

# Utjecaj kvarova komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova na opskrbni lanac

---

**Kulej, Mateja**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:579803>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-01**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**MATEJA KULEJ**

**UTJECAJ KVAROVA KOMPONENATA GLAVNOG MOTORA  
KONTEJNERSKIH BRODOVA NA OPSKRBNI LANAC**

**DIPLOMSKI RAD**

Zagreb, 2023

Zagreb, 24. svibnja 2023.

Zavod: **Zavod za transportnu logistiku**  
Predmet: **Logistički sustavi u prometu**

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 7359

Pristupnik: **Mateja Kulej (0135235594)**  
Studij: **Inteligentni transportni sustavi i logistika**  
Smjer: **Logistika**

Zadatak: **Utjecaj kvarova komponenata glavnog pogonskog motora kontejnerskih brodova na opskrbni lanac**

### Opis zadatka:

Kao glavni rezultat istraživanja očekuje se utvrditi pouzdanost proizvodnje pojedinih komponenata glavnog pogonskog motora na kontejnerskim brodovima te njihov utjecaj na funkcioniranje logističkog sustava broдача. Prijedlozi rješenja temeljit će se sukladno provedenoj analizi i Weibullovoj distribuciji. Temeljem navedene distribucije izvorni podatci sa naglaskom na primarne komponente prikazati će broj radnih sati unutar kojih se desilo najviše kvarova te će se tim saznanjem zaključiti određena pouzdanost i izraditi plan izmjene komponenata glavnog pogonskog motora kontejnerskih brodova. Dobiveni rezultati mogu se koristiti kao podloga za optimizaciju rada kontejnerskih brodova, odnosno broдача.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

---

doc. dr. sc. Tomislav Rožić

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

**DIPLOMSKI RAD**

**UTJECAJ KVAROVA KOMPONENATA GLAVNOG MOTORA  
KONTEJNERSKIH BRODOVA NA OPSKRBNI LANAC**

**THE IMPACT OF CONTAINER VESSELS MAIN ENGINE FAILURES  
ON SUPPLY CHAIN**

Mentor: doc.dr.sc. Tomislav Rožić

Student: mag.ing.traff. Mateja Kulej

JMBAG: 0135235594

Zagreb, rujan 2023.

## SAŽETAK

Svjetska globalizacija stvara ovisnost o pravodobnosti i sigurnosti opskrbe koja se provodi kroz kompleksnu pripremu i realizaciju prostorne i vremenske transformacije dobara, usluga i znanja. Pomorski promet najzastupljeniji je oblik prijevoza tereta koji u ukupnom svjetskom prijevozu sudjeluje s oko 80%, dok se 60% tereta u pomorskom prometu prevozi kontejnerskim brodovima. Svrha kontejnerskih brodova u opskrbnom lancu je povezivanje globalnog gospodarstva gdje je najniža zastupljenost troškova prijevoza tereta koja se očituje kroz potražnju. Razlog tome je trend u proizvodnji koji zahtjeva ekonomsku efikasnost kroz lokacije nižih troškova. Koncentracija proizvodnje na svjetskoj razini pokriva Azijsko i Pacifičko područje, te se u pogledu Europe stvorila velika udaljenost. Udaljenost sa sobom nosi rizik koji se odražava na opskrbeni lanac. Kašnjenja, mnoštvo točaka ukrcaja, iskrcaja i prekrcaja stvaraju dodatan problem kada se govori o kvalitetnoj organizaciji logistike. S druge strane, važna je i pouzdanost prijevoznog sredstva kojim se vrši prijenos dobara na iznimno velikoj udaljenosti. Krajnji kupac konstantno zahtjeva smanjenje troškova prijevoza i vremena isporuke, dok logistika pokušava upravljati i odgovoriti na njihove zahtjeve.

Globalna razmjena dobara primarno je distribuirana pomorskim prometom u kojem ključnu ulogu imaju kontejnerski brodovi. Njihova važnost proizlazi iz većinskog udjela globalnog prijevoza tereta gdje su postepeno opskrbeni lanci postali zavisni o ovoj vrsti prijevoznog sredstva. Kvarovi dijelova glavnog brodskog motora uzrokuju kašnjenja i opstrukciju opskrbnog lanca odnosno povećanje logističkih troškova što u konačnici generira veće ukupne troškove. Iz tih razloga nužna je pouzdanosti dijelova glavnog motora kontejnerskih brodova. Pouzdanost osigurava smanjene troškova i vremena te povećava sigurnost isporuke u opskrbnom lancu. Specifikacija dijelova svodi se na istoimene kriterije zbog homogenosti komponenata tehničkog sustava. Tijekom plovidbe broda, stručno i obučeno osoblje, koje posjeduje sposobnosti temeljene na iskustvu, provode najveći dio pregleda glavnog motora što je ujedno i najpouzdanija podloga za snimanje stanja opreme. Prevencija se postiže evidentiranjem kvarova, njihovih uzročnika i uvjeta u kojima su se dogodili. Međutim, važno je praćenje rada komponenata glavnog motora prema tehničkom priručniku propisanom od strane proizvođača. Svaka promjena stanja vodi se evidencijom u različito dostupnim programima koji daju uvid u povijest unesenih podataka i trenutno

praćenom radu. Mogućnost nastajanja neplaniranih zastoja i havarija mogu stvoriti dodatne troškove, gdje svaki sat brodovlasniku povećava operativne troškove, a kao posljedica javlja se konsternacija opskrbnog lanca. Zadatak stručnog osoblja, odgovornog za ekonomičnu i pouzdanu eksploataciju, je smanjiti ili spriječiti mogućnost nastanka zastoja.

Istraživanje se temelji na izvornim podacima kontejnerskih brodova, koji su u eksploataciji, unutar vremenskog razdoblja od 11 godina. U analizama kvarova nedvojbeno se najviše koristi Weibull-ova distribucija koja kroz određeni interval pokazuje da se izborom odgovarajućih vrijednosnih parametara mogu protumačiti vrlo složeni zakoni slučajno promjenljivih veličina. Kao glavni rezultat istraživanja očekuje se utvrditi pouzdanost proizvodnje pojedinih komponenata glavnog motora na kontejnerskim brodovima te njihov utjecaj na funkcioniranje logističkog sustava brodar. Prijedlozi rješenja temeljit će se sukladno provedenoj analizi i Weibull-ovoj distribuciji. Temeljem navedene distribucije izvorni podatci s naglaskom na primarne komponente prikazat će broj radnih sati unutar kojih se desilo najviše kvarova te će se tim saznanjem zaključiti određena pouzdanost i izraditi plan izmjene komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova. Dobiveni rezultati mogu se koristiti kao podloga za optimizaciju rada kontejnerskih brodova, odnosno brodar.

**KLJUČNE RIJEČI:** globalizacija, opskrbeni lanac, globalizacija, pomorski promet, kontejnerski brodovi, pouzdanost, Weibull-ova distribucija

## SUMMARY

World globalization creates a dependence on timeliness and security of supply which is carried out through the complex preparation and implementation of the spatial and temporal transformation of goods, services, and knowledge. Maritime transport is the most represented form of freight transport, which accounts for about 80% of the total world transport, while 60% of the freight in maritime transport is transported by container vessels. The purpose of container vessels in the supply chain is to connect the global economy where the lowest representation of cargo transportation costs is manifested through demand. The reason for this is the trend in production which requires economic efficiency through finding locations of lower costs. The concentration of production at the world level covers the Asia and Pacific region, which has created a great distance in terms of Europe. Distance brings with it risk that is reflected in the supply chain. Delays, numerous loading, unloading and transshipment points create an additional problem when it comes to quality organization of logistics. On the other side, the reliability of the means of transport used to transfer goods over an extremely long distance is also important. The end customer is constantly demanding a reduction in transportation costs and delivery times, while logistics is trying to manage and respond to their demands.

The global exchange of goods is primarily distributed by maritime transport in which container vessels play a key role. Their importance stems from the majority of the share of global freight transport, where supply chains have gradually become dependent on this type of transport. Container vessels main engine parts failures cause delays and obstruction of the supply chain, i.e., an increase in logistics costs, which ultimately generates higher total costs. For these reasons, the reliability of the container vessels main engine parts is necessary. Reliability ensures reduced costs, and time and increases the security of delivery in the supply chain. The specification of parts is reduced to the criteria of the same name due to the homogeneity of the technical components system. During the vessel navigation, professional and trained staff, which owns experience-based capabilities, conduct most of the main reviews of the engine, which is also the most reliable basis for recording the condition of the equipment. Prevention is achieved by recording failures, their causes, and the conditions in which they occurred. However, it is important to monitor the operation of the components of the main engine according to the technical manual prescribed by

the manufacturer. Every change of state is conducted with records in various available programs that provide insight into the history of the entries data and monitored work. The possibility of unplanned stoppages and breakdowns can create additional costs, where every hour increases operational costs for the shipowner, and as a result, consternation in the supply chain occurs. The task of professional staff, responsible for economical and reliable exploitation, is to reduce or prevent the possibility of breakdowns.

The research is based on the data of container vessels, which are in operation, within a period of 11 years. Weibull distribution is the most widely used in failure analysis, which shows that through a certain interval, very complex laws of randomly varying quantities can be interpreted by choosing appropriate value parameters. As the main result of the research, it is expected to determine the reliability of the production of individual components of the container vessels main engine and their influence on the functioning of the shipping company's logistics system. Proposals for solutions will be based on the conducted analysis and the Weibull distribution. Based on the aforementioned distribution, the data with an emphasis on the primary components will show the number of working hours during which the most failures occurred, and with this knowledge, will be concluded certain reliability and a plan for changing the individual components of the container vessels main engine. The obtained results can be used as a basis for optimizing the work of container vessels, and shipping companies.

KEY WORDS: globalization, supply chain, maritime transport, container vessels, reliability, Weibull distribution



# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA .....	4
3. ULOGA KONTEJNERSKIH BRODOVA U FUNKCIJI GLOBALNOG LANCA OPSKRBE .....	6
3.1. Svjetski bruto domaći proizvod .....	7
3.2. Međunarodna pomorska trgovina .....	8
3.3. Globalna kontejnerska trgovina .....	9
3.3.1. Svjetska robna razmjena kontejnerskim putem .....	11
3.3.2. Svjetski tržišni lideri kontejnerskog pomorskog prijevoza .....	13
3.3.3. Prikaz svjetske flote prema vrsti plovila .....	14
3.4. Buduća predviđanja .....	15
4. UTJECAJ KVAROVA GLAVNOG MOTORA KONTEJNERSKIH BRODOVA NA OPSKRBNI LANAC .....	18
4.1. Općenito o pomorskim nezgodama .....	18
4.2. Pomorske nezgode prema vrsti broda .....	19
4.2.1. Vrste pomorskih nezgoda .....	19
4.2.2. Uzroci pomorskih nezgoda .....	20
4.3. Distribucija nezgoda prema vrstama teretnih brodova .....	22
4.3.1. Klasifikacija kontejnerskih brodova .....	23
4.3.2. Analiza nezgoda kontejnerskih brodova .....	25
4.3.3. Tehnički kvarovi i prekidi glavnih motora .....	26
5. PRIMJENA TEORIJE POUZDANOSTI I KVARA NA PROMATRANI TEHNIČKI SUSTAV .....	30
5.1. Složeni tehnički sustav .....	30
5.2. Pouzdanost broskog tehničkog sustava .....	31
5.3. Analiza značaja kvara broskog tehničkog sustava .....	35
6. ANALIZA KVAROVA KOMPONENATA GLAVNOG MOTORA KONTEJNERSKIH BRODOVA .....	37
6.1. Weibull-ova distribucija .....	37
6.2. Analiza izvora podataka .....	41
6.2.1. Održavanje glavnog pogonskog stroja kontejnerskih brodova .....	42
6.2.2. Karakteristike glavnih motora kontejnerskih brodova .....	45
6.2.3. Obrada podataka identifikacije kvarova .....	49
6.2.4. Analiza kvarova dizel – motora WinGD/Wärtsilä 10 – X92 .....	54

7. PRIMJENA WEIBULL-OVE DISTRIBUCIJE I MARKOVLJEVIH MODELA U ODRŽAVANJU GLAVNOG BRODSKOG MOTORA.....	65
7.1. Modeliranje pouzdanosti kroz dvoparametarski Weibull-ov model.....	65
7.2. Markovljev model .....	76
7.3. Modeliranje održavanja glavnog broskog motora primjenom skrivenog Markovljevog lanca.....	77
8. ZAKLJUČAK.....	84
POPIS LITERATURE .....	87
POPIS SLIKA .....	93
POPIS TABLICA .....	94
POPIS GRAFOVA.....	95
POPIS KRATICA.....	96
POPIS OZNAKA.....	98

# 1. UVOD

Kontejnerski brodovi služe kao prijevozna sredstva koja podržavaju, omogućavaju i olakšavaju međunarodnu trgovinu, povezujući proizvođače i potrošače diljem svijeta. Njihova stalna operativnost od iznimne je važnosti za održavanje učinkovitosti i pouzdanosti opskrbnih lanaca koji su neizostavni dijelovi globalne trgovine. Međutim, osjetljivost glavnih motora kontejnerskih brodova na kvarove može poremetiti složene veze opskrbnog lanca, izazivajući neposredne i globalne negativne posljedice koje zahvaćaju različite industrije i gospodarstva.

Glavni motor kontejnerskih brodova obavlja ključnu funkciju pokretačkog sustava, pružajući potrebnu snagu za uspješnu plovidbu na velikim udaljenostima pri prijenosu tereta. Unatoč napretku tehnologije i inženjeringa, glavni motori nisu otporni na moguće kvarove, koji se mogu manifestirati u stupnjevima, od manjih operativnih poremećaja do potpunog prekida rada. Posljedice takvih kvarova imaju širu dimenziju koja se proteže izvan granica samog broda, što može utjecati na cijelu globalnu mrežu opskrbnih lanaca.

Najnovija istraživanja ukazuju na sve češće prekide rada i kvarove na glavnim motorima pomorskih brodova, te obuhvaćaju širok spektar plovila bez usmjeravanja na određenu vrstu broda. Stoga je svrha diplomskog rada prikazati i analizirati najčešće kvarove na komponentama glavnog motora kontejnerskih brodova primjenom koncepta dvoparametarske Weibull-ove distribucije. Cilj je diplomskog rada na temelju primijenjenog inženjerskog alata osigurati smjernice za učinkovito održavanje kritičnih komponenata, kao i usmjeravanje pažnje na potencijalne rizike koje donosi njihovo nepravilno održavanje s namjerom osiguranja neprekidnog i pouzdanog funkcioniranja opskrbnih lanaca. Diplomski rad također sadrži multidisciplinarno istraživanje koje integrira aspekte pomorskog inženjeringa, logistike i statističke analize u razmatranju zamršenog odnosa između kvarova glavnog motora kontejnerskih brodova i prekida opskrbnog lanca.

U izradi rada upotrijebljeni su podaci o kvarovima glavnog motora kontejnerskih brodova prikupljeni od tehničke službe održavanja i upravitelja stroja (glavnog motora). Cjelokupno istraživanje i analiza prikupljenih podataka provodili su se kontinuirano tijekom jednogodišnjeg razdoblja od 2022. do 2023. godine. Naziv diplomskog rada jest: Utjecaj kvarova komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova na opskrbni lanac. Rad je podijeljen u osam cjelina:

1. Uvod
2. Dosadašnja istraživanja
3. Uloga kontejnerskih brodova u funkciji globalnog lanca opskrbe
4. Utjecaj kvarova glavnog motora kontejnerskih brodova na opskrbni lanac
5. Primjena teorije pouzdanosti i kvara na promatrani tehnički sustav
6. Analiza kvarova komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova
7. Primjena Weibull-ove distribucije i Markovljevih modela u održavanju glavnog brodskog motora
8. Zaključak

U drugom poglavlju analizirana su dosadašnja istraživanja koja su se bavila problematikom utjecaja kvarova komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova na opskrbni lanac. Kroz pregled relevantne literature, proučavane su različite metodologije i alati koji su bili primijenjeni s ciljem procjene opsega istraživanja koja su već provedena u okviru teme ovog diplomskog rada. Ovo poglavlje je temeljna osnova za razumijevanje postojećeg znanja i istraživanja u području te problematike.

Treće poglavlje obuhvaća ulogu kontejnerskih brodova u funkciji globalnog lanca opskrbe. U ovom poglavlju prikazuje se povezanost između kontejnerskih brodova i svjetskog bruto domaćeg proizvoda, analizira se utjecaj kontejnerske trgovine na globalnu ekonomiju, te se razmatra značaj pomorske razmjene roba na svjetskoj razini. Osim toga, analizira se tržište kontejnerskih brodova, ističući vodeće lidere na tržištu s prikazom udjela globalne flote kontejnerskih brodova s obzirom na različite vrste plovila. Buduća predviđanja u industriji kontejnerskog prometa također će se prikazati u poglavlju. Kroz ovo poglavlje stvaraju se temeljni okviri za razumijevanje šireg konteksta u kojem djeluju kontejnerski brodovi te se naglašava njihova uloga u podršci globalnim opskrbnim lancima.

Četvrto poglavlje obuhvaća utjecaj kvarova glavnog motora kontejnerskih brodova na opskrbni lanac. Ovdje se pruža sveobuhvatan opis pomorskih nezgoda povezanih s različitim vrstama teretnih brodova, uključujući analizu temeljnih uzroka nezgoda s naglaskom na kvarove sustava i opreme, te ljudske pogreške, s fokusom na kontejnerske brodove. Ovo poglavlje omogućava uvid u specifične aspekte pomorskih nezgoda povezanih s glavnim motorom kontejnerskih brodova i njihovog utjecaja na opskrbne lance.

U petom poglavlju primjenjuje se teorija pouzdanosti i kvara na analizu promatranog tehničkog sustava. Opisuje se glavni motor kao složeni tehnički sustav, i ističe se važnost njegove pouzdanosti tijekom operativne eksploatacije. Posebna pozornost posvećuje se kako različiti stupnjevi kvarova utječu na performanse i funkcioniranje broda, doprinoseći tako dubljem razmatranju važnosti održavanja i pouzdanosti u podršci opskrbnim lancima.

Šesto poglavlje obuhvaća analizu kvarova komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova, te identifikaciju kritične komponente temeljene na bazi podataka tehničke službe održavanja koja sadrži broj radnih sati nastalih kvarova različitih komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova. Osim toga, u ovom poglavlju opisuju se postupci održavanja na brodu, pruža se uvid u različite tipove glavnih motora koji se primjenjuju na kontejnerskim brodovima.

U sedmom poglavlju prikazani su rezultati istraživanja i primjena Weibull-ove distribucije, te Markovljevih modela na održavanje glavnog broskog motora. U okviru ovog poglavlja, Weibull-ova distribucija se primjenjuje za analizu vjerojatnosti i vremena do kvara identificirane kritične komponente glavnog motora kontejnerskih brodova, dok se Markovljev model primjenjuje kao alat za matematičko modeliranje procesa. Statistička analiza i primjena Weibull-ove distribucije temelje se na bazi podataka tehničke službe održavanja glavnog motora kontejnerskih brodova. Na temelju dobivenih rezultata Weibull-ove distribucije i Markovljevog modela, pružaju se preporuke za održavanje glavnog motora kontejnerskog broda.

Osmo poglavlje obuhvaća zaključak s osvrtom na sva prethodno navedena poglavlja uključujući relevantne aspekte i ključne spoznaje tijekom provedene analize utjecaja kvarova komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova na opskrbni lanac.

## 2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

U svrhu detaljnijeg istraživanja područja utjecaja kvarova komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova koristile su se baze znanstvenih radova kao što su: Science Direct, Web of Science (WoS), Springer Link, Research Gate i Scopus. Provedenim istraživanjem utvrđen je širok raspon pokrivenosti područja pouzdanosti i održavanja složenih tehničkih sustava. Znanstveno je dokazano kako Weibull-ova distribucija najbolje aproksimira karakteristiku eksploatacijske pouzdanosti, dok se očekivano vrijeme rada bez kvara može dobro aproksimirati srednjim vremenom između kvara. Iako je područje metoda i modela održavanja često obrađivano još uvijek je nedovoljno istraženo, a primjena Weibull-ove distribucije na kvarove glavnog brodskog motora pojavljuje se u svega nekoliko radova. Jedan od najznačajniji radova koji približno opisuje problematiku navedene teme objavljen je od strane autora Karatuğ Ç. et al. pod naslovom „*Design of a decision support system to achieve condition - based maintenance in ship machinery systems*”. U radu su prikupljeni parametri kontejnerskog broda za razvoj strategije održavanja temeljene na stanju. Autori su izradili model neuronske umjetne mreže sa svrhom pravovremenog otkrivanja kvara čime se povećava pouzdanost sustava i sigurnost rada, a smanjuju operativni troškovi [1].

Naime, sedamdesetih godina prošlog stoljeća vodila se diskusija da li je bolje obavljati preventivno ili korektivno održavanje s obzirom na to da su se troškovi održavanja značajno odražavali na troškove eksploatacije. Cjelokupni sustav održavanja tada se vodio iskustvom posade koji je u konačnici rezultirao mnogim oštećenjima. Slijedom prijašnjih spoznaja Bukša A. u svojoj doktorskoj disertaciji pod nazivom „*Modeliranje održavanja brodskog porivnog sustava*“ predlaže jednostavan i znanstveno utemeljen postupak modeliranja održavanja brodskog porivnog sustava, gdje koristeći Weibull-ovu distribuciju daje preporuku održavanja temeljem najčešćih kvarova pojedinih komponenata glavnog brodskog dizelskog motora. Nadalje, u istraživanju je primijenjena metoda za podešavanje i oblikovanje koncepta održavanja MA-CAD<sup>1</sup> s čime se strategija temelji na stanju, a ono predstavlja suvremeni pristup održavanju [2].

---

<sup>1</sup> Prilagodba i dizajn koncepta održavanja

Mihanović L. okreće se daljnjem istraživanju sukladno postavljenoj tezi Bukše A. koji u svojoj doktorskoj disertaciji istražuje eksploatacijsku pouzdanost i pogodnost održavanja brzookretnih radijalnih<sup>2</sup> dizelskih brodskih motora. Također primjenjuje Weibull-ovu distribuciju u ispitivanju kvarova pojedinih dijelova navedenog motora čime dokazuje važnost i značaj njene primjene u ispitivanju pouzdanosti složenih tehničkih sustava [3].

Izuzev pomorstva, na osnovu provedene studije objavljen je znanstveni rad u kojem Kunar S. et al. primjenjuju Weibull-ovu distribuciju kako bi utvrdili pouzdanost složenog tehničkog sustava motora dizelske lokomotive. Tim radom opisuju kvar kao događaj koji može dovesti do gubitka glavnog pogonskog sustava, poremećaja opskrbe te povećavanja troškova održavanja [4].

U okviru teme „Utjecaja kvarova komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova na opskrbi lanac“ utvrdio se nedostatak istraživanja područja utjecaja kvarova komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova. Iako je područje kvarova komponenata glavnog motora već obrađeno u okviru pomorskog prometa ono se nije specijaliziralo za određenu vrstu prijevoznog sredstva odnosno na utjecaj kvarova komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova. Također, vidljiva je primjena Weibull-ove distribucije u utvrđivanju pouzdanosti složenog tehničkog sustava (glavnog motora), te će se s tim u vezi, primijeniti Weibull-ova distribucija u cilju određivanja pouzdanosti kvarova komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova.

---

<sup>2</sup> Brzookretni radijalni dizelski motor namijenjen je ratnim brodovima

### 3. ULOGA KONTEJNERSKIH BRODOVA U FUNKCJI GLOBALNOG LANCA OPSKRBE

Ovo poglavlje obuhvatit će pregled međunarodnih pomorskih trgovinskih tokova, kontejnersku trgovinu i njene tržišne lidere, svjetske flote prema vrsti plovila te buduća predviđanja koja su temeljena na istraživanjima UNCTAD-a<sup>3</sup>. Također opisat će se povezanost globalnog bruto domaćeg proizvoda i kontejnerskog prometa. Naime, povezanost između globalnog bruto domaćeg proizvoda i kontejnerskog prometa leži u ulozi međunarodne trgovine i njezinom utjecaju na gospodarsku aktivnost diljem svijeta. Kontejnerski brodovi primarna su sredstva za prijevoz robe preko međunarodnih granica i igraju ključnu ulogu u olakšavanju globalne trgovine, koja zauzvrat ima značajan utjecaj na globalni bruto domaći proizvod. Osim međunarodne trgovine njihova povezanost očituje se i kroz:

- izvoz i uvoz,
- lance opskrbe i proizvodnju,
- globalnu ekonomsku integraciju,
- otvaranje radnih mjesta i ekonomski učinak,
- razvoj infrastrukture,
- ekonomske cikluse.

Kretanje robe kontejnerskim prometom ključno je i za izvoz i za uvoz. Izvoz povećava bruto domaći proizvod<sup>4</sup> (BDP) zemalja izvoznica jer se vrijednost izvezene robe dodaje njihovom BDP-u. S druge strane, uvoz utječe na BDP zemalja uvoznica jer se trošak te robe oduzima od njihovog BDP-a. Lancima opskrbe olakšava se funkcioniranje s učinkovitim kontejnerskim prijevozom i mrežama za otpremu. Mnogi proizvodni procesi ovise o pravovremenom i ekonomičnom kretanju sirovina i repromaterijala preko granica, a nesmetan rad opskrbnih lanaca pridonosi gospodarskoj aktivnosti i posljedično, globalnom BDP-u. Kontejnerski promet i otprema promiču gospodarsku integraciju između zemalja i regija. Kako gospodarstva postaju međusobno povezanija, dolazi do povećanja protoka roba i usluga, ulaganja i tehnološke razmjene. Ova integracija često dovodi do većeg gospodarskog rasta i širenja globalnog BDP-a.

---

<sup>3</sup> Međuvladina organizacija unutar Tajništva Ujedinjenih naroda koja promiče interese zemalja u razvoju u svjetskoj trgovini.

<sup>4</sup> U daljnjem tekstu BDP



Industrija kontejnerskog prometa osigurava radna mjesta milijunima ljudi diljem svijeta. Gospodarska aktivnost koju stvara ova industrija doprinosi gospodarskom rastu i BDP-u. Ulaganja u lučke objekte, plovne putove i povezanu logističku infrastrukturu potiču gospodarski razvoj i povećavaju učinkovitost međunarodne trgovine. Poboljšanja u tim područjima mogu povećati obujam trgovine i pozitivno utjecati na globalni BDP. Učinkovitost industrije kontejnerskog prometa i otpreme usko je povezana s globalnim gospodarskim ciklusima. Tijekom razdoblja gospodarske ekspanzije, obujam trgovine ima tendenciju povećanja, dok tijekom pada trgovina može opadati, što utječe na ukupni globalni BDP. Prema prethodno opisanom može se zaključiti da je važna povezanost između kontejnerskog prometa i globalnog BDP-a jer je ono sastavni dio funkcioniranja globalnog gospodarstva i ima izravan utjecaj na međunarodnu trgovinu i gospodarsku aktivnost.

### *3.1. Svjetski bruto domaći proizvod*

Bruto domaći proizvod (BDP) ekonomski je pokazatelj ukupne vrijednosti svih dobara i usluga unutar države tijekom jedne godine. BDP je mjeran metodom pariteta kupovne moći (PKM), koja se izražava u američkim dolarima (USD). Prema podacima MMF<sup>5</sup>-a iz 2022. godine svjetski BDP iznosio je 101,6 trilijuna dolara (prvih deset zemalja) što je prikazano Tablicom (1), u kojem je SAD (Sjedinjene Američke Države) sa svojih 25,3 bilijuna dolara vodeći svjetski gospodarski lider, a zatim slijedi Narodna Republika Kina s 18,3 bilijuna dolara. Predvodnik u Europi je Savezna Republika Njemačka s 4,3 bilijuna dolara, dok je Ujedinjeno Kraljevstvo (UK) na drugom mjestu s 3,19 bilijuna dolara. Samo pet zemalja čini više od polovice cjelokupnog svjetskog BDP-a, a u 2022. godini bili su; SAD, Narodna Republika Kina, Japan, Savezna Republika Njemačka te Republika Indija [5].

