

Analiza pouzdanosti brodskih sustava: Mapiranje analize stabla grešaka u Bayes-ovu mrežu

Mateljak, Bruno-Srećko

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:235:697680>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Bruno-Srećko Mateljak

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Bruno-Srećko Mateljak

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Nikoli Vladimiru na pomoći, sugestijama i strpljenju prilikom izrade diplomskog rada. Zahvaljujem se svojoj djevojci, obitelji i prijateljima na ukazanoj podršci i razumijevanju. Posebno zahvaljujem asistentici Ivani Jovanović na neizmjerne pomoći.

Bruno-Srećko Mateljak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:



Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Bruno-Srećko Mateljak** JMBAG: 0035217121

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza pouzdanosti brodskih sustava: mapiranje analize stabla grešaka u Bayes-ovu mrežu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Reliability analysis of ship systems: Mapping fault tree analysis into Bayesian network**

Opis zadatka:

Analiza pouzdanosti brodskih sustava je proces procjene i mjerenja sposobnosti brodskih sustava da obavljaju svoje funkcije bez kvarova ili neuspjeha tijekom određenog vremenskog razdoblja. Ova analiza uključuje identifikaciju potencijalnih kvarova, njihovih uzroka i posljedica te procjenu vjerojatnosti njihovog nastanka. Cilj analize pouzdanosti brodskih sustava je poboljšati sigurnost, operativnu učinkovitost i ekonomičnost broda identificiranjem potencijalnih rizika i implementacijom mjera za smanjenje tih rizika. Analiza stabla grešaka (eng. *Fault Tree Analysis*, FTA) koristi se za procjenu kvalitativnih i kvantitativnih analiza sustava. Bayesova mreža (eng. *Bayesian Network*, BN) je probabilistički grafički model koji se koristi za modeliranje vjerojatnosti i međuovisnosti između različitih varijabli. Pretvaranje FTA u BN razmjerno je jednostavan proces i bilo koja analiza koja se provodi pomoću FTA može se također izvesti s BN analizom. Međutim, BN nudi neke dodatne prednosti, kao što je mogućnost uključivanja lokalnih ovisnosti, varijabli s više stanja, nesigurnosti i ovisnosti među elementima koji se mogu uključiti u BN nakon pretvorbe. U diplomskom radu potrebno je odabrati brodski sustav, opisati ga te provesti analizu pouzdanosti koristeći FTA i BN metodu. Diplomski rad treba sadržavati:

- pregled metoda za analizu pouzdanosti brodskih sustava,
- detaljan opis mapiranja analize stabla grešaka u Bayesovu mrežu,
- opis i shematski prikaz odabranog broskog sustava,
- analizu raspoloživih podataka o kvarovima odabranog sustava,
- analizu rezultata proračuna.

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

Zadatak zadan:

9. svibnja 2024.

Datum predaje rada:

11. srpnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Nikola Vladimír

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
SAŽETAK.....	V
1. UVOD.....	1
1.1. Sigurnost i pouzdanost sustava	3
1.2. Analiza rizika	7
1.3. Pregled metoda za procjenu pouzdanosti	8
2. MATEMATIČKI MODELI	11
2.1. Analiza stabla grešaka	11
2.1.1. <i>Simboli stabla grešaka</i>	12
2.1.2. <i>Izračuni unutar stabla grešaka</i>	14
2.2. Bayesova mreža.....	15
2.3. Mapiranje stabla grešaka u Bayesovu mrežu	16
3. ANALIZA ODABRANOG BRODSKOG SUSTAVA	20
3.1. Izmjenjivač topline (Shell & Tube).....	20
3.2. Analiza odabranog sustava.....	21
3.3. Konstruiranje stabla grešaka	23
3.3.1. <i>Stablo grešaka za kritični kvar AIR</i>	23
3.3.2. <i>Stablo grešaka za kritični kvar ELP</i>	26
3.3.3. <i>Stablo grešaka za kritični kvar STD</i>	28
3.3.4. <i>Stablo grešaka za kritični kvar PDE</i>	30
3.4. Mapiranje Bayesove mreže	33
3.4.1. <i>Mapiranje Bayesove mreže za kritični kvar AIR</i>	33
3.4.2. <i>Mapiranje Bayesove mreže za kritični kvar ELP</i>	36
3.4.3. <i>Mapiranje Bayesove mreže za kritični kvar STD</i>	38
3.4.4. <i>Mapiranje Bayesove mreže za kritični kvar PDE</i>	40
3.5. Analiza i poboljšanje sustava	42
4. ZAKLJUČAK	43
LITERATURA.....	44

POPIS SLIKA

Slika 1. Cijena pouzdanosti [14]	2
Slika 2. Unutarnja podjela sustava [18]	5
Slika 3. Procjena pouzdanosti sustava.....	5
Slika 4. Prikaz "bathtub" krivulje [19].....	6
Slika 5. Prikaz matrice za procjenu rizika [15]	7
Slika 6. Prikaz D-separacije	16
Slika 7. Postupak mapiranja FT u BN [49]	18
Slika 8. Prikaz "ILI" i "I" vrata u FT i BN [48]	19
Slika 9. Prikaz granice sustava izmjenjivača topline [51].....	20
Slika 10. Prikaz stabla grešaka za kritični kvar AIR.....	25
Slika 11. Prikaz stabla grešaka za kritični kvar ELP.....	28
Slika 12. Prikaz stabla grešaka za kritični kvar STD	30
Slika 13. Prikaz stabla grešaka za kritični kvar PDE	32
Slika 14. Prikaze Bayesove mreže za kritični kvar AIR	35
Slika 15. Prikaz posteriorne vrijednosti za grešku IS.....	36
Slika 16. Prikaze Bayesove mreže za kritični kvar ELP	37
Slika 17. Prikaz posteriorne vjerojatnosti za grešku UN1	38
Slika 18. Prikaz Bayesove mreže za kritični kvar STD	39
Slika 19. Prikaz posteriorne vjerojatnosti za grešku UN1	39
Slika 20. Prikaz Bayesove mreže za kritični kvar PDE	41
Slika 21. Prikaz posteriorne vjerojatnosti za grešku CF1	41
Slika 22. Prikaz posteriorne vjerojatnosti za grešku IS.....	42

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci metoda za analize pouzdanosti [34]	10
Tablica 2. Opis simbola događaja	12
Tablica 3. Opis simbola vrata.....	13
Tablica 4. Opis prijenosnih simbola.....	14
Tablica 5. Prikaz podsustava i komponenti odabranog sustava [51]	21
Tablica 6. Prikaz intenziteta kvarova i pojedinih udjela	23
Tablica 7. Vjerojatnost pojave kvarova u sustavu izmjenjivača topline	24
Tablica 8. Prikaz intenziteta kvarova i pojedinih udjela	26
Tablica 9. Vjerojatnost pojave kvarova u sustavu izmjenjivača topline	26
Tablica 10. Prikaz intenziteta kvarova i pojedinih udjela	28
Tablica 11. Vjerojatnost pojave kvarova u sustavu izmjenjivača topline	29
Tablica 12. Prikaz intenziteta kvarova i pojedinih udjela	30
Tablica 13. Vjerojatnost pojave kvarova u sustavu izmjenjivača topline	31
Tablica 14. Prikaz CPT tablice za grešku IT.....	34
Tablica 15. Prikaz faktora poboljšanja	35
Tablica 16. Prikaz CPT tablice za grešku UN.....	36
Tablica 17. Prikaz faktora poboljšanja	37
Tablica 18. Prikaz CPT tablice za grešku UN.....	38
Tablica 19. Prikaz faktora poboljšanja	39
Tablica 20. Prikaz CPT tablice za grešku PDE.....	40
Tablica 21. Prikaz faktora poboljšanja	41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
λ	h^{-1}	Intenzitet kvarova
n	[-]	Broj kvarova
P	[-]	Vjerojatnost
τ	h	Ukupno vrijeme u radnom vijeku
t	h	Vrijeme promatranja
z	h^{-1}	Intenzitet kvarova

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu, za odabrani brodski sustav, provedena je analiza pouzdanosti mapiranjem analize stabla grešaka (eng. *Fault Tree Analysis*, FTA) u Bayesovu mrežu (eng. *Bayesian Network*, BN). FTA i BN metode su opisane, te su navedene njihove prednosti i ograničenja, uz detaljan opis postupka grafičkog i numeričkog mapiranja FTA u BN. Kombinacijom FTA i BN dobije se detaljnija, fleksibilnija i preciznija procjena sigurnosti i pouzdanosti sustava integracijom determinističkih i vjerojatnosnih metoda.

Za odabrani brodski sustav, izmjenjivač topline (eng. *Shell & Tube*), definirana je granica sustava, zadatci, podsustavi i komponente, te je dan shematski prikaz. Koristeći bazu podataka OREDA, utvrđena su četiri potencijalna kritična kvara odabranog sustava: abnormalno očitavanje instrumenta (eng. *Abnormal instrument reading*, AIR), vanjsko curenje procesnog medija (eng. *External leakage – Process medium*, ELP), strukturni nedostatak (eng. *Structural deficiency*, STD), odstupanje parametara (eng. *Parameter deviation*, PDE). Nadalje, kritični kvarovi su prikazani kao glavni događaji i za njih je konstruirano stablo grešaka i izračunate vjerojatnosti pojave svih događaja unutar stabla. Mapiranjem stabla grešaka u BN formulirane su tablice uvjetne vrijednosti prema vrsti logičkih vrata. Na taj način je utvrđeno koje greške najviše doprinose razvoju kritičnog kvara. Korištenjem programskog alata Netica dobiveni su faktori poboljšanja za kritične kvarove. Utvrđeno je da kritična greška AIR ima najveći intenzitet kvarova, čemu najviše pridonosi njena podgreška opći kvar instrumenta (IS). Uvođenjem alarma povezanog s greškom IS, moguće je umanjiti vjerojatnost njene pojave s 26,9 % na 4,83 %.

Ključne riječi: pouzdanost broskog sustava, analiza stabla grešaka, Bayesova mreža, kritični kvarovi, intenzitet kvarova, izmjenjivač topline, poboljšanje sustava.

SUMMARY

In this thesis, a reliability analysis of a selected ship system was carried out by converting Fault Tree Analysis (FTA) into a Bayesian Network (BN). Both the FTA and BN methods are explained, highlighting their benefits and drawbacks, and providing a detailed guide on the graphical and numerical mapping process from FTA to BN. This combination allows for a more comprehensive, adaptable, and precise evaluation of system safety and reliability, integrating both deterministic and probabilistic approaches.

For the selected ship system, a Shell & Tube heat exchanger, the system boundaries, tasks, subsystems, and components were outlined, and a schematic diagram was included. Using the OREDA database, four potential critical failures were identified: abnormal instrument reading (AIR), external leakage of the process medium (ELP), structural deficiency (STD), and parameter deviation (PDE). These critical failures were treated as primary events, leading to the construction of a fault tree, with probabilities calculated for all events within the tree. By mapping the fault tree into a BN, conditional probability tables (CPT) were created based on the type of logic gates used. This approach pinpointed the errors that most significantly contribute to critical failures. Utilizing the Netica software tool, improvement factors for the critical failures were determined. It was discovered that AIR had the highest failure rate, primarily due to the sub-error of general instrument failure (IS). By implementing an alarm system linked to the IS error, the probability of its occurrence could be reduced from 26.9% to 4.83%.

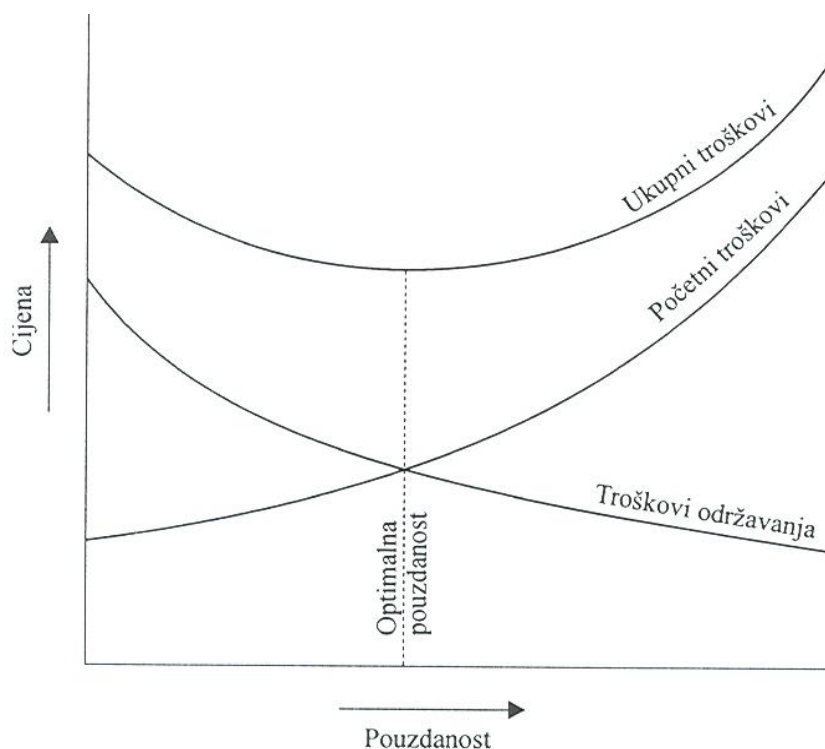
Key words: reliability of ship system, Fault Tree Analysis, Bayesian Network, critical failures, failure rate, heat exchanger, system improvement.

1. UVOD

Uzimajući u obzir da su brodovi odgovorni za prijevoz više od 90 % svjetskih roba te su od ključne važnosti za instalaciju i održavanje naftnih platformi, ali i ostalih pučinskih sustava za proizvodnju energije [1], suvremena brodogradnja i pomorstvo su pod kontinuiranim pritiskom smanjenja emisija uz istovremeno povećanje sigurnosti i pouzdanosti. Uvidom u karakteristike flote suvremenih brodova, utvrđeno je kontinuirano povećanje duljine između okomica, gaza i nosivosti, što dodatno usložnjava postizanje tražene razine energetske učinkovitosti, ekološke prihvatljivosti i pouzdanosti [1]. Iako se broj pomorskih nesreća u posljednjem desetljeću smanjio i dalje je potrebno kontinuirano raditi na povećanju pouzdanosti brodova jer pomorske nesreće uz potencijalan ljudski i materijalni gubitak mogu prouzročiti katastrofalne i dugoročne posljedice za morske ekosustave i okoliš. Također, uz planirano povećanje stupnja autonomnosti brodova, potrebno je osigurati traženu razinu sigurnosti. Autonomna vozila pojavljuju se u svim oblicima kopnenog prijevoza kao i u zrakoplovstvu, te stoga ne iznenađuje izniman interes znanstvene zajednice za razvoj autonomnih brodova različitih značajki i namjena. S naglaskom na održivost, rast i konkurentnost pomorskog prometa, istraživanje autonomnih plovila je jedna od važnijih tema brodograđevne znanosti, s preliminarnim pozitivnim rezultatima koji jamče njihovu širu implementaciju u budućnosti [2]. Autonomno plovilo je definirano kao plovilo s modularnim upravljačkim sustavima i komunikacijama nove generacije tehnologija koji omogućuju funkcije bežičnog nadzora i upravljanja kako na brodu, tako i izvan njega. Oni uključuju napredne sustave potpore odlučivanju koji pružaju sposobnost daljinskog upravljanja brodovima pod djelomično ili potpuno autonomnom kontrolom. Tehnologije, posebno senzorske, potrebne za daljinsko i autonomno upravljanje brodova u stvarnosti već postoje [3]. Izazov je pronaći optimalan način kombiniranja njihove pouzdanosti i isplativosti. Međunarodna pomorska organizacija (eng. *International Maritime Organisation*, IMO) je definirala četiri stupnja autonomije, gdje kod prvog stupnja posada na brodu donosi sve odluke, dok četvrti stupanj podrazumijeva potpuno autonoman brod s operativnim sustavom sposobnim donositi i provoditi sve potrebne radnje [4]. Drugi i treći stupanj obuhvaćaju daljinsko upravljanje brodom iz kontrolnog centra na kopnu, gdje je kod drugog stupnja posada još prisutna na brodu. Istraživanja su orijentirana prema razvoju broda s trećim stupnjem autonomije gdje bi važnu ulogu imao kontrolni centar na kopnu [5]. Važno je napomenuti da bi prijelaz s drugog na treći stupanj autonomije bio postupan uz veliki broj

testiranja i modifikacija [6]. Da bi došlo do uspješnog prijelaza sa standardnih na autonomne brodove važno je dokazati da su autonomni brodovi barem jednako sigurni [7], [8].

