

Analiza održavanja brodskih sustava: FMEA-BN model

Haramustek, Dario

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:573557>

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

Dario Haramustek

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Dario Haramustek

Zagreb, 2024.

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

Posebnu zahvalnost izražavam asistentici Ivani Jovanović, mag. ing. mech., te svom mentoru izv. prof. dr. sc. Nikoli Vladimiru, dipl. ing., na nesebičnoj pomoći, strpljenju i vrijednim savjetima kojima su me vodili kroz studij i izradu ovog rada.

Od srca zahvaljujem i svojoj obitelji, djevojci te prijateljima koji su mi bili neiscrpna podrška i oslonac tijekom svih godina mog studiranja.

Dario Haramustek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomatske ispite
Povjerenstvo za diplomatske 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: **Dario Haramustek**

JMBAG: 0035210199

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza održavanja brodskih sustava: FMEA-BN model**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Maintenance analysis of ship systems: FMEA-BN model**

Opis zadatka:

Održavanje brodova posljednjih je godina znatno napredovalo s fokusom na poboljšanje sigurnosti i zaštite okoliša. S obzirom na težnju za smanjenjem broja članova posade, te činjenicu da održavanje zahtijeva značajna ulaganja (rad, vrijeme, novac i sl.), izrada plana održavanja pokazala se kao korisno rješenje. Postupci održavanja općenito se dijele na korektivno, preventivno, održavanje prema stanju i održavanje temeljeno na pouzdanosti. Preventivno održavanje i održavanje prema stanju kontinuirano napreduju uz pomoć različitih alata i tehnoloških inovacija kako bi se prepoznali nadolazeći kvarovi prije nego što do njih dođe, čime se povećava pouzdanost i smanjuju troškovi. Primjena metode za analizu grešaka i posljedica koje one izazivaju (*eng. Failure Mode Effects Analysis, FMEA*) smatra se preduvjetom za odobrenje broskog energetskog sustava od strane klasifikacijskih društava te je zbog toga ta metoda najčešća za procjenu sigurnosti. 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 prioritnog broja rizika (*eng. Risk Priority Number, RPN*) te se procjenjuju nedostaci pojedinih komponenti. Ti rezultati se kombiniraju kako bi se dobila kritičnost pojave. Bayesova mreža (*eng. Bayesian Network, BN*) je vjerojatnosni grafički model koji se koristi za modeliranje vjerojatnosti i međuovisnosti između različitih varijabli, a ideja predloženog FMEA-BN modela je unaprijediti FMEA metodu pomoću BN-a i uvođenjem mogućnosti ažuriranja na temelju dokaza, kako bi se u obzir uzeo utjecaj radnih uvjeta na pouzdanost. U diplomskom radu je potrebno provesti analizu pouzdanosti zadanoga broskog energetskog sustava koristeći FMEA-BN model.

Diplomski rad treba sadržavati:

- pregled postupaka održavanja,
- pregled metoda za analizu pouzdanosti,
- opis i shematski prikaz odabranog broskog sustava,
- analizu raspoloživih podataka o kvarovima odabranog sustava,
- analizu pouzdanosti odabranog sustava,
- analizu rezultata pouzdanosti.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi 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

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Sustav i sigurnost sustava	2
1.2. Pouzdanost sustava	5
2. POSTUPCI ODRŽAVANJA.....	9
2.1. Pogodnost za održavanje.....	9
2.2. Podjela postupaka održavanja.....	10
2.2.1. Korektivno održavanje.....	11
2.2.2. Preventivno održavanje.....	12
2.2.3. Održavanje temeljeno na stanju	14
2.2.4. Održavanje temeljeno na pouzdanosti	16
2.2.5. Ostali postupci održavanja.....	20
3. MATEMATIČKI MODEL.....	21
3.1. Analiza grešaka i posljedica.....	21
3.1.1. Hardver FMECA.....	21
3.1.2. Opis primjene postupka FMECA metode.....	22
3.1.3. Broj prioriteta rizika.....	24
3.1.4. Primjena	26
3.2. Bayesova mreža	27
3.3. Procedura mapiranja FMEA-BN modela.....	28

4. ANALIZA ODABRANOG SUSTAVA	32
4.1. FMEA analiza sustava	34
4.2. Mapiranje FMEA-BN modela	40
4.3. BN analiza sustava	41
5. ZAKLJUČAK.....	45

POPIS SLIKA

Slika 1. Model sustava [18].....	3
Slika 2. Konfiguracije sustava [21].....	4
Slika 3. Koncept pouzdanosti [19].....	5
Slika 4. „Bathtub” krivulja [17].....	6
Slika 5. Matrica za procjenu rizika [14].....	7
Slika 6. Klasifikacija postupaka održavanja [23].....	11
Slika 7. Evolucija postupaka održavanja u pomorstvu [26].....	12
Slika 8. Elementi preventivnog održavanja [30].....	13
Slika 9. Ključni koraci CBM-a [36].....	15
Slika 10. RCM komponente [30].....	18
Slika 11. Ovisnost dostupnosti o troškovima održavanja [47].....	19
Slika 12. Glavni koraci [19].....	22
Slika 13. FMECA radni list [19].....	24
Slika 14. Prikaz osnovne Bayesove mreže [57].....	27
Slika 15. Postupak mapiranja FMEA-BN modela [61].....	31
Slika 16. Prikaz sustava za detekciju požara i plinova [63].	32
Slika 17. RPN uzroka kvarova.....	38
Slika 18. RPN vrsta kvarova.....	39
Slika 19. RPN komponenata u sustavu.....	40
Slika 20. FMEA-BN model sustava.....	41
Slika 21. Bayesova mreža sustava.....	42
Slika 22. Bayesova mreža neispravnog sustava.....	44

POPIS TABLICA

Tablica 1. Deduktivne i induktivne metode [19].....	8
Tablica 2. Rangiranje ozbiljnosti posljedica [54].....	25
Tablica 3. Rangiranje vjerojatnosti kvarova [54].....	25
Tablica 4. Rangiranje vjerojatnosti detekcije [54]	26
Tablica 5. Komponente sustava [62].....	33
Tablica 6. FMEA detektora požara i plinova – 1. Dio	36
Tablica 7. FMEA detektora požara i plinova – 2. dio	37
Tablica 8. Poredak vrste kvara prema RPN-ovima	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>D</i>	/	Detekcija (<i>eng. Detection</i>)
<i>E</i>	/	Dokaz (<i>eng. Evidence</i>)
<i>L</i>	/	Skup vrsta kvarova
λ	h^{-1}	Stopa kvara
<i>N</i>	/	Broj stanja
<i>n</i>	/	Broj kvarova
<i>O</i>	/	Stopa pojave (<i>eng. Occurrence</i>)
<i>P</i>	/	Vjerojatnost
<i>S</i>	/	Ozbiljnost (<i>eng. Severity</i>)
<i>X</i>	/	Skup svih varijabli

POPIS KRATICA

Kratika	Naziv
BN	Bayesova mreža (<i>eng. Bayesian Network</i>)
CBM	Održavanje temeljeno na stanju (<i>eng. Condition-Based Maintenance</i>)
CLU	Kontrolna logička jedinica (<i>eng. Control Logic Unit</i>)
CM	Korektivno održavanje (<i>eng. Corrective maintenance</i>)
CPT	Tablica uvjetne vjerojatnosti (<i>eng. Conditional Probability Table</i>)
DAG	Usmjereni aciklički graf (<i>eng. Directed Acyclic Graph</i>)
DBN	Dinamička Bayesova mreža (<i>eng. Dynamic Bayesian Network</i>)
ETA	Analizu slijeda događaja (<i>eng. Event Tree Analysis</i>)
FFA	Funkcionalna analiza kvara (<i>eng. Functional Failure Analysis</i>)
FM	Vrsta kvara (<i>eng. Failure Mode</i>)
FMEA	Analiza kvara i posljedica (<i>eng. Failure Mode and Effects Analysis</i>)
FMECA	Analiza kvara, posljedica i kritičnosti (<i>eng. Failure Modes, Effects and Criticality Analysis</i>)
FTA	Analiza stabla grešaka (<i>eng. Fault Tree Analysis</i>)
MTTF	Srednje vrijeme do pojave kvara (<i>eng. Mean Time to Failure</i>)
MTTR	Srednje vrijeme popravka (<i>eng. Mean Time to Repair</i>)
PM	Preventivno održavanje (<i>eng. Preventive maintenance</i>)
PMS	Sustav planiranog održavanja (<i>eng. Planned Maintenance System</i>)
PTI	Prediktivno testiranje i pregled (<i>eng. Predictive Testing and Inspection</i>)
RBD	Metoda blok dijagrama (<i>eng. Reliability Block Diagram</i>)
RBI	Inspekcija temeljena na riziku (<i>eng. Risk-Based Inspection</i>)
RBM	Održavanje temeljeno na riziku (<i>eng. Risk-Based Maintenance</i>)
RCM	Održavanje temeljeno na pouzdanosti (<i>eng. Reliability-Centered Maintenance</i>)
RPN	Broj prioriteta rizika (<i>eng. Risk Priority Number</i>)
RTF	Rad do kvara (<i>eng. Run-to-failure</i>)
TBM	Održavanje temeljeno na vremenu (<i>eng. Time-based maintenance</i>)
TPM	Potpuno proizvodno održavanje (<i>eng. Total Productive Maintenance</i>)

SAŽETAK

Ovaj diplomski rad bavi se analizom postupaka održavanja sustava, s posebnim naglaskom na pouzdanost i sigurnost u okviru brodograđevne industrije. Cilj istraživanja bio je proučiti različite pristupe održavanju, uključujući korektivno, preventivno, održavanje temeljeno na stanju te održavanje temeljeno na pouzdanosti (RCM), pri čemu je poseban fokus stavljen na RCM. U sklopu rada primjenjena je metoda analize kvara i posljedica (FMEA) u kombinaciji s Bayesovim mrežama (BN) kako bi se identificirali uzroci kvarova i analizirala njihova kritičnost. Metodologija je primjenjena na reprezentativnom sustavu za detekciju požara i plinova na brodu, u kojem su analizirane ključne komponente sustava, čime je ilustrirana primjena tih metoda na konkretnom primjeru. Iako posljedice kvarova nisu bile poznate niti su predložena konkretna rješenja za povećanje pouzdanosti, rad pruža čvrstu metodološku osnovu za daljnje istraživanje i razvoj u području optimizacije održavanja i sigurnosti tehničkih sustava.

Ključne riječi: održavanje, održavanje temeljeno na pouzdanosti, sigurnost, analiza pouzdanosti, FMEA, Bayesova mreža

SUMMARY

This thesis deals with the system maintenance procedures with a focus on enhancing reliability and safety in the shipbuilding industry. The research examines various maintenance strategies, including corrective, preventive, condition-based, and reliability-centered maintenance (RCM), with particular emphasis on RCM. To identify failure causes and assess their criticality, the study combines Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) with Bayesian Networks (BN). The methodology was applied to a representative shipboard fire and gas detection system, highlighting its key components to demonstrate practical use. While the study does not determine the consequences of failures or propose specific solutions for improving reliability, it lays a strong methodological foundation for future research and advancements in maintenance optimization and technical system safety.

Key words: maintenance, Reliability-Centered Maintenance, safety, reliability analysis, FMEA, Bayesian Network.

1. UVOD

Kod osnivanja, izgradnje, održavanja i upravljanja pomorskih i plutajućih konstrukcija, procjena rizika igra ključnu ulogu u osiguravanju njihove sigurnosti i pouzdanosti [1]. Glavni izazov u procjeni i kvantifikaciji operativnih rizika jest nedostatak pouzdanih informacija o ranijim kvarovima te nedostatak korisnih podataka za razvoj modela vjerojatnosti. Osim toga, odabir odgovarajuće metode za procjenu rizika, koja učinkovito obuhvaća neizvjesnosti proizašle iz ljudske pogreške u složenim uvjetima, predstavlja značajan izazov. Khan i sur. (2015) [2] istaknuli su tri ključna izvora informacija potrebnih za procjenu kvarova komponenti:

- stručno mišljenje,
- iskustva i prikupljeni podaci s lokalnih područja te
- podaci i informacije razmijenjeni među industrijama koje djeluju u zahtjevnim uvjetima.

Tradicionalno, upravljanje kvarovima sustava bilo je usmjereno na rješavanje problema koji su već nastali. Međutim, u posljednje vrijeme analiza kvarova stavlja naglasak na prevenciju problema kroz proaktivno upravljanje sustavom [3] umjesto na traženje rješenja nakon što kvar nastupi. Jedna od najznačajnijih metoda za rješavanje ovoga pitanja je analiza kvarova i posljedica koje one izazivaju (*eng. Failure Mode and Effects Analysis, FMEA*).

FMEA predstavlja metodu za prepoznavanje potencijalnih kvarova prije nego što se dogode, s ciljem smanjenja rizika povezanih s njima [4]. Ova se metoda široko koristi kao alat za povećanje pouzdanosti, omogućujući pravovremeno prepoznavanje i smanjenje rizika od potencijalnih kvarova [4, 5]. Budući da je glavni cilj FMEA-e identificiranje, prioritizacija i smanjenje kvarova, ova se metoda dokazala kao iznimno korisna u raznim proizvodnim sektorima, gdje pomaže u rješavanju problema povezanih s pouzdanošću [6–8].

Posljednjih godina metoda Bayesovih mreža (*eng. Bayesian Network, BN*) značajno je napredovala u području umjetne inteligencije [9]. Općeprihvaćeno je da ova metoda, temeljena na uzročno-posljedičnim mrežama, predstavlja snažan alat za izračunavanje vjerojatnosti događaja na temelju opažanja ili dokaza drugih događaja unutar iste mreže, koristeći teoriju grafova [10]. Bayesove mreže i dinamičke Bayesove mreže (*eng. Dynamic*

Bayesian Network, DBN) našle su široku primjenu u inženjerskim strategijama donošenja odluka [11, 12]. DBN omogućuje fleksibilno probabilističko modeliranje vremenskih ovisnosti između skupa slučajnih varijabli [13].

Cilj diplomskog rada je provesti analizu pouzdanosti brodskog sustava koristeći FMEA-BN model. U prvom, uvodnom poglavlju objašnjeni su osnovni pojmovi vezani za sigurnost i pouzdanost tehničkih sustava. Drugo poglavlje sadrži detaljan prikaz i opis postupaka održavanja. U trećem poglavlju detaljno su opisane FMEA i BN metoda te je razrađena procedura mapiranja FMEA-BN modela. Nadalje, u četvrtom poglavlju slijedi analiza odabranog brodskog sustava te prikaz identificiranih vrsta i uzroka kvarova. Za identificirane kvarove provedena je analiza pouzdanosti sustava pomoću FMEA metode te mapiranja FMEA-BN modela. FMEA-BN model korišten je u svrhu unapređenja FMEA metode pomoću BN-a s dodatkom mogućnosti ažuriranja temeljenog na dokazima, kako bi se u obzir uzeo utjecaj radnih uvjeta na pouzdanost.

1.1. Sustav i sigurnost sustava

Prema definiciji, sigurnost sustava je poddisciplina sustavnog inženjerstva koja primjenjuje znanstvena, inženjerska i upravljačka načela kako bi se postigla odgovarajuća sigurnost, pravovremena identifikacija rizika od opasnosti te pokretanje radnji za sprječavanje ili kontrolu tih opasnosti tijekom životnog ciklusa i unutar ograničenja operativne učinkovitosti, vremena i troškova [14].

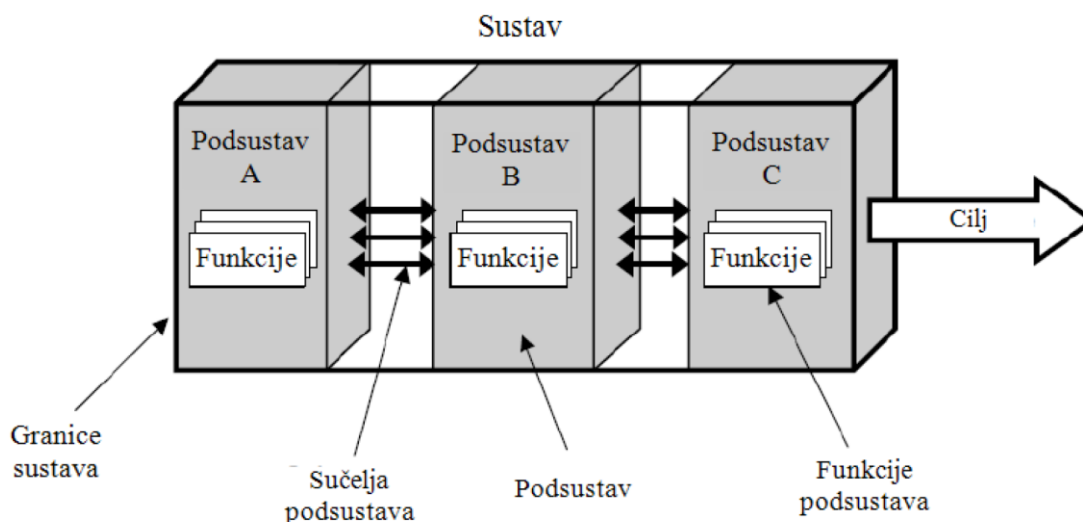
Pojam sigurnosti često se definira kao stupanj slobode od onih uvjeta koji mogu dovesti do smrti, tjelesne ozljede, oštećenja i/ili gubitka opreme/imovine (MIL-STD-882) [15]. Međutim, ova općepoznata definicija prepoznata je kao nelogična, jer bi se prema njoj svaki sustav mogao smatrati nesigurnim. Naravno, to nije istina jer svaki sustav ima određenu razinu nesigurnosti. Zbog toga se sigurnost sustava odnosi na smanjenje rizika povezanih s opasnošću na najnižu prihvatljivu razinu [14].

Kako bi se bolje razumjela daljnja razmatranja, definirani su neki od osnovnih pojmova:

- **Sustav:** skup jednog ili više međusobno povezanih ili međuovisnih elemenata koji tvore ili se mogu smatrati jednim kolektivom [14].
- **Podsustav:** skup jednog ili više elemenata, istih svojstava kao i sustav, ali na nižoj razini funkcijske raščlambe [16].