Ono što je privuklo značajnu pažnju uzimajući u obzir 2021. i 2022. godinu je indijsko gospodarstvo koje je zamijenilo UK u prvih pet zemalja. Rast kineskog BDP-a usporen je posljednjih nekoliko godina zbog posljedica pandemije COVID-19<sup>6</sup> koja je dovela do kraha kineskog izvoza čime je u SAD-u i Europi stvorila još veću pretenciju za smanjenjem njihove ovisnosti o njoj proizvodnji. Međutim,

---

<sup>5</sup> Međunarodni monetarni fond

<sup>6</sup> Pandemija koronavirusa (bolest dišnih puteva) koja se prvi puta pojavila krajem prosinca 2019. godine. U daljnjem tekstu COVID

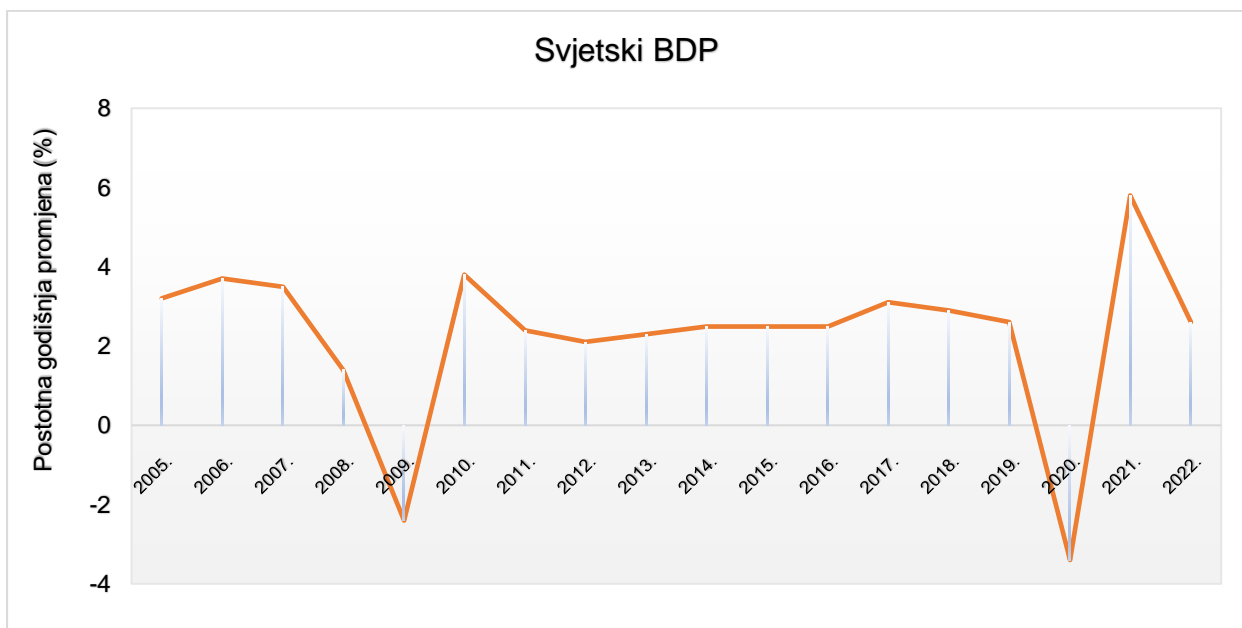
stručnjaci globalne ekonomije prema stvorenim projekcijama još uvijek predviđaju da će Narodna Republika Kina preći SAD do 2030. godine.

**Tablica 1.** Popis prvih deset zemalja prema udjelu u svjetskom gospodarstvu

Rang	Država	BDP (bilijuni, USD)
1.	 Sjedinjene Američke Države	25.035,20
2.	 Narodna Republika Kina	18.321,20
3.	 Japan	4.300,60
4.	 Savezna Republika Njemačka	4.031,10
5.	 Republika Indija	3.468,60
6.	 Ujedinjeno Kraljevstvo	3.198,50
7.	 Republika Francuska	2.778,10
8.	 Kanada	2.200,40
9.	 Ruska Federacija	2.133,10
10.	 Republika Italija	1.997,00
<b>Ukupni svjetski BDP (trilijuni)</b>		101.559,30

Izvor: [5]

Svjetski BDP prema Grafu (1) porastao je za 5,8 % u 2021. godini što predstavlja najbrži rast u više od pet desetljeća, no osjetni pad događa se u 2022. godini čiji uvid ćemo imati tek u nadolazećoj godini [6].



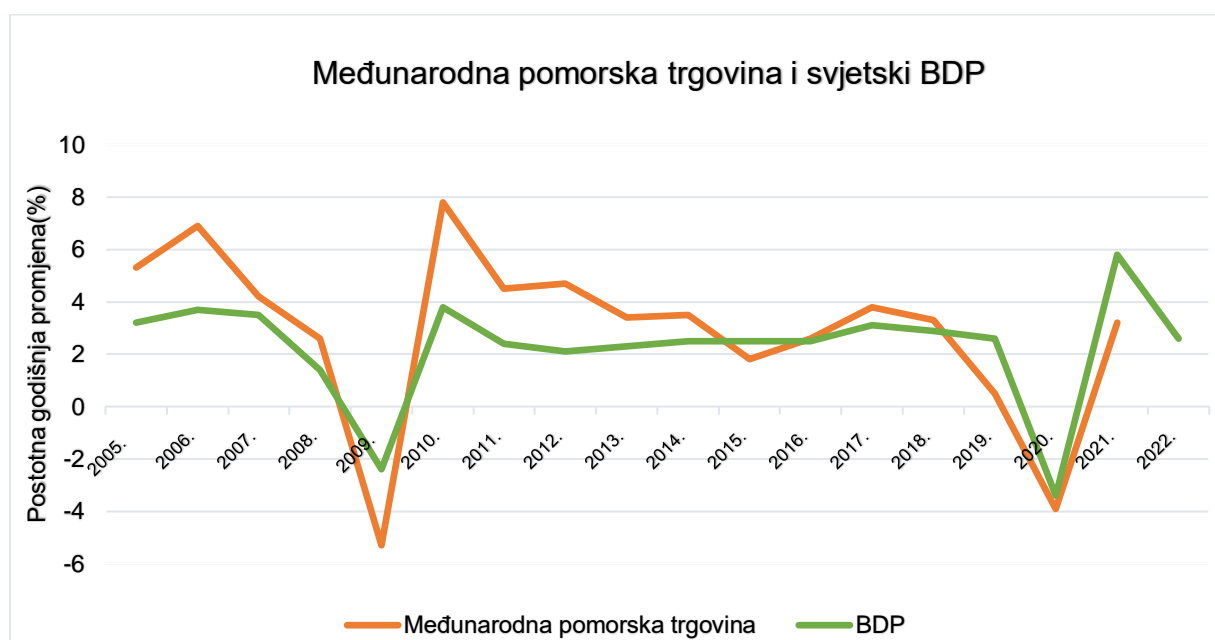
**Graf 1.** Prikaz svjetskog BDP-a u razdoblju od 2005. do 2022. godine

Izvor: [6]

### 3.2. Međunarodna pomorska trgovina

Svjetska robna razmjena pomorskim putem od 2005. godine (izuzevši godine pogođene globalnim ekonomskim krizama (2009., 2020.) pa sve do danas ostvaruje prosječan godišnji rast od oko 2,6 %. Pomorska trgovina oporavila se 2021. godine,

nakon pada od 3,4 % u 2020. godini. Godina 2020. zbog posljedica pandemije COVID-a dovodi međunarodnu pomorsku trgovinu do smanjenja za gotovo 4 %. 2021. godine dolazi do oporavka tržišta koji se očituje kroz potrošačku potrošnju, zajedno s ublažavanjem ograničenja povezanih s pandemijom. Pomorska trgovina rasla je za 3,2 % čime je ostvarila 11 milijardi tona<sup>7</sup> prevezenog tereta (tek malo ispod razine prije pandemije), međutim oporavak je bio neujednačen, a prijevoz tereta u kontejnerima se proširio. Ako se usporede stope rasta i pada tijekom prijašnjih godina međunarodne pomorske trgovine i svjetskog BDP-a što je prikazano Grafom (2) može se zaključiti da su oba segmenta u međusobnoj ovisnosti, odnosno da se promatranjem međunarodne pomorske trgovine ostvaruje mogućnost budućih predviđanja nestabilnosti globalnog tržišta, a samim time i njenog opskrbnog lanca [6].



**Graf 2.** Prikaz međunarodne pomorske trgovine i svjetskog BDP-a u razdoblju od 2005. do 2022. godine  
Izvor: [6]

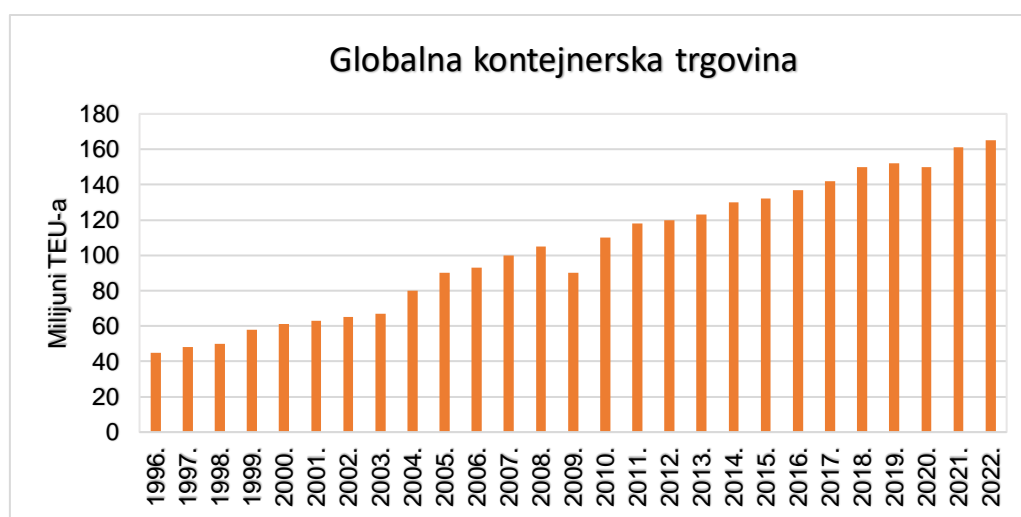
### 3.3. Globalna kontejnerska trgovina

Svjetsko gospodarstvo značajno ovisi o pomorskom prometu u čemu ključnu ulogu ima kontejnerski pomorski prijevoz. Njegova dominacija prouzrokovana je ekonomičnošću i učinkovitošću. Globalizacija je tijekom vremena stvorila teritorijalno udaljeni prostor između ponude i potražnje čime globalni opskrbni lanci postaju ovisni o kontejnerskoj industriji. Graf (3) prikazuje globalnu kontejnersku trgovinu u

<sup>7</sup> Mjerna jedinica za masu

promatranom razdoblju od 1996. do 2022. godine. Postotak godišnjeg rasta konstantno se mijenjao tijekom godina. Ono što se može primijetiti da je vrhunac rasta (15%) dosegnut 1999. godine i 2010. godine [6].

Osjetni pad kreće krajem 2007. godine kada započinje globalna ekonomska kriza koja u konačnici ostavlja negativan godišnji postotak od oko 8 % u 2009. godini. Krajem 2010. godine te ulaskom u 2011. godinu vidljiv je nagli pad postotka godišnjeg rasta što je karakteristika težnje tržišta za stabilizacijom. Osim navedene globalne ekonomske krize, 2020. godine nastupila je globalna COVID kriza kojom je prouzročen negativan postotak godišnjeg rasta za 1,3 %. Uzimajući u obzir ostale vrste trgovine koje su pretrpjele velike gubitke, globalna kontejnerska trgovina osjetno je manje pogođena. Razlog tome je posljedica pandemije koja je uzrokovala potražnju za robom široke potrošnje posebice iz Istočne Azije. Volumen tereta koji je pao za 1,3 % u 2020. godini oporavio se 2021. godine dostižući 165 milijuna jedinica ekvivalentna 20 stopa (TEU<sup>8</sup>). Analizirajući protekle godine te uzimajući u obzir segment TEU-a može se primijetiti konstantan rast globalne kontejnerske trgovine bez značajnijih odstupanja. Rekordne godine izuzev onih koje su pretrpjele krizu prelaze 140 milijuna prevezenih TEU-a (2018., 2019., 2020.). Vrlo važnu ulogu imaju glavne trgovačke rute koje ostvaruju milijunske iznose kada se govori o globalnoj kontejnerskoj trgovini [6].

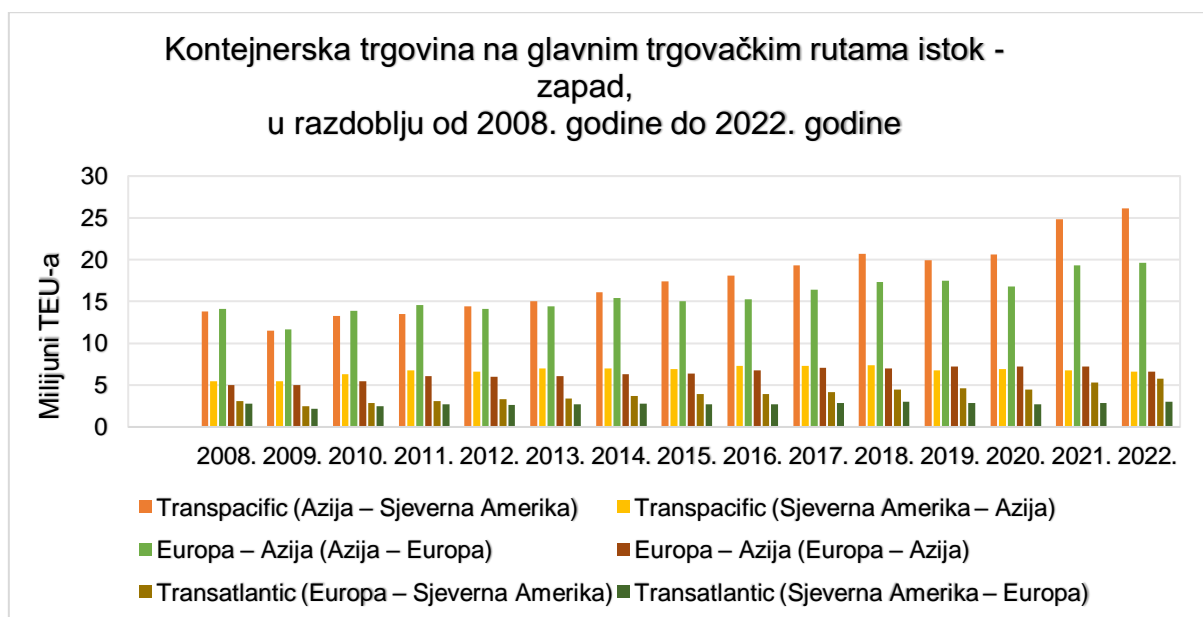


**Graf 3.** Prikaz globalne kontejnerske trgovine u razdoblju od 1996. do 2022. godine  
Izvor: [6]

<sup>8</sup> Jedinica ekvivalentna dvadeset stopa koja je bazirana na zapremnini ISO kontejnera dužine 20 stopa (6,1 m), širokog 8 stopa (2,44 m). Visina može varirati u rasponu od 4 stope i jednog inča (1,3m), 9 stopa i 6 inča (2,9 m), ali je najčešća 8 stopa i 6 inča (2,59 m). U daljnjem tekstu TEU

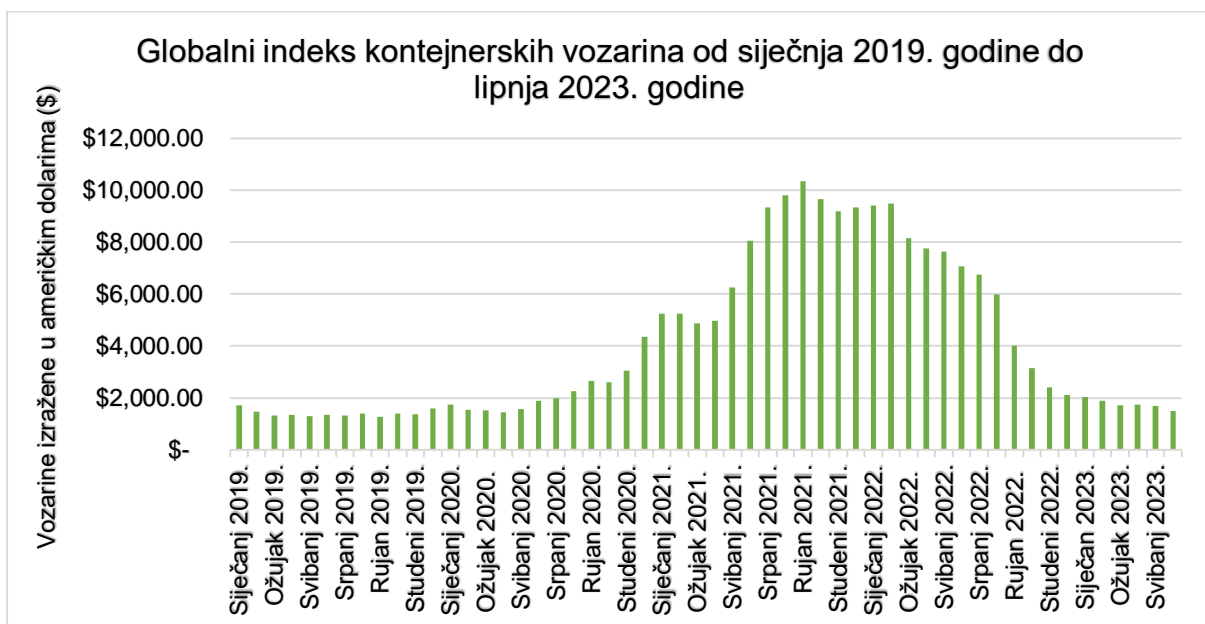
### 3.3.1. Svjetska robna razmjena kontejnerskim putem

Najvažnije svjetske kontejnerske rute su: *Transpacific* (Azija – Sjeverna Amerika), *Europa – Azija* te *Transatlantic* (Europa – Sjeverna Amerika). Ono što se može vidjeti Grafom (4) uzimajući u obzir 2022. godinu je porast kontejnerske trgovine na ruti Azija – Europa (10 %), podržana rastućim količinama iz Istočne Azije u Europu (14 %). Osim toga trgovina je porasla i na Transatlantskoj ruti (14 %), potaknuta za 18,7 % rasta u količinama isporučenim iz Europe u Sjevernu Ameriku gdje je bila iznimno velika potražnja potrošača. S druge strane, porast kontejnerske trgovine naišao je na brojne prepreke uzimajući u obzir ograničenje kapaciteta sa strane ponude, logistička uska grla, zagušenja luka i sl. Kontejnersko pomorstvo i trgovina ušli su u „svršenu oluju“ potaknutu pandemijom COVID-a koja je prouzročila smanjenje dostupnosti dostave u kombinaciji sa nestašicama u unutrašnjem prometu i logističkim kapacitetima. Globalna logistika bila je zarobljena, a kontejnerski brodovi bili zadržani u preopterećenim lukama uglavnom na glavnim kontejnerskim globalnim rutama. Tako je ruta *Transpacific* koja je tijekom godina imala glavnu tržišnu poziciju (Graf 4) s glavnom polazišnom točkom Kina pretrpjela veliki gubitak. Pandemija je ostavila poprilično velik trag i na ostale navedene rute. Ono što se očituje iz cjelokupne analize je dodatno isticanje ranjivosti globalnih opskrbnih lanaca te njihove ovisnosti o kontejnerskom prometu [6].



**Graf 4.** Prikaz glavnih trgovačkih ruta kontejnerske trgovine u razdoblju od 2008. do 2022. godine  
Izvor: [6]

Usprkos pandemiji te milijunskim gubitcima pošiljatelja, prijevoznici su s druge strane uspjeli ostvariti rekordnu dobit iskorištenjem slabosti unutrašnjeg prometa podižući vozarine. Globalni opskrbeni lanac je krhak sustav koji se sastoji od brojnih karika, a poremećaji u jednoj od karika mogu prouzročiti niz učinaka koji utječu na cjelokupni lanac opskrbe. Pokazalo se da je pandemija COVID-a bila događaj takvih razmjera da je ili zaustavila cijele industrije i opskrbeno lance ili ozbiljno smanjila njihovu učinkovitost. Od početka pandemije brodarska se industrija morala boriti sa zatvaranjem luka i zagušenjima, nedostatkom radne snage, poteškoćama s iskorištenjem kapaciteta, kao i nedostatkom novih brodskih kontejnera. Osim toga unutrašnji promet bio je zagušen i njegova mogućnosti opskrbe postajala je sve više nekonkurentna. Upravo zbog tih navedenih razloga uzimajući u obzir i podizanje cijena energenata brodari su odgovorili na slabost tržišta podizanjem cijena vozarina. Kontejnerske vozarine dramatično su oscilirale između siječnja 2019. godine i lipnja 2023. godine što je i vidljivo iz Grafa (5). Godine 2021. zabilježen je izuzetno velik porast globalnih vozarina, dosegnuvši rekordnu cijenu od gotovo 10 400 američkih dolara (rujan). Osim toga, u prvom tromjesečju 2021. godine glavne kontejnerske brodarske tvrtke imale su profitnu maržu od 56 %, u odnosu na oko 8,6 % dvije godine ranije. Trenutačno, u 2023. godini vidljiv je osjetni pad cijena vozarina nakon ekstremnog rasta (2021., 2022.), iako je on u odnosu na isto razdoblje u 2019. godini veći, te iznosi oko 2 000 američkih dolara [7].



**Graf 5.** Prikaz kontejnerskih vozarina u razdoblju od siječnja 2019. godine do svibnja 2022. godine  
Izvor: [7]

### 3.3.2. Svjetski tržišni lideri kontejnerskog pomorskog prijevoza

Vodeći lideri tržišta kontejnerskog prijevoza prikazani su Grafom (5) na temelju posjedovanja brodova (privatno vlasništvo i najam). U 2022. godini vodeće tvrtke su kontejnerskom prijevozu su [8]:

- A.P.Moller – Maersk Group (Maersk)<sup>9</sup>,
- Mediterranean Shipping Company (MSC)<sup>10</sup>,
- Compagnie Maritime d'Affrètement i Compagnie Générale Maritime (CMA CGM),
- China Ocean Shipping (Group) Company (COSCO),
- Hamburg-American Line i Norddeutscher Lloyd (Hapag – Lloyd),
- Ocean Network Express Holdings (ONE)<sup>11</sup>,
- Evergreen Marine Corporation (Evergreen Line),
- Wan Hai Lines,
- Zim Integrated Shipping Services Ltd. (Zim),
- International Holdings Co., Ltd. (SITC),
- Shanghai Zhonggu Logistic Co., Ltd.,
- Antong Holdings (QASC).

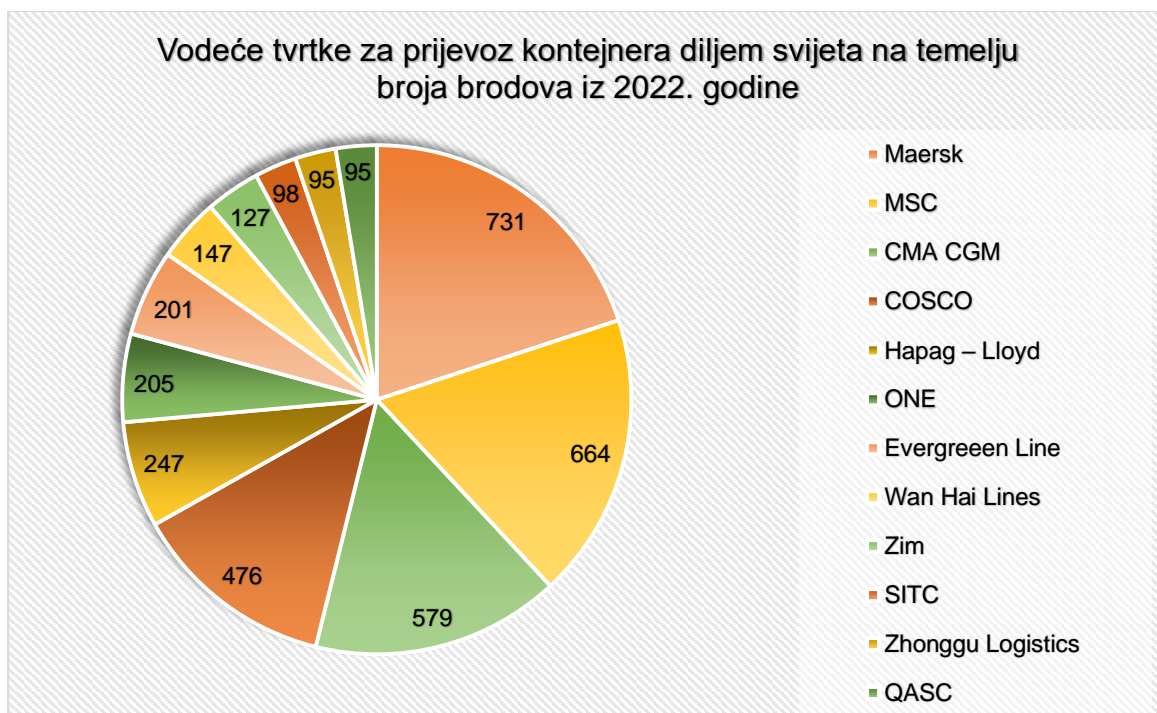
Ono što se primjećuje na grafu Grafu (6) je relativno visoko rangirani mladi konkurent ONE star nepunih 5 godina. Navedene kompanije posjeduju 86 % kontejnera u ukupnoj kontejnerskoj industriji čime ostvaruju rekordnu zaradu, a samim time i trgovački monopol nad globalnim tržištem [8].

---

<sup>9</sup> U daljnjem tekstu Maersk

<sup>10</sup> U daljnjem tekstu MSC

<sup>11</sup> U daljnjem tekstu ONE



**Graf 6.** Vodeće svjetske kontejnerske tvrtke  
Izvor: [8]

Od 30. travnja 2022. danska kompanija za prijevoz kontejnera Maersk upravljala je s najviše kontejnerskih brodova na svijetu. Iako je imao 731 kontejnerski brod u svojoj floti, Maersk je posjedovao samo 339 plovila, dok je ostatak bio unajmljen. Flota tvrtke imala je ukupni kapacitet približno 4,4 milijuna TEU-a u 2022. godini. Međutim, od svibnja 2023. godine MSC vodeći je operater kontejnerskih brodova u pogledu vlastitih i unajmljenih brodova. MSC u svojoj floti ima 643 vlastita kontejnerska broda i 292 unajmljena broda, a njihov kapacitet iznosi 4,1 milijuna TEU-a [8].

### 3.3.3. Prikaz svjetske flote prema vrsti plovila

Prisutnost svjetske flote kontejnerskih brodova kojima se vrši pomorski prijevoz tereta prikazan je Tablicom (2). Pregledom ostalih vrsta brodova kontejnerski brodovi zauzimaju treće mjesto u ukupnoj svjetskoj floti, što znači da svojom veličinom spadaju u tri vodeća lidera globalnog tržišta kojima se obavlja pomorski prijevoz tereta (60 %). Tijekom 2020. godine narudžbe za brodove pale su za 16 %, međutim početkom 2021. godine broderske su tvrtke reagirale na ograničenja kapaciteta naglim porastom novih narudžbi, posebno za kontejnerske brodove za koje su narudžbe bile najveće u posljednja dva desetljeća. U pogledu 2021. i 2022. godine potražnja za kontejnerskim



brodovima narasla je na 4,11 % što je izuzev LNG brodova iznimno veliki porast. Temeljem podataka u Tablici (2) može se zaključiti postupno jačanje svjetske kontejnerske flote čime se uspostavlja značajna uloga kontejnerskih brodova u globalnim opskrbnim lancima [6].

**Tablica 2.** Podatci svjetske flote prema vrsti broda

<b>Svjetska flota prema tipu plovila (tisuću tona nosivosti i postotak)</b>					
<b>Vrsta plovila</b>	<b>2021</b>	<b>%</b>	<b>2022</b>	<b>%</b>	<b>Postotna promjena 2021 preko 2022</b>
<b>Brodovi za rasuti teret</b>	913175	42.75%	946135	43,02%	3.61%
<b>Tankerski brodovi</b>	619331	28,99%	629014	28,60%	1,56%
<b>Kontejnerski brodovi</b>	281825	13.19%	293398	13,34%	4,11%
<b>Ostale vrste brodova:</b>	243949	11.42%	251742	11.45%	3,19%
<i>Offshore brodovi</i>	83805	3,92%	84 281	3,83%	0.57%
<i>Tanker za plin (LNG)</i>	77458	3,63%	83770	3.81%	8,15%
<i>Tankeri za kemikalije</i>	49055	2.30%	49662	2.26%	1,24%
<i>Ostalo/nije dostupno</i>	25 443	1.19%	25 690	1.17%	0,97%
<i>Trajekti i putnički brodovi</i>	8188	0.38%	8 340	0.38%	1.85%
<b>Brodovi za opći teret</b>	77910	3.65%	78 819	3.58%	1,17%
<b>Ukupno na svjetskoj razini</b>	<b>2 136 190</b>		<b>2 199 107</b>		<b>2,95%</b>

Izvor: [6]

### 3.4. Buduća predviđanja

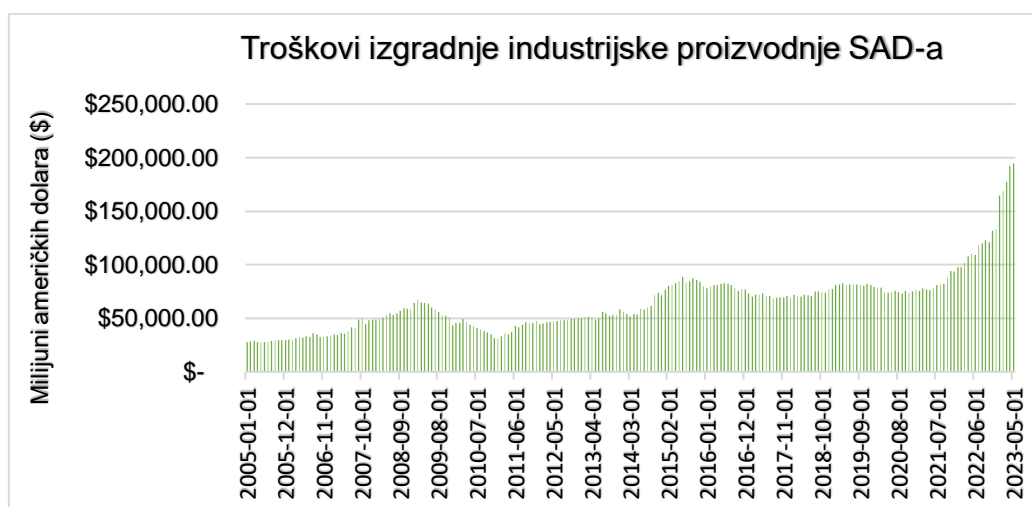
Zahvaljujući porastu potražnje za distribucijom tereta u kontejnerima (Poglavlje 3.3.), svjetska pomorska trgovina oporavila se 2021. godine. Isporuke su porasle za procijenjenih 3,2 % što čini ukupno 11 milijardi tona prevezenog tereta. Usporedbom 2020. i 2021. godine ostvaren je rast od 3,8 % u 2021. godini. Godine pogođene ekonomskim krizama nisu relevantne u razmatranju rasta ili pada poslovanja pojedine globalne trgovine. Ono što se treba uzeti u obzir je duži vremenski period koji je od značaja za razmatranje razumnosti djelovanja tijekom godina. Temeljem toga kontejnerska globalna trgovina ostvaruje konstantan rast bez velikih oscilacija (Graf 3) koja se uz prethodno prevladane krize u budućnosti treba pripremiti na jačanje i prilagođavanje novim tehnologijama i zahtjevima tržišta [6].

