih kursova su sudari nastali pod kutom od  $180^\circ$



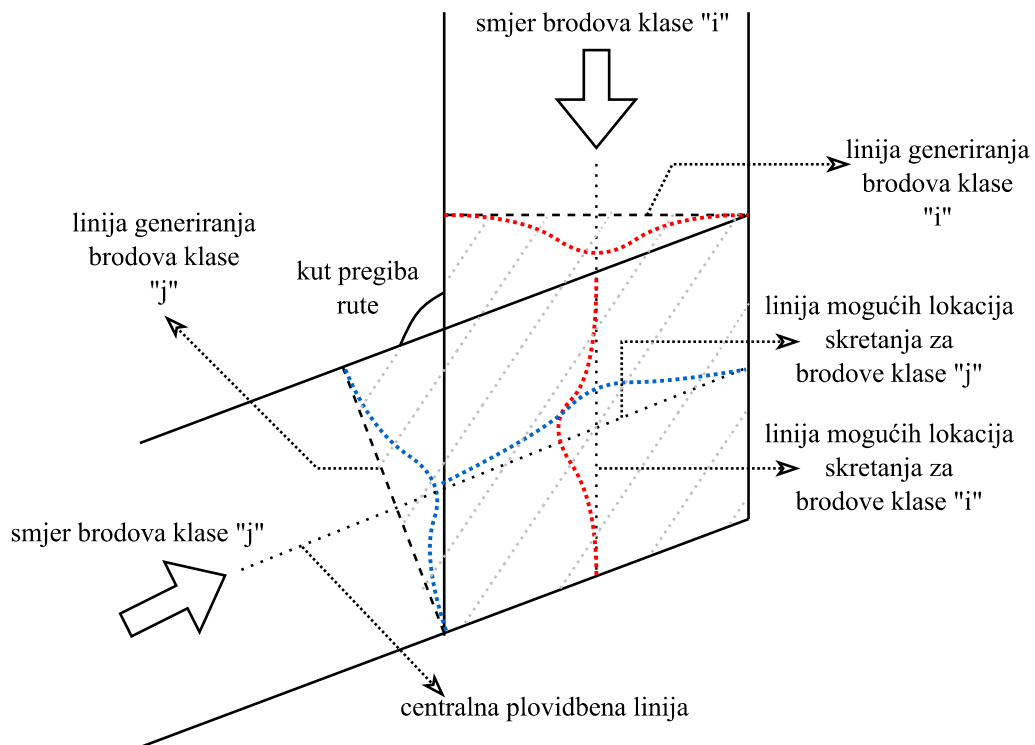
što je u skladu s klasifikacijom podržanom u [28] i sudarima koji se teoretski mogu pojaviti u ovoj plovidbenoj situaciji između dvije razmatrane klase brodova. Sudari brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta u osnovnom su fokusu ovog istraživanja.

Brodovi iz svake klase generiraju se u simuliranom vremenskom periodu na suprotnim krajevima razmatranog dijela plovidbene rute, duž širine plovidbene rute, te neposredno prije područja pregiba rute. Generiranje broda predstavlja trenutak ulaska broda u razmatrano područje pregiba na ruti. Normalna distribucija koristi se pri generiranju brodova za razmještaj brodova na inicijalnim pozicijama duž širine plovidbene rute. Brodovi se nakon generiranja kreću pravocrtno i diskretizirano s jednog kraja ka drugom kraju plovidbene rute uz primjenu skretanja. Skretanje se izvršava tako da se brod, odnosno trup broda (svi krugovi koji čine brod, osim prvog kruga) repositioniraju u smjeru plovidbe kojim je potrebno ploviti nakon promjene smjera protezanja plovidbenog puta (Slika 21 ilustrira skretanje broda).



Slika 21: Simulacija skretanja broda

Normalna distribucija također se koristi i za distribuciju lokacija izvršenja skretanja duž linije unutar pregiba rute na kojoj je skretanje teoretski moguće. U modelu se primjenjuje normalna distribucija jer najbolje opisuje prirodu same plovidbe i način skretanja brodova na plovidbenoj ruti. Ilustracija spomenutih koncepata modela prikazana je na Slici 22.



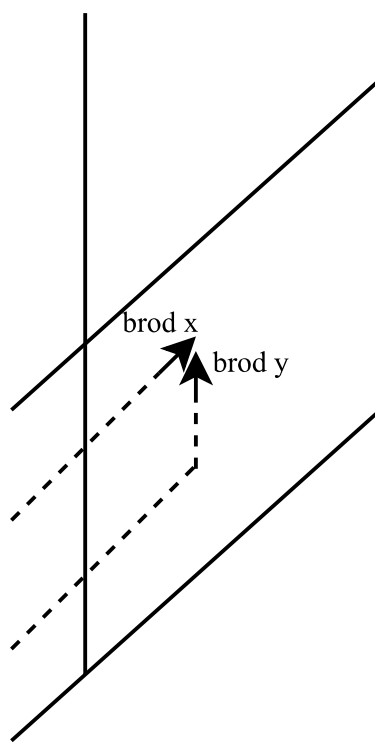
Slika 22: Koncept modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta – zone bez postojanja odvojene plovidbe

Model je razvijen tako da razmatra samo područje označeno isprekidanim sivim linijama na Slici 22 (romb i dva pravokutna trokuta). Dakle, osim područja unutar kojeg je skretanje u kontekstu ovog modela teoretski moguće (romb ili kvadrat u slučaju pravog kuta) model istodobno razmatra i dva dodatna područja (pravokutna trokuta) unutar kojih se brodovi nalaze neposredno prije ulaska u područje skretanja. Model je realiziran na taj način iz praktičnih razloga. Naime, u slučaju potrebe evaluacije rizika na preostalim „ravnim“ dijelovima rute koja je prikazana na Slici 22, ovaj način je praktičan jer je istu moguće izvršiti parcijalno koristeći autorove prethodne modele [39] za plovidbene situacije a) i b) sa Slike 7 bez izostavljanja dijelova plovidbene površine iz evaluacije ili dupliciranja evaluacije kod takvih plovidbenih površina (za izrazito tupe kutove površine dvaju pravokutnih trokuta nisu zanemarive). Prikazani koncept na Slici 22 generalna je aproksimacija plovidbe u zonama bez postojanja odvojene plovidbe pri kojoj brodovi mogu koristiti cijelu širinu rute, te sukladno tome u prosjeku teže ploviti sredinom rute. U praksi su moguće oscilacije, a srednje (očekivane) vrijednosti normalnih distribucija i standardne devijacije na linijama generiranja brodova i linijama mogućih lokacija skretanja ne moraju odgovarati prikazu na Slici 22. Primjerice,

srednja vrijednost distribucije pri generiranju brodova klase J duž linije generiranja brodova klase J ,tj. ulaska u razmatrano područje pregiba rute u nekom realističnom scenariju ne mora odgovarati sredini plovidbene rute (centralna plovidbena linija na Slici 22). Ovaj model razvijen je tako da je moguće u potpunosti kontrolirati, odnosno u skladu s potrebama modificirati sve korištene normalne distribucije, tj. pripadajuće srednje vrijednosti i standardne devijacije kojima su definirane (za više detalja vidjeti Poglavlje 5.7.3). Simulirani vremenski period se također zadaje u sekundama. Generiranje brodova na linijama generiranja brodova za obje klase se odvija u nasumičnim vremenskim trenucima unutar simuliranog vremenskog perioda. Točnije, generiranje brodova pri ulasku u područje pregiba rute simulira Poissonov proces (homogeni) zbog sljedećih razloga:

- Trenuci generiranja brodova nasumično su raspoređeni u simuliranom vremenskom periodu.
- Prosječno vrijeme između generiranja brodova poznato je i konstantno za vrijeme trajanja simulacije.
- Pojedinačni trenuci generiranja brodova međusobno su nezavisni.
- Dva broda iz iste klase ne mogu se generirati u istom trenutku.

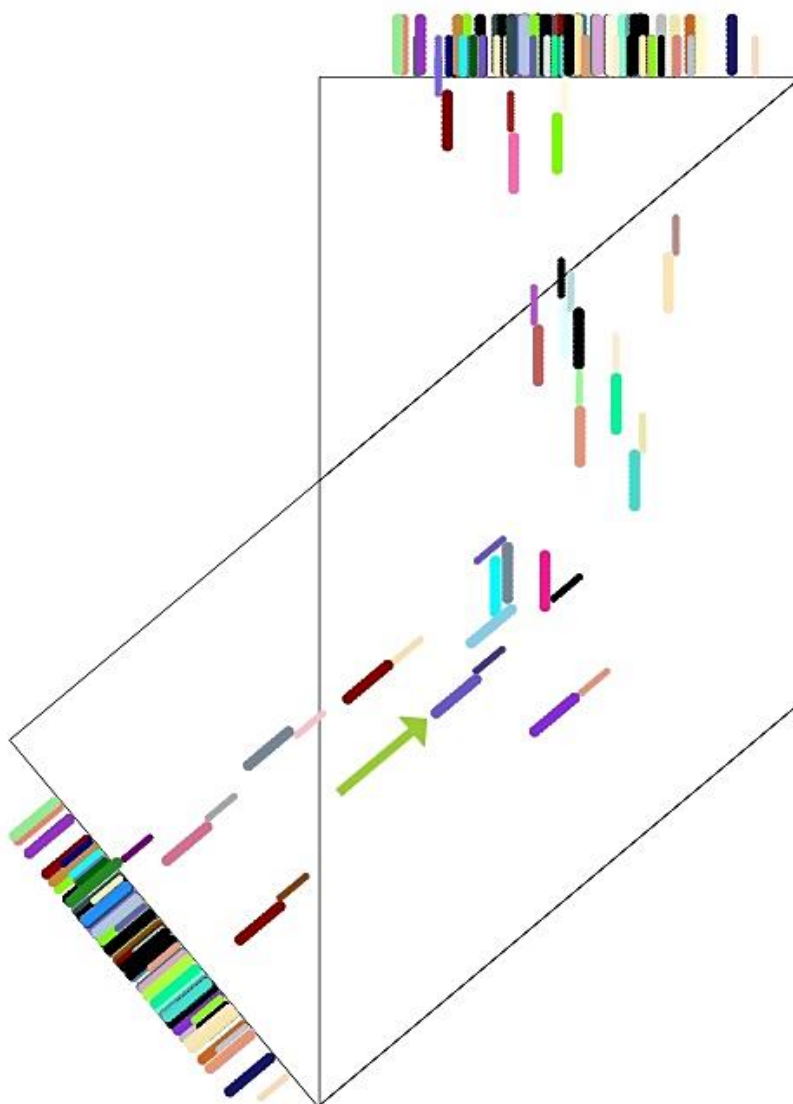
Time je omogućena ispravna detekcija kandidata za sudar brodova iste klase brodova pri skretanju s obzirom na to da korištenje fiksnog prosječnog vremenskog intervala između trenutaka generiranja brodova ne detektira kandidate za sudar kod izrazito velikih prosječnih vremenskih intervala (brodovi iste klase imaju istu prosječnu brzinu zbog čega je udaljenost između pojedinih brodova iste klase konstantna za vrijeme plovidbe tj. simulacije). Slika 23 ilustrira opisanu situaciju.



Slika 23: Sudar brodova istog smjera i klase kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta

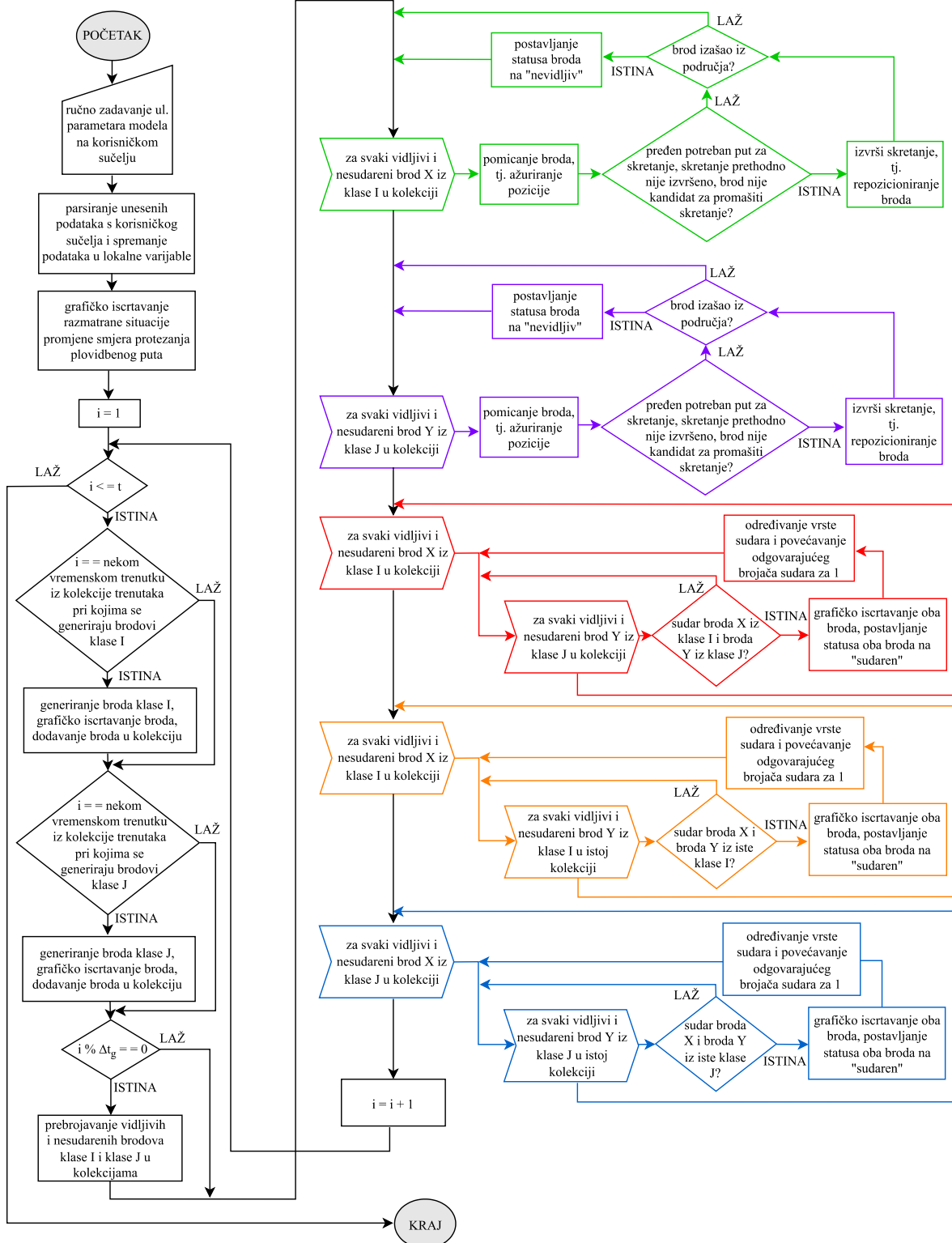
Iako Poissonov proces prirodnije simulira plovidbu brodova na ruti, za ostale plovidbene situacije dokazano je da je korištenje fiksnog prosječnog vremenskog intervala između generiranja brodova prihvatljivo jer ne narušava točnost predviđanja kandidata za sudar [39].

Vizualni modul razvijenog računalnog simulacijskog modela za promjenu smjera protezanja plovidbenog puta prikazan je na Slici 24.



Slika 24: Vizualni modul računalnog simulacijskog modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta

Slijedi prikaz dijagrama toka razvijene modelske logike, tj. algoritma računalnog simulacijskog modela (Slika 25).



Slika 25: Modelska logika (dijagram toka) – promjena smjera protezanja plovidbenog puta

Objašnjenja parametara sa Slike 25 su sljedeća:

- Vidljivi brod – brod koji se nije sudario i nalazi se unutar razmatranog plovidbenog područja (kvadrata).
- Kolekcija brodova – kolekcija objekata (u kontekstu OOP) koji predstavljaju brodove.
- Kolekcija vremenskih trenutaka generiranja brodova – kolekcija cijelih brojeva koji predstavljaju vremenske trenutke (sekunde) u kojima se brodovi generiraju i postavljaju u plovidbeno područje.
- $t$  – ukupno simulirano vrijeme.
- $\Delta t_g$  – vremenski interval između brojanja vidljivih i nesudarenih brodova klase I i J unutar razmatranog plovidbenog područja.

## **5.7. Testne simulacije i validacija modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta**

Ovo poglavlje daje opis metodologije izvođenja testnih simulacija i validacije razvijenog računalnog simulacijskog modela uz pomoć programskog paketa IWRAP i analitičko – numeričkih metoda koje su implementirane unutar istog. Pored hipotetskih scenarija i podataka, model je također testiran i validiran pomoću stvarnog plovidbenog scenarija i AIS podataka prometa brodova.

### **5.7.1. Hipotetski primjer scenarija i metodologija izvođenja simulacija**

Pomorski scenarij kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta testiran je na sljedećem primjeru prometa brodova i plovidbene rute:

- Promatrani vremenski period  $\Delta t$  iznosi 365 dana.
- Širina rute iznosi 3600 m.
- Kut pregiba rute iznosi  $130^\circ$ .

- Srednja vrijednost normalne distribucije za obje klase brodova kod razmještaja lokacija generiranja brodova  $\mu_G = 1800$  m i pripadajuća standardna devijacija  $\sigma_G = 600$  m.
- Srednja vrijednost normalne distribucije za obje klase brodova kod razmještaja lokacija skretanja brodova  $\mu_S = 2349$  m i pripadajuća standardna devijacija  $\sigma_S = 783$  m.

Brodovi klase I:

- $Q_i = 43800 / (365 \cdot 24 \cdot 3600)$  s,
- $V_i = 8,2$  m/s,
- $B_i = 18$  m,
- $L_i = 111$  m.

Brodovi klase J:

- $Q_j = 51100 / (365 \cdot 24 \cdot 3600)$  s,
- $V_j = 6,6$  m/s,
- $B_j = 12$  m,
- $L_j = 63$  m.

Značenja gore navedenih ulaznih parametara za obje klase brodova ista su kao i u Poglavlju 5.4.1. S obzirom na to da se validacija provodi uz pomoć računalnog programa IWRAP, dimenzije brodova klase I i J odabrane su tako da odgovaraju nekom od 14 tipova brodova iz „Lloyd“ baze brodova koju podržava IWRAP [28]. Brodovi klase I u gornjem primjeru predstavljaju brodove za rasuti teret (engl. bulk carrier) kategorije 100 – 125 m dužine (prosječna dužina iz baze brodova je 111 m, a prosječna širina 18 m). Brodovi klase J predstavljaju brodove za opći teret (engl. general cargo) kategorije 50 – 70 m dužine (prosječna dužina iz baze brodova je 63 m, a prosječna širina 12 m). Dužina i širina brodova klase I u modelu je simulirana spajanjem 11 krugova promjera 18 m u izduženi oblik po uzoru na metodu opisanu u Poglavlju 5.4.1 (Slika 15). Time je postignuta dimenzija broda dužine 108 m i širine 18 m što predstavlja prikladnu aproksimaciju dimenzije gore spomenutih brodova za rasuti teret kategorije 100 – 125 m dužine (prosječne dužine 111 m i prosječne širine 18 m). Analogno, dužina i širina brodova klase J u modelu simulirana je spajanjem 10 krugova promjera 12 m u izduženi oblik.