Brodovi su općenito građeni za različite primjene, pri čemu svaka od njih ima svoje specifičnosti u pogledu održavanja i drugih propisa, koji se mogu razlikovati od države do države [9]. Unatoč tome, svi brodovi čine složene sustave te su izgrađeni kako bi se kretali od jedne točke do druge, pružali podršku za boravak ljudi i strojeva te obavljali određene usluge. Prema Stopfordu [10], općenito se smatra da su brodovi projektirani s predviđenim operativnim vijekom od otprilike 25 godina, s mogućnošću produljenja do 35 godina ili više [11]. Upravljanje životnim ciklusom brodova i sustava na brodu često nije prioritarno, što rezultira značajnim troškovima održavanja nakon početnog razdoblja od pet godina [12], [13]. Zbog toga je potrebno integrirati metode analize pouzdanosti u postupak projektiranja, Slika 1.



Slika 1. Cijena pouzdanosti [14]

Jedan od ciljeva ovog rada je prikazati metode koje je moguće primjenjivati za poboljšanje pouzdanosti brodskih sustava. U radu je odabran reprezentativan brodski sustav, tj. izmjenjivač topline, te je analiziran način povećanja njegove pouzdanosti utjecanjem na grešku s najvećim intenzitetom kvarova. Rad je strukturiran u četiri poglavlja. U prvom, uvodnom poglavlju, objašnjeni su temeljni principi i termini sigurnosti i pouzdanosti sustava te procjene rizika.

Predstavljene su najčešće primjenjivanje metode procjene rizika. U drugom poglavlju detaljno su opisane dvije u radu korištene metode, analiza stabla grešaka i Bayesove mreže te postupak mapiranja analize stabla grešaka u Bayesove mreže. Reprezentativni brodski sustav je opisan u trećem poglavlju te su za njega identificirane četiri kritične greške za koje su provedene daljnje analize. U četvrtom poglavlju je iznesen zaključak rada.

Glavni doprinos rada je identifikacija, primjena i validacija metoda za postizanje veće pouzdanosti odabranog brodskog sustava. Poboljšanjem pouzdanosti brodskih sustava doprinosi se modernizaciji i učinkovitijem upravljanju pomorskim resursima. Nakon što se kvarovi identificiraju, razvijaju se rješenja za pojedinačni problem. Ta rješenja moraju pružati jednaku ili veću pouzdanost u usporedbi s postojećim sustavima. Na kraju, predložena rješenja se evaluiraju s obzirom na njihov doprinos pouzdanosti sustava. Analiza pokazuje koliko nova rješenja mogu unaprijediti pouzdanost sustava, čime se osigurava sigurniji i učinkovitiji rad brodskih sustava [15].

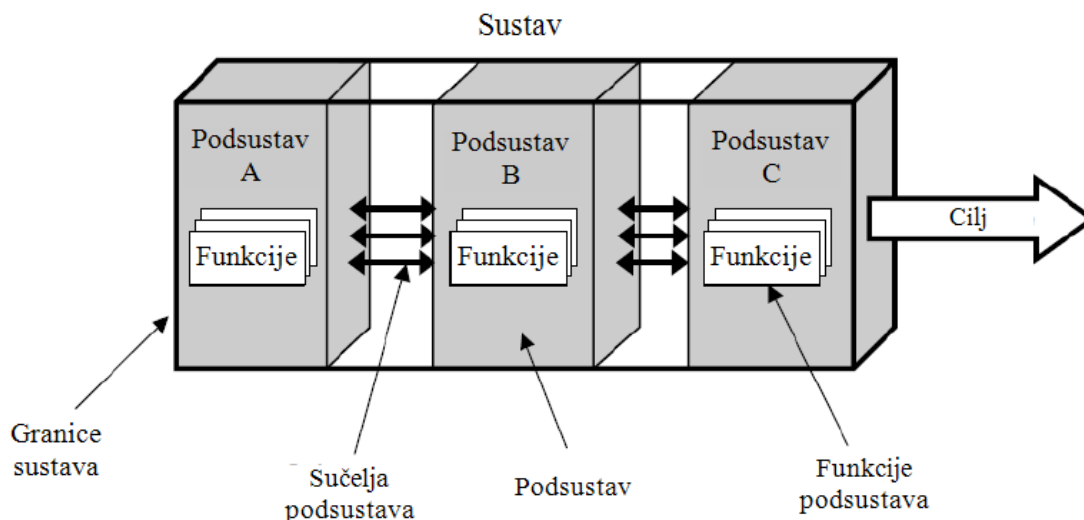
1.1. Sigurnost i pouzdanost sustava

Sigurnost sustava se može definirati kao disciplina koja koristi znanstvene, inženjerske i menadžerske principe kako bi osiguralo pravovremeno prepoznavanje rizika te pokretanje radnji za sprječavanje ili kontrolu tih rizika tijekom cijelog životnog ciklusa, unutar ograničenja operativne učinkovitosti, vremena i troškova. Sigurnost sustava je postala neizostavan dio procesa planiranja sigurnosti u mnogim industrijama, uključujući pomorsku, zrakoplovnu, farmaceutsku, zdravstvenu i druge. Stoga je bitno prvo razumjeti osnovne sigurnosne koncepte i termine kako bismo pravilno shvatili sigurnost sustava. U nastavku su definirani pojmovi u svrhu daljnjeg razumijevanja [16].

- **Sustav:** skup jednog ili više elemenata međusobno povezanih funkcionalnim i fizičkim vezama, koji kao cjelina obavlja definiranu funkciju. Ima svoja fizikalna i funkcionalna svojstva.
- **Podsustav:** skup jednog ili više elemenata, istih svojstava kao i sustav, ali na nižoj razini funkcijske raščlambe, ne egzistira samostalno, već kao dio nekog sustava, odnosno elementa više razine.
- **Komponenta:** element koji se općenito smatra dovoljnim za provođenje određene funkcije, i u širem smislu može se smatrati samostalnom fizičkom cjelinom.

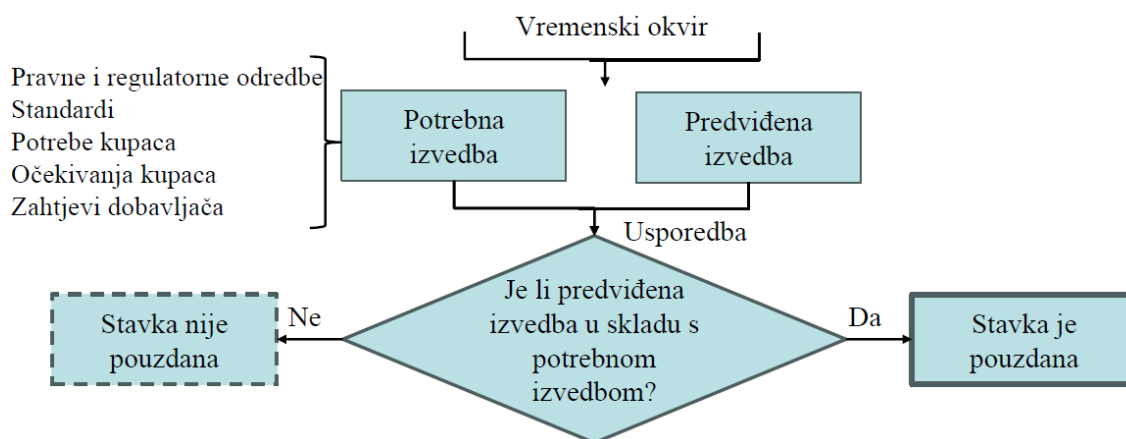
- **Podkomponenta:** element koji je sastavni dio komponente ili sustava, a sam nije klasificiran kao komponenta ili sustav. Kao takva, ona je osnovni gradbeni element i čini dalje nedjeljivu cjelinu.
- **Element:** bilo koja komponenta, podkomponenta, podsustav, funkcionalna jedinica ili cijeli sustav koji se može sagledati kao jedinka. Može imati i nefizičke oblike, npr. svojstva, stanja, kvarovi.
- **Kvar:** stanje sustava ili komponente u kojem ne obavlja svoju funkciju na zadovoljavajući način, ili ju ne obavlja uopće.
- **Sigurnost:** Indikator stupnja slobode od rizika ili uvjeta koji mogu dovesti do smrti, tjelesne ozljede ili oštećenja opreme/imovine [17].
- **Opasnost:** Stanje ili situacija prisutna u radnom okruženju koja može prouzročiti štetu, ozljedu i/ili oštećenje.
- **Težina opasnosti:** Kategorizirani opis razine opasnosti na temelju stvarnog ili percipiranog potencijala za uzrokovanje štete, ozljede i/ili oštećenja.
- **Vjerojatnost opasnosti:** Izgled da će određeno stanje ili skup uvjeta postojati u određenoj situaciji ili radnom okruženju.
- **Rizik:** Mogućnost ili vjerojatnost nepoželjnih posljedica ili štetnih događaja, procijenjenih prema njihovoj ozbiljnosti i vjerojatnosti, što može rezultirati gubicima ili negativnim utjecajem na pojedinca, organizaciju ili okoliš [16].

Slika 2 prikazuje unutarnju podjelu pojedinog sustava, pri čemu su različiti dijelovi sustava organizirani u podsustave. Svaki od tih podsustava obavlja specifične funkcije ili zadatke unutar ukupnog sustava, a međusobno su povezani i surađuju kako bi se postigli ciljevi sustava.



Slika 2. Unutarnja podjela sustava [18]

Pouzdanost predstavlja sposobnost sustava da obavlja svoje funkcije ili zadatke u definiranim uvjetima tijekom određenog vremenskog razdoblja, bez neželjenih prekida ili kvarova. Pouzdanost je ključni faktor u ocjeni performansi i kvalitete sustava, a utječe na ukupnu sigurnost, učinkovitost i zadovoljstvo korisnika. Slika 3 ilustrira procjenu pouzdanosti sustava. Pojam 'stavka' koristi se za označavanje bilo kojeg tehničkog sustava, podsustava ili komponente.



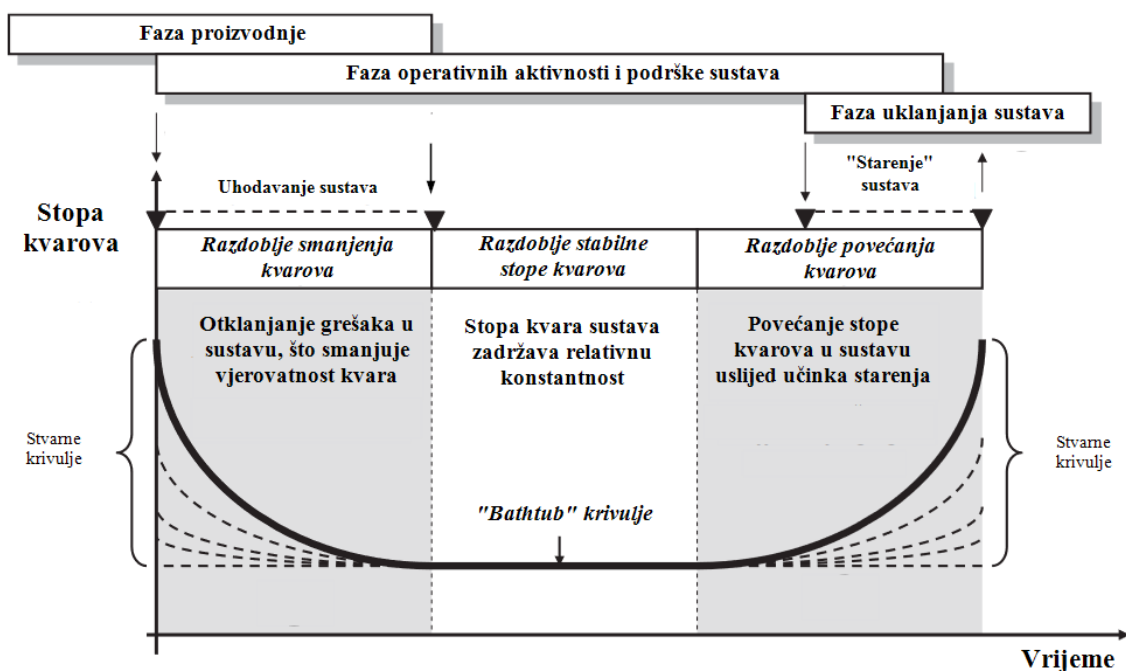
Slika 3. Procjena pouzdanosti sustava

Osnovni ciljevi teorije pouzdanosti su [14]:

- Određivanje optimalne, ekonomski utemeljene i opravdane mjere pouzdanosti, razvijajući metode proračuna koje su primjenjive u pojedinim fazama projektiranja, izrade i eksploatacije sustava,

- Kvantificiranje značajki pouzdanosti sustava, poznajući značajke elemenata i njihove funkcionalne veze.

Krivulja pojavnosti sustavu svojstvenih kvarova (eng. *Bathtub curve*) je grafički prikaz vremenske ovisnosti intenziteta kvarova nekog sustava. Naziv "*bathtub curve*" dolazi od oblika krivulje koji podsjeća na kadu. Visoki početni i krajnji dijelovi krivulje predstavljaju visoki intenzitet kvarova na početku i kraju životnog ciklusa, dok je srednji dio stabilna faza s niskim intenzitetom kvarova kao što je prikazano na Slici 4. U početnoj fazi životnog ciklusa, koja se naziva razdoblje uhadavanja ili razdoblje početnih kvarova (eng. *Infant Mortality Period*), intenzitet kvarova je visok zbog prisutnosti grešaka u projektiranju ili proizvodnji. Nakon toga, slijedi koristan vijek trajanja koji karakteriziraju slučajni kvarovi (eng. *Useful Service Life period*), tijekom kojeg intenzitet kvarova ostaje relativno nizak i konstantan. Na kraju, dolazi do porasta intenziteta kvarova zbog starenja komponenti ili istrošenosti materijala, što se naziva razdoblje dotrajalosti i karakteriziraju ga kvarovi zbog dotrajalosti (eng. *Wearout Period*) [19]. Ova krivulja je ključni alat u analizi pouzdanosti proizvoda ili sustava te u planiranju održavanja, jer omogućuje identifikaciju ključnih faza u životnom ciklusu u kojima su potrebni posebni postupci održavanja ili nadzora kako bi se osigurala optimalna pouzdanost i performanse.



Slika 4. Prikaz "*bathtub*" krivulje [19]

1.2. Analiza rizika

U prethodnom odjeljku definiran je pojam rizika i istaknuta je važnost procjene težine rizika. U nastavku je detaljnije opisana analiza težine opasnosti i vjerojatnosti rizika. Ova analiza obuhvaća procjenu vjerojatnosti pojave određenog događaja ili situacije, kao i ozbiljnost posljedica koje bi mogle proizaći iz tog događaja. Integracija tih faktora omogućuje određivanje prioriteta u upravljanju rizicima te razvijanje odgovarajućih strategija zaštite. Primjena tehnike kategorizacije opasnosti izuzetno je korisna jer omogućuje procjenu koliko je važno rješavati različite opasnosti u kontekstu sigurnosti sustava. Na primjer, rješavanje opasnosti kategorije I, što je ozbiljna ili katastrofalna prijetnja, ima mnogo veći prioritet od zanemarive opasnosti kategorije IV [20]. Na Slici 5 prikazana je kategorizacija težine opasnosti kako bi se pružio detaljniji uvid u način procjene rizika u sustavu. Ova klasifikacija pomaže identificirati prioritete u upravljanju rizicima i usmjeriti resurse prema najkritičnijim područjima sigurnosti sustava.