Budući izgledi su neizvjesni i ovise o promjenama potražnje, zagušenost luka i drugih poremećaja u opskrbnom lancu. U 2021. godini narudžba kontejnerskih brodova porasla je za 121 %. Ono što proizlazi iz toga je činjenica da više plovila ulazi na tržište što može smanjiti vozarine, no učinkovita opskrba može biti smanjena zbog operativnih i logističkih problema. Osim toga IMO<sup>12</sup>-ov Indeks postojećih brodova za energetska učinkovitost (EEXI) i indikator intenziteta ugljika (CII) stupaju na snagu od

<sup>12</sup> Međunarodna pomorska organizacija

2023. godine što će zahtijevati naknadno opremanje i recikliranje starijih plovila, te niže prosječne brzine plovidbe što u konačnici smanjuje i kapacitet. Lanci opskrbe prema tome moraju biti otporniji, učinkovitiji, te ekološki prihvatljiviji kako bi pomorski promet mogao savladati nadolazeće prepreke. Rizici i neizvjesnost ostaju visoki, a globalno, inflacija i životni troškovi rastu što bi utjecalo na smanjenje potrošnje [6].

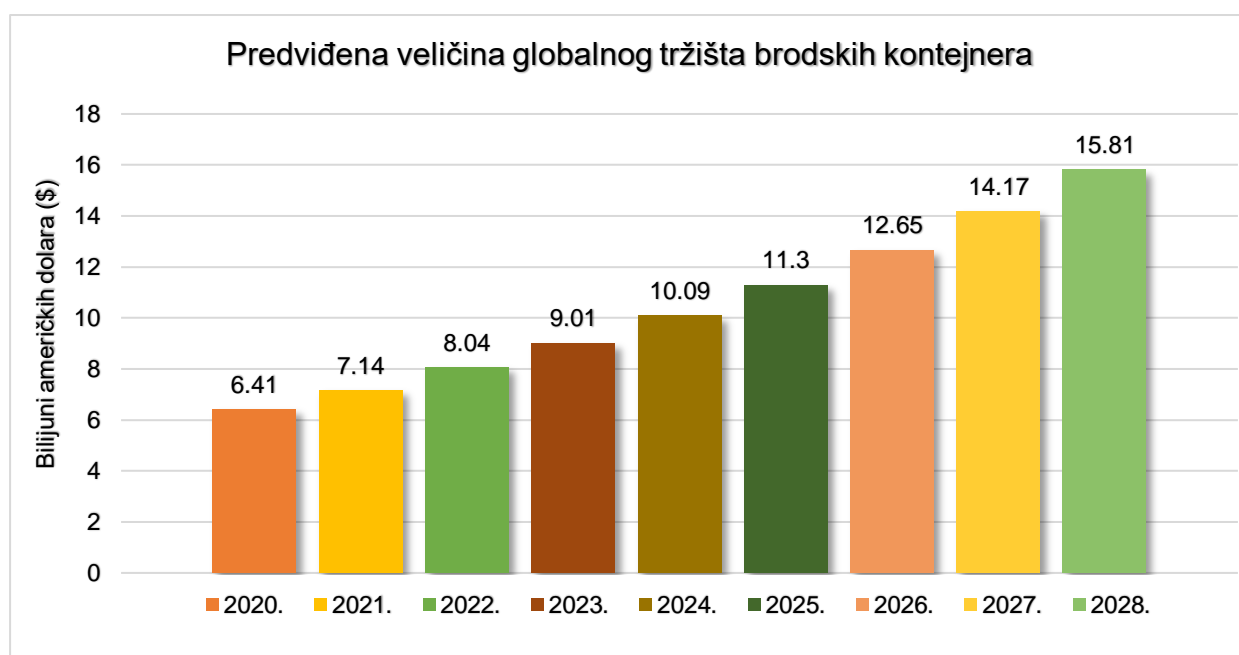
Preseljenje industrije iz SAD-a u druge države svijeta, uglavnom u Narodnu Republiku Kinu smatra se trendom koji traje već desetljećima. Visokoproduktivna industrija zahtjeva kvalitetnu i obrazovanu radnu snagu čime SAD ima daleko veću dodanu vrijednost industrijske proizvodnje po radniku od Narodne Republike Kine. Godine 2020. pandemija je razotkrila slabosti preseljenja industrije u prekomorske zemlje zbog toga što su u opskrbnim lancima nastala uska grla, došlo je do nestašice nekih ključnih komponenti i sl., a cijena energenata naglo je porasla. Dakako, ono nije stvaralo probleme u doba širenja globalizacije zadnjih 30-ak godina jer je teretni pomorski prijevoz bio povoljan i efikasan. Potaknuti tom činjenicom, kompanije u SAD-u odlučile su skratiti dio lanca nabave kako bi ostvarile sigurnost i povećale otpornost i na globalne promjene. Vraćanje proizvodnje u SAD prikazano je Grafom(7) iz kojeg se mogu vidjeti milijunska ulaganja u izgradnju industrijske proizvodnje. Svijet ulazi u novo razdoblje protekcionizma, a SAD želi smanjiti uvoz iz Narodne Republike Kine čime će u tom procesu naštetiti Europskoj Uniji (EU) koja puno više ovisi o izvozu u SAD nego on o izvozu u nju. Ono što ostaje buduće pitanje je hoće li ruta Azija - SAD gubiti na snazi tijekom godina, a tendencija postepeno egzistirati između SAD-a i Azije te SAD-a i EU (Poglavlje 3.4).



**Graf 7.** Ukupni troškovi izgradnje u industrijskoj proizvodnji SAD-a za razdoblje od 2005. do drugog kvartala 2023. godine  
Izvor:[9]

UNCTAD predviđa da će globalna pomorska trgovina izgubiti na snazi 2022. godine s usporavanjem rasta od 1,4 %. Za razdoblje od 2023. do 2027. godine očekuje se da će rasti 2,1% godišnje što je sporije od prosjeka (3,3 %) zabilježenog u posljednja tri desetljeća [6].

Između 2020. i 2028. godine predviđa se da će globalno tržište kontejnerskog prijevoza rasti po ukupnoj godišnjoj stopi rasta (CAGR<sup>13</sup>) za oko 12 %. Tržište kontejnerskog prijevoza 2020. godine iznosilo je oko 6,41 milijardi američkih dolara, te se očekuje da će 2028. godine dosegnuti vrijednost od oko 15,87 milijardi američkih dolara što je prikazano Grafom (8) [10].



**Graf 8.** Predviđanje veličine globalnog tržišta brodskih kontejnera između 2020. godine i 2028. godine  
Izvor: [10]

<sup>13</sup> Složena godišnja stopa rasta koja je jedan od najpreciznijih načina izračuna i određivanja povrata za sve što može porasti ili pasti u vrijednosti tijekom vremena

## 4. UTJECAJ KVAROVA GLAVNOG MOTORA KONTEJNERSKIH BRODOVA NA OPSKRIBNI LANAC

Ovo poglavlje obuhvatit će općeniti opis i statističke analize pomorskih nezgoda, njihove uzroke i postotak zastupljenosti temeljene na podjeli brodova prema njihovim vrstama. Kontejnerskim brodovima preveze se oko 60 % svjetske trgovine, stoga je njihova održivost, na globalnoj razini, od velike važnosti. U skladu s time, analizirat će se nezgode kontejnerskih brodova, a prije svega osvrnut će se na važnost održavanja komponenata glavnog motora čiji kvarovi mogu dovesti do stvaranja uskih grla u prijevoznom procesu, nesretnih događaja te velikih financijskih gubitaka. Statističke analize čiji su obuhvat pomorske nezgode prema istraživanju EMSA-e<sup>14</sup> koja djeluje na području Europske Unije, bit će obrađene ali neće uključivati statistike ljudskih žrtava i onečišćenja jer nisu u okviru ovog rada iako se pojavljuju kao posljedica pomorskih nezgoda.

### 4.1. Općenito o pomorskim nezgodama

Pomorske nezgode imaju mnogobrojne posljedice koje se odražavaju na sigurnost pomorskog prometa. Statističke analize dostupnih baza podataka pomorskih nezgoda TSB-a<sup>15</sup> MAIB-a<sup>16</sup>, EMSA-e, IMO-a (GISIS)<sup>17</sup>, AGCS<sup>18</sup>-a te mnogih drugih koriste se u znanstvenim istraživanjima čime pružaju uvid i stvaraju svijest o području nedostataka sigurnosti i rizika tijekom odvijanja pomorskog prometa. Svi sudionici koji su uključeni u pomorsku industriju (arhitekti, brodograditelji, brodari) imaju isti cilj, a to je izbjeći ozbiljne ishode brodskih nezgoda koje bi mogle dovesti do vrlo velikih gubitaka u pogledu izgubljenih života, šteta za okoliš i teret te posljedično i do vrlo velikih kazni. Pomorske su nezgode rezultirale nastanak zakonskih propisa, a najznačajnija Konvencija o zaštiti ljudskih života na moru (SOLAS) donošena je nakon dešavanja katastrofe gdje je mnogo ljudskih života odnijelo potonuće Titanic-a. Danas se u proces projektiranja brodova uvode metode zasnovane na riziku kako bi se

---

<sup>14</sup> Europska agencija za pomorsku sigurnost

<sup>15</sup> Kanadski odbor za sigurnost u prometu

<sup>16</sup> Britanska podružnica za istraživanje pomorskih nezgoda u kojima su sudjelovala plovila UK-a diljem svijeta i sva plovila u teritorijalnim vodama UK-a.

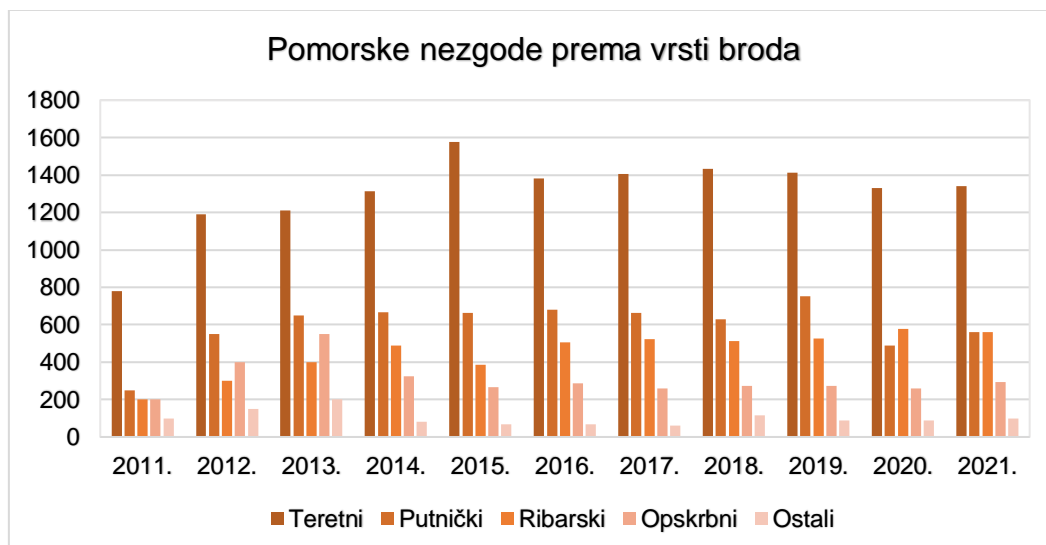
<sup>17</sup> Međunarodna pomorska organizacija koja ima u nadležnosti Globalni integrirani informacijski sustav za otpremu (Odbor za pomorsku sigurnost)

<sup>18</sup> Allianz globalna korporacija osiguranja (Odjel za pomorsku sigurnost)

osigurala racionalna osnova za donošenje odluka o novim dizajnerskim konceptima i reguliranje različitih operativa. Svi ti naponi rezultirali su smanjenjem broja pomorskih nezgoda i kontinuiranim trendom smanjenja tonaže te postotka izgubljene svjetske brodarske flote [11].

#### 4.2. Pomorske nezgode prema vrsti broda

Brodovi se općenito klasificiraju u osam skupina, a one se odnose na: kontejnerske brodove, brodove za prijevoz rasutih tereta, tankere, putničke brodove, vojne brodove (brodove ratnih mornarica), offshore brodove (brodove povezane s aktivnostima platformi), ribarske brodove i brodove za posebne namjene (jaružala, ledolomci i drugi). Od navedenih vrsta brodova, u skupinu teretnih brodova koju karakterizira najveći broj pomorskih nezgoda spadaju kontejnerski brodovi, brodovi za prijevoz rasutih tereta i tankeri. Grafom (9) može se uočiti desetogodišnja dominacija nezgoda teretnih brodova što nije iznenađujući trend budući da su u svjetskoj brodarskoj floti oni najviše zastupljeni (Tablica 1), pa samim time imaju najveću plovnosti i nužni su za održavanje globalne trgovinske razmjene [11], [12].

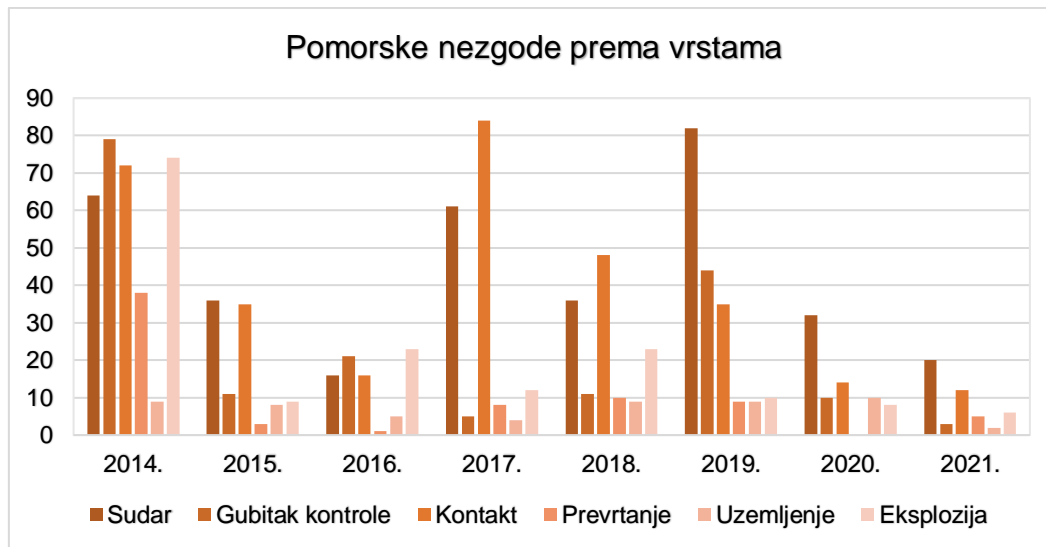


**Graf 9.** Prikaz pomorskih nezgoda prema vrsti broda u razdoblju od 2011. do 2021. godine  
Izvor: [12]

##### 4.2.1. Vrste pomorskih nezgoda

Pomorske nezgode dijele se na glavne vrste i ostale vrste. U glavne vrste pomorskih nezgoda spadaju: nasukanje, potonuće, sudar i udar, požar i eksplozija, dok se ostale vrste odnose na: prevrtanje broda, oštećenje broda ili brodske opreme, probij trupa broda, brod nesposoban za manevriranje (gubitak kontrole nad brodom)

te nestanak broda. Iz Grafa (10) jasno je vidljivo da je od svih pomorskih nezgoda u Europi najučestalija ona gubitka kontrole nad brodom. Naime, u razdoblju od 2011. do 2020. godine takvih je pomorskih nezgoda bilo čak 5.937, s time da ih je najviše bilo tijekom 2019. godine, njih 863. Pomorsku nezgodu gubitka kontrole po učestalosti slijedi pomorska nezgoda udara ili kontakta, nasukanja, oštećenja broda ili brodske opreme i sudara. Ostale nezgode događaju se u puno manjem broju, a najmanji broj zabilježenih slučajeva bio je proboj trupa [11], [12].



**Graf 10.** Pomorske nezgode prema vrstama u razdoblju od 2014. do 2021. godine  
Izvor: [12]

#### 4.2.2. Uzroci pomorskih nezgoda

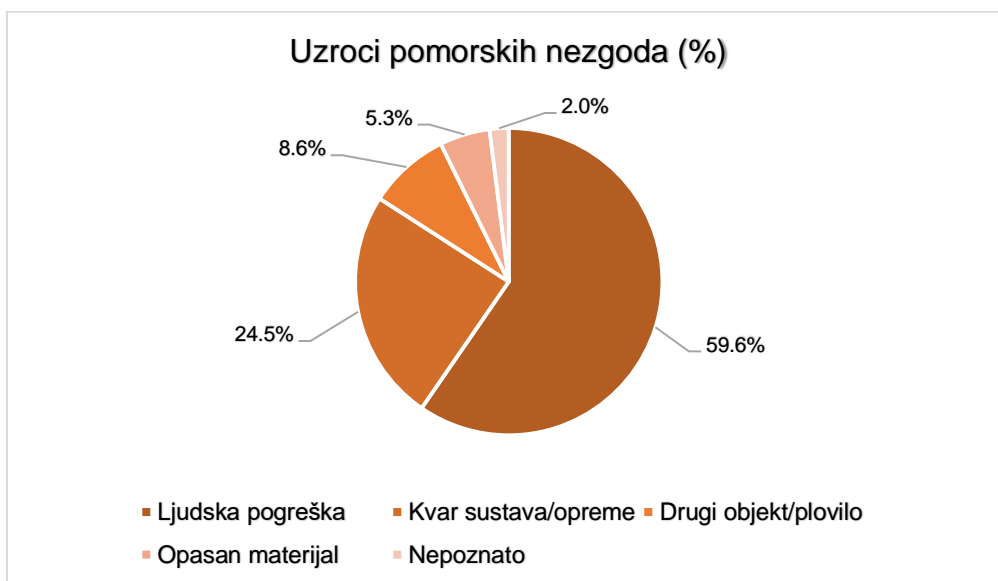
Pomorske nezgode često imaju različite uzroke, te se prema tim uzrocima pomorske nezgode najčešće dijele na nezgode koje su prouzročene [11]:

- vanjskim utjecajem (viša sila),
- nekom vrstom tehničkog kvara,
- ljudskom greškom,
- s namjerom.

Vanjski utjecaj kao uzrok pomorske nezgode je onaj kojeg je najteže predvidjeti i prevladati, a odnosi se na vremenske uvjete. Tehnički kvar kao uzrok pomorske nezgode može se dogoditi na raznim mjestima broda, u motoru, na opremi, u brodskim sustavima i slično što može, ali i ne mora biti zbog nedovoljno dobrog održavanja. Primjerice pojedini dijelovi odlaze zbog zamora materijala, loše kvalitete, vibracija, sastava goriva i slično. Naime, brod se sastoji od velikog broja međusobno povezanih

sustava koji moraju raditi ispravno da bi se osigurala sigurna i neometana eksploatacija. S toga, je vrlo važno osigurati pravilan plan održavanja koji u znatnoj mjeri može utjecati na smanjenje rizika pomorskih nezgoda. Mnogi znanstveni i stručni radovi opisuju problematiku uzročnika pomorskih nezgoda s naglaskom na ljudske pogreške (posada, piloti, inspektori itd.), te je u većini provedenih istraživanja otkriveno je da je ljudska pogreška bila glavni uzrok pomorske nezgode. Prisutnost pomorskih nezgoda koje su namjerno prouzročene imaju najmanji udio u statističkim analizama jer se smatra da nijednom sudioniku plovidbenog procesa nije u interesu izazvati pomorsku nezgodu [11].

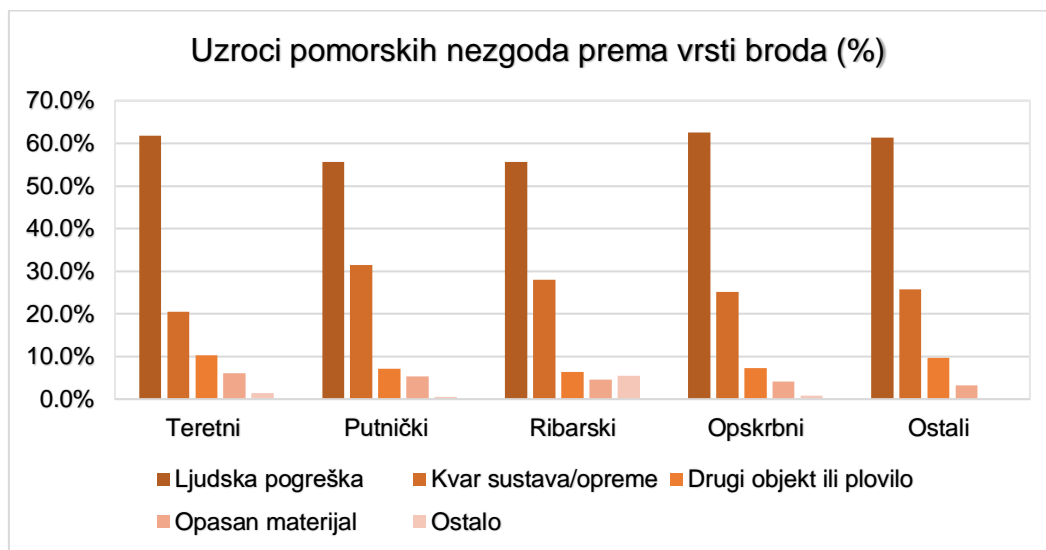
Kako je već spomenuto prema istraživanju EMSA-e najveći postotak nezgoda za razdoblje od 2014. do 2021. godine imalo je ljudsko djelovanje (Graf 11) u iznosu od 59,6 %, zatim slijedi kvar sustava ili opreme (24,5 %), drugi objekt ili plovilo (8,6 %), te opasan materijal s 5,3 % i nepoznato s (2 %). Osim ljudske pogreške koja iznosi više od polovine svih pomorskih nezgoda veliku važnost treba pridodati kvaru sustava ili opreme koji sa svojih 24,5 % ukazuje na tendenciju istraživanja njegovog prisustva što je i suština ovog rada [12].



**Graf 11.** Prikaz najčešćih uzročnika nesretnih događaja u pomorstvu za razdoblje od 2014. do 2021. godine  
Izvor: [12]

Nadalje, prema zastupljenosti uzroka pomorskih nezgoda (Graf 11) u razdoblju od 2014. do 2021. godine, Grafom (12) prikazan je postotni udio njihovog pojavljivanja na različitim vrstama brodova. Ono što se može zaključiti uspoređujući prisutnost

navedenih segmenata, da uzroci pomorskih nezgoda prate slične trendove za sve vrste brodova s malim varijacijama u postocima [12].

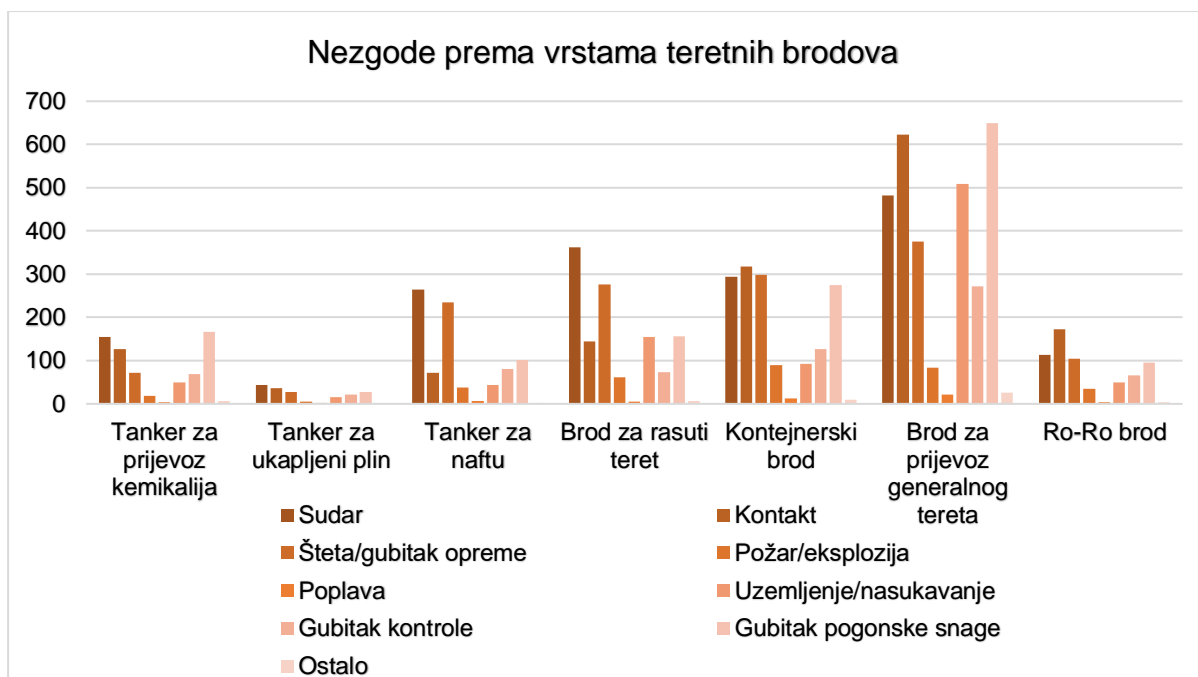


**Graf 12.** Prikaz uzročnika pomorskih nezgoda prema vrsti broda  
Izvor: [12]

#### 4.3. Distribucija nezgoda prema vrstama teretnih brodova

Podjela teretnih brodova opisana je u poglavlju 4.1.1. Temeljem važnosti značaja teretnih brodova, izvršena je statistička analiza pomorskih nezgoda (2014.-2020.) ove vrste plovila, koju 2021. godine objavljuje EMSA. Grafom (13) prikazana je prisutnost nezgoda na teretnim brodovima, gdje kontejnerski brodovi izuzev brodova za prijevoz generalnog tereta zauzimaju drugo mjesto najugroženijih. Isto tako, detaljnijom analizom izdvajaju se sudari koji predstavljaju 21,7 % svih događaja, zatim kontakti (18,2 %) i gubitak pogonske snage (18 %). Grupiranjem navigacijskih događaja (sudari, kontakti i nasukavanje/nasukanje) dolazi se do podatka da se njihovim pojavljivanjem uzrokuje više od 51,4 % nezgoda [13].