Srednje vrijednosti normalnih distribucija i standardne devijacije odabrane su na način da simuliraju plovidbu prikazanu na Slici 22, tj. plovidbu u zonama bez odvojene plovidbe gdje brodovi teoretski mogu koristiti cijelu širinu rute za plovidbu uz tendenciju plovidbe sredinom rute. Drugim riječima, srednja vrijednost normalne distribucije  $\mu_G$  koja iznosi 1800 m (širina rute je 3600 m) osigurava da za vrijeme trajanja simulacije većina brodova plovi sredinom rute uz standardnu devijaciju  $\sigma_G$  koja iznosi 600 m i simulira korištenje cijele širine rute (+/- tri standardne devijacije iznosa 600 m osigurava da 99,7% brodova za vrijeme simulacije plovi unutar granica rute širine 3600 m). Model može automatski određivati spomenute srednje vrijednosti normalnih distribucija i standardne devijacije na temelju zadane širine rute i kuta pregiba na ruti ako se simulira plovidba u zonama bez odvojene plovidbe.

Gore navedeni ulazni parametri uneseni su u model i simulacija je pokrenuta 30 puta (po uzoru na metodologiju prikazanu u Poglavlju 5.4.1). Odabrano simulirano vrijeme je jedan dan. Rezultati 30 pokrenutih simulacija su sljedeći:

16, 4, 11, 10, 9, 12, 6, 11, 18, 12, 8, 10, 9, 7, 9, 8, 10, 8, 6, 4, 12, 8, 10, 5, 15, 8, 9, 14, 11, 8

Na temelju rezultata 30 simulacija dobiven je prosječan ukupni očekivani broj kandidata za sudar u jednom danu  $N_{uk} = 9,6$ , odnosno prosječan ukupni očekivani broj kandidata za sudar u jednoj godini  $N_{uk} = 3504$ . Ovaj model razlikuje dva tipa nastalih kandidata za sudar: kandidate za sudar kod nasuprotnih kursova i kandidate za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta, tj. sudare nastale pod kutom između  $0^\circ$  i  $180^\circ$  kako je i navedeno u prethodnom Poglavlju 5.6. Unutar gore navedenih 30 simulacija detektiran je sljedeći broj kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta (engl. „bend“)  $N_b$ :

11, 3, 6, 6, 3, 8, 3, 6, 6, 8, 4, 6, 6, 5, 4, 3, 3, 4, 5, 3, 6, 6, 7, 3, 7, 3, 6, 5, 4, 6

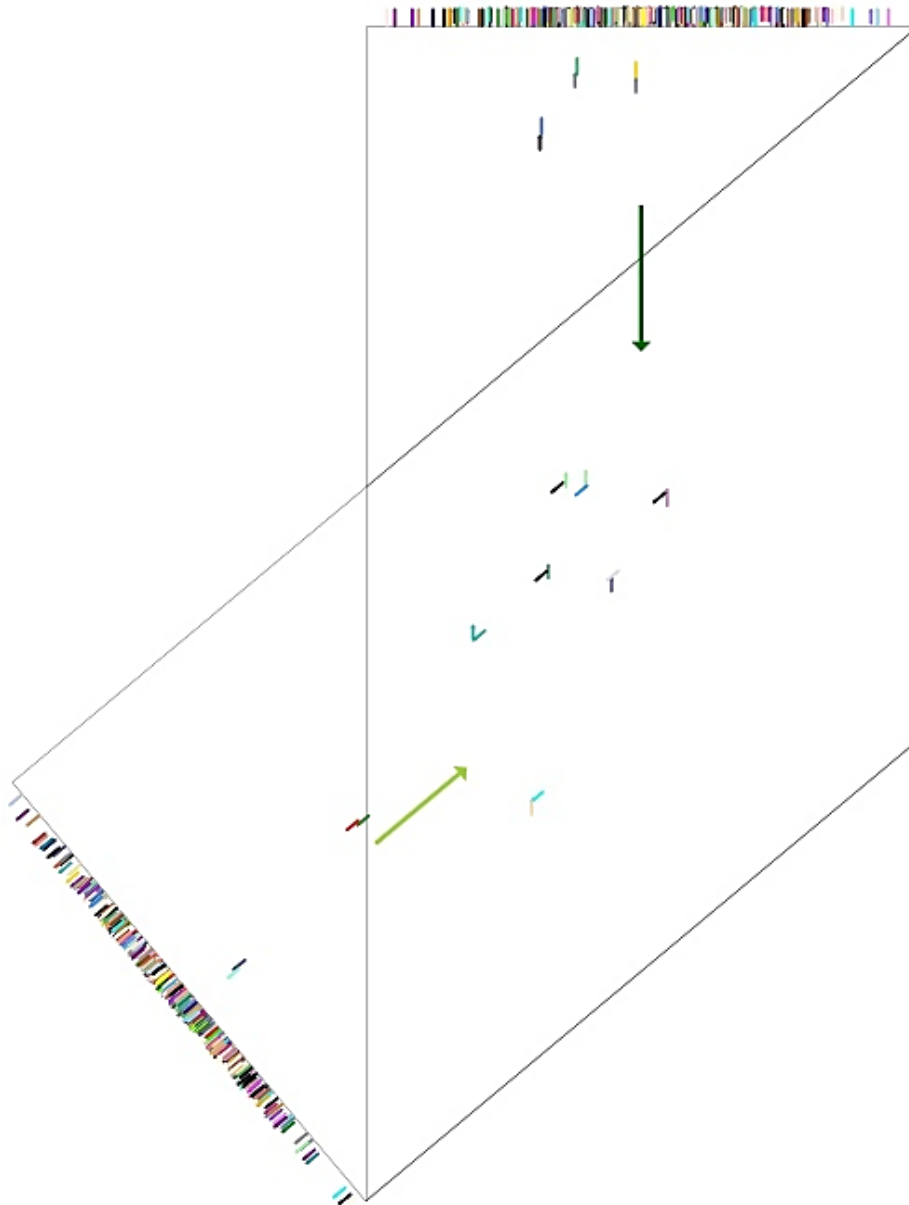
Dakle, prosječan očekivani broj kandidata za sudar u jednom danu iznosi  $N_b = 5,2$ , odnosno prosječan očekivani broj kandidata za sudar u jednoj godini iznosi  $N_b = 1898$ .

Također, unutar gore navedenih 30 simulacija detektiran je sljedeći broj kandidata za sudar kod nasuprotnih kursova (engl. „head on“)  $N_h$ :

5, 1, 5, 4, 6, 4, 3, 5, 12, 4, 4, 4, 3, 2, 5, 5, 7, 4, 1, 1, 6, 2, 3, 2, 8, 5, 3, 9, 7, 2

Dakle, prosječan očekivani broj kandidata za sudar u jednom danu iznosi  $N_h = 4,4$ , odnosno prosječan očekivani broj kandidata za sudar u jednoj godini iznosi  $N_h = 1606$ . Valja napomenuti da je  $N_{uk} = N_b + N_h$ .

Simulirani scenarij navedenog primjera u računalnom simulacijskom modelu prikazan je na Slici 26.

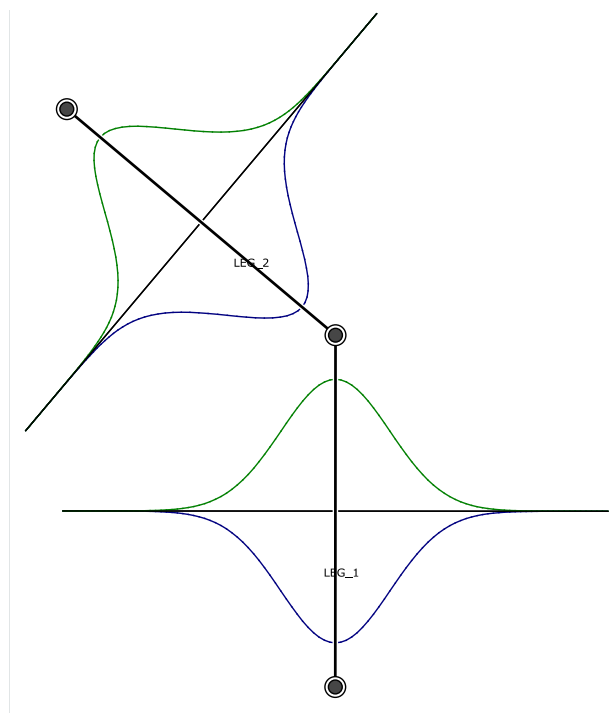


Slika 26: Primjer scenarija sudara kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta – vizualni modul računalnog simulacijskog modela

Kao i kod modela opisanog u Poglavlju 5.3 stvarni broj očekivanih sudara može se dobiti množenjem dobivenog broja kandidata za sudar s odgovarajućim korekcijskim čimbenikom  $P_c$ . Prema Tablici 1, korekcijski čimbenik za sudare kod nasuprotnih kursova iznosi  $P_c = 0,5 \cdot 10^{-4}$ , a za sudare kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta iznosi  $P_c = 1,3 \cdot 10^{-4}$ . Stvarni broj ukupnih očekivanih sudara u ovom primjeru plovidbenog scenarija promjene smjera protezanja plovidbenog puta računa se na način:  $N_{uk} = 1606 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} + 1898 \cdot 1,3 \cdot 10^{-4} = 0,32$  sudara godišnje.

U validacijske svrhe, isti hipotetski primjer simuliran je i u računalnom programu IWRAP.

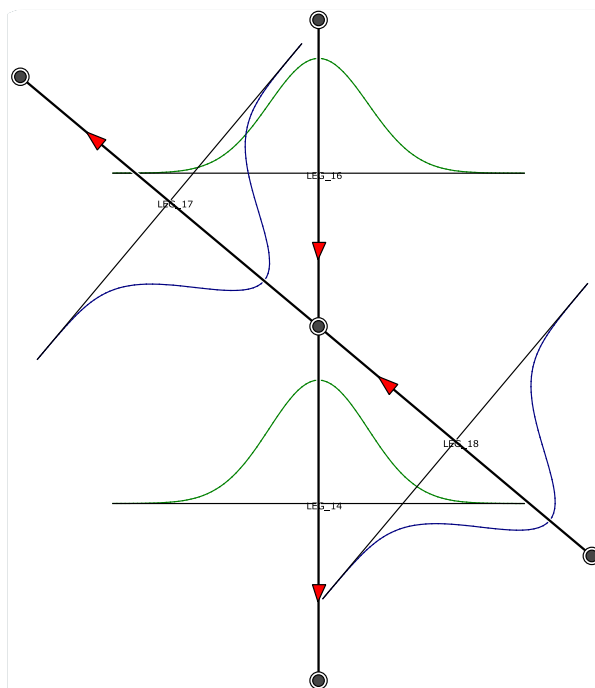
Duljina centralne plovidbene linije unutar razmatranog područja rute (isprekidane sive linije na Slici 22) u gornjem hipotetskom scenariju iznosi 7720 m. Ovo nije ulazni parametar računalnog simulacijskog modela, te ga model automatski izračunava uz pomoć trigonometrije na temelju širine rute i kuta pregiba. Ovaj parametar potreban je zbog uvida u duljinu rute za koju je izvršena evaluacija rizika (što je veći kut pregiba i širina rute, to je veća duljina rute koju model razmatra), a nužan je za simulaciju ovog hipotetskog scenarija u programu IWRAP. U program IWRAP i pripadajuća korisnička sučelja za unos potom su uneseni gore navedeni ulazni parametri. Na proizvoljno odabranom dijelu morske površine nacrtane su dvije centralne plovidbene linije (oznaka LEG 1 i LEG 2) koje tvore tupi kut od  $130^\circ$ . Svaka linija je dužine 3860 m čime se postiže ukupna dužina linije od 7720 m s pregibom u sredini. Slika 27 prikazuje IWRAP simulaciju navedene situacije (Slika 27 zarotirana je u odnosu na Sliku 26).



Slika 27: Primjer scenarija sudara kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta u računalnom programu IWRAP

Za brodove klase I iz IWRAP izbornika odabrani su brodovi za rasuti teret (engl. bulk carrier) kategorije 100 – 125 m dužine (normalna distribucija označena zelenom bojom), a za klasu J odabrani su brodovi za opći teret (engl. general cargo) kategorije 50 – 70 m dužine (normalna distribucija označena plavom bojom).

Jedini parametar koji nije moguće unijeti u IWRAP je srednja vrijednost normalne distribucije za razmještaj lokacija skretanja brodova. Naime, IWRAP sudare kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta aproksimira sudarima pri križanju kursova, odnosno plovidbenom situacijom c) (Slika 7). Drugim riječima, IWRAP učestalost sudara kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta sa Slike 27 izračunava na način ilustriran na Slici 28.



Slika 28: IWRAP aproksimacija promjene smjera protezanja plovidbenog puta križanjem kursova

Dokaz navedene tvrdnje vidljiv je iz činjenice da IWRAP za situaciju prikazanu na Slici 27 i Slici 28 (uz isti promet brodova bez poduzimanja skretanja, te istu širinu rute i kut) daje potpuno identičan broj kandidata za sudar za obje situacije, tj. broj kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta u situaciji na Slici 27 identičan je broju kandidata za sudar pri križanju kursova u situaciji prikazanoj na Slici 28 (Napomena: oznake u obliku crvenih trokuta na Slici 28 ne označavaju smjer kretanja brodova).

IWRAP rezultati gore navedenog hipotetskog primjera su sljedeći:

Prosječan očekivani broj kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta u jednoj godini iznosi  $N_b = 2229$ . Prosječan očekivani broj kandidata za sudar kod nasuprotnih kursova u jednoj godini iznosi  $N_h = 2034$ . Dakle, ukupan očekivani broj kandidata za sudar u jednoj godini iznosi  $N_{uk} = 4263$ . Zbirni rezultati svih hipotetskih testnih simulacija i objašnjenja rezultata prikazani su u sljedećem poglavlju.

## 5.7.2. Validacija računalnog simulacijskog modela uz pomoć programskog paketa IWRAP i analiza rezultata

U svrhu validacije razvijenog računalnog simulacijskog modela i utvrđivanja korelacije s rezultatima računalnog programa IWRAP, po uzoru na metodologiju opisanu u Poglavlju 5.4.1 odabrano je 30 hipotetskih scenarija promjene smjera protezanja plovidbenog puta. Prvih 8 hipotetskih scenarija odabrano je koristeći testni kriterij „svi parovi“. Ulazni parametri ovog modela: broj brodova, veličina brodova, brzina brodova, kut pregiba rute i širina rute, podijeljeni su također u dvije kategorije („manja“ i „veća“) kako je prikazano u Tablici 8.

Tablica 8: Podjela ulaznih parametara modela u dvije kategorije – promjena smjera protezanja plovidbenog puta

manja kategorija broja brodova godišnje 0-21900	veća kategorija broja brodova godišnje > 21900
manja kategorija brzine 0-6 m/s	veća kategorija brzine > 6 m/s
manja kategorija veličine brodova 0-75 m	veća kategorija veličine brodova > 75 m
manja kategorija kuta pregiba rute 90°-120°	veća kategorija kuta pregiba rute 120°-160°
manja kategorija širine rute 0-3000	veća kategorija širine rute > 3000 m

Kategorija „širine brodova“ i „dužine brodova“ je zamijenjena kategorijom „veličina brodova“ jer se za validaciju koriste predefimirani tipovi brodova iz programa IWRAP gdje su širina i dužina broda fiksno određene odabranim tipom brodova. Srednje vrijednosti normalnih distribucija i standardne devijacije u modelu su određene automatski na temelju zadane širine rute i kuta pregiba na ruti s obzirom na to da se simuliraju situacije u zonama bez postojanja odvojene plovidbe (Slika 22). Prvih 8 kombinacija kojima je zadovoljen testni kriterij „svi parovi“ prikazano je u Tablici 9.

Tablica 9: Kombinacije prema testnom kriteriju „svi parovi“ – promjena smjera protezanja plovidbenog puta

Rb.	Broj "I" brodova	Broj "J" brodova	Veličina "I" brodova	Veličina "J" brodova	Brzina "I" brodova	Brzina "J" brodova	Kut°	Širina rute
1	veća	veća	veća	veća	manja	manja	manja	veća
2	manja	manja	manja	manja	veća	veća	manja	manja
3	veća	manja	manja	veća	manja	veća	veća	veća
4	manja	veća	veća	veća	veća	manja	veća	manja
5	veća	manja	veća	manja	manja	manja	veća	manja
6	manja	veća	manja	manja	veća	manja	manja	veća
7	manja	veća	veća	veća	manja	veća	manja	manja
8	veća	manja	veća	manja	veća	manja	veća	veća

Proveden je analogan postupak kao u Poglavlju 5.4.2. Dakle, prvih 8 scenarija odabrano je prema gore navedenom kriteriju „svi parovi“, dok su preostala 22 scenarija odabrana proizvoljno. Svi scenariji i ulazni parametri za svakog od njih prikazani su u Tablici 10.