- **Element:** bilo koja komponenta, sklop, podsustav, funkcionalna jedinica ili cijeli sustav koji se može sagledati kao jedinka [14].
- **Funkcija:** operacija, aktivnost, proces ili radnja koju izvodi element sustava za postizanje određenog cilja unutar propisanog skupa ograničenja performansi [17].
- **Kvar:** stanje u kojem sustav ili komponenta ne obavlja svoju funkciju na zadovoljavajući način ili ju ne obavlja uopće [14].
- **Opasnost:** stanje ili situacija prisutna u radnom okruženju koja može prouzročiti štetu, ozljedu i/ili oštećenje [14].
- **Težina opasnosti:** kategorizirani opis razine opasnosti na temelju stvarnog ili percipiranog potencijala za uzrokovanje štete, ozljede i/ili oštećenja [14].
- **Vjerojatnost opasnosti:** mogućnost da će određeno stanje ili skup uvjeta postojati u određenoj situaciji ili radnom okruženju [14].
- **Rizik:** mogućnost ili vjerojatnost nepoželjnih posljedica ili štetnih događaja, procijenjenih prema njihovoj ozbiljnosti i vjerojatnosti [14].

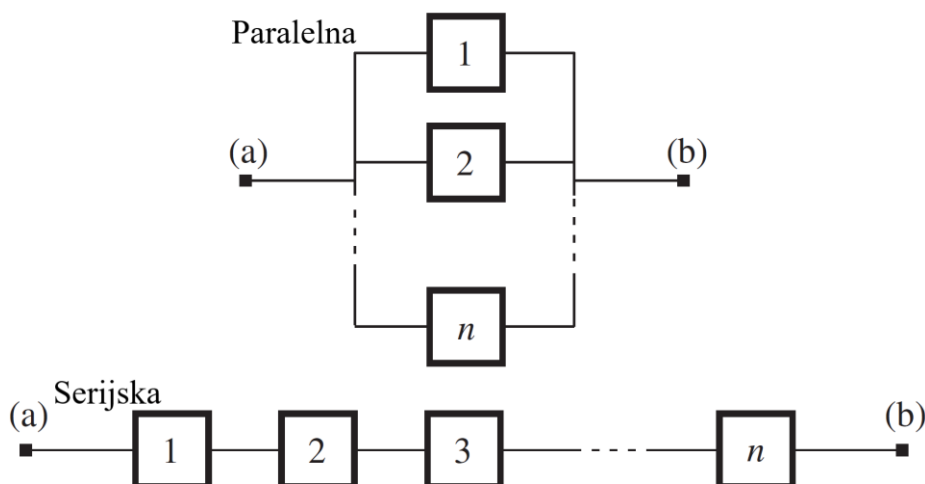
Slika 1 prikazuje generički koncept sustava. Sustav ima cilj te se oko njega nalazi granica koja ga dijeli od okruženja. Sigurnosna analiza sustava uključuje procjenu svih aspekata sustava, uključujući funkcije, podsustave, sučelja, granice i okruženje te cjelokupni sustav [18].



Slika 1. Model sustava [18]

Rani korak procjene pouzdanosti sustava je uspostavljanje modela strukture sustava. Model definira granicu sustava, elemente sustava te interakcije između tih elemenata. Također je

potrebno pretpostaviti način rada sustava, uvjete okruženja i ograničenja koja mogu utjecati na elemente sustava i njihovo ponašanje. Postoje dva osnovna modela strukture sustava, a to su serijski i paralelni sustav, koji su prikazani na Slici 2. Kod serijske konfiguracije sustava kvar bilo koje od komponenata rezultira kvarom cijelog sustava [19].



Slika 2. Konfiguracije sustava [21]

Paralelna struktura na Slici 2 ima redundanciju jer je potrebno da svi n blokovi otkazu kako bi prouzročili kvar sustava. Zbog navedenog sustav ima redundanciju n -tog reda. Dodavanje redundancije povećava troškove i čini sustav kompliciranijim, ali ako je cijena kvara visoka, redundancija je često rješenje koje se koristi [19].

Redundancija uključuje korištenje dodatnih aktivnih komponenti ili komponenti u pripravnosti. Pouzdanost sustava može se povećati ovom tehnikom, koja se može primijeniti u različitim konfiguracijama [20]:

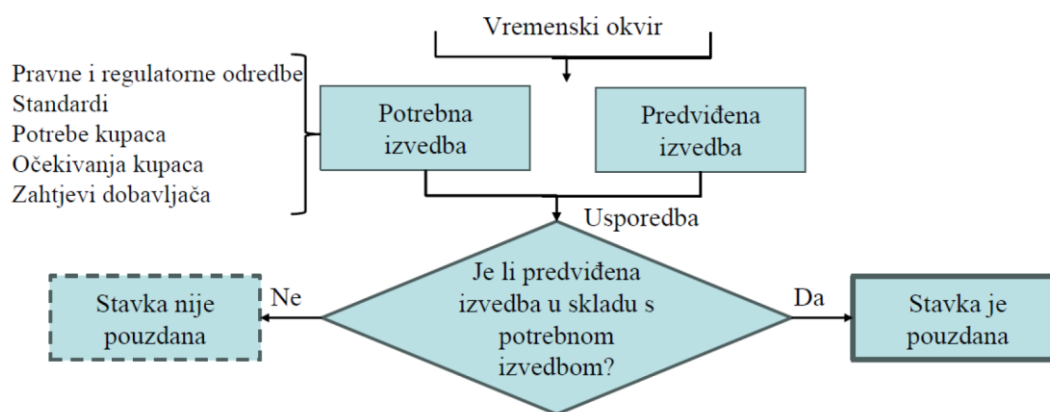
1. Aktivna redundancija:
 - Puna: sa svim dupliciranim komponentama.
 - Djelomična: određeni broj komponenti može otkazati, npr. dva od četiri motora na zrakoplovu.
 - Uvjetna: oblik redundancije koji se javlja prema vrsti kvara.
2. Redundancija u stanju pripravnosti: uključuje dodatne komponente koje se ne stavljaju u upotrebu dok se ne otkrije kvar.
3. Podjela opterećenja: aktivna redundancija gdje kvar jedne komponente stavlja veće opterećenje na preostale komponente.

4. Redundancija i popravak: situacija u kojoj su redundantne komponente podložne trenutnom ili periodičnom popravku.

Odluka o korištenju redundancije mora se temeljiti na analizi koja uključuje kompromise. Nakon što se iscrpe sve druge mogućnosti, redundancija je ponekad jedino rješenje. Primjena redundancije ostavlja posljedice na sustav jer povećava težinu, prostor i cijenu sustava, a povećanje broja dijelova rezultira povećanjem troškova održavanja i nabave rezervnih dijelova. Redundancija može povećati pouzdanost za jednu vrstu kvara, ali nauštrb drugog. Povećanje pouzdanosti dobiveno dodavanjem dodatnih elemenata smanjuje se iznad određenog broja dupliciranih elemenata zbog učinaka zajedničkog načina rada [20].

1.2. Pouzdanost sustava

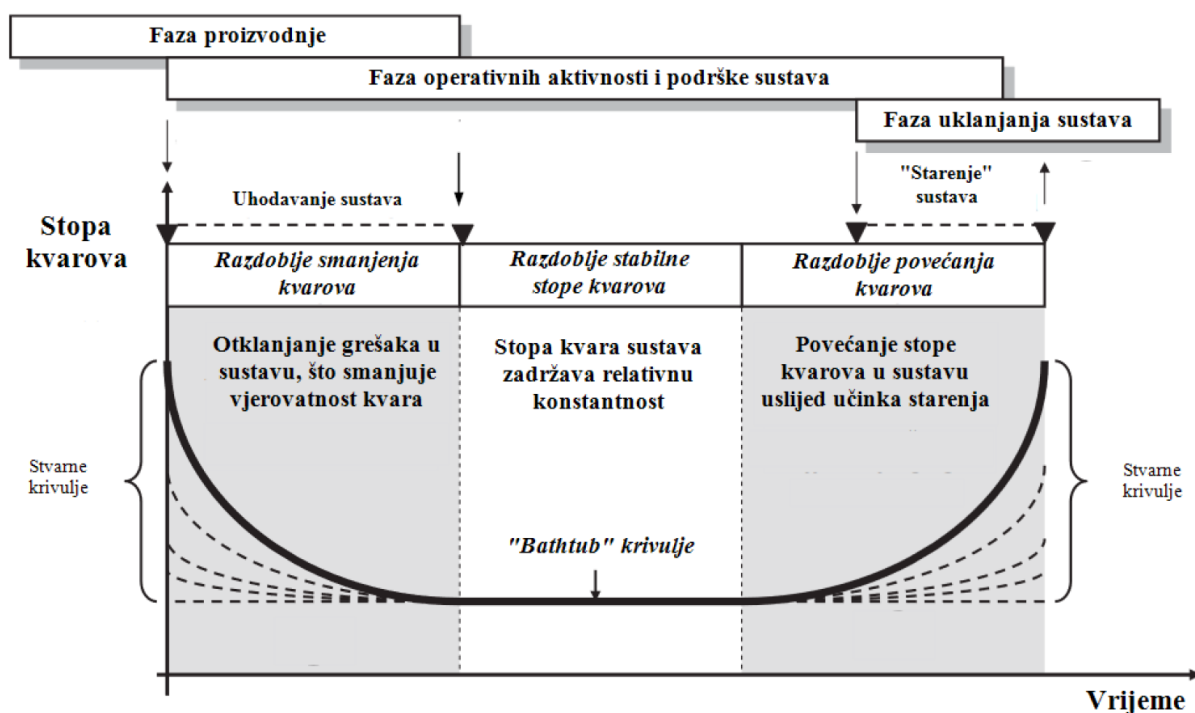
Pouzdanost predstavlja sposobnost sustava da obavlja svoje funkcije ili zadatke u definiranim uvjetima tijekom određenog vremenskog razdoblja. Pouzdanost ovisi o intenzitetu kvarova, radnom vremenu i uvjetima okoline u kojima proizvod radi [21]. Koncept pouzdanosti prikazan je na Slici 3. Pojam stavka koristi se za označavanje bilo kojeg tehničkog sustava, podsustava ili komponente [19]. Zahtijevana izvedba određena je zakonima, propisima, standardima, potrebama kupaca, očekivanjima te zahtjevima dobavljača. Najčešće je navedena u dokumentu o specifikaciji, gdje su navedena ograničenja u operativnom smislu [21].



Slika 3. Koncept pouzdanosti [19]

Sve dok predviđena izvedba ispunjava barem zahtijevanu izvedbu te se koristi u istom operativnom kontekstu i tijekom vremenskog razdoblja navedenog u zahtijevanoj izvedbi, stavka se smatra pouzdanom [19].

Na Slici 4 prikazana je krivulja učestalosti kvarova svojstvenih sustavu (eng. *Bathtub Curve*), koja grafički prikazuje vremenski tijek intenziteta kvarova sustava tijekom njegovog životnog ciklusa. Naziv krivulje dolazi od njezinog oblika koji podsjeća na kadu. Početni i završni dijelovi krivulje prikazuju visok intenzitet kvarova na početku i kraju životnog ciklusa, dok središnji dio predstavlja stalnu fazu s niskim intenzitetom kvarova, što je prikazano na Slici 4. Za prvo razdoblje životnog ciklusa, koje se naziva razdoblje uhadavanja ili razdoblje početnih kvarova (eng. *Infant Mortality Period*), karakterističan je visok intenzitet kvarova uzrokovanih pogreškama u projektiranju ili proizvodnji. Potom slijedi korisni vijek trajanja (eng. *Useful Service Life period*), obilježen slučajnim kvarovima, koji su relativno niski i konstantni. Na kraju dolazi razdoblje dotrajalosti (eng. *Wearout Period*), kada intenzitet kvarova raste zbog starenja komponenata ili istrošenosti materijala [17].



Slika 4. „Bathtub” krivulja [17]

Slika 5 prikazuje matricu rizika opasnosti, koja omogućuje procjenu razine rizika na temelju ozbiljnosti i vjerojatnosti nastanka opasnosti. Matrica sadrži pet razina vjerojatnosti pojavljivanja opasnosti, označenih od A (često) do E (malo vjerojatno). Osim razina vjerojatnosti, matrica sadrži četiri kategorije težine opasnosti: katastrofalna, kritična, umjerena i zanemariva. Na temelju vrijednosti vjerojatnosti i kategorije težine opasnosti određuje se indeks opasnosti od rizika te se identificiraju prioriteti u upravljanju rizicima.

Pomoću indeksa rizika određuje se strategija za minimiziranje rizika, a resursi se usmjeravaju na opasnosti koje imaju najveći potencijalni utjecaj [14].

<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. Matrica za procjenu rizika [14]

U analizi rizika primjenjuju se deduktivni i induktivni pristupi, koji predstavljaju dva različita oblika logike i zaključivanja. Kod ovih metoda promatra se određena greška ili odstupanje. Deduktivni pristup analize ispituje uzroke problema i temelji se na skupu pretpostavki. Za razliku od deduktivnog, induktivni pristup je logički proces u kojem se predlaže zaključak koji sadrži više informacija od dotadašnjeg iskustva ili opažanja. Induktivni pristup predviđa posljedice određenih situacija [19, 22].

U Tablici 1 navedene su metode koje se najčešće koriste u analizi rizika (pouzdanosti sustava), pri čemu se neke svrstavaju u deduktivne, druge u induktivne, dok neke sadrže elemente oba pristupa (Δ).

Tablica 1. Deduktivne i induktivne metode [19]

Model/metoda	Deduktivna	Induktivna
FMECA	Δ	Δ
FTA	X	-
ETA	-	X
RBD	X	-
BN	X	X

2. POSTUPCI ODRŽAVANJA

Kako bi bili konkurentni na nacionalnoj i međunarodnoj razini, proizvodni sustavi i oprema moraju raditi na razinama koje prije desetak godina nisu bile zamislive. Zahtjevi za većom kvalitetom proizvoda, skraćenim vremenom propusnosti te poboljšanom radnom učinkovitošću unutar dinamičnog okruženja potražnje kupaca i dalje postavljaju visoke standarde za učinkovitost održavanja.

U nekim slučajevima, održavanje je potrebno kako bi se povećala operativna učinkovitost, prihodi te zadovoljstvo kupaca, uz istovremeno smanjenje troškova. Zbog toga se zahtijeva da strategija održavanja bude usklađena s proizvodnom logistikom i u skladu s trenutnom najboljom praksom [23].

2.1. Pogodnost za održavanje

Dok se pouzdanost odnosi na smanjenje učestalosti ili ozbiljnosti kvara sustava, pogodnost za održavanje bavi se smanjenjem trajanja prekida rada sustava i napora potrebnog da se sustav vrati u rad nakon kvara. Pogodnost za održavanje se definira kao mjera sposobnosti da se stavka zadrži ili vrati u određeno stanje kada održavanje izvodi osoblje s propisanim vještinama, koristeći propisane postupke i resurse. Ova definicija ukazuje na razliku između pojmova pogodnosti za održavanje i održavanja. Za razliku od pogodnosti za održavanje, održavanje se odnosi na rad sustava i obuhvaća aktivnosti koje se poduzimaju nakon što je sustav stavljen u pogon. Cilj je održati sustav operativnim ili ga vratiti u operativno stanje nakon što je došlo do kvara [24].

Dva osnovna vremenska pojma koriste se za opisivanje ili mjerenje karakteristika pogodnosti za održavanje sustava, a to su vrijeme rada i zastoja. Vrijeme rada je vrijeme tijekom kojeg stavka radi ili je u stanju obavljati svoje potrebne funkcije, dok je zastoj razdoblje tijekom kojeg stavka nije u stanju obavljati svoje zadane funkcije [24].

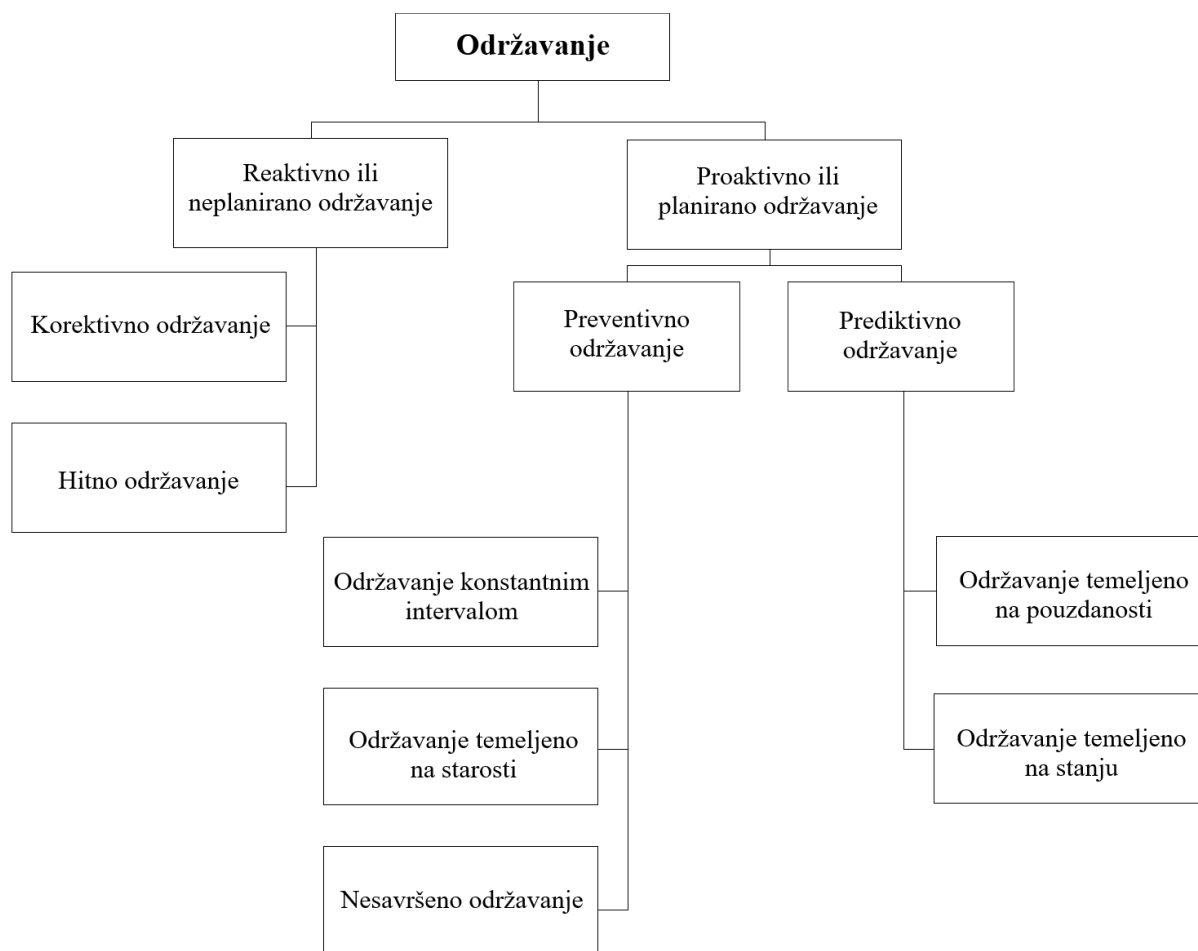
Osim navedenog, inženjeri koriste pogodnost za održavanje kako bi predvidjeli potrebno vrijeme za popravak popravljive stavke (*eng. Maintainable Item*) u slučaju kvara. Uzimajući u obzir takve predikcije, moguće je analizirati sustav u konceptualnoj fazi te napraviti izmjene koje će smanjiti potrebno vrijeme za popravak. Za procjenu pogodnosti za održavanje koriste se razna mjerila, a neka od njih su [19]:

-
- Srednje vrijeme popravka (*eng. Mean Time to Repair, MTTR*).
 - Srednje/medijalno vrijeme aktivnog popravka naspram srednjeg vremena zastoja stavke.
 - Srednje vrijeme prekida rada sustava.
 - Maksimalno vrijeme aktivnog korektivnog održavanja.
 - Srednje vrijeme preventivnog održavanja.
 - Srednji broj radnih sati po zadatku popravka.
 - Sati održavanja po radnim satima.
 - Srednje vrijeme za vraćanje sustava.