<i>Matrica procjene rizika</i>	⇓ KATEGORIJE <u>TEŽINE</u> OPASNOSTI ⇓			
UČESTALOST POJAVLJIVANJA (<u>VJEROJATNOST</u>) ⇓	I Katastrofalna	II Kritična	III Umjerena	IV Zanemariva
(A) Često	1A	2A	3A	4A
(B) Vjerojatno	1B	2B	3B	4B
(C) Povremeno	1C	2C	3C	4C
(D) Rijetko	1D	2D	3D	4D
(E) Malo vjerojatno	1E	2E	3E	4E
INDEKS OPASNOSTI RIZIKA				
Klasifikacija rizika		Kriterij rizika		
1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 3A		Neprihvatljivo, potrebne su promjene		
1D, 2C, 2D, 3B, 3C		Nepoželjno, napraviti promjene ako je moguće		
1E, 2E, 3D, 4A, 4B		Prihvatljivo uz pregled nadređenih		
3E, 4C, 4D, 4E		Prihvatljivo bez pregleda		

Slika 5. Prikaz matrice za procjenu rizika [15]

1.3. Pregled metoda za procjenu pouzdanosti

Prema Rausand i sur. [21], pouzdanost sustava jednaka je umnošku pouzdanosti pojedinačnih komponenti koje čine taj sustav; stoga, što je veći broj komponenti u sustavu, to je teže osigurati njegovu pouzdanost. U tom smislu, metode izračuna poput srednjeg vremena do pojave kvara (eng. *The mean time-to-failure*, MTTF) za diskretne događaje i srednjeg vremena između pojave kvarova (eng. *The mean time-between-failure*, MTBF) za kontinuirane događaje, kao i intenziteta kvarova (λ), široko se koriste za izračunavanje pouzdanosti ili raspoloživosti opreme radi planiranja održavanja sustava [22], [23]. Ove mjere pružaju planerima održavanja procjene o pouzdanosti sustava, ali ne daju dovoljno informacija za razumijevanje tijeka kvara i povezanih utjecaja [24]. Stoga se koriste dodatni alati koji analiziraju vjerojatnost kvara ili statistička mjerenja kako bi se kvar i tijek kvara mogli pripisati određenim komponentama u strojevima [25], [26].

Analiza pouzdanosti sustava povijesno je pomagala u planiranju održavanja od uvođenja organiziranih pristupa održavanju koji su evoluirali od jednostavnih popravaka i korektivnog održavanja do preventivnog održavanja i održavanja prema stanju [27], [28]. Pristupi koji se mogu koristiti za ovu svrhu uključuju analizu stabla grešaka (eng. *Fault Tree Analysis*, FTA), analizu slijeda događaja (eng. *Event Tree Analysis*, ETA), analizu grešaka i posljedica koje one izazivaju (eng. *Failure Mode Effects Analysis*, FMEA) te analizu kritičnosti grešaka i njihovih posljedica (eng. *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, FMECA), pri čemu se spomenuti pristupi mogu koristiti odvojeno ili kombinirano. Primjena metode FMEA ili FMECA smatra se preduvjetom za odobrenje broskog energetskog sustava od strane klasifikacijskih društava te je zbog toga ta metoda najčešća za procjenu sigurnosti [23]. Nadalje, FMEA kao preventivna metoda procjene pouzdanosti izvedena u fazi osnivanja sustava ili komponenti koristi empirijski pristup. Prednost metode je u tome što omogućuje sustavnu analizu na jednostavan način. Kriteriji procjene za određenu pojavu utvrđeni su tehnikom prioritarnog broja rizika (eng. *Risk Priority Number*, RPN) te se procjenjuju nedostaci pojedinih komponenti. Ti se rezultati kombiniraju kako bi se dobila kritičnost pojave. Nedostatak pristupa je da rezultati procjene mogu varirati ovisno o iskustvu osobe koja obavlja procjenu rizika [29]. FME(C)A (u kombinaciji s ETA-om i/ili FTA-om) predstavlja alat za procjenu sigurnosti koji koriste proizvođači motora za utvrđivanje visoko rizičnih (ili čak opasnih) eksploatacijskih scenarija i, prema potrebi, primjenjuju mjere za umanjenje rizika [30].

Abaei i sur. [31] predložili su i potvrdili postupak za predviđanje vjerojatnosti kvara u sustavu koji može dovesti do zastoja postrojenja bez nadzora. Postupak se sastoji od četiri koraka:

identifikacija komponenti osjetljivih na kvarove, multinominalno procesno stablo, konstruiranje Bayesove mreže, te Monte Carlo simulacije. Abaei i sur. [32] unaprijedili su prethodni postupak i također razmotrili redundantnost kako bi postigli otpornost. Rezultati ove studije pokazuju da se dodavanjem redundantnosti mogu postići značajne prednosti u pogledu skupih neplaniranih prekida i popravaka. BahooToroodi i sur. [33] koristili su Bayesove mreže (eng. *Bayesian Network*, BN) za procjenu pouzdanog operativnog vremena brodskog strojnog sustava kroz četiri različita stupnja autonomije. Weibullova raspodjela s dva parametra generirana je kako bi se modeliralo vrijeme pouzdanosti.

U okviru diplomskog rada obuhvaćena je FTA i BN analiza. Tablica 1 prikazuje prednosti i nedostatke tih dviju metoda. Analiza stabla grešaka koristi se za sistematično identificiranje i analiziranje potencijalnih uzroka kvarova unutar sustava. Omogućuje inženjerima da prepoznaju kritične komponente koje zahtijevaju posebnu pažnju u održavanju, čime se poboljšava cjelokupna pouzdanost sustava. Bayesove mreže koriste se za modeliranje složenih probabilističkih ovisnosti između različitih komponenata sustava, pružajući precizniju procjenu rizika i omogućujući donošenje informiranih odluka temeljenih na vjerojatnostima. Analiza stabla grešaka omogućuje procjenu posljedica različitih početnih događaja i njihovih potencijalnih utjecaja na sustav, čime se postiže dublje razumijevanje kako pojedinačni događaji mogu eskalirati i utjecati na cjelokupni sustav. Kombinacijom ovih metoda postiže se sveobuhvatan pristup analizi pouzdanosti, koji omogućuje preciznije planiranje održavanja, poboljšanje sigurnosti i povećanje operativne dostupnosti brodskih sustava.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci metoda za analize pouzdanosti [34]

Metoda	Prednosti	Nedostaci
FTA	<ol style="list-style-type: none"> 1. Omogućuje predviđanje pouzdanosti kvantificiranjem vjerojatnosti različitih kvarova i njihovih kombinacija 2. Vizualni prikaz omogućava učinkovito povezivanje događaja i kvara 3. Omogućava identifikaciju kritičnih slijedova kvara 4. FTA može pomoći u identifikaciji događaja visokog rizika ili načina kvara te se može koristiti za prioritizaciju resursa 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Razumijevanje i tumačenje stabla grešaka i vjerojatnosti zahtijeva stručno znanje 2. Razvoj FTA modela je izazovan za velike i složene sustave te zahtijeva detaljne podatke 3. FTA je usmjerena na pojedinačne kvarove, uslijed čega se mogu izostaviti kompleksni scenariji 4. FTA ne uključuje analizu ljudskih faktora u pouzdanosti
BN	<ol style="list-style-type: none"> 1. Efikasno modeliranje kompleksnih sustava s upotrebom kvantitativnih i kvalitativnih podataka 2. Kao usmjereni aciklički graf, BN omogućuje sveobuhvatnu vizualizaciju između sustava, komponenata i događaja 3. Mogućnost kreiranja prihvatljivog modela s ograničenim podacima korištenjem probabilističkog zaključivanja 4. Mogućnost provođenja analize integriranjem više tipova podataka 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Točnost modela ovisi o procjenama probabilističkih podataka 2. Struktura BN može biti kompleksna 3. Povećana složenost s rastom veličine modela može zahtijevati stručno znanje za interpretaciju 4. Osjetljivost na pretpostavke modela/stručne procjene koje mogu utjecati na kvalitetu rezultata 5. S porastom količine podataka, računaska složenost značajno se povećava

2. MATEMATIČKI MODELI

2.1. Analiza stabla grešaka

Analiza stabla grešaka, FTA, je sistematska deduktivna metoda koja se koristi za identifikaciju i analizu potencijalnih uzroka kvara sustava [35]. Ova metodologija, često primijenjena u inženjerskim disciplinama, započinje identifikacijom glavnog neželjenog događaja, poput kvara sustava ili nesreće. Potom se sustavno identificiraju različiti čimbenici ili događaji koji bi mogli dovesti do tog glavnog događaja [36]. Ovi čimbenici se prikazuju u obliku grafičke strukture nalik na stablo, gdje je glavni događaj korijen, a doprinosni čimbenici grane. Analiza stabla grešaka razvijena je početkom 1960-ih u laboratorijima *Bell Telephone*. Ta metoda uzima u obzir kvarove komponenti, kvarove podsustava, ljudske pogreške te njihovu kombinacije. Sustavi su gotovo uvijek sastavljeni od podsustava koji dalje uključuju komponente. Kako bi se odredila pouzdanost sustava, potrebno je procijeniti utjecaj tih podsustava i komponenti. Stablo grešaka je logički dijagram koji, koristeći logičke operatore poput I (AND) i ILI (OR), pokazuje koji podsustavi i komponente doprinose glavnom neželjenom događaju [37]. Prilikom konstruiranja stabla grešaka i provođenja analize, bitno je slijediti niz smjernica koje osiguravaju sveobuhvatnost i točnost cijelog procesa. Prvo, nužno je jasno definirati sustav koji se ispituje i sve pretpostavke koje se odnose na njega kako bi se postavila čvrsta osnova za daljnju analizu. Nakon toga, potrebno je identificirati kvar u sustavu, odnosno neželjeni glavni događaj koji će biti predmet istraživanja, što omogućuje usmjeravanje analize prema ključnim točkama. Zatim slijedi identifikacija svih mogućih uzroka koji mogu pridonijeti nastanku tog događaja. To se postiže korištenjem simbola stabla i formatom logičkog stabla kako bi se osiguralo obuhvatno razumijevanje svih potencijalnih faktora rizika. Nakon što su uzroci identificirani, ključno je razraditi stablo grešaka do najmanjih pojedinosti u skladu s postavljenim zahtjevima, što omogućuje detaljnu analizu svake moguće situacije i njihovih implikacija. Kada je stablo grešaka dovršeno, potrebno je provesti analizu s ciljem razumijevanja osnovne logike i međuovisnosti različitim slijedova kvara, kao i stjecanja uvida u jedinstvene načine kvarova unutar sustava, što omogućuje precizno identificiranje rizika. U kvantitativnoj fazi, svim osnovnim komponentama dodjeljuje se vjerojatnost njihove pojave i izračunava se vrijednost glavnog događaja [38]. Konačno, odabir najprikladnijih ispravnih mjera za sprječavanje ili ublažavanje potencijalnih kvarova te detaljno dokumentiranje analize i pažljivo praćenje provedenih mjera ključni su koraci u osiguravanju sigurnosti i pouzdanosti sustava [39].

2.1.1. Simboli stabla grešaka

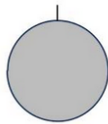



Postoje tri kategorije simbola korištenih u stablu grešaka: događaji, vrata i simboli prijenosa. Događaji su kvarovi koje se mogu dogoditi, ili izolirano ili u kombinaciji s drugim događajima, te uzrokuju glavni događaj. Vrata prikazuju odnose između događaja. Simboli prijenosa koriste se za prijenos grešaka s jednog lista na drugi [40].

Tipovi događaja:

- **Naredbeni događaj** (eng. *Command event*) - Pravokutni oblik je glavni ili umjereni događaj koji proizlazi iz kombinacije grešaka u stablu ispod njega.
- **Osnovni događaj** (eng. *Basic failure event*) – Predstavlja najniži događaj u stablu koji je prikazan kružnicom.
- **Ljudska pogreška ili nerazvijeni događaj** (eng. *Human error or undeveloped event*)
Nerazvijeni događaj je onaj koji ne zahtijeva daljnji razvoj i može, na primjer, biti događaj koji je vrlo malo vjerojatan. Prikazan je u obliku romba.





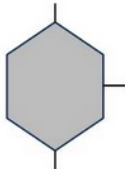
Tablica 2 prikazuje simbole FTA sa detaljnim opisom događaja.

Tablica 2. Opis simbola događaja

Objašnjenje	Simbol elementa
Osnovni inicijalni neuspjeh ili kvar.	
Događaj koji se obično očekuje ili je zajamčen da će se dogoditi. Općenito, imaju fiksnu vjerojatnost od 0 ili 1.	
Nerazvijeni događaji ne zahtijevaju daljnje razlaganje. To je događaj koji se dalje ne razrađuje jer daljnja analiza nije moguća zbog nedostatka informacija.	
Uvjetni događaj, u vezi je sa pojavljivanjem nekog drugog događaja.	

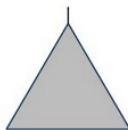
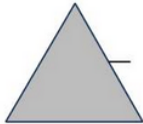
Simboli vrata opisuju logičku vezu između ulaznih i izlaznih događaja koji uzrokuju glavni događaj. Vrata I (AND) i ILI (OR), kao i ostala, osnovna su vrata koja prikazuju kako se izlazni događaj ostvaruje kada se dogodi određeni broj ulaznih događaja. Detaljan opis vrata nalazi se u Tablici 3.

Tablica 3. Opis simbola vrata

Objašnjenje	Simbol elementa
U OR vratima, izlazni događaj se događa čak i ako se dogodi samo jedan od ulaznih događaja. U smislu pouzdanosti sustava, to znači da ako je bilo koja ulazna komponenta u kvaru, tada će i sustav biti u kvaru.	
U AND vratima, izlazni događaj je pozitivan ako se dogode svi ulazni događaji. U smislu pouzdanosti sustava, možemo reći da sve komponente moraju biti u kvaru da bi sustav bio u kvaru.	
Simbol prijenosa "Transfer" u analizi stabla grešaka označava da se stablo dalje razvija na drugom mjestu unutar stabla.	
Pravilo ekskluzivnog ILI glasi: događaj na izlazu javlja se samo ako je ispunjen samo jedan od ulaznih uvjeta, ali ne i ako su svi uvjeti ispunjeni.	
Događaj će se dogoditi samo ako se dogode svi ulazni događaji i dodatni, uvjetni događaj.	

Prijenosni simboli olakšavaju povezivanje različitih stabala grešaka, uključujući i one koji se odnose na podsustave. To omogućuje bolje razumijevanje i praćenje veza između različitih dijelova sustava te olakšava analizu i upravljanje rizicima. U Tablici 4 se nalazi opis prijenosnih simbola.

Tablica 4. Opis prijenosnih simbola

Objašnjenje	Simbol elementa
Simbol prijenosa u analizi stabla grešaka ukazuje da se stablo dalje razvija na drugoj točki unutar stabla.	
Prijenos izlaza ukazuje na to da je ovaj dio stabla povezan s drugim dijelom unutar istog stabla.	

2.1.2. Izračuni unutar stabla grešaka

Nakon konstruiranja stabla grešaka, moguće je odrediti vjerojatnosti glavnog događaja. Za to je potrebno poznavati vjerojatnosti osnovnih događaja. Na temelju tih podataka mogu se izračunati niži događaji uzimajući u obzir različite vrste simbola [41]. Vjerojatnost nastanka greške na izlazu iz AND vrata određena je sljedećom formulom:

$$P(x_0) = \prod_{i=1}^n P(x_i) \quad (1)$$

gdje je

$P(x_0)$ – Vjerojatnost nastanka izlaznog događaja iz AND vrata,

n – Broj ulaznih događaja u AND vrata,

$P(x_i)$ – Vjerojatnost ulaznog događaja u AND vrata. Ulazni događaj je x_i za $i = 1, 2, 3, \dots, k$.

Vjerojatnost nastanka izlaznog događaja iz ILI (OR) vrata može se izračunati formulom:

$$P(y_0) = 1 - \prod_{i=1}^k \{1 - P(y_i)\} \quad (2)$$

gdje je

$P(y_0)$ – Vjerojatnost nastanka izlaznog događaja iz OR vrata,

k – Broj ulaznih događaja u OR vrata,

$P(y_i)$ – Vjerojatnost ulaznog događaja u OR vrata. Ulazni događaj je y_i za $i = 1, 2, 3, \dots, k$.