Tablica 10: Ulazni parametri modela za svaki hipotetski scenarij – promjena smjera protezanja plovidbenog puta

Rb.	Širina rute (m)	Kut°	Broj "I" brodova u jednoj godini	Brzina "I" brodova (čv i m/s)	Veličina "I" brodova (dužina u m)	Broj "J" brodova u jednoj godini	Brzina "J" brodova (čv i m/s)	Veličina "J" brodova (dužina u m)
1	3200	115°	40150	8 čv (4,11 m/s)	kontejnerski brod (75-100 m)	54750	10 čv (5,14 m/s)	brod za rasuti teret (75-100 m)
2	4000	140°	51830	11 čv (5,65 m/s)	brod za opći teret (25-50 m)	21170	16 čv (8,23 m/s)	brod za rasuti teret (100-125 m)
3	2600	145°	15330	14 čv (7,2 m/s)	brod za kemikalije (75-100 m)	32850	11 čv (5,65 m/s)	brod za rasuti teret (100-125 m)
4	2500	150°	62050	11 čv (5,65 m/s)	brod za opći teret (125-150 m)	20440	7 čv (3,6 m/s)	brod za opći teret (25-50 m)
5	2400	110°	18250	14 čv (7,2 m/s)	kontejnerski brod (50-75 m)	21900	16 čv (8,23 m/s)	brod za opći teret (50-75 m)
6	3200	105°	19345	17 čv (8,74 m/s)	kontejnerski brod (50-75 m)	56575	6 čv (3 m/s)	brod za opći teret (25-50 m)
7	3000	115°	17155	9 čv (4,63 m/s)	brod za opći teret (125-150 m)	61320	22 čv (11,31 m/s)	tanker za naftu (150-175 m)
8	4200	130°	50370	25 čv (12,86 m/s)	brod za opći teret (150-175 m)	20075	9 čv (4,63 m/s)	kontejnerski brod (50-75 m)
9	500	120°	58400	9,7 čv (5 m/s)	brod za opći teret (25-50 m)	40150	3,8 čv (2 m/s)	brod za opći teret (25-50 m)
10	600	100°	65700	7 čv (3,6 m/s)	brod za kemikalije (75-100 m)	43800	3 čv (1,54 m/s)	brod za opći teret (50-75 m)
11	700	150°	40150	9 čv (4,63 m/s)	brod za rasuti teret (100-125 m)	47450	11 čv (5,65 m/s)	kontejnerski brod (75-100 m)
12	2000	110°	49275	13 čv (6,68 m/s)	brod za opći teret (125-150 m)	54750	11 čv (5,65 m/s)	brod za rasuti teret (75-100 m)

13	3000	155°	29200	10 čv (5,14 m/s)	brod za opći teret (50-75 m)	18250	7 čv (3,6 m/s)	brod za opći teret (125-150 m)
14	2000	165°	40150	12 čv (6,17)	kontejnerski brod (75-100 m)	43800	14 čv (7,2 m/s)	brod za opći teret (125-150 m)
15	3000	95°	43800	10 čv (5,14 m/s)	brod za kemikalije (75-100 m)	54750	13 čv (6,68 m/s)	brod za rasuti teret (100-125 m)
16	1800	115°	54750	8 čv (4,11 m/s)	brod za opći teret (50-75 m)	47450	10 čv (5,14 m/s)	brod za kemikalije (75-100 m)
17	4000	125°	62050	15 čv (7,71 m/s)	brod za opći teret (125-150 m)	51100	9 čv (4,63 m/s)	brod za opći teret (50-75 m)
18	3600	130°	58400	5 čv (2,57 m/s)	brod za rasuti teret (75-100 m)	52925	4 čv (2,05 m/s)	brod za opći teret (50-75 m)
19	4000	120°	138700	18 čv (9,26 m/s)	brod za opći teret (125-150 m)	105850	15 čv (7,71 m/s)	brod za rasuti teret (100-125 m)
20	3600	130°	43800	16 čv (8,23 m/s)	brod za rasuti teret (100-125 m)	51100	13 čv (6,68 m/s)	brod za opći teret (50-75 m)
21	3400	150°	18250	14 čv (7,2 m/s)	kontejnerski brod (50-75 m)	54750	9 čv (4,63 m/s)	brod za opći teret (150-175 m)
22	3800	100°	27375	20 čv (10,28 m/s)	brod za opći teret (150-175 m)	73000	15 čv (7,71 m/s)	brod za rasuti teret (100-125 m)
23	4000	110°	83950	26 čv (13,37)	brod za opći teret (150-175 m)	27375	9 čv (4,63 m/s)	kontejnerski brod (50-75 m)
24	3000	120°	36500	8 čv (4,11 m/s)	brod za opći teret (25-50 m)	58400	10 čv (5,14 m/s)	brod za rasuti teret (75-100 m)
25	3000	100°	36500	8 čv (4,11 m/s)	brod za opći teret (125-150 m)	29200	6 čv (3 m/s)	kontejnerski brod (75-100 m)
26	4000	110°	62050	27 čv (13,89 m/s)	tanker za naftu (150-175 m)	20075	9 čv (4,63 m/s)	kontejnerski brod (50-75 m)
27	4200	130°	21900	7 čv (3,6 m/s)	brod za opći teret (25-50 m)	16425	15 čv (7,71 m/s)	brod za opći teret (50-75 m)
28	4000	120°	83950	9 čv (4,63 m/s)	brod za opći teret (25-50 m)	21900	20 čv (10,28 m/s)	brod za opći teret (125-150 m)
29	4100	140°	62050	11 čv (5,65 m/s)	brod za rasuti teret (100-125 m)	58400	8 čv (4,11 m/s)	brod za opći teret (50-75 m)
30	1000	130°	91250	6 čv (3 m/s)	brod za kemikalije (75-100 m)	73000	4 čv (2,05 m/s)	brod za opći teret (50-75 m)

Razmatrano vrijeme za svaki scenarij je jedna godina, tj.  $\Delta t = 365$  dana. Za veličinu „I“ i „J“ brodova korišteno je 5 tipova brodova različitih dimenzija kojima raspolaže IWRAP. Upotreba većeg broja tipova brodova nije nužna za ispravno testiranje jer IWRAP pri procjeni učestalosti sudara u obzir uzima samo dimenzije i brzinu broda, te ne pravi razliku među tipovima brodova (Primjerice, brod za rasuti teret ima jednaku vjerojatnost za sudar kao i brod za opći teret istih dimenzija i brzine). U Tablici 10 brzina je prikazana u čvorovima (ulazni podatak za IWRAP) i u m/s (ulazni podatak za računalni simulacijski model). Za svaki korišteni tip broda iz Tablice 10, u izvoru [28] moguće je pronaći popis pripadajućih prosječnih dužina i širina svakog tipa broda kojim raspolaže IWRAP (ulazni podaci za računalni simulacijski model).



Potom je za svaki hipotetski scenarij i pripadajuće parametre iz Tablice 10 izvršen izračun očekivanog broja kandidata za sudar pomoću razvijenog računalnog simulacijskog modela i programa IWRAP.

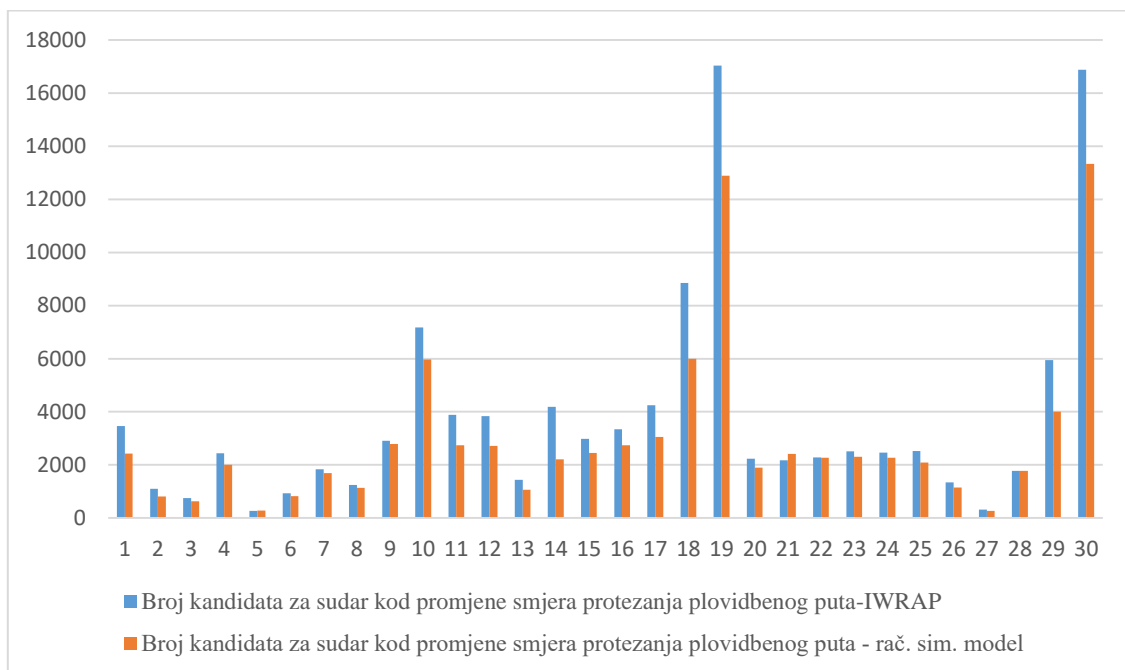
IWRAP rezultati su deterministički, a za svaki scenarij kod računalnog simulacijskog modela simulacija je pokrenuta 30 puta. Usporedba rezultata programa IWRAP i računalnog simulacijskog modela prikazana je u Tablici 11.

Tablica 11: Broj kandidata za sudar prema računalnom simulacijskom modelu i računalnom programu IWRAP kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta

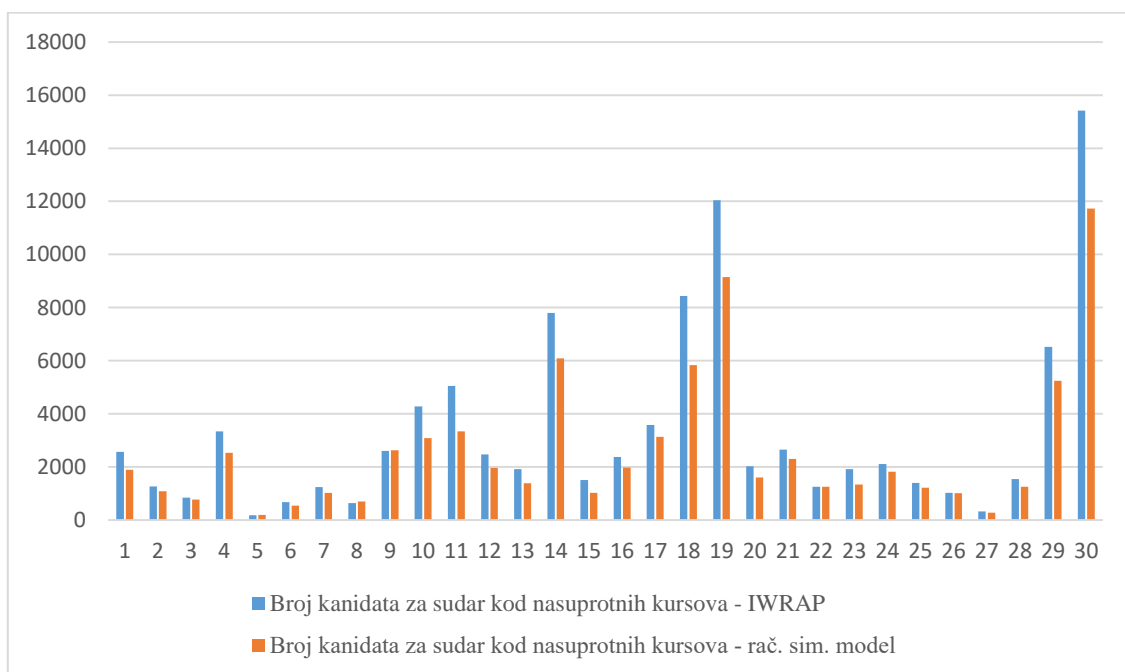
Rb.	Ukupan broj kandidata za sudar - IWRAP	Ukupan broj kandidata za sudar - rač. sim. model	Broj kanidata za sudar kod nasuprotnih kursova - IWRAP	Broj kanidata za sudar kod nasuprotnih kursova - rač. sim. model	Broj kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta - IWRAP	Broj kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta - rač. sim. model
1	6026	4331	2568	1898	3458	2433
2	2368	1907	1270	1095	1098	812
3	1602	1399	849	771	752	628
4	5779	4538	3339	2531	2440	2007
5	451	479	185	194	265	285
6	1617	1374	685	547	931	827
7	3082	2729	1242	1031	1841	1698
8	1882	1838	639	704	1243	1134
9	5517	5422	2607	2633	2909	2789
10	11463	9058	4284	3086	7179	5972
11	8933	6083	5050	3346	3883	2847
12	6305	4695	2471	1975	3834	2720
13	3372	2466	1927	1397	1444	1069
14	11990	8299	7806	6094	4181	2205
15	4503	3481	1516	1025	2987	2456
16	5712	4722	2374	1985	3338	2737
17	7840	6192	3589	3139	4251	3053
18	17029	11830	8442	5840	8848	5990
19	29079	22029	12046	9149	17033	12880
20	4263	3506	2034	1603	2229	1727
21	4822	4725	2653	2305	2170	2420
22	3537	3524	1256	1255	2280	2269
23	4432	3650	1919	1339	2513	2311
24	4571	4099	2113	1825	2458	2274
25	3929	3314	1404	1227	2524	2087
26	2371	2177	1029	1022	1342	1155
27	653	558	331	285	321	273
28	3332	3037	1551	1260	1780	1777

29	12047	9246	6527	5244	5944	4002
30	32290	25067	15420	11731	16870	13336

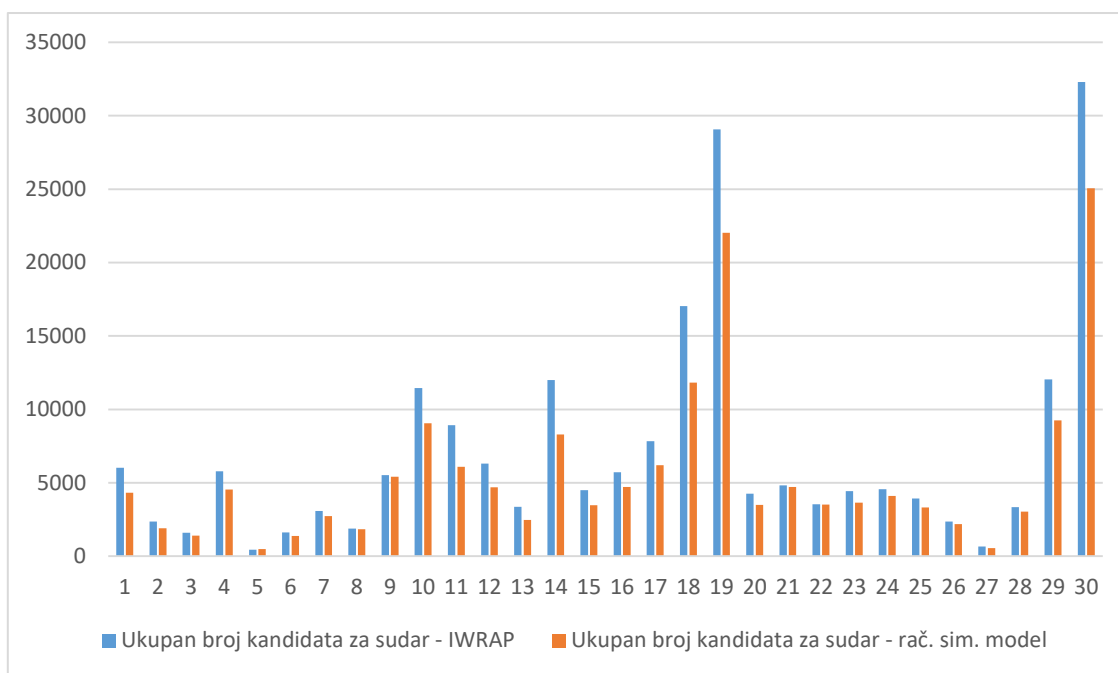
Grafički prikaz usporedbe rezultata računalnog simulacijskog programa i programa IWRAP nalazi se na Slici 29, Slici 30 i Slici 31.



Slika 29: Usporedba broja kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta prema računalnom simulacijskom modelu i računalnom programu IWRAP



Slika 30: Usporedba broja kandidata za sudar kod nasuprotnih kursova prema računalnom simulacijskom modelu i računalnom programu IWRAP

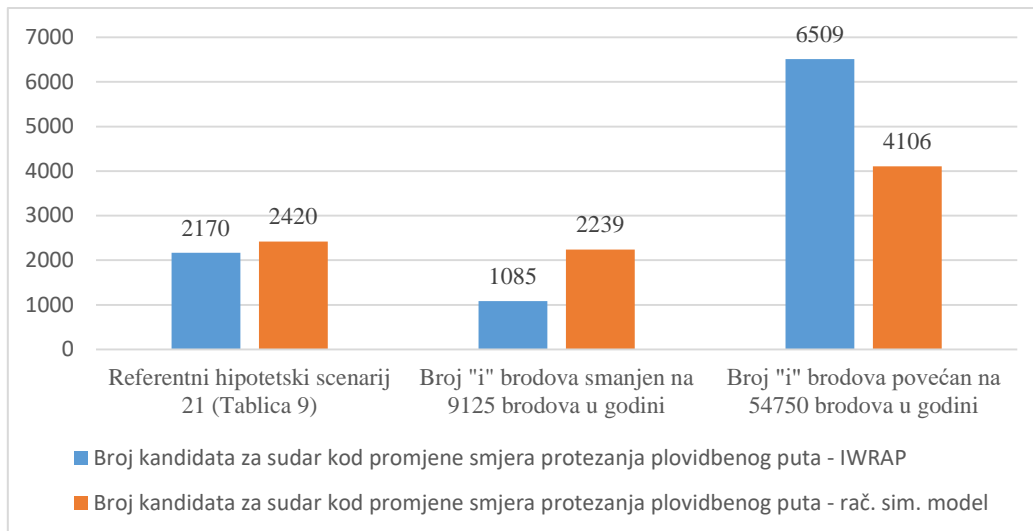


Slika 31: Usporedba ukupnog broja kandidata za sudar prema računalnom simulacijskom modelu i računalnom programu IWRAP

Na temelju rezultata vidljiva je snažna korelacija između rezultata računalnog simulacijskog modela i programa IWRAP. Pearsonov koeficijent linearne korelacije  $R$  za broj kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta iznosi 0,992, a za broj kandidata za sudar kod nasuprotnih kursova iznosi 0,996. Prosječno odstupanje između rezultata računalnog simulacijskog modela i programa IWRAP za svaku od tri izračunate kategorije (broj kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta, broj kandidata za sudar kod nasuprotnih kursova i ukupan zbroj) iznosi  $\approx 20\%$ . Drugim riječima, može se generalno zaključiti da računalni simulacijski model rezultira u prosjeku manjim brojem kandidata za sudar u odnosu na program IWRAP za razmatranu plovidbenu situaciju promjene smjera protezanja plovidbenog puta. U kontekstu prirode ovakvih modela, takve oscilacije smatraju se prihvatljivima [39].

