

# Analiza pomorskih nesreća primjenom metode stabla grešaka i Monte Carlo simulacija

---

**Bašić, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:832179>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Ivan Bašić

Zagreb, godina 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Nikola Vladimir, dipl. ing.

Student:

Ivan Bašić

Zagreb, godina 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, asistentici Ivani Jovanović, mag. ing. i izv. prof. dr. sc. Nikoli Vladimiru.

Ivan Bašić



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Bašić** JMBAG: 0035208638

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza pomorskih nesreća primjenom metode stabla grešaka i Monte Carlo simulacija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of maritime accidents by Fault Tree Analysis and Monte Carlo simulations**

Opis zadatka:

Cilj istraživanja pomorskih nesreća jest unaprijediti sigurnost plovidbe i spriječiti onečišćenje uzrokovano brodovima. Međunarodna pomorska organizacija (IMO) je 2008. godine usvojila Kodeks za istraživanje nesreća putem rezolucije MSC.255(84) i učinila ga obveznim. EMSA (*eng. European Maritime Safety Agency*) je agencija Europske unije koja se bavi pitanjima sigurnosti plovidbe, zaštite okoliša i nadzora pomorskog prometa. Analiza stabla grešaka (*eng. Fault Tree Analysis, FTA*) je postupak koji se koristi za razumijevanje uzroka nesreća identificirajući temeljne greške ili propuste koji su doveli do nesreće. FTA omogućuje strukturiranje i vizualizaciju različitih elemenata koji su doprinijeli nesreći, čime se olakšava identifikacija ključnih točaka intervencije radi poboljšanja sigurnosti plovidbe. Monte Carlo metoda je statistička tehnika koja se često koristi u analizi rizika pomorskih nesreća. Ova metoda koristi slučajno generirane simulacije kako bi se procijenila vjerojatnost različitih ishoda nesreće ili incidenata. Monte Carlo simulacije omogućuju modeliranje različitih scenarija i utvrđivanje vjerojatnosti pojave određenih događaja, što pomaže u identifikaciji i upravljanju rizicima u pomorskom prometu. Kombinacija FTA i Monte Carlo metode pruža dublje razumijevanje uzroka i posljedica pomorskih nesreća, te omogućuje razvoj ciljanih strategija za poboljšanje sigurnosti plovidbe i smanjenje rizika od nesreća na moru. U diplomskom radu potrebno je klasificirati podatke o nesrećama u zadanom vremenskom okviru te za potencijalne uzroke nesreća razviti kvalitativni i kvantitativni model stabla grešaka. Rezultate analize stabla grešaka potrebno je validirati korištenjem Monte Carlo simulacija. Diplomski rad treba sadržavati:

- pregled metoda za analizu pomorskih nesreća,
- detaljan opis analize stabla grešaka i Monte Carlo metode,
- analizu prometnih nesreća prema tipu i ozbiljnosti nesreće te tipu broda,
- analizu rezultata.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predvideni datum obrane:

26. rujna 2024.

28. studeni 2024.

5., 6. i 9. 12. 2024.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Nikola Vladimirović

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
POPIS KRATICA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. MATEMATIČKI MODEL.....	3
2.1. Blok dijagram analize podataka .....	3
2.2. Analiza stabla grešaka (Fault Tree Analsys).....	4
2.2.1. Definicije iz FTA teorije .....	4
2.2.2. Simboli u stablu grešaka .....	5
2.2.3. Rezni skupovi.....	7
2.2.4. Najčešće greške u provedbi analize stabla grešaka.....	8
2.3. Monte Carlo metoda.....	8
2.3.1. Monte carlo integracija .....	9
2.3.2. Osnovni pojmovi i definicije.....	12
2.3.3. Uzrokovanje po važnosti.....	14
2.3.4. Generiranje nasumičnih brojeva iz uniformne i nezavisne distribucije brojeva. 16	
2.3.4.1. Bernoullijeva slučajna varijabla.....	17
2.3.4.2. Neprekidna slučajna varijabla.....	18
2.3.4.3. Eksponecijalna slučajna varijabla .....	19
2.4. Analiza odabranih nesreća .....	20
2.4.1. OpenFTA .....	20
2.4.2. P-model i $\lambda$ -model.....	20
2.5. Baza podataka osnovnih događaja .....	20
2.5.1. Izrada baze podataka osnovnih događaja povezanim za pomorske nesreće .....	21
3. REZULTATI I RASPRAVA.....	25
3.1. Kvantitativna analiza.....	27
3.1.1. Kvantitativna analiza za "Manjak iskustva i ljudske greške" IE1 .....	27
3.1.2. Kvantitativna analiza za "Nepoštivanje protokola" IE2 .....	30
3.1.3. Kvantitativna analiza za "Izvanredne situacije" IE3 .....	31
3.1.4. Kvantitativna analiza za "Sudar" TE_Sudar .....	33
3.2. Kvalitativna analiza.....	34
3.3. Rezultati Monte Carlo simulacija .....	36
3.3.1. Rezultati Monte Carlo simulacija n = 10.000 .....	36
3.3.2. Rezultati Monte Carlo simulacija n = 100.000 .....	39
4. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	44

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Dijagram toka analize podataka .....	3
Slika 2. Standardni simboli korišteni u analizi stabla grešaka [19]. .....	7
Slika 3. Primjer reznih skupova na stablu grešaka [19]. .....	8
Slika 4. Graf funkcije distribucije neprekidne slučajne varijable [24].....	18
Slika 5. Vrste brodova iz skupa izvještaja pomorskih nesreće .....	24
Slika 6. Stablo grešaka za pomorsku nesreću sudar dvaju brodova.....	26
Slika 7. Podstablo Manjak iskustva i ljudske greške .....	27
Slika 8. Podstablo manjak mekih vještina.....	28
Slika 9. Manjak tvrdih vještina .....	28
Slika 10. Individualni problemi i mane .....	29
Slika 11. Podstablo slaba percepcija .....	30
Slika 12. Podstablo nepoštivanje protokola .....	31
Slika 13. Podstablo izvanredne situacije .....	32
Slika 14. Podstablo kvar opreme.....	32
Slika 15. Podstablo vremenski uvjeti i okruženje .....	33
Slika 16. Pareto analiza rezultata Monte Carlo simulacija 10.000 ponavljanja.....	38
Slika 17. Pareto analiza rezultata Monte Carlo simulacija 100.000 ponavljanja. ....	41

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Baza podataka osnovnih događaja u stablu grešaka.....	22
Tablica 2. Vjerojatnosti minimalnih reznih skupova .....	35
Tablica 3. Rezultati Monte Carlo simulacija 10.000 ponavljanja .....	37
Tablica 4. Rezultati Monte Carlo simulacija 100.000 ponavljanja .....	40



**POPIS OZNAKA**

<b>Simbol</b>	<b>Opis</b>
$\mu$	Očekivana srednja vrijednost.
$\sigma^2$	Varijanca.
$\hat{\mu}$	Monte Carlo procjenitelj.
$SE(\hat{\mu})$	Standardna greška procjenitelja.
$P(A)$	Vjerojatnost događaja A.
$\Phi(x)$	Funkcija distribucije.
$Var(X)$	Varijanca slučajne varijable X.
$E(X)$	Matematičko očekivanje slučajne varijable X.
RMSE	Korijen srednje kvadratne pogreške.
RS	Rezni skup.
MinRS (MRS)	Minimalni rezni skup.
$N(\mu, \sigma^2)$	Normalna distribucija.
$AN(\mu, \sigma^2)$	Asimptotska normalna distribucija.
$U(a, b)$	Uniformna distribucija na intervalu [a, b].
$U(0,1)$	Uniformna distribucija na intervalu [0,1].
$Ber(p)$	Bernoullijeva distribucija s parametrima p.
$\cup$	Unija skupova.
$\cap$	Presjek skupova.
$\in$	Pripadnost skupu.
$\subseteq$	Podskup.
$\subset$	Strogi podskup.
$\Omega$	Skup elementarnih ishoda (prostor).
$\mathcal{P}(A)$	Skup svih podskupova skupa A.
$\text{supp}(f)$	Podrška funkcije f.
$\Rightarrow$	Implicira.
$\Leftrightarrow$	Ekvivalencija.

---

$\neg$	Negacija.
$\forall$	Za sve.
$\exists$	Postoji.
$\rightarrow$	Konvergencija.
$f(x)$	Funkcija gustoće.
$g(x)$	Funkcija težine.
$\chi(A)$	Indikatorska funkcija skupa A.
$f^{-1}(x)$	Inverzna funkcija.
$\delta(x)$	Diracova delta funkcija.
$+, -, \times, \div$	Osnovne aritmetičke operacije.
$\Sigma$	Suma.
$\Pi$	Produkt.
$\int$	Integral.
$d/dx$	Derivacija.
$\sqrt{\quad}$	Kvadratni korijen.
$O(f)$	Red veličine (asimptotska analiza).
$TE$ Sudar	Glavni događaj vezan uz sudar.
$BE\_i$	Identifikator osnovnog događaja, npr. BE1.
$\bar{Y}$	Prosjeak slučajnih vrijednosti.
$(X_1, \dots, X_n)$	Slučajni vektor.
$z_{1-\alpha/2}$	Kvantil normalne distribucije.

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Značenje</b>
FTA	Fault Tree Analysis
EMSA	European Maritime Safety Agency
RS	Rezni skup (Cut Set)
MinRS/MRS	Minimalni rezni skup (Minimal Cut Set)
VD/MOE	Višestruki događaj (Multiple Occurring Event)
VG/MOB	Višestruka grana (Multiple Occurring Branch)
COLREG	International Regulations for Preventing Collisions at Sea
SE( $\mu$ )	Standardna greška procjenitelja
AN( $\mu, \sigma^2$ )	Asimptotska normalna distribucija
BE <sub>x</sub>	Osnovni događaj (Basic Event), npr. BE8
TE	Glavni događaj (Top Event)
IE	Srednji događaj (Intermediate Event)

**SAŽETAK**

Cilj istraživanja pomorskih nesreća je unaprijediti sigurnost plovidbe i spriječiti onečišćenja uzrokovana brodovima. Ključni okvir za takva istraživanja osigurala je Međunarodna pomorska organizacija (IMO), koja je 2008. godine usvojila Kodeks za istraživanje nesreća putem rezolucije MSC.255(84), čineći ga obveznim. Na razini Europske unije, Europska agencija za pomorsku sigurnost (EMSA) ima ključnu ulogu u pitanjima sigurnosti plovidbe, zaštite okoliša i nadzora pomorskog prometa. Ovaj rad kombinira analizu stabla grešaka (FTA) i Monte Carlo simulacije kako bi se procijenili rizici i uzroci pomorskih nesreća, s naglaskom na sudare brodova. Analiza koristi podatke iz EMSA baze za razdoblje od 2012. do 2023. godine, identificirajući glavne uzroke nesreća: ljudske greške, kvarove opreme i izvanredne situacije. Na temelju tih uzroka izrađeno je stablo grešaka, koje omogućuje vizualizaciju i analizu uzročno-posljedičnih veza. Provedene su Monte Carlo simulacije s 10.000 i 100.000 iteracija, omogućujući kvantitativnu procjenu minimalnih reznih skupova (MinRS), koji identificiraju kritične točke neuspjeha u sustavu. Rezultati sugeriraju usmjeravanje preventivnih mjera na ključne čimbenike rizika kako bi se smanjila učestalost sudara i poboljšala sigurnost u pomorskom prometu. Kombinacija metoda analize stabla grešaka i Monte Carlo simulacija pokazala se kao snažan alat za razumijevanje i unapređenje sustava sigurnosti pomorskog prometa, doprinoseći pritom smanjenju rizika i zaštiti okoliša.

**Ključne riječi:** Pomorske nesreće, sudari brodova, sigurnost pomorskog prometa, analiza stabla grešaka, minimalni rezni skupovi, Monte Carlo simulacije.

**SUMMARY**

The objective of maritime accident research is to improve navigation safety and prevent pollution caused by ships. A key framework for such investigations was provided by the International Maritime Organization (IMO), which adopted the Casualty Investigation Code in 2008 through resolution MSC.255(84), making it mandatory. At the European Union level, the European Maritime Safety Agency (EMSA) plays a pivotal role in addressing navigation safety, environmental protection, and maritime traffic monitoring. This study combines Fault Tree Analysis (FTA) and Monte Carlo simulations to assess the risks and causes of maritime accidents, with a focus on ship collisions. The analysis utilizes data from the EMSA database covering the period from 2012 to 2023, identifying the main causes of accidents: human errors, equipment failures, and extraordinary circumstances. Based on these causes, a fault tree was constructed to visualise and analyse causal relationships. Monte Carlo simulations were conducted with 10,000 and 100,000 iterations, enabling a quantitative assessment of Minimal Cut Sets (MinRS), which identify critical failure points in the system. The results suggest directing preventive measures toward key risk factors to reduce the frequency of collisions and improve safety in maritime transport. The combination of fault tree analysis and Monte Carlo simulations has proven to be a powerful tool for understanding and enhancing maritime safety, contributing to risk reduction and environmental protection.

Keywords: Maritime accidents, Ship collisions, Maritime safety, European Maritime Safety Agency, Fault Tree Analysis, Minimal Cut Sets, Monte Carlo simulations.

## 1. UVOD

Pomorski prijevoz čini okosnicu globalnog trgovinskog sustava. U usporedbi s drugim vrstama prijevoza, nezamjenjiva količina tereta prevozi se morskim putem, pri čemu su jedinični troškovi prijevoza znatno niži. Zahvaljujući tim prednostima, 90 % globalnog prijevoza po volumenu obavlja se morem [1]. Povećana globalna potražnja za sirovinama i gotovim proizvodima zahtijeva plovidbu sve većeg broja brodova, što dovodi do pojave mnogih problema, uključujući gušći pomorski promet brodova i povećani rizik od sudara. Uz to, u slučaju pomorske nesreće, posljedice mogu dosegnuti katastrofalne razmjere [2]. Istraživanje pomorskih nesreća pokazuje da su sudari i kontakti značajno učestaliji od ostalih vrsta pomorskih nesreća [3]. Statistike Europske agencije za pomorsku sigurnost (*eng. European Maritime Safety Agency, EMSA*) pokazuje da sudari spadaju među najčešće vrste pomorskih nesreća koje uključuju ljudske žrtve [4]. Istraživanja potvrđuju da je 75–96 % svih pomorskih nesreća i 89–96 % sudara uzrokovano ljudskom pogreškom [5], [6], [7].

Pomorski promet i dalje je suočen s brojnim izazovima, uzrokovanim različitim nesigurnostima poput novih tehnologija (primjerice autonomnih brodova), klimatskih promjena i ekonomskih previranja [6]. Kako bi se bolje razumjeli i analizirali uzroci nesreća te unaprijedila opća razina sigurnosti na moru, istraživači su se fokusirali na različite aspekte pomorskih nesreća, uključujući čimbenike koji na njih utječu i njihovu prostornu distribuciju [7]. Acharya i sur. (2017) [8] istraživali su prostornu distribuciju pomorskih nesreća u vodama Istočne Azije, pružajući nove uvide za predviđanje nesreća, upravljanje rizicima i donošenje odluka u područjima s visokom stopom nesreća. Navas de Maya i Kurt (2020) [9] koristili su Neizrazite kognitivne mape (*eng. Fuzzy Cognitive Maps*) i stručno znanje kako bi identificirali ključne čimbenike koji doprinose pomorskim nesrećama. Utvrđeno je da su glavni uzroci nesreća na teretnim brodovima nedostatak situacijske svijesti pilota i neadekvatna komunikacija.