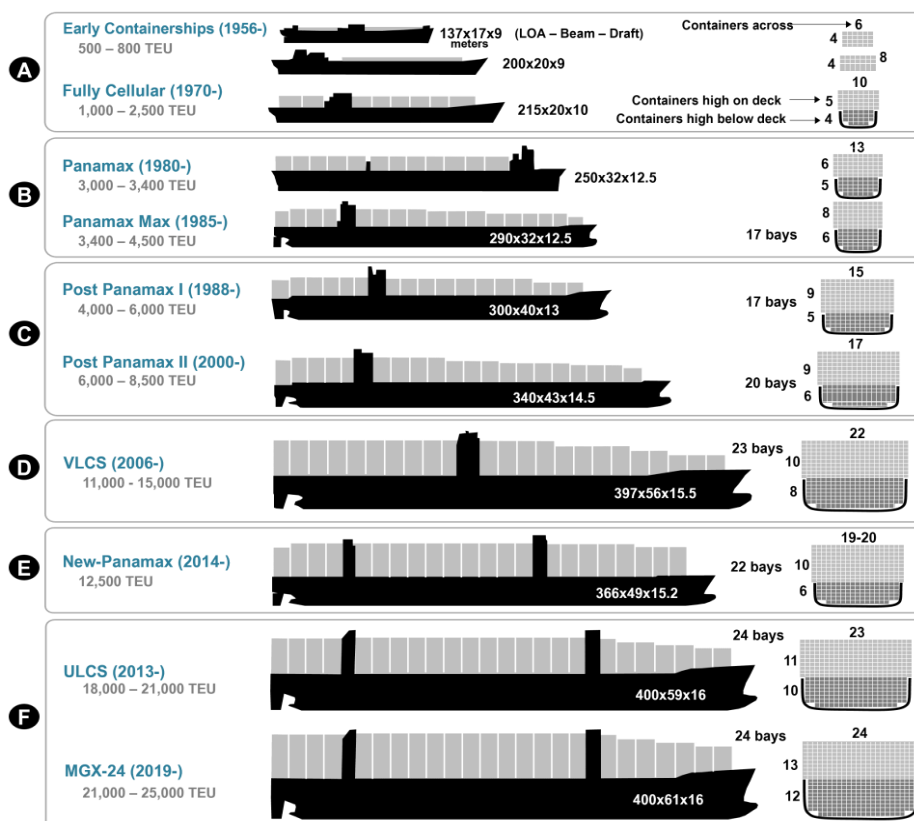


**Graf 13.** Prikaz distribucije nezgoda prema vrstama teretnih brodova  
Izvor: [13]

#### 4.3.1. Klasifikacija kontejnerskih brodova

Kontejnerski brodovi mogu se klasificirati na temelju njihovog operativnog profila (raspon usluge ili rute), generacije, veličine i rukovanje teretom. U ovom dijelu rada, prema Slici (1) opisan će se njihove klasifikacije za različite generacije. Prva generacija kontejnerskih brodova bila je sastavljena od modificiranih brodova za rasuti teret ili tankera koji su mogli prevesti do 1000 TEU-a (A). Tijekom 1980-ih godina, ekonomija razmjera ubrzano je potaknula izgradnju većih kontejnerskih brodova. Ograničenje veličine Panamskog kanala, koje je postalo poznato kao standard Panamax, postignuto je 1985. godine s kapacitetom od oko 4000 TEU-a (B). Istodobno, dizajni kontejnerskih brodova Panamax razvijali su se kako bi maksimalno iskoristili ograničenje širine kanala. Ovi brodovi postali su poznati kao Panamax Max te spadaju u drugu generaciju razvoja kontejnerskih brodova (B). Treća generacija obuhvaća klasu APL C10, s kapacitetom od 4500 TEU-a koja je uvedena 1988. godine i bila je prva klasa kontejnerskih brodova koja je premašila granicu širine Panamskog kanala (Post Panamax I) (C). Nakon što je prijeđen prag Panamaksa, nastavilo se s povećanjem klase APL C10 gdje se veličina broda povećala, a kapaciteti su dosegli 8000 TEU-a (Post Panamax II; "Suverena klasa") (C). Četvrta generacija Post Panamax kontejnerskih brodova pojavila se na mreži kada je Maersk uveo klasu brodova s većim kapacitetom u rasponu od 11 000 do 14 500 TEU-a. Nazvani su

VLCS<sup>19</sup> jer su bili veći od specifikacija proširenog Panamskog kanala (D). Novi Panamax brodovi imaju kapacitet od oko 12 500 TEU i spadaju u petu generaciju kontejnerskih brodova. Iako im je kapacitet nešto manji za razliku od VLCS-a postoji nekoliko konfiguracija u pogledu duljine (17 do 22 polja) i širine (19 ili 20 kontejnera poprečno) (E). Daljnje proširenje Post Panamax dizajna dovelo je do uvođenja ULCS<sup>20</sup> klase od 18 000 TEU-a i više, 2013. godine ('Triple E' od strane Maerska) (F). Ova klasa je dalje proširena, a do 2017. godine počeli su se isporučivati brodovi iznad 20 000 TEU-a. Dodatno proširenje u 2019. godini uvelo je brodove od 24 kontejnera poprečno i s 24 zaljeva, nazvane Megamax-24 (MGX-24). Svakako treba spomenuti da se zadnja šesta generacija kontejnerskih brodova (ULCS i Megamax- 24) približava tehničkim granicama koje Sueski kanal može primiti, ali izvan kojih komercijalna važnost značajno opada. Nacrti većih brodova, kao što je klasa Malacca Max, koji bi mogli imati kapacitet oko 27 000 do 30 000 TEU-a već postoje, ali se ne očekuje da će biti izgrađeni sve dok ne bude dovoljno volumena na ograničenim rutama koje bi ti brodovi mogli opsluživati [14].



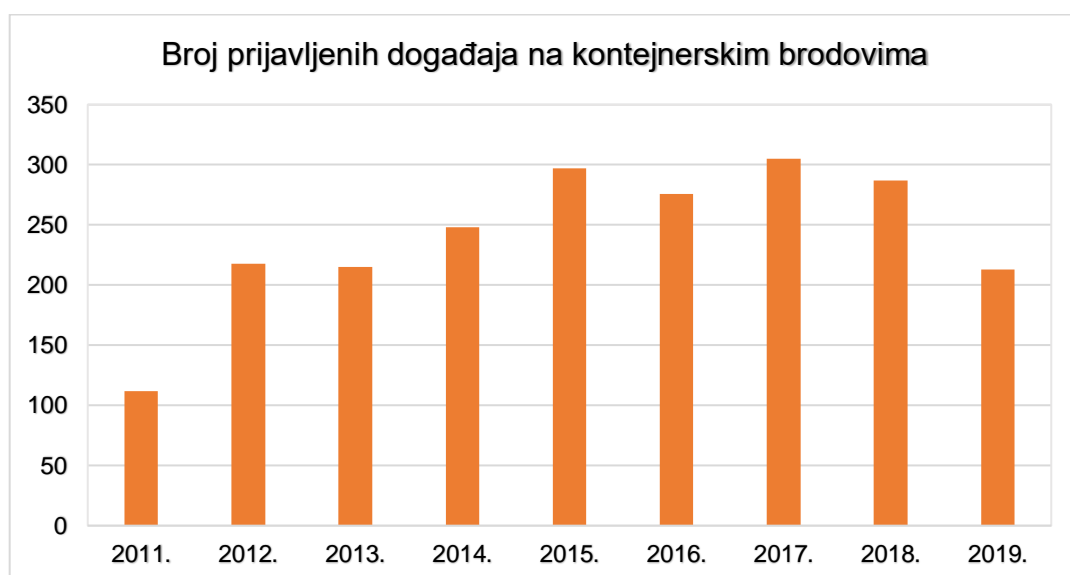
Slika 1. Prikaz razvojne generacije kontejnerskih brodova, [14]

<sup>19</sup> Vrlo veliki kontejnerski brodovi

<sup>20</sup> Iznimno veliki kontejnerski brodovi

#### 4.3.2. Analiza nezgoda kontejnerskih brodova

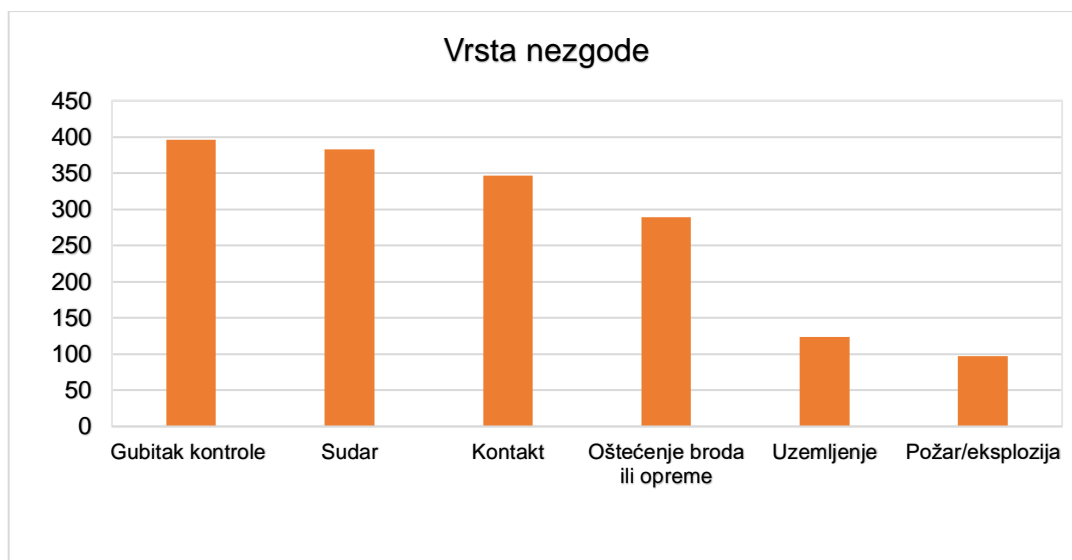
Broj prijavljenih događaja na kontejnerskim brodovima u Europi prikazan je Grafom (14). Statistička analiza obrađena je za razdoblje od 2011. do 2019. godine jer noviji podatci još nisu javno dostupni. Tijekom osmogodišnjeg razdoblja države članice EU-a prijavile su EMCIP<sup>21</sup>-u 2.171 događaj koji uključuje kontejnerske brodove. Distribucija učestalosti izvješća po godinama pokazuje rastući trend do 2015. godine, s vrhuncima u 2015. i 2017. godini. Nakon 2017. godine primjetan je trend pada s daljnjim smanjenjem u 2019. godini. Kao što je već spomenuto zbog nedostupnosti javnih podataka smanjenje trenda u 2019. godini, prema dosadašnjim saznanjima praćenja događaja na kontejnerskim brodovima mogao bih ponovno nastaviti rasti [15].



**Graf 14.** Broj prijavljenih događaja na kontejnerskim brodovima u Europi u razdoblju od 2011. do 2019. godine  
Izvor: [15]

Unutar istog vremenskog razdoblja zabilježeno je 1657 nezgoda. Već spomenuta podjela vrsta nezgoda (Graf 10.) primijenjena je na analizu kontejnerskih brodova (Graf 15). Od prijavljenih događaja (Graf 14) otprilike 80 % odnosi se na gubitke kontrole, sudare i kontakte. U 2019. godini zabilježen je pad nezgoda na kontejnerskim brodovima u odnosu na prethodnu godinu, a treba napomenuti da se kategorija požar značajno povećava [15].

<sup>21</sup> Europska informacijska platforma o pomorskim nezgodama



**Graf 15.** Vrste nezgoda kontejnerskih brodova  
Izvor: [15]

#### 4.3.3. Tehnički kvarovi i prekidi glavnih motora

Općenito, motori najvećih kontejnerskih brodova na svijetu su izazovi s kojima se njihovi proizvođači suočavaju. Veličina, nosivost, brzina te vlasništvo broda utječe na odabir broja glavnih motora. Kao primjer, onoga što pomorska industrija zahtijeva danas, Maersk-ovi kontejnerski brodovi Triple-E (poglavlje 4.2.1.) sastoje se od dva MAN-ova dvotaktna dizelaša, od kojih svaki pokreće svoj propulzor (propeler). Pojedini brodovlasnici preferiraju konfiguraciju jedan motor/jedan propeler zbog svoje učinkovitosti i smanjenih troškova rada, gdje se to uzima u obzir sve dok se previše ne utječe na brzinu plovidbe (krstarenja). Brodarska industrija ne zahtijeva samo čišće i štedljivije motore, već i motore koji će izdržati predviđeni životni vijek broda (25 godina) uz planirano održavanje i minimalne popravke.

Održavanje je kritična domena sigurnosti kontejnerskog prometa, s obzirom na složenost brodskih sustava i opremu kao i brze operacije koje su uobičajene na ovoj vrsti plovila. Troškovi povezani s popravcima, održavanjem i upravljanjem zalihama neizbježan su dio poslovanja brodara koji žele osigurati da će njihovi brodovi uvijek biti operativni i sposobni za prijevoz tereta prema svojoj namjeni. Troškovi popravaka i održavanja čine otprilike 25 % operativnih troškova, i obuhvaćaju sve financijske aspekte povezane s održavanjem broda u skladu s normama koje propisuju klasifikacijska društva [16].

Troškovi popravaka i održavanja mogu se podijeliti u dvije glavne skupine, u skupinu redovnog održavanja, te u skupinu popravaka kvarova. Redovno održavanje

obuhvaća aktivnosti kao što su održavanje glavnog motora, pomoćnih uređaja, opreme, nadogradnje, obnove i slično. Važno je napomenuti da se troškovi redovitog održavanja paralelno povećavaju s godinama starosti broda. S druge strane, troškovi uzrokovani kvarovima nastaju iznenada zbog mehaničkih grešaka ili problema i često su znatno veći od planiranih troškova održavanja.

Glavni motor (stroj) na brodu je od iznimne važnosti jer služi kao primarni izvor snage i pogona, igrajući ključnu ulogu u cjelokupnoj funkcionalnosti i radu plovila. Primarna funkcija glavnog motora (stroja) je osigurati potrebnu snagu za kretanje broda kroz vodu, a uz to pretvara različite oblike energije, poput goriva, u mehaničku energiju koja se koristi za pogon brodskih propelera gdje oni stvaraju potisak, pokrećući brod naprijed ili natrag, omogućujući mu plovidbu morima i učinkovito dosezanje odredišta. Pomoćni strojevi na brodovima igraju ključnu ulogu u pružanju podrške različitim bitnim funkcijama i osiguravanju neometanog rada, sigurnosti i udobnosti plovila i njegove posade. Oni su sekundarni u odnosu na glavni stroj, ali su jednako važni za cjelokupnu funkcionalnost i učinkovitost broda. Najvažnija funkcija pomoćnih strojeva, poput generatora, odnosi se na proizvodnju električne energije na brodu koja je neophodna za rad navigacijskih sustava, komunikacijske opreme, rasvjete, hlađenja, klimatizacije i raznih drugih električnih uređaja i strojeva na plovilu.

Naime, broderska industrija primijetila je sve veći broj prekida rada i kvarova na brodskim strojevima što potvrđuje i najnovije istraživanje o pomorskim nezgodama koje su proveli *Lloyd's List Intelligence* i *DNV<sup>22</sup>*, a odnosi se na razdoblje od 2012. do 2022. godine. Tijekom 2012. godine kvar stroja (glavnih i pomoćnih) prijavilo je više od 700 brodova, no ta brojka porasla je na gotovo 1.000 u 2015. godini, te na 1.500 u 2022. godini. Novi tipovi motora, goriva i digitalni sustavi nude mnoga rješenja, ali također donose i povećanje neizvjesnosti te nove rizike. Taj rastući trend dakako nije dobar, te se čini jasnim da su povećanja šteta strojeva i incidenti jedni od razloga kašnjenja na planiranoj ruti plovila (financijski gubitak brodara, opstrukcija lanca opskrbe, mogućnost utjecaja na globalnu ekonomiju), zahtjeva za pomoć tegljenja (povećavanje operativnih troškova brodara) i u najgorem slučaju uzročnici potpunog gubitka prijevoznog sredstva kao i ljudskih života [16], [17], [18].

Temeljem Grafa (15) najučestalije vrste nezgoda na kontejnerskim brodovima mogu se izravno ili neizravno pripisati kvarovima glavnog motora uključujući uzroke

---

<sup>22</sup>Međunarodno ovlašteni registar i klasifikacijsko društvo (Norveška)

njihovog nastanka koji su prikazani Grafom (11). Eksplozija glavnog broskog motora brodaru MSC-a obilježila je 2022. godinu. Uzroci njenog nastanka nisu poznati javnosti, no mnogi stručnjaci smatraju da je glavni uzrok neodržavanje pumpi goriva. Ono što najčešće prati ovakvu vrstu nezgoda je smrtni gubitak članova posade ili njihove ozljede koje su u ovom slučaju bile lakše i teže. Slika (2) prikazuje plovilo na kojem se desila nezgoda [17], [19].



**Slika 2.** Kontejnerski brod Rachele, [19]

Ove godine, ponovio se prethodni događaj na kontejnerskom brodu drugog imena ali istog brodaru. Slika (3) prikazuje plovilo na kojem se desila nezgoda s posljedicama gubitka ljudskog života. Za novonastali događaj, trenutačno nema preciznijih informacija ni mišljenja stručnjaka, ali ono što ostaje kao pitanje je uzrok ponavljanja istih događaja koji svakako nemilosrdno prate MSC [20].



**Slika 3.** Kontejnerski brod Rita, [20]

Dakako, postoji još mnogo zabilježenih slučajeva kojima su glavni uzroci nastanka nezgoda eksplozije ili kvarovi glavnog motora. Međutim, s osvrtom na cjelokupnu statističku analizu koja je prethodno obrađena u ovom poglavlju, zaključuje se da se ljudskim pogreškama, koje su i najčešći uzrok pomorskih nezgoda (Graf 10), treba pridodati velika pažnja kao i održavanju koje treba biti propisno kontrolirano od strane osoblja. Isto tako, s obzirom na nemogućnost utjecaja na politiku poslovanja brodara treba naglasiti, da pojedini dijelovi koji se kvare na glavnom motoru nemaju adekvatnu zamjenu (jeftinija nabava dijelova) zbog težnje za stvaranjem određene uštede (veći profit) koja može uzrokovati češće kvarove stroja i opreme (Graf 11).

Kao što je već spomenuta važnost kontejnerskih brodova (poglavlje 3.2.) koje prati trend prekida rada i kvara motora, zbivanjem nezgoda uzrokovanih tim segmentima izravno se utječe na opskrbni lanac što stvara zagušenja i kašnjenja koji generalno utječu na globalnu ekonomiju.

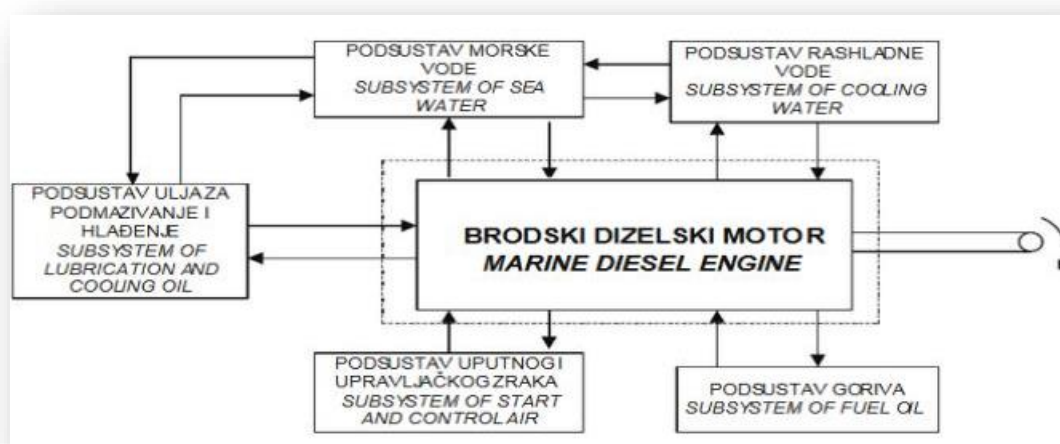
## 5. PRIMJENA TEORIJE POUZDANOSTI I KVARA NA PROMATRANI TEHNIČKI SUSTAV

Da bi se moglo govoriti o pouzdanosti, potrebno ju prije svega definirati. Postoji mnoštvo definicija koje opisuju njeno značenje, a prema Elsayed A. pouzdanost je jedna od najvažnijih karakteristika kvalitete komponenti, proizvoda, te velikih i složenih sustava [21]. Složeni tehnički sustav glavni je aspekti ovog poglavlja, u kojem će se detaljnije obrazložiti značaj pouzdanosti dizel motora koji je uobičajen u funkciji glavnog motora na kontejnerskim brodovima.

### 5.1. Složeni tehnički sustav

Tehnički sustav obično se sastoji od većeg broja podsustava i komponenti povezanih na način da je sustav sposoban obaviti niz zahtijevanih funkcija. Podsustavi i komponente sustava često su izrađeni od različitih tehnologija koje povećavaju složenost sustava. Brodski dizelski motori ubrajaju se u složene tehničke sustave jer se sastoje od međusobno povezanih različitih podsustava i velikog broja komponenata (Slika 4) [22], [23], [24].

Kako bi složeni tehnički sustavi mogli obavljati svoju funkciju u planiranom životnom ciklusu eksploatacije, potrebno je da oni budu u ispravnom stanju i s pravilnim održavanjem. Neispravnost broskog složenog tehničkog sustava može uzrokovati ekonomske gubitke, ugroziti sigurnost ljudi koji ga održavaju ili se nalaze u blizini njega ali i stvoriti uska grla i prekid usluge [2].



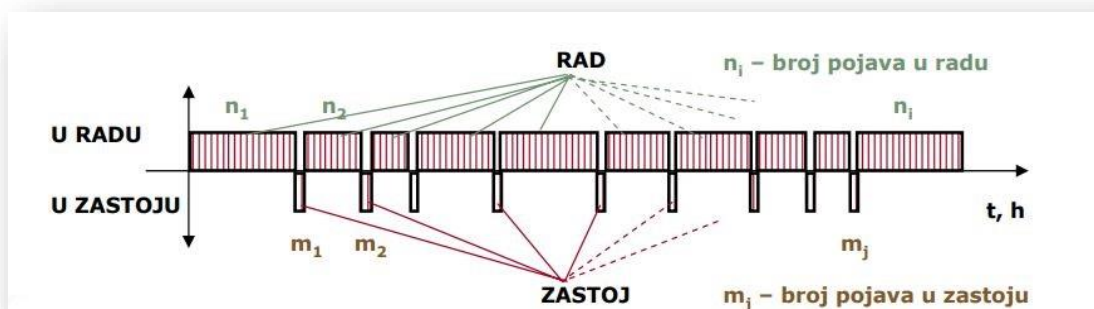
Slika 4. Brodski dizelski motor s podsustavima, [25]



## 5.2. Pouzdanost brodskog tehničkog sustava

Pouzdanost brodskog tehničkog sustava odnosi se na sposobnost sustava da dosljedno i bez kvarova obavlja svoje predviđene funkcije i zadatke tijekom određenog vremenskog razdoblja i pod određenim radnim uvjetima. Jednostavnije rečeno, to je mjera koliko su tehnički sustavi broda sigurni i pouzdani u obavljanju svojih namjenskih funkcija. Za brod, tehnički sustav uključuje širok raspon komponenti i opreme, kao što su motori, generatori, propulzijski sustavi, električni sustavi, navigacijska oprema, komunikacijski sustavi i različiti strojevi na brodu. Pouzdanost svake od ovih pojedinačnih komponenti i sustava u cjelini ključna je za siguran i učinkovit rad broda. Pod pouzdanošću dizel motora podrazumijeva se vjerojatnost ispunjavanja njegovih projektiranih funkcija u određenim uvjetima eksploatacije što znači, da bi unutar određenog vremenskog intervala trebao raditi bez zastoja [2]. Postoji niz znanstvenih radova koji analiziraju područja pouzdanosti složenih tehničkih sustava odnosno brodskih dizel motora [23], [26], [27], [28], [29], a prema Bukši A, potrebno je tijekom provođenja analize, cjelokupni sustav razdijeliti na složene dijelove i elemente odnosno na sustave, podsustave i komponente [2].

Značajke pouzdanosti u primjeni sustava promatraju se u dva segmenta, od kojih se jedan odnosi na sustav u radu, a drugi na sustav u zastoju. Naime, tijekom eksploatacije može doći do kvara motora čija je potencijalna prijetnja zastoju, te se prema tome, sustav može promatrati kao radno sposoban, tj. u radu (bez kvara) ili nesposoban za rad tj. u zastoju (kvar). Stanja sustava u radu i zastoju mogu se prikazati Slikom (5) [2].



Slika 5. Prikaz značajki pouzdanosti, [30]

Osim prethodno definiranih značajki pouzdanosti (Slika 5) potrebno je matematičkim formulama prikazati način izračuna vremena u radu (ukupno, srednje, srednje kvadratno odstupanje (varijanca)) i zastoju (ukupno, srednje, srednje kvadratno odstupanje (varijanca)), pouzdanost, nepouzdanost, učestalost te intenzitet. Prema [30] bit će prikazane formule pomoću kojih se računaju navedeni segmenti.

Ukupno vrijeme u radu računa se pomoću formule (1):

$$T_{ur} = \sum_{i=1}^n t_{uri}, (h) \quad (1)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $T_{ur}$  – ukupno vrijeme u radu,
- $t_{uri}$  – vrijeme u radu,
- $n$  – broj pojava u radu,
- $h$  – mjerna jedinica vremena (sati).

Srednje vrijeme u radu računa se pomoću formule (2):

$$T_{ur\_sred} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{uri}}{n}, (h) \quad (2)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $T_{ur\_sred}$  – srednje vrijeme u radu,
- $t_{uri}$  – vrijeme u radu,
- $n$  – broj pojava u radu,
- $h$  – mjerna jedinica vremena (sati).

Srednje kvadratno odstupanje (varijanca) računa se pomoću formule (3):

$$\sigma_{ur}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{uri} - T_{ur\_sred})^2}{n}, (h) \quad (3)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $\sigma_{ur}^2$  – srednje kvadratno odstupanje (varijanca),
- $t_{uri}$  – vrijeme u radu,
- $T_{ur\_sred}$  – srednje vrijeme u radu,
- $n$  – broj pojava u radu,

- $h$  – mjerna jedinica vremena (sati).

Ukupno vrijeme u zastoju računa se pomoću formule (4):

$$T_{uz} = \sum_{j=1}^m t_{uzj}, (h) \quad (4)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $T_{uz}$  – ukupno vrijeme u zastoju,
- $t_{uzj}$  – vrijeme u zastoju,
- $m$  – broj pojava u zastoju,
- $h$  – mjerna jedinica vremena (sati).

Srednje vrijeme u zastoju računa se pomoću formule (5):

$$T_{uz\_sred} = \frac{\sum_{j=1}^m t_{uzj}}{m}, (h) \quad (5)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $T_{uz\_sred}$  – srednje vrijeme u zastoju,
- $t_{uzj}$  – vrijeme u zastoju,
- $m$  – broj pojava u zastoju,
- $h$  – mjerna jedinica vremena (sati).

Srednje kvadratno odstupanje (varijanca) računa se pomoću formule (6):

$$\sigma_{uz}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{uzi} - T_{uz\_sred})^2}{m}, (h) \quad (6)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $\sigma_{uz}^2$  – srednje kvadratno odstupanje (varijanca),
- $t_{uzi}$  – vrijeme u zastoju,
- $T_{uz\_sred}$  – srednje vrijeme u zastoju,
- $m$  – broj pojava u zastoju,
- $h$  – mjerna jedinica vremena (sati).

Pouzdanost se računa pomoću formule (7):

$$R(t) = \frac{n - N(t)}{n} \quad (7)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $R(t)$  – pouzdanost,
- $n$  – ukupan broj pojava u radu ili ukupni broj elemenata u trenutku  $t=0$ ,
- $N(t)$  – ukupni broj stanja ili elemenata u zastoju do trenutka  $t$ ,
- $n(t)$  – ukupni broj stanja u radu ili ukupni broj ispravnih elemenata do trenutka  $t$ .

Nepouzdanost se računa pomoću formule (8):

$$F(t) = \frac{N(t)}{n} = 1 - R(t) \quad (8)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $F(t)$  – nepouzdanost,
- $n$  – ukupni broj stanja u radu ili ukupni broj ispravnih elemenata do trenutka  $t$ .
- $R(t)$  – pouzdanost.

Zbroj vjerojatnosti pojava u radu  $R(t)$  i zastoju  $F(t)$  uvijek je jednak jedinici, a računa se pomoću formule (9):

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (9)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $F(t)$  – nepouzdanost,
- $R(t)$  – pouzdanost.

Učestalost se računa pomoću formule (10):

$$f(t) = \frac{N(\Delta t)}{n \cdot \Delta t}, (h^{-1}) \quad (10)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $f(t)$  – učestalost,
- $n$  – ukupni broj stanja u radu ili ukupni broj ispravnih elemenata do trenutka  $t$ ,
- $h$  – mjerna jedinica vremena (sati),
- $N(\Delta t)$  – ukupni broj stanja ili elemenata u zastoju, gdje je  $\Delta t$  širina intervala koja se računa pomoću formule (11):

$$\Delta(t) = \frac{t_{max} - t_{min}}{1 + 3,3 \log n}, (h^{-1}) \quad (11)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $\Delta t$  – širina intervala,
- $t_{\min}$  – vrijeme pojave prvog zastoja (često je  $t_{\min}=0$  zbog početka mjerenja),
- $t_{\max}$  – vrijeme posljednje pojave zastoja,
- $h$  – mjerna jedinica vremena (sati).

Intenzitet se računa pomoću sljedeće formule (12):

$$\lambda(t) = \frac{N(\Delta t)}{\frac{n(t-\Delta t)+n(t)}{2}\Delta t}, (h^{-1}) \quad (12)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $\lambda(t)$  – intenzitet,
- $N(\Delta t)$  – ukupni broj stanja ili elemenata u zastoju, gdje je  $\Delta t$  širina intervala,
- $n$  – ukupni broj stanja u radu ili ukupni broj ispravnih elemenata do trenutka  $t$ ,
- $t$  – interval,
- $\Delta t$  – širina intervala,
- $n(t)$  – ukupni broj stanja u radu ili ukupni broj ispravnih elemenata do trenutka  $t$ .

### 5.3. Analiza značaja kvara brodskog tehničkog sustava

Kvar predstavlja promjenu stanja tehničkog sustava ili njegovih sastavnih dijelova koji onemogućuje funkciju tehničkog sustava. Osim kvara, potrebno je između ostalog definirati i oštećenje koje je usko povezano s kvarom, a predstavlja promjenu stanja tehničkog sustava ili njegovih sastavnih dijelova koje ne ometa funkciju tehničkog sustava, ali se tijekom vremena ovisno o vrsti ono može razviti u kvar. Često se kvarovi ne mogu predvidjeti, ali sa stručnim i iskusnim osobljem (posadom), te pravilnim održavanjem mogu se naslutiti i svesti na najmanje moguće razine [5].