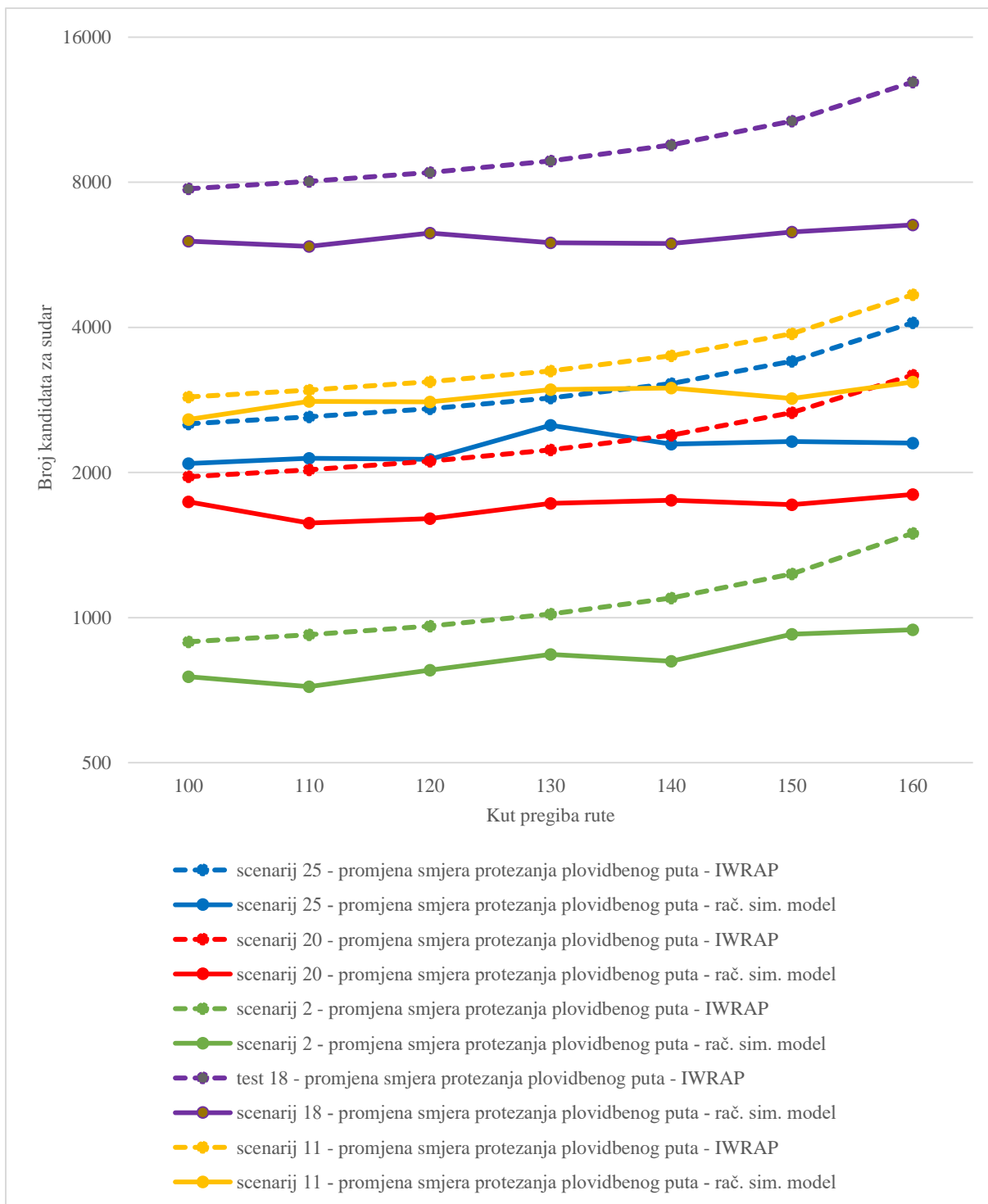
S obzirom na prethodno opisan način kojim program IWRAP simulira plovidbenu situaciju promjene smjera protezanja plovidbenog puta (prikazano na Slici 28) i način kojim računalni simulacijski model simulira tu istu situaciju (prikazano na Slici 24 i Slici 26), odstupanje u rezultatima je očekivano. Nedvojbeno je da razvijeni računalni simulacijski model realističnije simulira navedenu situaciju s obzirom na to da križanje kursova, tj. plovidbenih ruta (situacija c) na Slici 7) i promjena smjera protezanja plovidbenog puta na nekoj ruti (situacija e) na Slici 7) predstavljaju dvije potpuno različite plovidbene situacije. Također,

računalni simulacijski model za razliku od programa IWRAP u simulaciji dodatno razmatra i međusobne sudare brodova istog smjera unutar jedne klase brodova (prikazano na Slici 23), te bi izostavljanje navedenog iz računalnog simulacijskog modela rezultiralo još manjim brojem kandidata za sudar kod računalnog simulacijskog modela, tj. većom razlikom između rezultata računalnog simulacijskog modela i programa IWRAP. Procjena sudara brodova u spomenutoj situaciji prikazanoj na Slici 23 u potpunosti je opravdana [102]. Uključivanje ove situacije u model razlog je zbog kojeg primjerice, računalni simulacijski model za hipotetski scenarij 21 na Slici 29 rezultira većim brojem kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta u odnosu na rezultat koji daje IWRAP. Naime, hipotetski scenarij 21 podrazumijeva plovidbu značajno većeg broja brodova iz jednog smjera koji postaju kandidati za sudar u situaciji koja je ilustrirana na Slici 23, dok iz suprotnog smjera plovi znatno manji broj brodova. Prema istoj Slici 23 potrebno je uočiti da u ekstremnoj situaciji gdje iz jednog smjera postoji plovidba brodova, a iz drugog ne, program IWRAP za razliku od računalnog simulacijskog modela ne detektira nikakve kandidate za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta (zbog samog načina simuliranja plovidbene situacije). Također, iz istog razloga program IWRAP maksimizira broj kandidata za sudar u situacijama gdje iz oba smjera postoji plovidba brodova s jednakim, odnosno približno jednakim brojem brodova u realnim situacijama. Primjerice, ako se za hipotetski scenarij 21 dodatno smanji ulazni podatak „Broj "I" brodova u jednoj godini“ na iznos od 9125 brodova godišnje (a svi ostali podaci ostanu nepromijenjeni), razlika između broja kandidata za sudar računalnog simulacijskog modela i programa IWRAP dodatno se povećava na način da računalni simulacijski model za broj kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta iznosi 2239, a kod programa IWRAP iznosi 1085 kandidata za sudar. Također, ako se za hipotetski scenarij 21 dodatno povećava ulazni podatak „Broj "I" brodova u jednoj godini“ na 54750 (tj. izjednači s ulaznim podatkom „Broj "J" brodova u jednoj godini“ drugog smjera), program IWRAP maksimizira broj kandidata za sudar, te rezultira sa 6509 kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta, dok računalni simulacijski model rezultira s 4106 kandidata za sudar. Rezultati spomenute modifikacije hipotetskog scenarija 21 prikazani su na Slici 32.



Slika 32: Usporedba broja kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta prema računalnom simulacijskom modelu i računalnom programu IWRAP za različite modifikacije hipotetskog scenarija 21

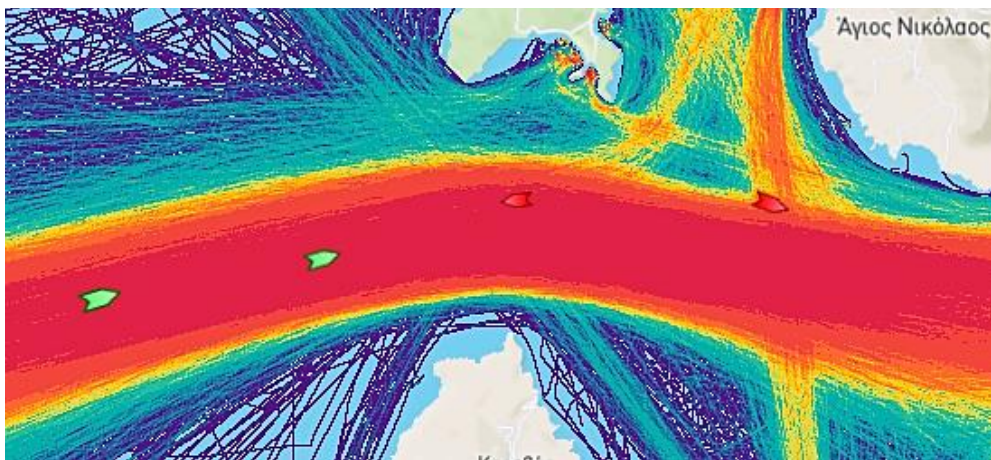
U prilog realističnosti broja kandidata za sudar računalnog simulacijskog modela ide i činjenica da je broj kandidata za sudar programa IWRAP isključivo kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta u nekoliko relevantnih istraživanja na temelju prosudbe eksperata ocijenjen kao precijenjen [19, 61, 103]. Takvi zaključci istraživanja mogu pronaći uporište i u činjenici da u realnim situacijama promjena smjera protezanja plovidbenog puta na ruti iz praktičnih razloga najčešće podrazumijeva veće kutove pregiba (tj. izrazito tupe kutove između „pravocrtnog“ dijela rute prije pregiba i „pravocrtnog“ dijela rute nakon pregiba), a uočeno je da IWRAP eksponencijalno povećava broj kandidata za sudar s povećanjem kuta pregiba. Eksponencijalno povećanje broja kandidata za sudar u plovidbenoj situaciji križanja kursova (kojom IWRAP aproksimira određivanje kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta) potvrđeno je i u istraživanju [39]. Također je uočeno da pri izrazito velikim kutovima pregiba rute dolazi do dodatnog povećanja razlike između broja kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta koje izračunava računalni simulacijski model i koje izračunava IWRAP (ne vrijedi za ekstremne situacije u kojima jedan od smjerova na istoj ruti ima značajno manji promet brodova od drugog smjera). Grafom na Slici 33 prikazan je primjer povećanja razlike broja kandidata za sudar računalnog simulacijskog modela i programa IWRAP u ovisnosti o kutu pregiba koristeći nekoliko proizvoljno odabranih hipotetskih scenarija iz Tablice 9 koji nemaju ekstremne razlike u prometu brodova iz različitih smjerova (scenarij 2, 11, 18, 20 i 25 simulirani su za nekoliko kutova u rasponu od 90° do 160°).



Slika 33: Usporedba broja kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta između računalnog simulacijskog modela i programa IWRAP u ovisnosti o kutu pregiba rute

### 5.7.3. Validacija računalnog simulacijskog modela na primjeru realističnog plovidbenog scenarija i pripadajućih AIS podataka uz pomoć programskog paketa IWRAP – studija slučaja

U ovom poglavlju izvršeno je testiranje i validacija računalnog simulacijskog modela na primjeru realističnog plovidbenog scenarija promjene smjera protezanja plovidbenog puta koristeći program IWRAP i AIS podatke razmatranog plovidbenog područja. Za realistični primjer plovidbenog scenarija promjene smjera protezanja plovidbenog puta odabrana je plovidbena ruta s promjenom smjera protezanja plovidbenog puta pozicionirana između dva grčka otoka Elafonisos i Kitera (Slika 34).



Slika 34: AIS podaci brodova – promjena smjera protezanja plovidbenog puta između otoka Elafonisos i Kitera [93]

Prikazano područje omeđeno je sljedećim koordinatama: točka 1 (36.4461, 22.8522), točka 2 (36.4472, 23.0218), točka 3 (36.3754, 23.0047), točka 4 (36.3793, 22.8728). Uvid u strukturu i karakteristike pomorskog prometa u navedenom području dobiven je uz pomoć povijesnih AIS podataka (rezolucije 5 min) prikupljenih s web servisa MarineTraffic [93] za razdoblje od 04.07.2021. do 11.07.2021. koji su učitani u program IWRAP. Valja naglasiti da se razmatrani promet brodova odnosi samo na brodove koji imaju ugrađen AIS sustav, tj. brodove koji podliježu SOLAS konvenciji. Na temelju geografske strukture plovidbene rute za širinu rute odabrana je vrijednost od 6790 m, a za kut pregiba na ruti odabrana je vrijednost od 160°. Navedene vrijednosti odabrane su tako da što približnije odgovaraju stvarnim karakteristikama rute. Scenarij je konstruiran po uzoru na koncept modela prikazan na Slici 22, te u skladu s navedenim duljina centralne plovidbene linije u razmatranom scenariju promjene

smjera protezanja plovidbenog puta iznosi 38506 m, tj. pravocrtni dio rute prije pregiba i dio nakon pregiba iznosi 19253 m.

Na temelju prikupljenih AIS podataka, 97% prometa brodova na razmatranom dijelu plovidbene rute klasificirano je na tankere za prijevoz naftnih proizvoda, brodove za opći teret, te jahte i ostale brodove. IWRAP strukturu i karakteristike prometa prikupljene iz AIS podataka ekstrapolira na cjelogodišnje razdoblje što je standardni način korištenja programa IWRAP u kombinaciji s AIS podacima. Primjer strukture i karakteristika prometa ekstrahiranog iz AIS podataka za brodove za opći teret koji plove od istoka prema zapadu prikazan je u Tablici 12.

Tablica 12: Godišnji promet brodova za opći teret u plovidbi od istoka prema zapadu

Tip broda	Broj brodova	Prosječna dužina brodova (m)	Prosječna širina brodova (m)	Prosječna brzina brodova (čv)
Brodovi za opći teret (0-25 m)	148	21	6,75	15,8
Brodovi za opći teret (25-50 m)	148	41	8,4	15,95
Brodovi za opći teret (50-75 m)	372	63	11,2	8,8
Brodovi za opći teret (75-100 m)	1414	87	14,62	9,44
Brodovi za opći teret (100-125 m)	1191	110	16,79	11,29
Brodovi za opći teret (125-150 m)	968	138	20,35	13,42
Brodovi za opći teret (150-175 m)	1042	161	25,35	13,11
Brodovi za opći teret (175-200 m)	446	183	29,51	14,48
Brodovi za opći teret (225-250 m)	74	237	32,24	14,3

Ukupna godišnja struktura i karakteristike prometa prikazane su Tablicom 13 i Tablicom 14.



Tablica 13: Struktura i karakteristike prometa brodova za smjer od zapada prema istoku

Smjer pomorskog prometnog toka od zapada prema istoku			
	Tankeri za prijevoz naftnih proizvoda	Brodovi za opći teret	Jahte i ostali brodovi
<b>Broj:</b>	964	5133	964
<b>Prosječna dužina (m):</b>	115,8	117,9	42,4
<b>Prosječna širina (m):</b>	18,4	18,5	10,9
<b>Prosječna brzina (m/s):</b>	5,3	5,81	4,91

Tablica 14: Struktura i karakteristike prometa brodova za smjer od istoka prema zapadu

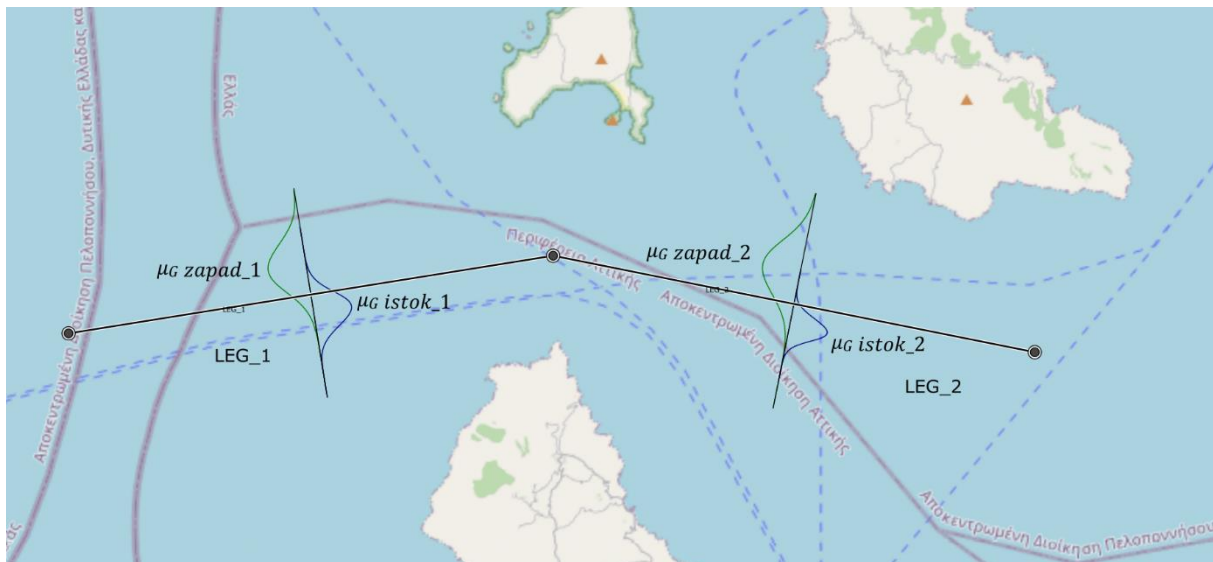
Smjer pomorskog prometnog toka od istoka prema zapadu			
	Tankeri za prijevoz naftnih proizvoda	Brodovi za opći teret	Jahte i ostali brodovi
<b>Broj:</b>	1485	5803	890
<b>Prosječna dužina (m):</b>	126	118,4	33,2
<b>Prosječna širina (m):</b>	20,4	18,7	8,6
<b>Prosječna brzina (m/s):</b>	5,89	6,11	5,31

Prosječne dužine i širine za svaki tip broda su izračunate prema izvoru [28]. IWRAP na temelju AIS podataka brodova automatski određuje srednju vrijednost normalne distribucije prolazaka brodova duž širine rute  $\mu_G$  i pripadajuću standardnu devijaciju  $\sigma_G$  za oba smjera (spomenuta distribucija ekvivalentna je normalnoj distribuciji za razmještaj lokacija generiranja brodova na inicijalnim pozicijama u računalnom simulacijskom modelu). Navedene normalne distribucije IWRAP definira uz pomoć AIS podataka na sljedeći način:

- Srednja vrijednost normalne distribucije prolazaka brodova duž širine rute u smjeru od zapada prema istoku na dijelu rute označenom s „LEG\_1“ iznosi  $\mu_{G_{istok_1}} = 2018,76 m$ , a pripadajuća standardna devijacija iznosi  $\sigma_{G_{istok_1}} = 672,92 m$ .
- Srednja vrijednost normalne distribucije prolazaka brodova duž širine rute u smjeru od istoka prema zapadu na istom dijelu rute označenom s „LEG\_1“ iznosi  $\mu_{G_{zapad_1}} = 3898,76 m$ , a pripadajuća standardna devijacija iznosi  $\sigma_{G_{zapad_1}} = 965,11 m$ .
- Srednja vrijednost normalne distribucije prolazaka brodova duž širine rute u smjeru od zapada prema istoku na dijelu rute označenom s „LEG\_2“ iznosi  $\mu_{G_{istok_2}} = 1349,19 m$ , a pripadajuća standardna devijacija iznosi  $\sigma_{G_{istok_2}} = 449,73 m$ .

- Srednja vrijednost normalne distribucije prolazaka brodova duž širine rute u smjeru od istoka prema zapadu na dijelu rute označenom s „LEG\_2“ iznosi  $\mu_{G\ zapad\_2} = 3499,19\ m$ , a standardna devijacija iznosi  $\sigma_{G\ zapad\_2} = 1087,89\ m$ .

Simulacija navedenog scenarija potom je pokrenuta u računalnom programu IWRAP. Vizualni modul simuliranog scenarija u programu IWRAP prikazan je na Slici 35.



Slika 35: Vizualni modul simuliranog realističnog scenarija u računalnom programu IWRAP

Iz Slike 35 i gore navedenih parametara vidljivo je postojanje određene razlike između srednjih vrijednosti i pripadajućih standardnih devijacija normalnih distribucija smjera plovidbe od zapada prema istoku i od istoka prema zapadu iako se radi o zoni bez postojanja odvojene plovidbe.