2.2. Bayesova mreža

Nezavisnosti i uvjetne nezavisnosti među varijablama mogu značajno smanjiti broj vjerojatnosti koje je potrebno navesti kako bi se opisala združena distribucija. Bayesove mreže (BN) se koriste u analizi pouzdanosti [42], za upravljanje nesigurnostima u složenim sustavima [43] i dijagnostiku kvarova [44], kao i za modeliranje sigurnosnih sustava [45]. Ovaj dio uvodi koncept BN kao strukture podataka koja omogućuje prikazivanje veza između varijabli. BN mogu efikasno predstaviti bilo koju zajedničku raspodjelu vjerojatnosti, često na vrlo sažet način. BN su grafičke strukture koje omogućuju prikazivanje uvjetnih vjerojatnosti između većeg broja varijabli (atributa) i donošenje zaključaka uvjetovanih prema tim varijablama [46]. Na temelju BN moguće je izračunati vjerojatnosti svih nepoznatih varijabli u sustavu na temelju već poznatih varijabli. Većina istraživanja o BN odvijala se tijekom osamdesetih godina, kada su se uspostavile osnovne strukture mreža (eng. *belief networks*, *causal networks*, *influence diagrams*). Tada su razvijeni alati za zaključivanje, a Bayesove mreže su počele nalaziti primjenu u različitim područjima. U devedesetima su se počeli razvijati i algoritmi za učenje BN iz podataka, a danas su BN i dalje važan model u računalnim sustavima koji se primjenjuju u različitim područjima ljudskog djelovanja [47]. BN je strukturirani graf u kojem svaki čvor sadrži kvantitativne podatke o vjerojatnosti. Specifikaciju mreže možemo opisati kako slijedi:

- Svaki čvor odgovara slučajnoj varijabli, koja može biti diskretna ili kontinuirana.
- Veze povezuju parove čvorova u jednom smjeru. Ako strelica ide od čvora X do čvora Y, onda se X naziva roditeljem, a Y dijete. Graf nema cikluse i stoga je usmjereni aciklički graf ili DAG (eng. *Directed Acyclic Graph*).
- Uvjetna vjerojatnost za svaki čvor X_i , uz dane njegove roditelje, $P(X_i | \text{Roditelji}(X_i))$, opisuje utjecaj roditelja na dijete.

BN omogućuju zaključivanje o vjerojatnostima bilo kojeg čvora u mreži ako su poznate tablice uvjetnih vjerojatnosti. Često se dogodi da čvor za koji se traži vjerojatnost nema poznate vjerojatnosti za neposredne prethodne čvorove, ali ipak je moguće izračunati vjerojatnosti.

Osnovna jednadžbom BN glasi:

$$P(H_i|A) = \frac{P(H_i)P(A|H_i)}{P(A)} \quad (3)$$

gdje je:

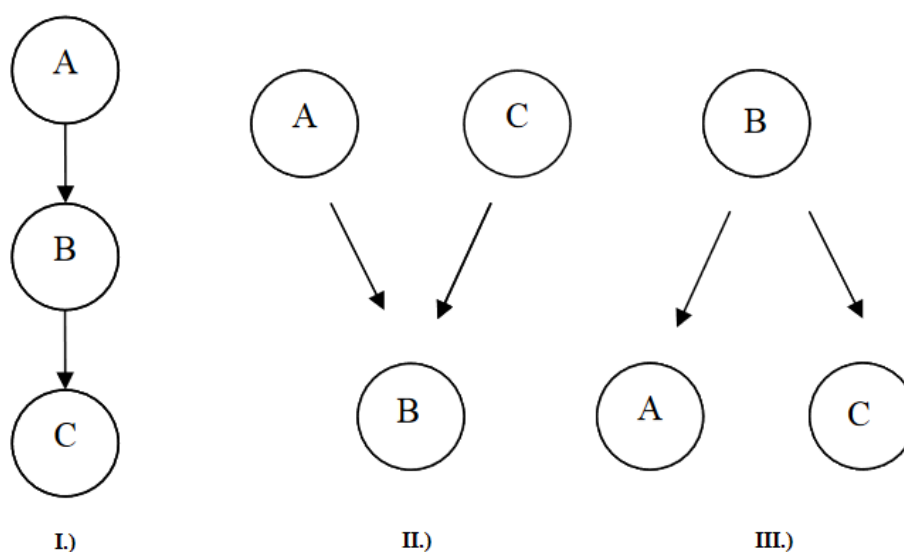
$P(H_i|A)$ uvjetnu vjerojatnost događaja H_i pod uvjetom da se dogodio događaj A ,

$P(A|H_i)$ vjerojatnost događaja A pod uvjetom da se dogodio događaj H_i ,

$P(H_i)$ je vjerojatnost događaja H_i ,

$P(A)$ je vjerojatnost događaja A .

Strelica u BN označava direktni utjecaj varijable (X) na varijablu (Y), implicirajući da bi uzroci trebali biti roditelji posljedica. Identifikacija tih uzroka često je intuitivna za domene, no određivanje samih vjerojatnosti može biti izazovnije. Nakon definiranja topologije BN, fokus prelazi na određivanje uvjetnih distribucija vjerojatnosti za svaku varijablu u odnosu na njene roditelje. Kombinacija čvorova i uvjetnih distribucija omogućuje implicitno definiranje potpune zajedničke distribucije za sve varijable. Ključno pitanje u BN je jesu li dvije varijable nezavisne. Odgovor na to pitanje pruža koncept D-separacije koji je prikazan na Slici 6.



Slika 6. Prikaz D-separacije

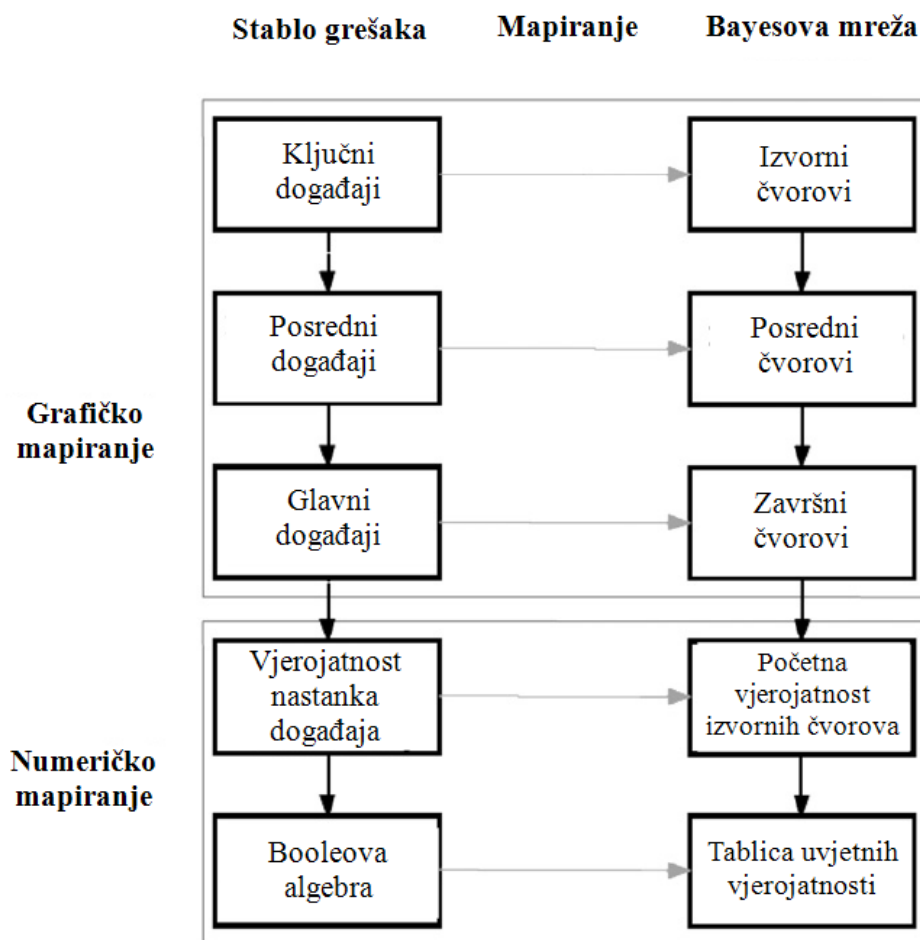
D-separacija istražuje nezavisnost između tri varijable, u ovom slučaju radi se o varijablama A, B i C. Prvi slučaj predstavlja uzročni lanac, drugi zajednički ishodi, a treći zajednički uzrok. Svaki kompleksniji scenarij može se razložiti na ove osnovne slučajeve. Ovaj pristup, ovisno o strukturi mreže, omogućuje različite puteve do istog rezultata, uz mogućnost procjene tijekom analize. Korištenjem D-separacije mogu se pronaći različiti pristupi rješavanju problema bez povećanja složenosti modela, čime se ističe kao korisna tehnika u analizi BN.

2.3. Mapiranje stabla grešaka u Bayesovu mrežu

Prije nego što se krene s mapiranjem stabla grešaka u Bayesovu mrežu, važno je ponoviti nekoliko osnovnih pretpostavki FTA analize. Te pretpostavke su sljedeće:

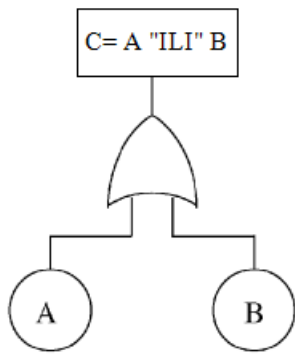
- i. Prva pretpostavka definira događaje kao binarne, što znači da se svaki događaj može klasificirati kao ispravan ili neispravan.
- ii. Druga pretpostavka naglašava statističku nezavisnost među događajima. Drugim riječima, pojavljivanje ili ne pojavljivanje jednog događaja ne utječe na pojavljivanje drugih događaja.
- iii. Treća pretpostavka upućuje na to da veze između događaja i njihovih uzroka mogu biti kompleksne, ali se često modeliraju korištenjem logičkih operatora "I" (konjunkcija) i "ILI" (disjunkcija).
- iv. Četvrta pretpostavka označava korijen stabla grešaka kao neželjeni glavni događaj koji se analizira. Ovo je centralna točka u analizi, jer se pokušava razumjeti kako različiti događaji i uzroci doprinose tom neželjenom događaju [48].

Algoritam mapiranja obuhvaćaju grafičke i numeričke korake. U grafičkom mapiranju, ključni događaji, posredni događaji i glavni događaj stabla grešaka prikazuju se kao izvorni, posredni i završni čvorovi odgovarajuće BN. Čvorovi BN povezani su na isti način kao odgovarajuće komponente u stablu grešaka. S druge strane, u numeričkom mapiranju, vjerojatnosti nastanka ključnih događaja dodjeljuju se odgovarajućim izvornim čvorovima. Slika 7 prikazuje pojednostavljeni postupak mapiranja stabala grešaka u Bayesovu mrežu [49].

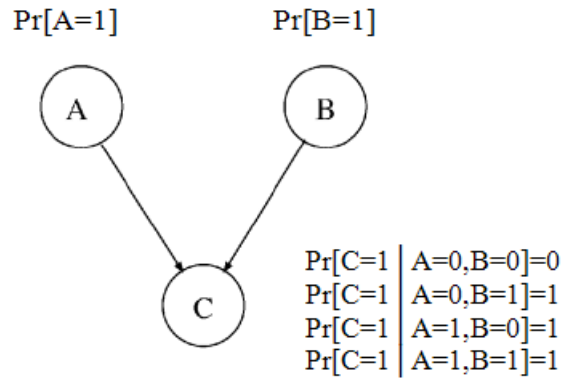


Slika 7. Postupak mapiranja FT u BN [49]

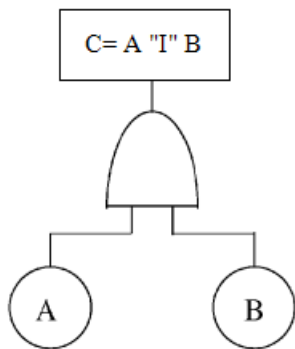
Na Slici 8 prikazan je proces mapiranja stabla grešaka u BN. Prvi primjer na slici demonstrira primjenu "ili" vrata u FT-u, gdje je ishod C (dijete) ostvariv ako je ispravan barem jedan od roditelja A ili B. Ovaj model opisuje situaciju u kojoj je potrebno samo jedno od potencijalnih uzroka za nastanak posljedice. U drugom primjeru, primjenjuju se "I" vrata u FT-u, što implicira da su oba roditelja A i B nužna kako bi se postigao ishod C. Ove relacije između događaja FT-a prenose se u strukturu (čvorove) BN, koja omogućuje kvantificiranje vjerojatnosti različitih ishoda. Na Slici 8 prikazane su odgovarajuće jednadžbe koje opisuju vjerojatnosti svih mogućih ishoda na temelju strukture FT-a.



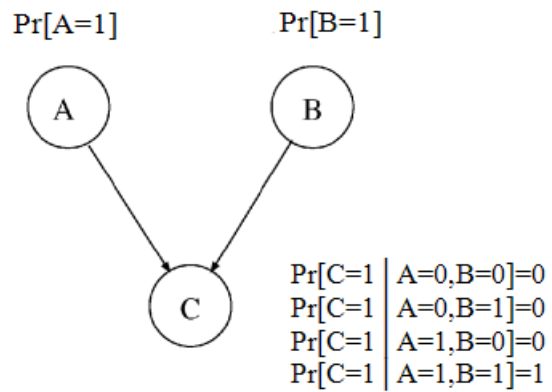
STABLO GREŠAKA: "ILI" VRATA



BAYESOVA MREŽA: "ILI" ČVOR



STABLO GREŠAKA: "I" VRATA



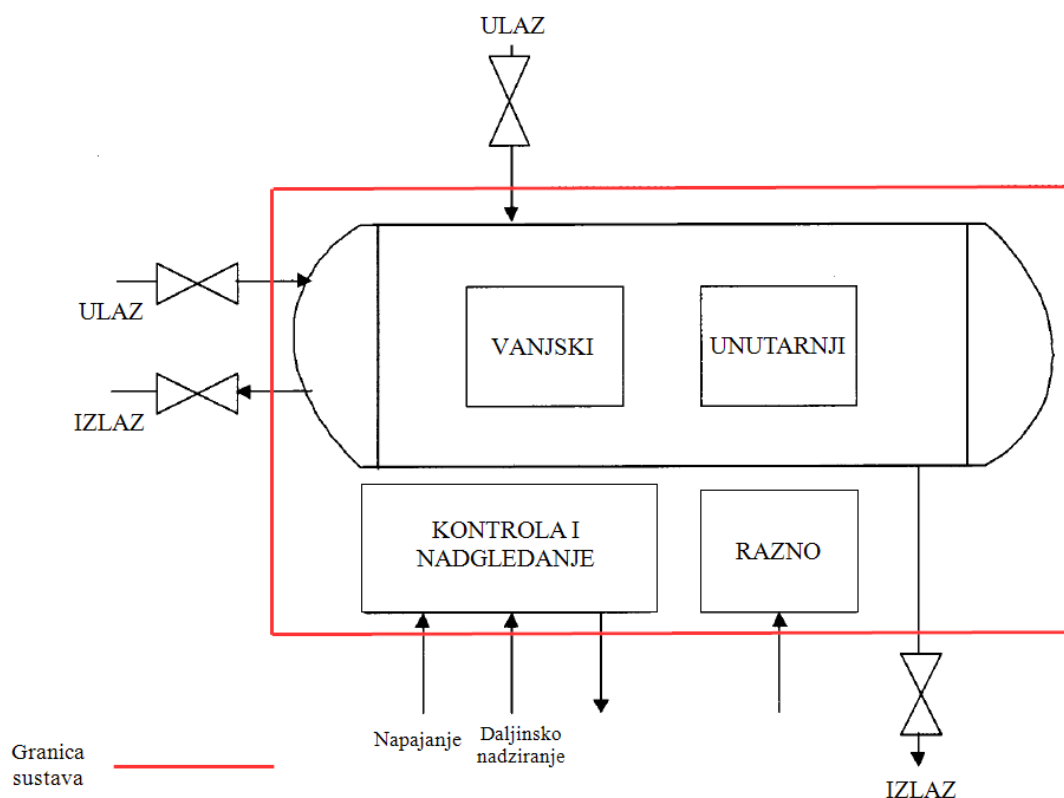
BAYESOVA MREŽA: "I" ČVOR

Slika 8. Prikaz "ILI" i "I" vrata u FT i BN [48]

3. ANALIZA ODABRANOG BRODSKOG SUSTAVA

3.1. Izmjenjivač topline (Shell & Tube)

Izmjenjivači topline se koriste za učinkoviti prijenos topline između dva fluida, s ili bez razdvajanja čvrstim zidom. Toplina se može prenositi između dva fluida putem isparavanja, kondenzacije ili bez promjene faze. Kada se stvori temperaturna razlika, energija u obliku topline se prenosi, a ta toplina može biti osjetna ili latentna toplina. Najčešći tip izmjenjivača topline koji se koristi na brodovima je *shell & tube* izmjenjivač topline. Koristi se u različitim pomoćnim sustavima brodskih postrojenja, kao što su sustavi za grijanje vode, grijanje goriva, te hlađenje ulja. Glavni dijelovi standardnog *shell & tube* izmjenjivača topline su oplata, cijevi, rebra i ploče za cijevi. Osnovna funkcija cijevi je prijenos topline s fluida na strani oplata na fluid unutar cijevi i obrnuto. Shematski prikaz tipičnog *shell & tube* izmjenjivača topline nalazi se na Slici 9 [50].