Kada se govori o analizi značaja kvara potrebno je razmatrati i klasificirati njegov učinak s aspekta sigurnosti i operacije kao što je prikazano Tablicom (3). Prema Tablici (3), svaka klasa značaja definira kriterije mogućeg učinka kvara koji se odnosi na brodara, brod (oprema) ili okolinu. Veličina ovoga učinka izražava se s indeksom značaja SI ( $0 \rightarrow 1$ ) koji pokazuje veličinu očekivanog gubitka povezanih s jednim od neželjenih događaja [2].

**Tablica 3.** Indeks značaja (gradacija učinka kvara)

Klasa	Veličina	SI	Mogući učinci kvara
<b>Sigurnost</b>	katastrofična	1	gubitak broda, katastrofa okoline
	kritična	0,1	kritična šteta, velika brodska havarija
	oštra	0,01	manja havarija, sekundarna šteta
	marginalna	0,001	moguća šteta, moguća havarija broda
	zanemariva	< 0,0001	bez havarije, bez štete brodu ili okolini
<b>Operacija</b>	nije raspoloživa	0,01	brod nije pristupačan za operaciju danima
	djelomično raspoloživa	0,001	brod nije pristupačan za operaciju satima
	reducirana performansa	0,0001	brod radi s reduciranom performansom
	raspoloživa	< 0,00001	brod je potpuno operativan

Izvor: [2]

Slikom (6) prikazana je skala značaja indeksa (0 → 1), u kojoj jedinica (1) ima značajan efekt katastrofe, dok je nula (0) beznačajan. Osim skale značaja prikazani su indeksi sigurnosti (SI(s)) i operacija (SI(o)) koji se općenito teško razlikuju, a njihovo značenje varira kod brodara jer se svaki od njih vodi svojom politikom poslovanja [2].

Skala značaja	Veličina	Indeks sigurnosti - SI(s)	Operacijski indeks - SI(o)
	katastrofična	Gubitak broda Katastrofa okoline	Izvan operacije (dana)
	kritična	Velika brodska šteta Kritična havarija	
	oštra	Manja šteta Manja brodska havarija	
	marginalna	Moguća havarija na brodu	Izvan operacije (sati)
	zanemariva	Bez štete brodu ili okolini	Pad performanse
		Brod je potpuno operativan	

**Slika 6.** Skala značaja kvara, [2]

## 6. ANALIZA KAVROVA KOMPONENATA GLAVNOG MOTORA KONTEJNERSKIH BRODOVA

U ovom poglavlju, provest će se analiza kvarova komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova temeljem broja radnih sati dobivenih od tehničke službe održavanja. Ovo poglavlje predstavlja značajan dio rada u kojem će se prikazati način pristupa i važnosti obrade dobivenih podataka. Podaci o broju radnih sati komponenata glavnog motora bilježe se u dnevniku stroja, a zatim se šalju tehničkoj službi održavanja. Podaci o broju radnih sati uključuju informacije o kvarovima na komponentama glavnog motora i održavanju. Tehnička služba održavanja koristi podatke o kvarovima kako bi poboljšala održavanje i optimizirala performanse, što pridonosi uspješnosti pomorskih operacija i globalnih opskrbnih lanaca. U ovom poglavlju, također će biti opisan opći koncept Weibull-ove distribucije i razlozi za njenu primjenu u analizi. Uz navedeno, bit će prikazane osnovne karakteristike promatranih kontejnerskih brodova i njihovih glavnih motora, uključujući različite proizvođače kao što su Hyundai - MAN B&W, MAN B&W i WinGD/Wärtsilä. Razlike između proizvođača glavnih motora očituju se kroz performanse, pouzdanost, usklađenost s emisijama, održavanje i sl.. Osim toga, naglasit će se analiza kvarova na pojedinim komponentama glavnih motora, posebno kod proizvođača WinGD/Wärtsilä 10 – X92, te će se opisati rad identificirane ključne komponente i „težina“ njenog otkaza u usporedbi s stariji generacijama glavnih motora. Kroz ovo poglavlje neće se otkrivati ime brodarka zbog povjerljivosti podataka.

### 6.1. Weibull-ova distribucija

Weibull-ova distribucija je kontinuirana distribucija vjerojatnosti koja se obično koristi u inženjerstvu pouzdanosti i statističkoj analizi. Također, ova distribucija je neobično svestrana funkcija gustoće jer može stati u različite oblike, a može čak i približno aproksimirati normalnu raspodjelu i druge distribucije. Općenito, Weibull-ova distribucija ima dva parametra, a osim Weibull-ove distribucije s dva parametra postoji i Weibull-ova distribucija s tri parametra.

Direktna primjena u ovom istraživanju provest će se prema dvoparametarskoj Weibull-ovoj distribuciji, koja je korištena iz sljedećih razloga. Weibull-ova dvoparametarska distribucija široko je korištena u inženjerstvu pouzdanosti,

uključujući analizu intenziteta kvara i gustoće. Njezina fleksibilnost, jednostavnost, interpretacija parametara i sposobnost uklapanja realnih podataka čine ju prikladnim izborom za modeliranje ponašanja kvarova različitih komponenti i sustava, pružajući uvid u obrasce kvara i podržavajući strategije održavanja. Prema tome, u ovoj analizi kvarova primjena dvoparametarske Weibull-ove distribucije omogućit će prikaz odnosa funkcije intenziteta kvara i gustoće na temelju broja radnih sati kvara pojedine komponente promatranog složenog tehničkog sustava (glavnog motora) kontejnerskih brodova. Funkcija intenziteta kvara iznimno je važna zbog uvida u broj radnih sati najčešćih kvarova koji su prisutni u promatranim komponentama (npr. od skupa promatranih radnih sati kvarova identificirane kritične komponente najčešći kvarovi su na 12 000 radnih sati). Time se postiže mogućnost konstatacije kvara na točnom broju radnih sati kritične komponente, te se može dati preporuka načina održavanja ili provjere komponente prije nastanka kvara i većih nezgoda. Parametri od kojih se sastoji dvoparametarske Weibull-ova distribucija predstavljaju oblik i razmjer (širinu) distribucije. Parametar oblika, često označen simbolom  $\beta$  (beta)<sup>23</sup>, određuje oblik distribucije. Mala vrijednost od  $\beta$  ( $\beta < 1$ ) označava distribuciju s dugim repom, dok velika vrijednost od  $\beta$  ( $\beta > 1$ ) označava distribuciju s kratkim repom. Parametar skale, često označen simbolom ( $\alpha$ )<sup>24</sup>, određuje širenje distribucije. Velika vrijednost od  $\alpha$  označava distribuciju s velikim rasponom, dok mala vrijednost od  $\alpha$  označava distribuciju s malim rasponom [31].

Korištenjem Weibull-ove distribucije s tri parametra osim  $\beta$ -e i  $\alpha$ -e uvodi se parametar lokacije koji se označava simbolom  $\gamma$  (gama)<sup>25</sup>. Treći parametar lokacije ( $\gamma$ ), poznat je i kao parametar praga, koji određuje točku u kojoj distribucija počinje. Kada je parametar praga nula (0), Weibull-ova distribucija s tri parametra smanjuje se na Weibull-ovu distribuciju s dva parametra. Weibull-ova distribucija s tri parametra korisna je za modeliranje vremena kvara i drugih pojava koje pokazuju prag kao što je vrijeme potrebno da uređaj otkáže nakon što je uključen i sl.. Također, spomenuta tri parametra mogu se prilagoditi kako bi odgovarali podacima i davali predviđanja. Njena primjena u ovom istraživanju nije uključena zbog nedovoljne količine podataka, složenosti, većeg izazova točne procjene trećeg parametra i sl. [31], [32].

---

<sup>23</sup> U daljnjem tekstu  $\alpha$

<sup>24</sup> U daljnjem tekstu  $\beta$

<sup>25</sup> U daljnjem tekstu  $\gamma$



Najopćenitiji izraz Weibull-ove distribucije daje se troparametarskim Weibull-ovim distribucijskim izrazom koja se računa pomoću formule (13) [33]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta}} \quad (13)$$

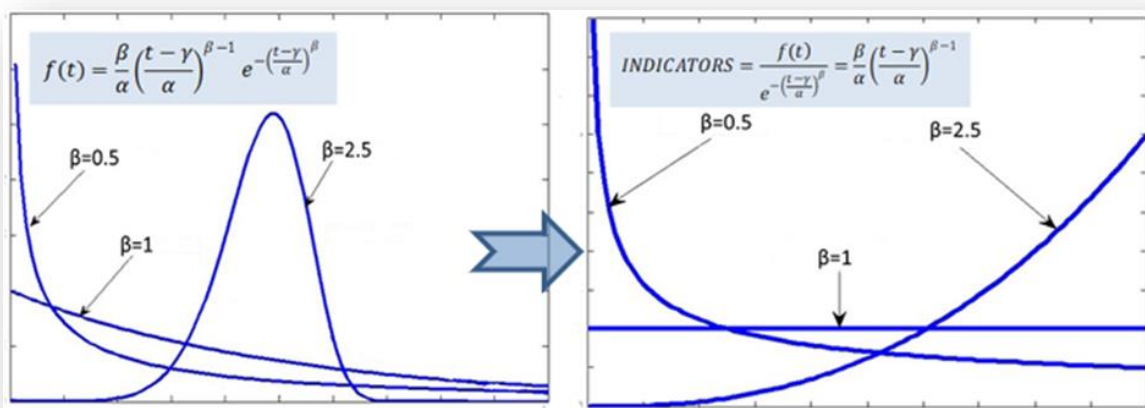
gdje je:

$$f(t) \geq 0, t \geq 0 \text{ ili } \alpha > 0, \beta > 0, -\infty < \gamma < +\infty$$

a oznake imaju sljedeće značenje:

- $\beta$  - parametar oblika, također poznat kao Weibull-lov nagib,
- $\alpha$  - parametar skale,
- $\gamma$  - parametar lokacije.

Osim gore navedene formulacije Slikom (7) prikazan je primjer grafikona za parametar oblika -  $\beta$  za tipične vrijednosti indikatora (0.5, 1, 2.5).



**Slika 7.** Primjer grafikona za parametar oblika -  $\beta$  za tipične vrijednosti indikatora, [34]

Kako bi se koristila dvoparametarska Weibull-ova distribucija obično se moraju procijeniti vrijednosti  $\alpha$ -e i  $\beta$ -e na temelju promatranih podataka. To se može učiniti korištenjem statističkih tehnika kao što je procjena maksimalne vjerojatnosti ili metoda trenutaka. Nakon što se procijene parametri  $\alpha$ -e i  $\beta$ -e, može se koristiti distribucija za predviđanje, izračunavanje vjerojatnosti ili analizu pouzdanosti i karakteristiku kvarova sustava i komponenti. U skladu s navedenim, pouzdanost se može opisivati dvoparametarskom Weibull-ovom raspodjelom gdje se funkcije izračunavaju pomoću sljedećih formula (14), (15), (16), (17) [33]:

Pouzdanost se računa pomoću formule (14):

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (14)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $R(t)$  – pouzdanost u trenutku  $t$ ,
- $\alpha$  - parametar mjerila,
- $\beta$  - parametar oblika, također poznat kao Weibull-ov nagib.

Funkcija gustoće vjerojatnosti se računa pomoću formule (15):

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (15)$$

gdje oznake imaju sljedeći naziv:

- $f(t)$  - funkcija gustoće vjerojatnosti (PDF) u trenutku  $t$ ,
- $\beta$  - parametar oblika, također poznat kao Weibull-ov nagib,
- $\alpha$  - parametar mjerila.

Intenzitet otkaza se računa pomoću formule (16):

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (16)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $\lambda(t)$  – intenzitet otkaza u trenutku  $t$ ,
- $\beta$  - parametar oblika, također poznat kao Weibull-ov nagib,
- $\alpha$  - parametar mjerila.

Očekivano vrijeme bez otkazanog rada se računa pomoću formule (17):

$$E(T) = \alpha \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (17)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $E(T)$  - očekivano vrijeme do kvara (srednje vrijeme do kvara),
- $\alpha$  - parametar mjerila,
- $\Gamma$  - gama funkcija,
- $\beta$  - parametar oblika.

Prikazane formule (14), (15), (16) i (17), biti će korištene u primjeni dvoparametarske Weibull-ove distribucije kod modeliranja kvarova identificirane kritične komponente glavnog motora kontejnerskih brodova s detaljnijim prikazom u sedmom poglavlju.

## 6.2. Analiza izvora podataka

U analizu izvora podataka uključeno je šest kontejnerskih brodova različitih tipova glavnih motora i karakteristika. Osnovne karakteristike ovih promatranih kontejnerskih brodova uključuju nosivost, gaz, brzinu, starost i mrtvu težinu<sup>26</sup> (*engl. deadweight (DWT)*). Nosivost, gaz i brzina svih šest promatranih kontejnerskih brodova u sljedećim je rasponima:

- nosivost od 12 000 do 21 000 TEU-a ,
- širina od 48 do 53 metara<sup>27</sup> ,
- gaz od 9 do 15,5 m
- od 18 do 22 čvora<sup>28</sup> brzina i
- starost brodova od šest do trinaest godina.

Novije i starije generacije kontejnerskih brodova prisutne su u količini sakupljenih baza podataka, te se prema navedenoj nosivosti može preciznije govoriti o tome da se promatrani kontejnerski ubrajaju u generacije VLCS-a i ULCS-a (poglavlje 4.3.2). Mrtve težine analiziranih kontejnerskih brodova u rasponu su od 34 365 do 166 093 tona. U razmatranju njihovih tipova glavnih motora uzima se u obzir starost i proizvođač. Kada govorimo o starosti tipova glavnih motora promatranih kontejnerskih brodova treba naglasiti da postoje starije i novije generacije koje su isto tako vezane i uz promatranje starijih i novijih generacija kontejnerskih brodova. Novije generacije glavnih motora pružaju pojedine unaprijeđene karakteristike kao što su npr. niska potrošnja goriva u cijelom radnom rasponu, minimalne emisije ispušnih plinova itd., dok se za nove generacije brodova veže povećanje nosivosti i ostale karakteristike opisane u poglavlju 4.3.1. Svakako, za starije generacije vežu se VLCS kontejnerski brodovi, dok se za novije generacije vežu ULCS kontejnerski brodovi. Isto tako, svaka novija generacija kontejnerskih brodova zahtjeva i noviju generaciju glavnih motora.

---

<sup>26</sup> Bruto tonaža broda u daljnjem tekstu DWT

<sup>27</sup> Jedinica za dužinu, u daljnjem tekstu m

<sup>28</sup> Jedinica za brzinu, u engleskom jeziku knot. Koristi se uglavnom u pomorstvu, zrakoplovstvu i meteorologiji.

U spomenutoj bazi podataka većina glavnih motora starosti je preko deset godina, dok ih je nekoliko u manjem starosnom razdoblju od pet do šest godina. Jednake karakteristike glavnih motora ovih analiziranih kontejnerskih brodova odnosile su se na činjenicu da svi analizirani kontejnerskih brodovi imaju dvotaktni dizelski motor. Također, važno je napomenuti da su svi analizirani kontejnerski brodovi u eksploataciji, te da su njihovi glavni motori proizvedeni od različitih proizvođača.

Općeniti opis ovih prethodno navedenih karakteristika značajan je zbog cjelokupnog promatranja dobivenih podataka. Naime, da bi se identificirali kvarovi na pojedinim komponentama analiziranih glavnih motora što je i suština ovog istraživanja, potrebno je imati uvid u njihove radne sate. Dobivena baza podataka uključuje starost bilježenja radnih sati za razdoblje od deset godina, ali se ono ne odnosi i ne uključuje praćenje rada svakog glavnog motora ovih šest brodova kroz deset godina, već su pojedine dobivene baze bilježene u tromjesečnom razdoblju npr. za 2013. godinu. Isto tako, praćeni radni sati promatrali su se neovisno o starosti glavnih motora. Navedeni podatci prikupljali su se godinu dana (2022./2023.) kako bi se sakupila dovoljna količina podataka koja bi omogućila provođenje analize i primjene dvoparametarske Weibull-ove distribucije (poglavlje 6.1.). Prije detaljnijih opisa karakteristika promatranih glavnih motora potrebno je opisati bazu podataka i predočiti način održavanja kontejnerskih brodova čiji je opis u daljnjem tekstu.

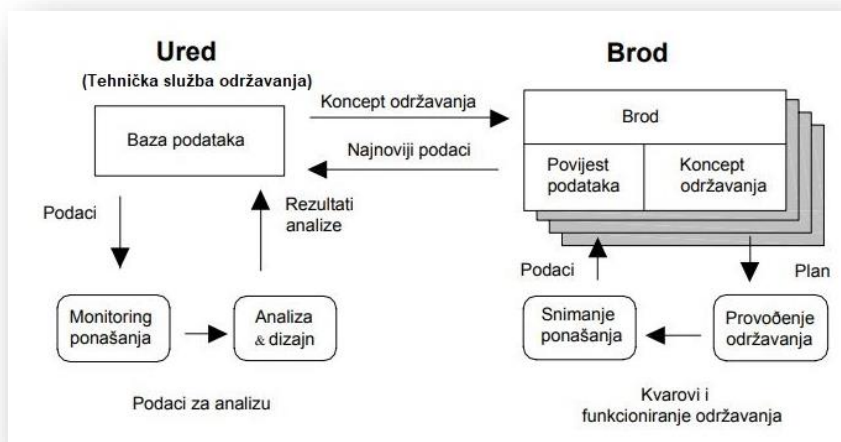
### *6.2.1. Održavanje glavnog pogonskog stroja kontejnerskih brodova*

Održavanje broda vitalni je aspekt pomorskih operacija kako bi se osiguralo sigurno i učinkovito funkcioniranje plovila tijekom njegovog radnog vijeka. Pravilno i redovito održavanje pomaže u sprječavanju kvarova, osigurava usklađenost s propisima, produljuje životni vijek broda i povećava ukupnu sigurnost. Održavanje broda može se podijeliti na dvije glavne kategorije: održavanje trupa broda i održavanje brodske opreme. Dok se održavanje trupa broda obično provodi tijekom procesa dokovanja, održavanje brodske opreme može se izvoditi tijekom plovidbe ili boravka u luci, te također tijekom dokovanja kako bi se osiguralo ispravno funkcioniranje svih brodskih sustava.

Brod ulazi u proces dokovanja iz različitih razloga, uključujući rutinske preglede, redovna periodična održavanja, opsežne remonte, popravke ili preinake. Klasifikacijska društva, u skladu sa svojim propisima ( SOLAS, Poglavlje 1, Propis 10-V), propisuju specifična razdoblja između dokovanja. Prema tim propisima, svaki brod

mora proći kroz dokovanje najmanje dva puta u petogodišnjem razdoblju. Između svaka dva dokovanja ne smije proći više od tri godine. Ovo pravilo je posebno važno zbog potrebe za pregledom podvodnih dijelova broda od strane klasifikacijskih društava [35], [36].

Ovo istraživanje temelji se na analizi podataka prikupljenih održavanjem na brodu kako bi se utvrdila pouzdanost komponenata glavnih motora kontejnerskih brodova Hyundai - MAN B&W-a, MAN B&W-a i WinGD/Wärtsilä-e. Podatci su prikupljeni iz brojnih dnevnika različitih tipova strojeva (glavnih motora) sličnih karakteristika, u kojem ključnu ulogu ima upravitelj stroja koji upravlja brodskim inženjerskim odjelom, osigurava ispravan rad strojeva (glavnih i pomoćnih) i održava visoki standard sigurnosti i učinkovitosti na brodu. Njegova stručnost i vodstvo uz pomoć ostalih časnika ključni su za nesmetan rad broda tijekom eksploatacije. Analiza i dizajn koncepta održavanja glavnih i pomoćnih motora radi se u uredu na osnovi baze podataka koji su prikupljeni iz dnevnika stroja u kojem se vodi evidencija rada glavnih i pomoćnih strojeva vođenih od strane posade. Zabilješke posade o snimanju ponašanja strojeva šalju se u tehničkoj službi zbog nadopune glavne baze podataka gdje je osim toga važna i funkcija broskog sustava koja sakuplja povijesne podatke, koji se šalju u istoimenu bazu. Ovi podaci imaju operativni karakter (karakter kvara i održavanja), koje koristi i tehnički odjel da bi se poboljšao program održavanja. Cjelokupni prikaz međusobnog povezivanja i razmijene podataka između navedenih segmenata vidljiv je sa Slike(8). U analizu su uključeni praćeni radni sati vezani samo uz komponente glavnog motora kontejnerskih brodova [2].



**Slika 8.** Prikaz razmijene informacija između ureda, tehničke službe održavanja i broda  
Izvor: [2]

Dnevnik stroja službeni je zapisnik ili zapisnik o radu strojeva, koji se održava i bilježi svakodnevno tijekom plovidbe. Ovaj dnevnik ima važnu ulogu u praćenju rada i njegovog stanja te je od suštinske važnosti za održavanje, sigurnost, i učinkovitost broda. Tablicom (4) prikazan je primjer broskog dnevnika koji služi za bilježenje podataka o radu glavnog motora u koji se unose sljedeći podatci:

- komponente (glavnog motora),
- zadnji datum održavanja,
- broj radnih sati pojedine komponente (posljednje održavanje),
- trenutni broj radnih sati,
- period na kojem bi se trebao raditi servis (*engl. overhaul*)<sup>29</sup> (propisan od strane proizvođača),
- uzrok kvara,
- primjedba.

Također, skup (1,2,..n) predstavlja količinu klipova, ispušnih ventila, košuljica cilindara, pokretnih i indikatorskih ventila koji variraju ovisno o broju cilindara odnosno tipu motora (npr. deset cilindara - deset klipova). Zadnji datum održavanja važan je zbog evidencije rada pojedinog upravitelja stroja prema datumskom bilježenju radnih sati i održavanja. Ostale značajke kao što su radni sati, period, uzrok kvara i primjedba, realnog su unosa zabilježenih u dnevniku stroja (glavnog motora) kontejnerskog broda. Ostale komponente glavnog motora zbog velike opsežnosti nisu prikazane. Dakako, ove prikazane komponente kao i ostale, razlikuju se ovisno o tipu i izvedbi glavnog motora što znači da je svaki motor drugačije izvedbe koja ovisi o njegovom proizvođaču, a samim time i definirani radni sati potrebnog održavanja propisani od strane proizvođača.

---

<sup>29</sup> Vršenje popravka na točnom broju radnih sati propisanih od proizvođača

**Tablica 4.** Raspored održavanja prikazan na temelju vođenja dnevnika glavnog motora kontejnerskog broda

Komponenta	Zadnji datum održavanja	Radni sati (posljednje održavanje)	Trenutni broj radnih sati	Period (propisan od strane proizvođača)	Uzrok kvara	Primjedba
Klip (1,2,3..n)	07. travnja 2019.	41200	4382	28000	ne postoji kvar	
Ispušni ventil (1,2,3..n)	18. veljače 2019.	26664	18918	30000	ne postoji kvar	
Košuljica cilindra (1,2,3..n)	18. siječnja 2019.	21496	24086	Po potrebi	ne postoji kvar	
Pokretni ventil (1,2,3..n)	04. travnja 2019.	34490	11092	12000	ne postoji kvar	
Indikatorski ventil (1,2,3..n)	05. rujna 2019.	39022	6560	8000	ne postoji kvar	rabljeni stari reparirani indikatorski ventil
Cilindar mlaznice za gorivo (1,2,3..n)	06. svibnja 2019.	42143	3439	8000	ne postoji kvar	
Pumpa goriva (1,2,3..n)	09. lipnja 2019.	31356	14226	16000	ne postoji kvar	nova pumpa

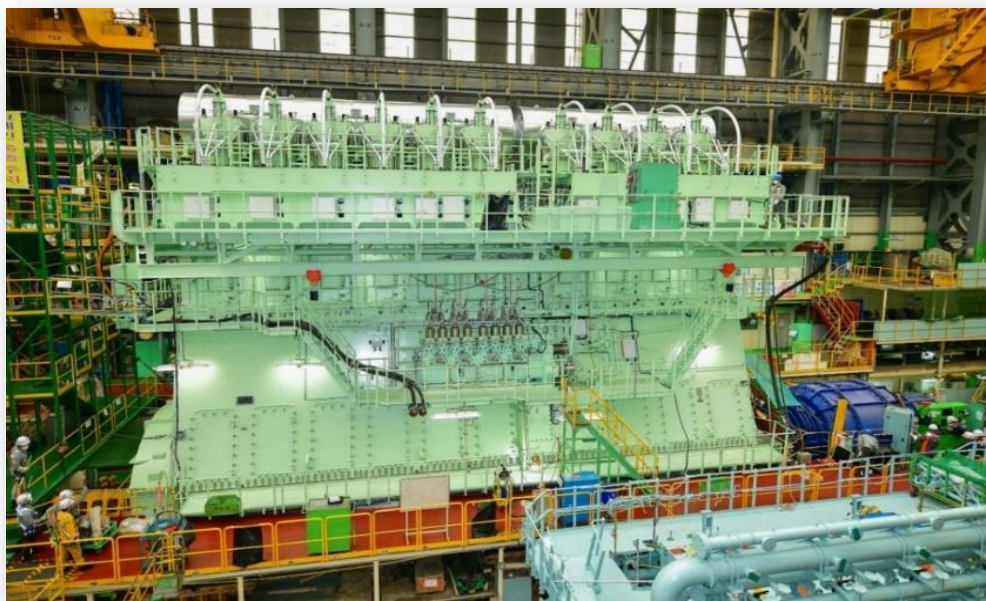
### 6.2.2. Karakteristike glavnih motora kontejnerskih brodova

Tijekom jednogodišnjeg istraživanja (2022./2023.) prikupljali su se podaci o različitim tipovima glavnih motora kontejnerskih brodova (poglavlje 6.2.1.) kako bi se pronašao dovoljan uzorak na temelju kojeg bi se omogućila primjena dvoparametarske Weibull-ove distribucije koja omogućuje modeliranje podataka o kvarovima pojedinih komponenata ovih složenih tehničkih sustava (poglavlje 5.1.). Primarni koncept ovog istraživanja vodio se prikupljanjem podataka o kvarovima pojedinih komponenata glavnih motora prethodno navedenih kontejnerskih brodova (poglavlje 6.2.) gdje su se analizirale prikupljene baze podataka dnevnika stroja (poglavlje 6.2.1.). Iako nisu svi kontejnerski brodovi odnosno njihovi glavni motori uključeni u detaljniju analizu i modeliranje kvara potrebno je opisati njihove osnovne karakteristike da bi se predočili različiti tipovi i proizvođači s kojima se susreće tijekom analize i obrade podataka. U skladu s time, glavni motori promatranih kontejnerskih brodova proizvedeni su od: Hyundai - MAN B&W-a, MAN B&W-a i WinGD/Wärtsilä-e. Osnovne karakteristike Hyundai – MAN B&W-a i MAN B&W-a ukratko će se opisati, dok će karakteristike glavnog motora proizvođača WinGD/Wärtsilä-e imati detaljniji opis jer se tijekom analize uočila veća relevantnost njegovih podataka, te je i koncept modeliranja kvarova pojedinih komponenata glavnog motora primijenjen na motoru navedenog proizvođača.

Motori proizvođača Hyundai - MAN B&W-a 12K98 ME - C7 - TII i 12K98MC Mk6 tipovi su glavnog brodskog dvotaktnog dizel motora koji proizvodi Hyundai Heavy Industries (HHI) prema licenci MAN Energy Solutions. Dio naziva koji se odnosi na

12K98 ME - C7 - TII i 12K98MC Mk6 predstavlja određeni model ovih glavnih motora koji se razlikuju prema generaciji, elektroničkim kontrolama i poboljšanju potrošnje energije i sl.. MAN Energy Solutions (MAN B&W) 12K98 MCC, 12K98 MC - C7 i 12K98 7S70MC predstavlja određene modele ovih glavnih motora koji se također definiraju prema prethodno navedenom.

Motor WinGD/ Wärtsilä - X92 s deset cilindara čiji se naziv stručnije prikazuje u obliku WinGD/W 10 - X92 prikazan je Slikom (9). Naime, njegova konfiguracija (dizajn) ubraja se u velike brodske dizelske motore male brzine koji je dizajniran za pogon na ultra velikim kontejnerskim brodovima (ULCS) (poglavlje 4.3.1).



**Slika 9.** Prikaz dizajna glavnog motora WinGD/ Wärtsilä 10 - X92, [37]

Ovaj dizel – motor bez bregaste osovine ima deset cilindara postavljenih u liniju (10 L). Motori bez bregaste osovine koriste elektronski kontrolirane aktuator<sup>30</sup> za svaki pojedinačni ventil. Aktuatori su odgovorni za izravno otvaranje i zatvaranje usisnih i ispušnih ventila motora bez oslanjanja na bregasto vratilo i mehanički ventilski sklop. Također, sadrži noviji sustav ubrizgavanja goriva *engl. common rail system*<sup>31</sup>, kojeg je važno razumjeti u razmatranju kritične komponente.

<sup>30</sup>Uređaji ili komponente koje pretvaraju ulazne signale, kao što su električni, hidraulički ili pneumatski signali, u fizičko kretanje. Imaju ključnu ulogu u kontroli različitih funkcija, kao što su kretanje ventila, ubrizgavanje goriva i kontrola turbopunjača.