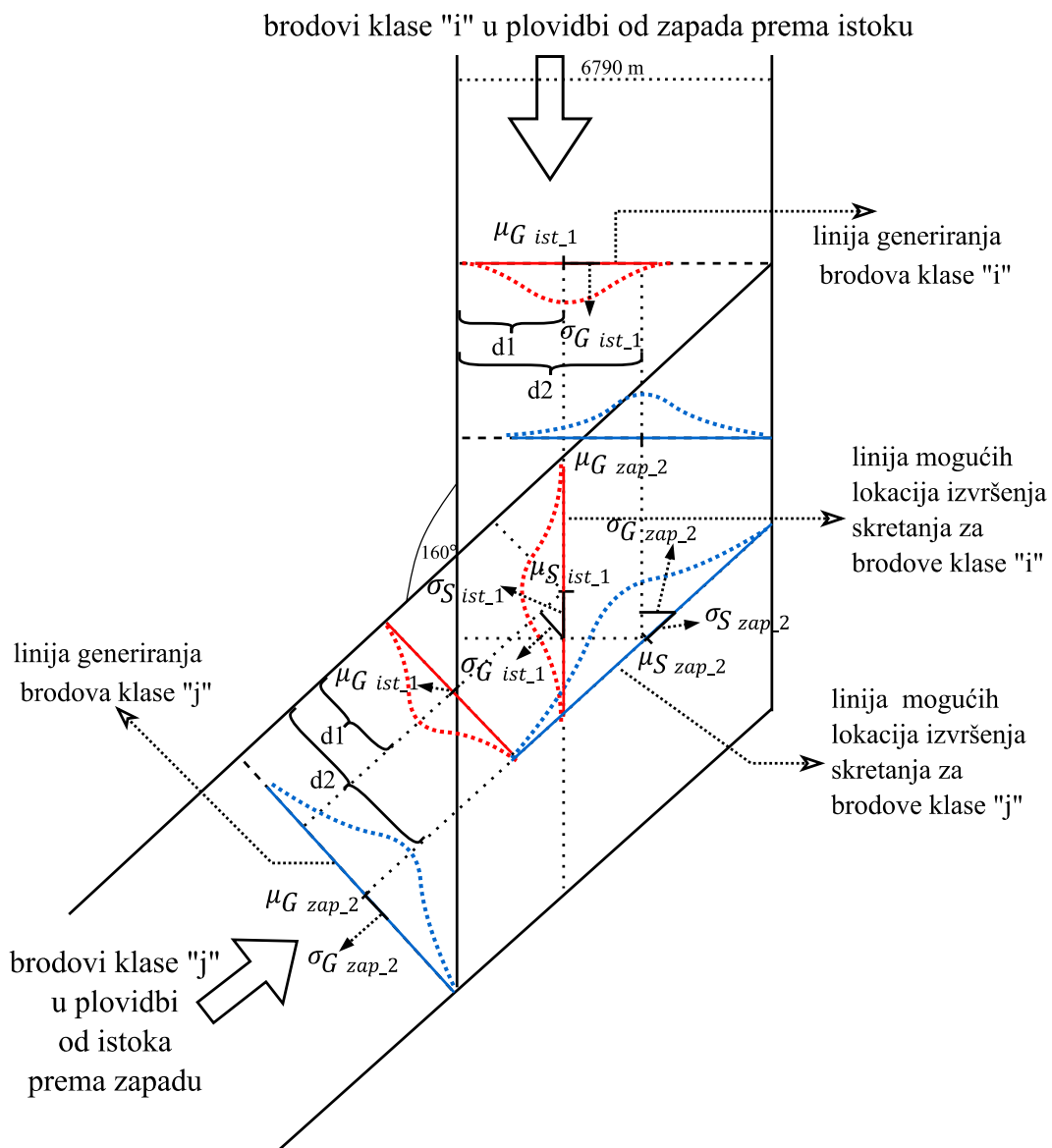
IWRAP broj kandidata za sudar u scenariju na Slici 35 izračunava na način opisan u Poglavlju 5.7.1, tj. promet brodova u smjeru od zapada prema istoku (normalna distribucija s parametrima  $\mu_{G\ istok\_1}$  i  $\sigma_{G\ istok\_1}$ ) i promet brodova u smjeru od istoka prema zapadu (normalna distribucija s parametrima  $\mu_{G\ zapad\_2}$  i  $\sigma_{G\ zapad\_2}$ ) postavlja u plovidbenu situaciju križanja kursova (ilustrirano Slikom 28), te tako izračunava broj kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta. IWRAP normalnu distribuciju s parametrima  $\mu_{G\ zapad\_1}$  i  $\sigma_{G\ zapad\_1}$ , kao i normalnu distribuciju s parametrima  $\mu_{G\ istok\_2}$  i  $\sigma_{G\ istok\_2}$  koristi za računanje broja kandidata za sudar kod nasuprotnih kursova.

S obzirom na razlike u načinu simulacije plovidbene situacije promjene smjera protezanja plovidbenog puta kod računalnog simulacijskog modela i programa IWRAP,

simulacija navedenog scenarija u računalnom simulacijskom modelu zahtjeva prilagodbe opisane u nastavku.

Simulacija ovog realističnog scenarija u računalnom simulacijskom modelu podrazumijeva simuliranje (propuštanje) prometnog toka brodova u smjeru od zapada prema istoku koristeći normalnu distribuciju definiranu parametrima  $\mu_{G\ istok\_1}$  i  $\sigma_{G\ istok\_1}$  i simuliranje (propuštanje) prometnog toka brodova u smjeru od istoka prema zapadu koristeći normalnu distribuciju definiranu parametrima  $\mu_{G\ zapad\_2}$  i  $\sigma_{G\ zapad\_2}$ , uz istodobno simuliranje skretanja i jednog i drugog prometnog toka brodova u području pregiba rute koristeći normalne distribucije za razmještaj lokacija skretanja brodova koje su definirane s  $\mu_{S\ istok\_1}$  i  $\sigma_{S\ istok\_1}$ , te  $\mu_{S\ zapad\_2}$  i  $\sigma_{S\ zapad\_2}$  (koriste se umjesto distribucija definiranih s  $\mu_{G\ istok\_2}$  i  $\sigma_{G\ istok\_2}$ , te  $\mu_{G\ zapad\_1}$  i  $\sigma_{G\ zapad\_1}$ ), a kojima je određen daljnji prometni tok brodova nakon područja pregiba rute.

Normalne distribucije za razmještaj lokacija skretanja brodova u ovom primjeru definirane su tako da brodovi koji plove iz nekog smjera nakon ulaska u područje pregiba rute imaju tendenciju zadržati isto pozicioniranje duž širine rute, tj. isto odstojanje od ruba rute koje su imali i prije ulaska u područje pregiba rute. Drugim riječima, normalne distribucije za razmještaj lokacija skretanja brodova definirane su u računalnom simulacijskom modelu na način da osiguraju upravo tako opisanu plovidbu (jednostavnim trigonometrijskim izračunom), a iznose:  $\mu_{S\ istok\_1} = 5900,23\ m$  i  $\sigma_{S\ istok\_1} = 1967,48\ m$ , te  $\mu_{S\ zapad\_2} = 10230,35\ m$  i  $\sigma_{S\ zapad\_2} = 3180,7\ m$ . Normalne distribucije za simuliranje prometa brodova u smjeru od zapada prema istoku, i u smjeru od istoka prema zapada definirane su isto kao u IWRAP-u i iznose:  $\mu_{G\ istok\_1} = 2018,76\ m$  i  $\sigma_{G\ istok\_1} = 672,92\ m$ , te  $\mu_{G\ zapad\_2} = 3499,19\ m$  i  $\sigma_{G\ zapad\_2} = 1087,89\ m$ . Simulacija ovog realističnog scenarija u računalnom simulacijskom modelu ilustrirana je na Slici 36.



Slika 36: Koncept simulacije realističnog scenarija u računalnom simulacijskom modelu

Ukupan broj kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta u navedenom scenariju dobiven je tako da je najprije izračunat broj kandidata za sudar svake od 9 kombinacije klasa brodova iz Tablice 13 i Tablice 14. Analogan pristup koristi se i u programu IWRAP, a u skladu je s analitičkim modelima iz Poglavlja 3.2. Kombinacije su prikazane u Tablici 15.

Tablica 15: Sve kombinacije klasa brodova za izračun učestalosti sudara brodova

Smjer pomorskog toka od zapada prema istoku	Smjer pomorskog toka od istoka prema zapadu
Brodovi za opći teret	Tankeri za prijevoz naftnih proizvoda
Brodovi za opći teret	Brodovi za opći teret
Brodovi za opći teret	Jahte i ostali brodovi
Tankeri za prijevoz naftnih proizvoda	Tankeri za prijevoz naftnih proizvoda
Tankeri za prijevoz naftnih proizvoda	Brodovi za opći teret
Tankeri za prijevoz naftnih proizvoda	Jahte i ostali brodovi
Jahte i ostali brodovi	Jahte i ostali brodovi
Jahte i ostali brodovi	Brodovi za opći teret
Jahte i ostali brodovi	Tankeri za prijevoz naftnih proizvoda

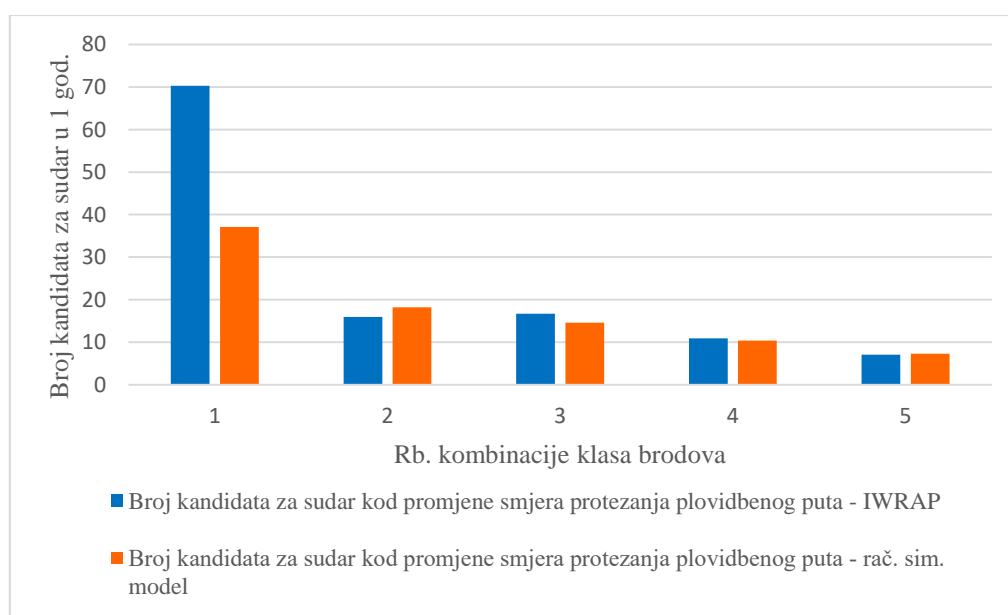
Simulacije u računalnom simulacijskom modelu za svaku kombinaciju klasa brodova izvršene su po uzoru na prethodno opisanu metodologiju iz Poglavlja 3.2.

U Tablici 16 prikazani su rezultati realističnog scenarija, tj. izračun broja kandidata za sudar računalnog simulacijskog modela i programa IWRAP. Kombinacije klasa brodova koje su i kod računalnog simulacijskog modela i kod programa IWRAP rezultirale s manje od 5 kandidata za sudar godišnje izostavljene su iz razmatranja iz praktičnih razloga s obzirom na to da je riječ o malom riziku, tj. ekstremno malom broju kandidata za sudar u jednoj godini pri čemu računalni simulacijski model zahtjeva znatno više od 30 simulacija za postizanje konvergencije rezultata.

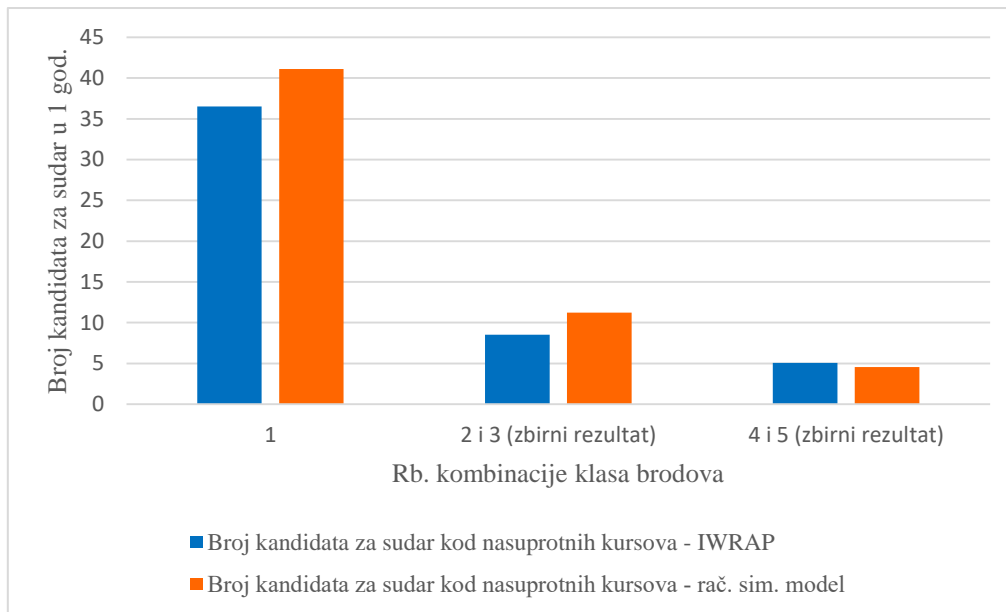
Tablica 16: Usporedba rezultata računalnog simulacijskog modela i programa IWRAP

Rb.	Smjer pomorskog prometa od zapada prema istoku	Smjer pomorskog prometa od istoka prema zapadu	Broj kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta - rač. sim. model	Broj kandidata za sudar kod nasuprotnih kursova - rač. sim. model	Broj kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta - IWRAP	Broj kandidata za sudar kod nasuprotnih kursova - IWRAP
1.	Brodovi za opći teret	Brodovi za opći teret	37,14	41,12	70,31	36,54
2.	Brodovi za opći teret	Tankeri za prijevoz naftnih proizvoda	18,25	11,25	15,99	8,52
3.	Tankeri za prijevoz naftnih proizvoda	Brodovi za opći teret	14,6		16,74	
4.	Brodovi za opći teret	Jahte i ostali brodovi	10,42	4,54	10,92	5,06
5.	Jahte i ostali brodovi	Brodovi za opći teret	7,3		7,09	
<b>Ukupno:</b>			<b>87,71</b>	<b>56,91</b>	<b>121,05</b>	<b>50,12</b>
			<b>Rač. sim. model: 144,62</b>		<b>IWRAP: 171,17</b>	

Program IWRAP broj kandidata za sudar kod nasuprotnih kursova za različite kombinacije smjerova dviju klasa brodova prikazuje zbirno (Rb. 2 i 3, te Rb. 4 i 5), stoga je i rezultat računalnog simulacijskog modela prikazan na isti način. Grafički prikaz rezultata nalazi se na Slici 37 i Slici 38.



Slika 37: Usporedba broja kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta prema računalnom simulacijskom modelu i programu IWRAP u realističnom scenariju



Slika 38: Usporedba broja kandidata za sudar kod nasuprotnih kursova prema računalnom simulacijskom modelu i programu IWRAP u realističnom scenariju

Iz rezultata je vidljivo da se najveći broj sudara može očekivati između brodova za opći teret jednog i drugog smjera. Program IWRAP za kombinaciju br. 1 (Slika 37) rezultira znatno većim brojem kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta u odnosu na računalni simulacijski model zbog načina simulacije ovog plovidbenog scenarija, tj. maksimiziranja broja kandidata za sudar u situaciji gdje iz oba smjera plovi približno jednak broj brodova, ali i zbog velikog kuta pregiba rute od  $160^\circ$  (detaljnije objašnjenje vidjeti u Poglavlju 5.7.2). Također, udaljenost između srednjih vrijednosti normalnih distribucija (duž širine rute) prometnih tokova brodova jednog i drugog smjera dodatno utječe na smanjenje broja kandidata za sudar koji detektira računalni simulacijski model. Nadalje, može se uočiti da kod svih ostalih kombinacija br. 2, br. 3, br. 4 i br. 5 (Slika 37) postoji značajna razlika u broju brodova koji plovo iz jednog i drugog smjera zbog čega se smanjuje razlika između rezultata, tj. smanjuje se broj kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta koje detektira IWRAP, a povećava se broj kandidata za sudar koje detektira računalni simulacijski model (detaljnije objašnjenje vidjeti također u Poglavlju 5.7.2). Sukladno navedenom, te u kontekstu usporedbe rezultata s programom IWRAP, rezultati dobiveni računalnim simulacijskim modelom su logični i u granicama očekivanja.

Stvarni broj očekivanih sudara, odnosno realnu procjenu učestalosti sudara brodova za ovaj realistični scenarij moguće je dobiti množenjem gore dobivenog broja kandidata za sudar iz Tablice 16 s odgovarajućim korekcijskim čimbenicima kako je opisano u Poglavlju 3.6.

#### **5.7.4. Zaključno razmatranje provedene validacije**

Računalni simulacijski model za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta testiran je i validiran kroz izvođenje simulacija nad višestrukim hipotetskim primjerima promjene smjera protezanja plovidbenog puta i usporedbom rezultata s rezultatima programskog paketa IWRAP kao jednog od vodećih alata za procjenu učestalosti sudara brodova. Uočena je jaka korelacija između rezultata razvijenog modela i programa IWRAP (prosječno odstupanje u rezultatima iznosi  $\approx 20\%$ ) uz opažanje da razvijeni računalni simulacijski model rezultira u prosjeku manjim brojem sudara od programa IWRAP što ga čini realističnijim u kontekstu očekivanja eksperata i prethodno provedenih istraživanja u kojima je korišten program IWRAP. Analizom rezultata utvrđeno je da su oscilacije u rezultatima razvijenog računalnog simulacijskog modela i programa IWRAP posljedica primjene različitih modelskih logika pri simuliranju razmatrane plovidbene situacije promjene smjera protezanja plovidbenog puta. Točnije, program IWRAP u nedostatku prikladnog analitičkog modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta koristi aproksimativan pristup, odnosno učestalost sudara brodova procjenjuje analitičkim modelom koji se izvorno koristi kod križanja kursova. Za razliku od programa IWRAP, računalni simulacijski model izravno simulira plovidbu brodova u razmatranoj plovidbenoj situaciji uz primjenu koncepta „slijepe navigacije“, uzimajući pri tom u obzir mogućnost sudara brodova istog plovidbenog smjera i razlike u distribucijama prometa brodova duž širine rute dvaju različitih smjerova plovidbe. Validacija modela također je provedena i na studiji slučaja, odnosno realističnom primjeru promjene smjera protezanja plovidbenog puta usporedbom i analizom rezultata računalnog simulacijskog modela i rezultata programa IWRAP.