Različite metodologije korištene su za istraživanje pomorskih nesreća, pri čemu su postignuti značajni rezultati. Primjerice, kombinacija analize stabla grešaka (*eng. Fault Tree Analysis, FTA*), utemeljene teorije (*eng. Grounded Theory, GT*) i Bayesove mreže (*Bayesian Network, BN*) pokazala se korisnom u istraživanju Wang i sur. (2021) [10]. Njihovo istraživanje pokazalo je da su učinkoviti ventilacijski sustavi i brza reakcija posade i putnika ključni za ublažavanje posljedica brodskih požara. Fan i sur. (2020) [11] primijenili su metodu analize temeljenu na podacima o pomorskim nesrećama kako bi identificirali pet ključnih faktora koji utječu na sigurnu plovidbu brodova. Ventikos i sur. (2017) [12] analizirali su pomorske nesreće

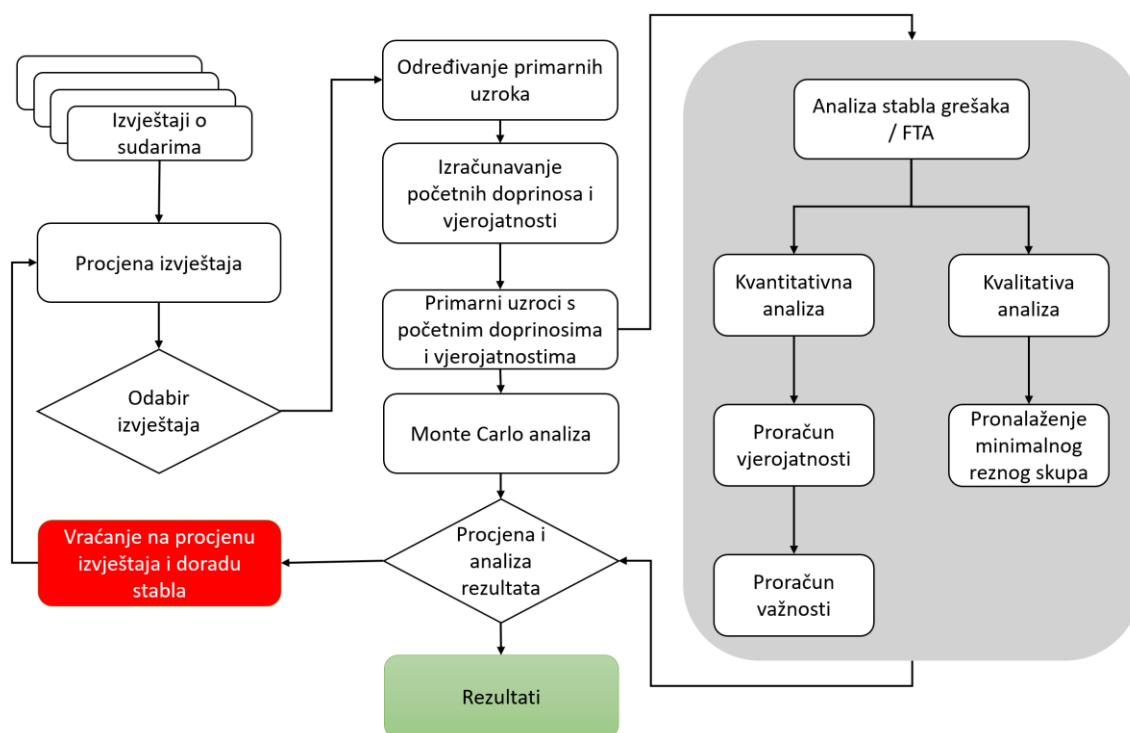
u Egejskom moru tijekom desetogodišnjeg razdoblja pri čemu su predstavili dva različita modela za bolje razumijevanje rezultata. Osim toga, korišteni su i drugi pristupi, uključujući logističku regresiju [13], analizu i klasifikaciju ljudskih čimbenika (*eng. Human Factors Analysis and Classification System, HFACS*) [14], strojno učenje [15] i druge metode. Ova istraživanja donijela su vrijedne uvide za prevenciju pomorskih nesreća te pružila korisne smjernice za upravljanje sigurnošću u nadležnim pomorskim agencijama.

U ovome radu, baza podataka korištena za izradu matematičkog preuzeta je s EMSA portala [16]. U analizu su uključene vrlo ozbiljne nesreće uzrokovane sudarima brodova, koje su se dogodile u vremenskom razdoblju od 2012. do 2023. godine. Istraživanje je obuhvatilo 30 izvještaja u kojima se spominje ukupno 60 brodova. Na temelju tih izvještaja izrađena je klasifikacija srodnih uzroka, koji su zajednički identificirani u svim analiziranim incidentima.

## 2. MATEMATIČKI MODEL

### 2.1. Blok dijagram analize podataka

Dijagram toka na Slici 1 prikazuje metodologiju za analizu pomorskih nesreće korištenu u ovome radu, počevši od prikupljanja podataka, pa sve do završne analize rezultata. Svaka faza prikazana je pojedinačno kako bi se jasno definirali koraci koje treba provesti za postizanje rezultata.



Slika 1. Dijagram toka analize podataka

Analiza sudara sastoji se od više ključnih koraka koji osiguravaju razumijevanje rizika i razvoj učinkovitih mjera za poboljšanje sigurnosti. Prvo se prikupljaju izvještaji o sudarima, koji sadrže detalje o okolnostima, uzrocima i posljedicama nesreća te kao temelj za analizu. Nakon toga provodi se procjena izvještaja radi identifikacije ključnih uzroka i obrazaca rizika, a odabiru se samo relevantni izvještaji kako bi analiza bila precizna i učinkovita.

U sljedećem koraku analiziraju se primarni uzroci sudara, uključujući ljudske greške, tehničke kvarove i vanjske uvjete, dok se za svaki uzrok izračunavaju početni doprinosi i vjerojatnosti. Ti podaci služe kao osnova za Monte Carlo analizu, koja simulacijama kvantificira nesigurnosti i procjenjuje ukupnu razinu rizika. Rezultati Monte Carlo simulacija koriste se za daljnje razumijevanje distribucije rizika i identifikaciju ključnih čimbenika s najvećim utjecajem.



Kao dodatak, provodi se analiza stabla grešaka (FTA) kako bi se razradio mehanizam nastanka neželjenih događaja, dok kvantitativna analiza omogućuje precizno određivanje vjerojatnosti i važnosti pojedinačnih uzroka. Uz to, kvalitativna analiza identificira minimalne rezne skupove, koji predstavljaju najmanje skupove uzroka potrebne za glavni događaj.

Ako rezultati nisu zadovoljavajući, vraća se na prethodne korake radi dorade i ponovne procjene izvještaja. Ovaj iterativni proces omogućuje detaljno razumijevanje rizika i pruža čvrstu osnovu za donošenje odluka o mjerama sigurnosti.

## 2.2. Analiza stabla grešaka (Fault Tree Analsys)

Analiza stabla grešaka (eng. *Fault Tree Analysis - FTA*) je sistematska tehnika analize sustava koja se koristi za određivanje osnovnih uzroka i vjerojatnosti pojave određenog neželjenog događaja. Koristi se za procjenu velikih, složenih dinamičkih sustava kako bi se razumjeli i spriječili potencijalni problemi [17]. Stablo grešaka predstavlja logički i grafički prikaz različitih kombinacija mogućih događaja u sustavu koji dovode do neželjenog događaja. Analiza je deduktivna, i provodi se od općeg problema do specifičnih uzroka, pokazujući logične putove kvara od pojedinačnog neželjenog događaja do svih mogućih korijenskih uzroka [17]. FTA je poznata po jednostavnosti upotrebe, jasnoći, pružanju korisnih uvida u sustav te sveobuhvatnom prikazu potencijalnih uzroka problema [17]. Grafički modeli stabla grešaka koriste logička vrata i događaje kvara kako bi ilustrirali odnos uzroka i posljedica u pojavi neželjenog događaja. Ti se modeli mogu prevesti u matematičke funkcije za izračun vjerojatnosti kvara [17]. FTA se primjenjuje i proaktivno i reaktivno, pružajući uvid u značaj događaja kvara i potrebne preventivne mjere [17]. FTA sustavno istražuje sustave kako bi identificirao i prikazao uzroke i odnose koji leže u osnovi neželjenih događaja. Rezultati FTA omogućuju potvrdu usklađenosti, identifikaciju nedostataka, uspostavu preventivnih mjera i informiranje sigurnosnih zahtjeva za sljedeće faze projekta.

### 2.2.1. Definicije iz FTA teorije

Važno je definirati značenje pojmova koja se koristi u analizi stabla grešaka [17]:

- Rezni skup (RS): Skup događaja koji zajedno uzrokuju glavni događaj. Također poznat kao put greške.

- Minimalni rezni skup (MinRS ili MRS): Rezni skup koji je sveden na minimalni broj događaja koji uzrokuju glavni događaj. MinRS se više ne može dodatno smanjiti, a da se još uvijek osigura pojava vršnog događaja.
- Kvar: Pojava osnovnog kvara komponente, na primjer, " kvar otpornika uslijed naglog velikog prolaza struje i/ili napona, uzrokujući požar".
- Greška: Pojava ili postojanje neželjenog stanja komponente, podsustava ili sustava.
- Primarni kvar/greška: Neovisni kvar komponente koji se ne može dalje definirati na nižoj razini.
- Sekundarni kvar/greška: Neovisni kvar komponente koje je uzrokovan vanjskim utjecajem na sustav.
- Vrijeme izloženosti (VI): Vremenski period tijekom kojeg je komponenta učinkovito izložena kvaru tijekom radnog vijeka.
- Kritični put: Najvjerojatniji RS koji utječe na vjerojatnost glavnog neželjenog događaja.

### 2.2.2. *Simboli u stablu grešaka*

U konstrukciji osnovnog stabla grešaka koristi se niz simbola, koji se nazivaju osnovnim logičkim simbolima.

Pravokutnik se koristi za identifikaciju glavnog ili glavnog neželjenog događaja, kao i sekundarnih ili doprinosećih događaja (ponekad glavni događaj grane stabla grešaka). Pravokutni oblik na stablu označava događaj ili stanje sustava koje se mora dalje analizirati na nižim razinama unutar stabla [17].

Krug se koristi za prikazivanje osnovnog događaja u procesu FTA. Može biti primarni događaj greške (tj. prvi u procesu koji se dogodio) i stoga neće zahtijevati daljnji razvoj [17]. Upotreba simbola kruga pruža analitičaru određenu fleksibilnost.

Kuća se koristi za identifikaciju normalnog događaja koji se događa tijekom operacije sustava. To je događaj koji se ili događa ili ne događa, poput uključivanja ili isključivanja prekidača [17].

Dijamant predstavlja događaj na stablu grešaka koji se smatra nedovoljno razvijenim. Korištenjem ovog simbola označava događaj koji analitičar nije odabrao dalje razvijati ili zbog složenosti događaja ili zbog nedostatnih podataka za daljnju analizu [17].









Oval je uvjetni događaj ili uvjetni ulaz u logičko stablo koji dodatno definira stanje sustava koje mora postojati kako bi se dogodio niz grešaka [17].

Logička vrata su temelj logičkog stabla koje pokazuje povezanost događaja na stablu [17]. Općenito, postoje dvije vrste logičkih vrata koje se pojavljuju na stablu grešaka: I vrata i ILI vrata [17]. Koristeći I vrata, svi doprinoseći događaji povezani s glavnim ili primarnim događajima, kroz vrata, moraju se dogoditi kako bi se glavni događaj dogodio [17].

Kada se koriste ILI vrata, ako se dogodi bilo koji događaj povezan s glavnim događajem kroz ILI vrata, tada će se i glavni događaj dogoditi [17]. Ovo je inkluzivna ILI vrata što znači da će se događaj dogoditi ako se dogodi bilo koji ili svi navedeni događaji.

Ovalni simbol, pričvršćen na vrata, označava stanje ILI vrata [17]. Ako se ocjenjuju složeniji sustavi, ekskluzivni uvjet postavljen na ovaj vrata zahtijeva daljnje objašnjenje.

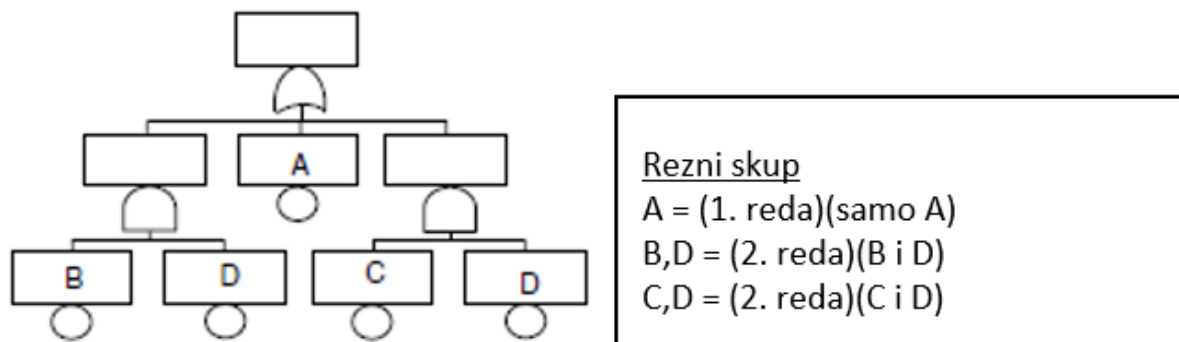
Izgled simbola i kratke definicije su prikazane na Slici 2.

Simbol	Naziv	Opis
	Pravokutnik	Glavni događaj; sekundarni događaj; doprinosni događaj
	Krug	Konkretna greška koja doprinosi glavnom događaju
	Kuća	Greška koja se očekuje da će se dogoditi za vrijeme rada sustava
	Romb	Nerazvijeni događaj, Događaj koji se pod uvjetom i/ili iz nužde neće razvijati
	Oval	Događaj koji će se desiti kada se svi uvjeti ispune
	I vrata	Govori kako se svi navedeni događaji moraju dogoditi da bi se događaj dogodio
	ILI vrata	Govori kako se jedna ili više događaja trebaju dogoditi da bi se događaj dogodio
	Transferna vrata in/out	Koristi se kako bi se pokazao logički tijek između dva dijela stabla grešaka

Slika 2. Standardni simboli korišteni u analizi stabla grešaka [17].

### 2.2.3. Rezni skupovi

Rezni skupovi (RS) jedan su od ključnih dijelova FTA-a. Oni identificiraju kvarove i/ili kombinacije događaja koji mogu uzrokovati glavni ND. RS-ovi također pružaju jedan mehanizam za izračunavanje vjerojatnosti. U osnovi, RS-ovi otkrivaju kritične i slabe veze u dizajnu sustava identificirajući komponente s sigurnosnim problemima. Slika 3 prikazuje primjer FT-a s popisom rezultirajućih RS-ova navedenih s desne strane. Prema definiciji RS-a, svaki od tih RS-ova može uzrokovati glavni ND [17]. RS-ovi se generiraju prema pravilima Booleove algebre, a postoji mnogo različitih algoritama za generiranje RS-ova.



Slika 3. Primjer reznih skupova na stablu grešaka [17].

#### 2.2.4. Najčešće greške u provedbi analize stabla grešaka

U nastavku je popis tipičnih pogrešaka koje se često događaju tijekom provođenja FTA [17]:

1. Ne uključivanje ljudske pogreške u stablo grešaka.
2. Nedovoljno razumijevanje konfiguracije i rada sustava.
3. Preskakanje koraka u projektiranju sustava dalje nego što logika kvara opravdava.
4. Ne postavljanje teksta u svaki čvor stabla.
5. Nedostatak dovoljno opisanog teksta u svakom čvoru stabla.
6. Zaboravljanje ispravnih definicija stabla grešaka (neispravna upotreba događaja).
7. Pogrešno uzimanje u obzir VD-a u stablu grešaka.