<sup>31</sup> Sustav zajedničkog visokotlačnog spremnika koji opskrbljuje sve injektore odnosno cilindre gorivom. U daljnjem tekstu common rail sustav



Slikom (10) prikazani su općeniti parametri (karakteristike) ovog motora čije će značenje biti opisano u daljnjem tekstu. Snaga cilindra (*engl. power/cylinder u skraćenici power/cly.*)<sup>32</sup> na razini R1 iznosi 6130 kilovata kW<sup>33</sup>, a odnosi se na izlaznu snagu pojedinačnog cilindra (*engl. cylinder u skraćenici cyl.*) u višecilindričnom motoru, posebno kada motor radi na toj razini. Prema konfiguraciji ovog motora s deset cilindara gdje specifikacija navodi power/cly. R1 = 6130 kW, znači da svaki pojedinačni cilindar može proizvesti 6130 kW kada motor radi na svojoj neprekidnoj snazi R1. Ukupna izlazna snaga motora, u ovom slučaju, je deset puta veća od snage po cilindru (tj. 10 cilindara x 6130 kW/cilindar = 61 300 kW). Power/cly. R4 znači da svaki cilindar u ovom motoru proizvodi 4070 kW kada motor radi na svojoj R4 snazi. Ukupna izlazna snaga ovog motora s njegovom oznakom R4 bila bi zbroj izlazne snage svih cilindara, pomnožen s brojem cilindara u motoru (tj. 10 cilindara x 4070 kW/cilindar = 40 700 kW). Izraz brzine na izlaznoj snazi R1 (*engl. speed R1*) izražen u broju okretaja u minuti (*engl. revolutions per minute u skraćenici rpm*)<sup>34</sup> koristi se za određivanje brzine vrtnje koljenastog vratila motora. Osim toga označava broj potpunih okretaja koje radilica motora napravi u jednoj minuti kada motor radi pri svojoj neprekidnoj snazi (R1). Broj okretaja u minuti za ovaj motor na neprekidnoj snazi (R1) iznosi 76. Speed R1 + znači da se broj okretaja motora povećava na razinu povezanu s načinom rada ili stanjem "R1", koji u ovom slučaju s oznakom + omogućava 80 rpm.

Oznaka brzine R3/R4 (*engl. speed R3/R4*) sugerira da ovaj motor može raditi na dvije različite razine snage kada dosegne 70 rpm. Provrta (*engl. bore*) koji označava promjer unutarnje površine cilindra obično se izražava u milimetrima (mm)<sup>35</sup> ili inčima. U ovom slučaju navodi se da je provrta 920 mm. Duljina hoda cilindara (*engl. stroke*) ovog motora je 3468 mm. Hod je mjerenje udaljenosti koju klip prijeđe unutar cilindra između položaja gornje mrtve točke (GMT) i donje mrtve točke (DMT). MEP je engleska kratica naziva *Mean Effective Pressure*<sup>36</sup> i to je ključni parametar koji se koristi za procjenu performansi motora s unutarnjim izgaranjem<sup>37</sup>(dizel motora). Srednji efektivni tlak tijekom faze "uvođenja" (*engl. MEP introduction*) odnosno tijekom

---

<sup>32</sup> U daljnjem tekstu power/cly.

<sup>33</sup> Mjerna jedinica za snagu. U daljnjem tekstu kW

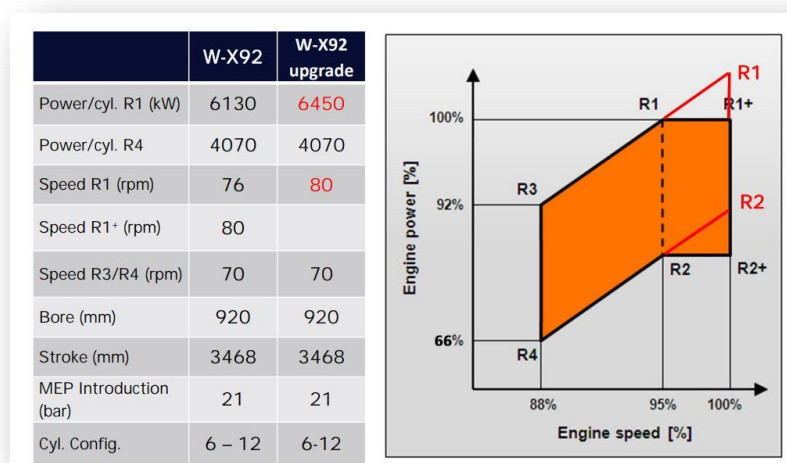
<sup>34</sup> Okretaji u minuti su jedinica za brzinu vrtnje rotacijskih strojeva

<sup>35</sup> Mjerna jedinica za dužinu. U daljnjem tekstu mm

<sup>36</sup> U daljnjem tekstu MEP.

<sup>37</sup> Gorivo izgara u radnom prostoru koji služi za pretvaranje kemijske energije goriva u toplinsku energiju, a potom iz toplinske energije u mehanički rad.

usisnog takta ovog dvotaktnog dizelskog motora iznosi 21 bar<sup>38</sup>. Konfiguracija cilindra (*engl. cylinder configuration u skraćenici cly. config.*). odnosi se na to, da se prethodno navedene karakteristike primjenjuju za broj cilindara ove vrste motora koji su rasponu od šest do 12 cilindara. Nadogradnja ovog motora (*engl. upgrade W - X92*) odnosi se na nadogradnju s prethodno opisanim karakteristikama kod kojih se povećavaju performanse snage cilindra na R1 izlaznoj snazi od 6450 kW i (*engl. power/cly. R1 6450*) brzine na istoj izlaznoj snazi (R1) s 80 rpm. Desna strana slike prikazuje jačinu motora izraženu u postotcima u odnosu na broj okretaja motora koji je također izražen u postotcima za svaku od izlazne snage (R1, R1+, R2, R2+, R3, R4) [38].



**Slika 10.** Karakteristike glavnog motora WinGD/Wärtsilä – X92, [38]

Uz prethodno navedene općenite karakteristike, detaljniji podatci o WinGD/Wärtsilä – X92 s deset cilindara prikazani su Tablicom (5). Naime, ovaj tip motora omogućuje konfiguraciju u rasponu od šest do 12 cilindara. Ovaj glavni motor s deset cilindara ima sljedeće karakteristike; izlazna snaga na R1 iznosi 64 500 kW na 80 rpm, dok na R2 iznosi 46 500 kW na istom broju okretaja. Kod postizanja 70 rpm izlazna snaga na R3 iznosi 56 500 kW, a na R4 40 700 kW. Duljina A (mm) predstavlja duljinu motora ovisno o broju cilindara, te za ovaj desetcilindrični motor iznosi 19 520 mm (19, 52 m). Težina cjelokupnog motora s deset cilindara iznosi 1 790 tona. Sve navedene karakteristike variraju ovisno o konfiguraciji glavnog motora odnosno o tome koliki mu je broj cilindara [38].

<sup>38</sup> Mjerna jedinica za tlak.

**Tablica 5.** Karakteristike glavnog motora WinGD/Wärtsilä 10 – X92

<i>Snaga, duljina, težina</i>						
<i>Broj cilindara</i>	80 (rpm)		70 (rpm)		Duljina A (mm)	Težina (tona)
	R1	R2	R3	R4		
<b>10</b>	64 500	46 500	56 500	40 700	19 520	1 790

Izvor: [38]

### 6.2.3. Obrada podataka identifikacije kvarova

U jednogodišnjem razdoblju (2022./2023.) prikupili su se podatci od glavnih motora kontejnerskih brodova (poglavlje 6.2.2. i 6.2.3.). Međutim, kako je već spomenuto u detaljniju analizu nisu uključeni svi glavni motori promatranih kontejnerskih brodova jer se na pojedinim komponentama prema broju radnih sati evidencije upravitelja stroja nije uočio kvar. Prema Slici (11) u tabličnom prikazu, baza podataka sastoji se od broja kvarova komponentata glavnih motora i radnih sati kvara. Svi prikazani radni sati pojedinih komponentata glavnih motora realnog su unosa dobiveni od strane tehničke službe održavanja i upravitelja stroja, koji su tijekom eksploatacije i održavanja spomenutih kontejnerskih brodova bili bilježeni u dnevniku stroja (poglavlje 6.2.1. i 6.2.2.). Obrada podataka provodila se uzimajući u obzir različite tipove i proizvođače glavnih motora kontejnerskih brodova gdje je važno napomenuti da se prema homogenosti sustava omogućilo razmatranje kvarova postojećih istih komponentata na različitim motorima. Tako se primjerice kvarovi na pumpama goriva, klipovima i ispušnim ventilima i sl. neovisno o tipu motora, nosivosti, brzini i DWT-u kontejnerskih brodova mogu promatrati kao zajednička cjelina jer su im slična ili ista opterećenja, isti ili jednaki uvjeti rada itd.. Na Slici (11) može se vidjeti da su komponente i radni sati odvojeni prilikom analize kvarova glavnih motora, a razlozi takvog postupanja opisat će se u daljnjem tekstu.

Uočeni kvarovi iz baze podataka (Slika 11) odnosili su se na kvarove glavnih motora proizvođača Hyundai - MAN B&W-a 12K98 ME - C7 - TII i WinGD/Wärtsilä 10 – X92. Kod razmatranja kvarova na pojedinim komponentama uzevši u obzir ova dva proizvođača uočile su se neke od sljedećih razlika. Naime, kod razmatranja kvarova iz prikazane baze podataka (Slika 11) neke od komponentata imale su poprilično velik raspon radnih sati prije nastanka kvara. Tako se primjerice uočio 20. kvar nakon 58 760 radnih sati iako je servis od strane proizvođača propisan na 16 000 radnih sati. Ako je servis propisan od strane proizvođača na 16 000 radnih sati to znači da upravitelj stroja treba obaviti servis na tom broju radnih sati, te ukoliko se nije desio

kvar prije ili na tom radnom satu sljedeći servis treba biti obavljen tek za idućih 16 000 radnih sati. Prema tome, opravdan je velik broj radnih sati na toj komponenti, te se prilikom izvršavanja pregleda od strane upravitelja stroja ovog glavnog motora nije uočio kvar. Njezin rad odvijao se dalje bez promjena do trenutka uočavanja kvara koji se na ovoj komponenti identificiran na 58 760 odrađenih radnih sati. Ovaj primjer iz prakse ukazuje način razmišljanja vođenja rada i održavanja cjelokupnog glavnog motora i politike brodaru. Ukoliko se ne uočava kvar prije servisa i na radnom satu propisanom od strane proizvođača, komponente se puštaju u daljnji rad sve dok se dogodi kvar. To omogućava brodaru manje troškove održavanja koji svakako imaju veliki udio u ukupnim operativnim troškovima kontejnerskih brodova (poglavlje 4.3.3.). S tom spoznajom i navedenim primjerom 20. kvara može se govoriti o dobroj kvaliteti materijala od koje je izrađena komponenta i pravilnom održavanju, ali i napomeni za posjedovanjem savjesti rizika ovakvog pristupa koji može rezultirati velikim posljedicama čija je odgovornost na iskustvu upravitelja stroja (glavnog motora). Dakako, osim 20. kvara prikazani su i drugi kvarovi koji su se dogodili na većem broju radnih sati (kvarovi ili komponenta 19., 21., 22, 24. itd.). Pojedine komponente koje su se razmatrale do 43. kvara imale su i manji broj radnih sati od propisanih radnih sati na kojima se treba provesti održavanje. Navedeni kvarovi iz prikazane Slike (11) odnose se na 1., 2., 3., i 4. kvar. Isto tako, do 43. kvara predstavljen je skup kvarova različitih komponenata kao što su klipovi, ispušni ventili i ostali dijelovi glavnog motora Hyundai - MAN B&W-a 12K98 ME - C7 – TII. Na njima se nisu uočili konstantni ponavljajući kvarovi istih komponenata, te je time otežana provedba detaljnije analize i dvoparametarske Weibull-ove distribucije. Za njihovo daljnje razmatranje potrebno je prikupiti veću bazu podataka s ponavljajućim kvarovima istih komponenata koji su se dogodili prije propisanog servisa od strane proizvođača. Sve promatrane komponente imaju svoj vijek trajanja no međutim, one postaju kritične i pogodne za detaljniju analizu ako se identificirani kvarovi konstantno pojavljuju na radnim satima prije propisanog servisa od strane proizvođača.

Od 43. kvara, prilikom analize kvarova promatrane baze podataka (Slika 11) uočio se veći broj kvarova koji se ponavljao na dobavnim pumpama razvodnika goriva glavnog motora WinGD/Wärtsilä 10 – X92. Ono što se može vidjeti iz priložene Slike (11), da se od 43. kvara uzastopno ponavlja 56 kvarova na ovoj komponenti čime se prema prethodno opisanom razmatranju kvarova ova komponenta može identificirati kao kritična. Uz ponavljajuće kvarove, propisan servis od strane

proizvođača za ovu komponentu iznosi 18 000 radnih sati. Prema tome, može se zaključiti da su se svi ponavljajući kvarovi ove komponente desili upravo prije nego je predviđen servis. Također, u razmatranju ovih kvarova dovodi se u pitanje pouzdanost komponente i razlozi njihovih nastajanja. Općenito, komponente koje su u interakciji s gorivom izložene su čestim kvarovima zbog sve veće prisutnosti lošeg goriva, a osim toga, tijekom eksploatacije pomorskih kontejnerskih brodova koji su izloženi velikim opterećenjima, pojavljuju se vibracije različitih amplituda i frekvencija koje mogu utjecati na rad ove komponente i prouzročiti kvar. Osim vibracija i lošeg goriva kvarovi mogu nastati i zbog lošeg materijala od kojeg je izrađena komponenta. Danas je sve veća prisutnost nekvalitetnih materijala u proizvodnji komponentata što rezultira jeftinijom cijenom njihove nabave, pa je sa strane brodarka ono itekako prihvaćeno jer su time manji troškovi održavanja, a u konačnici i ukupni operativni troškovi.

S time se može zaključiti da se u ovim kvarovima neki od navedenih razloga njihovog nastajanja svakako pojavljuju. Osim navedenih mogućih razloga nastanka ovih kvarova potrebno je dotaknuti se i održavanja. Održavanje se u ovom slučaju ne može proglasiti nepravilnim iz razloga što su se identificirali kvarovi prije propisanih sati servisa čija je vrijednost pojedinih kvarova bila poprilično niska kao što je primjer 43. do 68. kvara. To znači da je upravitelj stroja uočio i često provjeravao način njenog rada. Uz to, nije se zabilježila nezgoda u kojoj najveću prisutnost općenito ima ljudska pogreška, pa zatim kvar opreme ili stroja (Graf 11). Prema prethodno opisanom, može se reći da je iznimno dobro praćen rad komponente od strane upravitelja stroja ovog glavnog motora. Detaljnija razrada i prikaz dobivene baze podataka iz koje su se identificirali ovi kvarovi, te važnost značaja visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva glavnog motora WinGD/Wärtsilä-e 10 – X92 bit će opisana u sljedećem poglavlju. U razmatranju primjene dvoparametarske Weibull-ove distribucije ovi kvarovi pokazali su se relevantnijima u odnosu na preostale kvarove čiji se razlozi takvog načina pristupa njihovih razmatranja temelje na prethodno opisanim konstatacijama. U skladu s time, ovi kvarovi bit će primijenjeni u dvoparametarskoj Weibull-ovoj distribuciji koja će uključivati grafički prikaz funkcije intenziteta kvara i gustoće. S time će se omogućiti uvid u točan broj radnih sati na kojima su se najčešće dešavali kvarovi ove promatrane komponente, te će se na osnovu funkcije intenziteta kvara preporučiti način njenog održavanja kako bi se osigurala prevencija od nastanka potencijalnih nezgoda.

Svaka predstavljena komponenta na glavnom brodskom motoru (Slika 11) ima specifičnu ulogu koja pridonosi cjelokupnom radu, sigurnosti, učinkovitosti i dugovječnosti motora i broda koji pokreće. Zajedničkim radom one omogućuju učinkovito funkcioniranje motora, dajući potrebnu snagu za propulziju i pomoćne sustave. Njihovo ispravno funkcioniranje i održavanje ključni su za uspješan rad pomorskih kontejnerskih brodova, te je i provođenje ove analize kvarova pojedinih komponentata u skladu s time od velike važnosti. Kvarovi i neodržavanja na ovim komponentama mogu uzrokovati različite nezgode koje se ne odražavaju samo na gubitak broдача nego i na cjelokupni lanac opskrbe (poglavlje 4.3.3).

Ukratko, može se zaključiti da je pouzdanost komponentata glavnih motora na kontejnerskim brodovima isprepletena s funkcionalnošću i učinkovitošću globalnog opskrbnog lanca. Osiguravanje pouzdanog rada ovih komponentata glavnih motora kontejnerskih brodova pomaže u održavanju protoka robe, podržava poslovne operacije i pridonosi ukupnom uspjehu međunarodne trgovine i trgovine.

BROJ KVAROVA NA GLAVNIM MOTORIMA	RADNI SATI KVARA	
1	5680	
2	8293	
3	14353	
4	16890	
5	18988	
6	21496	
7	23268	
8	23296	
9	23296	
10	24042	
11	24042	
12	24048	
13	24049	
14	25464	
15	25992	
16	26029	
17	26044	
18	48220	
19	55863	
20	58760	
21	48665	
22	42912	
23	49315	
24	57476	
25	51048	
26	26664	
27	26684	
28	26744	
29	26744	
30	26772	
31	26894	
32	26894	
33	30099	
34	30139	
35	30370	
36	30876	
37	31325	
38	31365	
39	32297	
40	35783	
41	37612	
42	39022	
43	2892	
44	3281	
45	3866	
46	4326	
47	6577	
48	6949	
49	7155	
50	7411	
51	7710	
52	7822	
53	8384	
54	8694	
55	8835	
56	8925	
57	9058	
58	9095	
59	9100	
60	9122	
61	9214	
62	9261	
63	9670	
64	9711	
65	9825	
66	9838	
67	9978	
68	10093	
69	10397	
70	10410	
71	10516	
72	10703	
73	10845	
74	11193	
75	11587	
76	11715	
77	12043	
78	12320	
79	12841	
80	12908	
81	12951	
82	13196	
83	13350	
84	13500	
85	13804	
86	14193	
87	14259	
88	14383	
89	14395	
91	14489	
92	15171	
93	16348	
94	16488	
95	16538	
96	16802	
97	17147	
98	17392	
99	17801	

komponente glavnog motoraHyundai - MAN B&W-a 12K98 ME - C7 - TII (klipovi, ispušni ventili itd)

visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva glavnog motora WinGD/Wärtsilä-e 10 - X92

Slika 11. Broj ukupnih kvarova promatranih glavnih motora kontejnerskih brodova

#### 6.2.4. Analiza kvarova dizel – motora WinGD/Wärtsilä 10 – X92

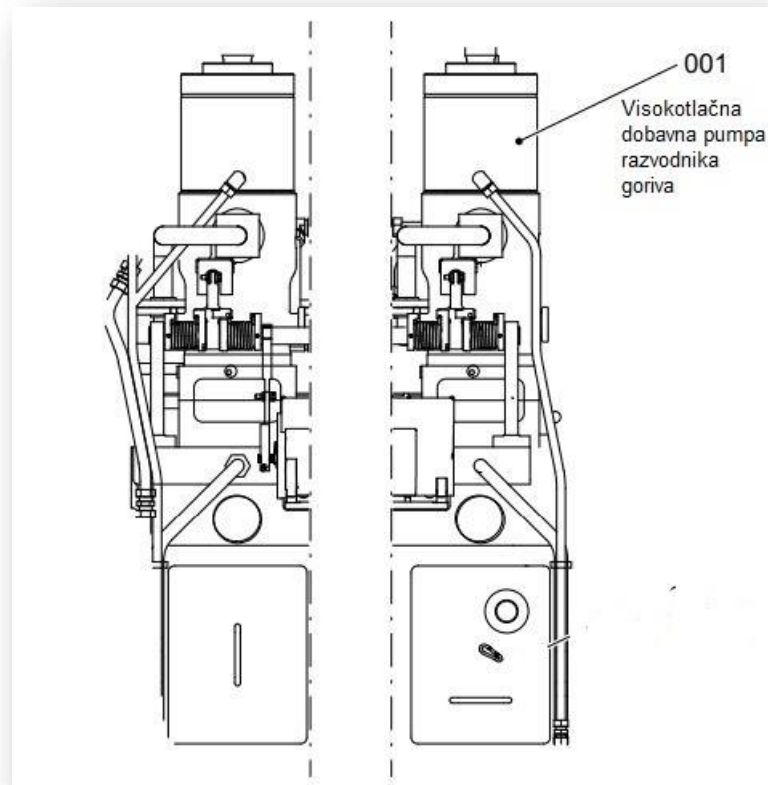
Kao najkritičnija komponenta glavnog motora WinGD/Wärtsilä-e 10 – X92 pojavljuje se visokotlačna dobavna pumpa razvodnika goriva (poglavlje 6.2.3.). Složeni tehnički sustav (glavni motor) koji posjeduje *common rail* sustav s visokotlačnom dobavnom pumpom razvodnika goriva (*engl. H/P fuel rail supply pump*), kao što je WinGD/Wärtsilä 10 – X92, prisutan je na novijim kontejnerskim brodovima starosti od pet do šest godina. Visokotlačna dobavna pumpa razvodnika goriva radi na način da dovodi gorivo pod visokim tlakom do razvodnika. Razvodnik goriva djeluje kao distribucijski razvodnik, povezujući se sa svakom pojedinačnom mlaznicom za gorivo koja izravno pod tlakom ubrizgava točnu količinu goriva cilindrima motora. To je dio sustava goriva koji osigurava pravilno i učinkovito izgaranje goriva u cilindrima motora, a njen rad uz prethodno navedene komponente može se detaljnije opisati na sljedeći način [39]:

1. Visokotlačna dobavna pumpa: odgovorna je za izvlačenje goriva iz brodskih spremnika goriva i dovod istog do visokotlačne cijevi za gorivo. Tlači gorivo na potrebnu razinu za učinkovito izgaranje u motoru.
2. Razvodnik goriva: je cijev koja dovodi gorivo pod tlakom od dobavne pumpe do mlaznica za gorivo. Dizajniran je da izdrži visoke pritiske kako bi se održao dosljedan protok goriva do mlaznica.
3. Mlaznice za gorivo: povezane su s razvodnikom goriva i odgovorne su za ubrizgavanje točnih količina goriva pod tlakom izravno u cilindre motora. Mlaznice za gorivo su elektronički kontrolirane i sinkronizirane s ciklusom izgaranja motora.
4. Učinkovito izgaranje: gorivo pod visokim pritiskom.

Opis rada *common rail* sustava kao i razna istraživanja na navedeno, može se pronaći u stručnim literaturama i znanstvenim radovima područja tehničkih znanosti pod engleskim nazivom *common rail system* [40], [41], [42], [43].

Slikom (12) prikazan je položaj visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva koja opskrbljuje razvodnik goriva s gorivom pod visokim tlakom. Važno je reći da ovaj proces pažljivo kontroliraju elektronički sustavi glavnog motora kako bi se osiguralo optimalno izgaranje, proizvodnja energije i učinkovitost [44].





**Slika 12.** Prikaz položaja visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva glavnog dizel – motora WinGD/Wärtsilä – X92, [44]

Visokotlačna dobavna pumpa razvodnika goriva bitan je dio sustava goriva (common rail sustav), a njezino pravilno funkcioniranje ključno je za pouzdan i učinkovit rad novijih generacija glavnih motora kontejnerskih brodova. Također, važno je napomenuti da je prema priručniku za upotrebu (*engl. operation manual*) glavnog motora WinGD/Wärtsilä-e – X92 navedena visokotlačna dobavna pumpa razvodnika goriva zapravo pumpa goriva. Stručniji naziv te pumpe goriva odnosi se na naziv visokotlačna dobavna pumpa razvodnika goriva (*engl. high pressure (H/P) fuel rail supply pump*) kojeg koristi tehnička služba održavanja.

Općenito, pumpe koje su u interakciji s gorivom na glavnim motorima, najviše stradaju (zavisi od izvedbe i tipa motora) zbog zamora materijala, loše kvalitete dijelova, lošeg sastavljanja, vibracija, sastava goriva, lošeg podmazivanja i sl. Kod razmatranja starijih i novijih generacija glavnih motora kontejnerskih brodova, kvarovi pumpi goriva, imaju različite „težine“ važnosti. Tako je primjerice njihova važnost potpuno drugačija kada se uzme u obzir npr. starija generacija glavnih motora i novija generacija glavnih motora. Kod starijih generacija glavnih motora proizvođača kao što je npr. Hyundai - MAN B&W 12K98 ME - C7 TII, svaka pumpa goriva (uvijek ih je

nekoliko) radi za sebe i za svoj cilindar. Novije generacije glavnih motora, kao što je npr. glavni motor proizvođača WinGD/Wärtsilä 10 – X92, sadrže visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva (pumpe goriva) koje rade po principu *common rail* sustava. U *common rail* sustavu, ako se dogodi kvar na jednoj od pumpi goriva (uvijek ih je nekoliko), preostale pumpe goriva "potrude" se da nadoknade taj nedostatak. Navedene razlike mogu se i detaljnije opisati na sljedeći način. Kada pumpa goriva (*engl. fuel booster unit*) na glavnom motoru Hyundai - MAN B&W 12K98 ME - C7 TII ne radi, to će rezultirati nefunkcionalnim jednim cilindrom. Svaka pumpa za gorivo dovodi gorivo pod visokim tlakom na zasebni razvodnik goriva, koji zatim putem ubrizgača (mlaznica) za gorivo ubrizgava gorivo u određeni cilindar glavnog motora. Kada dođe do otkaza u radu jedne pumpe za gorivo, jedan cilindar neće funkcionirati, što znači da će od 12 cilindara glavnog motora raditi samo 11. Uz svaki daljnji otkaz pumpe za gorivo, gubit će se po još jedan cilindar, što će rezultirati smanjenjem snage motora.

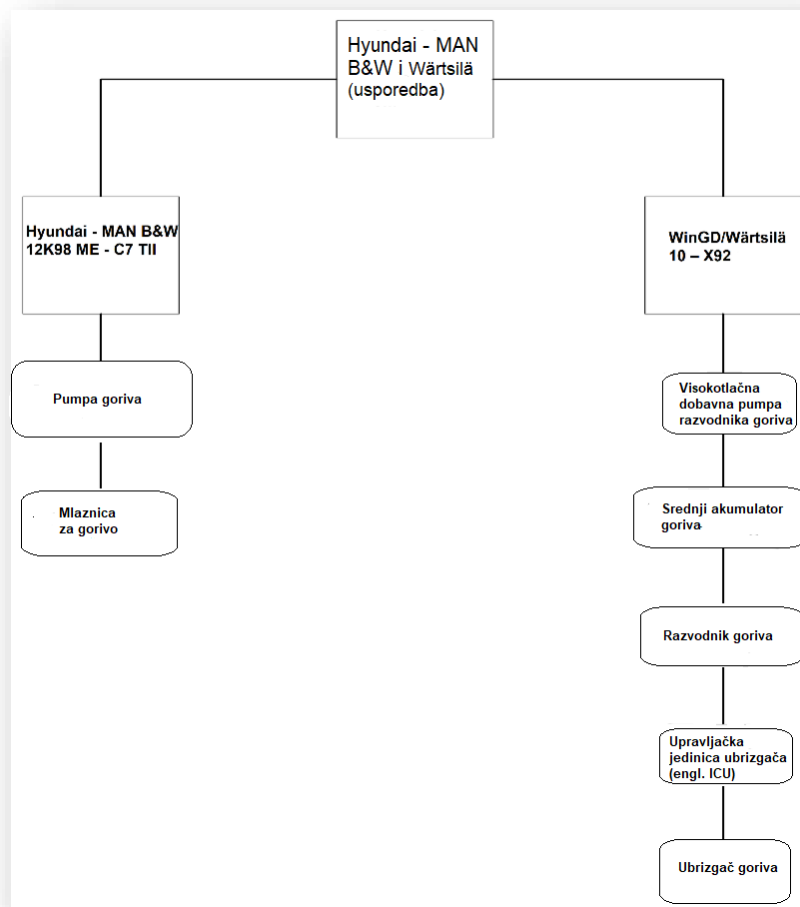
Kod glavnih motora npr. proizvođača WinGD/Wärtsilä-e 10 – X92, ostvaren je drugačiji način rada pumpi goriva. Ako dođe do kvara visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva, neće biti gubitka u radu cilindara. Sve visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva tlače gorivo pod visokim tlakom do jednog razvodnika goriva, koji zatim koristi ubrizgače za gorivo (*engl. injectors*) kako bi se gorivo ubrizgalo u sve cilindre motora. Ovo omogućava motoru da nastavi raditi sa svim cilindrima i bez gubitka snage, jer su na raspolaganju druge visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva koje zajedno osiguravaju kontinuiranu opskrbu gorivom. Ovaj prethodno navedeni opis važan je u razmatranju značaja kvarova koji su se identificirali na visokotlačno dobavnim pumpama razvodnika goriva novijeg glavnog motora WinGD/Wärtsilä-e 10 – X92 (poglavlje 6.2.3.), pa se može zaključiti da su identificirani kvarovi „manjeg“ utjecaja na daljnji tijek rada novije generacije glavnih motora kontejnerskih brodova.