2.2. Podjela postupaka održavanja

Postupci održavanja mogu se podijeliti na reaktivno i proaktivno. Reaktivno ili neplanirano održavanje smatra se naslijeđenom praksom, pri čemu se radnje održavanja obavljaju tek nakon što nastane kvar [23]. Neplanirano održavanje uglavnom je korektivno, uključujući i održavanje u hitnim slučajevima [25]. Navedeno je prikazano na Slici 6.

Proaktivno ili planirano održavanje može se dalje podijeliti na preventivno i prediktivno održavanje. Kao što i samo ime sugerira, kod proaktivnog održavanja ne čeka se pojava kvara kako bi se poduzele odgovarajuće radnje održavanja. Razlika između preventivnog i prediktivnog održavanja je u rasporedu održavanja. Preventivno održavanje provodi se prema unaprijed definiranoj strategiji, gdje se održavanje obavlja u unaprijed određenim intervalima kako bi se smanjila vjerojatnost kvara ili degradacije performansi. To podrazumijeva izvođenje radnji održavanja prema fiksnom rasporedu. Prediktivno održavanje, s druge strane, koristi prilagođeni raspored održavanja temeljen na praćenju stvarnog stanja opreme i njezinih performansi [23].



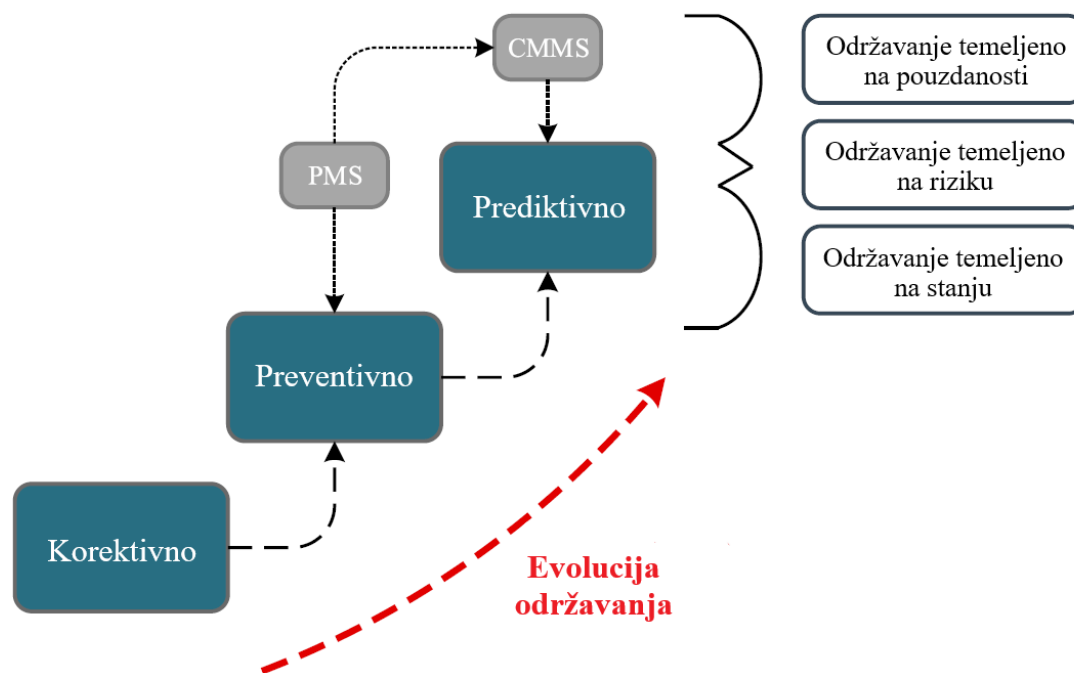
Slika 6. Klasifikacija postupaka održavanja [23]

2.2.1. *Korektivno održavanje*

Korektivno održavanje (*eng. Corrective maintenance, CM*) je vrsta održavanja u kojoj se sve aktivnosti vezane uz održavanje odvijaju nakon nastanka kvara. Korektivno održavanje uglavnom se primjenjuje na dijelove opreme s niskom stopom kvarova te na manje kritičnim i jeftinijim sustavima [26]. Međutim, u slučaju opreme koja se koristi u brodskim strojaricama, postoje puno kritičniji dijelovi koji bi u slučaju nastanka kvara mogli prouzročiti vrlo velike i značajne posljedice. Sama primjena CM-a na brodu dovela bi do povećanja troškova održavanja i vremena popravka [27].

U strategiji korektivnog održavanja ili rada do kvara (*eng. Run-to-failure, RTF*), korektivna radnja se poduzima kako bi se oprema vratila u funkcionalno stanje nakon što neočekivano prestane raditi. Ova radnja uključuje ili popravak ili zamjenu pokvarene komponente i može se provesti prema potrebi. Stoga je ova strategija održavanja poželjna samo na onoj opremi čije se posljedice kvara smatraju minimalnima. Investicija koja je potrebna za izvršenje ove

strategije održavanja mnogo je manja od bilo koje druge strategije održavanja, no ona može uzrokovati dodatne troškove popravka i povećati vrijeme zastoja kada se primijeni na kritičnoj opremi [27]. Kroz godine, održavanje je napredovalo dalje od korektivnog održavanja, što prikazuje Slika 7 na kojoj je vidljiva evolucija održavanja u pomorstvu.



Slika 7. Evolucija postupaka održavanja u pomorstvu [26]

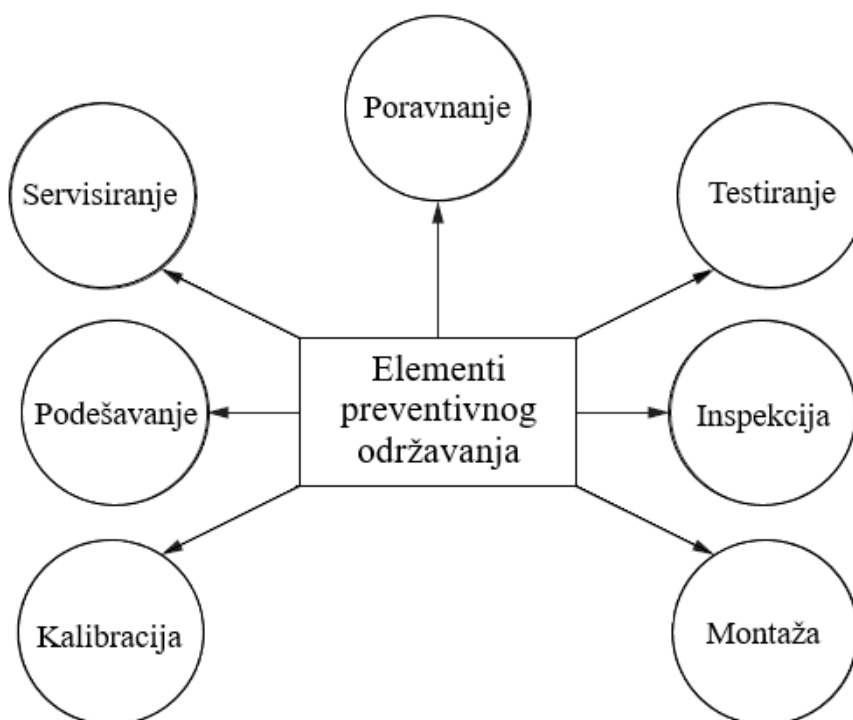
2.2.2. Preventivno održavanje

Preventivno održavanje (*eng. Preventive maintenance, PM*) ili održavanje temeljeno na vremenu (*eng. Time-based maintenance, TBM*) je strategija u kojoj se radnje vezane uz popravak provode unutar određenih vremenskih intervala kako bi se izbjegao bilo kakav potencijalni kvar ili degradacija, koja bi mogla utjecati na pouzdanost sustava u bliskoj budućnosti [18]. Temelji se na iskustvu pomorskih inženjera i preporukama proizvođača. Takvo održavanje omogućuje veću dostupnost sustava, manje stope kvarova, duži životni vijek opreme te bolje optimiziranje i reguliranje procedura održavanja [29].

Slika 8 prikazuje sedam elemenata preventivnog održavanja, a to su [30]:

1. Inspekcija: Povremeno provjeravanje materijala/stavki kako bi se utvrdila njihova upotrebljivost usporedbom njihovih fizičkih, električnih, mehaničkih i drugih karakteristika (prema potrebi) s očekivanim standardima.

2. Servisiranje: Pravovremeno čišćenje, podmazivanje, punjenje i očuvanje predmeta/materijala kako bi se spriječilo pojavljivanje početnih kvarova.
3. Kalibracija: Periodično određivanje vrijednosti karakteristika stavke u usporedbi sa standardom. Sastoji se od usporedbe dvaju instrumenata, od kojih je jedan certificirani standard s poznatom točnošću. Cilj je otkriti i prilagoditi svaku razliku u točnosti materijala ili parametra koji se uspoređuju s utvrđenom standardnom vrijednošću.
4. Testiranje: Periodično testiranje ili provjera radi utvrđivanja upotrebljivosti i otkrivanja električnih ili mehaničkih degradacija.
5. Poravnanje: Promjene u određenim varijabilnim elementima artikla u svrhu postizanja optimalne izvedbe.
6. Podešavanje: Periodično prilagođavanje navedenih varijabilnih elemenata materijala u svrhu postizanja optimalnih performansi sustava.
7. Montaža: Periodična zamjena predmeta s ograničenim životnim vijekom ili predmeta koji prolaze vremenski ciklus ili degradaciju trošenja, kako bi se održala navedena tolerancija sustava.



Slika 8. Elementi preventivnog održavanja [30]

Unatoč nekoliko vrlo bitnih prednosti, PM ne jamči eliminaciju svih neočekivanih kvarova jer ne uzima u obzir trenutno zdravstveno stanje komponenti i korisni vijek trajanja opreme. Iz

tog razloga, PM ponekad rezultira nepotrebnim zastojsima strojeva, pretjeranim troškovima popravka i kvarovima izazvanih održavanjem [31, 32].

Neki istraživači izvijestili su da provođenje vremenskih PM radnji može dovesti do pogrešne procjene zdravstvenog stanja opreme, zbog čega stopa korištenja možda neće biti konstantna tijekom vremena. Tako je moguće i provođenje održavanja opreme koja je u dobrom stanju zbog pogrešnih procjena [33].

Trenutno većina brodarskih tvrtki provodi ovu strategiju uspostavljanjem sustava planiranog održavanja (*eng. Planned Maintenance System, PMS*) na brodovima [34]. Kako bi se povećala sigurnost, operativno vrijeme neprekidnog rada i pouzdanost uz smanjenje troškova održavanja, pomorska se industrija sve više okreće održavanju temeljenom na analizi rizika i pouzdanosti [29, 35].

2.2.3. Održavanje temeljeno na stanju

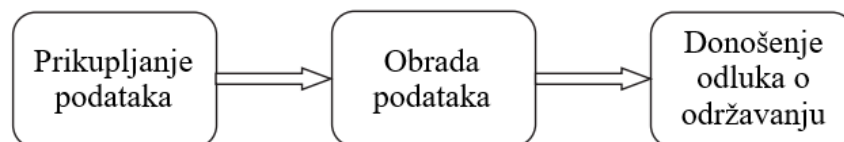
Održavanje temeljeno na stanju (*eng. Condition-Based Maintenance, CBM*) strategija je donošenja odluka u kojoj se odluka o izvođenju održavanja donosi promatranjem „stanja” sustava i/ili njegovih komponenti. Stanje sustava određuje se parametrima koji se kontinuirano prate i specifični su za određeni sustav i/ili komponentu. Na primjer, u slučaju rotacijskih sustava, karakteristika ili indeksa vibracije prikladan je izbor parametra za opis stanja [23].

Primjenom CBM-a pokušava se izbjeći nepotrebno provođenje održavanja sustava na način da se određene radnje održavanja provode samo onda kada postoje dokazi o neispravnom načinu rada. Ako je pravilno uspostavljen i učinkovito implementiran, može značajno smanjiti troškove održavanja smanjenjem broja nepotrebnih planiranih operacija preventivnog održavanja [35].

Prednost ovog pristupa odmah je vidljiva jer se odluka donosi na temelju vidljivih i potkrepljujućih podataka koji zapravo odražavaju stanje sustava. Nema smisla pretpostaviti da će stanje sustava uvijek slijediti istu radnu krivulju, što je temeljna pretpostavka u preventivnom održavanju. U industrijskom ili proizvodnom okruženju sustav je izložen nasumičnim poremećajima koji uzrokuju odstupanja u radnim karakteristikama. Zbog toga je poželjno pratiti stanje sustava, na kojem se treba temeljiti odluka o održavanju [23].

CBM se sastoji od tri ključna koraka [36] (Slika 9):

1. Prikupljanje podataka (prikupljanje informacija): kako bi se dobili relevantni podaci o stanju sustava.
2. Obrada podataka (upravljanje informacijama): obrada i analiza podataka ili signala prikupljenih u prvom koraku radi boljeg razumijevanja i interpretacije podataka.
3. Donošenje odluka o održavanju: kako bi se preporučile učinkovite politike održavanja.



Slika 9. Ključni koraci CBM-a [36]

Dijagnostika i prognostika su dva važna aspekta u CBM-u. Dijagnostika se bavi [36]:

- otkrivanjem grešaka: pokazuje događa li se nešto pogrešno unutar nadziranog sustava,
- izolacijom grešaka: lociranjem neispravne komponente,
- identifikacijom greške: određivanjem vrste kvara.

Prognostika se bavi predviđanjem greške prije nego što se dogodi. Potrebno je utvrditi prijeli li kvar te procijeniti koliko brzo i kolika je vjerojatnost da će se kvar pojaviti. Prognostika je puno učinkovitija od dijagnostike za postizanje maksimalnog vremena bez prekida u radu. Međutim, dijagnostika je i dalje potrebna kada predviđanje greške ili prognostika ne uspije te dođe do greške. CBM se može koristiti za dijagnostiku, prognostiku, ili oboje prema ranije navedenim trima koracima [36].

Za praćenje stanja ili kao tehnika predviđanja, prihvatljivo je bilo koje relevantno sredstvo za određivanje stanja komponente i predviđanje potencijalnog kvara. Ljudska osjetila (zvuk, miris, izgled...) mogu poslužiti za praćenje rada sustava. Naravno, tu su i sofisticiranije tehnologije koje se koriste, kao što su [25]:

- mjerenje i analiza vibracija,
- akustična emisija (ultrazvuk),
- analiza ulja,
- infracrvena termografija.

Neke od prednosti CBM-a su prethodno upozorenje o nadolazećem kvaru i povećana preciznost u predviđanju kvara. Također, pomaže u dijagnostičkim postupcima jer je relativno lako povezati kvar s određenim komponentama putem praćenja parametara. Nedostatak je

potreba da se instalira i koristi oprema za praćenje te da se razvije određena razina modeliranja ili strategije donošenja odluka [23].

Istraživanja su pokazala da je CBM učinkovitiji od preventivnog održavanja. Navodi se da korištenje CBM-a može produžiti cikluse remonta (overhaul) održavanja do 50 % i uštedjeti između 25 % i 45 % troškova održavanja [37].

Iako CBM može pružiti znatne uštede u troškovima održavanja i smanjenju rizika od kvarova, trenutna istraživanja otkrivaju da samo 10 % industrije u pomorskom sektoru koristi CBM kao svoju preferiranu strategiju održavanja [29]. Osim ranije navedenih nedostataka, jedan od glavnih razloga sporog usvajanja CBM-a je ograničen pristup visokokvalificiranom osoblju za izvođenje i daljnju interpretaciju rezultata [38].

2.2.4. Održavanje temeljeno na pouzdanosti

Postupak održavanja temeljen na pouzdanosti sustava (*eng. Reliability-Centered Maintenance*, RCM) nastao je u zrakoplovnoj industriji te se uspješno primjenjuje i u drugim industrijama, kao što su industrija nuklearne energije, vojna, industrija plina i nafte na moru, itd., dugi niz godina. Dosadašnja iskustva iz navedenih industrija pokazuju smanjenje troškova održavanja i poboljšanje dostupnosti sustava [39]. U kontekstu pomorstva, osim u industriji plina i nafte na moru, RCM se koristi i kod mornarice, poput američke i britanske kraljevske mornarice [40].