### 2.3. Monte Carlo metoda

Monte Carlo metoda je numerička tehnika koja se primjenjuje u različitim disciplinama, uključujući fiziku, računalne znanosti, statistiku, financije, strojarstvo, itd. Ova metoda temelji se na ideji simuliranja slučajnih procesa ili eksperimenata kako bi se dobile približne vrijednosti ili rješenja kompleksnih problema koji se teško ili nemoguće rješavaju analitički.

U Monte Carlo metodi se određuje iznos koji se želi znati kao očekivana vrijednost slučajne varijable ( $Y$ ), tj.  $\mu = E(Y)$ . Tada se nezavisno i slučajno generiraju vrijednosti ( $y_1, y_2, \dots, y_n$ ) iz distribucije od ( $Y$ ) i uzimaju njihove prosječne vrijednosti kao procjena od ( $\mu$ ).

Monte Carlo procjenitelj za ( $\mu$ ) dan je s:

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (1)$$

Pod uvjetom da je varijanca ( $\sigma^2 = \text{Var } Y$ ) konačna, zbog centralnog graničnog teorema:

$$\sqrt{n}(\bar{Y} - \mu) \rightarrow N(0,1), \quad n \rightarrow \infty \quad (2)$$

slijedi da je približna distribucija Monte Carlo procjenitelja asimptotski normalna s očekivanjem ( $\mu$ ) i varijancom ( $\sigma^2$ ):

$$\bar{Y} \sim AN\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right), \quad n \rightarrow \infty \quad (3)$$

U praksi, parametar ( $\sigma^2$ ) je najčešće nepoznat, ali se može procijeniti uzorkovanjem varijancom:

$$\widehat{\sigma^2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (4)$$

Procjena greške Monte Carlo metode dana je standardnom greškom procjenitelja:

$$\text{SE}(\bar{Y}) = \sqrt{\frac{\widehat{\sigma^2}}{n}} \quad (5)$$

Kako se veličina uzorka ( $n$ ) povećava, standardna greška opada proporcionalno s ( $\frac{1}{\sqrt{n}}$ ), što čini Monte Carlo metodu pogodnom za aproksimaciju složenih problema uz dovoljan broj iteracija.

### 2.3.1. Monte Carlo integracija

Monte Carlo integracija je tehnika numeričke integracije koja koristi realizacije slučajne varijable iz neke distribucije za računanje konačnih integrala. To je moguće zbog činjenice da se integral može interpretirati kao matematičko očekivanje [18], [19].

Neka je  $(\Omega, F, P)$  vjerojatnosni prostor i  $U \sim U(0,1)$ . Promatramo problem procjene integrala funkcije  $f: I \rightarrow R$  na jediničnom intervalu  $I = [0,1]$ . Ako je  $E|f(U)| < \infty$ , tada integral

$$\mu = \int_I f(x) dx \quad (6)$$

možemo interpretirati kao očekivanje  $E[f(U)]$ , odnosno

$$\mu = \int_I f(x) dx = E[f(U)] \quad (7)$$

Neka je  $(U_1, U_2, \dots, U_n)$  niz nezavisnih slučajnih varijabli s uniformnom  $U(0,1)$  distribucijom. Monte Carlo procjenitelj dan je s

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(U_i). \quad (8)$$

Primijetimo:

1. Za  $U \sim U(a, b)$  je

$$E[f(U)] = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx, \quad (9)$$

te je tada za  $(U_1, U_2, \dots, U_n)$  n.j.d. niz s  $U(a, b)$  distribucijom, procjenitelj za integral dan s

$$\frac{b-a}{n} \sum_{i=1}^n f(U_i). \quad (10)$$

2. Problem integracije može se generalizirati na procjenu očekivanja na skupu

$$I^d = [0,1]^d \quad [18] [19].$$

Aproksimacija (25) po jakom zakonu velikih brojeva, kad  $(n \rightarrow \infty)$ , konvergira stvarnoj vrijednosti integrala

$$\frac{f(U_1) + f(U_2) + \dots + f(U_n)}{n} (g.s) \rightarrow E[f(U)] \quad (11)$$

Budući da su  $(U_1, U_2, \dots, U_n)$  nezavisne i jednako distribuirane,  $(\hat{\mu}_n)$  je slučajna varijabla s očekivanjem

$$E(\hat{\mu}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_f(U) = E_f(U) = \mu \quad (12)$$

i varijancom

$$\text{Var}(\hat{\mu}_n) = \text{Var}\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(U_i)\right) = \frac{1}{n^2} \left(\sum_{i=1}^n \text{Var}(f(U_i))\right) = \frac{\text{Var}(f(U))}{n} = \frac{\sigma^2}{n}. \quad (13)$$

Dakle, Monte Carlo procjenitelj je asimptotski nepristran za  $(\mu)$  i konzistentan. Jak zakon velikih brojeva osigurava konvergenciju Monte Carlo procjene k stvarnoj vrijednosti očekivanja za velike vrijednosti  $(n)$ . Procjena nastala Monte Carlo metodama ima prateće greške uzorka. Pitanje je koliki treba biti  $(n)$  da bi greška aproksimacije bila dovoljno mala te hoće li ta greška uopće biti mala za dani uzorak. Bitnu ulogu ocjenjivanja greške ima centralni granični teorem. Iz centralnog graničnog teorema slijedi približna distribucija pogreške Monte Carlo procjenitelja:

$$\hat{\mu}_n - \mu \sim AN\left(0, \frac{\sigma^2}{n}\right), \quad n \rightarrow \infty. \quad (14)$$

Očito je da će rezultat biti lošiji povećanjem varijance, dok će on biti bolji povećavanjem uzorka, odnosno s većim ( $n$ ). Korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE) od ( $\hat{\mu}_n$ ) je:

$$\sqrt{E((\hat{\mu}_n - \mu)^2)} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

Što pišemo  $RMSE = O(n^{-1/2})$  za ( $n \rightarrow \infty$ ) kako bi se naglasilo da je greška reda ( $n^{-1/2}$ ). Da bi se poboljšala točnost za još jednu decimalu, RMSE bi trebala biti jednu desetinu veća, što bi zahtijevalo 100 puta više računanja.

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (16)$$

koja po zakonu velikih brojeva konvergira prema ( $\sigma^2$ ) kada ( $n \rightarrow \infty$ ).

Specijalno, za ( $\alpha \in (0,1)$ ) i veliki ( $n$ ), interval pouzdanosti ( $(1 - \alpha)$ ) za očekivanje ( $\mu$ ) je:

$$\left( \bar{Y} - z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{Y} + z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (17)$$

gdje je ( $z_{1-\alpha}$ ) ( $(1 - \alpha)$ )-kvantil standardne normalne distribucije ( $N(0,1)$ ).

Osnovni postupak procjene nezavisnih i jednako distribuiranih podataka sažet je u nastavku.

Postupak se ponekad naziva i jednostavnim Monte Carlom (*eng. Crude Monte Carlo*, (CMC)).

Algoritam za jednostavni Monte Carlo [19]:

1. Generiraj nezavisno i jednako distribuiran niz ( $y_1, \dots, y_n$ ) iz distribucije od  $Y$ .
2. Vrati vrijednost procjene ( $\bar{y}$ ) i interval pouzdanosti za ( $\mu = E(Y)$ ).

Često je  $Y$  funkcija nekog slučajnog vektora ili čak i slučajnog procesa, odnosno  $Y = f(X)$ , gdje je  $X \in D \subseteq R^d$  slučajni vektor s funkcijom gustoće  $p(x)$  i  $f$  realna funkcija definirana na  $D$ . Također,  $X$  ne mora uopće biti točka u Euklidskom prostoru, on može biti i put neke lutajuće čestice, dokle god je  $Y = f(X)$  iznos koji ima aritmetičku sredinu, kao što ju imaju realni brojevi ili vektori, može se koristiti Monte Carlo.

1. Računanje integrala

$$E(h(X)) = \int h(x)f(x)dx \quad (18)$$

pri čemu je ( $h$ ) realna funkcija, a ( $f$ ) funkcija gustoće slučajne varijable ( $X$ ).

2. Računanje vjerojatnosti

$$P(Y \in A) = E(1_A). \quad (19)$$

Procjena vjerojatnosti ( $P(Y \in A)$ ) dobiva se kao specijalan slučaj prethodne primjene, ako se za ( $h$ ) uzme indikatorska funkcija, tj. ( $P(Y \in A)$ ) može se računati koristeći procjenitelj



$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i). \quad (20)$$

### 2.3.2. Osnovni pojmovi i definicije

Prije samog postupka objašnjenja Monte Carlo metoda definirat će se neki ključni pojmovi potrebni u radu, poput slučajnog vektora i njegove distribucije, zatim statističkog modela i jednostavnog slučajnog uzorka. Također će se definirani procjenitelj te iskazati centralni granični teorem i zakon velikih brojeva [22].

**Definicija 1:** Neka je  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  vjerojatnosni prostor pridružen slučajnom pokusu. Funkciju  $(X_1, \dots, X_n)$  koja svakom ishodu pokusa pridružuje uređenu  $(n)$ -torku realnih brojeva  $(x_1, \dots, x_n)$  zovemo  $(n)$ -dimenzionalan slučajni vektor ako vrijedi:

$$\{X_1 \leq x_1\} \cap \dots \cap \{X_n \leq x_n\} \in \mathcal{F} \quad (21)$$

za svaki  $(x_1 \in R, \dots, x_n \in R)$ .

**Definicija 2:** Neka je  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  vjerojatnosni prostor pridružen slučajnom pokusu i  $(X_1, \dots, X_n)$  slučajni vektor. Funkciju  $F: R^n \rightarrow [0,1]$ , definiranu kao:

$$F(x_1, \dots, x_n) = P\{X_1 \leq x_1, \dots, X_n \leq x_n\} \quad (22)$$

zovemo funkcija distribucije slučajnog vektora  $(X_1, \dots, X_n)$ . Zadati statistički model znači opisati poznate karakteristike slučajnog vektora za koji se smatra da podaci čine jednu realizaciju. Kako je slučajni vektor određen svojom funkcijom distribucije, statističkim je modelom opisano ono što je unaprijed poznato o funkciji distribucije slučajnog vektora kojim se modeliraju podaci, odnosno statistički model jest familija funkcija distribucije koja se uzima u obzir za zaključivanje u danom problemu.

**Definicija 3:** Statistički model  $(P)$  je familija dozvoljenih funkcija distribucije slučajnog vektora za koji baza podataka čini jednu realizaciju.

**Definicija 4:** Statistički model zovemo model jednostavnog slučajnog uzorka iz funkcije distribucije  $(F)$  ako za slučajni vektor  $(X_1, \dots, X_n)$ , čiju realizaciju čine podaci  $(x_1, \dots, x_n)$ , vrijedi:

1. Slučajne varijable  $(X_1, \dots, X_n)$  su nezavisne,
2. Sve slučajne varijable  $(X_1, \dots, X_n)$  imaju istu funkciju distribucije  $(F)$ .

**Definicija 5:** Neka je  $P = \{F_\theta: \theta \in \Theta \subseteq R^k\}$  parametarski statistički model,  $(\theta)$   $k$ -dimenzionalan parametar, a  $(\Theta \subseteq R^k)$  prostor parametara tj. skup svih dozvoljenih vrijednosti nepoznatog parametra  $(\theta)$ . Neka je  $(X_1, \dots, X_n)$  slučajni vektor s distribucijom iz  $(P)$  i

$(t: R^n \rightarrow \Theta)$ . Slučajni vektor  $T = t(X_1, \dots, X_n)$  jest procjenitelj za  $(\theta)$ . Teorem Kolmogorovljev jak zakon velikih brojeva [19], [20]

Neka je  $(X_n, n \in N)$  niz nezavisnih jednako distribuiranih slučajnih varijabli na  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ . Tada niz  $(X_n, n \in N)$  konvergira (g.s) ako i samo ako  $E[X_1]$  postoji i u tom slučaju je:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} X_n = E[X_1] \quad (23)$$

Teorem (Levyjev centralni granični teorem) [19] Neka je  $(X_n, n \in N)$  niz nezavisnih jednako distribuiranih slučajnih varijabli u  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  s očekivanjem  $(\mu)$  i varijancom  $(\sigma^2 < \infty)$ . Tada:

$$\frac{X_n - \mu}{\sqrt{n}} \rightarrow N(0,1), \quad n \rightarrow \infty. \quad (24)$$

Kod modela jednostavnog slučajnog uzorka, promatrana veličina se smatra slučajnom varijablom s funkcijom distribucije  $(F)$ , a vrijednosti varijable izmjerene na jedinkama iz uzorka nezavisne su realizacije te slučajne varijable. U nastavku rada koristit će se termin "slučajni uzorak" za slučajni vektor  $(X_1, \dots, X_n)$  statističkog modela, a termin "uzorak" za njegovu realizaciju  $(x_1, \dots, x_n)$ , odnosno podatke. Kao primjer, za izračun prosječne visine odraslog stanovništva neke zemlje potrebno je mjeriti visinu svake osobe koja čini tu populaciju, zbrojiti te podatke i podijeliti dobiveni broj s ukupnim brojem izmjerenih osoba. Ovaj zadatak može biti vremenski zahtjevan. Umjesto toga, moguće je uzeti uzorak te populacije i izračunati prosječnu visinu. Iako je malo vjerojatno da će rezultat biti točna prosječna visina cijelog stanovništva, ova tehnika daje približan rezultat koji je generalno dobara aproksimacija stvarnog broja. U većini slučajeva, aproksimacija i stvarni prosjek cijelog stanovništva bit će različiti brojevi. Međutim, razlika između aproksimacije i stvarnog rezultata bit će manja s povećanjem veličine uzorka. Pretpostavimo da je visina osobe realizacija slučajne varijable iz neke distribucije. Stoga, kada se uzorkuje populacija nasumičnim odabirom osoba iz populacije i mjerenjem njihove visine kako bi se aproksimirala prosječna visina, svaka mjera bit će jedna realizacija. Visina populacije modelirat će se slučajnom varijablom  $(X)$ , a njene vrijednosti  $(x_i)$  predstavljat će visine ljudi koji čine tu populaciju, pri čemu će  $(i)$  biti oznaka za  $(i)$ -tog čovjeka te populacije. Koncept aproksimacije prosječne visine odrasle populacije iz nekog uzorka veličine  $(N)$  dana je sljedećom formulom:

$$\text{Aproksimacija(Prosjeck(X))} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (25)$$

To je u suštini ono što se naziva Monte Carlo aproksimacijom. Ukratko, Monte Carlo metodama se pomoću generiranog slučajnog uzorka dobivaju realizacije kojima se aproksimira očekivanje slučajne varijable.

### 2.3.3. Uzrokovanje po važnosti

Algoritam za procjena uzorkovanjem po važnosti [19], [20]:

1. Odaberi funkciju važnosti ( $g$ ) takvu da je  $\text{supp}(h \times f) \subset \text{supp}(g)$ .
2. Generiraj  $n$  nezavisnih i jednako distribuiranih realizacija ( $x_1, \dots, x_n$ ) s gustoćom ( $g$ ) i postavi  $y_i = \frac{h(x_i)f(x_i)}{g(x_i)}$  za ( $i = 1, \dots, n$ ).
3. Procijeni ( $l$ ) s ( $\hat{l} = \bar{y}$ ) i odredi aproksimaciju ( $1 - \alpha$ ) pouzdanog intervala:

$$\left( \bar{y} - z_{1-\alpha/2} \frac{\sqrt{n}}{S}, \bar{y} + z_{1-\alpha/2} \frac{\sqrt{n}}{S} \right) \quad (26)$$

gdje je ( $S$ ) uzorkovačka standardna devijacija od ( $y_1, \dots, y_n$ ), a ( $z_{1-\alpha/2}$ ) je ( $1 - \alpha$ )-kvantil standardne normalne distribucije  $N(0,1)$ .