#### **5.8. Programska realizacija relevantnijih komponenti modela**

U ovom poglavlju iznesena je programska realizacija nekih važnijih komponenti modela. Modeli su integrirani unutar WPF (engl. Windows Presentation Foundation) aplikacije, a sama modelska logika realizirana je s više od 2000 linija programskog koda u programskom jeziku C#. Iako su u istraživanju razvijena dva zasebna modula računalnog simulacijskog modela sa zasebnim specifičnostima, isti dijele mnoge zajedničke i analogne programske koncepte od kojih su neki važniji prikazani u nastavku.



Slijedi prikaz pseudokoda za generiranje brodova u modelu. Navedeno je realizirano metodom *GeneriranjeBroda* i konstruktorom (posebna metoda) klase *Brod*. Pri tome je korištena sljedeća apstrakcija: prvi krug broda predstavlja pramac broda, dok ostali krugovi predstavljaju trup broda (svi krugovi su instance klase *Brod*).

*//Metoda GeneriranjeBroda*

**METHOD** GeneriranjeBroda

**PASS IN:** (*pozicija, brzina, radijus, distancaKojuTrebaPrijeci, kut, boja, brojKrugovaTrupa, indeksBroda, duzinaBroda, distancaKojuTrebaPrijeciNakonSkretanja, distancaKojuTrebaPrijeciPrijeSkretanja*)

**IF** objekt *Brod* sadrži krugove trupa broda **THEN**

- Podesi poziciju trupa broda, tj. pozicije svih krugova trupa broda
- Odredi udaljenost koju svaki krug trupa broda mora prijeći

**ENDIF**

**RETURN** objekt *Brod* i pri tome pozovi konstruktor koji generira sve krugove broda (pramac i krugove trupa broda)

**ENDMETHOD**

*//Konstruktor Brod*

**CONSTRUCTOR** Brod

**PASS IN:** (*pozicija, brzina, radijus, distancaKojuTrebaPrijeci, kut, boja, brojKrugovaTrupa, distancaKojuTrebaPrijeciNakonSkretanja, distancaKojuTrebaPrijeciPrijeSkretanja*)

- Generiraj praznu listu *Brodovi* za pohranu objekata *Brod*

**FOR** za svaki krug trupa broda

- **CALL** *GeneriranjeBroda* **WITH** *pozicija, brzina, radijus, distancaKojuTrebaPrijeci, kut, Boja, 0, i, brojKrugovaTrupa, distancaKojuTrebaPrijeciNakonSkretanja, distancaKojuTrebaPrijeciPrijeSkretanja*

- Dodaj generirani objekt *Brod* u listu *Brodovi*

**ENDFOR**

- Inicijaliziraj sve attribute generiranog objekta *Brod*

**ENDCONSTRUCTOR**

Zbog složenosti interakcije metode *GeneriranjeBroda* i konstruktora klase *Brod*, slijedi detaljnije objašnjenje. Prilikom generiranja objekta *Brod* najprije se poziva metoda *GeneriranjeBroda* (pri prvom pozivu parametar *indeksBroda* iznosi 0), koja potom poziva konstruktor koji treba generirati prvi krug broda, tj. pramac. Konstruktor pri izvršavanju pokreće programsku petlju *for* kojom započinje generiranje krugova trupa broda tako da za svaki krug trupa broda poziva metodu *GeneriranjeBroda* (*indeksBroda* označava redni broj kruga trupa broda). Metoda *GeneriranjeBroda* pomoću uvjetnog bloka koda *if* za svaki krug trupa broda mijenja dva parametra u odnosu na prvi krug broda (pramac), a to su *pozicija* i *distancaKojuTrebaprijeci*, te potom ponovo poziva konstruktor koji generira krugove trupa broda. Valja uočiti da konstruktor za svaki krug trupa broda poziva metodu *GeneriranjeBroda*, koja potom opet poziva konstruktor. Pri tome se prvi krug broda (pramac) generira posljednji, tj. nakon što se njegova lista krugova popuni s krugovima trupa broda.

Slijedi prikaz realizacije dijela programa za detekciju sudara, tj. kandidata za sudar u modelu. Korištena je metoda *DetekcijaSudara* koju za vrijeme trajanja simulacije (pri svakoj iteraciji petlje koja pokreće simulaciju) pozivaju svi brodovi (instance klase *Brod*) koji se za vrijeme simulacije nisu sudarili i plove u razmatranom plovidbenom području kako bi se detektirali sudari s ostalim brodovima koji se nisu sudarili.

### //Metoda *DetekcijaSudara*

#### **METHOD** *DetekcijaSudara*

**PASS IN:** (objekt *Brod*)

- Postavi status detekcije sudara između dva razmatrana objekta *Brod* na **false** (tj. *sudaren = false*)

**IF** jedan od objekata *Brod* izašao iz razmatranog plovidbenog područja ili ako je jedan od njih već uništen, tj. sudaren **THEN**

**RETURN** *sudaren*

**ENDIF**

- Izračunaj distancu između pramca (kruga) prvog objekta *Brod* i pramca (kruga) drugog objekta *Brod*, te postavi status detekcije sudara između ova dva objekta *Brod* na **true** (tj. *sudaren = true*) ako je izračunata distanca manja od sume radijusa pramca (kruga) prvog objekta *Brod* i pramca (kruga) drugog objekta *Brod*

**IF** detektiran sudar između pramca prvog objekta *Brod* i pramca drugog objekta *Brod* (tj. *sudaren == true*) **THEN**

- Proglasi oba objekta *Brod* uništenima

- Brojač sudara povećaj za 1

**IF** detektirani sudar nastao kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta **THEN**

- Brojač sudara kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta povećaj za 1

**ENDIF**

**IF** barem jedan od objekata *Brod* nije izvršio skretanje **THEN**

- Brojač sudara u kojem barem jedan od brodova nije izvršio skretanje povećaj za 1

**ENDIF**

**RETURN** *sudaren*

**ENDIF**

**IF** drugi objekt *Brod* sadrži krugove trupa broda

**FOR** svaki krug trupa broda drugog objekta *Brod*

- Izračunaj distancu između pramca (kruga) prvog objekta *Brod* i kruga trupa broda drugog objekta *Brod*, te postavi status detekcije sudara između ova dva objekta *Brod* na **true** (tj. *sudaren* = **true**) ako je izračunata distanca manja od sume radijusa pramca (kruga) prvog objekta *Brod* i kruga trupa drugog objekta *Brod*

**IF** detektiran sudar između pramca prvog objekta *Brod* i kruga trupa broda drugog objekta *Brod* (tj. *sudaren* = **true**) **THEN**

- Proglasi oba objekta *Brod* uništenima

- Brojač sudara povećaj za 1

**IF** detektirani sudar nastao kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta **THEN**

- Brojač sudara kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta povećaj za 1

**ENDIF**

**IF** barem jedan od objekata *Brod* nije izvršio skretanje **THEN**

- Brojač sudara u kojem barem jedan od brodova nije izvršio skretanje povećaj za 1

**ENDIF**

**RETURN** *sudaren*

**ENDIF**

**ENDFOR**

**ENDIF**

- *Analognim pristupom provjerava se jeli došlo do sudara između trupa prvog broda i pramca drugog broda, te sudara između trupa prvog broda i trupa drugog broda...*

**ENDMETHOD**

Nadalje, za realizaciju same plovidbe brodova kao i izvršenje potencijalnog skretanja za vrijeme trajanja simulacije korištene su metode *PomakBrodaKlaseI* i *PomakBrodaKlaseJ*. Slijedi prikaz metode *PomakBrodaKlaseI* koja se odnosi na brodove klase I.

*//Metoda PomakBrodaKlaseI*

**METHOD** PomakBrodaKlaseI

**PASS IN:** ()

**IF** objekt *Brod* se nije sudario i još se uvijek nalazi unutar razmatranog plovidbenog područja **THEN**

- Izračunaj novu poziciju na kojoj se isti objekt *Brod* treba generirati
- Izračunaj novi prijedeni put

**IF** objekt *Brod* je kandidat za izvršiti skretanje i dosegao je poziciju za izvršenje skretanja **THEN**

- Izvrši skretanje objekta *Brod*, tj. repositioniranje trupa broda (krugova trupa)
- Postavi status objekta *Brod* na brod koji je izvršio skretanje (tj. *SkretanjeIzvršeno = true*)

**ENDIF**

**IF** objekt *Brod* napustio razmatrano plovidbeno područje **THEN**

- Postavi status objekta *Brod* na brod koji je izašao iz razmatranog plovidbenog područja (tj. *Vidljiv = false*)

**ENDIF**

**ENDIF**

**ENDMETHOD**

Generiranje slučajnih brojeva s normalnom distribucijom u modelu je realizirano koristeći metodu *GaussovBroj* koja implementira Box-Muller transformacijski algoritam za generiranje brojeva iz normalne distribucije [104]. Box-Muller algoritam transformira uzorak iz uniformne distribucije u uzorak iz normalne distribucije.

//Metoda *GaussovBroj*

**METHOD** GaussovBroj

**PASS IN:** ()

- Generiraj slučajan uniformno distribuiran broj iz intervala (0,1) i spremi ga u varijablu *u1*
- Generiraj slučajan uniformno distribuiran broj iz intervala (0,1) i spremi ga u varijablu *u2*
- Koristeći Box-Muller transformacijski algoritam i varijable *u1* i *u2*, generiraj slučajan broj sa standardnom normalnom distribucijom i spremi ga u varijablu *normalan*
- U varijablu *broj* spremi rezultat izraza „*normalan* · *zadana\_standardna devijacija* + 0,5“

**RETURN** *broj*

(*slučajan broj kojeg metoda vraća ima srednju vrijednost normalne distribucije iznosa 0,5 i prosječno odstupanje, tj. standardnu devijaciju iznosa „zadana\_standardna devijacija“*)

**ENDMETHOD**

## 5.9. Karakteristike razvijenog modela

*Razvijeni računalni simulacijski model s pripadajućim modulima posjeduje sljedeće tehničke karakteristike:*

- Simulacija diskretnih događaja – Broj iteracija petlje predstavlja broj diskretnih promatranih trenutaka. Stanje sustava mijenja se od trenutka do trenutka, a vrijeme između tih trenutaka je zanemareno. Valja naglasiti da se navedena simulacija zbog velikog broja diskretnih trenutaka približava kontinuiranoj simulaciji. Primjerice, jedna simulirana godina sadrži  $365 \times 24 \times 60 \times 60 = 31536000$  diskretnih trenutaka.
- Dinamička simulacija – promjene stanja prometnog sustava odvijaju se u vremenskom tijeku.

- Mikrosimulacija – svaki brod (objekt) pomorskog prometnog toka je zasebni entitet.
- Stohastička priroda – model koristi slučajne varijable. Razmještanje brodova duž stranica kvadrata (duž rubova plovidbenog područja) neposredno prije ulaska u kvadrat (plovidbeno područje) može se smatrati slučajnim. Smjer kretanja broda također se može smatrati slučajnim, tj. svi smjerovi su podjednako zastupljeni (uniformna distribucija). Za razmještaj brodova duž širine plovidbene rute i skretanje brodova također se koriste slučajne varijable (normalna distribucija).

*Razvijeni računalni simulacijski model s pripadajućim modulima posjeduje sljedeće aplikativne karakteristike:*

- Računalnim simulacijskim modelom moguće je simulirati bilo koju dužinu, širinu i kut pregiba rute kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta, kao i bilo koju kvadratnu površinu kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova. To ga čini aplikativnim nad bilo kojim plovidbenim područjem uz uvjet poznavanja strukture i volumena prometa brodova tog područja. Model također nema ograničenja pri odabiru simuliranog vremenskog perioda.
- Procjena učestalosti sudara brodova za neko plovidbeno područje izvršava se segmentalno – ako je na razmatranom plovidbenom području prisutna plovidbena situacija promjene smjera protezanja plovidbenog puta i plovidbena situacija koja uključuje model slučajno distribuirane plovidbe brodova, simulacija za svaku plovidbenu situaciju izvršava se zasebno. Analognim pristupom moguće je simulirati i različite vremenske periode kod kojih je prisutna značajna razlika u volumenu i strukturi prometa brodova na nekom plovidbenom području.
- Računalni simulacijski model koristi iste ulazne parametre kao i postojeći „state of the art“ analitički modeli (Poglavlje 3.2) što potencijalno olakšava validaciju i samu primjenu.
- Računalnim simulacijskim modelom u situaciji promjene smjera protezanja plovidbenog puta moguće je simulirati i kutove pregiba na ruti koji su veći od  $170^\circ$  (primjerice, program IWRAP limitiran je na kut pregiba do maksimalno  $170^\circ$ ). Kutovi veći od  $170^\circ$  relevantni su za razmatranje kod procjene učestalosti sudara brodova [105].
- Provedenim istraživanjem utvrđeno je da simulacija jedne stohastičke reprezentacije (jedna simulacija nekog skupa ulaznih parametara modela) zahtjeva vrijeme od nekoliko sekundi do maksimalno nekoliko minuta kod vrlo zahtjevnih scenarija uz korištenje

prosječnih računalnih konfiguracija. Vrijeme izvršavanja ovisi o broju brodova, njihovim brzinama, dužini puta kojeg brodovi prevaljuju u razmatranom području i simuliranom vremenskom periodu. Paralelnim izvođenjem simulacije na više programskih niti (engl. multithreading) i procesorskih jezgri postiže se značajno ubrzanje. Primjerice, navedenim pristupom vrijeme potrebno za izvođenje 30 simulacija vremenski vrlo zahtjevnog zadanog skupa ulaznih parametara modela i postizanje konvergencije rezultata svodi se na vrijeme izvršavanja samo jedne simulacije od nekoliko minuta.

## 6. ZAKLJUČAK

Sudari brodova visokorizični su incidentni događaji u pomorskom prometu, a procjena vjerojatnosti i učestalosti takvih događaja neizostavan je korak u smanjenju rizika. Provedenim istraživanjem utvrđeno je da su kvantitativni modeli dominantan način procjene učestalosti sudara brodova. Pregledom literature i analizom postojećih kvantitativnih modela uočeno je da postojeći analitički modeli za procjenu učestalosti sudara brodova nisu prikladni kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i za promjene smjera protezanja plovidbenog puta. Nadalje, postojeći simulacijski modeli i modeli temeljeni na obradi AIS podataka pretežno su razvijeni i prilagođeni specifičnim geografskim plovidbenim područjima uz izravnu ovisnost o realnim podacima praćenja brodova, čime je otežana primjena nad ostalim plovidbenim područjima, kao i testiranje hipotetskih plovidbenih scenarija.

U skladu s uočenim mogućnostima poboljšanja, postavljenim ciljem i znanstvenim hipotezama, kroz ovo istraživanje realizirani su doprinosi opisani u nastavku.

Razvijen je novi računalni simulacijski model za procjenu učestalosti sudara brodova kojeg čine dva zasebna modula:

- Model za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova
- Model za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta

Provedenim simulacijama potvrđeno je da je moguće simulirati promet brodova i procijeniti učestalost sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i za promjene smjera protezanja plovidbenog puta. Time je potvrđena prva postavljena hipoteza. Na taj način također je ostvaren i prvi očekivani znanstveni doprinos kroz razvoj računalnog simulacijskog modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i za promjene smjera protezanja plovidbenog puta.

Testiranje i validacija razvijenog računalnog simulacijskog modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova provedeno je višestrukim simulacijama nad različitim hipotetskim primjerima modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i usporedbom rezultata sa specijalnim slučajem postojećeg analitičkog



modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod križanja kursova pod pravim kutom. Utvrđeno je postojanje jake linearne korelacije između rezultata razvijenog računalnog simulacijskog modela i rezultata analitičkog modela. Korištenjem regresijske analize i dobivenih rezultata dvaju modela izveden je novi modificirani analitički model koji unapređuje postojeće analitičko-numeričke metode za procjenu učestalosti sudara brodova, čime je potvrđena druga postavljena hipoteza te ostvaren i drugi očekivani znanstveni doprinos kroz unapređenje postojećih analitičko-numeričkih metoda procjene rizika sudara brodova.

Testiranje i validacija razvijenog računalnog simulacijskog modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta provedeno je višestrukim simulacijama nad različitim hipotetskim primjerima promjene smjera protezanja plovidbenog puta i nad realističnim primjerom navedene plovidbene situacije, uz usporedbu rezultata s rezultatima programskog paketa IWRAP.

Računalni simulacijski model integriran je u računalnu aplikaciju s korisničkim sučeljem za unos ulaznih parametara modela uz vizualizaciju simuliranih plovidbenih situacija i koristi novi intuitivan pristup pri simuliranju razmatranih plovidbenih situacija. Razvijeni model primjenjiv je u različitim plovidbenim područjima uz mogućnost korištenja stvarnih ili hipotetskih podataka o prometu brodova, te predstavlja unaprjeđenje i proširenje prethodnih autorovih istraživanja novim plovidbenim situacijama čime je omogućena potpunija procjena učestalosti sudara brodova u analiziranim plovidbenim područjima. Zbog integriranosti unutar računalne aplikacije model je u potpunosti aplikativan u trenutnoj fazi razvoja, te uz primjenu paralelizma, odnosno višenitnog izvođenja simulacija predstavlja praktično rješenje za procjenu učestalosti sudara brodova. Navedeno predstavlja aplikativni doprinos u okviru istraživanja ove doktorske disertacije.

Buduća istraživanja mogu se usmjeriti na proširenje razvijenog modela novim plovidbenim situacijama i incidentnim događajima. Primjerice, model je moguće proširiti na plovidbenu situaciju spajanja plovidbenih putova koja nije obuhvaćena dosadašnjim autorovim istraživanjima. Nadalje, ostali incidentni događaji poput nasukavanja brodova ili sudara brodova s naftnim platformama i drugim strukturama također mogu biti predmet budućih istraživanja, kao i implementacija drugih metoda detekcije kandidata za sudar.