Slika 9. Prikaz granice sustava izmjenjivača topline [51]

Prilikom analize izmjenjivača topline, ključno je precizno definirati granice sustava. Granice sustava obuhvaćaju sve bitne komponente koje izravno utječu na funkcionalnost i performanse uređaja. Komponente sustava navedene su u Tablici 5. Kvarovi koji se dogode na spojevima

(npr. curenje) uključeni su u analizu, osim ako se specifično ne zna da su nastali na povezanom elementu izvan definirane granice [51].

Tablica 5. Prikaz podsustava i komponenti odabranog sustava [51]

IZMJENJIVAČ TOPLINE			
Vanjski elementi	Unutarnji elementi	Kontrola i nadzor	Razno
<ul style="list-style-type: none"> • Potporni elementi • Kućište • Ventili i cjevovodi • Instrumenti 	<ul style="list-style-type: none"> • Rebra • Cijevi • Instrumenti • Brtve 	<ul style="list-style-type: none"> • Aktuator • Upravljačka jedinca • Nadzor • Ventili • Napajanje • Kablovi i spojne kutije 	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilator s motorom

Kritične greške identificirane su kao kvarovi koji uzrokuju trenutani i potpuni gubitak funkcionalnosti sustava, dovodeći do nemogućnosti pružanja traženih performansi.

Popis kritičnih kvarova za odabrani sustav prema OREDA izvješću [51]:

- AIR – abnormalno očitavanje instrumenta (eng. *Abnormal instrument reading*),
- ELP – vanjsko curenje procesnog medija (eng. *External leakage – Process medium*),
- STD – strukturni nedostatak (eng. *Structural deficiency*),
- PDE – odstupanje parametara (eng. *Parameter deviation*).

3.2. Analiza odabranog sustava

Odabrani sustav je složen i uključuje četiri kritične greške koje su detaljno razložene na pojedinačne komponente koje pridonose tim greškama. Na primjer, jedna od kritičnih grešaka, AIR, može biti uzrokovana problemima na razini senzora tlaka, senzora temperature ili drugih specifičnih uređaja koji nadgledaju parametre. Svaka od tih komponenti ima značajan utjecaj na opću sigurnost i operativnu učinkovitost izmjenjivača topline. Cilj ove analize je dublje

razumijevanje načina na koji pojedine komponente međusobno djeluju i kako njihova funkcionalnost ili neispravnost mogu utjecati na performanse i pouzdanost cijelog sustava.

Kao što je objašnjeno u poglavlju 1.1 o "bath-tube" krivulji i njenom funkcioniranju, ovaj koncept služi kao model za opisivanje promjena intenziteta kvarova tijekom različitih faza životnog vijeka tehničkih sustava. *Bath-tube* krivulja ilustrira kako intenzitet kvarova može opadati tijekom razdoblja uhadavanja, ostati gotovo konstantan tijekom korisnog vijeka trajanja te značajno rasti u razdoblju dotrajalosti. Pretpostavlja se da funkcija intenziteta kvarova ostaje konstantna tijekom uporabnog vijeka, što znači da uređaj ne propada tijekom te faze. Starenje obično započinje kada uređaj uđe u razdoblje dotrajalosti. Stoga su sve procjene intenziteta kvara koje su prikazane u ovom radu temeljene na pretpostavci da je intenzitet kvara konstantan i neovisan o vremenu, izražen kao $z(t) = \lambda$. To znači da su intenziteti kvarova pretpostavljeni kao eksponencijalno distribuirani s parametrom λ . Za određivanje parametra λ , potrebni su nam podaci o broju grešaka i ukupnom vremenu u radnom vijeku [51]. Parametar λ izračunava se prema:

$$\lambda = \frac{\text{broj kvarova}}{\text{ukupno vrijeme u radnom vijeku}} = \frac{n}{\tau} \quad (4)$$

Za daljnju analizu, uzeto je razdoblje od 10^5 h, a vjerojatnost pojave se računa koristeći izraz:

$$P = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (5)$$

gdje su

λ – intenzitet kvarova,

t – vrijeme promatranja.

3.3 Konstruiranje stabla grešaka

3.3.1. Stablo grešaka za kritični kvar AIR

U Tablici 6 prikazani su postotci koji predstavljaju udio pojedinih kvarova u ukupnom intenzitetu kvarova. Za izračunavanje vjerojatnosti pojave specifičnih kvarova potrebno je koristiti izraz (5).

Tablica 6. Prikaz intenziteta kvarova i pojedinih udjela

$\lambda (AIR) = 11,78 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$		
Razina unutar mjernog instrumenta 2,9 %	Instrument temperature 14,49 %	Nepoznato 8,7 %
<ul style="list-style-type: none"> • Neispravno podešen instrument 2,9 % 	<ul style="list-style-type: none"> • Labavost instrumenta 1,45 % • Opći kvar instrumenta 7,25 % • Kvar upravljanja 4,35 % • Korozija 1,45 % 	<ul style="list-style-type: none"> • Neispravan signal alarma 7,25 % • Bez signala alarma 1,45 %

Vrijeme promatranog razdoblja iznosi $t = 10^5 \text{ h}$.

$$P(AIR) = 1 - e^{-11,78 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5} = 0,6921 \quad (6)$$

Sljedeća tablica je oblikovana tako da se pojedine vrijednosti, odnosno postotci, množe s ukupnim intenzitetom kvarova koju smo prethodno izračunali. Vjerojatnosti pojave za svaki primarni događaj prezentirane su u Tablici 7. Na temelju tih vjerojatnosti, izračunata je *a priori* vjerojatnost za glavni događaj.

Tablica 7. Vjerojatnost pojave kvarova u sustavu izmjenjivača topline

Broj	Komponenta	Simbol	Vjerojatnost pojave
1	Razina unutar mjernog instrumenta	IL	<i>OR-gate</i>
2	Neispravno podešen instrument	OA	0,0201
3	Instrument temperature	IT	<i>OR-gate</i>
4	Labavost instrumenta	LI	0,0100
5	Opći kvar instrumenta	IS	0,0502
6	Kvar upravljanja	CF	0,0301
7	Korozija	CS	0,0100
8	Nepoznato	UN	<i>OR-gate</i>
9	Neispravan signal alarma	NF	0,0502
10	Bez signala alarma	NA	0,0100

Koristeći jednadžbu (2), moguće je izračunati nepoznate vjerojatnosti povezane s komponentama navedenim u Tablici 7. Ova jednadžba omogućuje sustavno određivanje vjerojatnosti glavnog događaja na temelju pojedinačnih događaja. Pravilnim korištenjem jednadžbe, moguće je kvantitativno procijeniti vjerojatnosti svakog ključnog elementa u analizi.

$$\begin{aligned}
 P(IT) &= 1 - \prod_{i=1}^4 \{1 - P(y_i)\} \\
 &= 1 - \{1 - P(LI)\} \cdot \{1 - P(IS)\} \cdot \{1 - P(CF)\} \cdot \{1 - P(CS)\}
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$= 1 - \{1 - 0,0100\} \cdot \{1 - 0,0502\} \cdot \{1 - 0,0301\} \cdot \{1 - 0,0100\} = 0,0972$$

$$\begin{aligned}
 P(UN) &= 1 - \prod_{i=1}^2 \{1 - P(y_i)\} \\
 &= 1 - \{1 - P(NF)\} \cdot \{1 - P(NA)\}
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$= 1 - \{1 - 0,0100\} \cdot \{1 - 0,0502\} = 0,0597$$

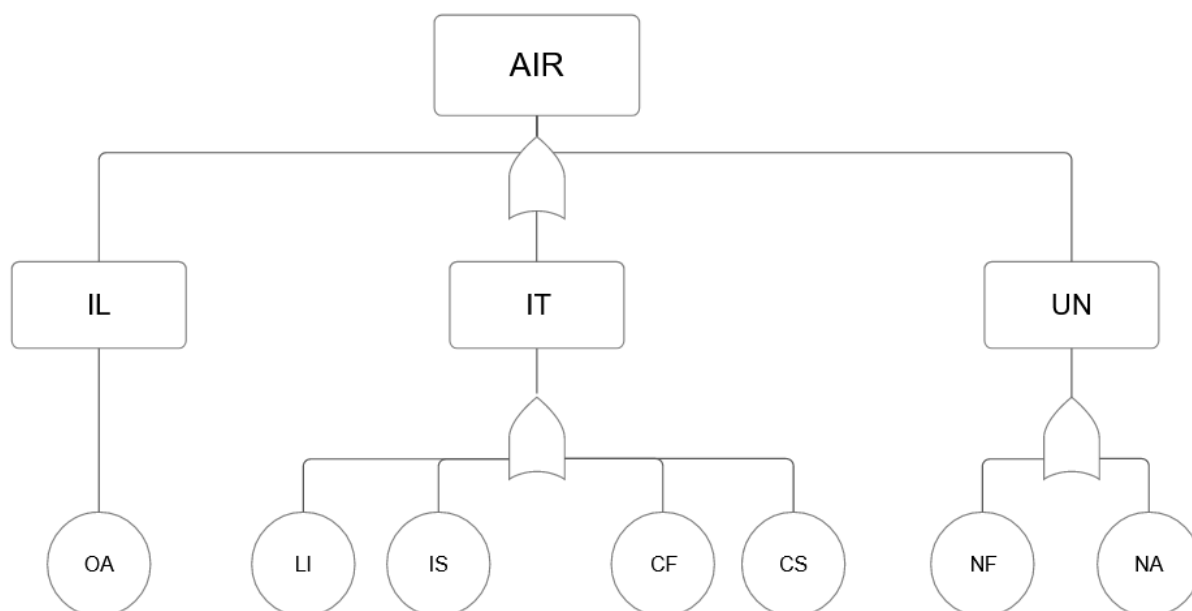
Analogno prethodnom pristupu, vjerojatnost glavnog događaja izračunava se na isti način kao i za prethodne dvije greške, s obzirom na to da se koristi logička vrata OR.

$$P(AIR) = 1 - \prod_{i=1}^3 \{1 - P(y_i)\}$$

$$= 1 - \{1 - P(IL)\} \cdot \{1 - P(IT)\} \cdot \{1 - P(UN)\} \quad (9)$$

$$= 1 - \{1 - 0,0201\} \cdot \{1 - 0,0972\} \cdot \{1 - 0,0597\} = 0,1681$$

Vjerojatnost pojave glavnog događaja iznosi 0,1681 unutar vremenskog razdoblja od 10^5 h. Analizom ponašanja komponenti i međudogađaja, razvijena je FT koja je prikazana na Slici 10.



Slika 10. Prikaz stabla grešaka za kritični kvar AIR

3.3.2. Stablo grešaka za kritični kvar ELP

U Tablici 8 prikazani su postotci koji predstavljaju udio pojedinih kvarova u ukupnoj stopi kvarova.

Tablica 8. Prikaz intenziteta kvarova i pojedinih udjela

$\lambda \text{ (ELP)} = 1,96 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$		
Protok unutar mjernog instrumenta 1,45 %	Ventili 2,9 %	Nepoznato 11,59 %
<ul style="list-style-type: none"> Curenje 1,45 % 	<ul style="list-style-type: none"> Curenje 2,9 % 	<ul style="list-style-type: none"> Nepoznato 7,25 % Mehanički kvar – općenito 2,9 % Labavost 1,45 %

Vjerojatnost pojave se izračunava prema izrazu (5).

Vrijeme promatranog razdoblja iznosi $t = 10^5$ h.

$$P(\text{ELP}) = 1 - e^{-1,96 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5} = 0,1780 \quad (10)$$

Sljedeća tablica je oblikovana tako da se pojedine vrijednosti, odnosno postotci, množe s ukupnim intenzitetom kvarova koju smo prethodno izračunali. Tablica 9 prikazuje vjerojatnosti pojave za svaki osnovni događaj.

Tablica 9. Vjerojatnost pojave kvarova u sustavu izmjenjivača topline

Broj	Komponenta	Simbol	Vjerojatnost pojave
1	Protok unutar mjernog instrumenta	IF	<i>OR-gate</i>
2	Curenje	LE1	0,0025
3	Ventili	VL	<i>OR-gate</i>
4	Curenje	LE2	0,0051
5	Nepoznato	UN	<i>OR-gate</i>
6	Nepoznato	UN1	0,0129
7	Mehanički kvar - općenito	MF	0,0052
8	Labavost	LO	0,0026

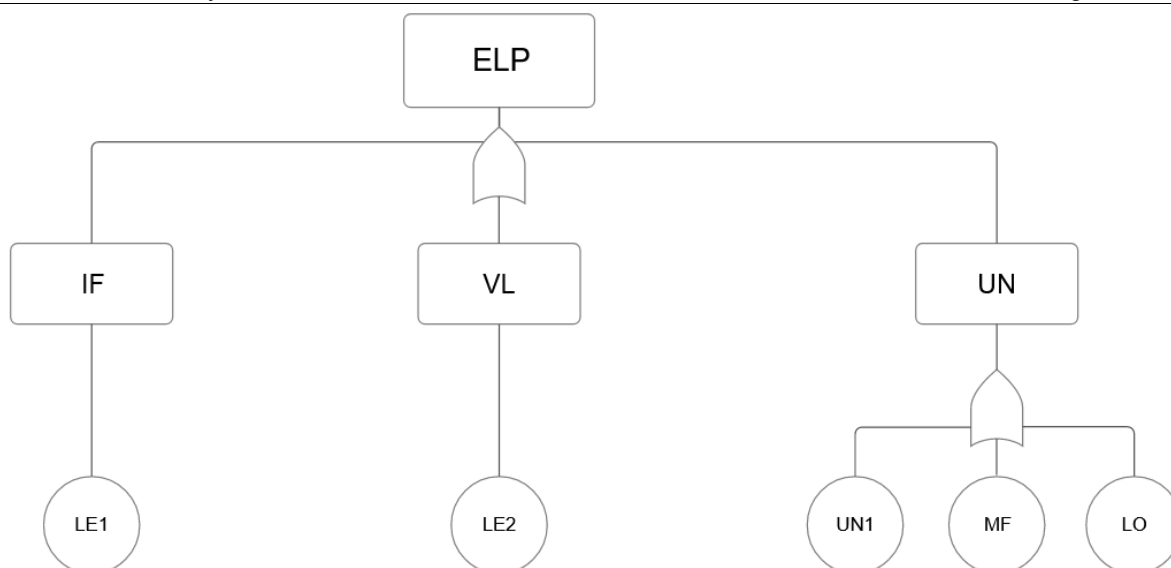
Primjenom jednadžbe (2), moguće je izračunati nepoznate vjerojatnosti povezane s komponentama navedenim u Tablici 9. Ova jednadžba omogućuje sustavno određivanje vjerojatnosti glavnog događaja na temelju pojedinačnih događaja. Pravilna primjena ove jednadžbe omogućuje kvantitativnu procjenu vjerojatnosti svake ključne komponente u analizi. Greške s protokom unutar mjernog instrumenta i ventila se ne razgraničavaju na više komponenti u stablu grešaka, stoga su vjerojatnosti njihovog pojavljivanja jednake kao u slučaju niže navedenih grešaka. Slika 11 prikazuje stablo grešaka za komponentu ELP.

$$\begin{aligned}
 P(UN) &= 1 - \prod_{i=1}^3 \{1 - P(y_i)\} \\
 &= 1 - \{1 - P(UN1)\} \cdot \{1 - P(MF)\} \cdot \{1 - P(LO)\} \\
 &= 1 - \{1 - 0,0129\} \cdot \{1 - 0,0051\} \cdot \{1 - 0,0025\} = 0,0205
 \end{aligned} \tag{11}$$

Analogno prethodnom pristupu, vjerojatnost glavnog događaja izračunava se na isti način kao i za prethodnu grešku, s obzirom na to da se koristi logička vrata OR.

$$\begin{aligned}
 P(ELP) &= 1 - \prod_{i=1}^3 \{1 - P(y_i)\} \\
 &= 1 - \{1 - P(IF)\} \cdot \{1 - P(VL)\} \cdot \{1 - P(UN)\} \\
 &= 1 - \{1 - 0,0025\} \cdot \{1 - 0,0051\} \cdot \{1 - 0,0205\} = 0,0281
 \end{aligned} \tag{12}$$

Vjerojatnost pojave glavnog događaja iznosi 0,0281 unutar vremenskog razdoblja od 10^5 h.