Uzorkovanje po važnosti je jedna od ključnih tehnika za smanjenje varijance. Nazvana je po funkcijama važnosti na kojima se temelji. Ova metoda predstavlja alternativu Monte Carlo integraciji. Posebno je korisna za procjenu vjerojatnosti rijetkih događaja i koristi se za smanjenje varijance procjene Monte Carlo integrala:

$$I = \int h(x)f(x)dx = E_f[(h(X))] \quad (27)$$

$h$  predstavlja realnu funkciju, a  $f$  funkciju gustoće slučajne varijable  $X$ .

Neka je ( $g$ ) strogo pozitivna funkcija gustoće na  $R$ , i  $h \times f \neq 0$ . Tada možemo zapisati kao:

$$E(h(X)) = \int_R h(x) \frac{f(x)}{g(x)} g(x) dx = E \left( h(X) \frac{f(X)}{g(X)} \right) \quad (28)$$

gdje je ( $\chi$ ) nosač od ( $h \times f$ ). Procjenitelj za  $E_g \left[ h(X) \frac{f(x)}{g(x)} \right]$  je dan s:

$$\hat{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h(X_i) \frac{f(X_i)}{g(X_i)} \quad (29)$$

gdje su ( $X_1, \dots, X_n$ ) nezavisne i jednako distribuirane s gustoćom ( $g$ ). Procjenitelj ( $\hat{l}$ ) naziva se procjeniteljem uzorkovanjem po važnosti i konvergira prema  $E_f[f(h(X))]$  iz istog razloga

kao i regularni Monte Carlo procjenitelj ( $\hat{\mu}_n$ ), po zakonu velikih brojeva, dokle god je  $\text{supp}(h \cdot f) \subseteq \text{supp}(g)$ .

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h(X_i) \frac{f(X_i)}{g(X_i)} \rightarrow E_f(h(X)), \quad n \rightarrow \infty. \quad (30)$$

Gustoća ( $g$ ) naziva se funkcija važnosti, a  $\frac{f(x_i)}{g(x_i)}$  omjer uzorkovanja ili težina uzorkovanja.

Označimo s  $Y_i = \frac{h(x_i)}{f(x_i)g(x_i)}$ , varijanca procjenitelja dana je s:

$$\text{Var}\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i\right) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \text{Var}(Y_i) = \frac{\text{Var}(Y_1)}{n}. \quad (31)$$

Ideja je da ta varijanca bude što manja, a to se postiže odabirom funkcije važnosti ( $g$ ) tako da ( $Y_1$ ) bude bliže konstanti, odnosno odabirom funkcije ( $g$ ) koja je "blizu" ( $f$ ).

Teorem izbora funkcije važnosti ( $g$ ) ([21]) koji minimizira varijancu procjenitelja ( $\hat{l}$ ) je

$$g^* = \frac{|h(x)|f(x)}{\int |h(x)|f(x) dx}. \quad (32)$$

Dokaz. Neka je ( $w = \frac{h \cdot f}{g}$ ), tada vrijedi:

$$\begin{aligned} E_g(w^2) - E_g(w)^2 &= \int w^2(x)g(x) dx - \left(\int w(x)g(x) dx\right)^2 = \\ &= \int \frac{h^2(x)f^2(x)}{g^2(x)} g(x) dx - \left(\int \frac{h(x)f(x)}{g(x)} g(x) dx\right)^2 \\ &= \int \frac{h^2(x)f^2(x)}{g^2(x)} g(x) dx - \left(\int h(x)f(x) dx\right)^2. \end{aligned} \quad (33)$$

Drugi integral u izrazu ne ovisi o funkciji ( $g$ ), što znači da se samo prvi integral treba minimizirati. Prema Jensenovoj nejednakosti, budući da je kvadratna funkcija konveksna, vrijedi:

$$E_g(w^2) \geq (E_g(|w|))^2 = \left(\int h(x)f(x) dx\right)^2. \quad (34)$$

što predstavlja donju granicu za  $E_g(W^2)$ . Tvrdnja je dokazana jer je  $E_g^*(W^2)$  jednaka toj donjoj granici, odnosno:

$$\begin{aligned} E_{g^*}(w^2) &= \int \frac{h^2(x)f^2(x)}{g^*(x)^2} g^*(x) dx = \int \frac{h^2(x)f^2(x)}{g^*(x)} dx \\ &= \int \frac{h^2(x)f^2(x)}{|h(x)|f(x)} dx \int |h(x)|f(x) dx = \int |h(x)|f(x) dx \int |h(x)|f(x) dx \end{aligned} \quad (35)$$

$$= \left( \int |h(x)|f(x) dx \right)^2.$$

Prethodni teorem ima teorijskog smisla, no u praksi, procjena optimalne funkcije važnosti  $g^*$  obično nije moguća. Dovoljno je pronaći funkciju  $g$  s težim repovima od funkcije  $f$  koja je slična  $|h|f$ .

#### 2.3.4. Generiranje nasumičnih brojeva iz uniformne i nezavisne distribucije brojeva

Generiranje nezavisnih slučajnih uzoraka iz uniformne distribucije  $U(0,1)$  je ključno za korištenje Monte Carlo metode. Tradicionalno su tablice slučajnih brojeva bile izvor slučajnosti, ali su danas te tablice zamijenjene generatorima slučajnih brojeva koji se temelje na računalima. Generiranje slučajnih brojeva podrazumijeva stvaranje niza brojeva iz određene distribucije, a ti brojevi ne mogu biti unaprijed predvidljivi. Različite potrebe za slučajnošću rezultirale su različitim metodama generiranja slučajnih podataka. Kvalitetan generator obuhvaća sve bitne statističke karakteristike stvarno slučajnog niza. Obično se generiraju realizacije nizova nezavisnih uniformnih  $U(0,1)$  slučajnih varijabli.

Navedene definicije uzete su iz [22].

**Definicija 6:** Familija ( $\mathcal{F}$ ) podskupova od  $(\Omega)$  je  $(\sigma)$ -algebra skupova na  $(\Omega)$  ako je:

$$\phi \in \mathcal{F} \quad (36)$$

$$A \in \mathcal{F} \Rightarrow A^c \in \mathcal{F} \quad (37)$$

$$(A_i \in \mathcal{F})(\forall i \in N) \Rightarrow \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i \in \mathcal{F} \quad (38)$$

**Definicija 7;** Neka je  $(\Omega)$  neprazan skup i  $(\mathcal{F})$   $(\sigma)$ -algebra na  $(\Omega)$ . Funkcija  $(P: \mathcal{F} \rightarrow R)$  je vjerojatnost ako vrijedi:

$$(P(A) \geq 0, \forall A \in \mathcal{F}) \quad (39)$$

$$P(\Omega) = 1 \quad (40)$$

$$A_i \in \mathcal{F} \text{ za } i \in N \text{ i } A_i \cap A_j = \phi \text{ za } i \neq j \Rightarrow P\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} P(A_i) \quad (41)$$

**Definicija 8:** Uređena trojka  $((\Omega, \mathcal{F}, P))$ , gdje je  $(\mathcal{F})$   $\sigma$ -algebra na nepraznom skupu  $(\Omega)$ , a  $(P)$  vjerojatnost na  $(\mathcal{F})$ , zove se vjerojatnosni prostor. Elementi od  $(\mathcal{F})$  nazivaju se događaji, a za  $(A \in \mathcal{F})$  broj  $(P(A))$  zove se vjerojatnost događaja  $(A)$ .

**Definicija 9:** Stavimo  $(S = \{(a, b): a, b \in R, a < b\} \subseteq \mathcal{P}(R))$ .  $(S)$  je familija (omeđenih) otvorenih intervala u  $(R)$ . Najmanju  $(\sigma)$ -algebru na  $(R)$  koja sadrži familiju  $(S)$  označavamo s  $(\mathcal{B})$  i nazivamo Borelova  $(\sigma)$ -algebra, a njezine elemente Borelovi skupovi.

**Definicija 10:** Neka je  $((\Omega, \mathcal{F}, P))$  vjerojatnosni prostor. Funkcija  $(X: \Omega \rightarrow R)$  je slučajna varijabla na  $(\Omega)$  ako je  $(X^{-1}(B) \in \mathcal{F}), (\forall B \in \mathcal{B})$ .

**Definicija 11:** Funkcija distribucije slučajne varijable  $(X)$  je funkcija  $(F_X: R \rightarrow [0,1])$  definirana sa

$$[F_X(x) = P(X \leq x), \quad x \in R]. \quad (42)$$

**Definicija 12:** Funkcija  $(g: R \rightarrow R)$  je Borelova funkcija ako je  $(g^{-1}(B) \in \mathcal{B}), (\forall B \in \mathcal{B})$ .

**Definicija 13:** Neka je  $(X)$  slučajna varijabla na vjerojatnosnom prostoru  $((\Omega, \mathcal{F}, P))$  i neka je  $(f)$  njena funkcija distribucije. Kažemo da je  $(X)$  neprekidna slučajna varijabla ako postoji nenegativna Borelova funkcija  $(f: R \rightarrow R)$  takva da vrijedi

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (43)$$

Funkciju  $(f)$  zovemo funkcija gustoće od  $(X)$  i često je označujemo s  $(f_X)$ .

**Definicija 14:** Neprekidna slučajna varijabla ima uniformnu distribuciju (ili razdiobu) na segmentu  $([a, b])$

ako je njena funkcija gustoće  $(f)$  dana sa

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & x \in [a, b] \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (44)$$

Uniformna distribucija na segmentu  $([a, b])$  označava se sa  $(U(a, b))$ .

#### 2.3.4.1. Bernoullijeva slučajna varijabla

Neka  $(U)$  ima uniformnu distribuciju  $(U(0,1))$ . Definiramo Bernoullijevu slučajnu varijablu s parametrom  $(p), (p \in (0,1))$ , u oznaci  $(\text{Ber}(p))$ , sa

$$X = \begin{cases} 1, & U < p \\ 0, & U \geq p \end{cases} \quad (45)$$

te tada vrijedi:

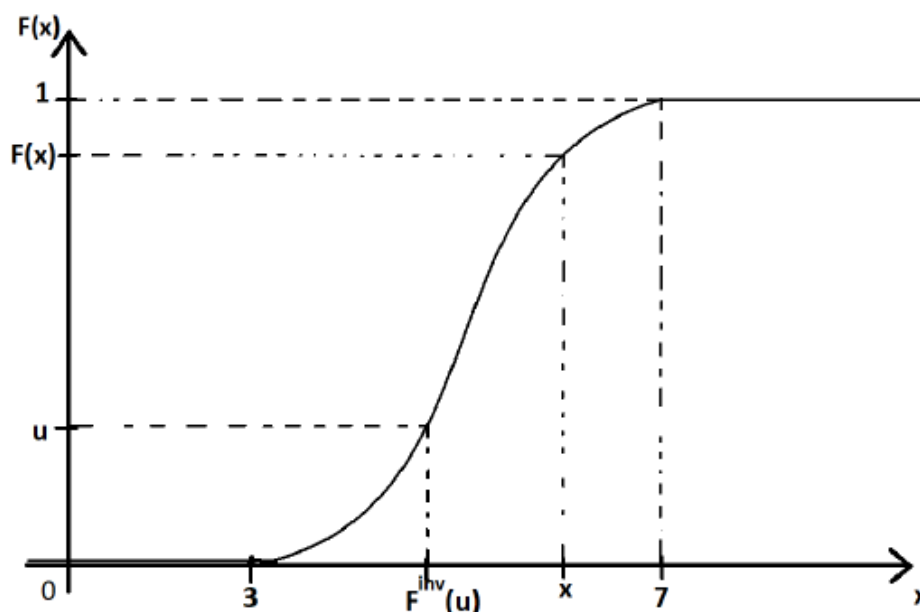
$$[P(X = 1) = P(U < p) = p,] \quad (46)$$

$$[P(X = 0) = P(U \geq p) = 1 - p.] \quad (47)$$

Analogno se može napraviti za  $n$  vrijednosti  $(v_1, v_2, \dots, v_n)$  i  $(n)$  parametara  $(p_1, p_2, \dots, p_n)$ . [22].

## 2.3.4.2. Nепrekidna slučajna varijabla

Neka je zadana funkcija distribucije ( $F$ ) nепrekidne slučajne varijable. Cilj nam je konstruirati slučajnu varijablu s istom distribucijom. To možemo ostvariti u slučaju kada ( $F$ ) strogo raste od 0 prema 1. Tada ( $F$ ) ima inverznu funkciju ( $F_{inv}$ ). Slika 4 prikazuje primjer: ( $F$ ) je strogo rastuća na segmentu  $[3, 7]$ ; postoji  $inverz(F_{inv}: [0,1] \rightarrow [3,7])$  [22].



Slika 4. Graf funkcije distribucije nепrekidne slučajne varijable [22]

Primijetimo da se  $u$  odnosi prema  $F_{inv}(u)$  kao što se  $F(x)$  odnosi prema  $x$ . Vidimo da je  $u \leq F(x)$  ekvivalentno sa  $F_{inv}(u) \leq x$  [22]. Ako umjesto realnog broja  $u$  promatramo slučajnu varijablu ( $U$ ) s razdiobom  $U(0,1)$ , dobivamo sljedeće [22]:

$$\{U \leq F(x)\} = \{F_{inv}(U) \leq x\} \quad (48)$$

Kako za slučajnu varijablu ( $U$ ) vrijedi  $P(U \leq b) = b$  za bilo koji ( $0 \leq b \leq 1$ ), supstitucijom ( $b = F(x)$ ) dobivamo

$$P(U \leq F(x)) = F(x) \quad (49)$$

Slijedi, iz (49)

$$P(F_{inv}(U) \leq x) = F(x) \quad (50)$$

tj.  $F$  je funkcija distribucije od  $F_{inv}(U)$ . Odredimo sada  $F_{inv}$ . Slika 4 prikazuje sljedeće:

$$F(x) = u \Rightarrow x = F_{inv}(u) \quad (51)$$

Dakle, riješimo li jednadžbu  $F(x) = u$ , za  $x$ , dobivamo izraz za  $F_{inv}(u)$ .

## 2.3.4.3. Eksponencijalna slučajna varijabla

Eksponencijalna razdioba s parametrom  $(\lambda) \in \langle 0, \infty \rangle$ , u oznaci  $(X \sim \text{Exp}(\lambda))$ , je definirana funkcijom gustoće [22]:

$$f_X(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (52)$$

Funkcija distribucije od  $\text{Exp}(\lambda)$  je oblika,

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_x(t) dt = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \int_{-\infty}^x \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \end{cases} \quad (53)$$

Ponavljamo isti postupak kao i za općenitu neprekidnu slučajnu varijablu, ali gledamo restrikciju funkcije distribucije na  $\langle 0, \infty \rangle$  jer na tom intervalu funkcija distribucije strogo raste i dana je kao

$$F_X(x) = 1 - e^{-\lambda x}. \quad (54)$$

Da bismo našli  $(F_{\text{inv}_X})$ , rješavamo jednadžbu  $(F_X(x) = u)$ :

$$\begin{aligned} F_X(x) = u &\Rightarrow 1 - e^{-\lambda x} = u \\ &\Rightarrow e^{-\lambda x} = 1 - u \\ &\Rightarrow -\lambda x = \ln(1 - u) \\ &\Rightarrow x = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - u) \end{aligned} \quad (55)$$

Slijedi  $(F_{\text{inv}_X}(u) = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - u))$ , i ako uvrstimo slučajnu varijablu  $(U)$  sa distribucijom  $(U(0,1))$ , tada slučajna varijabla  $(X)$  definirana kao

$$X = F_{\text{inv}_X}(U) = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - U) \quad (56)$$

ima eksponencijalnu  $(\text{Exp}(\lambda))$  distribuciju s parametrom  $(\lambda)$ . Prilikom rješavanja zadataka, umjesto  $(1 - U)$  može se koristiti samo  $(U)$  jer obje slučajne varijable imaju distribuciju  $(U(0,1))$ . To se često radi radi efikasnosti prilikom korištenja računala. Sada, umjesto  $(X)$ , imamo

$$Y = -\frac{1}{\lambda} \ln(U) \quad (57)$$

koja također ima  $\text{Exp}(\lambda)$  distribuciju.