Zasad RCM nema preveliku uspješnu primjenu u pomorstvu, a najviše zbog toga što je uglavnom svaki brod jedinstven. Postoje određene serije sestrinskih brodova kod komercijalnih teretnih brodova, no oni se i dalje uvelike razlikuju u pogonskoj opremi i sustavima. Navedeno, rezultira intezivnom analizom RCM-a za svaki brod i sustav [41].

RCM služi za određivanje najboljeg pristupa održavanju bilo kojeg fizičkog sustava kako bi se osiguralo da taj isti sustav nastavi obavljati svoju predviđenu funkciju/e u zadanim radnim uvjetima [42]. Cilj RCM-a je prepoznati kritične komponente u bilo kojem procesu i zatim osmisliti i prilagoditi tehniku preventivnog/prediktivnog održavanja na temelju tih informacija [43].

Postoje četiri načela koja definiraju i karakteriziraju RCM, a to su [44]:

- očuvanje funkcije sustava,
- prepoznavanje vrste kvara koja može dovesti do onemogućavanja izvršenja funkcije sustava,

-
- prioritizacija funkcijskih potreba sustava i vrste kvarova,
 - odabir efektivnog i primjenjivog pristupa održavanja.

Norma SAE JA1011 opisuje minimalne kriterije koje proces mora zadovoljiti da bi ga se moglo nazivati RCM-om. RCM proces odgovara na sljedećih sedam pitanja [45]:

1. Funkcije i standardi performansi - koje su funkcije i povezani standardi performansi opreme u trenutnom radnom kontekstu?
2. Funkcionalni kvar - na koje načine ne ispunjava svoje funkcije?
3. Vrsta kvara - koji je uzrok svakog funkcionalnog kvara?
4. Efekt kvara - što se događa kod pojave svakog kvara?
5. Posljedice kvara - Na koji je način svaki kvar važan?
6. Preventivni zadaci - što se sve može učiniti kako bi se spriječio svaki kvar?
7. Zadane radnje - što treba učiniti ako se ne može pronaći odgovarajući preventivni zadatak?

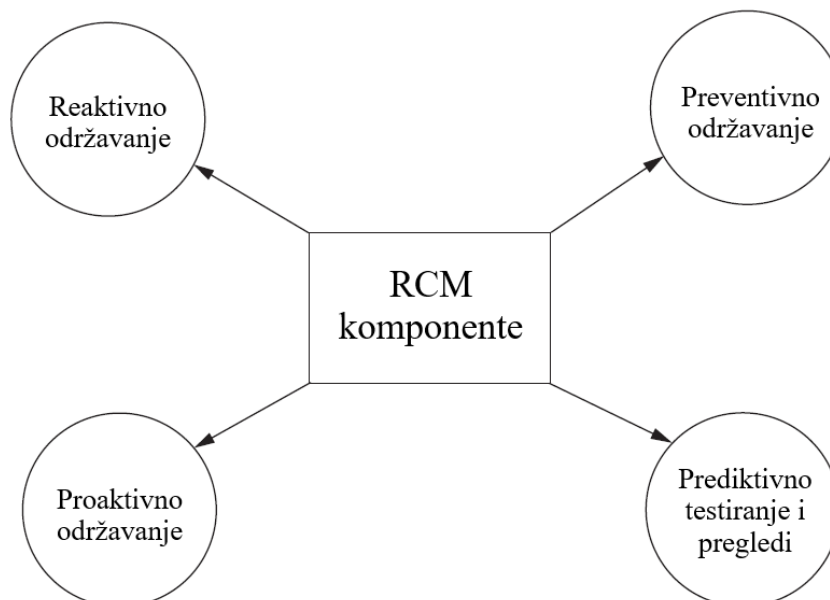
Iskustvo je pokazalo da se otprilike 30 % RCM analize koristi kako bi se dobio odgovor na prvo pitanje [39].

RCM analiza može se provesti kao niz aktivnosti ili koraka, od kojih se neki vremenski preklapaju [46]:

1. Priprema studije,
2. Izbor i definicija sustava,
3. Funkcionalna analiza kvara (*eng. Functional Failure Analysis, FFA*),
4. Odabir kritične stavke,
5. Prikupljanje i analiza podataka,
6. Analiza kvara, posljedica i kritičnosti (*eng. Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, FMECA*),
7. Odabir radnji održavanja,
8. Određivanje intervala održavanja,
9. Analiza usporedbe preventivnog održavanja,
10. Tretiranje nekritičnih stavki,
11. Implementacija,

12. Prikupljanje i ažuriranje podataka tijekom rada.

RCM se sastoji od četiri glavne komponente održavanja, odnosno objedinjuje navedene komponente prikazane na Slici 10 unutar održavanja temeljenog na pouzdanosti.



Slika 10. RCM komponente [30]

Reaktivno održavanje odnosi se na održavanje kada je to nužno potrebno, odnosno popravak u slučaju kvara. Ako se prakticira isključivo reaktivno održavanje, postoji vrlo visok postotak zamjene dijelova, vrlo malo truda posvećenog održavanju te puno neplaniranih aktivnosti vezanih uz održavanje. Reaktivno održavanje može se učinkovito provoditi samo ako se provodi kao odluka temeljena na zaključcima RCM analize, koja uspoređuje rizik i trošak kvara s troškom održavanja potrebnog za ublažavanje tog rizika i troška kvara [30].

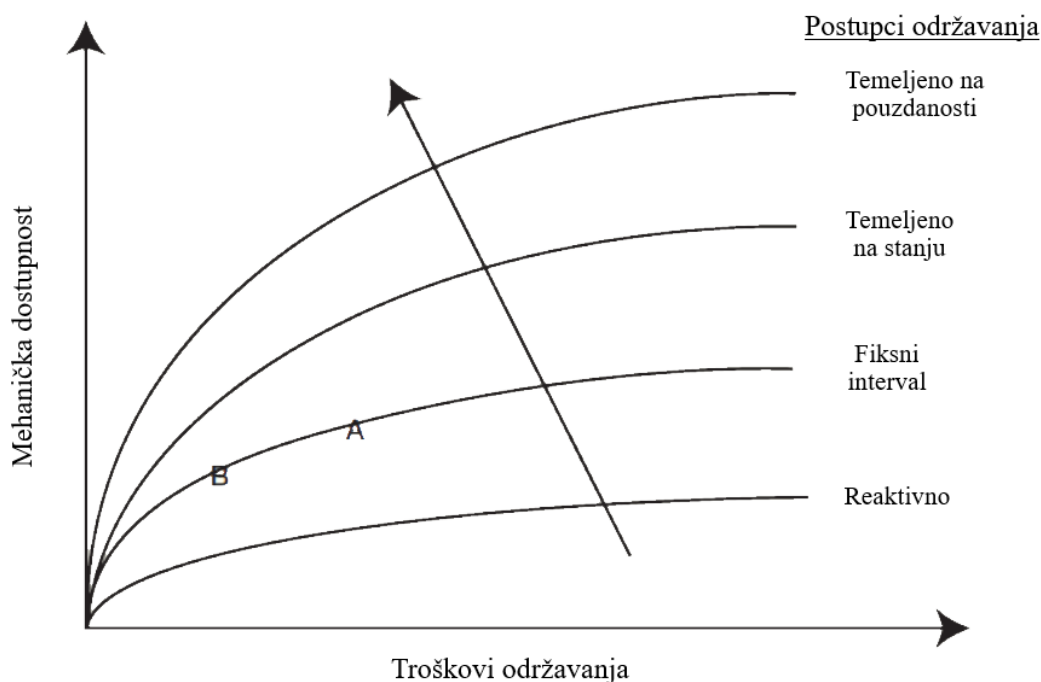
Preventivno održavanje (PM) ili intervalno održavanje provodi se bez obzira na stanje opreme. PM planira redovite preglede i održavanje prema zadanim intervalima s ciljem smanjenja kvarova. Ako se u održavanju koristi samo tehnika PM-a, može doći do značajnog povećanja rutinskih pregleda i održavanja, što u konačnici može biti vrlo skupo i neučinkovito [30].

Prediktivno testiranje i pregled (eng. *Predictive Testing and Inspection*, PTI) ponekad se još naziva i praćenje stanja ili prediktivno održavanje. Za procjenu stanja stavke koriste se podaci o performansama, nenametljive tehnike testiranja i vizualni pregled. PTI zamjenjuje proizvoljno tempirane zadatke održavanja s održavanjem koje se temelji na stanju stavke. Kontinuirana analiza podataka o praćenju stanja stavke/opreme korisna je za planiranje

rasporeda održavanja/popravaka prije nastanka katastrofalnog ili funkcionalnog kvara. PTI ne bi trebala biti jedina tehnika održavanja koja se prakticira, jer nije podložna svim vrstama stavaka/opreme i mogućim vrstama kvara [30].

Proaktivno održavanje pomaže poboljšati održavanje putem boljeg dizajna, proizvodnje, planiranja i provedbe održavanja. Karakteristike proaktivnog održavanja uključuju kontinuirano praćenje procesa poboljšanja korištenjem povratnih informacija i komunikacija kako bi se osiguralo da su promjene u konstrukciji/proizvodnji uspješno primijenjene. Unutar proaktivnog održavanja provodi se analiza korijena uzroka kvara i prediktivna analiza kako bi se povećala učinkovitost održavanja. Također, provodi se periodična evaluacija tehničkog sadržaja i performansi provedbe zadataka održavanja. Postoje različite tehnike koje se mogu primijeniti unutar proaktivnog održavanja, a jedna od osnovnih jest provedba analize pouzdanosti [30].

Kada se troškovi održavanja smanje bez promjene postupka održavanja, mehanička dostupnost se smanjuje, kao što je prikazano na Slici 11. Na Slici 11 prikazan je prelazak s točke A na B unutar tehnike održavanja bazirane na „fiksnom intervalu“. Unutar istih uvjeta vrijedi i suprotno, a to je da s povećanjem mehaničke dostupnosti rastu i troškovi održavanja. Jedini način da se istovremeno smanje troškovi održavanja i poveća mehanička dostupnost jest prelazak na proaktivnije postupke održavanja [47].



Slika 11. Ovisnost dostupnosti o troškovima održavanja [47]

2.2.5. Ostali postupci održavanja

Održavanje temeljeno na riziku (*eng. Risk-Based Maintenance, RBM*) ima za cilj utvrditi rizike opreme ili sustava na temelju vjerojatnosti nastanka kvara i njegovih posljedica [48] te minimizirati vjerojatnost kvara sustava uz istovremeno ublažavanje njegovih posljedica [49]. Planovi održavanja koji se provode pomoću RBM-a dovode do koncentriranja održavanja na komponente povezane s visokim rizikom koje je potrebno češće održavati, nego uređaje niskog rizika [50]. Na taj način može se postići smanjenje operativnih troškova i stope nastanka kvarova [51].

Slično tome, postoji i postupak pomoću inspekcije temeljene na riziku (*eng. Risk-Based Inspection, RBI*) koja služi za određivanje prioriteta i planiranja inspekcije sustava. Ova vrsta planiranja inspekcije analizira vjerojatnost neuspjeha i posljedice istog kako bi se izradio plan inspekcije [52]. RBI pomaže u odabiru troškovno učinkovitih i odgovarajućih zadataka i tehnika održavanja te inspekcije. Također, pomaže u prebacivanju s reaktivnog na proaktivni režim održavanja [53].

Još jedan pristup održavanju jest potpuno proizvodno održavanje (*eng. Total Productive Maintenance, TPM*). Iako je TPM razvijen u industriji proizvodnje i montaže, njegova su načela primjenjiva i drugdje. TPM je izvorno definiran tako da uključuje sljedećih pet strategija koje su redefinirane kao [41]:

1. Povećanje ukupne učinkovitosti opreme.
2. Uspostavljanje sveobuhvatnog sustava preventivnog održavanja koji pokriva cijeli vijek trajanja opreme.
3. Uključivanje svih odjela koji planiraju, koriste i održavaju opremu.
4. Uključivanje svih zaposlenika, od menadžmenta do radnika u proizvodnji.
5. Promoviranje preventivnog održavanja kroz motivaciju.

3. MATEMATIČKI MODEL

3.1. Analiza grešaka i posljedica

Prva uputstva za korištenje metode za analizu kvara i posljedica koje one izazivaju (FMEA) objavljena su 1949. godine, a metoda se i danas ubraja među najčešće korištene u analizi pouzdanosti sustava [17, 19]. FMEA pregledava komponente, sklopove i podsustave s ciljem identificiranja mogućih vrsta kvarova, njihovih uzroka i posljedica. Za svaku komponentu bilježe se vrste kvarova i njihove posljedice, koje utječu na ostatak sustava, na posebnom FMEA radnom listu. Postoje brojne varijante takvih radnih listova, a jedan tipičan primjer prikazan je na Slici 13 [19].

Ako se svakom kvaru dodijeli razina kritičnosti ili prioritet, metoda se proširuje i postaje analiza kvara, posljedica koje one izazivaju i kritičnosti, poznata kao FMECA (*eng. Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*). Radi jednostavnosti, u daljnjem tekstu koristit će se izraz FMECA za oba pojma [19].

Za tehničke stavke koriste se uglavnom dva pristupa, a to su [19]:

1. Hardver FMECA koristi se za analizu postojećih sustava i koncepata sustava. Pojedinačne komponente na najnižoj razini u hijerarhiji sustava analiziraju se kako bi se identificirale moguće vrste kvarova, njihovi uzroci i posljedice. Kada se analiziraju komponente na najnižoj razini, prelazi se na sljedeću višu razinu u hijerarhiji. Koristi se pristup odozdo prema gore.
2. Funkcionalna FMECA uglavnom se koristi u ranim fazama projektiranja sustava. Analiza počinje s funkcijom sustava najviše razine, a ispituje se kako ta funkcija može zakazati, koji su uzroci i posljedice. Isti postupak slijedi za svaki funkcionalni kvar. Provodi se pristupom odozgo prema dolje.

3.1.1. Hardver FMECA

Ciljevi hardverske FMECA u fazi projektiranja su sljedeći [19]:

- Pomoć u odabiru alternativnih rješenja s visokom pouzdanošću i visokim sigurnosnim potencijalom tijekom rane faze projektiranja.

- Pobrinuti se da su uzete u obzir sve moguće vrste kvarova te posljedice na operativni sustav.
- Navesti potencijalne kvarove i odrediti težinu njihovih posljedica.
- Razviti rane kriterije za planiranje testiranja te dizajn sustava testiranja i provjere.
- Osigurati osnove za kvantitativnu analizu pouzdanosti i dostupnosti.
- Osigurati povijesnu dokumentaciju za buduću referencu kao pomoć u analizi kvarova na terenu i razmatranju promjena konstrukcija.
- Osigurati ulazne podatke za studije kompromisa.
- Osigurati osnovu za utvrđivanje prioriteta korektivnih radnji.
- Pružiti pomoć u objektivnoj procjeni projektnih zahtjeva koji se odnose na redundanciju, sustave za otkrivanje kvarova, karakteristike sigurnosti od kvara te automatsko i ručno upravljanje.

FMECA se uglavnom koristi kao kvalitativna analiza te ju provode projektanti tijekom faze projektiranja sustava. Svrha je identificirati područja u kojima su potrebna poboljšanja kako bi se ispunili zahtjevi pouzdanosti [19].

3.1.2. Opis primjene postupka FMECA metode

FMECA ne zahtijeva nikakve napredne analitičke vještine, ali analitičari moraju biti upoznati sa svrhom stavke proučavanja i ograničenjima pod kojima ona radi. Analiza se provodi kao niz od sedam glavnih koraka, kao što je prikazano primjerom na Slici 12. Broj i sadržaj koraka ovise o primjeni i granicama analize [19].



Slika 12. Glavni koraci [19]

Različiti unosi u FMECA radni list najbolje se ilustriraju prolaskom kroz određeni radni list, stupac po stupac. Kao primjer prikazan je FMECA radni list na Slici 13, prema sljedećim stupcima [19]:

- (1) Referenca: naziv/oznaka artikla ili referenca na crtež navodi se u prvom stupcu.
- (2) Funkcija: funkcija stavke iz prvog stupca.

-
- (3) Način rada: stavka može imati različite načine rada, npr. rad ili stanje pripravnosti. U analizama gdje nije bitno razlikovati načine rada, ovaj stupac može se izostaviti.
 - (4) Vrsta kvara: za funkciju i način rada svake komponente identificiraju se i bilježe sve vrste kvarova. Definiiraju se kao neispunjavanje funkcionalnih zahtjeva funkcija navedenih u stupcu 2.
 - (5) Uzroci i mehanizmi kvara: mogući mehanizmi kvara (korozijska, erozijska, zamor, itd.) koji mogu proizvesti identificirane vrste kvarova. Također treba zabilježiti i ostale uzroke.
 - (6) Otkrivanje kvara: način otkrivanja svakog uzroka kvara, što uključuje alarme, testiranje, ljudsku percepciju itd.
 - (7) Posljedice na druge komponente u istom podsustavu: bilježe se sve glavne posljedice identificiranih vrsta kvarova na ostale komponente u podsustavu.
 - (8) Posljedice na funkciju sustava: bilježe se sve glavne posljedice identificirane vrste kvara na funkciju sustava. Može zabilježiti i rezultirajuće operativno stanje sustava nakon pojave kvara, tj. radi li sustav ili ne te je li prebačen u drugi način rada.
 - (9) Stopa kvara: bilježi se stopa kvarova za svaku vrstu kvara.
 - (10) Težina: težina vrste kvara potencijalna je posljedica kvara koja je određena stupnjem ozljede, štete na imovini ili oštećenja sustava do kojih bi u konačnici moglo doći.
 - (11) Mjere za smanjenje rizika: bilježe se moguće radnje za ispravljanje kvara i ponovno uspostavljanje funkcije sustava ili sprječavanje ozbiljnih posljedica. Također se mogu zabilježiti radnje koje će vjerojatno smanjiti učestalost vrste kvara.
 - (12) Komentari: ovaj se stupac može koristiti za bilježenje relevantnih informacija koje nisu uključene u drugim stupcima

Kombiniranjem stupca 9 i 10 može se dobiti matrica rizika, koja je prikazana u prethodnom poglavlju na Slici 5 [19].