Svaki otkaz pumpe, ima određene alarme koji se javljaju na alarmnom sustavu (*engl. alarm monitoring system*<sup>39</sup>), što opet vodi u dublju analizu i ne može se generalizirati. Dublja analiza zahtjeva praćenje određenog tipa motora njegove karakteristike, značajke, povezane funkcije njegovog djelovanja i načina rada. Slikom (13) prikazan je shematski primjer prethodno opisane općenite razlike pumpi goriva,

---

<sup>39</sup> Alarmni sustav koji se koristi za nadzor funkcija na brodu, kao što su motori, generatori i drugi sustavi.

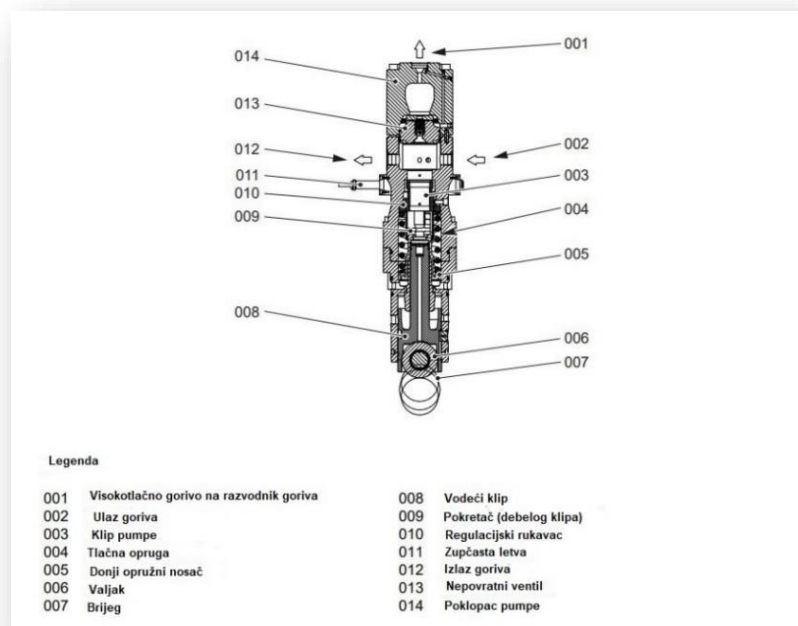
odnosno odraza utjecaja kvarova pumpi goriva koje vežu nadolazeće komponente dvaju različitih proizvođača.



**Slika 13.** Primjer redoslijeda komponenata poslije pumpi goriva za dva različita motora

Slikom (14) prikazane su pojedinačne komponente visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva, a njihov rad može se opisati na sljedeći način. Kada brijeg (007) pomiče valjak (006) prema gore, klip za vođenje (008) također se pomiče prema gore, zatim donji nosač opruge (005) sabija kompresijsku oprugu (004). Pumpa klipa (003) tada se pomiče prema gore gdje kontrolni utori u klipu pumpe (003) kontroliraju količinu goriva. Kada se zupčasta letva (011) pomiče, zupci zahvaćaju zupce na regulacijskoj čahuri (010), s čime se okreće regulacijski rukavac. Regulacijska čahura (010) okreće pokretač (009) i na taj način klip pumpe (003). Količina goriva koja ulazi u komoru klipa povezana je s kontrolom položaja (između 0 za nultu opskrbu i 10 za maksimalnu opskrbu). Nakon toga, tim prethodno opisanim radnim procesima stvori se mogućnost da pumpa goriva opskrbi gorivom pod visokim tlakom razvodnik goriva (001). Zatim, putem visokotlačne cijevi za gorivo, razvodnik goriva opskrbljuje

mlaznice gorivom, gdje one u konačnici dovode gorivo do cilindra motora. Kada se razmatraju kvarovi na navedenoj pumpi goriva (poglavlje 6.2.3.), važno je naglasiti da se ona sastoji od više komponenata (Slika 14), pa se stoga ne može govoriti o kvaru cjelokupne pumpe goriva, već o kvaru njenih pojedinih komponenata. Tako se primjerice kvar ove pumpe goriva može predstaviti kao kvar klipa pumpe goriva koji se ne može pomicati ili kao kvar puknuća visokotlačne cijevi za gorivo (između pumpe goriva i razvodnika goriva). Prema tome, pojedine komponente na kojima se dogodi kvar mogu uzrokovati prestanak rada cjelokupne pumpe goriva, te ako ne postoji adekvatno održavanje moguć je nastanak i većih nezgoda. Zbog toga općenito, kada nastane kvar na visokotlačno dobavnoj pumpi razvodnika goriva, kvar se mora odmah popraviti, a u slučaju da popravak nije moguć moguće je isključiti nepopravljivu pumpu za gorivo.



**Slika 14.** Prikaz presjeka visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva i njenih elemenata, [44]

Slikom (15) prikazana je baza podataka tehničke službe održavanja glavnog motora WinGD/Wärtsilä-e 10 – X92 iz koje su se identificirani kvarovi visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva (poglavlje 6.2.2.). Na Slici (15) pod nazivom komponenta može se uočiti, da glavni motor (*engl. main engine u skraćenicu ME*) ima osam (No 1,2,3..8) visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva, od kojih se dvije mogu isključiti ukoliko se ne uviđa potreba njihovog rada, pa će tako umjesto osam raditi šest visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva. Tu odluku donosi upravitelj

stroja, koji je odgovoran za cjelokupni rad stroja (glavnog motora), s obzirom na zahtjeve koji utječu na odluku rada svih ili nekoliko visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva. Uobičajeni zahtjevi odnose se na zahtjeve od strane broдача i tržišta kao što su npr. očekivana vremena stizanja u luke ukrcaja i luke iskrcaja. Naravno, glavni motor nikada neće konstantno raditi na svom najvećem broju okretaja gdje bi postojala mogućnost odluke rada svih visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva zbog velike potrošnje goriva koja utječe na operativne troškove broда. U praksi se uvijek tijekom eksploatacije broда nastoji postići optimalna brzina plovidbe broда kako bi potrošnja goriva bila prihvatljiva za broдача i za zahtjeve tržišta.

Radni se sati visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva upisuju u dnevnik stroja vođenog od strane upravitelja stroja (glavnog motora), koji tehničkoj službi održavanja omogućuje uvid u nastanak kvarova. Iz priložene Slike (15) baza podataka tehničke službe održavanja sadrži; naziv komponente, radne sate intervala ponovnog servisa, radne sate ponovnog, prvog i zadnjeg servisa, te ukupan broj radnih sati na dan popunjavanja. Prema tim prethodno navedenim elementima i Slici (15) omogućuje se utvrđivanje kvarova prema intervalu ponovnog servisa, ponovnog, prvog i zadnjeg servisa, na određenoj komponenti kao što je iz priložene Slike (15) visokotlačna dobavna pumpa razvodnika goriva. Kvarovi se identificiraju na način da se uzimaju u obzir radni sati ponovnog intervala servisa koji je propisan od strane proizvođača, te radni sati ponovnog, prvog i zadnjeg servisa. Iznimno su važni radni sati intervala ponovnog servisa propisanog od strane proizvođača u razmatranju kvarova koji ujedino predstavljaju i obavljanje općenitog servisa kojeg je potrebno provesti na komponenti. Za visokotlačnu dobavnu pumpu goriva ovaj interval iznosi 18 000 radnih sati (Slika 15). Tijekom analize ove priložene baze podataka uočili su se ponavljajući kvarovi na navedenoj komponenti koji su se desili prije intervala propisanog servisa od strane proizvođača. Takvi kvarovi iznimno su važni jer oni zapravo ukazuju na pouzdanost ove komponente koja je ključna za rad glavnog motora WinGD/Wärtsilä-e 10 – X92. Osim toga iz Slike (15), može se vidjeti da su se visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva odnosno njihove komponente kvarile i po čak dva puta (4. i 8.). Međutim, točan broj radnih sati na kojima su se desili kvarovi iz priložene Slike (15) ne može se vidjeti, te ih je potrebno izračunati što će biti prikazano daljnjem tekstu.

Naziv komponente	Radni sati intervala ponovnog servisa	Radni sati intervala ponovnog servisa	Radni sati prvog servisa	Radni sati zadnjeg servisa	Ukupni broj radnih sati na dan popunjavanja
M/E NO.01 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	39805	18000	0	21807	29692
M/E NO.02 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	44878	18000	0	26878	29692
M/E NO.03 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	43589	18000	9058	25589	29692
M/E NO.04 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	23743	18000	2892	0	29692
M/E NO.05 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	43590	18000	0	25590	29692
M/E NO.06 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	40196	18000	0	22196	29692
M/E NO.07 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	37462	18000	0	19462	29692
M/E NO.08 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	34296	18000	0	16296	29692
Naziv komponente	Radni sati intervala ponovnog servisa	Radni sati intervala ponovnog servisa	Radni sati prvog servisa	Radni sati zadnjeg servisa	Ukupni broj radnih sati na dan popunjavanja
M/E NO.01 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	39805	18000	6949	24807	34736
M/E NO.02 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	44878	18000	3866	21741	34736
M/E NO.03 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	43589	18000	9825	19198	34736
M/E NO.04 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	23743	18000	9095	23159	34736
M/E NO.05 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	43590	18000	9214	27165	34736
M/E NO.06 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	40196	18000	9261	27306	34736
M/E NO.07 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	37462	18000	12908	21617	34736
M/E NO.08 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	34296	18000	3281	20673 - 21511	34736
Naziv komponente	Radni sati intervala ponovnog servisa	Radni sati intervala ponovnog servisa	Radni sati prvog servisa	Radni sati zadnjeg servisa	Ukupni broj radnih sati na dan popunjavanja
M/E NO.01 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	39805	18000	0	16645	34231
M/E NO.02 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	44878	18000	0	16229	34231
M/E NO.03 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	43589	18000	0	16242	34231
M/E NO.04 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	23743	18000	10845/18199	29423	34231
M/E NO.05 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	43590	18000	0	18853	34231
M/E NO.06 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	40196	18000	0	12303	34231
M/E NO.07 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	37462	18000	0	16645	34231
M/E NO.08 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	34296	18000	0	16291	34231
Naziv komponente	Radni sati intervala ponovnog servisa	Radni sati intervala ponovnog servisa	Radni sati prvog servisa	Radni sati zadnjeg servisa	Ukupni broj radnih sati na dan popunjavanja
M/E NO.01 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	39805	18000	0	31674	32749
M/E NO.02 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	44878	18000	0	23680	32749
M/E NO.03 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	43589	18000	0	23680	32749
M/E NO.04 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	23743	18000	10703	28589	32749
M/E NO.05 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	43590	18000	0	28589	32749
M/E NO.06 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	40196	18000	0	28589	32749
M/E NO.07 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	37462	18000	0	27616	32749
M/E NO.08 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	34296	18000	0	24413	32749
Naziv komponente	Radni sati intervala ponovnog servisa	Radni sati intervala ponovnog servisa	Radni sati prvog servisa	Radni sati zadnjeg servisa	Ukupni broj radnih sati na dan popunjavanja
M/E NO.01 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	39805	18000	0	26162	34579
M/E NO.02 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	44878	18000	0	26289	34579
M/E NO.03 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	43589	18000	0	21605	34579
M/E NO.04 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	23743	18000	0	23049	34579
M/E NO.05 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	43590	18000	0	19512	34579
M/E NO.06 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	40196	18000	0	23957	34579
M/E NO.07 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	37462	18000	0	24285	34579
M/E NO.08 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	34296	18000	25590	25907	34579
Naziv komponente	Radni sati intervala ponovnog servisa	Radni sati intervala ponovnog servisa	Radni sati prvog servisa	Radni sati zadnjeg servisa	Ukupni broj radnih sati na dan popunjavanja
M/E NO.01 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	39805	18000	16348	26022	21458
M/E NO.02 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	44878	18000	10397	25484	21458
M/E NO.03 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	43589	18000	8925	22500	21458
M/E NO.04 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	23743	18000	9100	22500	21458
M/E NO.05 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	43590	18000	15171	28290	21458
M/E NO.06 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	40196	18000	9670	22650	21458
M/E NO.07 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	37462	18000	13196	22650	21458
M/E NO.08 VISOKOTLAČNA DOBAVNA PUMPA RAZVODNIKA GORIVA	34296	18000	15171	28178	21458

Slika 15. Prikaz prikupljenih podataka visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva

Kvarovi na pojedinim komponentama visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva (Slika 14.), kao što je prethodno navedeno, ne mogu se direktno uočiti sa Slike (15) već je potrebno izračunati kvar na točnom radnom satu. Prema tome, Tablicom (6) prikazani su izračunati radni satovi kvarova visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva koji se temelje na prethodno opisanoj bazi podataka. Također, oni su poredani od najmanjeg do najvećeg izvršenog radnog sata na kojem je identificiran kvar zbog jednostavnije upotrebe dvoparametarske Weibull-ove distribucije. Kao što je već prethodno opisan razlog primjene dvoparametarske Weibull-ove distribucije na ove identificirane kvarove (poglavlje 6.2.3.), potrebno je i u skladu s tim prikazati dobivene rezultate. Rezultati primjene dvoparametarske Weibull-ove distribucije detaljnije će se opisati i prikazati u sedmom poglavlju.

**Tablica 6.** Prikaz broja kvarova koji su se desili na pojedinim radnim satima kod komponenata visokotlačne dovodne pumpe razvodnika goriva

Broj kvarova komponenata visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva	Broj radnih sati kvara
1	2892
2	3281
3	3866
4	4326
5	6577
6	6949
7	7155
8	7411
9	7710
10	7822
11	8384
12	8694
13	8835
14	8925
15	9058
16.	9095
17	9100
26	10093
27	10397
28	10410
29	10516
30	10703
31	10845
32	11193
33	11587
34	11715
35	12043
36	12320
37	12841
38	12908
39	12951
40	13196
41	13350
42	13500
43	13804
44	14193
45	14259
46	14383
47	14395
48	14489
49	15171
50	16348
51	16488
52	16538
53	16802
54	17147
55	17392
56	17801

Zaključno, može se reći da se prikazanim radnim satima uviđaju ponavljajući kvarovi na visokotlačno dobavnim pumpama razvodnika goriva glavnog motora WinGD/Wärtsilä-e 10 – X92, te je njihov udio kvara u ukupnom broju radnih sati prikazanih kvarova (Slika 11) 32 %. Predstavljeni postotak kvarova u promatranju visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva kao cjeline, govori o iznimno velikom prisustvu njihovih kvarova s obzirom na kvarove ostalih promatranih komponenata. Osim toga, ti kvarovi bili su većeg broja ponavljajući, te su se dešavali i prije intervala propisanog servisa od strane proizvođača (Tablica 6), pa se u skladu s time donijela



odluka njihovog korištenja u primjeni dvoparametarske Weibull-ove distribucije. Dvoparametarska Weibull-ova distribucija omogućuje prikaz funkcija pouzdanosti, nepouzdanosti gustoće i intenziteta otkaza koje će s prikazanim kvarovima ove navedene komponente (Tablica 6) biti opisane u sljedećem poglavlju. Prije prikaza ovih funkcija potrebno je obrazložiti načine njihovih tumačenja koji su različiti s aspekta promatranog kvara i otkaza. Naime, kada se analiziraju kvarovi pojedinih komponenata glavnih motora kontejnerskih brodova, važno je razumjeti razliku između otkaza i kvara. Ova razlika je posebno značajna zbog toga što se složeni tehnički sustav, kao što je glavni motor, smatra popravljivim sustavom. U takvim situacijama, terminologija se često mijenja, a umjesto izraza "otkaz" koristi se izraz "kvar". Funkcija intenziteta otkaza i funkcija intenziteta kvara imaju istu osnovnu koncepciju i koriste se za analizu pouzdanosti. Oba koncepta opisuju brzinu kvarova ili otkaza u sustavu u određenom trenutku  $t$ . U stručnijim tehničkim područjima razmatranja kvarova glavnih motora brodova, kao što je brodstrojarstvo, funkcija intenziteta kvara često se koristi kao zajednički naziv za oba pojma kako bi se osigurala dosljednost u analizi pouzdanosti različitih tehničkih sustava. U ovoj analizi, koristit će se naziv funkcija intenziteta otkaza kako je definirano u Weibull-ovoj distribuciji što će omogućiti dosljednost u pristupu analizi pouzdanosti unatoč promjenjivoj terminologiji i olakšati modeliranje u kontekstu složenih tehničkih sustava kao što su brodski motori.

## 7. PRIMJENA WEIBULL-OVE DISTRIBUCIJE I MARKOVLJEVIH MODELA U ODRŽAVANJU GLAVNOG BRODSKOG MOTORA

U ovom poglavlju prikazat će se rezultati istraživanja primjenom Weibull-ove distribucije i postavljenim Markovljevim modelom uzimajući u obzir kvarove na visokotlačnim dobavnim pumpama razvodnika goriva glavnog motora WinGD/Wärtsilä-e 10 – X92 (poglavlje 6.2.4.). Markovljev model i Weibull-ova distribucija ključni su za bolju integraciju u ukupni kontekst istraživanja, te jasnije postavljanje u cjelokupni kontekst rezultata istraživanja. Uz prikaz primjene skrivenog Markovljevog lanaca, upoznat će se s njegovim osnovnim svojstvima koja će biti izražena parametrima Weibull-ove distribucije, a koji se mogu povezati s modelom održavanja glavnog brodskeg motora kako bi se prevenirali kvarovi.

### *7.1. Modeliranje pouzdanosti kroz dvoparametarski Weibull-ov model*

Važnost Weibull-ove distribucije opisana je u poglavlju 6.1., te će se njena primjena kao alata u inženjerstvu koristiti u obradi statističkih podataka promatranih kvarova komponenata visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva glavnog motora kontejnerskog broda (Tablica 6). Prije samog razmatranja njene upotrebe potrebno je bilo prikupljanje, strukturiranje, analiziranje, interpretacija i prezentacija rezultata analize u numeričkom obliku. Dobiveni rezultati su informacije koje su u domeni statističkih analiza zasnovanih na prikupljanju podataka i to mjerenjem tj. praćenjem. U slučaju potrebne procjene samih parametara Weibull-ovog modela, koristi se MS Excel. U daljnjem tekstu, detaljno će se opisati modeliranje pouzdanosti kroz dvo - parametarski Weibull-ov model i interpretirat će se podatci, te će se izvesti formula intenziteta otkaza  $\lambda(t)$  primijenjena u analizi obrade statističkih podataka.

Funkcija intenziteta otkaza  $\lambda(t)$  je specifična funkcija koja temeljem podataka o otkazima prikazuje vjerojatnost otkaza u trenutku  $t + \Delta t$ . Matematički ova funkcija se može izraziti pomoću sljedećeg obrasca:

$$p(t + \Delta t) = \lambda(t) * \Delta t \quad (17)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $P(t + \Delta t)$  - vjerojatnost da će se događaj otkaza dogoditi u trenutku  $t + \Delta t$  (uvjetna vjerojatnost),

- $\lambda(t)$  - intenzitet otkaza u trenutku  $t$ ,
- $\Delta t$  - vremenski interval.

Predstavljenim prethodnim matematičkim izrazom važno je naglasiti da se radi o uvjetnoj vjerojatnosti koja je opisana intenzitetom otkaza. Vjerojatnost da će element otkazati u razdoblju  $(t, t + \Delta t)$  pod uvjetom da je element bio ispravan tj. da nije otkazao do vremena  $t$ , može se dobiti koristeći se sljedećom formulom za izračun uvjetne vjerojatnosti za dva događaja [45]:

$$p(A|B) = \frac{p(A \cap B)}{p(B)} \quad (18)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $p(A|B)$  – uvjetna vjerojatnost; vjerojatnost događaja  $A$  s obzirom da se događaj  $B$  već dogodio,
- $p(A \cap B)$  – zajednička vjerojatnost događaja  $A$  i  $B$ ; vjerojatnost da se dogode oba događaja  $A$  i  $B$ ,
- $p(B)$  - vjerojatnost događaja  $B$ .

Osim navedenog, događaj  $A$  predstavlja otkaz do vremena  $(t + \Delta t)$ , a događaj  $B$  da element nije otkazao do vremena  $t$ . Nadalje, vjerojatnost da element nije otkazao do vremena  $t$  (događaj  $B$ ), tj. vjerojatnost da je vrijeme otkaza  $T$  veće od vremena  $t$  može se izraziti sljedećim matematičkim izrazom:

$$p(T > t) = R(t) \quad (19)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $p(T > t)$  - vjerojatnost da će vrijeme otkaza ( $T$ ) biti veće od trenutka  $t$
- $R(t)$  - vjerojatnost da element nije doživio otkaz do trenutka  $t$

S prethodno navedenim, potrebno je opisati i vjerojatnost  $R(t)$ . Vjerojatnost  $R(t)$  da element nije otkazao do vremena  $t$  (da je vrijeme otkaza  $T > t$ ), te vjerojatnost  $F(t + \Delta t)$  da je element otkazao u vremenu  $t + \Delta t$  jednaka je vjerojatnosti događaju otkaza u vremenskom intervalu  $(t, t + \Delta t)$ , te je ta vjerojatnost događaja jednaka i može se matematički izraziti u sljedećem obliku:

$$p(A \cap B) = p(t < T \leq t + \Delta t) = F(t + \Delta t) - F(t) \quad (20)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $p(A \cap B)$  - vjerojatnost da će se otkaz dogoditi nakon trenutka  $t$ , ali unutar vremenskog intervala  $(t, t + \Delta t)$
- $p(t < T \leq t + \Delta t)$  - vjerojatnost da će vrijeme otkaza ( $T$ ) biti veće od  $t$  i manje ili jednako  $t + \Delta t$
- $F(t + \Delta t)$  - kumulativna distribucijska funkcija (CDF) za vrijeme otkaza ( $T$ ) u trenutku  $t + \Delta t$
- $F(t)$  - kumulativna distribucijska funkcija za vrijeme otkaza ( $T$ ) u trenutku  $t$
- $F(t + \Delta t) - F(t)$  - razlika između vjerojatnosti da će se otkaz dogoditi unutar vremenskog intervala  $(t, t + \Delta t)$  i vjerojatnosti da će se otkaz dogoditi prije trenutka  $t$

Koristeći se prethodnim navedenim i pojašnjenim izrazima za uvjetnu vjerojatnost, sada se može prikazati sljedeći matematički izraz za izračun vjerojatnosti da će element otkazati u razdoblju  $(t, t + \Delta t)$  pod uvjetom da je element bio ispravan (tj. da nije otkazao) do vremena  $t$ :

$$p(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} = \frac{\Delta F(t)}{R(t)} \quad (21)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $p(t < T \leq t + \Delta t | T > t)$  - uvjetna vjerojatnost otkaza u vremenskom intervalu  $(t, t + \Delta t)$ , ali pod uvjetom da je element ostao ispravan do trenutka  $t$
- $F(t + \Delta t) - F(t)$  - razlika između vjerojatnosti da će se otkaz dogoditi unutar vremenskog intervala  $(t, t + \Delta t)$  i vjerojatnosti da će se otkaz dogoditi prije trenutka  $t$
- $R(t)$  - vjerojatnost da element nije doživio otkaz do trenutka  $t$
- $\Delta F(t)$  - promjena vrijednosti CDF-a za vrijeme otkaza ( $T$ ) između trenutka  $(t, t + \Delta t)$

Ako gornji izraz podijelimo s  $\Delta t$  i dopustimo da  $\Delta t \rightarrow 0$  dobit će se sljedeća matematička funkcija intenziteta otkaza  $\lambda(t)$  (*engl. failure rate function*):

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta F(t)}{\Delta t} \frac{1}{R(t)} = \frac{dF(t)}{dt} \frac{1}{R(t)} \quad (22)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $\lambda(t)$  – intenzitet otkaza u trenutku  $t$
- $\Delta F(t)$  - promjena vrijednosti CDF-a za vrijeme otkaza ( $T$ ) između trenutka ( $t$ ,  $t + \Delta t$ )
- $\Delta t$  - vremenski interval
- $R(t)$  - vjerojatnost da element nije doživio otkaz do trenutka  $t$ .

Ako znamo da je funkcija gustoće otkaza derivacija funkcije nepouzdanosti koja ima sljedeći izraz:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (23)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $f(t)$  – gustoća otkaza,
- $F(t)$  – distribucijska funkcija,
- $t$  – vrijeme za koje se proučava vjerojatnost da će se događaj otkaza dogoditi prije ili upravo u trenutku  $t$ .

dolazi se do sljedećih matematičkih izraza i konačne formule intenziteta otkaza  $\lambda(t)$ :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (24),$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{dF(t)}{dt}}{R(t)} \quad (25)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $\lambda(t)$  – intenzitet otkaza u trenutku  $t$ ,
- $f(t)$  – funkcija gustoće otkaza u trenutku  $t$ ,
- $F(t)$  – distribucijska funkcija u trenutku  $t$ ,
- $R(t)$  - vjerojatnost da element nije doživio otkaz do trenutka  $t$ .

Koristeći se prethodno definiranim matematičkim izrazom, intenzitet otkaza može se i statistički odrediti praćenjem elementa u eksploataciji. U izračunu su, temeljem prikupljenih podataka (poglavlje 6.2.4) na početku eksploatacije ( $t = 0$ ) podatci o  $n = 56$  visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva i njihovim vremenima otkaza. Ono što je uzeto u obzir je da je do vremena  $t$  otkazalo  $N(t)$  pumpi, a  $n(t)$  je ukupan broj ispravnih elemenata do trenutka  $t$ . Temeljem tako strukturiranih podataka izračunata je funkcija gustoće otkaza prema sljedećoj matematičkoj formuli u kojem  $\Delta t$  predstavlja trajanje vremenskog intervala u kojem se promatraju otkazi, a s  $N(\Delta t)$  je označen broj visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva koje su otkazale u intervalu  $\Delta t$ :

$$\lambda(t) = \frac{\frac{N(\Delta t)}{n \cdot \Delta t}}{\frac{n(t)}{n}} = \frac{N(\Delta t)}{n(t) \cdot \Delta t} \quad (26)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $\lambda(t)$  - intenzitet otkaza do trenutka  $t$ ,
- $N(\Delta t)$  – broj otkazanih elemenata,
- $\Delta t$  – interval,
- $n(t)$  – ukupan broj ispravnih elemenata do trenutka  $t$ ,
- $n$  – broj elemenata.

Funkcija intenziteta otkaza  $\lambda(t)$ , (*engl hazard function*), iako nije vjerojatnost predstavlja značajnu funkciju kojom se može opisati životni vijek visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva i uočiti njihov rad u eksploataciji naspram otkaza. Pomoću nje se mogu izračunavati i uvjetne vjerojatnosti otkaza (kvara) u svakom trenutku eksploatacije koja se može izraziti pomoću sljedećeg matematičkog izraza:

$$p(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = \lambda(t) \cdot \Delta t \quad (27)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $p(t < T \leq t + \Delta t | T > t)$  - uvjetna vjerojatnost otkaza u vremenskom intervalu ( $t$ ,  $t + \Delta t$ ), ali pod uvjetom da je element ostao ispravan do trenutka  $t$ ,
- $\lambda(t)$  - intenzitet otkaza do trenutka  $t$ ,

- $\Delta t$  – interval.

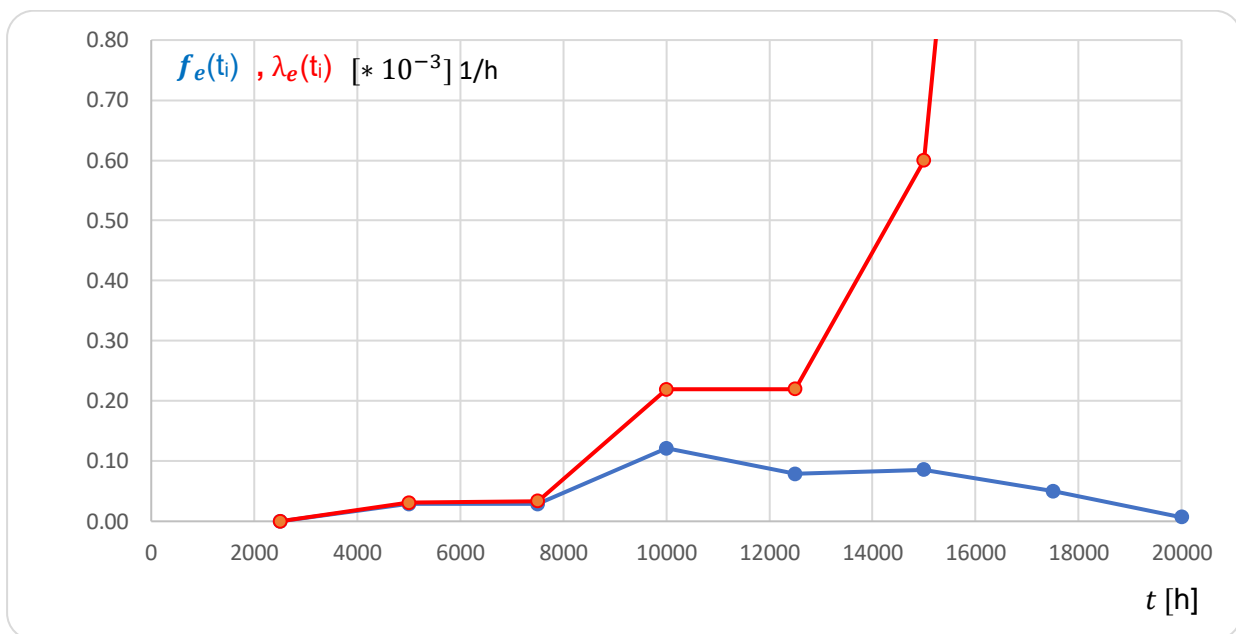
U daljnjem tekstu, Slikom (16) prikazani su parametri izvedeni iz prethodno navedenih formula koji su potrebni za izračun vjerojatnosti pojave kvara ( $F_e(t)$ ), vjerojatnosti bez kvara ( $R(t)$ ), gustoće vjerojatnosti pojave kvara ( $f_e(t)$ ) i intenzitet kvarova ( $\lambda(t)$ ). Slika (16) također prikazuje kako se ovi parametri izračunavaju koristeći podatke radnih sati kvarova visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva (Tablica 6).