## 2.4. Analiza odabranih nesreća

U ovom diplomskom radu korištena je programska aplikacija OpenFTA, koja sadrži modul za izvođenje Monte Carlo simulacija te grafičko sučelje za izradu stabla grešaka.

### 2.4.1. OpenFTA

OpenFTA je programska aplikacija za crtanje, analizu i ispisivanje stabala grešaka. Zadaci analitičara olakšani su mnogim mogućnostima i značajkama alata, koje uključuju:

- grafičko sučelje s opcijom point-and-click koje omogućuje brzo crtanje stabala grešaka,
- podršku za cijeli set simbola stabala grešaka u skladu s NUREG-0492,
- bazu podataka za pohranu definicija primarnih događaja,
- kvalitativnu analizu stabala grešaka za određivanje minimalnih reznih skupova,
- kvantitativnu analizu stabala grešaka (uključujući mogućnost Monte Carlo simulacije).

### 2.4.2. P-model i $\lambda$ -model

OpenFTA podržava definiciju P-modela ili  $\lambda$ -modela vjerojatnosti da se primarni događaj dogodi.

P-model koristi se za izračun vjerojatnosti da će se događaj dogoditi kada vrijeme do kvara (događanja) nije poznato ili nepredvidljivo.

$\lambda$ -model koristi se za izračun vjerojatnosti da će se primarni događaj dogoditi unutar određenog vremenskog perioda.  $\lambda$ -model je prikladna za događaje unutar sustava koji neprekidno rade i imaju poznatu vjerojatnost kvara tijekom jedinice vremena.

Za svaki događaj definiran u smislu  $\lambda$ -modela, vjerojatnost kvara dana je izrazom:

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (58)$$

gdje je  $(t)$  vrijeme do događaja i  $(\lambda)$  je konstanta. Događaji definirani u smislu P-modela ne moraju se modificirati za vrijeme. Vjerojatnost reznog skupa je umnožak vjerojatnosti događaja unutar njega, kako je određeno P ili  $\lambda$  modelima.

## 2.5. Baza podataka osnovnih događaja

Kod OR vrata, kombinirana vjerojatnost dva događaja  $(A)$  i  $(B)$  može se izračunati prema formuli:

$$P(A \text{ ili } B) = P(A) + P(B) - P(A) \times P(B) \quad (59)$$

Ova formula uzima u obzir mogućnost da se oba događaja mogu dogoditi istovremeno, čime se izbjegava dvostruko brojanje. Proširena formula za više događaja Ako postoji više od dva

događaja (npr.,  $P(A), P(B), P(C), \dots$ ), kombinirana vjerojatnost može se izračunati pomoću generalizirane formule:

$$P(A \text{ ili } B \text{ ili } C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A) \cdot P(B) - P(A) \cdot P(C) - P(B) \cdot P(C) + P(A) \cdot P(B) \cdot P(C). \quad (60)$$

Ova formula se može proširiti za još više događaja, no postaje složenija s dodavanjem svakog novog događaja. Primjer za OR vrata s tri događaja. Ako imamo tri događaja s vjerojatnostima ( $P(A) = 0,05$ ), ( $P(B) = 0,10$ ) i ( $P(C) = 0,02$ ), tada je kombinirana vjerojatnost:

$$P(A \text{ ili } B \text{ ili } C) = 0,05 + 0,10 + 0,02 - (0,05 \times 0,10) - (0,05 \times 0,02) - (0,10 \times 0,02) + (0,05 \times 0,10 \times 0,02). \quad (61)$$

### 2.5.1. Izrada baze podataka osnovnih događaja povezanim za pomorske nesreće

Za procjenu uzroka sudara brodova korišten je Open FTA program, koji omogućuje kvalitativnu i kvantitativnu analizu stabla greške. Kvalitativna analiza koristi se za identifikaciju uzroka nesreće i njihove vjerojatnosti, dok kvantitativna analiza uključuje simulacije za dobivanje minimalnih skupova kombinacija događaja koji mogu dovesti do nesreće.

Osnovni uzroci su grupirani prema uzrocima nesreća, a vjerojatnosti svake osnovne situacije su procijenjene pomoću:

$$UDUN = \frac{1}{RC_1} + \frac{1}{RC_2} + \dots + \frac{1}{RC_n} \quad (62)$$

- UDUN predstavlja "ukupni doprinos uzroka nesreća, što je vrijednost koja se dobiva kao suma recipročnih vrijednosti osnovnih uzroka nesreće.

$RC_1, RC_2, \dots, RC_n$  predstavljaju različite osnovne uzroke nesreće (engl. Root Causes).

Formula nam govori da se ukupni doprinos uzroka dobiva kao suma recipročnih vrijednosti pojedinih osnovnih uzroka koji doprinose nastanku nesreće.

Za konačnu procjenu koristi se formula:

$$VUN = \frac{UDUN}{BB \times UV} \quad (63)$$

gdje je VUN vjerojatnost uzroka nesreće, BB broj brodova, a UV ukupno vrijeme.

Baza podataka osnovnih događaja, prikazana na Tablica 1 predstavljena u ovom poglavlju obuhvaća ključne osnovne događaje identificirane tijekom analize rizika. Svaki događaj označen je jedinstvenom oznakom (npr. BE1, BE2) te opisuje specifične faktore ili situacije

koje mogu doprinijeti nastanku glavnog događaja. Tablica pruža detaljne informacije o vjerojatnosti svakog osnovnog događaja i njegovom ukupnom doprinosu glavnom događaju.

Tablica 1 uključuje sljedeće kategorije:

1. Naziv događaja – Kratak opis događaja koji može dovesti do incidenta.
2. Označavanje – Jedinствена oznaka za svaki osnovni događaj.
3. Opis – Detaljnije objašnjenje svakog osnovnog događaja, uključujući tehničke ili proceduralne aspekte.
4. Vjerojatnost događaja – Procijenjena vjerojatnost pojave svakog osnovnog događaja, izražena u znanstvenom zapisu.
5. Ukupni doprinos – Ukupni doprinos osnovnog događaja ukupnom riziku incidenta.

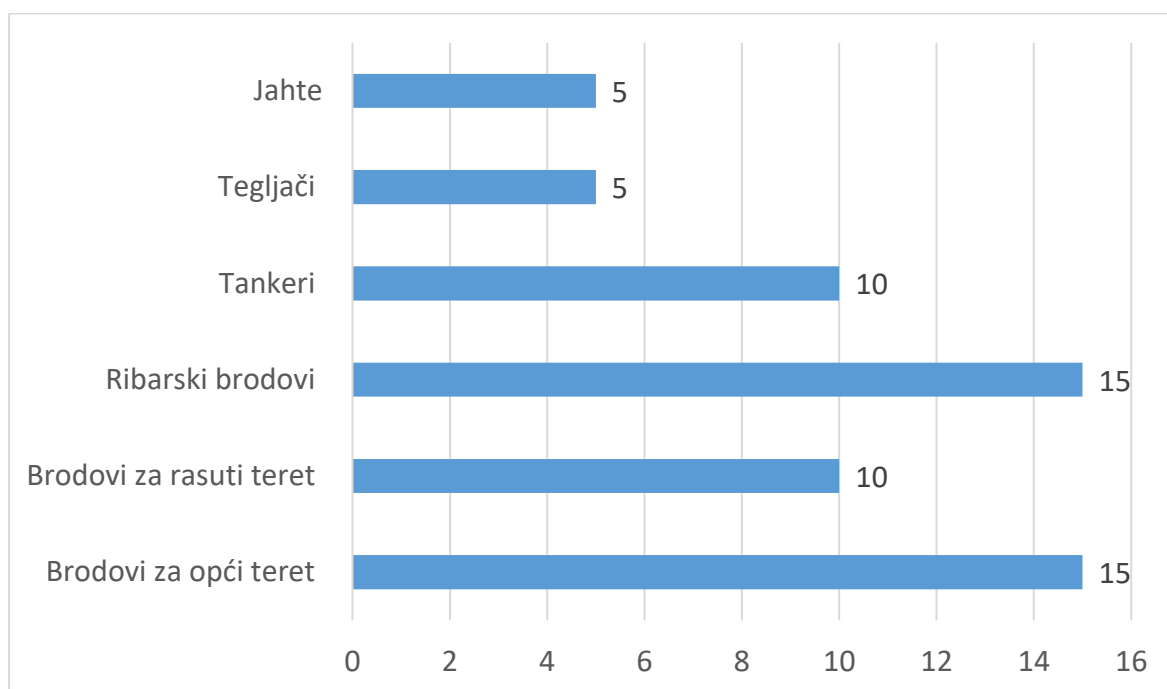
Tablica 1. Baza podataka osnovnih događaja u stablu grešaka

<b>NAZIV DOGAĐAJ A</b>	<b>Oznaka</b>	<b>OPIS</b>	<b>VJEROJATNOST DOGAĐAJA/P</b>	<b>UKUPNI DOPRINOS/D</b>
Osnovni događaj-1	BE1	Umor / Fatigue	9,59E-03	8,06E-01
Osnovni događaj-2	BE2	Zloupotreba alkohola / Alcohol abuse	1,08E-03	2,33E-01
Osnovni događaj-3	BE3	Nedonošenje odluka / Lack of decision making	7,00E-04	11,00E-03
Osnovni događaj-4	BE4	Neznanje / Lack of knowledge	5,535E-03	77,30E-03
Osnovni događaj-5	BE5	Manjak iskustva s opremom / Lack of familiarization	2,135E-03	22,00E-03
Osnovni događaj-6	BE6	Manjak obuke / Nedostatak obuke / Lack of training	1,718E-03	22,00E-03
Osnovni događaj-7	BE7	Kriva uporaba navigacijskih alata / Misuse of navigational tools	1,51E-02	1,38E-01
Osnovni događaj-8	BE8	Kršenje COLREG-a / Violation of COLREG	2,61E-02	3,79E-01
Osnovni događaj-9	BE9	Loša komunikacija / Bad communication	9,07E-03	1,62E-01
Osnovni događaj-10	BE10	Manjak upravljanja resursima na mostu / Lack of bridge resource management	5,00E-03	6,63E-02

Osnovni događaj-11	BE11	Neuspjeh u manevriranju / Maneuvering failure	2,02E-03	1,13E-01
Osnovni događaj-12	BE12	Neprikladno planiranje putovanja / Inappropriate voyage planning	1,05E-03	5,71E-01
Osnovni događaj-13	BE13	Kvar glavnog motora / Main engine failure	3,49E-03	8,79E-01
Osnovni događaj-14	BE14	Kvar tegljača / Tugboat failure	1,23E-03	1,66E-02
Osnovni događaj-15	BE15	Kvar navigacijskih pomagala / Navigation aids failure	1,00 E-03	16,60E-03
Osnovni događaj-16	BE16	Ekstremni vremenski uvjeti /uvjeti na moru / Extreme weather / sea conditions	4,91E-03	1,16E-01
Osnovni događaj-17	BE17	Gust promet / Heavy traffic	7,00E-03	11,00E-03
Osnovni događaj-18	BE18	Kvar upravljačkog mehanizma / Steering gear failure	3,54E-03	3,33E-01
Osnovni događaj-19	BE19	Zdravstveni problem / Medical problem	4,64E-05	20,00E-03
Osnovni događaj-20	BE20	Prevelika samouvjerenost / Overconfidence	1,39E-04	70,00E-03
Osnovni događaj-21	BE21	Visoka razina stresa / High stress level	1,39E-04	70,00E-03
Osnovni događaj-22	BE22	Mentalno/kognitivno opterećenje / Mental/cognitive overload	1,39E-04	70,00E-03
Osnovni događaj-23	BE23	Nedostatak svijesti o situaciji / Lack of situational awareness	11,20E-03	5,76E-03
Osnovni događaj-24	BE24	Ometanje/nepažnja / Distraction/inattention	1,81E-03	9,30E-01
Osnovni događaj-25	BE25	Loša procjena / Poor judgment	2,69E-03	1,38E-01
Osnovni događaj-26	BE26	Pogrešna pretpostavka / Incorrect assumption	2,18E-03	1,12E-01

Uz analizu osnovnih događaja, također je uzeta u obzir distribucija brodova u različitim kategorijama, budući da različiti tipovi brodova mogu imati različite razine rizika i specifične čimbenike rizika. Slika 5 prikazuje raspodjelu vrsta brodova, osigurava reprezentativnost uzorka i omogućuje analizu rizika specifičnih za svaku kategoriju broda. Na primjer, ribarski brodovi i jahte mogu biti izloženi specifičnim rizicima zbog manjka profesionalnog upravljanja

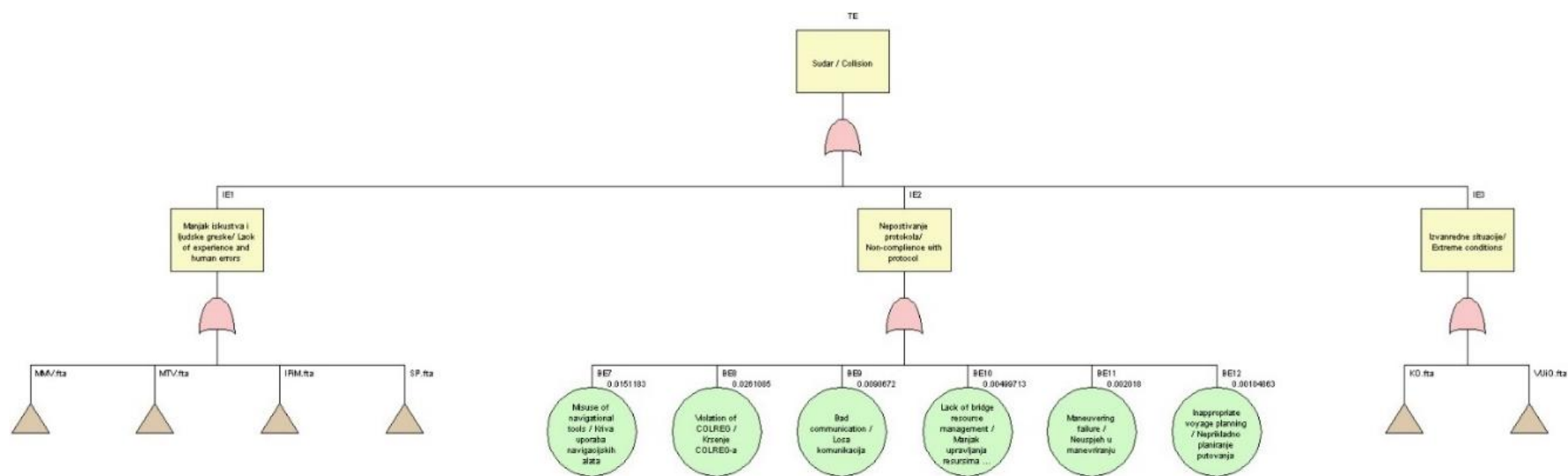
ili navigacijskih pomagala, dok su tankeri i tegljači često povezani s tehničkim problemima poput kvarova opreme.



Slika 5. Vrste brodova iz skupa izvještaja pomorskih nesreće

### **3. REZULTATI I RASPRAVA**

Slika 6 prikazuje stablo grešaka izrađeno za analizu uzroka pomorskih nesreća. Glavni događaj ("Top Event") označen je kao "Sudar", a predstavlja potencijalni sudar dvaju brodova kao krajnji neželjeni ishod. Stablo grešaka sadrži nekoliko razina posrednih događaja i osnovnih događaja koji su povezani logičkim vezama, u ovom slučaju OR vezama, što znači da svaki osnovni događaj može dovesti do posrednog događaja, a posljedično i do glavnog događaja ako je ispunjen barem jedan uvjet na toj razini.