Sustav:			Izradio:								
Ref. br. crteža:			Datum:					Stranica: od			
Opis stavke			Opis kvara			Posljedica kvara		Stopa kvara	Težina	Mjere za smanjenje rizika	Komentari
Ref.	Funkcija	Način rada	Vrsta kvara	Uzroci i mehanizmi kvara	Otkrivanje kvara	Posljedice na druge komponente u istom podsustavu	Posljedice na funkciju sustava				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)

Slika 13. FMECA radni list [19]

3.1.3. Broj prioriteta rizika

U nekim područjima primjene, npr. u automobilskoj industriji, uobičajeno je predstaviti "rizik" povezan s vrstom kvara kao broj prioriteta rizika (eng. *Risk Priority Number*, RPN). RPN se izračunava kao umnožak ocjena ozbiljnosti (eng. *Severity*, S), stope pojave (eng. *Occurrence*, O) i detekcije (eng. *Detection*, D) [19]:

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

gdje je:

- Ozbiljnost (S): ocjena ozbiljnosti je numerička vrijednost, subjektivno odabrana kao cijeli broj između 1 i 10, koja procjenjuje kolika je težina vrste kvara.
- Stopa pojavljivanja (O): ocjena pojavljivanja je numerička vrijednost, subjektivno odabrana kao cijeli broj između 1 i 10, koja procjenjuje vjerojatnost da će se određena vrsta kvara dogoditi tijekom vijeka trajanja stavke.
- Detekcija (D): ocjena detekcije je numerička vrijednost, subjektivno odabrana kao cijeli broj između 1 i 10, koja procjenjuje učinkovitost kontrola za sprječavanje ili otkrivanje kvara prije nego što kvar dođe do korisnika.

RPN kao takav nema određeno značenje (vrijednost mu se kreće od 1 do 1000), ali se može koristiti za rangiranje problema u sustavu. Međutim, u mnogim primjenama težina ima veći prioritet od RPN-a. RPN-ovi se koriste samo za određivanje prioriteta razmatranja

potencijalnih slabosti sustava kako bi se poduzele određene radnje te smanjila kritičnost i/ili osjetljivost u proizvodnji [19].

U ovom radu RPN će se definirati prema standardu MIL-HDBK-338B [54]. U Tablicama 2 – 4 prikazane su vrijednosti ozbiljnosti kvara, stope pojave odnosno vjerojatnosti kvara te vjerojatnosti detekcije kvara.

Tablica 2. Rangiranje ozbiljnosti posljedica [54]

Posljedice	Ozbiljnost posljedica	Poredak
Opasno – bez upozorenja	Vrlo visok stupanj ozbiljnosti kada moguća vrsta kvara utječe na siguran rad sustava bez upozorenja.	10
Opasno – uz upozorenje	Vrlo visok stupanj ozbiljnosti kada moguća vrsta kvara utječe na siguran rad sustava s upozorenjem.	9
Vrlo velike	Sustav neispravan s destruktivnim kvarom bez ugrožavanja sigurnosti. Gubitak primarne funkcije.	8
Velike	Sustav je operativan, ali s reduciranom razinom performansi. Kupac nezadovoljan.	7
Umjerene	Sustav je operativan, stavka/e nisu operativne. Manja oštećenja. Kupac doživljava nelagodu.	6
Niske	Sustav je operativan, a stavka/e operativne s reduciranim performansama. Kupac doživljava određeno nezadovoljstvo	5
Vrlo niske	Stavke ne odgovaraju međusobno, tvore buku. Nedostatak koji primjećuje većina kupaca.	4
Male	Stavke ne odgovaraju međusobno, tvore buku. Nedostatak koji primjećuje polovica kupaca.	3
Vrlo male	Stavke ne odgovaraju međusobno, tvore buku. Nedostatak koji primjećuje mali dio kupaca.	2
Nikakve	Nema posljedica.	1

Tablica 3. Rangiranje vjerojatnosti kvarova [54]

Vjerojatnost kvarova	Moguće stope kvarova	Poredak
Vrlo velika: Kvar je gotovo neizbježan.	> 1 in 2	10
	1 in 3	9
Velika: Ponavljajući kvarovi.	1 in 8	8
	1 in 20	7
Umjerena: Povremeni kvarovi.	1 in 80	6
	1 in 400	5
	1 in 2,000	4
Niska: Relativno malo kvarova.	1 in 15 000	3
	1 in 150 000	2
Mala: Kvar je malo vjerojatan.	<1 in 1 500 000	1

Tablica 4. Rangiranje vjerojatnosti detekcije [54]

Detekcija	Kriterij vjerojatnosti detekcije	Poredak
Apsolutna nesigurnost	Kontrola dizajna neće i/ili ne može otkriti potencijalni uzrok/mehanizam kvara; ili nema kontrole dizajna.	10
Vrlo mala	Vrlo mala vjerojatnost da će kontrola dizajna otkriti potencijalni uzrok/mehanizam kvara.	9
Mala	Mala vjerojatnost da će kontrola dizajna otkriti potencijalni uzrok/mehanizam kvara.	8
Vrlo niska	Vrlo niska vjerojatnost da će kontrola dizajna otkriti potencijalni uzrok/mehanizam kvara.	7
Niska	Niska vjerojatnost da će kontrola dizajna otkriti potencijalni uzrok/mehanizam kvara.	6
Umjerena	Umjerena vjerojatnost da će kontrola dizajna otkriti potencijalni uzrok/mehanizam kvara.	5
Umjereno visoka	Umjereno visoka vjerojatnost da će kontrola dizajna otkriti potencijalni uzrok/mehanizam kvara.	4
Visoka	Visoka vjerojatnost da će kontrola dizajna otkriti potencijalni uzrok/mehanizam kvara.	3
Vrlo visoka	Vrlo visoka vjerojatnost da će kontrola dizajna otkriti potencijalni uzrok/mehanizam kvara.	2
Gotovo sigurna	Kontrola dizajna će otkriti potencijalni uzrok/mehanizam kvara.	1

3.1.4. Primjena

Mnoge industrije zahtijevaju da FMECA bude integrirana u proces projektiranja tehničkih sustava i da radni listovi budu dio dokumentacije sustava. To je uobičajena praksa za dobavljače zrakoplovne i automobilske industrije. Isti zahtjevi postaju sve češći i u brodograđevnoj industriji [19].

FMECA najviše pridonosi kada se provodi tijekom faze projektiranja sustava. Glavni cilj analize je otkriti slabosti i potencijalne kvarove u ranoj fazi kako bi se projektantu omogućilo da napravi ispravke u projektu. Rezultati FMECA-e također mogu biti korisni tijekom modificiranja sustava i planiranja održavanja. Projektanti su obučeni razmišljati u smislu funkcionalnosti, tj. kako dizajnirati sustav da zadovolji određene funkcionalne zahtjeve. Analizom su prisiljeni razmotriti potencijalne kvarove, a uz ranu svijest o potencijalnim kvarovima ti isti kvarovi mogu biti uklonjeni iz sustava [19].

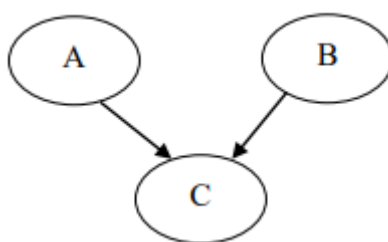
Mnoge industrije uvode program održavanja usmjeren na pouzdanost (RCM), a FMECA je jedan od osnovnih alata RCM-a. Budući da su sve vrste kvarova, mehanizmi kvarova i uzroci dokumentirani u FMECA-i, to pruža vrijedne informacije koje mogu poslužiti kao osnova za postupke dijagnostike kvarova te za kontrolne liste servisera. Metoda je vrlo učinkovita kada se primijeni na sustav u kojem su kvarovi sustava najvjerojatnije rezultat kvara jedne

komponente. Tijekom analize svaki se kvar promatra pojedinačno kao neovisna pojava bez veze s drugim kvarovima u sustavu. Metoda nije prikladna za analizu sustava s velikim stupnjem redundancije. Za takve sustave analiza stabla grešaka (*eng. Fault Tree Analysis, FTA*) predstavlja bolju alternativu [19].

Također, FMECA nije prikladna za analizu sustava u kojima se kvarovi zajedničkog uzroka smatraju značajnim problemom [19]. Nedostatak pristupa leži u tome što rezultati procjene mogu varirati ovisno o iskustvu osobe koja obavlja procjenu rizika [22]. Jedan od najvećih nedostataka jest što se svi kvarovi komponenti ispituju i dokumentiraju, a to uključuje i one koji nemaju značajnije posljedice. Zbog navedenog kod velikih je sustava, posebice sustava s visokim stupnjem redundancije, prisutna je velika količina nepotrebnog rada na dokumentaciji [19].

3.2. Bayesova mreža

Bayesova mreža (BN) je grafička probabilistička tehnika za prikaz skupa slučajnih varijabli i njihovih uvjetnih ovisnosti kroz usmjereni aciklički graf (*eng. Directed Acyclic Graph, DAG*). U BN-u čvorovi predstavljaju varijable (npr. korijenske događaje, sigurnosne barijere i posljedice scenarija nesreće), dok rubovi ilustriraju uvjetne ovisnosti između povezanih čvorova [55]. U BN-u se čvor s čijeg je ruba strelica usmjerena na drugi čvor naziva „roditelj”, dok se drugi čvor na čiji je rub usmjerena strelica naziva „dijete”. Svaki čvor povezan je s distribucijom vjerojatnosti kao funkcijom stanja roditeljskih varijabli čvora [56].



Slika 14. Prikaz osnovne Bayesove mreže [57]

Na Slici 14 prikazani su čvorovi „A” i „B” koji su roditeljski čvorovi čvora „C” (dijete). U BN-ovima tablice uvjetne vjerojatnosti (*eng. Conditional Probability Table, CPT*) dodjeljuju se čvorovima na temelju vrste i snage uzročno-posljedičnih odnosa između čvorova roditelj-dijete. Na temelju kriterija d-separacije svi korijenski čvorovi uvjetno su neovisni o svojim nenasljednim čvorovima s obzirom na svoje neposredne roditelje. Kao takve, vjerojatnosti korijenskih događaja (oštre ili nejasne) dodjeljuju se odgovarajućim korijenskim čvorovima

kao prethodne vjerojatnosti, dok se za međučvorove, kao i za lisne čvorove (vršni događaji), razvijaju CPT-ovi [58]. BN služi kao učinkovita metoda za modeliranje i sigurnosnu analizu složenih sustava zahvaljujući svojoj prilagodljivoj strukturi i mogućnosti probabilističkog zaključivanja [59]. Uzimajući u obzir uvjetne ovisnosti varijabli i lančano pravilo, BN predstavlja zajedničku distribuciju vjerojatnosti skupa varijabli $U = \{X_1, \dots, X_n\}$ kao [60]:

$$P(U) = \prod_{i=1}^n P(X_i | P_a(X_i)) \quad (2)$$

Gdje je $P_a(X_i)$ roditeljski skup varijable X_i . Prema tome vjerojatnost X_i izračunava se kao [60]:

$$P(X_i) = \sum_{X_j, j \neq i} P(U) \quad (3)$$

BN koristi Bayesov teorem za pružanje ažuriranih (posteriornih) vjerojatnosti događaja s obzirom na nova opažanja koja se nazivaju „dokaz” (eng. *Evidence*, E), kao što je prikazano u jednadžbi (4). Ovi dokazi mogu biti u obliku pojavljivanja zamalo nesreća, nesreća, incidenata ili opažanja posljedica nesreće koje postaju dostupne tijekom životnog ciklusa procesa [60].

$$P(U | E) = \frac{P(U, E)}{P(E)} = \frac{P(U, E)}{\sum_U P(U, E)} \quad (4)$$

3.3. Procedura mapiranja FMEA-BN modela

Primarna ideja FMEA-BN modela je proširenje FMEA metodologije s mogućnošću ažuriranja utjecaja radnog okruženja na pouzdanost. Metodološki gledano, sastoji se od dva podmodela, a to su FMEA i BN, koji dijele zajedničku informaciju vjerojatnosti kvara. Unutar BN podmodela vjerojatnosti kvarova ažuriraju se prema stvarnim radnim uvjetima. Ažurirani dokazi zatim se prenose u FMEA podmodel kao osnova za ponovno izračunavanje RPN-a. Prvo je potrebno konstruirati BN model iz FMEA strukture. Neka su elementi u FMEA $\mathbf{V} = (\mathbf{N}, \mathbf{L})$, gdje je [61]:

$$\mathbf{N} = \{N^{\text{FOWT}}, \mathbf{X}^{\text{SYST}}, \mathbf{X}^{\text{COMP}}, \mathbf{X}^{\text{FM}}, \mathbf{X}^{\text{FE}}, \mathbf{X}^{\text{FC}}\} \quad (5)$$

$$\mathbf{L} = \{L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_n\}. \quad (6)$$

U jednadžbama (5) i (6) \mathbf{N} predstavlja stavku u kvaru, dok \mathbf{L} predstavlja povezanost između stavki u kvaru kao što je hijerahijska struktura ponašanja kvara, npr. plutajuća vjetroturbina

na moru – sustav – komponenta – vrsta kvara – uzrok kvara. N^{FOWT} predstavlja najvišu razinu FMEA modela, koji u ovom slučaju predstavlja plutajuću vjetroturbinu na moru. \mathbf{X}^{SYST} , \mathbf{X}^{COMP} , \mathbf{X}^{FM} , \mathbf{X}^{FE} , \mathbf{X}^{FC} predstavljaju skup čvorova na razini sustava (npr. sustav vjetroturbine), razini komponente (npr. generator), razini vrste kvara (npr. puknuti konopi za privez), razini posljedice kvara (npr. gašenje vjetroturbine) i razini uzroka kvara (npr. zamor). BN model može se izvesti iz FMEA strukture prema sljedećim koracima [61]:

Korak 1: Mapiranje čvorova.

Na Slici 15(a) prikazano je mapiranje čvorova BN modela prema stavkama FMEA strukture uključujući stavke u \mathbf{X}^{SYST} , \mathbf{X}^{COMP} , \mathbf{X}^{FM} , \mathbf{X}^{FE} , \mathbf{X}^{FC} i N^{FOWT} [61].

Korak 2: Određivanje stanja čvorova.

Za $\forall X_j^{\text{COMP}} \in \mathbf{X}^{\text{COMP}}$ određuju se vrste kvarova za komponente X_j^{COMP} označeni kao X_i^{FM} . Holistički gledano, razmatra se $N+1$ stanja svake komponente uključujući N vrsta kvarova i radno stanje. Pretpostavlja se da X_j^{COMP} ili radi normalno (radno stanje), ili je u kvaru (što se predstavlja poznatim vrstama kvara X_i^{FM}), kao što je prikazano na Slici 15(b) [61].

Korak 3: Mapiranje lukova.

U ovom koraku povezuju se svi čvorovi koji opisuju ponašanje kvara (sustav – komponenta – uzrok kvara) pomoću usmjerenih lukova u mehanizmu „odozdo prema gore”. Usmjereni luk započinje od uzroka kvara i pokazuje prema razini sustava, kao što je prikazano na Slici 15(c). Ako čvor X_j^{COMP} ima vanjski utjecaj, tada mu se dodjeljuje usmjereni luk koji započinje s čvorom X_j^{COMP} i pokazuje prema čvoru odgovarajuće posljedice $X_i^{\text{FE}} \in \mathbf{X}^{\text{FE}}$. Ovaj proces se ponavlja za cijeli BN model. Kako bi se izbjegli kružni ciklusi, uvodi se načelo izbjegavanja kruženja, prema kojem čvor X_i ne smije direktno ili indirektno pokazivati na svoj roditeljski čvor. Navedeno se primjenjuje na čvorovima \mathbf{X}^{SYST} i \mathbf{X}^{COMP} kako bi se osiguralo da usmjereni lukovi uvijek pokazuju prema čvorovima na višim razinama, čime bi se izbjegli usmjereni ciklusi unutar BN modela [61].

Korak 4: Agregacija čvorova.

Spajaju se čvorovi koji predstavljaju isti uzrok kvara u skupu \mathbf{X}^{FC} i vrstu kvara u skupu \mathbf{X}^{FE} . Potrebno je napomenuti kako agregacija čvorova ne smije promijeniti ponašanje kvara i prijenosne putanje. Npr. razlozi istrošenosti ležajeva i zupčanika generatora su neprikladno

početno prednaprezanje i pogreške kod ugradnje te prema tome nije potrebna agregacija. S druge strane spajanje čvorova ne bi trebalo brisati usmjerene lukove agregiranih čvorova, što uključuje one od kojih počinju i one na koje ukazuju. Također, agregacija čvorova ne smije promijeniti prikazana fizička svojstva kvara, kao što je prikazano na Slici 15(d) [61].

Korak 5: Vjerojatnost kvara - određivanje korijenskih čvorova.

Vjerojatnost kvarova korijenskih čvorova može se približno odrediti njihovim učestalostima nakon dugotrajnog promatranja ili analizom zapisa sustava. Model konstante stope kvarova primjenjiv je za mapiranje odnosa između stope kvara, vjerojatnosti kvara i srednjeg vremena do kvara (*eng. Mean Time to Failure*, MTTF) elemenata, zbog čega dostupni podaci o kvaru nisu uvijek dostatni da bi odgovarali distribuciji životnog vijeka za sve uzroke kvara. Stopa pojavljivanja za uzrok kvara (λ_i^{FC}) može se izračunati pomoću MTTF-a kao [61]:

$$\lambda_i^{FC} = \frac{1}{MTTF_i^{FC}} \quad (7)$$

Shodno tome vjerojatnost pojave uzroka kvara određuje se prema [60]:

$$P_i^{FC} = 1 - e^{-\lambda_i^{FC} \cdot t} \quad (8)$$

Korak 6: Određivanje tablice uvjetne vjerojatnosti.

Tablice uvjetnih vjerojatnosti (CPT) definiraju odnose između čvorova u BN modelu. Ove vjerojatnosti mogu se izračunati na temelju [61]:

- Zapisa o održavanju, npr. OREDA.
- Mišljenja stručnjaka, ako podaci o održavanju nisu dostupni.

Ažuriranjem vjerojatnosti kvara pomoću BN modela, koristeći dijagnostičke podatke i uvjetne vjerojatnosti, posteriorna vjerojatnost može se ažurirati prema jednažbi (4). Zajednička vjerojatnost za više neovisnih varijabli može se dobiti prema jednažbi (2) [61].