Slika 11. Prikaz stabla grešaka za kritični kvar ELP

3.3.3. Stablo grešaka za kritični kvar STD

U Tablici 10 prikazani su postotci koji predstavljaju udio pojedinih kvarova u ukupnoj stopi kvarova.

Tablica 10. Prikaz intenziteta kvarova i pojedinih udjela

$\lambda (STD) = 1,96 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$		
Cjevovodi 2,9 %	Ventili 1,45 %	Nepoznato 5,8 %
<ul style="list-style-type: none"> Korozija 2,9 % 	<ul style="list-style-type: none"> Trošenje 1,45 % 	<ul style="list-style-type: none"> Nepoznato 2,9 % Kvar materijala– općenito 1,45 % Korozija 1,45 %

Vjerojatnost pojave se izračunava prema izrazu (5).

Vrijeme promatranog razdoblja iznosi $t = 10^5 \text{ h}$.

$$P(STD) = 1 - e^{-1,96 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5} = 0,1780 \quad (13)$$

Sljedeća tablica je oblikovana tako da se pojedine vrijednosti, odnosno postotci, množe s ukupnim intenzitetom kvarova kojeg smo prethodno izračunali. Tablica 11 prikazuje vjerojatnosti pojave za svaki osnovni događaj.

Tablica 11. Vjerojatnost pojave kvarova u sustavu izmjenjivača topline

Broj	Komponenta	Simbol	Vjerojatnost pojave
1	Cjevovodi	PI	<i>OR-gate</i>
2	Korozija	CO	0,0052
3	Ventili	VL	<i>OR-gate</i>
4	Trošenje	WE	0,0026
5	Nepoznato	UN	<i>OR-gate</i>
6	Nepoznato	UN1	0,0052
7	Kvar materijala - općenito	MF	0,0026
8	Korozija	CO1	0,0026

Jednadžba (2) omogućuje izračunavanje vjerojatnosti za komponente navedene u prethodnoj tablici, što omogućuje sustavno određivanje vjerojatnosti za glavni događaj na temelju pojedinačnih komponenti. Pravilna primjena ove jednadžbe omogućuje kvantitativnu procjenu vjerojatnosti svake ključne komponente u analizi.

Greške u cjevovodima i ventilima ne razgraničavaju se na više komponenti u stablu grešaka, pa su vjerojatnosti njihovog pojavljivanja jednake onima u donjim greškama. Slika 12 prikazuje stablo grešaka za komponentu STD.

$$\begin{aligned}
 P(UN) &= 1 - \prod_{i=1}^3 \{1 - P(y_i)\} \\
 &= 1 - \{1 - P(UN1)\} \cdot \{1 - P(MF)\} \cdot \{1 - P(CO1)\}
 \end{aligned} \tag{14}$$

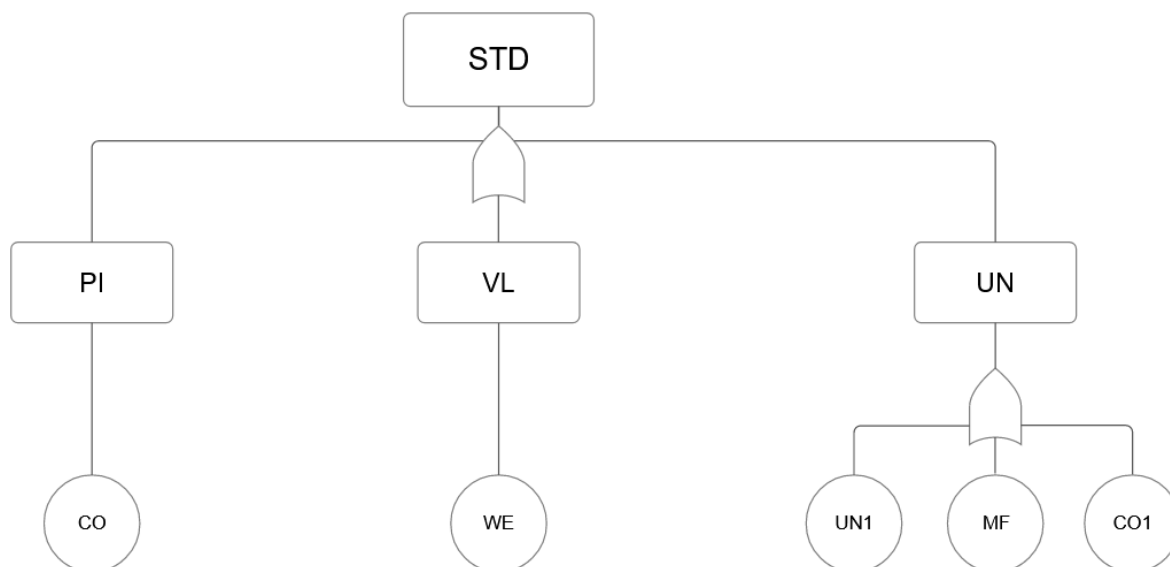
$$= 1 - \{1 - 0,0052\} \cdot \{1 - 0,0026\} \cdot \{1 - 0,0026\} = 0,0103$$

Analogno prethodnom pristupu, vjerojatnost glavnog događaja izračunava se na isti način kao i za prethodnu grešku, s obzirom na to da se koristi logička vrata OR.

$$\begin{aligned}
 P(STD) &= 1 - \prod_{i=1}^3 \{1 - P(y_i)\} \\
 &= 1 - \{1 - P(PI)\} \cdot \{1 - P(VL)\} \cdot \{1 - P(UN)\}
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$= 1 - \{1 - 0,0052\} \cdot \{1 - 0,0026\} \cdot \{1 - 0,0103\} = 0,0179$$

Vjerojatnost pojave glavnog događaja iznosi 0,0179 unutar vremenskog razdoblja od 10^5 h.



Slika 12. Prikaz stabla grešaka za kritični kvar STD

3.3.4. Stablo grešaka za kritični kvar PDE

U Tablici 12 prikazani su postotci koji predstavljaju udio pojedinih kvarova u ukupnoj stopi kvarova.

Tablica 12. Prikaz intenziteta kvarova i pojedinih udjela

λ (PDE) = $5,89 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$			
Kontrolna jedinica 1,45 %	Protok unutar mjernog instrumenta 1,45 %	Tlakomjer 4,35 %	Ostalo 2,9 %
<ul style="list-style-type: none"> • Blokada/začepljenje 1,45 % 	<ul style="list-style-type: none"> • Kvar upravljanja 1,45 % 	<ul style="list-style-type: none"> • Neispravno podešen instrument 1,45 % • Kvar upravljanja 2,9 % 	<ul style="list-style-type: none"> • Kvar upravljanja 2,9 %

Vjerojatnost pojave se izračunava prema izrazu (5).

Vrijeme promatranog razdoblja iznosi $t = 10^5$ h.

$$P(PDE) = 1 - e^{-5,89 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5} = 0,4451 \quad (16)$$

Sljedeća tablica je oblikovana tako da se pojedine vrijednosti, odnosno postotci, množe s ukupnim intenzitetom kvarova kojeg smo prethodno izračunali. Tablica 13 prikazuje vjerojatnosti pojave za svaki osnovni događaj.

Tablica 13. Vjerojatnost pojave kvarova u sustavu izmjenjivača topline

Broj	Komponenta	Simbol	Vjerojatnost pojave
1	Kontrolna jedinica	CU	<i>OR-gate</i>
2	Blokada/začepljenje	BP	0,0065
3	Protok unutar mjernog instrumenta	IF	<i>OR-gate</i>
4	Kvar upravljanja	CF	0,0065
5	Tlakomjer	IP	<i>OR-gate</i>
6	Neispravno podešen instrument	OA	0,0065
7	Kvar upravljanja	CF1	0,0129
8	Ostalo	OT	<i>OR-gate</i>
9	Kvar upravljanja	CF2	0,0129

Jednadžba (2) omogućuje izračunavanje vjerojatnosti za komponente iz prethodne tablice, što omogućuje sustavno određivanje vjerojatnosti glavnog događaja na temelju pojedinačnih komponenti.

Greške kao što su blokada/začepljenje i kvar upravljanja ne razgraničavaju se na više komponenti u stablu grešaka, pa su vjerojatnosti njihovog pojavljivanja jednake onima u donjim greškama. Slika 13 prikazuje stablo grešaka za komponentu PDE.

$$\begin{aligned}
 P(IP) &= 1 - \prod_{i=1}^2 \{1 - P(y_i)\} \\
 &= 1 - \{1 - P(OA)\} \cdot \{1 - P(CF1)\} \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$= 1 - \{1 - 0,0065\} \cdot \{1 - 0,0129\} = 0,0193$$

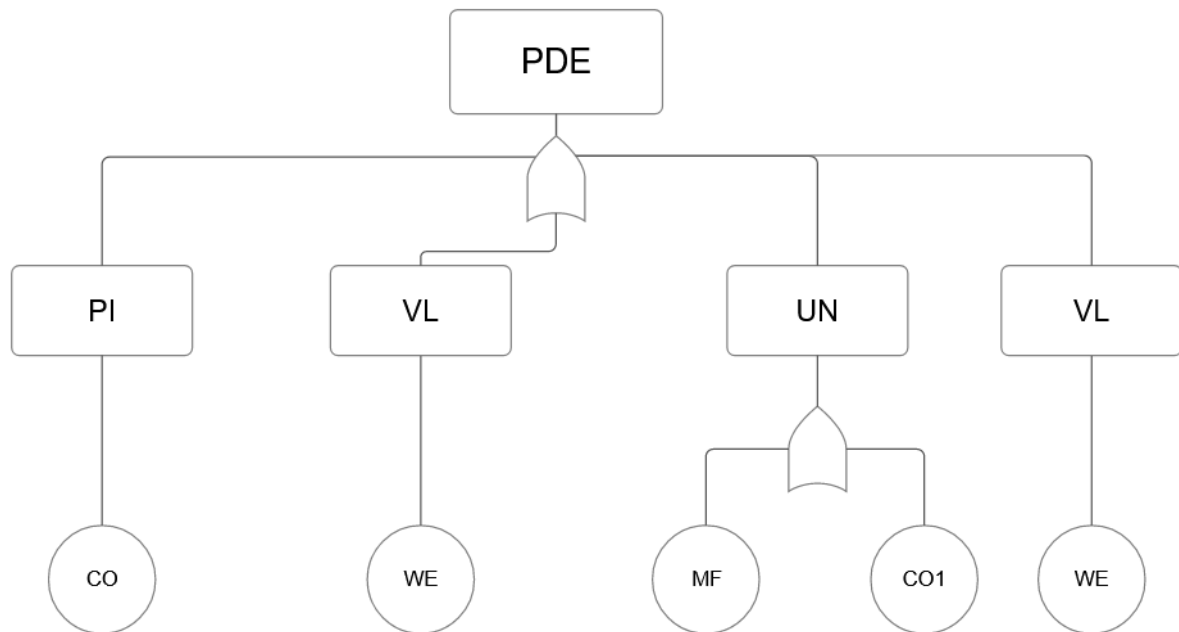
Analogno prethodnom pristupu, vjerojatnost glavnog događaja izračunava se na isti način kao i za prethodnu grešku, s obzirom na to da se koristi logička vrata OR.

$$P(PDE) = 1 - \prod_{i=1}^4 \{1 - P(y_i)\}$$

$$= 1 - \{1 - P(CU)\} \cdot \{1 - P(IF)\} \cdot \{1 - P(IP)\} \cdot \{1 - P(OT)\} \quad (18)$$

$$= 1 - \{1 - 0,0065\} \cdot \{1 - 0,0065\} \cdot \{1 - 0,0193\} \cdot \{1 - 0,0129\} = 0,0444$$

Vjerojatnost pojave glavnog događaja iznosi 0,0444 unutar vremenskog razdoblja od 10^5 h.



Slika 13. Prikaz stabla grešaka za kritični kvar PDE

3.4. Mapiranje Bayesove mreže

Kao što je detaljno objašnjeno u poglavlju 2.3, postupak mapiranja BN iz FTA uključuje nekoliko ključnih koraka. U grafičkom segmentu, primarni događaji, međudogađaji i glavni događaji FT-a prikazani su kao korijenski, međučvorovi i završni čvorovi u odgovarajućoj Bayesovoj mreži. Čvorovi BN-a su povezani na način koji odražava strukturu i odnose komponenti u FT-u. Numerički dio mapiranja uključuje dodjelu početnih vjerojatnosti korijenskim čvorovima na temelju vjerojatnosti pojave primarnih događaja. Za svaki međučvor i završni čvor razvija se tablica uvjetne vjerojatnosti (eng. *Conditional Probability Table*, CPT), koja se formira prema vrsti logičkih vrata korištenih u FT-u. Ovakav pristup omogućuje preciznu kvantitativnu procjenu rizika i pouzdanosti sustava.

3.4.1. Mapiranje Bayesove mreže za kritični kvar AIR

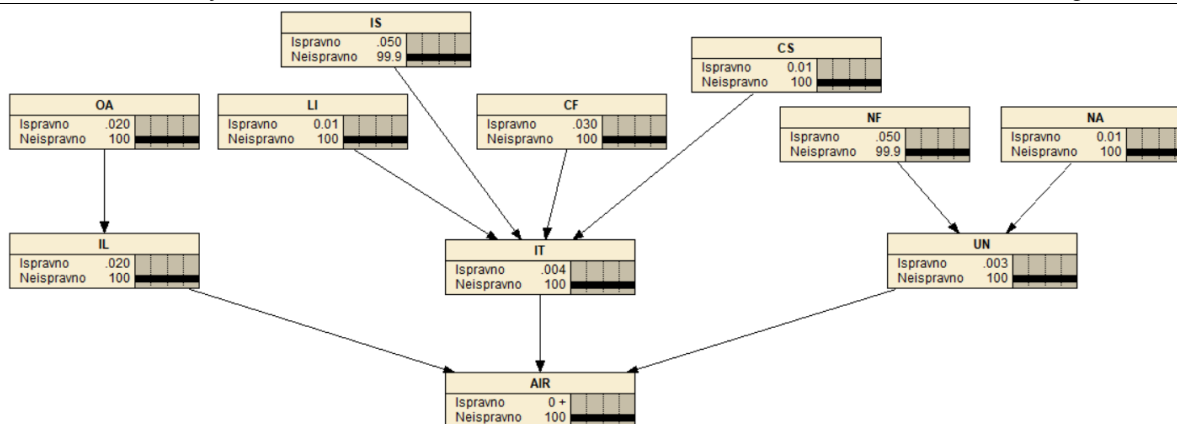
Prije nego što mapiramo Bayesovu mrežu (BN), važno je definirati tablice uvjetne vjerojatnosti kako bismo precizno definirali vjerojatnosti pojave svakog čvora u mreži. Ova tablica služi kao temeljni korak u konstrukciji BN-a jer specificira ovisnosti između čvorova, što omogućuje daljnje kvantitativno modeliranje rizika i pouzdanosti sustava. Tablica 14 prikazuje primjer CPT tablice s vjerojatnostima. U ovom slučaju radi se o greški IT, koja se dijeli na četiri podgreške, te je moguće formirati CPT tablicu s 16 različitih kombinacija.

Tablica 14. Prikaz CPT tablice za grešku IT

LI	IS	CF	CS	Ispravno	Neispravno
0	0	0	0	0	1
0	0	0	1	0,0100	0,9900
0	0	1	0	0,0301	0,9699
0	0	1	1	0,0398	0,9602
0	1	0	0	0,0502	0,9498
0	1	0	1	0,0597	0,9403
0	1	1	0	0,0788	0,9212
0	1	1	1	0,0880	0,9120
1	0	0	0	0,0100	0,9900
1	0	0	1	0,0199	0,9801
1	0	1	0	0,0398	0,9602
1	0	1	1	0,0494	0,9506
1	1	0	0	0,0597	0,9403
1	1	0	1	0,0691	0,9309
1	1	1	0	0,0880	0,9120
1	1	1	1	0,0971	0,9029

U prethodnoj tablici, nula označava da greška nije prisutna (neispravna), dok jedinica označava da greška postoji (ispravna), što implicira da se greška dogodila u sustavu.