Slika 6. Stablo grešaka za pomorsku nesreću sudar dvaju brodova

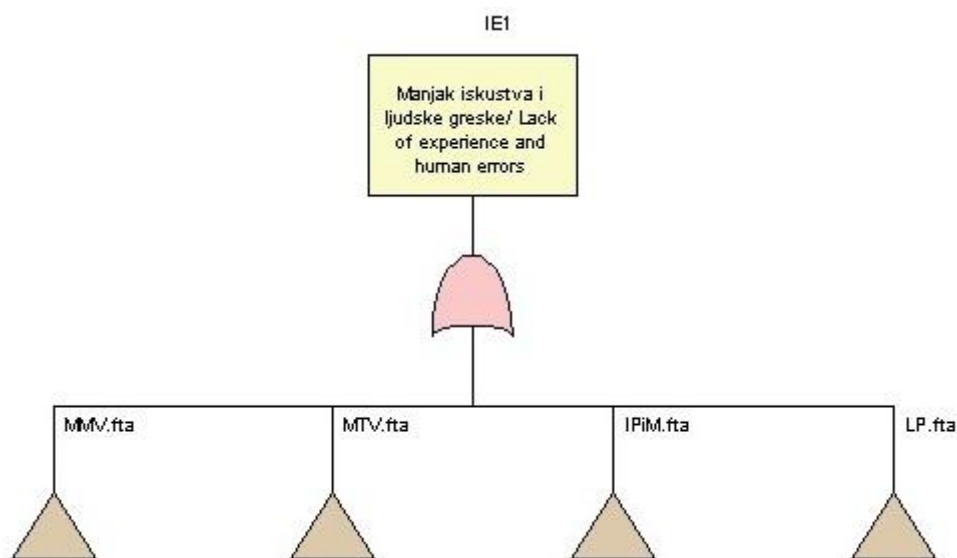
### 3.1. Kvantitativna analiza

#### 3.1.1. Kvantitativna analiza za "Manjak iskustva i ljudske greške" IE1

Na Slici 7 je prikazano podstablo s oznakom IE1 pod nazivom „Manjak iskustva i ljudske greške“ sastoji se od 4 manja stabla manjak mekih vještina MMV, manjak tvrdih vještina MTV, individualni problemi i mane IPiM i slaba percepcija LP.

Koristeći OR logiku, ukupna vjerojatnost IE1 može se izraziti formulom:

$$P(IE1) = 1 - [(1 - P(MMV)) \times (1 - P(MTV)) \times (1 - P(IPiM)) \times (1 - P(LP))] = 0,03848. \quad (64)$$



Slika 7. Podstablo Manjak iskustva i ljudske greške

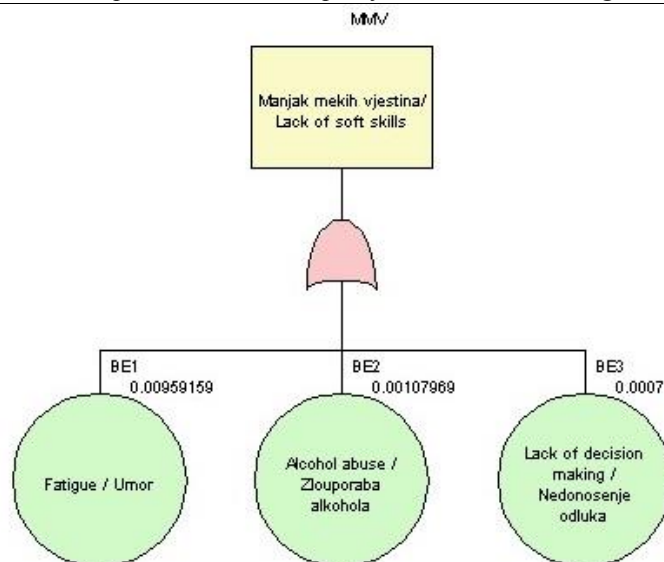
Slika 8 prikazuje MMV, manjak mekih vještina i sastoji je od sljedećih osnovnih događaja:

- BE1: Umor
- BE2: Zloupotreba alkohola
- BE3: Nedonošenje odluka

Formula za MMV:

$$P(MMV) = 1 - [(1 - P(BE1)) \times (1 - P(BE2)) \times (1 - P(BE3))] = 0,011353. \quad (65)$$





Slika 8. Podstablo manjak mekih vještina

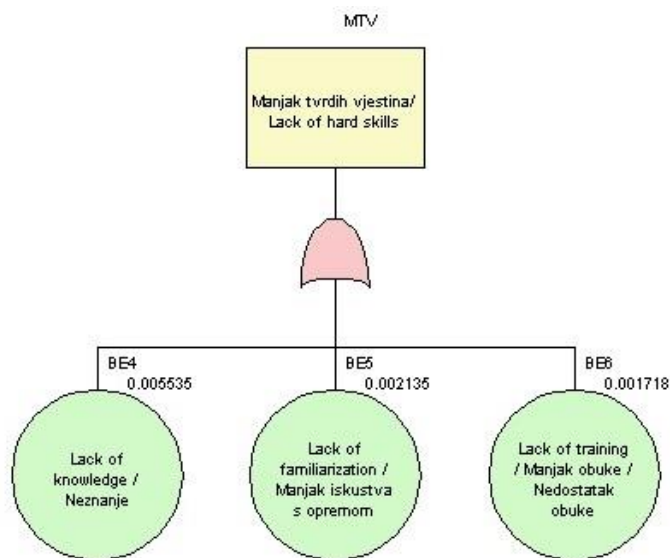
Slika 9 prikazuje MTV, manjak tvrdih vještina i sastoji se od sljedećih osnovnih događaja:

- BE4: Neznanje
- BE5: Manjak iskustva s opremom
- BE6: Nedostatak obuke

Formula za MTV:

$$P(MTV) = 1 - [(1 - P(BE4)) \times (1 - P(BE5)) \times (1 - P(BE6))] \quad (66)$$

$$= 0,009363$$



Slika 9. Manjak tvrdih vještina

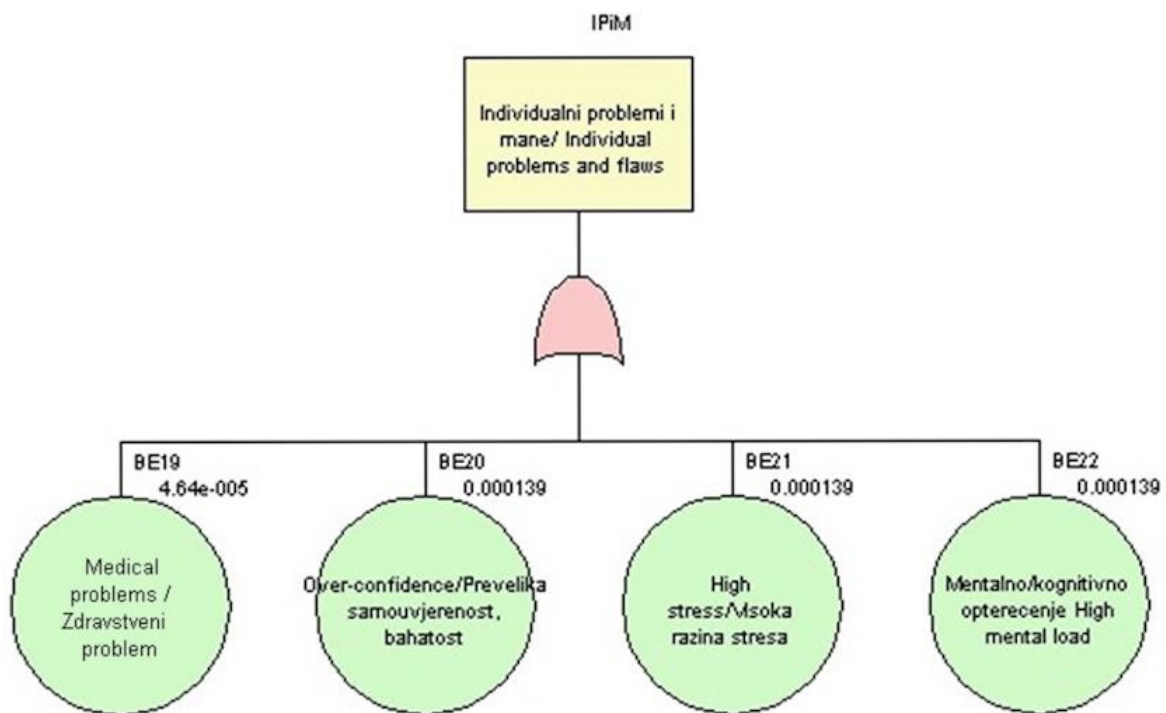
Slika 10 prikazuje IPiM, individualni problemi i mane i sastoji se od sljedećih osnovnih događaja:

Osnovni događaji (BE):

- BE19: Medicinski problemi
- BE20: Prevelika samouvjerenost
- BE21: Visoka razina stresa
- BE22: Mentalno/kognitivno opterećenje

Formula za IPiM:

$$P(IPiM) = 1 - [(1 - P(BE19)) \times (1 - P(BE20)) \times (1 - P(BE21)) \times (1 - P(BE22))] = 0,000463. \quad (67)$$



Slika 10. Individualni problemi i mane

Slika 11 prikazuje SP, slaba percepcija sastoji se od sljedećih međudogađaja i osnovnih događaja SP se sastoji od dva podstabla: IE10 i IE11. Ukupna vjerojatnost za IE9 je:

$$P(SP) = 1 - [(1 - P(IE10)) \times (1 - P(IE11))] = 0,017791. \quad (68)$$

SS: Situacijska svijest

Osnovni događaji (BE):

- BE23: Nedostatak svijesti o situaciji
- BE24: Ometanje/nepažnja

Formula za DLO:

$$P(IE10) = 1 - [(1 - P(BE23)) \times (1 - P(BE24))] = 0,01299 \quad (69)$$

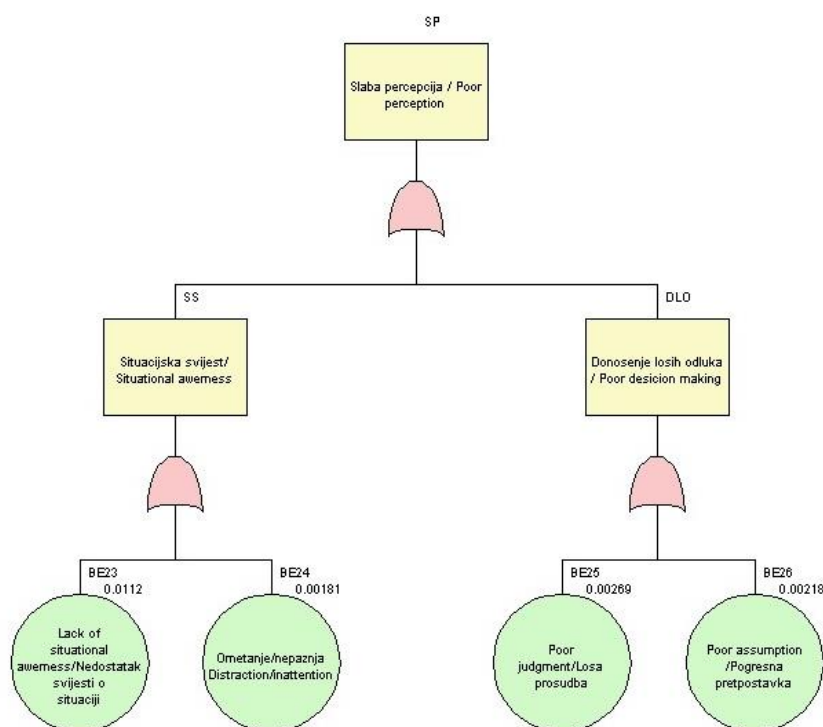
DLO: Donošenje loše odluke

Osnovni događaji (BE):

- BE25: Loša procjena
- BE26: Pogrešna pretpostavka

Formula za DLO:

$$P(DLO) = 1 - [(1 - P(BE25)) \times (1 - P(BE26))] = 0,004864 \quad (70)$$



Slika 11. Podstablo slaba percepcija

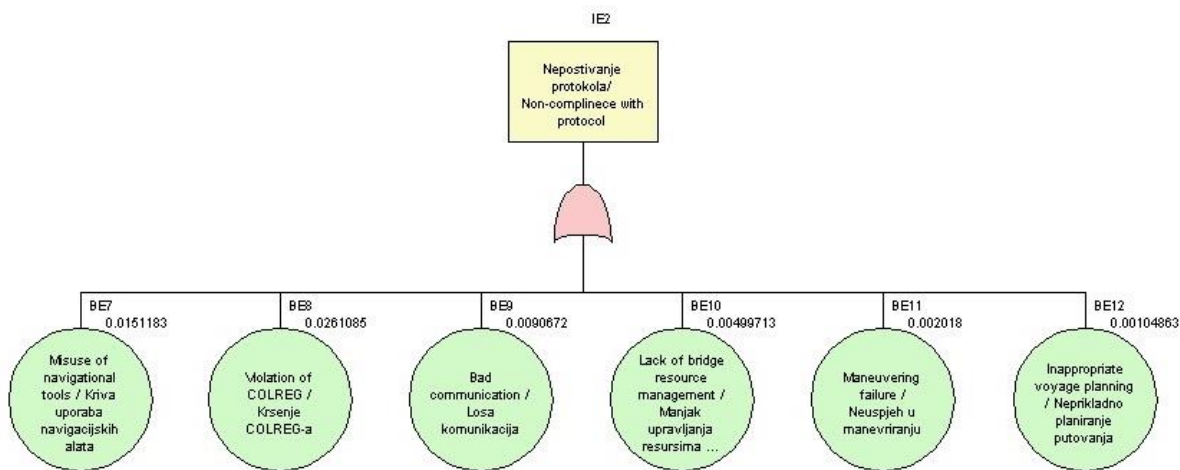
### 3.1.2. Kvantitativna analiza za "Nepoštivanje protokola" IE2

Na Slici 12 je prikazano podstablo sa oznakom IE2 i nazivom nepoštivanje protokola sastoji se od šest osnovnih događaja (BE): BE7, BE8, BE9, BE10, BE11 i BE12. Koristeći OR logiku, ukupna vjerojatnost za IE2 može se izračunati sljedećom formulom:

$$P(IE2) = 1 - [(1 - P(BE7)) \times (1 - P(BE8)) \times (1 - P(BE9)) \times (1 - P(BE10)) \times (1 - P(BE11)) \times (1 - P(BE12))] = 0,057177. \quad (71)$$

Osnovni događaji (BE) unutar IE2:

- BE7: Kriva uporaba navigacijskih alata,
- BE8: Kršenje COLREG-a,
- BE9: Loša komunikacija,
- BE10: Manjak upravljanja resursima na mostu,
- BE11: Neuspjeh u manevriranju,
- BE12: Neprikladno planiranje putovanja.