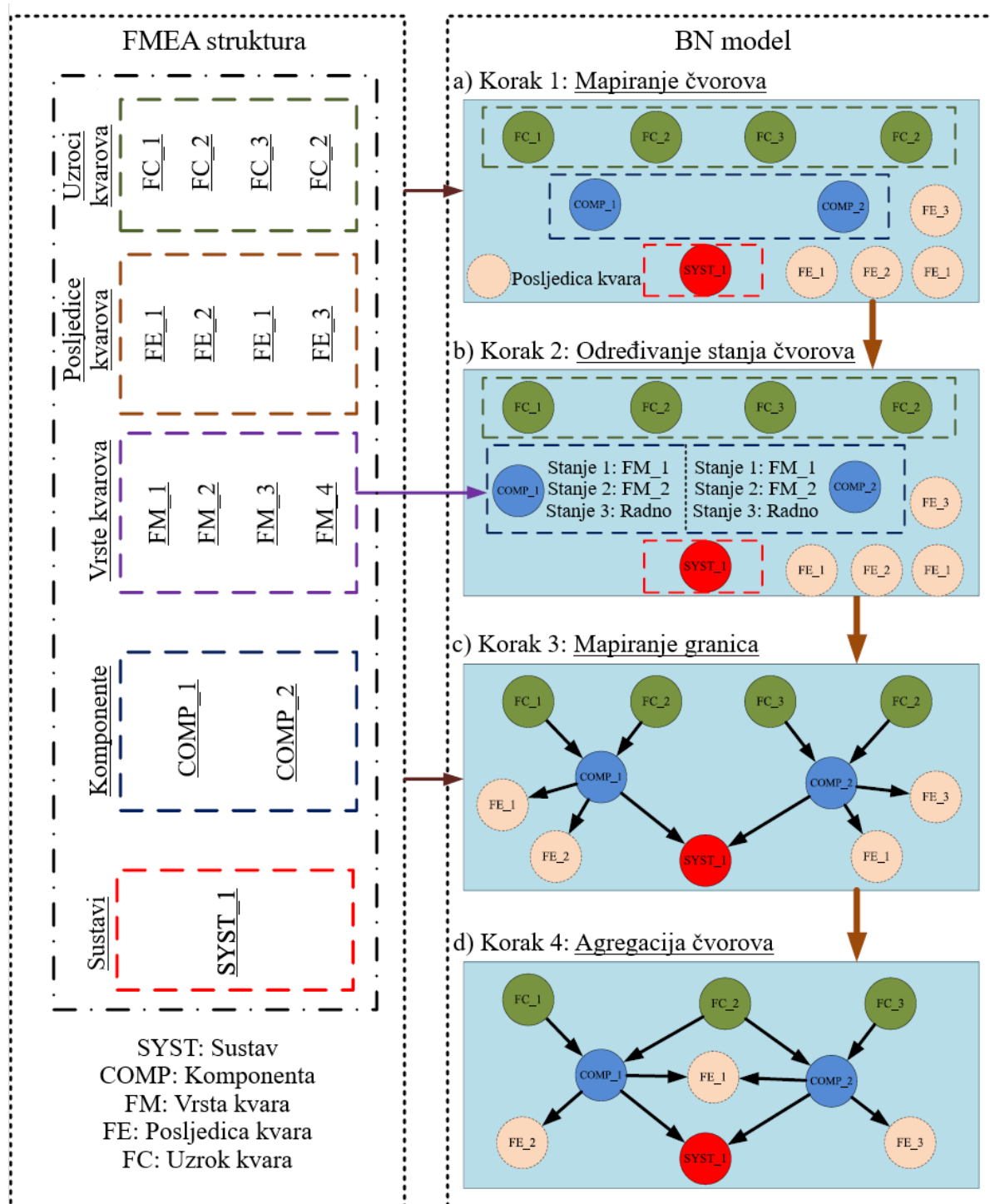
Moguće je ažurirati RPN^{FC} na temelju posteriorne vjerojatnosti na razini uzroka kvara. Za vrstu kvara vrijedi [61]:

$$RPN^{FM} = \sum RPN^{FC} \quad (9)$$

zbroj svih RPN-ova uzroka kvara povezanih s tom vrstom kvara. Za komponentu vrijedi [61]:

$$RPN^{COMP} = \sum RPN^{FM} \quad (10)$$

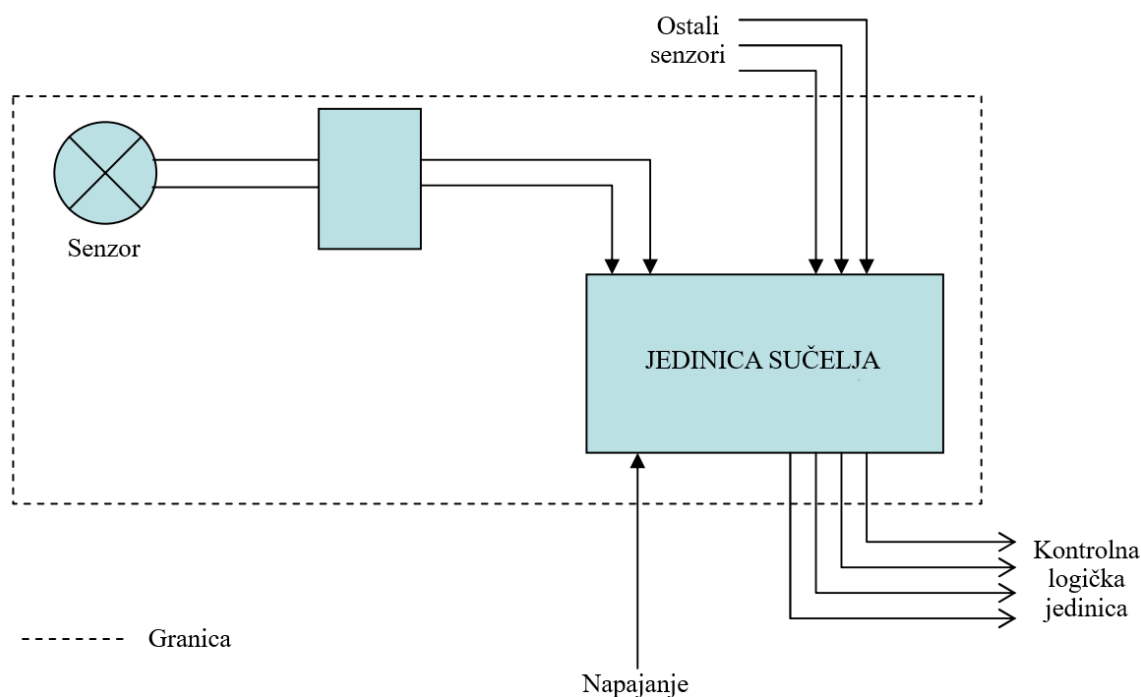
Zbroj svih RPN-ova vrsta otkaza povezanih s tom komponentom. Ista analogija vrijedi i za sustav [61].



Slika 15. Postupak mapiranja FMEA-BN modela [61]

4. ANALIZA ODABRANOG SUSTAVA

Katalitički detektor plina sastoji se od senzorskog dijela i zasebne elektroničke jedinice (jedinice sučelja), koji zajedno čine krug Wheatstoneovog mosta. Senzor sadrži elemente koji su osjetljivi na plin ugljikovodika, tj. na prirodni plin (katalitička oksidacija elementa). Promjena električnog otpora proizvodi struju izvan ravnoteže u krugu Wheatstoneovog mosta. Jedinica sučelja (*eng. Interface Unit*) može se nalaziti u kontrolnim sobama ili na terenu. Neki dobavljači sustava logičke kontrole dizajnirali su zasebne ulazne kartice za senzore plina te se stoga ne koriste jedinice sučelja koje je osigurao dobavljač plinskog senzora. U predloženoj raščlambi sustava namjenske kartice za unos plina smatraju se dijelom detektora plina (jedinice sučelja), a ne dijelom kontrolnih logičkih jedinica (*eng. Control Logic Unit, CLU*), kao što je prikazano na Slici 16 [62].



Slika 16. Prikaz sustava za detekciju požara i plinova [63].

Većina konvencionalnih senzora požara na izlazu generira standardni signal koji je kompatibilan sa standardnim ulaznim modulom logičkog sustava upravljanja. Stoga za ove detektore požara ne postoji zasebna jedinica sučelja. Za detektore požara i plinova (*eng. Fire & Gas Detectors*) nema potpodjele na razini podjedinice, nego samo na razini stavke za održavanje. Jedan od razloga proizlazi iz toga što je uobičajeno zamijeniti i dijelove na

senzoru i na dijelu sučelja tijekom popravka. Smatra se kako će se u budućnosti koristiti sve više adresabilnih sustava za detekciju požara jer je u njima više pojedinačnih detektora spojeno u jednu jedinicu sučelja [62]. Slika 16 prikazuje shematski prikaz odabranog sustava. Na slici je jasno prikazana granica sustava, koja mora biti točno određena kako bi se obuhvatili svi elementi (stavke) koji utječu na funkcionalnost i performanse sustava. U Tablici 5 prikazana je podjela komponenata i potpodjela stavki unutar komponenata.

Tablica 5. Komponente sustava [62]

DETEKTORI POŽARA I PLINOVA		
Senzori	Jedinica sučelja	Razno
Kablovi	Ormar	Ostalo
Poklopac	Kontrolna kartica	
Detektor (uključujući glavu i pripadajuću elektroniku)	Zaslona	
Montažna utičnica		

Unutar baze podataka „OREDA” postoji klasifikacija kvarova prema ozbiljnosti [62, 64]:

1. Kritični kvar (*eng. Critical failure*): Kvar koji dolazi iznenada i uzrokuje prestanak jedne ili više temeljnih funkcija.
2. Degradirani kvar (*eng. Degraded Failure*): Kvar koji nije kritičan, ali sprječava normalno funkcioniranje opreme. Kvar može biti postupni ili djelomični te može napredovati i postati kritičan.
3. Kvar u početku (*eng. Incipient Failure*): Nesavršenstvo u stanju stavke koje može napredovati u degradirani ili kritični neuspjeh ako se ne poduzmu korektivne radnje.
4. Nepoznati (*eng. Unknown*): Ozbiljnost kvara nije bilo moguće zaključiti ili zabilježiti.

Popis vrsta kvarova (*eng. Failure Mode, FM*) za odabrani sustav prema OREDA izvješću [62]:

- ERO – Nepravilan izlaz (*eng. Erratic output*),
- FTF – Ne funkcionira na zahtjev (*eng. Fail to function on demand*),
- HIO – Visoki izlaz (*eng. High output*),

-
- LOO – Nizak izlaz (*eng. Low output*),
 - LOU – Nizak izlaz, nepoznato očitavanje (*eng. Low output, unkown reading*),
 - NOO – Nema izlaza (*eng. No output*),
 - OTH – Ostalo (*eng. Other*),
 - SER – Manji problemi u radu (*eng. Minor in-service problems*),
 - SHH – Lažni alarm visoke razine (*eng. Spurious high level alarm signal*),
 - SPO – Lažna operacija (*eng. Spurious operation*),
 - UNK – Nepoznato (*eng. Unknown*).

Svaku vrstu kvara prouzročuje jedan ili više uzroka kvara sa sljedećeg popisa [62]:

- lom (*eng. Brekeage*),
- kontaminacija (*eng. Contamination*),
- pogrešan signal (*eng. Faulty signal*),
- kvar instrumenta (*eng. Instrument failure*),
- lom materijala (*eng. Material failure*),
- razni vanjski utjecaji (*eng. Miscellaneous external influences*),
- nema signala (*eng. No signal*),
- neispravno podešen instrument (*eng. Out of adjustment*)
- pad sustava (*eng. Software failure*),
- nepoznato (*eng. Unknown*).

4.1. FMEA analiza sustava

OREDA klasificira vrste kvarova na temelju njihovih ozbiljnosti, koje se dijele se na: kritične (*eng. Critical*), degradirane (*eng. Degraded*), na početku (*eng. Incipient*) i nepoznate (*eng. Unknown*). Vrste kvarova prema ocjeni ozbiljnosti „nepoznato” ne uzimaju se u obzir zbog njihove nesigurnosti. Prema mišljenju mnogih stručnjaka te prema standardima, npr. „ISO 14224”, u obzir bi se trebale uzeti samo vrste kvarova s kritičnom ocjenom ozbiljnosti. Budući da se pretpostavlja kako mehanizam kvara u mnogim slučajevima počinje od niske ozbiljnosti i prelazi u kritičnu, u proračun bi se trebale uključiti stope kvara iz svih faza ozbiljnosti. Kvarovi na početku ne mogu se nazvati kvarovima, zato što stavka i dalje

ispunjava svoju funkciju. Međutim, s obzirom na to da je cilj otkriti kvar prije njegovog nastanka, a „incipient“ predstavlja posljednju fazu prije nastanka kvara, u obzir su uzeti svi kvarovi osim onih s nepoznatom ocjenom ozbiljnosti. Ukupna stopa kvara proračunava se prema sljedećoj jednadžbi [65]:

$$\lambda = \frac{n_I + n_D + n_C}{\text{Vrijeme}(10^6)}, \quad (11)$$

gdje je:

n_I – broj kvarova u početku,

n_D – broj degradiranih kvarova,

n_C – broj kritičnih kvarova.

Svaka vrsta kvara ima više stavki koje doprinosi stopi kvara. Kako bi se odredila svaka stavka koja doprinosi određenoj vrsti kvara, potrebno je sagledati tablicu unutar baze podataka, u kojoj su navedene stavke koje se mogu održavati u odnosu na vrstu kvara. Također, unutar tablice je prikazan postotak kojim svaka stavka doprinosi ukupnoj stopi kvarova.

Unutar baze podataka „OREDA” nalazi se i tablica u kojoj je prikazan odnos između svake vrste kvara i uzroka kvara te udio svakog uzroka u ukupnoj stopi kvara. Pomoću te tablice određeni su uzroci kvarova za svaku od vrsta.

Određivanjem stavki, pripadajućih vrsta kvarova, stopa kvarova te uzroka kvara završava prva faza FMEA analize. Druga faza uključuje analizu kritičnosti s ciljem određivanja ozbiljnosti kvara, odnosno određivanja RPN-a za svaku vrstu kvara. RPN se određuje prema jednadžbi [19]:

$$RPN = S \times O \times D, \quad (12)$$

gdje se svaka od navedenih ocjena određuje iz Tablica 2 – 4 iz prethodnog poglavlja. Nakon izračuna RPN-a svi relevantni podaci prikazani su u Tablicama 6 i 7. Svakoj stavci, vrsti kvara i uzroku kvara pridodana je referenca. Za sustav detektora požara i plinova prepoznato je 5 različitih stavki (komponentata) koje zajedno imaju 19 vrsta i 59 uzroka kvara. Moguće je uočiti kako uzroci kvarova kao što su „kvar instrumenta”, „nema signala ” i „ neispravno podešen instrument” često imaju visoke vrijednosti RPN-a. To ukazuje na potrebu za boljim održavanjem opreme, posebice redovitom provjerom i kalibracijom instrumentacije kako bi se smanjio rizik od specifičnih kvarova.

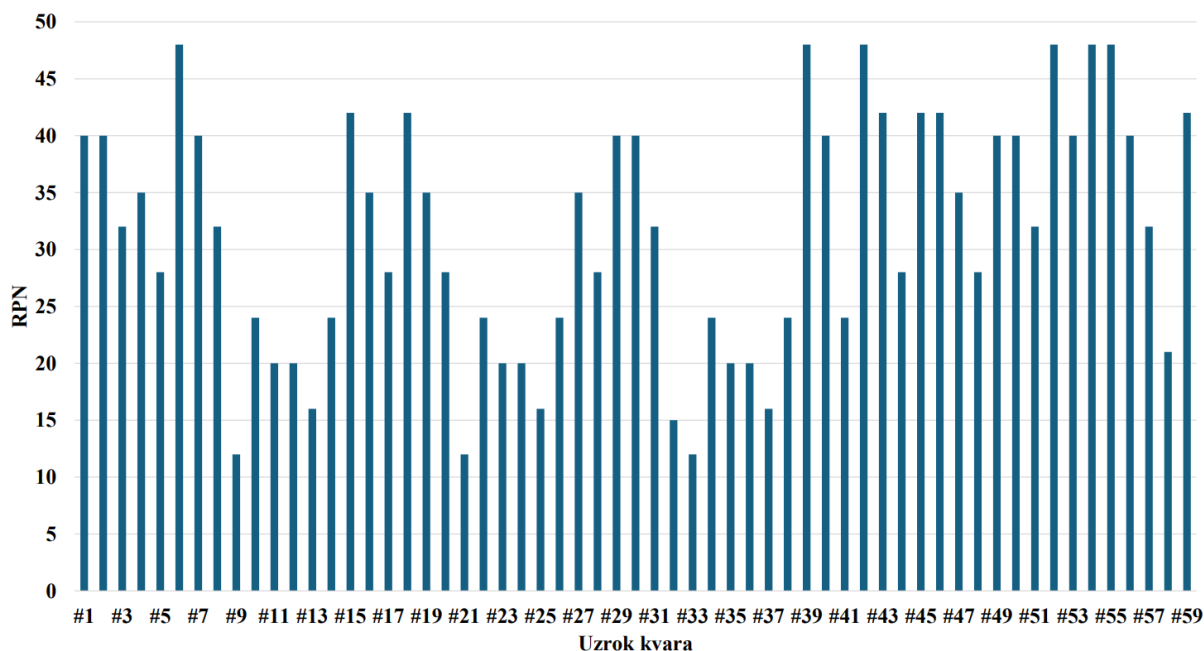
Tablica 6. FMEA detektora požara i plinova – 1. Dio