U odjeljku 3.3.1 izračunata je vjerojatnost glavnog događaja koja iznosi 0,1681 za grešku AIR. Kako bi se kvalitetno analizirala ova pojava, nužno je identificirati kritične primarne događaje i minimalne rezne skupove (eng. *minimal cut-sets*) koji dovode do pojave glavnog događaja. Važnost svake komponente procjenjuje se uklanjanjem tog događaja i ponavljanjem analize stabla grešaka. Svi dobiveni rezultati transformiraju se u faktor poboljšanja, kao što je prikazano u Tablici 15. Ovaj faktor označava udio doprinosa svakog događaja nastanku glavnog događaja, pri čemu najviši faktor zahtijeva hitnu intervenciju [52]. Korištenjem programskog alata Netica dobije se Slika 14 koja prikazuje Bayesovu mrežu za navedenu komponentu [53].

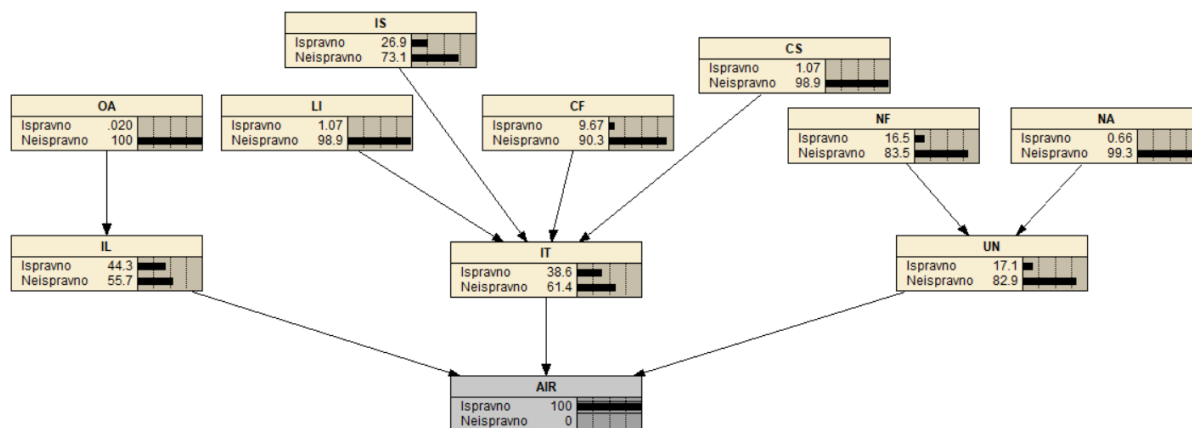


Slika 14. Prikaze Bayesove mreže za kritični kvar AIR

Tablica 15. Prikaz faktora poboljšanja

Događaj	Vjerojatnost	Faktor poboljšanja
0	0,1681	0
C1	0,1597	0,0084
C2	0,1241	0,0440
C3	0,1596	0,0085
C4	0,1422	0,0259
C5	0,1241	0,0440
C6	0,1596	0,0085
C7	0,1511	0,0170

Tablica 15 prikazuje faktore poboljšanja, pri čemu najveće vrijednosti imaju C2 i C5, koje predstavljaju greške poput neispravnog signala alarma i općeg kvara instrumenta. To ukazuje na njihov značajan utjecaj na pojavu sistemske greške. Cilj ove analize je optimizacija sustava smanjenjem učestalosti ovih kritičnih grešaka, čime se poboljšava ukupna pouzdanost i učinkovitost sustava. Slika 15 prikazuje rezultate numeričke analize, pri čemu se vidi da greška IS ima najveći doprinos glavnom događaju, s posteriornom vjerojatnošću od 26,9 %.



Slika 15. Prikaz posteriorne vrijednosti za grešku IS

3.4.2. Mapiranje Bayesove mreže za kritični kvar ELP

U skladu s prethodnom analizom, potrebno je slijediti identične korake i za ovaj scenarij. Tablica 16 prikazuje primjer CPT tablice s vjerojatnostima za grešku UN. S obzirom na to da se greška UN dijeli na tri podgreške, moguće je formirati CPT tablicu s 8 različitih kombinacija.

Tablica 16. Prikaz CPT tablice za grešku UN

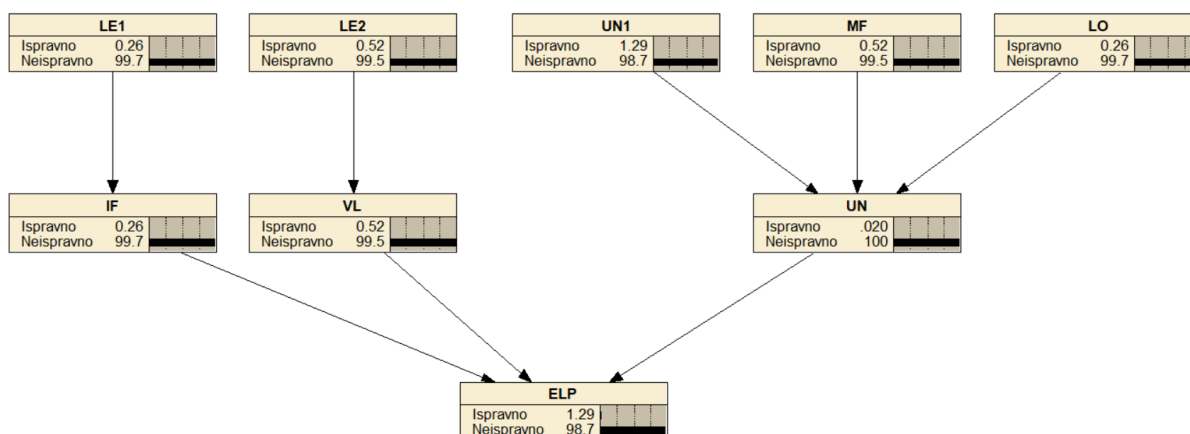
UN1	MF	LO	Ispravno	Neispravno
0	0	0	0	1
0	0	1	0,0026	0,9974
0	1	0	0,0052	0,9948
0	1	1	0,0077	0,9923
1	0	0	0,0129	0,9871
1	0	1	0,0154	0,9846
1	1	0	0,0180	0,9820
1	1	1	0,0205	0,9795

U prethodnom poglavlju detaljno je opisan način identificiranja kritičnih događaja, a u ovom poglavlju koristi se isti metodološki pristup. Rezultati faktora poboljšanja prikazani su u Tablici 17.

Tablica 17. Prikaz faktora poboljšanja

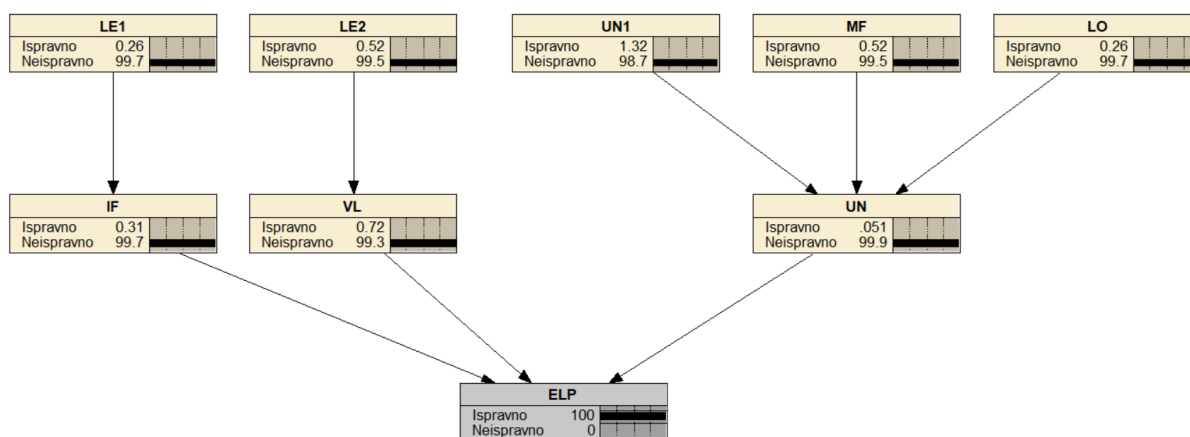
Događaj	Vjerojatnost	Faktor poboljšanja
0	0,0281	0
C1	0,0254	0,0027
C2	0,023	0,0051
C3	0,0153	0,0128
C4	0,023	0,0050
C5	0,0255	0,0026

Na Slici 16 prikazana je Bayesova mreža za komponentu ELP, koja prikazuje međusobne ovisnosti između događaja i komponenti u sustavu.



Slika 16. Prikaze Bayesove mreže za kritični kvar ELP

U analitičkom i numeričkom pristupu dolazimo do istih zaključaka o grešci koja najviše doprinosi glavnom događaju. Analiza faktora poboljšanja jasno pokazuje da greška C3, odnosno UN1, ima najveći faktor poboljšanja, što ukazuje na njezin značajan doprinos glavnom događaju i potrebu za smanjenjem njezine pojave. U numeričkoj analizi, UN1 greška se također ističe prikazivanjem posteriorne vjerojatnosti, što dodatno potvrđuje njezinu ključnu ulogu. Oba pristupa konzistentno upućuju na zaključak da je odabir metode opravdan i da osigurava pouzdane rezultate u analizi sustava. Slika 17 ilustrira ključni doprinos greške UN1 glavnom događaju.



Slika 17. Prikaz posteriorne vjerojatnosti za grešku UN1

3.4.3. Mapiranje Bayesove mreže za kritični kvar STD

Postupak se ponavlja kao kod ostalih grešaka. Tablica 18 prikazuje uvjetne vjerojatnosti za grešku UN.

Tablica 18. Prikaz CPT tablice za grešku UN

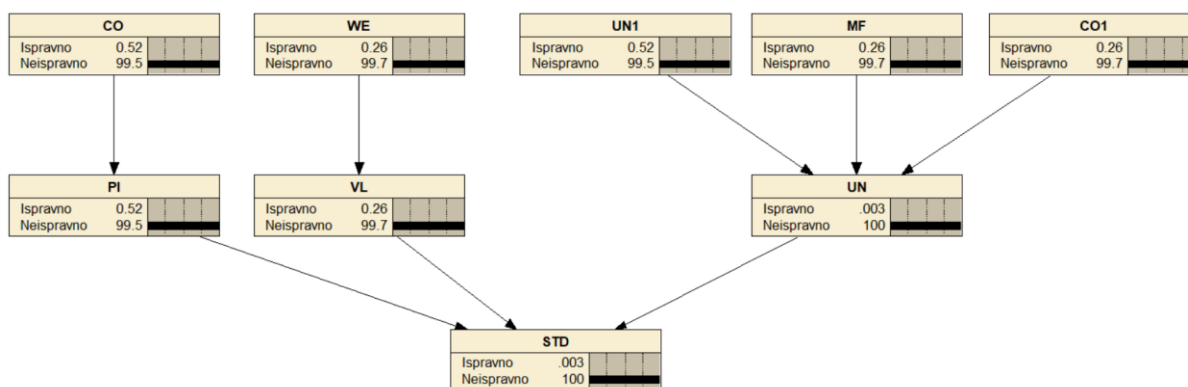
UN1	MF	CO1	Ispravno	Neispravno
0	0	0	0	1
0	0	1	0,0026	0,9974
0	1	0	0,0026	0,9974
0	1	1	0,0052	0,9948
1	0	0	0,0052	0,9948
1	0	1	0,0078	0,9922
1	1	0	0,0078	0,9922
1	1	1	0,0104	0,9896

Kako bi identificirali grešku koja najviše doprinosi glavnom događaju pratiti ćemo postupak iz prethodnom poglavlja. Tablica 19 prikazuje vjerojatnost svake komponente kao i njezin faktor poboljšanja.

Tablica 19. Prikaz faktora poboljšanja

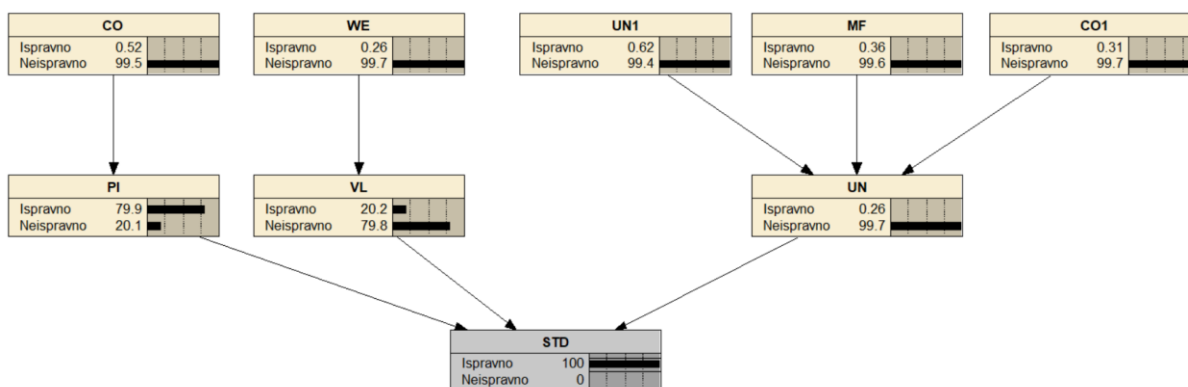
Događaj	Vjerojatnost	Faktor poboljšanja
0	0,0179	0
C1	0,0155	0,0024
C2	0,0129	0,0051
C3	0,0155	0,0024
C4	0,0154	0,0025
C5	0,0129	0,0050

Slika 18 prikazuje Bayesovu mrežu za kritični kvar STD.



Slika 18. Prikaz Bayesove mreže za kritični kvar STD

Numerička analiza prikazuje da greška UN1 ima najveći doprinos glavnom događaju, što je prikazano kroz posteriornu vjerojatnost. Slika 19 prikazuje rezultat numeričke analize.



Slika 19. Prikaz posteriorne vjerojatnosti za grešku UN1

3.4.4. Mapiranje Bayesove mreže za kritični kvar PDE

Tablica 20 prikazuje uvjetne vjerojatnosti za pojavu grešku PDE.

Tablica 20. Prikaz CPT tablice za grešku PDE

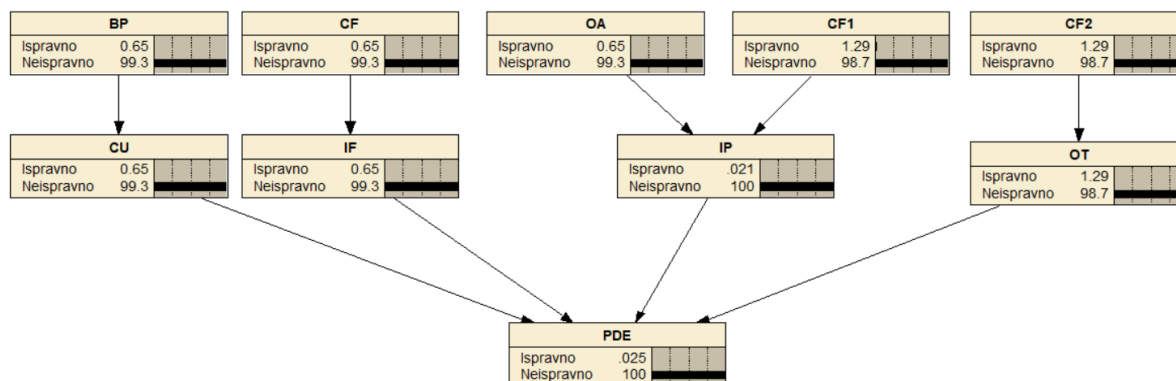
CU	IF	IP	OT	Ispravno	Neispravno
1	1	1	1	0,044	0,956
1	1	1	0	0,032	0,968
1	1	0	1	0,026	0,974
1	1	0	0	0,013	0,987
1	0	1	1	0,038	0,962
1	0	1	0	0,026	0,974
1	0	0	1	0,019	0,981
1	0	0	0	0,006	0,994
0	1	1	1	0,038	0,962
0	1	1	0	0,026	0,974
0	1	0	1	0,019	0,981
0	1	0	0	0,006	0,994
0	0	1	1	0,032	0,968
0	0	1	0	0,019	0,981
0	0	0	1	0,013	0,987
0	0	0	0	0	1

Na isti način kao u prethodnom poglavlju izračunat ćemo faktor poboljšanja. U Tablici 21 prikazane su te vrijednosti.