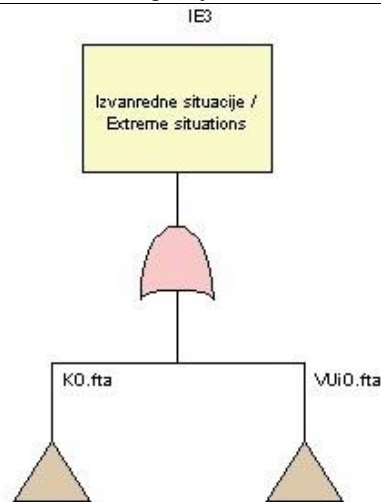


Slika 12. Podstablo nepoštivanje protokola

### 3.1.3. Kvantitativna analiza za "Izvanredne situacije" IE3

Na Slici 13 je prikazano podstablo s oznakom IE3 i nazivom izvanredne situacije i sadrži dva podstabla: KO i VUiO. Ukupna vjerojatnost IE3 može se izraziti formulom:

$$P(IE3) = 1 - [(1 - P(KO)) \times (1 - P(VUiO))] = 0,014773. \quad (72)$$



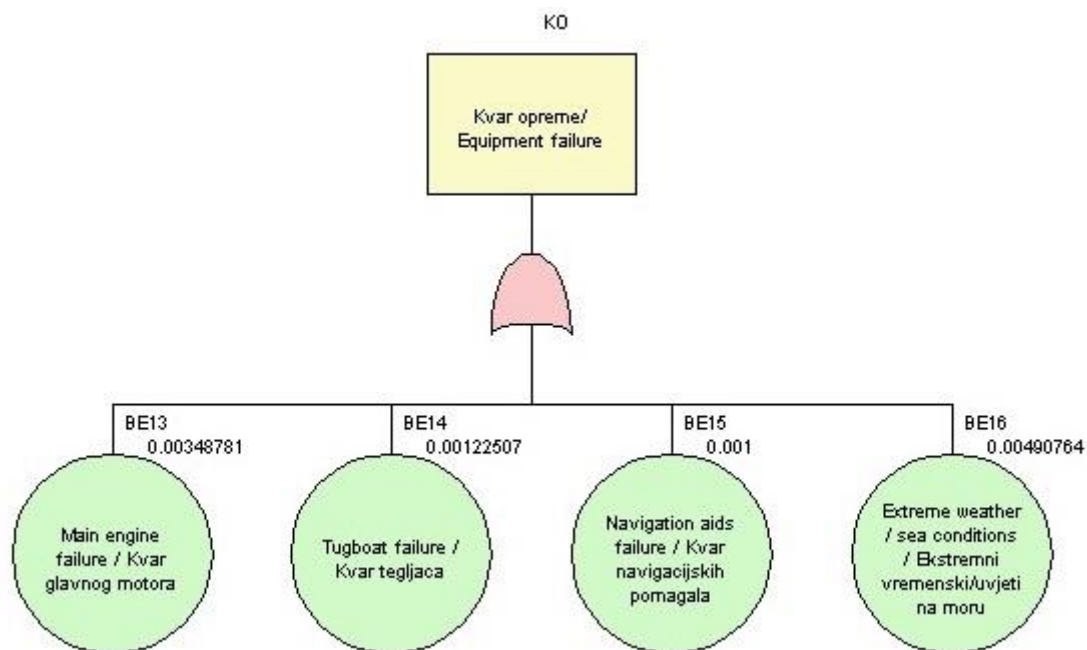
Slika 13. Podstablo izvandredne situacije

Slika 14 prikazuje KO, kvar opreme i sastoji je od sljedećih osnovnih događaja:

- BE13: Kvar glavnog motora / Main engine failure
- BE14: Kvar tegljača / Tugboat failure
- BE15: Kvar navigacijskih pomagala / Navigation aids failure
- BE16: Ekstremni vremenski/uvjeti na moru / Extreme weather / sea conditions

Formula za KO:

$$P(KO) = 1 - [(1 - P(BE13)) \times (1 - P(BE14)) \times (1 - P(BE15)) \times (1 - P(BE16))] = 0,010584. \quad (73)$$



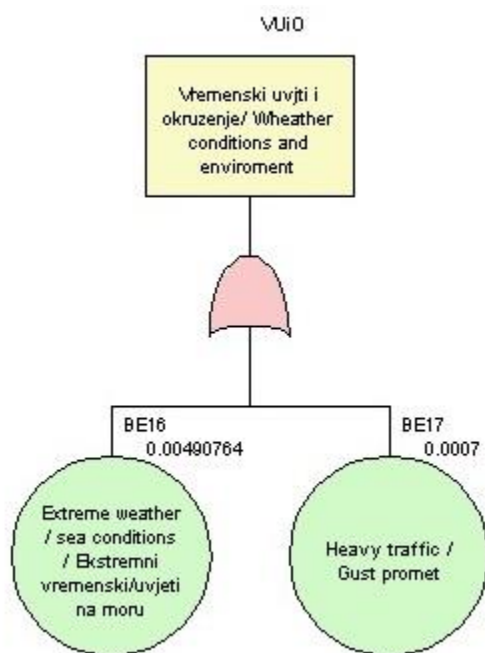
Slika 14. Podstablo kvar opreme

Slika 15 prikazuje VUiO, vremenski uvjeti i okruženje i sastoji se od sljedećih osnovnih događaja:

- BE17: Gust promet / Heavy traffic
- BE18: Kvar upravljačkog mehanizma / Steering gear failure

Formula za VUiO:

$$P(VUiO) = 1 - [(1 - P(BE17)) \times (1 - P(BE18))] = 0,004235. \quad (74)$$



Slika 15. Podstablo vremenski uvjeti i okruženje

### 3.1.4. Kvantitativna analiza za "Sudar" TE\_Sudar

TE\_Sudar: Sudar se sastoji od tri međudogađaja: IE1, IE2, i IE3. Ukupna vjerojatnost za TE\_Sudar može se izraziti formulom:

$$P(TE\_Sudar) = 1 - [(1 - P(IE1)) \times (1 - P(IE2)) \times (1 - P(IE3))] \quad (75)$$

IE1: Manjak iskustva i ljudske greške

IE1 sadrži četiri podstabla: MMV, MTV, IPiM i LP. Ukupna vjerojatnost za IE1 može se izraziti formulom:

$$P(IE1) = 1 - [(1 - P(MMV)) \times (1 - P(MTV)) \times (1 - P(IPiM)) \times (1 - P(LP))] = 0,03848. \quad (76)$$

IE2: Nepoštivanje protokola

IE2 se sastoji od osnovnih događaja koji su relevantni za nepoštivanje propisanih procedura ili protokola. Ukupna vjerojatnost za IE2 može se izraziti formulom:

$$P(IE2) = 1 - [(1 - P(BE7)) \times (1 - P(BE8)) \times \dots \times (1 - P(BE12))] \quad (77)$$

$$= 0,057177.$$

IE3: Izvanredne situacije

IE3 sadrži dva podstabla: IE6 i IE7. Ukupna vjerojatnost za IE3 može se izraziti formulom:

$$P(IE3) = 1 - [(1 - P(KO)) \times (1 - P(VUio))] = 0,014773. \quad (78)$$

Sada, povezivanjem svih izraza, imamo ukupnu vjerojatnost za TE\_Sudar:

$$P(TE\_Sudar) = 0,106849188. \quad (79)$$

### 3.2. Kvalitativna analiza

Tablica 2 sadrži 26 minimalnih reznih skupova (BE1 do BE26) sa različitim vjerojatnostima pojavljivanja. Događaji s najvišom vjerojatnošću su:

- BE8: 2,61 % (najveći doprinos sa 24,43 % od ukupne vjerojatnosti kvara sistema)
- BE7: 1,51 % (drugi po važnosti, s 14,15 % udjela u ukupnom riziku)
- BE23: 1,12 % (treći, s udjelom od 10,48 % u ukupnom riziku)

Najmanje vjerojatnosti događaja su za BE19, BE20, BE21, i BE22, sa vrlo malim vrijednostima koje čine neznatan doprinos ukupnom riziku. Ukupna vjerojatnost događaja sudara, izračunata na temelju minimalnih skupova presjeka prvog reda, iznosi 0,1068 (10,68 %). Ovo znači da postoji znatan rizik od sudara u jedinici vremena, što ukazuje na ranjivost sustava i potrebu za optimizacijom u ključnim dijelovima. "Važnost" svakog događaja izračunata je kao njegov relativni doprinos ukupnoj vjerojatnosti sudara. Najvažniji događaji su:

1. BE8 - Najveći doprinos (24,43 %), što znači da gotovo četvrtina ukupnog rizika dolazi od ovog događaja.
2. BE7 - Drugi najveći doprinos (14,15 %).
3. BE23 - Treći najveći doprinos (10,48 %).

Ovi događaji predstavljaju ključne točke sustava i prioritet su za dalju analizu i eventualne preventivne mjere. Događaji poput BE1, BE4, i BE9 također imaju značajne vrijednosti važnosti (između 5 % i 9 %) i trebalo bi ih također uključiti u proces za smanjenje rizika, iako nisu najkritičniji.

Tablica 2. Vjerojatnosti minimalnih reznih skupova

#	Osnovni događaj	Vjerojatnost
1	BE1	9,59159E-03
2	BE10	4,997128E-03
3	BE11	2,018E-03
4	BE12	1,048633E-03
5	BE13	3,487807E-03
6	BE14	1,22507E-03
7	BE15	1E-03
8	BE16	4,907643E-03
9	BE17	7E-01
10	BE18	3,537E-03
11	BE19	4,64E-01
12	BE2	1,079689E-03
13	BE20	1,39E-02
14	BE21	1,39E-02
15	BE22	1,39E-02
16	BE23	1,12E-04
17	BE24	1,81E-03
18	BE25	2,69E-03
19	BE26	2,18E-03
20	BE3	7E-02
21	BE4	5,535E-03
22	BE5	2,135E-03
23	BE6	1,718E-03
24	BE7	1,51183E-04
25	BE8	2,61085E-04
26	BE9	9,067198E-03



### 3.3. Rezultati Monte Carlo simulacija

#### 3.3.1. Rezultati Monte Carlo simulacija $n = 10.000$

Tablica 3 prikazuje vrijednosti dobivene Monte Carlo simulacijama za 10.000 ponavljanja. Iz Tablica 3 možemo zaključiti sljedeće:

##### 1. Najveći doprinosi sudara:

- BE8 i BE7 su najznačajniji doprinositelji, s brojem pojavljivanja od 2,455 i 1,438. Zajedno doprinose gotovo 39 % ukupnom riziku od kvara (24,55 % za BE8 i 14,38 % za BE7).
- Ova dva događaja čine više od trećine vjerojatnosti kvara, što sugerira da su ključne mete za bilo kakve strategije smanjenja rizika.

##### 2. Srednje važni doprinositelji:

- BE23, BE1, i BE9 su sljedeći po važnosti, doprinoseći 10,44 %, 9,19 %, i 7,95 %. Zajedno predstavljaju oko 27,5 % ukupne vjerojatnosti kvara.
- Ova grupa pokazuje nižu vjerojatnost u usporedbi s BE8 i BE7, ali je i dalje dovoljno značajna da zaslužuje pažnju u procjeni rizika.

##### 3. Doprinositelji niže važnosti:

- Događaji poput BE10, BE4, BE16 i BE13 pokazuju umjerenu važnost, svaki doprinosi između 3-5 %. Iako njihov individualni utjecaj nije presudan kao kod najvažnijih događaja, zajedno dodaju značajan rizik u sustavu.
- Rješavanje ovih događaja može pružiti postupno smanjenje rizika, ali može biti manje isplativo u usporedbi s fokusom na događaje visokog utjecaja.

##### 4. Događaji s niskom vjerojatnošću i minimalnim utjecajem:

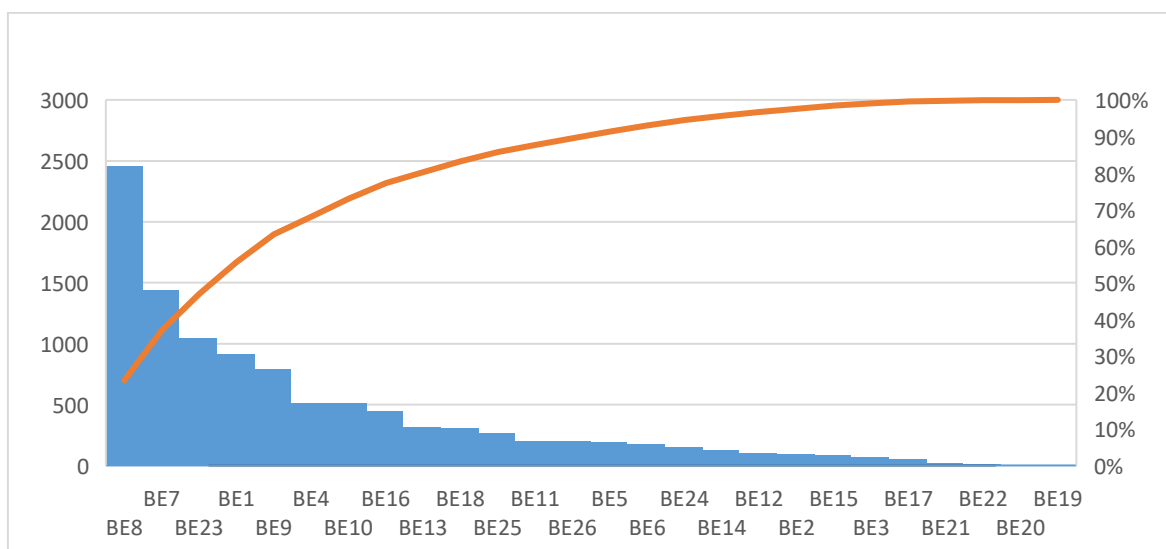
- Događaji BE19, BE20, BE22 i BE21 imaju minimalan doprinos kvarovima, svaki manje od 0,2 %.
- S obzirom na njihov mali utjecaj, ovi događaji vjerojatno nisu primarne mete za intervenciju osim ako resursi dopuštaju šire napore za smanjenje rizika.

Tablica 3. Rezultati Monte Carlo simulacija 10.000 ponavljanja

#	Događaj	Broj pojavljivanja događaja	Vjerojatnost	Procjena		Važnost
				+/-		
1	BE19	4	4,27E-05	+/-	2,14E-05	0,04 %
2	BE20	6	6,41E-05	+/-	2,62E-05	0,06 %
3	BE22	13	1,39E-04	+/-	3,85E-05	0,13 %
4	BE21	18	1,92E-04	+/-	4,53E-05	0,18 %
5	BE17	55	5,88E-04	+/-	7,92E-05	0,55 %
6	BE3	69	7,37E-04	+/-	8,88E-05	0,69 %
7	BE15	91	9,72E-04	+/-	1,02E-04	0,91 %
8	BE2	95	1,02E-03	+/-	1,04E-04	0,95 %
9	BE12	102	1,09E-03	+/-	1,08E-04	1,02 %
10	BE14	128	1,37E-03	+/-	1,21E-04	1,28 %
11	BE24	150	1,60E-03	+/-	1,31E-04	1,50 %
12	BE5	189	2,02E-03	+/-	1,47E-04	1,89 %
13	BE6	179	1,91E-03	+/-	1,43E-04	1,79 %
14	BE26	198	2,12E-03	+/-	1,50E-04	1,98 %
15	BE11	203	2,17E-03	+/-	1,52E-04	2,03 %
16	BE25	268	2,86E-03	+/-	1,75E-04	2,68 %
17	BE18	309	3,30E-03	+/-	1,88E-04	3,09 %
18	BE13	318	3,40E-03	+/-	1,91E-04	3,18 %
19	BE16	449	4,80E-03	+/-	2,26E-04	4,49 %
20	BE4	515	5,50E-03	+/-	2,42E-04	5,15 %
21	BE10	511	5,46E-03	+/-	2,42E-04	5,11 %
22	BE9	795	8,49E-03	+/-	3,01E-04	7,95 %
23	BE1	919	9,82E-03	+/-	3,24E-04	9,19 %
24	BE23	1044	1,12E-02	+/-	3,45E-04	10,44 %
25	BE7	1438	1,54E-02	+/-	4,05E-04	14,38 %
26	BE8	2455	2,62E-02	+/-	5,29E-04	24,55 %

Zapažanja o distribuciji događaja iz Slike 16:

- Kumulativna krivulja (narančasta linija na dijagramu) pokazuje da je oko 80 % vjerojatnosti kvara koncentrirano u prvih 10 događaja. To ukazuje na efekt "nekoliko bitnih", gdje mali broj događaja uzrokuje većinu rizika.
- Pareto princip (pravilo 80/20) ovdje se dobro primjenjuje, što sugerira da bi rješavanje gornjih 20-25 % događaja (primarno BE8, BE7, BE23, BE1 i BE9) moglo donijeti značajne koristi u smanjenju rizika sudara.