Sustav (Ref.)	Ref.	Stavka / Funkcija	Ref.	Vrsta kvara	Stopa kvara (λ)	Ref.	Uzrok kvara	S	O	D	RPN
DETEKTOR POŽARA I PLINOVA (FGD)	CC	Kontrolna kartica	FM1	NOO	0,7	#1	Kvar instrumenta	8	1	5	40
						#2	Nema signala		1	5	40
						#3	Neispravno podešen instrument		1	4	32
	DH	Glava detektora	FM2	LOO	0,17	#4	Kvar instrumenta	7	1	5	35
						#5	Neispravno podešen instrument		1	4	28
			FM3	SPO	0,34	#6	Pogrešan signal	8	1	6	48
						#7	Kvar instrumenta		1	5	40
						#8	Neispravno podešen instrument		1	4	32
						#9	Kontaminacija		4	1	3
	#10	Pogrešan signal	1	6	24						
	#11	Kvar instrumenta	1	5	20						
	#12	Lom materijala	1	5	20						
	#13	Neispravno podešen instrument	1	4	16						
	#14	Nepoznato	1	6	24						
	OT	Ostalo	FM4	ERO	1,4	#15	Pogrešan signal	7	1	6	42
						#16	Kvar instrumenta		1	5	35
						#17	Neispravno podešen instrument		1	4	28
			FM5	LOU	0,34	#18	Pogrešan signal	7	1	6	42
						#19	Kvar instrumenta		1	5	35
						#20	Neispravno podešen instrument		1	4	28
	SU	Podjedinica	FM6	LOU	0,34	#21	Kontaminacija	4	1	3	12
						#22	Pogrešan signal		1	6	24
						#23	Kvar instrumenta		1	5	20
			#24	Lom materijala	1	5	20				
			#25	Neispravno podešen instrument	1	4	16				
			#26	Nepoznato	1	6	24				
			FM7	ERO	1,4	#27	Kvar instrumenta	7	1	5	35
						#28	Neispravno podešen instrument		1	4	28
			FM8	LOO	0,17	#29	Kvar instrumenta	8	1	5	40
						#30	Nema signala		1	5	40
	#31	Neispravno podešen instrument				1	4		32		
	FM9	NOO	0,7	#32	Kvar instrumenta	3	1	5	15		
FM10	SER	0,17									

Tablica 7. FMEA detektora požara i plinova – 2. dio

Sustav (Ref.)	Ref.	Stavka / Funkcija	Ref.	Vrsta kvara	Stopa kvara (λ)	Ref.	Uzrok kvara	S	O	D	RPN
DETEKTOR POŽARA I PLINOVA (FGD)	UN	Nepoznato	FM11	ERO	1,4	#33	Kontaminacija	4	1	3	12
						#34	Pogrešan signal		1	6	24
						#35	Kvar instrumenta		1	5	20
						#36	Lom materijala		1	5	20
						#37	Neispravno podešen instrument		1	4	16
						#38	Nepoznato		1	6	24
			FM12	FTF	1,22	#39	Kontaminacija	8	2	3	48
						#40	Nema signala		1	5	40
						#41	Pad sustava		1	3	24
						#42	Nepoznato		1	6	48
			FM13	HIO	1,66	#43	Kontaminacija	7	2	3	42
						#44	Neispravno podešen instrument		1	4	28
						#45	Nepoznato		1	6	42
			FM14	LOU	0,34	#46	Pogrešan signal	7	1	6	42
						#47	Kvar instrumenta		1	5	35
						#48	Neispravno podešen instrument		1	4	28
			FM15	NOO	0,7	#49	Kvar instrumenta	8	1	5	40
						#50	Nema signala		1	5	40
						#51	Neispravno podešen instrument		1	4	32
			FM16	OTH	0,26	#52	Lom	8	1	6	48
						#53	Kvar instrumenta		1	5	40
			FM17	SHH	0,09	#54	Razni vanjski utjecaji	8	1	6	48
			FM18	SPO	0,34	#55	Pogrešan signal	8	1	6	48
						#56	Kvar instrumenta		1	5	40
						#57	Neispravno podešen instrument		1	4	32
			FM19	UNK	0,52	#58	Kontaminacija	7	1	3	21
#59	Nepoznato	1				6	42				

Slika 17 prikazuje raspodjelu RPN-a po uzrocima kvarova. Vidljivo je kako uzroci #6, #39, #42, itd. imaju najviše vrijednosti RPN-a koje iznose 48. Navedeno sugerira kako su ti uzroci vrlo značajni i da bi trebali biti prioritet kod planiranja preventivnih i korektivnih mjera održavanja. Ovi uzroci predstavljaju rizik za ukupnu sigurnost i pouzdanost sustava.



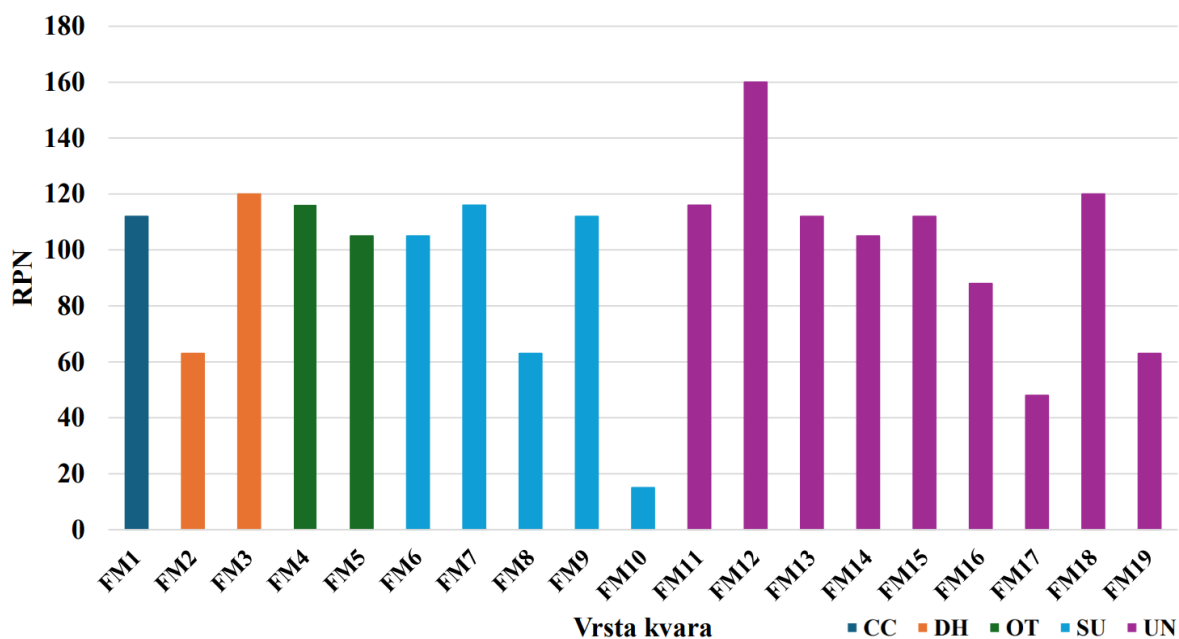
Slika 17. RPN uzroka kvarova

U Tablici 8 prikazan je poredak vrsta kvarova od najvećeg RPN-a do najmanjeg. Vrsta kvara FM12 ima RPN od 160 te predstavlja najveći prioritet za primjenu korektivnih mjera održavanja. FM12 zahtijeva detaljniju analizu kako bi se identificirali mogući načini za smanjenje RPN-a, bilo da je to kroz smanjenje ozbiljnosti posljedica, smanjenje učestalosti kvara ili poboljšanje detekcije.

Tablica 8. Poredak vrste kvara prema RPN-ovima

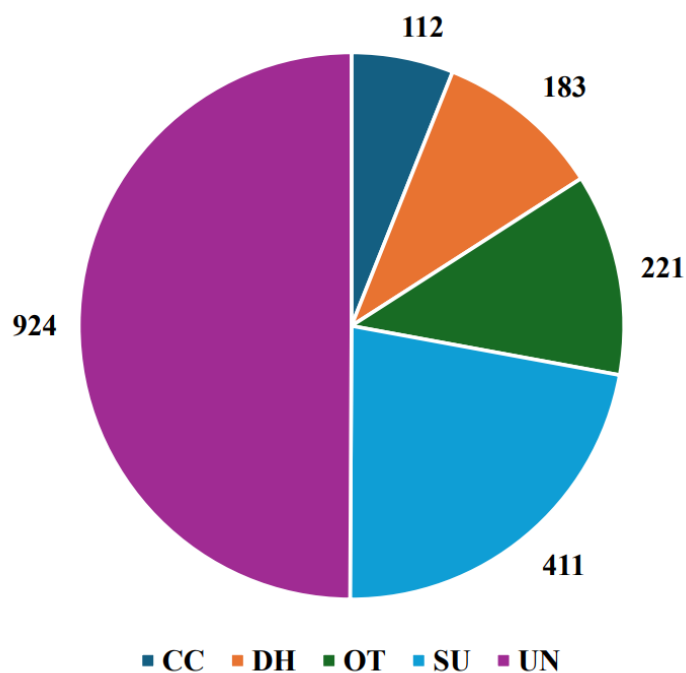
RBR.	Ref. Vrsta kvara	RPN
1.	FM12	160
2.	FM3	120
3.	FM18	120
4.	FM7	116
5.	FM4	116
6.	FM11	116
7.	FM9	112
8.	FM15	112
9.	FM13	112
10.	FM1	112
11.	FM6	105
12.	FM5	105
13.	FM14	105
14.	FM16	88
15.	FM8	63
16.	FM2	63
17.	FM19	63
18.	FM17	48
19.	FM10	15

Slika 18 prikazuje raspodjelu RPN-a po vrstama kvarova. Svaka boja predstavlja jednu komponentu sustava pri čemu je vidljivo kako UN (ljubičasta) ima najviše vrsta kvarova te se većina vrsta kvarova s najvišim vrijednostima RPN-a nalazi unutar komponente UN.



Slika 18. RPN vrsta kvarova

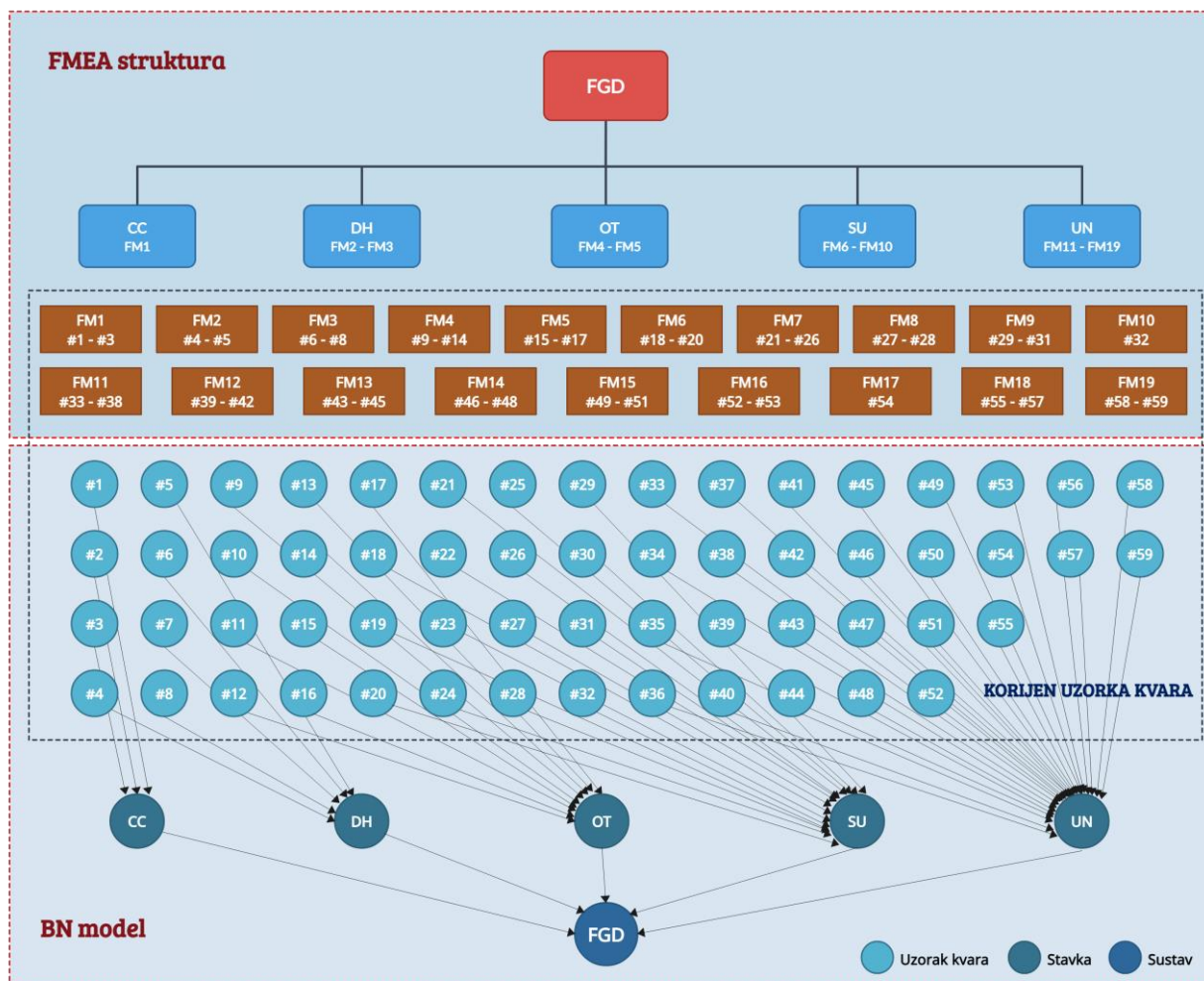
Slika 19 prikazuje RPN svake komponente sustava. Vidljivo je kako UN ima najvišu vrijednost RPN-a. RPN UN-a iznosi 924, dok RPN prve sljedeće komponente, SU-a, iznosi dvostruko manje, odnosno 411. Navedena komponenta može se smatrati kritičnom unutar ovog sustava što implicira potrebu za usmjeravanjem prioriteta na ovu komponentu kroz aktivnosti održavanja i detaljniju analizu komponente. Također, potrebno je razmotriti dodatne mjere za smanjenje rizika kvarova kao što su jače sigurnosne kontrole i povećanje redundantnosti.



Slika 19. RPN komponenata u sustavu

4.2. Mapiranje FMEA-BN modela

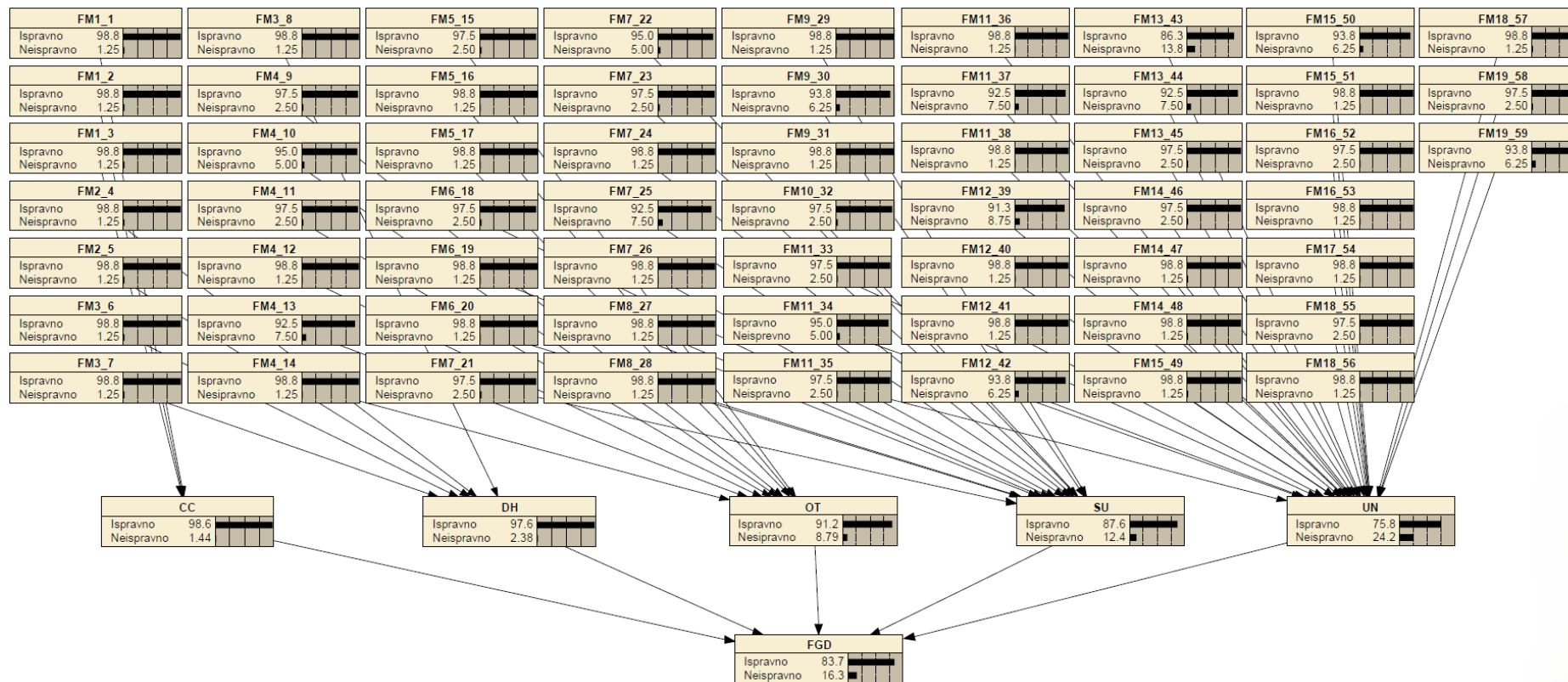
U poglavlju 3.3 detaljno je objašnjena procedura mapiranja FMEA-BN modela. Na Slici 20 prikazan je FMEA-BN model za odabrani sustav. Model omogućuje dobar pregled odnosa između komponenti, vrsta i uzroka kvarova te olakšava prepoznavanje komponenti koje su najviše podložne kvarovima i za koje je potrebno planirati dodatne sigurnosne mjere ili povećavati redundantnost.