## 7. LITERATURA

1. Eleftheria, E.; Apostolos, P.; Markos, V. Statistical analysis of ship accidents and review of safety level. *Saf. Sci.* **2016**, *85*, 282–292. doi: 10.1016/j.ssci.2016.02.001.
2. 3,174 maritime casualties and incidents reported in 2019. Available online: <https://safety4sea.com/23073-maritime-casualties-and-incidents-reported-in-2019/> (accessed on 19 August 2021).
3. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2017. Available online: <http://www.emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/3156-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2017.html> (accessed on 19 August 2021).
4. Soares, C.G.; Teixeira, A.P. Risk assessment in maritime transportation. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* **2001**, *74*, doi: 299–309. 10.1016/S0951-8320(01)00104-1.
5. Ozbas, B. Safety Risk Analysis of Maritime Transportation Review of the Literature. *Transp. Res. Rec.* **2013**, *2326*, doi: 32–38. 10.3141/2326-05.
6. Vinnem, J.-E. Offshore Risk Assessment vol 2: Principles, Modelling and Applications of QRA Studies; 3rd ed.; Springer-Verlag London: London, 2014; pp. 513 ISBN: 978-1-4471-5212-5. doi: 10.1007/978-1-4471-5213-2.
7. Kristiansen, S. Maritime transportation: safety management and risk analysis; 1st ed.; Elsevier Butterworth-Heinemann: Oxford, England, 2005; pp. 12, 133-171.
8. (IMO), I.M.O. GUIDELINES FOR FORMAL SAFETY ASSESSMENT (FSA) FOR USE IN THE IMO RULE-MAKING PROCESS; 2002; Available online: <http://www.safedor.org/resources/1023-MEPC392.pdf> (accessed on 05 September 2021).
9. Kontovas, C.A.; Psaraftis, H.N. Formal safety assessment: A critical review. *Mar. Technol. SNAME News* **2009**, *46*, 45–59. doi: 10.5957/mtsn.2009.46.1.45.
10. Wang, G.; Ji, C.; Kuhala, P.; Lee, S.-G.; Marino, A.; Sirkar, J.; Suzuki, K.; Pedersen, P.T.; Vredevelt, A.W.; Yuriy, V. Collision and Grounding. In Proceedings of the 16th Int. Ship and Offshore Structures Congress (Vol. Volume 2), University of

Southampton, UK, 20-25 August 2006; pp. 57.

11. Chai, T.; Weng, J.; De-qi, X. Development of a quantitative risk assessment model for ship collisions in fairways. *Saf. Sci.* **2017**, *91*, 71–83. doi: 10.1016/j.ssci.2016.07.018.
12. Pedersen, P.T. Review and application of ship collision and grounding analysis procedures. *Mar. Struct.* **2010**, *23*, 241–262. doi: 10.1016/j.marstruc.2010.05.001.
13. Lušić, Z. Assessment of number of ship collisions in waterways crossing situations. *NAŠE MORE, Znan. časopis za more i Pomor.* **2005**, *52*, 185–194.
14. Chen, P.; Huang, Y.; Mou, J.; van Gelder, P.H.A.J.M. Probabilistic risk analysis for ship-ship collision: State-of-the-art. *Saf. Sci.* **2019**, *117*, 108–122. doi: 10.1016/j.ssci.2019.04.014.
15. Chen, P.; Huang, Y.; Mou, J.; van Gelder, P.H.A.J.M. Ship collision candidate detection method: A velocity obstacle approach. *Ocean Eng.* **2018**, *170*, 186–198. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.10.023.
16. Fujii, Y.; Shiobara, R. The Analysis of Traffic Accidents. *J. Navig.* **1971**, *24*, 534–543. doi: 10.1017/S0373463300022372.
17. Macduff, T. PROBABILITY OF VESSEL COLLISIONS. *Ocean Ind* **1974**, *9*, 144–148.
18. Chen, P.; Mou, J.; van Gelder, P.H. Risk assessment methods for ship collision in estuarine waters using ais and historical accident data. In Proceedings of the 17th International Congress of the International Maritime Association of the mediterranean, IMAM 2017, Lisbon, Portugal, 9–11 October 2017; pp. 213–221.
19. Ylitalo, J. Modelling Marine Accident Frequency. Master's thesis, Aalto University, Finland, 2 February 2010.
20. Du, L.; Goerlandt, F.; Kujala, P. Review and analysis of methods for assessing maritime waterway risk based on non-accident critical events detected from AIS data. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* **2020**, *200*. doi: 10.1016/j.ress.2020.106933.
21. Zhang, G.; Thai, V. V. Expert elicitation and Bayesian Network modeling for shipping accidents: A literature review. *Saf. Sci.* **2016**, *87*, 53–62. doi: 10.1016/j.ssci.2016.03.019.

22. Szłapczyński, R.; Niksa-Rynkiewicz, T. A Framework of A Ship Domain-Based Near-Miss Detection Method Using Mamdani Neuro-Fuzzy Classification. *Polish Marit. Res.* **2018**, *25*, 14–21. doi: 10.2478/pomr-2018-0017.
23. Lei, P.R.; Tsai, T.H.; Wen, Y.T.; Peng, W.C. A framework for discovering maritime traffic conflict from AIS network. In Proceedings of the 19th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium: Managing a World of Things, AP-NOMS 2017; Seoul, Korea, 27-29 September 2017; pp. 1-6.
24. Weng, J.; Xue, S. Ship collision frequency estimation in port fairways: A case study. *J. Navig.* **2015**, *68*, 602–618. doi: 10.1017/S0373463314000885.
25. Martins, M.R.; Maturana, M.C. Human error contribution in collision and grounding of oil tankers. *Risk Anal.* **2010**, *30*, 674–698. doi: 10.1111/j.1539-6924.2010.01392.x.
26. Ren, J.; Jenkinson, I.; Wang, J.; Xu, D.L.; Yang, J.B. A methodology to model causal relationships on offshore safety assessment focusing on human and organizational factors. *J. Safety Res.* **2008**, *39*, 87–100. doi: 10.1016/j.jsr.2007.09.009.
27. Chauvin, C.; Lardjane, S.; Morel, G.; Clostermann, J.P.; Langard, B. Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS. *Accid. Anal. Prev.* **2013**, *59*, 26–37. doi: 10.1016/j.aap.2013.05.006.
28. Friis-Hansen, P. IWRAP MK II WORKING DOCUMENT BASIC MODELLING PRINCIPLES FOR PREDICTION OF COLLISION AND GROUNDING FREQUENCIES; 2007; Available online: [https://www.iala-aism.org/wiki/iwrap/images/2/2b/IWRAP\\_Theory.pdf](https://www.iala-aism.org/wiki/iwrap/images/2/2b/IWRAP_Theory.pdf) (accessed on 02 October 2021)
29. Goerlandt, F.; Montewka, J. Maritime transportation risk analysis: Review and analysis in light of some foundational issues. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* **2015**, *138*, 115–134. doi: 10.1016/j.ress.2015.01.025.
30. Shrader-Frechette, K. *Risk and rationality: philosophical foundations for populist reforms*; 1992; Vol. 29; doi: 10.5860/choice.29-6259.
31. Bradbury, J.A. The Policy Implications of Differing Concepts of Risk. *Sci. Technol. Human Values* **1989**, *14*, 380–399. doi: 10.1177/016224398901400404.

32. Rosa, E.A. Metatheoretical foundations for post-normal risk. *J. Risk Res.* **1998**, *1*, 15–44. doi: 10.1080/136698798377303.
33. IALA. Risk Management - PAWSA, IWRAP Mk2 & SIMULATION; 2010; Available online: <https://www.iala-aism.org/product/risk-management-pawsa-iwrap-mk2-simulation/> (accessed on 05 October 2021)
34. Kim, I.; Lee, H.; Lee, D. Development of a new tool for objective risk assessment and comparative analysis at coastal waters. *J. Int. Marit. Safety, Environ. Aff. Shipp.* **2019**, *2*, 58–66. doi: 10.1080/25725084.2018.1562511.
35. Cucinotta, F.; Guglielmino, E.; Sfravara, F. Frequency of Ship Collisions in the Strait of Messina through Regulatory and Environmental Constraints Assessment. *J. Navig.* **2017**, *70*, 1002–1022. doi: 10.1017/S0373463317000157.
36. Yoo, Y.; Kim, T.G. An improved ship collision risk evaluation method for Korea Maritime Safety Audit considering traffic flow characteristics. *J. Mar. Sci. Eng.* **2019**, *7*. doi: 10.3390/JMSE7120448.
37. Burmeister, H.-C.; Walther, L.; Jahn, C.; Toter, S.; Froese, J. Assessing the Frequency and Material Consequences of Collisions with Vessels Lying at an Anchorage in Line with IALA iWrap MkII. *TransNav, Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp.* **2014**, *8*, 61–68. doi: 10.12716/1001.08.01.07.
38. Eriksson, O.F. IWRAP MK2 INTRODUCTION IALA Waterway Risk Assessment Programme; 2018; Available online: <https://portal.helcom.fi/meetings/OPENRISK%20WS%203-2018-527/MeetingDocuments/Presentaton%206.pdf> (accessed on 06 November 2021)
39. Lušić, Z.; Čorić, M. Models for estimating the potential number of ship collisions. *J. Navig.* **2015**, *68*, 735–749. doi: 10.1017/S0373463314000903.
40. Pedersen, P. Collision and grounding mechanics. *Danish Soc. Nav. Archit. Mar. Eng.* **1995**, 125–157.
41. Goerlandt, F.; Kujala, P. Modeling of ship collision probability using dynamic traffic simulation. In Proceedings of the Euro-pean Safety & Reliability Conference, ESREL

- 2010, Rhodes, Greece, 5-9 September 2010; pp. 440-447.
42. Kujala, P.; Hänninen, M.; Arola, T.; Ylitalo, J. Analysis of the marine traffic safety in the Gulf of Finland. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* **2009**, *94*, 1349–1357. doi: 10.1016/j.ress.2009.02.028.
  43. Otto, S.; Pedersen, P.T.; Samuelides, M.; Sames, P.C. Elements of risk analysis for collision and grounding of a RoRo passenger ferry. *Mar. Struct.* **2002**, *15*, 461–474. doi: 10.1016/S0951-8339(02)00014-X.
  44. Silveira, P.A.M.; Teixeira, A.P.; Soares, C.G. Use of AIS data to characterise marine traffic patterns and ship collision risk off the coast of Portugal. *J. Navig.* **2013**, *66*, 879–898. doi: 10.1017/S0373463313000519.
  45. COWI, Risk Analysis of Sea Traffic in the Area around Bornholm, 2008. - VTT; 2008; Available online: <https://www.yumpu.com/en/document/read/35601367/risk-analysis-of-sea-traffic-in-the-area-around-bornholm-2008-vtt> (accessed on 28 November 2021)
  46. Fowler, T.G.; Sørgård, E. Modeling ship transportation risk. *Risk Anal.* **2000**, *20*, 225–244. doi: 10.1111/0272-4332.202022.
  47. Kaneko, F. Methods for probabilistic safety assessments of ships. *J. Mar. Sci. Technol.* **2002**, *7*, 1–16. doi: 10.1007/s007730200009.
  48. Montewka, J.; Hinz, T.; Kujala, P.; Matusiak, J. Probability modelling of vessel collisions. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* **2010**, *95*, 573–589. doi: 10.1016/j.ress.2010.01.009.
  49. Curtis, R.G. A ship collision model for overtaking. *J. Oper. Res. Soc.* **1986**, *37*, doi: 397–406. 10.1057/jors.1986.67.
  50. Endoh, S. Aircraft collision models. Partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 7 May 1987.
  51. Rawson, A.; Brito, M. A critique of the use of domain analysis for spatial collision risk assessment. *Ocean Eng.* **2021**, *219*. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108259.
  52. Wang, N. An intelligent spatial collision risk based on the quaternion ship domain. *J.*

- Navig.* **2010**, *63*, 733–749. doi: 10.1017/S0373463310000202.
53. Weng, J.; Liao, S.; Wu, B.; Yang, D. Exploring effects of ship traffic characteristics and environmental conditions on ship collision frequency. *Marit. Policy Manag.* **2020**, *47*, 523–543. doi: 10.1080/03088839.2020.1721584.
  54. van Iperen, E. Classifying Ship Encounters to Monitor Traffic Safety on the North Sea from AIS Data. *TransNav, Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp.* **2015**, *9*, 51–58. doi: 10.12716/1001.09.01.06.
  55. Zhang, W.; Goerlandt, F.; Montewka, J.; Kujala, P. A method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. *Ocean Eng.* **2015**, *107*, 60–69. doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.046.
  56. COWI RISKS OF OIL AND CHEMICAL POLLUTION IN THE BALTIC SEA Results and recommendations from HELCOM’s BRISK and BRISK-RU projects Nordic Council of Ministers; 2012; Available online: [https://helcom.fi/media/publications/BRISK-BRISK-RU\\_SummaryPublication\\_spill\\_of\\_oil.pdf](https://helcom.fi/media/publications/BRISK-BRISK-RU_SummaryPublication_spill_of_oil.pdf) (accessed on 03 January 2022)
  57. Wu, X.; Mehta, A.L.; Zaloom, V.A.; Craig, B.N. Analysis of waterway transportation in Southeast Texas waterway based on AIS data. *Ocean Eng.* **2016**, *121*, doi: 196–209. 10.1016/j.oceaneng.2016.05.012.
  58. Weng, J.; Meng, Q.; Qu, X. Vessel collision frequency estimation in the Singapore Strait. *J. Navig.* **2012**, *65*, 207–221. doi: 10.1017/S0373463311000683.
  59. Weng, J.; Meng, Q.; Li, S. Quantitative Risk Assessment Model for Ship Collisions in the Singapore Strait. In Proceedings of the The 93rd Annual Meeting of Transportation Research Board; Washington DC, United States, 12-16 January 2014; pp. 16.
  60. Chen, P.; Huang, Y.; Papadimitriou, E.; Mou, J.; van Gelder, P.H.A.J.M. An improved time discretized non-linear velocity obstacle method for multi-ship encounter detection. *Ocean Eng.* **2020**, *196*. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106718.
  61. Goerlandt, F.; Kujala, P. Traffic simulation based ship collision probability modeling. In Proceedings of the Reliability Engineering and System Safety; 2011; Vol. 96. doi:

- 10.1016/j.ress.2010.09.003.
62. Faghieh-Roohi, S.; Xie, M.; Ng, K.M. Accident risk assessment in marine transportation via Markov modelling and Markov Chain Monte Carlo simulation. *Ocean Eng.* **2014**, *91*, 363–370. doi: 10.1016/j.oceaneng.2014.09.029.
  63. Van Dorp, J.R.; Merrick, J.R.W.; Harrald, J.R.; Mazzuchi, T.A.; Grabowski, M. A risk management procedure for the Washington state ferries. *Risk Anal.* **2001**, *21*, 127–142. doi: 10.1111/0272-4332.211096.
  64. Vujičić, S.; Mohović, Đ.; Mohović, R. A Model of Determining the Closest Point of Approach Between Ships on the Open Sea. *PROMET - Traffic & Transportation* **2017**, *29*, 225–232. doi: 10.7307/ptt.v29i2.2197.
  65. Merrick, J.R.W.; Van Dorp, J.R.; Blackford, J.P.; Shaw, G.L.; Harrald, J.; Mazzuchi, T.A. A traffic density analysis of proposed ferry service expansion in San Francisco bay using a maritime simulation model. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* **2003**, *81*, 119–132. doi: 10.1016/S0951-8320(03)00054-1.
  66. Ulusçu, Ö.S.; Özbaş, B.; Altiok, T.; Or, İ. Risk analysis of the vessel traffic in the strait of Istanbul. *Risk Anal.* **2009**, *29*, 1454–1472. doi: 10.1111/j.1539-6924.2009.01287.x.
  67. Qu, X.; Meng, Q. Development and applications of a simulation model for vessels in the Singapore Straits. *Expert Syst. Appl.* **2012**, *39*, 8430–8438. doi: 10.1016/j.eswa.2012.01.176.
  68. Rong, H.; Teixeira, A.; Soares, C. Evaluation of near-collisions in the Tagus River Estuary using a marine traffic simulation model. *Zesz. Nauk. Akad. Morskiej w Szczecinie* 2015, nr 43 (115), 68–78.
  69. Fujii, Y.; Tanaka, K. Traffic capacity. *J. Navig.* **1971**, *24*, 543–552. doi: <https://doi.org/10.1017/S0373463300022384>.
  70. Mazaheri, A.; Montewka, J.; Kujala, P. Modeling the risk of ship grounding—a literature review from a risk management perspective. *WMU J. Marit. Aff.* **2014**, *13*. doi: 10.1007/s13437-013-0056-3.
  71. Li, S.; Meng, Q.; Qu, X. An Overview of Maritime Waterway Quantitative Risk



- Assessment Models. *Risk Anal.* **2012**, *32*, 496–512. doi: 10.1111/j.1539-6924.2011.01697.x.
72. Weintrit, A.; Neumann, T.; Montewka, J.; Goerlandt, F.; Lammi, H.; Kujala, P. A Method for Assessing a Causation Factor for a Geometrical MDTC Model for Ship-Ship Collision Probability Estimation. *Methods Algorithms Navig.* **2011**, *5*, 365–373. doi: 10.1201/b11344-13.
73. IMO, REVISED GUIDELINES FOR FORMAL SAFETY ASSESSMENT (FSA) FOR USE IN THE IMO RULE-MAKING PROCESS; 2018; Available online: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MSC-MEPC.2-Circ.12-Rev.2%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20\(Fsa\)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20\(Secretariat\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MSC-MEPC.2-Circ.12-Rev.2%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20(Fsa)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20(Secretariat).pdf) (accessed on 20 January 2022)
74. Uğurlu, Ö.; Köse, E.; Yıldırım, U.; Yüksekıldız, E. Marine accident analysis for collision and grounding in oil tanker using FTA method. *Marit. Policy Manag.* **2015**, *42*, 163–185. doi: 10.1080/03088839.2013.856524.
75. Antão, P.; Guedes Soares, C. Fault-tree models of accident scenarios of RoPax vessels. *Int. J. Autom. Comput.* **2006**, *3*, 107–116. doi: 10.1007/s11633-006-0107-8.
76. Langseth, H.; Portinale, L. Bayesian networks in reliability. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* **2007**, *92*, 92–108. doi: 10.1016/j.ress.2005.11.037.
77. Hänninen, M.; Kujala, P. Influences of variables on ship collision probability in a Bayesian belief network model. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* **2012**, *102*, 27–40. doi: 10.1016/j.ress.2012.02.008.
78. Montewka, J.; Ehlers, S.; Goerlandt, F.; Hinz, T.; Tabri, K.; Kujala, P. A framework for risk assessment for maritime transportation systems - A case study for open sea collisions involving RoPax vessels. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* **2014**, *124*, 142–157. doi: 10.1016/j.ress.2013.11.014.
79. Trucco, P.; Cagno, E.; Ruggeri, F.; Grande, O. A Bayesian Belief Network modelling of organisational factors in risk analysis: A case study in maritime transportation. *Reliab.*

*Eng. Syst. Saf.* **2008**, *93*, 845–856. doi: 10.1016/j.res.2007.03.035.