Tablica 21. Prikaz faktora poboljšanja

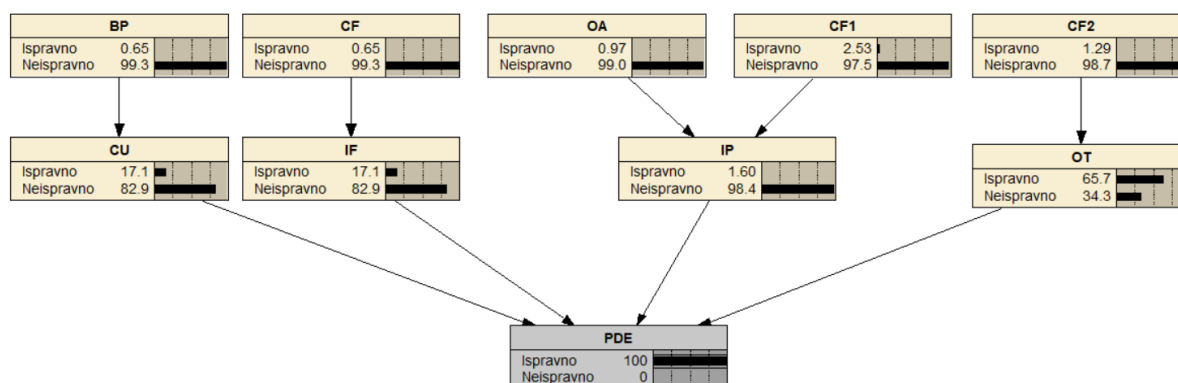
Događaj	Vjerojatnost	Faktor poboljšanja
0	0,0444	0
C1	0,0321	0,0123
C2	0,0320	0,0124
C3	0,0382	0,0062
C4	0,0382	0,0062
C5	0,0382	0,0062

Slika 20 ilustrira Bayesovu mrežu za komponentu PDE.



Slika 20. Prikaz Bayesove mreže za kritični kvar PDE

Numerička analiza pokazuje da glavnom događaju najznačajnije doprinosi greška CF1, što je potvrđeno kroz faktor poboljšanja. Slika 21 prikazuje rezultat numeričke analize.

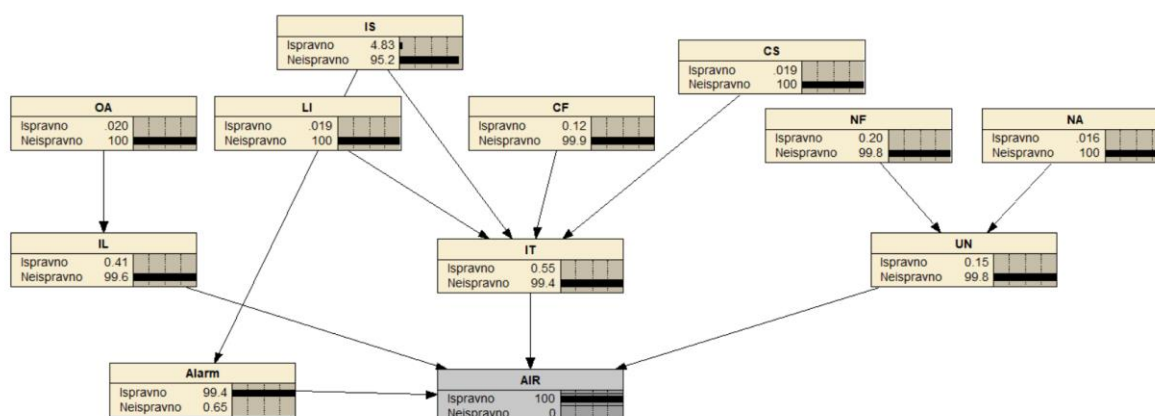


Slika 21. Prikaz posteriorne vjerojatnosti za grešku CF1

3.5. Analiza i poboljšanje sustava

Od četiri kritične greške, fokus je bio na poboljšanju one koja najviše doprinosi, odnosno one koja ima najveći intenzitet kvarova, a to je greška AIR. Ova analiza usmjerena je na poboljšanje sigurnosti sustava implementacijom dodatnih mehanizama za rano otkrivanje i reakciju na potencijalne kvarove. Ključna intervencija bila je uvođenje alarma povezanog s greškom pod nazivom "opći kvar instrumenta". Dodavanjem ovog alarma smanjena je posteriorna vjerojatnost greške IS te je smanjen njezin doprinos glavnom događaju.

Rezultati numeričke analize potvrđuju učinkovitost ovog poboljšanja. Korištenje alarma omogućilo je brže prepoznavanje problema, što je dovelo do smanjenja rizika od ozbiljnih kvarova. Na osnovu Slike 14, kada se pojavi greška AIR u sustavu, doprinos greške IS je 26,9%. Rezultati numeričke analize prikazani na Slici 22 pokazuje da je doprinos greške IS smanjen sa 26,9 % na 4,83 %.



Slika 22. Prikaz posteriorne vjerojatnosti za grešku IS

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljena je metoda koja se široko koristi u području analize sigurnosti. Na početku je objašnjeno kako mapirati stablo grešaka (FT) u Bayesovu mrežu (BN) te je prikazana usporedba njihovih značajki. Bayesove mreže pružaju robustan pristup analizi pouzdanosti kompleksnih sustava, pokazujući se prilagodljivijima i fleksibilnijima u usporedbi s analizom stabla grešaka (FTA). Detaljna analiza izmjenjivača topline naglasila je nekoliko ključnih aspekata važnih za pouzdanost i sigurnost sustava. Identificirane kritične greške poput AIR, ELP, STD i PDE predstavljaju značajne prijetnje operativnoj sposobnosti izmjenjivača topline, zahtijevajući pažljivo upravljanje i strategije za smanjenje rizika. Za poboljšanje sigurnosti sustava predloženo je uvođenje alarma kako bismo smanjili vjerojatnost nastanka nesreća. Dodavanje alarma u sustav služi kao dijagnostički alat koji zahtijeva daljnje operativne radnje kako bi se efikasno riješili identificirani problemi. Uzimajući u obzir napredne sustave alarma za detekciju kvarova, važno je istaknuti da njihovo efikasno oglašavanje treba biti popraćeno prikladnom ljudskom intervencijom. To podrazumijeva razvijanje jasnih procedura za brzu reakciju i intervenciju kako bi se osigurala brza dijagnostika i efikasno otklanjanje problema, čime se smanjuje potencijalni rizik od ozbiljnijih kvarova. Analiza nije detaljno obuhvatila postupke za rješavanje pojedinačnih grešaka, već je naglasak stavljen na identifikaciju kritičnih grešaka na koje se treba usmjeriti najviše pažnje. U kontekstu rastućeg trenda autonomnih sustava u brodskim postrojenjima, naglašava se da su pouzdanost i sigurnost osnovni preduvjeti za njihovu uspješnu implementaciju. Autonomni sustavi zahtijevaju visoku razinu pouzdanosti kako bi se osiguralo njihovo stabilno i sigurno funkcioniranje u različitim uvjetima. Također, potrebno je osigurati da autonomni sustavi mogu pouzdano detektirati i odgovoriti na kritične situacije poput grešaka AIR, ELP, STD i PDE kako bi se minimizirali rizici od ozbiljnih kvarova ili prekida u radu. Konačno, razvoj autonomnih sustava u brodskim postrojenjima predstavlja ključni korak prema učinkovitijem, sigurnijem i konkurentnijem pomorskom sektoru.

LITERATURA

- [1] UNCTAD, *Review of Maritime Transport*, Geneva, Switzerland, 2022.
- [2] Jovanović, I. Perčić, M. Koričan, M. Vladimir, N. Fan, A, *Investigation of the Viability of Unmanned Autonomous Container Ships under Different Carbon Pricing Scenarios*, Journal of Marine Science and Engineering, 2022.
- [3] Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., Yuan, C., *Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges*, Annu. Rev. Control., 41, 2016.
- [4] IMO, *Maritime Safety Committee, 103rd session (MSC 103.)*, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-103rd-session.aspx>.(pristup 09.7.2024).
- [5] Zghyer, R., Ostnes, R., Halse, K.H, *Is Full-autonomy the Way to Go Towards Maximizing the Ocean Potentials?*, Int. Mar. Navig. Saf. Sea Transport. 2019.
- [6] Rødseth, Ø.J., Nordahl, H.E., *Definition for Autonomous Merchant Ships*, Norwegian Forum for Autonomous Ships, October 10. 2017.
- [7] Burmeister, H.C., Bruhn, W.C., Rødseth, Ø.J., Porathe, T., *Can Unmanned Ships Improve Navigational Safety?*, Transport Research Arena, Paris, 2014.
- [8] Porathe, T., Hoem, Å., Rødseth, Ø.J., Fjørtoft, K., Johnsen, S.O., *At least as safe as manned shipping? Autonomous shipping, safety and “human error”*, 28th European Safety and Reliability Conference, 2018.
- [9] MARPOL, *Revised MARPOL Annex VI (Resolution MEPC.328(76))*, 2021.
- [10] Stopford, M, *Maritime Economics. 3rd Edition*, Routledge, London. 2009.
- [11] Horvath, S., *Techno-economic analysis of a decarbonized shipping sector: Technology suggestions for a fleet in 2030 and 2040*, Energy Conversion and Management, 164, 230-241., 2018.
- [12] Kang, Y. J. Noh, Y. Jang, M.S. Park, S. Kim, J.e, *Hierarchical Level Fault Detection and Diagnosis of Ship Engine Systems*, Expert Systems with Applications 2022.
- [13] Karatuğ, Ç. Arslanoğlu, Y. Guedes Soares, C., *Design of a decision support system to achieve condition-based maintenance in ship machinery systems*, Ocean Engineering. 281., 2023.
- [14] A. Šestan, N. Vladimir, I. Ančić, *Nastavni materijali iz kolegija Pouzdanost brodskih energetskekih sustava*, Zagreb, 2013.
- [15] J. W. Vincoli, *Basic Guide to System Safety*, Wiley, Hoboken, New Jersey, 2014.
- [16] J. Stephenson, *System safety 2000: A practical guide for planning, managing, and conducting system safety programs*, United States: N. p., 1991.
- [17] N. Leveson, *Software Safety: Why, What, and How*, ACM Computing Surveys, Vol. 18, No. 2, June 1986.
- [18] Ericson, C.A, *Hazard analysis techniques for system safety*, John Wiley & Sons. 2015.
- [19] C. Wasson, *System Analysis, Design, and Development: Concepts, Principles, and Practices*, Wiley-Interscience, USA, 2005.
- [20] U.S. Department of Defense, *MIL-STD-882: System Safety Program Requirements*, U.S. Government Printing Office, Washington DC., March 1984.
- [21] Rausand, M. Barros, A. Hoyland, A, *System Reliability Theory Models, Statistical Methods and Application*, Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2021.

- [22] Lazakis, I. Ölçer, A., *Selection of the best maintenance approach in the maritime industry under fuzzy multiple attributive group decision-making environment*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ. 2015.
- [23] Lazakis, I. Raptodimos, Y. Varelas, T., *Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks*, Ocean Eng. 152, 404–415, 2018.
- [24] Ben-Daya, M. Duffuaa, S.O. Raouf, A. Knezevic, J. Ait-Kadi, D., *Handbook of Maintenance Management and Engineering*, Berlin/Heidelberg, Germany, 2009.
- [25] Daya, A.A. Lazakis, I., *Investigating ship system performance degradation and failure criticality using FMECA and Artificial Neural Networks*, Trends Marit. Technol. Eng. 2022.
- [26] Dao, P.B. Staszewski, W.J. Barszcz, T. Uhl, T., *Condition monitoring and fault detection in wind turbines based on cointegration analysis of SCADA data*, Renew. Energy, 116, 107–122., 2018.
- [27] Soliman, M.H., *Machine Reliability and Condition Monitoring A Comprehensive Guide to Predictive Maintenance Planing*, Cairo, Egypt, 2020.
- [28] Bousdekis, A. Papageorgiou, N. Magoutas, B. Apostolou, D. Mentzas, G., *Enabling condition-based maintenance decisions with proactive event-driven computing*, Comput. Ind., 100, 173–183., 2018.
- [29] Jeon, H., Park, K. and Kim, J., *Comparison and verification of reliability assessment techniques for fuel cell-based hybrid power system for ships*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol. 8., No. 74, 2020.
- [30] Stoumpos, S., Bolbot, V., Theotokatos, G. and Boulougouris, E., *Safety performance assessment of a marine dual fuel engine by integrating failure mode, effects and criticality analysis with simulation tools*, Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2021.
- [31] Abaei, M. M., Hekkenberg, R., BahooToroody, A., *A multinomial process tree for reliability assessment of machinery in autonomous ships*, Reliability Engineering and System Safety, 210. 2021.
- [32] Abaei, M. M., Hekkenberg, R., BahooToroody, A., Banda, O. V., van Gelder, P., *A probabilistic model to evaluate the resilience of unattended machinery plants in autonomous ships*, Reliability Engineering & System Safety, 219, 2022.
- [33] BahooToroody, A., Abaei, M. M., Banda, O. V., Montewka, J., Kujala, P., *On reliability assessment of ship machinery system in different autonomy degree; A Bayesian-based approach*, Ocean Engineering, 254, 2022.
- [34] Daya, A.A. Lazakis, I., *Component Criticality Analysis for Improved Ship Machinery Reliability*, Machines, 11, 737., 2023.
- [35] J. K. Vaurio, *Treatment of general dependencies in system fault-tree and risk analysis*, IEEE Transactions on Reliability, vol. 51., 2002.
- [36] N. Gharahasanlou, A. Mokhtarei, A. Khodayarei and M. Ataei, *Fault tree analysis of failure cause of crushing plant and mixing bed hall at Khoy cement factory in Iran Ali*, Case Studies in Engineering Failure Analysis, vol. 2., 2014.
- [37] B. S. Dhillon, *Human reliability and error in transportation systems*, Springer Science & Business, 2007.
- [38] V. Ramesh and R. Saravannan, *Reliability Assessment of Cogeneration Power Plant in Textile Mill Using Fault Tree Analysis*, J Fail. Anal. and Preven, vol. 11., 2011.

- [39] W. Grant Ireson, Clyde F. Coombs, Richard Y. Moss, *Handbook of reliability engineering*, McGraw-Hill Professional, 1996.
- [40] V. Bertram, *Technologies for low-crew/no-crew ships*, In Forum Captain Computer IV., Citeseer, 2002.
- [41] B. S. Dhillon, *Design reliability: fundamentals and applications.*, CRC press, 1999.
- [42] H. Langsetha and L. Portinaleb, *Bayesian networks in reliability*, Reliability Engineering and System Safety, vol. 92, 2007.
- [43] C. Simon, P. Weber and E. Levrat, *Bayesian Networks and Evidence Theory to Model Complex Systems*, Journal of Computers, vol. 2., 2007.
- [44] Y. Huang, R. McMurrin, G. Dhadyalla and R. P. Jones, *Probability based vehicle fault diagnosis: Bayesian network method*, J Intell Manuf, vol. 19, 2008.
- [45] H. Zerrouki, A. Tamrabet, *Safety and Risk Analysis of an Operational Heater Using Bayesian Network*, J Fail. Anal. And Preven., vol. 15, 2015.
- [46] J. Pearl, *Bayesian networks*, UCLA: Department of Statistics 2011.
- [47] P. Marin, *Predstavljanje znanja zasnovano na integraciji ontologija i Bayesovih*, FER, Sveučilište u Zagrebu, 2010.
- [48] Bobbio A., Portinale L., Minichino M., Ciancamerla E., *Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks*, Reliability Engineering & System Safety, 71(3), 2001.
- [49] Khakzad, N. Khan, F. Amyotte, P., *Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches*, Reliability Engineering & System Safety, 96., 2011.
- [50] Murad, A. Anwar, U. Luai, M. A. Aamer, S., *Review of Common Failures in Heat Exchangers - Part I: Mechanical and Elevated Temperature Failures*, Engineering Failure Analysis. 104396., 2020.
- [51] DNV - Det Norske Veritas., *OREDA - Offshore Reliability Data Handbook.*, 6th ed. Norway: OREDA Participants, 2015.
- [52] F. Khan, R. Sadiq and T. Husain, *Risk-based process safety assesment and control*, Journal of Hazardous Materials, vol. 94, pp. 1-36, 2002.
- [53] Netica 7.01, *Norsys Software Corp.*, 2024.
- [54] Dominguez-Péry, C. Vuddaraju, L. Narasimha, R. Corbett-Etchevers, I. Tassabehji, R., *Reducing maritime accidents in ships by tackling human error: a bibliometric review and research agenda*, J. shipp. trd. 6, 20, 2021.