Slika 20. FMEA-BN model sustava

4.3. BN analiza sustava

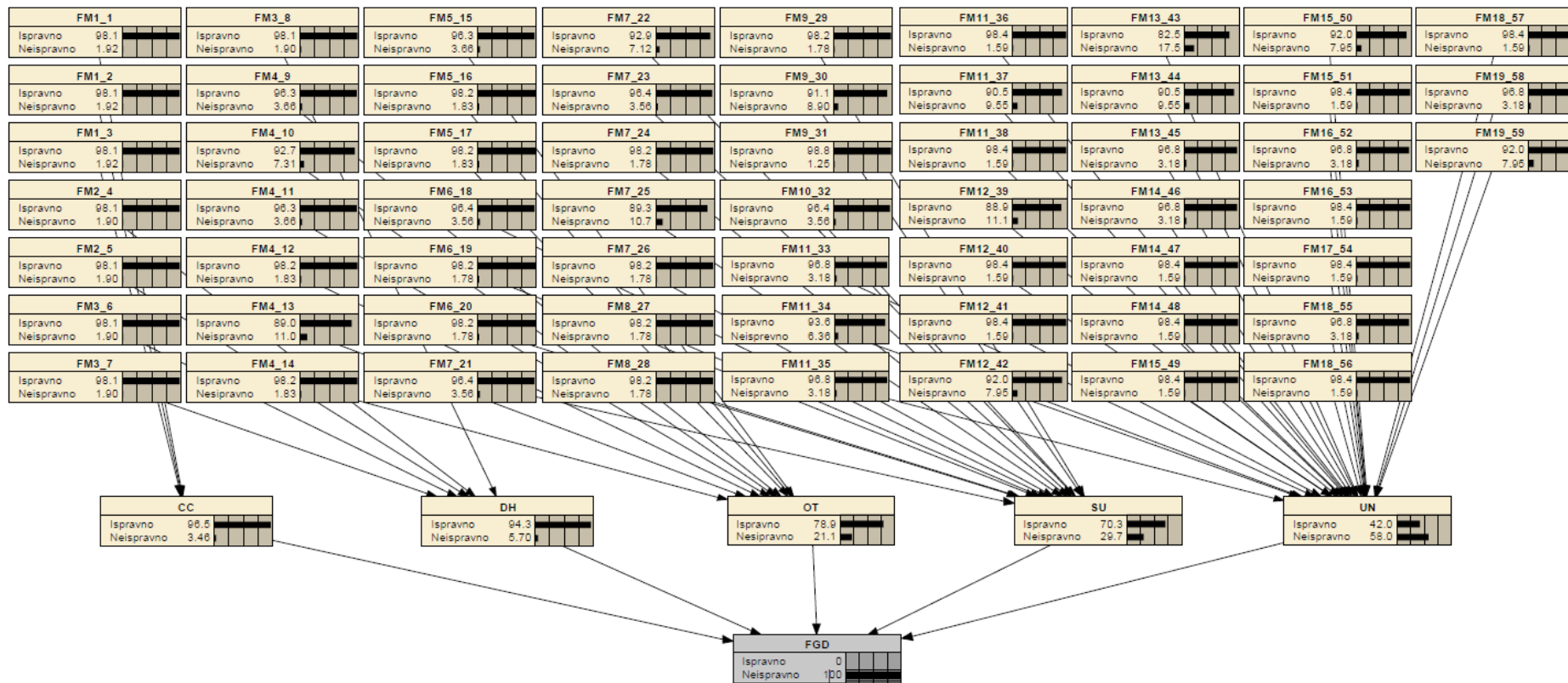
Nakon mapiranja grafičkog BN modela iz FMEA strukture slijedi proračun CPT-a (Slika 21). Dostupne su vrijednosti stopa kvarova, koje se u ovom slučaju očitavaju iz baze podataka OREDA. Nije poznato o kakvoj je strukturi riječ u odabranom sustavu te je stoga odabrana serijska struktura. Postavljena je pretpostavka da ~39 % kvarova uzrokuje neispravnost sustava. Riječ je o postotku kritičnih kvarova iz baze podataka OREDA. FMEA analiza provedena je za sve kvarove (osim za nepoznate), a kritični su jedini koji uzrokuju prekid jedne ili više temeljnih funkcija sustava, odnosno neispravnost kompletnog sustava.



Slika 21. Bayesova mreža sustava

Za proračun uvjetne vjerojatnosti korišten je programski paket NETICA [66]. Slika 21 prikazuje Bayesovu mrežu sustava unutar programskog paketa NETICA koja je dobivena postupkom mapiranja FMEA-BN. Iz Bayesove mreže je vidljivo da vjerojatnost pojave kritičnog kvara u sustavu iznosi 16,3 %. Najveća vjerojatnost pojave kvara je kod komponente UN, dok najveću stopu kvara ima uzrok kvara #43 (FM13_43), koji iznosi 13,8 %.

Slika 22 prikazuje uvjetne vjerojatnosti unutar sustava kada je sustav u kvaru, odnosno kada ne obavlja temeljne funkcije. Prema slici je vidljivo kako je najveća vjerojatnost pojave kvara ponovo kod komponente UN te iznosi 58 %, dok vjerojatnost uzroka kvara #43 iznosi 17,5 %. Iz navedenog je vidljivo da se vjerojatnost pojave povećava u slučaju kada je sustav neispravan.



Slika 22. Bayesova mreža neispravnog sustava

5. ZAKLJUČAK

U ovome radu obrađeni su temeljni pojmovi sigurnosti i pouzdanosti sustava, čime je postavljena teorijska osnova za analizu održavanja tehničkih sustava. Detaljno su razmotreni različiti postupci održavanja, s posebnim naglaskom na održavanje temeljeno na pouzdanosti (RCM). U matematičkom modelu obrađene su metode FMEA i Bayesova mreža, pri čemu je postupak mapiranja FMEA-BN modela prikazan kroz šest jasno definiranih koraka. Kao studija slučaja analiziran je brodski sustav za detekciju požara i plinova, uzimajući u obzir sve poznate vrste kvarova kako bi se što preciznije procijenila pouzdanost sustava.

Provedene analize istaknule su važnost primjene naprednih metoda analize rizika i održavanja u projektiranju i upravljanju brodskim sustavima. Korištenjem FMEA metode u kombinaciji s Bayesovim mrežama omogućeno je identificiranje ključnih komponenti sustava te procjena njihove kritičnosti u pogledu sigurnosti i pouzdanosti. Iako zbog nedostatka podataka o posljedicama kvarova nije bilo moguće predložiti konkretne mjere za povećanje pouzdanosti, analiza je ukazala na komponente koje zahtijevaju najveću pozornost pri održavanju. Time se otvara prostor za bolju raspodjelu resursa i smanjenje rizika od nepredviđenih kvarova.

Rad naglašava prednosti održavanja temeljenog na pouzdanosti, poput optimizacije troškova i povećanja dostupnosti sustava, ali ukazuje i na izazove, poput potrebe za specijaliziranom opremom i educiranim kadrom, koji mogu otežati širu implementaciju ovih metoda u praksi.

Zaključno, implementacija sveobuhvatnog plana održavanja i sigurnosne analize doprinosi ne samo operativnoj učinkovitosti, već i ispunjavanju sve strožih standarda sigurnosti i smanjenju emisija u pomorskom sektoru. Premda ograničen dostupnim podacima, ovaj rad pruža vrijedan doprinos razumijevanju metodologije održavanja temeljenog na pouzdanosti te može poslužiti kao osnova za daljnja istraživanja. Prikupljanje preciznijih podataka o posljedicama kvarova u budućnosti omogućilo bi detaljnije analize i izradu preporuka za unapređenje strategija održavanja i sigurnosti sustava.

LITERATURA

- [1] Noroozi, A., Abbassi, R., Mackinnon, S., Khan, F., Khakzad, N.: *Effects of cold environments on human reliability assessment in offshore oil and gas facilities*, Hum. Factors 2014., 56(5), 825–839.
- [2] Khan, F., Salim, A., Ming, Y., et al.: *Safety challenges in harsh environments: lessons learned*, Process Saf. Prog. 2014., 34(2), 191–195.
- [3] Stamatis, D. H.: *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*, ASQC Quality Press, Milwaukee, WI, 2003.
- [4] Narayanagounder, S. , Gurusami, K.: *A new approach for prioritization of failure modes in design FMEA using ANOVA*, World Acad. Sci. Eng. Techno., 2009.
- [5] Puente, J., Pino, R., Priore, P., de la Fuente, D.: *A decision support system for applying failure mode and effects analysis*, Int. J. Qual. Reliab. Manag. 2002., 19 (2), 137–150.
- [6] Rhee, S.J., Ishii, K.: *Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability*, J. Adv. Eng. Inf. 2003, 17 (3), 179–188.
- [7] Dale, B. G., Shaw, P.: *Failure mode and effects analysis in the motor industry: A state-of-the-art study*, Qual. Reliab. Eng. Int. 1990., 6, 179–188.
- [8] Vandenbrande, W. W.: *How to use FMEA to reduce the size of your quality toolbox*, Qual. Prog. 1998., 31, 97–100.
- [9] Nielsen, T. D., Jensen, F. V.: *Bayesian Networks and Decision Graphs*, Springer Science & Business Media, 2007.
- [10] Ghosh, J. K.: *Bayesian networks and influence diagrams: a guide to construction and analysis by uffe B. Kjaerulff, Anders L. Madsen*, Int. Stat. Rev. 2008., 76 (3), 461–462.
- [11] Leoni, L., BahooToroody, A., De Carlo, F., Paltrinieri, N.: *Developing a risk-based maintenance model for a natural gas regulating and metering station using Bayesian network*, J. Loss Prev. Process Ind. 2019., 57, 17–24.
- [12] BahooToroody, A., et al.: *Multi-level optimization of maintenance plan for natural gas system exposed to deterioration process*, J. Hazard Mater. 2019., 362, 412–423.
- [13] Hadi Hosseini, S. M., Takahashi, M.: *Combining Static/dynamic Fault Trees and Event Trees Using Bayesian Networks'*, *Computer Safety, Reliability, and Security*, Springer, 2007., 93–99.
- [14] Vincoli, J. W.: *Basic Guide to System Safety*, Wiley, Hoboken, New Jersey, 2014.

-
- [15] Sezer, S. I., Ceylan, B. O., Aykuz, E., Arslan, O.: *D-S evidence based FMECA approach to assess potential risks in ballast water system (BWS) on-board tanker ship*, Ocean Eng. 2022.
- [16] Roland, H. E., Moriarty, B.: *System safety engineering and management, second edition*, John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [17] Wasson, C. S.: *System Analysis, Design and Development: Concepts, Principles, and Practices*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2006
- [18] Ericson, C. A.: *Hazard analysis techniques for system safety*, John Wiley & Sons, 2015.
- [19] Rausand, M., Barros, A., Hoyland, A.: *System Reliability Theory Models, Statistical Methods and Application*, Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2021.
- [20] Smith, D. J.: *Reliability and Maintainability and Risk*, 8th edition, Elsevier, Amsterdam, 2011.
- [21] Kumar, V., Singh, L., Tripathi, A. K.: *Reliability analysis of safety-critical and control systems: a state-of-the-art review*, IET Softw. 2018, 12, 1-18.
- [22] Popović, V., Vasić, B.: *Review of Hazard Analysis Methods and Their Basic Characteristics*, FME Trans. 2008.
- [23] Ben-Daya, M., Duffuaa, S. O., Raouf, A., Knezevic, J., Ait-Dari, D.: *Handbook of Maintenance Management and Engineering*, Springer, London, 2009.
- [24] Ireson, W. G., Coombs, C. F. Moss, R. Y.: *Handbook of reliability engineering and management-2nd edition*, New York, McGraw-Hill, 1996.
- [25] Misra, K. B.: *Handbook of Performability Engineering*, Springer, London, 2008.
- [26] Karatuğ, Ç., Arslanoğlu, Y., Soares, C. G.: *Review of maintenance strategies for ship machinery systems*, J. Mar. Eng. Technol. 2023., 22(5), 233-247.
- [27] Houshyar A.: *Reliability and maintainability of machinery and equipment, part 2: benchmarking, life-cycle cost, and predictive maintenance*, Int. J. Model. Simul. 2005., 25, 1–11.
- [28] Goossens A. J. M., Basten R. J. I.: *Exploring maintenance policy selection using the Analytic Hierarchy Process; an application for naval ships*, Reliab. Eng. Syst. Saf. 2015., 142, 31–41.
- [29] Abbas, M., Shafiee, M.: *An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments*. Mar. Struct. 2020., 71.
- [30] Dhillon, B. S.: *Engineering Maintenance: A Modern Approach*, CRC Press, USA, 2002.

-
- [31] Selvik, J. T, Scarf, P., Aven, T.: *An extended methodology for risk based inspection planning*, Electron. J. Reliab. Risk Anal. Theory Appl. 2011., 2, 115–126.
- [32] Anantharaman M.: *Using reliability block diagrams and fault tree circuits, to develop a condition based maintenance model for a vessel's main propulsion system and related subsystems*, TransNav: Int. J. Mar. Navig Saf. Sea Transp. 2013., 7, 409–413.
- [33] Cullum, J., Binns, J., Lonsdale, M., Abbassi, R., Garaniya, V.: *Risk-based maintenance scheduling with application to naval vessels and ships*, Ocean Eng. 2018, 148, 476–485.
- [34] Lazakis, I., Raptodimos Y, Varelas T.: *Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks*, Ocean Eng. 2018., 152, 404–415.
- [35] Conachey, R., Serratella, C. M., Wang, G.: *Risk-based strategies for the next generation of maintenance and inspection programs*, WMU J. Marit. Aff. 2008., 7, 151–173.
- [36] Jardine, A. K. S., Lin, D., Banjevic, D.: *A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance*, Mech. Syst. Signal Process. 2006., 20, 1483–1510.
- [37] Ahmad, R., Kamaruddin, S.: *An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application*. Comput. Ind. Eng. 2012., 63, 135–149.
- [38] Lazakis I., Dikis K., Michala A. L., Theotokatos G.: *Advanced ship systems condition monitoring for enhanced inspection, maintenance and decision making in ship operations*, Transp. Res. Procedia 2016;14:1679–88.
- [39] Rausand, M., Hoyland, A.: *System Reliability: Theory Models and Statistical Methods*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.
- [40] Eriksen, S., Utne, I. B., Lützen, M.: *An RCM approach for assessing reliability challenges and maintenance needs of unmanned cargo ships*, Reliab. Eng. Syst. Saf. 2021., 210, 107550.
- [41] Mokashi, A. J., Wang, J., Verma, A. K.: *A study of reliability-centred maintenance in maritime operations*, Mar. Policy 2002., 26, 325–335.
- [42] Dhillon, B. S.: *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*, CRC Press, New York, 2006.
- [43] Eti, M. C., Ogaji, S. O. T, Probert, S. D.: *Reducing the cost of preventive maintenance (PM) through adopting a proactive reliability-focused culture*, Appl. Energy 2006., 83(11), 1235-1248.

-
- [44] Gulati, R.: *Maintenance and Reliability - Best Practices*, Industrial Press, New York, 2013.
- [45] Moubray J.: *Reliability-centred maintenance*, 2-nd ed., Oxford, Butterworth-Heinemann, 1997.
- [46] Kobbacy, K. A. H., Prabhakar, Murty, D. N.: *Complex System Maintenance Handbook*, Springer, London, 2008.
- [47] Moore, R.: *Making Common Sense Common Practice*, Butterworth-Heinemann, Boston, 2002.
- [48] Selvik, J. T., Aven, T.: *A framework for reliability and risk centered maintenance*, Reliab. Eng. Syst. Saf. 2011., 96(2), 324–331.
- [49] Arunraj, N. S., Maiti, J.: *Risk-based maintenance - Techniques and applications*. J. Hazard. Mater. 2007., 142(3), 653–661.
- [50] Leoni, L., De Carlo, F., Paltrinieri, N., Sgarbossa, F., BahooToroody, A.: *On risk-based maintenance: A comprehensive review of three approaches to track the impact of consequence modelling for predicting maintenance actions*, J. Loss Prev. Process Ind. 2021., 72, 104555.
- [51] Karatuž, C., Arslanoğlu, Y., Guedes Soares, C.: *Review of maintenance strategies for ship machinery systems*, J. Mar. Eng. Technol. 2023., 22(5), 233-247.
- [52] Bertolini, M., Bevilacqua, M., Ciarapica, F. E., Giacchetta, G.: *Development of Risk-Based Inspection and Maintenance procedures for an oil refinery*, J. Loss Prev. Process Ind. 2009., 22(2), 244–253.
- [53] Tan, Z., Li, J., Wu, Z., Zheng, J., He, W.: *An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection*. Saf. Sci. 2011., 49(6), 852–860.
- [54] Department of Defense: *Electronic reliability design handbook*, Standard MIL-HDBK-338B, USA, 1998.
- [55] Pearl, J.: *Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference*, Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco, CA., 2014.
- [56] Zarei, E., Khakzad, N., Cozzani, V., Reniers, G.: *Safety analysis of process systems using Fuzzy Bayesian Network (FBN)*, J. Loss Prev. Process Ind. 2019., 57, 7-16.
- [57] Toungsetwut, M.: *Analytical Methods for Risk Assessment and reduction of the uncertainty*, Master's Thesis, University of Stavanger, Faculty of Science and Technology, Norway ,2012.

-
- [58] Bobbio, A., Portinale, L., Minichino, M., Ciancamerla, E.: *Improving the analysis of dependable systems by mapping Fault Trees into Bayesian Networks*, Reliab. Eng. Syst. Saf. 2001., 71, 249–260.
- [59] Khakzad, N., Khan, F., Amyotte, P.: *Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches*, Reliab. Eng. Syst. Saf. 2011., 96, 925–932.
- [60] Nielsen, T. D., Jensen, F., V.: *Bayesian networks and decision graphs*, Second. ed. Springer Science & Business Media, LLC., New York, USA, 2009.
- [61] Li, H., Huang, C. G., Soares, C. G.: *A real-time inspection and opportunistic maintenance strategies for floating offshore wind turbines*, Ocean Eng., 2022., 256.
- [62] DNV - Det Norske Veritas., OREDA - *Offshore Reliability Data Handbook.*, 6th ed. Norway: OREDA Participants, 2015.
- [63] Korsah, K., Muhlheim, M. D., Helcomb, D. E.: *Industry Survey of Digital I&C Failures*, Oak Ridge National Laboratory, 2007.
- [64] Rausand, M., Øien, K.: *The basic concepts of failure analysis* Reliab. Eng. Syst. Saf. 1996., 53(1), 73–83.
- [65] Vestvik, D. H.: *Development of FMEA/RCM methodology to be implemented in Generic Maintenance Concepts*, Master's Thesis, University of Stavanger, Faculty of Science and Technology, Norway, 2012.
- [66] <https://www.norsys.com/netica.html>, 22.11.2024.