80. Khaled, M.E.; Kawamura, Y. Application of Bayesian Belief Network to Estimate Causation Probability of Collision at Chit-tagong Port by Analyzing Accident Database of Bangladesh. In Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Nagasaki, Japan, 20-21 November 2014; pp. 133–136.
81. Šurdonja, S.; Nežić, D.; Deluka-Tibljaš, A. Mikrosimulacijski model proračuna kapaciteta kružnog raskrižja. *Pomor. Zb.* **2015**, *49–50*, 143–165.
82. Dadić Ivan; Kos Goran; Ševrović Marko *Teorija prometnog toka*; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti: Zagreb, 2014;
83. Assumma, V.; Vitetta, A. Microsimulation models in a RO-RO high speed services intermodal container terminal: ordinary and perturbed conditions. In Proceedings of the European Transport Conference, Strasbourg, France, 18 – 20 September 2006; pp. 18 - 20.
84. Papageorgiou, G.; Damianou, P.; Pitsillides, A.; Aphantis, T.; Ioannou, P. Modelling and Simulation of transportation systems: Planning for a Bus Priority System | Request PDF. In Proceedings of the Modelling and simulation of transportation systems: planning for a bus priority system, Ljubljana, Slovenia, 09 – 13 September 2007; pp. 325 - 335.
85. Zeigler, B.; Kim, G.; Praehofer, H. *Theory of Modelling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*. 2nd Edition, Academic Press, San Diego, 2002. doi: 10.1002/rnc.610.
86. Bošnjak, I. *Inteligentni transportni sustavi 1*; Sveučilište u Zagrebu: Fakultet Prometnih Znanosti: Zagreb, 2006.
87. Sage, A.P.; Rouse, W.B. *Handbook of Systems Engineering and Management, 2nd Edition*; John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, USA, 2014.
88. Code Project. *Introduction to Object Oriented Programming Concepts (OOP) and More*; 2021; Available online: <https://www.codeproject.com/Articles/22769/Introduction-to-Object-Oriented-Programming-Concepts#Introduction> (accessed on 12 February 2022).
89. Techopedia. *Class Library*; 2011; Available online:

- <https://www.techopedia.com/definition/3764/class-library> (accessed on 12 February 2022)
90. Leemis Lawrence, M.; Park, S.. *Discrete – event simulation: A first course*; Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA, 2006;
  91. Čorić, M.; Mandžuka, S.; Gudelj, A.; Lušić, Z. Quantitative ship collision frequency estimation models: A review. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9. doi: 10.3390/jmse9050533.
  92. VesselFinder. *Real-Time AIS Data*; 2021; Available online: <https://www.vesselfinder.com> (accessed on 18 February 2022)
  93. MarineTraffic. *Real-Time AIS Data*; 2021; Available online: <https://www.marinetraffic.com> (accessed on 18 February 2022)
  94. Oh, J.-H.; Kim, K.; Jeong, J.-S. A Study on the Risk Analysis based on the Trajectory of Fishing Vessels in the VTS Area. *Int. J. e-Navigation Marit. Econ.* **2015**, 2. doi: 10.1016/j.enavi.2015.06.004.
  95. IALA. *Predicting Collision Frequencies*; 2010; Available online: [https://www.iala-aism.org/wiki/iwrap/index.php/Predicting\\_Collision\\_Frequencies](https://www.iala-aism.org/wiki/iwrap/index.php/Predicting_Collision_Frequencies) (accessed 26 February 2022)
  96. Byrne, M.D. How many times should a stochastic model be run? An approach based on confidence intervals. In Proceedings of the 12th International conference on cognitive modeling, ICCM 2013, Carleton University, Ottawa, Canada, 11–14 July 2013; pp. 445-450.
  97. Mohr dieck, C. *Physical Chemistry for the Life Sciences. By Peter Atkins and Julio de Paula*. European Chemical Societies Publishing, Oxford University press, Oxford, 2005. doi: 10.1002/cphc.200600131.
  98. Maxwell, J.C. V. Illustrations of the dynamical theory of gases. —Part I. On the motions and collisions of perfectly elastic spheres . *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.* **1860**, 19. doi: 10.1080/14786446008642818.
  99. Bach, J.; Schroeder, P.J. Pairwise Testing : A Best Practice That Isn ' t. In Proceedings of the 22nd Pacific Northwest Software Quality Conference, Portland, 2004; pp. 180-

196.

100. Quy, N.M.; Łazuga, K.; Gucma, L.; Vrijling, J.K.; van Gelder, P.H.A.J.M. Towards generalized ship's manoeuvre models based on real time simulation results in port approach areas. *Ocean Eng.* **2020**, *209*. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107476.
101. Weisberg, S. *Applied Linear Regression: Third Edition*. Wiley, New York, USA, 2005. doi: 10.1002/0471704091.
102. Finn Mølsted, R.; Glibbery, K.A.K.; Melchild, K.; Hansen, M.G.; Jensen, T.K.; Tue, L.-S.; Randrup-Thomsen, S. Quantitative assessment of risk to ship traffic in the fehmarnbelt fixed link project. *J. Polish Saf. Reliab. Assoc.* **2012**, *3*, 123–134.
103. Khaled, M.E.; Kawamura, Y. Collision risk analysis of chittagong port in Bangladesh by using collision frequency calculation models with modified BBN model. In Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE 2015), Kona, Hawaii, USA, 21-26 June 2015.
104. Scott, D.W. Box-Muller transformation. *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.* **2011**, *3*, 177–179. doi: 10.1002/wics.148.
105. Kaneko, F. A method for estimating the number of collision candidates in two waterways – for all intersection angles. *J. Navig.* **2022**, 1–21. doi: 10.1017/S0373463321000898.

## 8. POPIS ILUSTRACIJA

Slika 1: Scenarij nastanka sudara kod nasuprotnih i pretjecajnih kursova.....	10
Slika 2: Scenarij nastanka sudara pri križanju kursova .....	12
Slika 3: Brod predstavljen točkom u sredini kruga i definicija sudara [47] .....	17
Slika 4: Ilustracija algoritma za detekciju sudara [40][60].....	22
Slika 5: Markovljev model pomorskih nesreća .....	22
Slika 6: Generički oblik Bayesove mreže za procjenu rizika sudara brodova [65].....	27
Slika 7: Mogući scenariji nastanka sudara brodova [19][28][38] .....	34
Slika 8: AIS podaci brodova – model slučajno distribuirane plovidbe brodova u a) talijanskom dijelu Jadranskog mora [91] i b) istočnom dijelu Mramornog mora [92] .....	35
Slika 9: IWRAP model za procjenu učestalosti sudara brodova kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova.....	36
Slika 10: Vizualni modul računalnog simulacijskog modela za procjenu učestalosti sudara kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova.....	37
Slika 11: Simulacija dužine i širine broda .....	38
Slika 12: Situacija koju model proglašava sudarom.....	38
Slika 13: Modelska logika (dijagram toka) – model slučajno distribuirane plovidbe brodova .....	40
Slika 14: Modelska logika (UML sequence dijagram).....	42
Slika 15: Simulacija broda dužine 64 m i širine 10 m.....	44
Slika 16: Primjer scenarija sudara kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova – vizualni modul računalnog simulacijskog modela .....	45
Slika 17: Broj kandidata za sudar u ovisnosti o broju simulacija.....	46
Slika 18: Graf raspršenosti i regresijski pravac .....	53
Slika 19: Broj kandidata za sudar prema regresijskom modelu i računalnom simulacijskom modelu .....	55
Slika 20: AIS podaci brodova – promjena smjera protezanja plovidbenog puta jugoistočno od otoka Kitira u Jonskom moru [92].....	56
Slika 21: Simulacija skretanja broda .....	58
Slika 22: Koncept modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta – zone bez postojanja odvojene plovidbe .....	59

Slika 23: Sudar brodova istog smjera i klase kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta .....	61
Slika 24: Vizualni modul računalnog simulacijskog modela za procjenu učestalosti sudara brodova kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta.....	62
Slika 25: Modelska logika (dijagram toka) – promjena smjera protezanja plovidbenog puta .....	63
Slika 26: Primjer scenarija sudara kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta – vizualni modul računalnog simulacijskog modela .....	67
Slika 27: Primjer scenarija sudara kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta u računalnom programu IWRAP .....	69
Slika 28: IWRAP aproksimacija promjene smjera protezanja plovidbenog puta križanjem kursova.....	70
Slika 29: Usporedba broja kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta prema računalnom simulacijskom modelu i računalnom programu IWRAP .....	75
Slika 30: Usporedba broja kandidata za sudar kod nasuprotnih kursova prema računalnom simulacijskom modelu i računalnom programu IWRAP .....	75
Slika 31: Usporedba ukupnog broja kandidata za sudar prema računalnom simulacijskom modelu i računalnom programu IWRAP .....	76
Slika 32: Usporedba broja kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta prema računalnom simulacijskom modelu i računalnom programu IWRAP za različite modifikacije hipotetskog scenarija 21 .....	78
Slika 33: Usporedba broja kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta između računalnog simulacijskog modela i programa IWRAP u ovisnosti o kutu pregiba rute .....	79
Slika 34: AIS podaci brodova – promjena smjera protezanja plovidbenog puta između otoka Elafonisos i Kitera .....	80
Slika 35: Vizualni modul simuliranog realističnog scenarija u računalnom programu IWRAP .....	83
Slika 36: Koncept simulacije realističnog scenarija u računalnom simulacijskom modelu	85
Slika 37: Usporedba broja kandidata za sudar kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta prema računalnom simulacijskom modelu i programu IWRAP u realističnom scenariju .....	87
Slika 38: Usporedba broja kandidata za sudar kod nasuprotnih kursova prema računalnom simulacijskom modelu i programu IWRAP u realističnom scenariju .....	88

## 9. POPIS TABLICA

Tablica 1: Pregled postojećih korekcijskih čimbenika nekih plovidbenih područja i situacija [28].....	28
Tablica 2: Podjela ulaznih parametara modela u dvije kategorije – model slučajno distribuirane plovidbe .....	48
Tablica 3: Kombinacije prema testnom kriteriju „svi parovi“ – model slučajno distribuirane plovidbe brodova .....	49
Tablica 4: Ulazni parametri modela za svaki hipotetski scenarij – model slučajno distribuirane plovidbe brodova.....	50
Tablica 5: Broj kandidata za sudar prema računalnom simulacijskom modelu (20) kod modela slučajno distribuirane plovidbe brodova i prema analitičkom modelu u scenariju križanja kursova za kut od 90° .....	52
Tablica 6: Rezultati regresijske analize .....	53
Tablica 7: Reziduali i broj kanidatata za sudar predviđen regresijskim modelom.....	54
Tablica 8: Podjela ulaznih parametara modela u dvije kategorije – promjena smjera protezanja plovidbenog puta.....	71
Tablica 9: Kombinacije prema testnom kriteriju „svi parovi“ – promjena smjera protezanja plovidbenog puta .....	72
Tablica 10: Ulazni parametri modela za svaki scenarij – promjena smjera protezanja plovidbenog puta .....	72
Tablica 11: Broj kandidata za sudar prema računalnom simulacijskom modelu i računalnom programu IWRAP kod promjene smjera protezanja plovidbenog puta .....	74
Tablica 12: Godišnji promet brodova za opći teret u plovidbi od istoka prema zapadu .....	81
Tablica 13: Struktura i karakteristike prometa brodova za smjer od zapada prema istoku. 82	
Tablica 14: Struktura i karakteristike prometa brodova za smjer od istoka prema zapadu. 82	
Tablica 15: Sve kombinacije klasa brodova za izračun učestalosti sudara brodova .....	86
Tablica 16: Usporedba rezultata računalnog simulacijskog modela i programa IWRAP ...	87

## 10. POPIS KRATICA

AIS - Sustav automatske identifikacije brodova (eng. Automatic Identification System)

APF - (engl. Artificial Potential Field)

ATSB - (engl. Australian Transport Safety Bureau)

DCPA - (engl. Distance of the Closest Point of Approach)

FSA - (engl. Formal Safety Assessment)

FTA - Analiza stabla grešaka (engl. Fault Tree Analysis)

IALA - Međunarodno udruženje uprava pomorske signalizacije i sredstava za pomorsku navigaciju (engl. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities)

IMO - Međunarodna pomorska organizacija (engl. International maritime organization)

IWRAP - (engl. IALA Waterway Risk Assessment Program)

MCMC - (engl. Markov Chain Monte Carlo)

MDTC - (engl. Minimum Distance To Collision)

OOP - Objektno orijentirano programiranje (engl. Object-oriented programming)

TCPA - (engl. Time to the Closest Point of Approach)

TD-NLVO - (engl. Time Discrete Non-linear Velocity Obstacle)

TSS - Zone odvojenog prometa (engl. Traffic separation scheme)

UML - Unificirani jezik za modeliranje (engl. Unified Modeling Language)

VCRO - (engl. Vessel Conflict Ranking Operator)

WPF - (engl. Windows Presentation Foundation)



## 11. ŽIVOTOPIS AUTORA

Mirko Čorić rođen je 16. prosinca 1985. godine u Splitu u Republici Hrvatskoj. Gimnaziju je završio 2004. godine. Potom je upisao preddiplomski sveučilišni studij – smjer računarstvo na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu kojeg je završio 2008. godine. Na istom fakultetu upisuje i diplomski studij gdje je diplomirao 2010. godine, te stekao kvalifikaciju „Magistar inženjer računarstva“.

Po završetku diplomskog studija započinje raditi kao „Freelance“ razvojni programer web aplikacija. Od 2013. godine honorarno radi kao asistent na Pomorskom fakultetu u Splitu, gdje održava vježbe iz različitih informatičkih predmeta, sudjeluje u znanstvenim istraživanjima i pisanju znanstvenih publikacija, primjenjuje informacijske tehnologije kod izrade aplikacija iz područja pomorstva (npr. izrada i održavanje web aplikacije za evidenciju studenata posebnog programa obrazovanja, tzv. alternativnih studija), unosi podatke u sustav visokih učilišta (ISVU sustav) i educira osobe zadužene za rad s istim. 2015. godine upisuje poslijediplomski doktorski studij „Tehnološki sustavi u prometu i transportu“ na Fakultetu prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, a 2018. godine zaposlen je kao suradnik u suradničkom zvanju i radnom mjestu asistent u znanstvenom području tehničkih znanosti, polju računarstvo, grani informacijski sustavi na Katedri za opće i zajedničke predmete na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Splitu. Član je višegodišnje institucijski financiranog (VIF) projekta „Pomorska meteorološka motrenja i istraživanja“ Pomorskog fakulteta u Splitu, a 2021. godine sudjelovao je i u organizaciji Festivala znanosti u Splitu s temom „Kultura plovidbe brodom“. Autor je i koautor niza znanstvenih radova. Aktivno se služi engleskim jezikom. Oženjen je i otac je jednog djeteta.

### *Popis objavljenih radova:*

- [1] Čorić, M., Gudelj, A., & Krčum, M. (2013, May). Advantages of modern object oriented programming languages in development of computer simulation models for marine traffic safety”. U: 16th International Conference on Transport Science (ICTS), Maritime Transport and Logistics Science-Conference proceedings, Fakultet za pomorstvo in promet Portorož (pp. 74-80).

- [2] Čorić, M. & Gudelj, A. (2014) Application of the Vector Quantization Compression Method in the Video Supervision of Maritime Systems. U: 6th International Maritime Science Conference (IMSC 2014).
- [3] Lušić, Z. & Mirko, Č. (2015) Models for Estimating the Potential Number of Ship Collisions. *Journal of navigation*, 68 (4), 735-749 doi:10.1017/S0373463314000903.
- [4] Gudelj, A., Krčum Maja & Čorić, M. (2015) Upravljanje i više-objektna optimizacija rasporeda poslova autonomnih vozila na kontejnerskom terminalu. U: Željko Šakić (ur.)35th Conference on Transportation Systems with International Participation AUTOMATION IN TRANSPORTATION 2015.
- [5] Čorić, M. & Gudelj, A. (2015) Compression of iris images in the safety of marine systems using image procesing methods and classified vector quantization. U: 17th International Conference on Transport Science – ICTS 201.
- [6] Gudelj, A., Krčum, M. & Čorić, M. (2015) Modelling and control automated guided vehicle traffic at a container terminal. U: 34th International Conference on Organizational Science Development.
- [7] Čorić, M., Gudelj, A. & Lušić, Z. (2016) Classified Vector Quantization and its Application on Compression of Iris Images in the Safety of Marine Systems. *Promet*, 28 (2), 125-131 doi:10.7307/ptt.v28i2.1707.
- [8] Lušić, Z., Pušić, D. & Čorić, M. (2016) Maritime Traffic on Approach to Port of Split and Assessment of Collision and Grounding Risk. *Transactions on maritime science*, 5 (2), 130-140 doi:10.7225/toms.v05.n02.004.
- [9] Čorić, M., Gudelj, A. & Bubalo, T. (2016) Biometric identification systems in function of transport safety by applying CVQ compression method. U: Cokorilo, O. (ur.)Proceedings of the Third International Conference On Traffic And Transport Engineering (ICTTE).
- [10] Blašković Zavada, J. & Čorić, M. (2017) Razvoj hidrozrakoplovstva i popratne infrastrukture na jadranskoj obali. *Suvremeni promet : časopis za pitanja teorije i prakse prometa*, 37 (3/4), 138-142.

- [11] Blašković Zavada, J. & Čorić, M. (2017) Razvoj hidrozrakoplovstva i popratne infrastrukture na jadranskoj obali. U: Franko, R. (ur.)SYMPOSIUM HZDP 2017.
- [12] Gudelj, A., Krčum, M. & Čorić, M. (2017) Multiobjective optimization for job scheduling at automated container terminals. U: Zadnik Stirn, L., Kljajić Borštar, M., Žerovnik, J. & Drobne, S. (ur.)The 14th International Symposium on Operational Research in Slovenia – SOR'17.
- [13] Bubalo, T., Čorić, M. & Košir, G. (2018) The possibility of developing and implementing autonomus buses for road passenger transportation. U: Rijavec, R., Godec, A., Pavel, M., Kos, S. & Anžek, M. (ur.)Proceedings of the 26th International Symposium on Electronics in Transport (ISEP 2018)"Challenges for autonomous transport".
- [14] Čorić, M., Gudelj, A. & Krčum, J. (2018) BIOMETRICS AND THE SIGNIFICANCE OF BIOMETRIC DATA COMPRESSION IN TRANSPORT SYSTEMS. U: Zanne, M. & Bajec, P. (ur.)18th International Conference on Transport Science – ICTS 2018, CONFERENCE PROCEEDINGS.
- [15] Lušić, Z., Bakota, M., Čorić, M. & Skoko, I. (2019) Seafarer Market – Challenges for the Future. Transactions on Maritime Science – ToMS, 8 (1), 62-74 doi:10.7225/toms.v08.n01.007.
- [16] Čorić, M., Gudelj, A., Lušić, Z. & Mandžuka, S. (2019) E-Navigation Architecture Overview and Functional Connection Analysis. Naše more: znanstveni časopis za more i pomorstvo, 66 (3), 120-129 doi:10.17818/NM/2019/3.4.
- [17] Vidan, P., Gudelj, A., Čorić, M. & Vukša, S. (2020) Contribution to safety of navigation by introducing of new technologies in fairway marking. Journal of applied engineering science, 18 (1), 55-63 doi:10.5937/jaes18-23624.
- [18] Čorić, M., Mandžuka, S., Gudelj, A. & Lušić, Z. (2021) Quantitative Ship Collision Frequency Estimation Models: A Review. Journal of marine science and engineering, 9 (5), 1-28 doi:10.3390/jmse9050533.