Slika 16. Pareto analiza rezultata Monte Carlo simulacija 10.000 ponavljanja

### 3.3.2. Rezultati Monte Carlo simulacija $n = 100.000$

Tablica 4 prikazuje vrijednosti dobivene Monte Carlo simulacijama za 100.000 ponavljanja. Iz Tablica 4 možemo zaključiti sljedeće:

• **Najveći doprinosi sudara:**

- BE8 i BE7 su najznačajniji doprinositelji s vjerojatnostima od 2,62 % i 1,51 %. Zajedno doprinose gotovo 39 % ukupnom riziku od kvara (24,55 % za BE8 i 14,13 % za BE7).
- Ova dva događaja predstavljaju ključne mete za smanjenje rizika jer čine više od trećine ukupne vjerojatnosti kvara.

• **Srednje važni doprinositelji:**

- BE23, BE1 i BE9 su sljedeći po važnosti, doprinoseći 10,58 %, 9,02 % i 8,51 %. Zajedno predstavljaju oko 28 % ukupne vjerojatnosti kvara.
- Ovi događaji također su značajni i preporučljivo ih je uzeti u obzir kod procjene rizika.

• **Doprinositelji niže važnosti:**

- BE4, BE10, BE16 i BE18 doprinose između 3 % i 5 % ukupnoj vjerojatnosti, što ih svrstava u srednje važnu kategoriju. Ovi događaji pružaju dodatne mogućnosti za smanjenje rizika, ali s manjim učinkom nego kod događaja s visokim doprinosom.

• **Događaji s niskom vjerojatnošću i minimalnim utjecajem:**

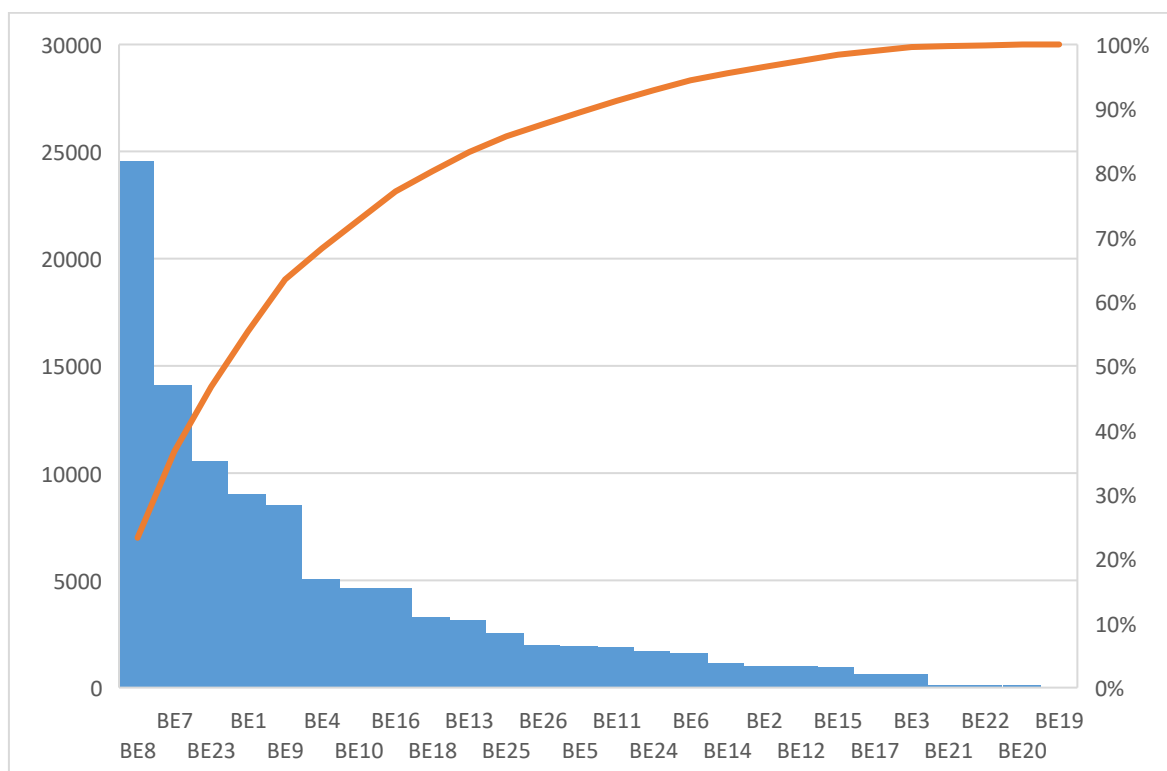
- BE19, BE20, BE22 i BE21 doprinose manje od 0,2 % ukupnoj vjerojatnosti, što sugerira da nisu primarne mete za intervenciju, osim ako resursi dopuštaju šire napore za smanjenje rizika.

Tablica 4. Rezultati Monte Carlo simulacija 100.000 ponavljanja

#	Događaj	Broj pojavljivanja događaja	Vjerojatnost	Procjena		Važnost
				+/-		
1	BE19	44	4,70E-05	+/-	7,09E-06	0,04 %
2	BE20	120	1,28E-04	+/-	1,17E-05	0,12 %
3	BE22	129	1,38E-04	+/-	1,21E-05	0,13 %
4	BE21	148	1,58E-04	+/-	1,30E-05	0,15 %
5	BE17	636	6,80E-04	+/-	2,69E-05	0,64 %
6	BE3	631	6,74E-04	+/-	2,68E-05	0,63 %
7	BE15	976	1,04E-03	+/-	3,34E-05	0,98 %
8	BE12	1002	1,07E-03	+/-	3,38E-05	1,00 %
9	BE2	1043	1,11E-03	+/-	3,45E-05	1,04 %
10	BE14	1144	1,22E-03	+/-	3,61E-05	1,14 %
11	BE6	1625	1,74E-03	+/-	4,31E-05	1,63 %
12	BE24	1720	1,84E-03	+/-	4,43E-05	1,72 %
13	BE11	1909	2,04E-03	+/-	4,67E-05	1,91 %
14	BE5	1958	2,09E-03	+/-	4,73E-05	1,96 %
15	BE26	1970	2,10E-03	+/-	4,74E-05	1,97 %
16	BE25	2552	2,73E-03	+/-	5,40E-05	2,55 %
17	BE13	3170	3,39E-03	+/-	6,02E-05	3,17 %
18	BE18	3289	3,51E-03	+/-	6,13E-05	3,29 %
19	BE16	4645	4,96E-03	+/-	7,28E-05	4,64 %
20	BE10	4652	4,97E-03	+/-	7,29E-05	4,65 %
21	BE4	5076	5,42E-03	+/-	7,61E-05	5,08 %
22	BE9	8508	9,09E-03	+/-	9,86E-05	8,51 %
23	BE1	9019	9,64E-03	+/-	1,01E-04	9,02 %
24	BE23	10577	1,13E-02	+/-	1,10E-04	10,58 %
25	BE7	14131	1,51E-02	+/-	1,27E-04	14,13 %
26	BE8	24549	2,62E-02	+/-	1,67E-04	24,55 %

Zapažanja o distribuciji događaja iz Slike 17:

- Kumulativna krivulja (narančasta linija na dijagramu) pokazuje da je oko 80 % vjerojatnosti kvara koncentrirano u prvih 10 događaja. To ukazuje na efekt "nekoliko bitnih", gdje mali broj događaja uzrokuje većinu rizika.
- Pareto princip (pravilo 80/20) ovdje se dobro primjenjuje, što sugerira da bi rješavanje gornjih 20-25 % događaja (primarno BE8, BE7, BE23, BE1 i BE9) moglo donijeti značajne koristi u smanjenju rizika sudara.



Slika 17. Pareto analiza rezultata Monte Carlo simulacija 100.000 ponavljanja.

## 4. ZAKLJUČAK

Na temelju provedene analize i prikazanih rezultata, možemo donijeti nekoliko zaključaka o vjerojatnosti i važnosti pojedinih osnovnih događaja (BEs) u kontekstu rizika i sigurnosti sustava:

- Analiza je pokazala da su određeni osnovni događaji odgovorni za veći dio ukupnog rizika u sustavu. Posebno se ističu događaji BE8 (Kršenje COLREG-a) i BE7 (Kriva uporaba navigacijskih alata), koji zajedno čine značajan dio ukupne vjerojatnosti sudara, sa važnostima od 24,44 % i 14,14 %, što ukupno iznosi 38,58 % svih rizika. To ukazuje da su ovi događaji, uzrokovani specifičnim faktorima ili kombinacijama okolnosti, ključni čimbenici za koje je potrebno osigurati učinkovite mjere kontrole i prevencije.
- Događaji s umjerenim rizikom, poput BE23 (Nedostatak svijesti o situaciji), BE1 (Umor), i BE9 (Kvarovi opreme ili tehnički problemi), također doprinose značajnom udjelu u ukupnoj vjerojatnosti incidenta, što znači da njihova kontrola može dodatno doprinijeti smanjenju ukupnog rizika. Ovi događaji čine dodatnih 27,94 % ukupne važnosti, što ih čini važnim, iako sekundarnim ciljevima u odnosu na BE8 i BE7.
- Ostali događaji poput BE4 (Neznanje), BE10 (Nedostatak pažnje), i BE16 (Kvarovi upravljačkog mehanizma) doprinose manjem postotku ukupne važnosti, ali njihova kontrola i dalje može imati pozitivan utjecaj na cjelokupnu sigurnost.

BE8 i BE7 su najvažniji osnovni događaji i stoga zaslužuju prioritet u sigurnosnim strategijama. Njihov visok rizik može biti rezultat specifičnih radnih uvjeta, nedostaci u procedurama i protokola ili neispravnoj provedbi procedura i protokola. S obzirom na značajan doprinos ukupnom riziku. Osnovni događaji BE23, BE1, i BE9 predstavljaju dodatni rizik koji, iako manji od BE8 i BE7, i dalje doprinosi značajnom udjelu u ukupnom riziku.

Analiza jasno pokazuje da su rizici koncentrirani u nekoliko ključnih događaja, prvenstveno BE8 i BE7, čija redukcija može značajno smanjiti ukupnu razinu rizika. Stoga bi primarni fokus preventivnih mjera trebao biti na ovim događajima, dok bi sekundarni događaji poput BE23, BE1, i BE9 trebali također biti podvrgnuti dodatnim mjerama za prevenciju.

Ovaj holistički pristup, koji kombinira kontrolu nad visokorizičnim događajima s redovitim praćenjem, omogućit će učinkovitije upravljanje rizicima i održavanje visokih sigurnosnih standarda u sustavu.

Poboljšanje procedura rada i operativnih standarda koji mogu smanjiti rizik ovih događaja. To uključuje strože standarde sigurnosti i redovite revizije operativnih protokola. Obuka i certifikacija zaposlenika na pozicijama koje su povezane s ovim događajima. Kvalitetna obuka može pomoći u smanjenju rizika grešaka i nesreća. Praćenje i održavanje opreme, redovno praćenje i preventivno održavanje ključnih dijelova opreme može smanjiti vjerojatnost pojavljivanja kvarova koji su povezani s visokorizičnim događajima.

Ova analiza pruža temelj za daljnji razvoj i optimizaciju sigurnosnih postupaka, što može pridonijeti smanjenju broja incidenata i osigurati dugoročnu stabilnost i sigurnost sustava.



**LITERATURA**

- [1] Smith, T. W. P., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A. (2015) Third IMO Greenhouse Gas Study 2014. London, UK : International Maritime Organization.
- [2] EMSA (2023) Annual Overview of Marine Casualties and Incidents.
- [3] Rothblum, A. (2000) Human Error and Marine Safety.
- [4] Ugurlu, O., Yildiz, S., Loughney, S., Wang, J. (2015) Modified human factor analysis and classification system for passenger vessel accidents (HFACS PV). *Ocean. Eng.* 161. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.086>.
- [5] Shi, X., Zhuang, H., Xu, D. (2021). Structured survey of human factor-related maritime accident research. 109561. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109561>.
- [6] Aydin, M., Akyuz, E., Turan, O., Arslan, O. (2021) Validation of risk analysis for ship collision in narrow waters by using fuzzy bayesian networks approach. *Ocean. Eng.* 231, 108973 <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108973>,
- [7] Wang, H., Liu, Z., Liu, Z., Wang, X., Wang, J. (2022) Gis-based analysis on the spatial patterns of global maritime accidents. *Ocean. Eng.* 245, 110569. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110569>.
- [8] Acharya, T.D., Yoo, K.W., Lee, D.H. (2017) Gis-based spatio-temporal analysis of marine accidents database in the coastal zone of korea. *J. Coast Res.* 79, 114–118. <https://doi.org/10.2112/SI79-024.1>.
- [9] Navas de Maya, B., Kurt, R.E. (2020) Marine accident learning with fuzzy cognitive maps (malfcms): a case study on bulk carrier’s accident contributors. *Ocean. Eng.* 208, 107197 <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107197>.
- [10] Wang, L., Wang, J., Shi, M., Fu, S., Zhu, M. (2021) Critical risk factors in ship fire accidents. *Marit. Pol. Manag.* 48 (6), 895–913. <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1821110>.
- [11] Fan, S., Blanco-Davis, E., Yang, Z., Zhang, J., Yan, X. (2020) Incorporation of human factors into maritime accident analysis using a data-driven bayesian network. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 203, 107070 <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107070>.
- [12] Ventikos, N.P., Stavrou, D.I., Andritsopoulos, A. (2017) Studying the marine accidents of the aegean sea: critical review, analysis and results. *Journal of Marine Engineering and Technology* 16 (3), 103–113. <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1322027>.

- [13] Mansyur, M., Sagitasari, R., Wangge, G., Sulistomo, A.B., Kekalih, A. (2021) Long working hours, poor sleep quality, and work-family conflict: determinant factors of fatigue among Indonesian tugboat crewmembers. *BMC Publ. Health* 21 (1), 1832. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-11883-6>.
- [14] He, L., Xiaoxue, M., Weiliang, Q., Yang, L. (2022) A methodology to assess the causation relationship of seafarers' unsafe acts for ship grounding accidents based on bayesian sem. *Ocean Coast Manag.* 225, 106189 <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106189>.
- [15] Rawson, A., Brito, M. (2022) A survey of the opportunities and challenges of supervised machine learning in maritime risk analysis. *Transport Rev.* 1–23. <https://doi.org/10.1080/01441647.2022.2036864>.
- [16] <https://portal.emsa.europa.eu/emcip-public/#/public-occurrences> pristup 21.11.2024.
- [17] Clifton A. Ericson II. (2002) *Hazard Analysis Techniques for System Safety*-Wiley-Interscience.
- [18] James E. (2005) *Gentle Statistics and Computing; Random Number Generation and Monte Carlo Methods* 2nd edition.
- [19] Botev Z. I., Kroese D. P., Taimre T. (2011) *Handbook of Monte Carlo Methods*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- [20] Leobacher G., Pillichshammer F. (2014) *Introduction to Quasi-Monte Carlo Integration and Applications*, Compact Textbooks in Mathematics, Birkhäuser, Basel.
- [21] Wasserman, L. (2004) *All of Statistics - A Concise Course in Statistical Inference*, Springer Texts in Statistics, New York.
- [22] Benšić M., Šuvak N. (2014) *Uvod u vjerojatnost i statistiku*, Sveučilište J. J. Strossmayera, Odjel za matematiku, Osijek.