Broj promatranih elemenata:		56									
POKAZATELJI	Formula	INTERVALI RADA									
		1.	2.	3.	4.	5.	6.				
Širina intervala $\Delta t$	$\frac{t_{max} - t_{min}}{1 + 3,3 * \log n}$	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	
Granice intervala [10 <sup>3</sup> km]	od do	0 2500	2500 5000	5000 7500	7500 10000	10000 12500	12500 15000	15000 17500	17500 20000		
Sredina intervala	$t_i$	1250	3750	6250	8750	11250	13750	16250	18750		
Broj otkaza u intervalu	$n_1(t) - n_1(t-\Delta t)$	0	4	4	17	11	12	7	1		
Broj otkaza do intervalu $t_i$ ; $N(t_i)$	$\sum_{k=0}^i N(t_k)$	0	4	8	25	36	48	55	56		
Ukupan broj ispravnih elemen. u tren. $n(t_i)$	$n - n_1(t)$	56	52	48	31	20	8	1	0		
Srednji broj elemen. u intervalu; $\bar{n}(t_i)$	$\frac{n_1(t) + n_1(t - \Delta t)}{2}$	28	54	50	39,5	25,5	14	4,5	0,5		
Vjerojatnost pojave otkaza; $F_e(t)$	$\frac{n_1(t_i)}{n}$	0,00	0,07	0,14	0,45	0,64	0,86	0,98	1,00		
Vjerojatnost bezotkaznog rada; $R_e(t)$	$\frac{n_2(t_i)}{n}$	1,00	0,93	0,86	0,55	0,36	0,14	0,02	0,00		
Gustoća vjerojatnosti pojave otkaza; $f_e(t)$ [10 <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ]	$\frac{n_1(t) - n_1(t - \Delta t)}{n \cdot \Delta t}$	0,00000000	0,02857143	0,02857143	0,12142857	0,07857143	0,08571429	0,05000000	0,00714286		
Intenzitet otkaza; $\lambda_e(t)$ [*10 <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ]	$\frac{f_e(t_i)}{R_e(t_i)}$	0,00000000	0,03076923	0,03333333	0,21935484	0,22000000	0,60000000	2,80000000	+ ∞		
Intenzitet otkaza; $\lambda_e(t)$ [h <sup>-1</sup> ]	$\frac{N(\Delta t)}{n_1(t) * \Delta t}$	0,00000000	0,00003077	0,00003333	0,00021935	0,00022000	0,00060000	0,00280000	+ ∞		

**Slika 16.** Prikaz korištenih formula u analizi kvarova visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva

Prema prikazanim podacima iz Slike (16), generira se Graf (16) koji prikazuje funkciju gustoće  $f(t)$  i intenziteta otkaza  $\lambda(t)$  visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva. Funkcija intenziteta otkaza ( $\lambda(t)$ ) omogućuje uvid u promjene vjerojatnosti otkaza tijekom vremena, tj. koliko često se može očekivati da će se otkazi dogoditi u različitim trenucima. Graf (16) pokazuje da funkcija intenziteta otkaza prati funkciju gustoće otkaza do 10 000 radnih sati, te počinje rasti nakon 12 000 radnih sati, što ukazuje na povećanu vjerojatnost otkaza visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva nakon tog radnog vijeka. S druge strane, funkcija gustoće otkaza ( $f(t)$ ) pruža informacije o vjerojatnosti otkaza u odnosu na vremenski interval. Iz Grafa (16) može se primijetiti da gustoća otkaza visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva raste nakon 8000 radnih sati, te doseže svoj vrhunac na 10 000 radnih sati, nakon čega

počinje varirati i konačno opadati. Najviša gustoća otkaza na 10 000 radnih sati znači da je u tom vremenskom intervalu vjerojatnost otkaza najveća u usporedbi s drugim vremenima. Međutim, to ne znači da će se u tom trenutku dogoditi najveći broj otkaza, već da će vjerojatnost pojedinačnog otkaza biti najviša. Nakon što se dosegao taj vrhunac na 10 000 radnih sati, funkcija gustoće otkaza počinje varirati i opadati, što ukazuje na smanjenje vjerojatnosti otkaza u kasnijim vremenima.



**Graf 16.** Funkcija gustoće  $f(t)$  i intenzitet otkaza  $\lambda(t)$  visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva

Kako različiti sustavi i elementi tijekom eksploatacije imaju različit intenzitet otkaza, te se njihov životni vijek u odnosu na zastoje može prikazati različitim grafovima od padajućih konstantnih do rastućih tako oni u različitim fazama eksploatacije mogu poprimiti različite oblike pa i sve od navedenih tipova grafova. Stoga je za njihovo opisivanje korištena Weibull-ova distribucija koja udovoljava svim oblicima grafova za modeliranje podataka o pouzdanosti.

Za modeliranje vremena ili intervala do otkaza s prikupljenim podacima (empirijski podatci) primjenjuje se dvoparametarska Weibull-ova funkcija koja može dobro interpretirati podatke o pouzdanosti, a parametri dobivene Weibull-ove distribucije postaju dobar pokazatelj stanja sustava ili elementa te mogu kvantitativno aproksimirati suštinski različite intenzitete otkaza. Tablicom 7 prikazane su izračunate vrijednosti dvoparametarske Weibull-ove distribucije gdje parametar oblika ( $\beta$ ) iznosi 3.15, a parametar skale ( $\alpha$ ) 12 360.24.

**Tablica 7.** Numerički prikaz parametra oblika i parametra skale



Parametar oblika ( $\beta$ ) (engl. <i>Shape Parameter</i> )	3.15
Parametar skale ( $\alpha$ )- (engl. <i>Scale Parameter</i> )	12360.24

Ove prikazane vrijednosti iz tablice (7) koriste se u dvoparametarskoj Weibull-ovoj distribuciji kako bi se modeliralo vremensko ponašanje otkaza visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva. Parametar oblika ( $\beta$ ) od 3.15 ukazuje na rastući rep distribucije, dok parametar skale ( $\alpha$ ) od 12 360.24 određuje brzinu širenja distribucije. Vrijednost parametra oblika ( $\beta$ ) od 3.15 ukazuje na to da je oblik Weibull-ove distribucije s rastućim repom, što znači da su kvarovi rjeđi u ranim fazama rada visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva, te postaju češći s vremenom. Parametrom skale  $\alpha$  s 12 360.24, znači da se otkazi visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva događaju relativno brzo, budući da treba relativno malo vremena da se postigne visoka vjerojatnost otkaza. Te vrijednosti koriste se za stvaranje Weibull-ova Grafa (17) da bi se vizualiziralo kako se stvarni podaci podudaraju s Weibull-ovom distribucijom i kako se događaji raspoređuju tijekom vremena.

Metoda izvođenja formule (26) za funkciju intenziteta otkaza uzima u obzir da je  $N(t)$  visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva doveden do kvara i daje predodžbu očekivanog broja koji će otkazati u intervalu  $(t, t + dt)$ , te se može se dobiti s vrijednošću  $n \cdot \lambda(t)dt$ . Dok broj pumpi za koji se očekuje da će biti ispravne nakon vremena  $t$  je  $n \cdot R(t)$ . Za dovoljno veliki  $n$ , omjer očekivanog broja koji se kvare u  $(t, t + dt)$  i broja koji još uvijek funkcionira u trenutku  $t$  konvergiraće do vjerojatnosti kvara u tom intervalu  $\lambda(t)dt$ . Pred toga izračunom parametara Weibull-ove distribucije (Tablica 7) iz empirijskih podataka o otkazima (Tablica 6) omogućen je i izračun srednjeg vremena do otkaza  $E(T)$  uvažavajući funkciju intenziteta otkaza visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva glavnog broskog motora koji je u eksploataciji, s sljedećim matematičkim izrazom:

$$E(T) = \alpha * \Gamma\left(\frac{1}{\beta}+1\right) \quad (28)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $E(T)$  – srednje vrijeme do otkaza,
- $\alpha$  – parametar skale,
- $\beta$  – parametar oblika,
- $\Gamma$  – gama.

te se u konačnici dobiva izračun srednjeg vremena do otkaza uvrštavajući parametar skale i oblika na sljedeći način:

$$E(T) = 12360.24 * \Gamma\left(\frac{1}{3.15} + 1\right) = 11\,062,21 \text{ sati} .$$

Srednje vrijeme do otkaza  $E(T)$ , kao što je dobar pokazatelj koji ukazuje na vrijeme održavanja visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva s vrijednošću od 11062.21 sati ukazuje na potrebu korekcije vremena održavanja. Izračun srednjeg vremena do otkaza na ovaj način dobiven je uzimajući u obzir specifičnu funkcija intenziteta otkaza kojom je interpretiran životni vijek visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva.

Kumulativna funkcija  $H(t)$  dobivena integracijom Weibull-ove funkcije intenziteta otkaza  $\lambda(t)$  pokazuje očekivani broj otkaza do vremena  $t$  pri određenim uvjetima koji su rezultirali prikupljenim podacima o otkazima (Tablica 6) na osnovu kojih se dobivaju parametri Weibull-ove distribucije za  $\lambda(t)$ . Pri tome se pretpostavlja da je intenzitet otkaza visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva prije popravke jednak intenzitetu otkaza nakon popravke (*engl. „as bad as old“*). Na ovaj način omogućena je analiza intenziteta otkaza ili brzina kvarenja (*engl. failure rate; hazard rate*) primjenom sljedećeg matematičkog izraza:

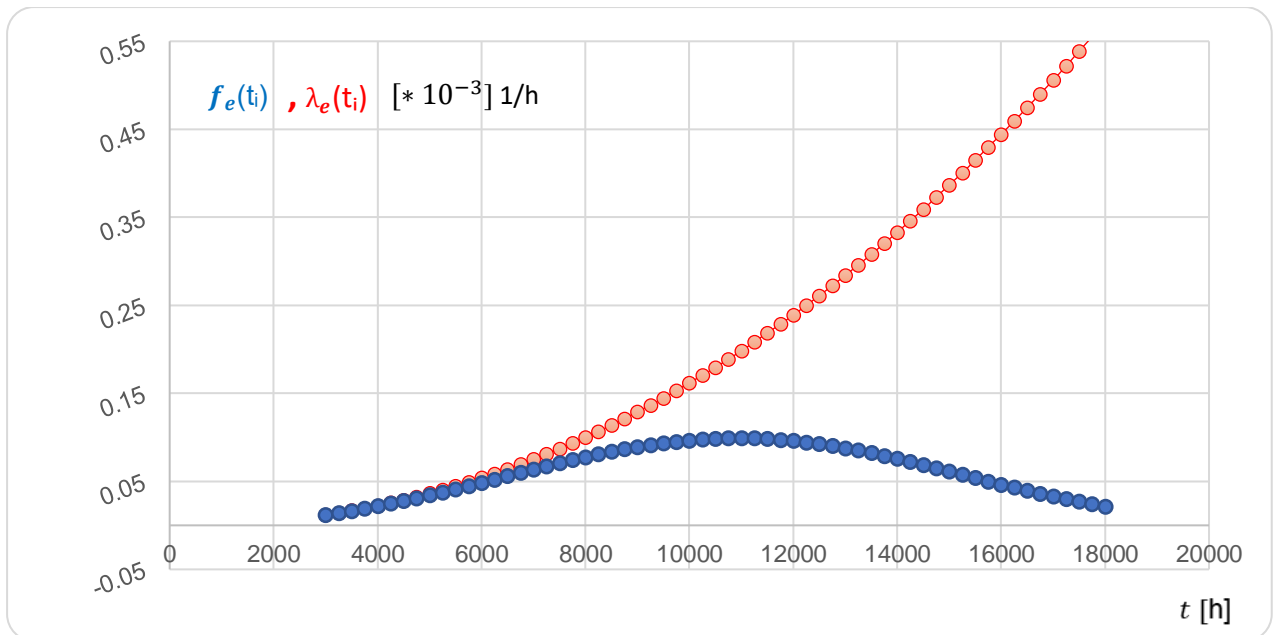
$$H(t) = \int_0^t \lambda(x) dx \quad (29)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $H(t)$  – kumulativna funkcija vremena do otkaza (mjeri očekivani broj otkaza koji će se dogoditi prije vremena  $t$ ),
- $\lambda(x)$  - intenziteta otkaza (mjeri stopu otkaza ili brzinu kvarenja komponenti ili sustava u odnosu na vrijeme  $x$ ).

Slijedom prethodno navedenog, te prema Grafu (17) može se zaključiti sljedeće. Iako su proizvođači visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva propisali interval održavanja na 18 000 radnih sati (*engl. overhaul*), preporučuje se da prvi servis bude obavljen nakon odrađenih 11 062,21 radnih sati, ili čak niže, odnosno na 11 000 radnih sati. Kada se uspoređi ova analiza s analizom kvarova pumpi goriva Bukše A. koje imaju propisane intervale održavanja na 16 000 radnih sati, zaključuje se da se razina pouzdanosti tih komponenata (u ovom slučaju, pumpi goriva općenito)

postupno smanjivala tijekom godina. Ova usporedba pokazuje da bi pristup održavanju trebao biti promijenjen kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost u radu glavnog brodskog motora, u skladu s analizom kontejnerskih brodova. Osim navedenog, ovom prikazanom Weibull-ovom distribucijom omogućava se i planiranje zaliha prema sljedećem. Na temelju modela Weibull-ove distribucije i izračunatog srednjeg vremena do otkaza  $E(T)$ , mogu se planirati zalihe rezervnih dijelova i potrebnih resursa. Na primjer, ako se očekuje da će se sljedeći kvar dogoditi nakon odrađenih 11 000 radnih sati kao što i prikazuje srednje vrijeme do otkaza može se osigurati dovoljno zaliha za zamjenu dijelova kako bi se minimaliziralo vrijeme zastoja u radu uzrokovanih kvarovima, te osigurala bolja organizacija u učinkovitijem upravljanju zalihama rezervnih dijelova. S druge strane kada se razmatraju kvarovi visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva s aspekta kvara s nepravilnim održavanjem, postoji mogućnost nastanka ozbiljne nezgode popraćene eksplozijom i požarom (poglavlje 4.3.3). Prema tom primjeru s gradacijom učinka kvara (Tablica 3) može se s inženjerskog stajališta govoriti o sigurnosti koja je kritična ili katastrofična i operaciji koja je djelomično raspoloživa ili nije raspoloživa odnosno brod nije pristupačan za operaciju (eksploataciju) danima ili satima gdje se u konačnici takva situacija odražava ne samo na brodara već i na cjelokupni lanac opskrbe (kašnjenja, gubitak tereta, zagušenja i sl.). Upravo s tom spoznajom važno je pružati sugestiju održavanja prema radnim satima prikazanih kvarova u svrhu sigurnijeg i pouzdanijeg rada glavnog motora WinGD/Wärtsilä-e 10 – X92, te prevencije od nastanka većih pomorskih nezgoda.



**Graf 17.** Parametarske Weibull-ove funkcije gustoće  $f(t)$  i intenziteta otkaza visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva

Nakon što je izvedena analiza otkaza visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva, te dobiveni podaci komparirani s podacima o otkazima glavnog brodskog motora nije vidljiva sasvim jasna veza te je teško za pretpostaviti da pri analizi brodskih motora možemo direktno promatrati promjene stanja brodskog motora kroz servisne podatke o otkazima. Analiza je pokazala da se nalazimo u situaciji da možemo promatrati mijenjanje određenih čimbenika kao što su performanse brodskih visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva u odnosu na servisiranje glavnih brodskih motora. Obje komponente podložne su procesu održavanja te nas njihova ispravnost zanima. Ovakva problematika je upravo motivirala uvođenje skrivenih Markovljevih modela jer oni uzimaju u obzir pozadinske procese čija nas kretanja zanimaju ali su nam skrivena, te nisu adekvatno valorizirana kao u slučaju rada visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva. Ujedno to je i široko primijenjen alat za matematičko modeliranje procesa te se primjenjuje u raznim područjima znanosti. Stoga se u nastavku rada razmatra skriveni Markovljev model kojim se može analizirati uočeni problem rada visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva s posljedicama na rad brodskih motora. Kako se ovdje radi o tumačenju prikupljenih podataka koji se odnose na održavanje sustava brodskog motora tako se ovdje radi o vrlo netrivialnom zadatku. U ovom slučaju skriveni proces predstavlja rad visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva koje se mogu izolirano održavati u odnosu na održavanje glavnog brodskog motora.

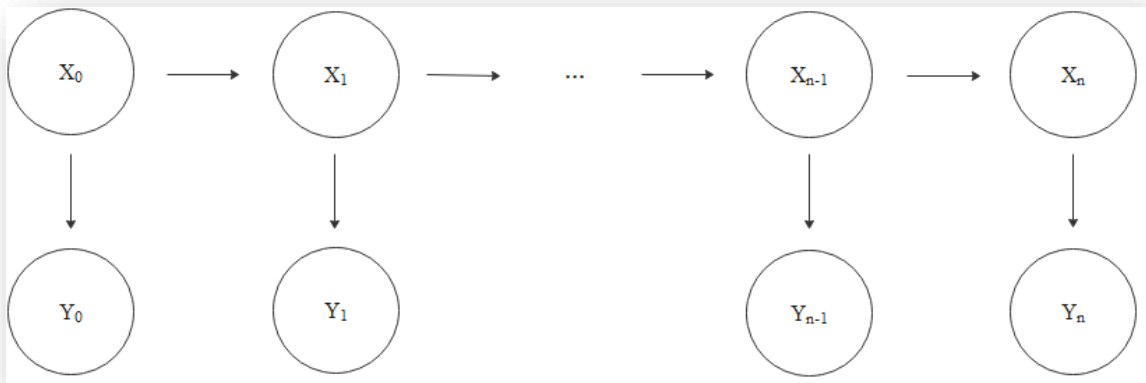
## 7.2. Markovljev model

Markovljev model je matematički model koji se koristi za opisivanje sekvencijalnih događaja u kojima vjerojatnost budućeg događaja ovisi isključivo o trenutnom stanju i ne ovisi o prethodnim događajima. Dvije najčešće primjenjive vrste Markovljevih modela su Markovljevi lanci i skriveni Markovljevi modeli. Oni se koriste kada se modelira sustav koji radi samostalno, bez utjecaja vanjskih čimbenika [46].

Iako Markovljevi lanci imaju široku primjenu, nije sasvim realistično pretpostaviti da se pri modeliranju mogu direktno promatrati promjene stanja Markovljevog lanca, već se češće nalazi u situaciji da se može promatrati mijenjanje određenih čimbenika koji su pod utjecajem kretanja procesa koji nas zanima. Ovakva problematika je upravo motivirala uvođenje skrivenih Markovljevih modela jer oni uzimaju u obzir pozadinski proces čija nas kretanja zanimaju ali su nam skrivena. Skriveni Markovljev model općenito se može shvatiti kao Markovljev proces koji se u ovoj analizi koristi za razdvajanje dvije komponente: otkaz visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva i otkaz glavnog broskog motora. Ova podjela komponentata u skrivenom Markovljevom modelu može se prikazati kao:

1. Skriveni proces (*engl. hidden process*) kojeg čini niz slučajnih varijabli  $(X_t; t \in T)$  s vrijednostima u skupu  $S$  (čije su promjene stanja skrivene u smislu predviđanja kvara na broskom motoru),
2. Opservacijski proces (*engl. observable process*) kojeg čini niz slučajnih varijabli  $(Y_t; t \in T)$  s vrijednostima u skupu  $O$  čije se vrijednosti i promjene mogu promatrati i pratiti jer se događaju znatno češće što je potvrđeno i parametrima Weibull-ove distribucije (Graf 17) je proces otkaza visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva.

Odnosno, pod skrivenim Markovljevim procesom smatra se uređeni par procesa  $((X_t, Y_t); t \in T)$  na prostoru stanja  $S \times O$ , (gdje se pretpostavlja da su sredstva za promatranje  $Y_t$ , ali ne i  $X_t$ ). Slikom (14) prikazana je shema skrivenog Markovljevog procesa.



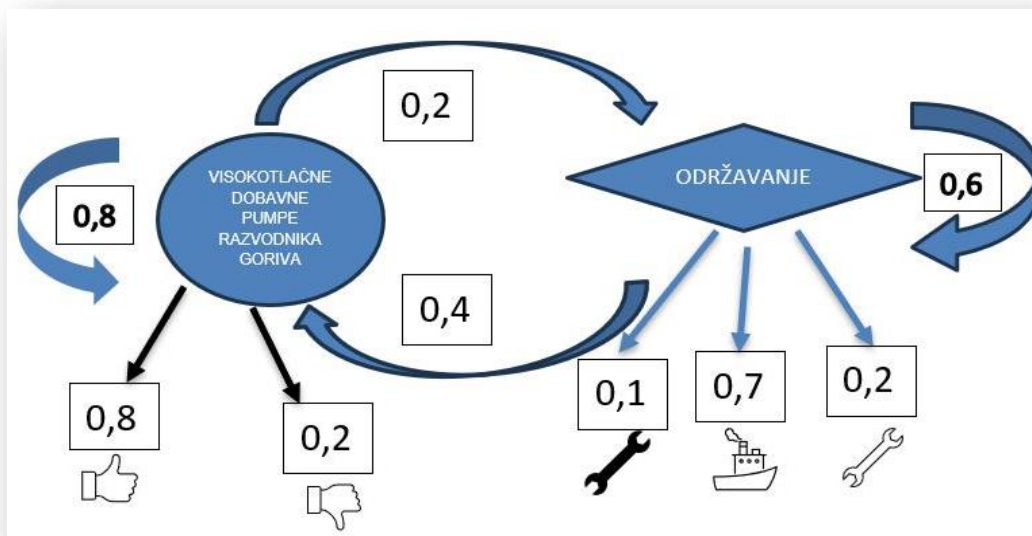
**Slika 17.** Shematski prikaz skrivenog Markovljevog procesa, [47]

Ovakav koncept može se uzeti u obzir jer bi slučajni proces otkaza glavnog motora  $X_t$  predstavljao bitan čimbenik koji utječe na model održavanja visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva. Kako dolazi do otkaza glavnih brodskih motora, motori dobivaju između ostalog oštećene vrijednosti za koje su zadužene visokotlačne dovodne pumpe razvodnika goriva  $Y_t$ , a cilj mu je ostvariti zahtijevani učinak. S druge strane proces  $Y_t$  u konačnici je zanimljiv, dok  $X_t$  samo predstavlja utjecaj nekih neupadljivih čimbenika na  $Y_t$ . Cilj koncepta je modelirati promatrane oscilacije kvarova, dok je proces neprimjetnih faktora zanemaren, ali njegovim uključivanjem je moguće izgraditi model koji vjernije odražava statistička svojstva promatranih performansi glavnih brodskih motora.

### *7.3. Modeliranje održavanja glavnog brodskog motora primjenom skrivenog Markovljevog lanca*

Mjerenje je proces prikupljanja podataka, a evaluacija je proces zaključivanja iz skupa podataka. Glavni brodski motori složeni su tehnički sustavi (poglavlje 5.1.), a visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva nalaze se u takvom sustavu u kojem njezine komponente često mogu biti neispravne. Kako njihov rad ima važnu ulogu za rad glavnih brodskih motora (poglavlje 6.2.4.) njihova ispravnost i pravilno održavanje trebalo bi dovesti do značajnog povećanja pouzdanosti i boljeg modela održavanja glavnih brodskih motora. Međutim, tumačenje podataka o kvarovima (visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva) u odnosu na sustav održavanja glavnog brodskog motora je vrlo netrivialan zadatak. Na primjer, javlja se sljedeći problem: postoji razlika u distribucijama gustoće kvarova između visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika

goriva i Weibull-ovog modela kvarova glavnih brodskih motora, koji je izrađen na temelju empirijskih podataka o servisiranju. Tijekom analiziranja podataka postojali su podatci koji se poklapaju i podatci koji se mogu izdvojeno promatrati, a odnose se na podatke o navedenoj pumpi ili svim komponentama glavnog motora (poglavlje 6.2.3). Upravo u tom dijelu analize ovaj koncept može se smatrati zamršenim procesom koji započinje prepisivanjem odgovarajućeg dijela lanca koji se odnosi na visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva. Da bi se mogao interpretirati proces otkazivanja, prvo se moraju razdvojiti neovisna područja otkazivanja. Nažalost, ne postoji jasan znak kada započinje kritično područje koje se može povezati s jednim ili drugim uvjetno rečeno sustavom, tako da se obično ta identifikacija mora obaviti statističkim metodama. Stoga je važno, prilikom analize podataka o kvarovima, prvo provesti klasifikaciju kvarova visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva i svih ostalih komponenata glavnog motora kao pojedinačnih kvarova. Prvenstveno, u ovoj analizi naglasak je na visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva gdje kvarovi ovih pumpi mogu imati ozbiljne posljedice na rad cijelog složenog tehničkog sustava (glavnog motora), pa je važno razviti model koji može pratiti njihovo ponašanje i predvidjeti trenutke kada će biti potrebno održavanje kako bi se osigurala pouzdanost i funkcionalnost glavnog brodskog motora. Slikom (18) prikazan je shematski prikaz skrivenog Markovljevog lanca koji je primijenjen na visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva. Na Slici (18) mogu se vidjeti različiti brojevi koji predstavljaju vjerojatnosti prijelaza između različitih stanja u primijenjenom skrivenom Markovljevom lancu. Svaki od tih brojeva ima svoju posebnu ulogu u modeliranju ponašanja složenog tehničkog sustava, pri čemu se u ovom slučaju radi o glavnom brodskom motoru. Primjenom ovih vjerojatnosti može se predvidjeti kako će se stanje sustava mijenjati između ispravnog stanja, potreba za održavanjem, popravka i drugih stanja. Ovo je izuzetno korisno u svrhu planiranja održavanja jer omogućuje identifikaciju trenutaka kada će biti potrebno intervenirati kako bi se spriječili kvarovi ili ispravili problemi.



**Slika 18.** Shematski prikaz skrivenog Markovljevog lanca primijenjenog na visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva

Pristup modeliranju koji će biti opisan u daljnjem tekstu, temelji se na konceptu skrivenog Markovljevog lanca (Slika 18), koji omogućuje analitičko praćenje promjena stanja u sustavu s vremenom. Skriveni proces u ovom modelu predstavlja stanja visokotlačnih dobavnih pumpi, dok opservacijski proces predstavlja faktore koji ovise o njihovom ponašanju i koji utječu na ukupno stanje glavnog motora. Ovakav način razlaganja problematike primijenjen je u znanstvenim istraživanjima u elektrotehnici i strojarstvu [48].

U ovom slučaju skriveni proces ( $X_n, n \in N_0$ ) predstavlja klasu promatranih visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva (poglavlje 6.2.4.) koje se mogu proizvoljno analizirati. Opservacijski proces ( $Y_n, n \in N_0$ ) predstavlja čimbenike analiziranog glavnog motora koji direktno ovise o načinu ponašanja ovih visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva (poglavlje 6.2.6.). Rješenje ovakvih problema može se pronaći i u geofizici [49].

Prema prethodno navedenom, najjednostavniji pristup modeliranju je sljedeći; Vremenski parametar  $n$  predstavlja položaj duž lanca kojim se opisuje servisiranje motora. Skriveni proces ( $X_n, n \in N_0$ ) je Markovljev lanac (stanja navedenih visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva) sa stanjima  $S = \{1, 2\}$ , gdje bi 1 označavao da se trenutna visokotlačna dobavna pumpa razvodnika goriva nalazi u ispravnom području, a 2 da se nalazi u neispravnom stanju. Opservacijski lanac ( $Y_n, n \in N_0$ ) ima skup stanja = {Korektivno održavanje, Preventivno održavanje, u Radu},



tako da  $Y_n$  predstavlja tip  $n$  - tog para. Prijelazne i emitirane vjerojatnosti matrica  $\Pi$  i  $\Phi$  procjenjuju se iz podataka o kvarovima. U suštini taj je pristup prilično naivan, ali može dati dobre rezultate.

Temeljem stanja visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva tj. svih informacija želi se saznati stanje glavnog brodskog motora s obzirom na potrebu eventualnog održavanja. Ovakav problem modeliran je skrivenim Markovljevim lancem (Slika 18). Opservacijski lanac  $(Y_t, t \in \mathbb{N}_0)$  predstavlja vrijeme u kojem bi trebalo nešto poduzeti ili da se radi o normalnom vremenu u radu za  $t$  koji također ima dva moguća stanja  $O = \{r, z\}$  ( $M = 2$ ), gdje je  $r$  oznaka za dobro funkcioniranje glavnog brodskog motora, a  $z$  oznaka za probleme u funkcioniranju glavnog brodskog motora. Također postoji i niz opservacijskih stanja  $o = [r, r, r, z, z, r]$ . Polazeći od Markovljevog svojstva računanje nekih vjerojatnosti može svesti na Weibull-ovu distribuciju kvarova koja je za visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva prikazana u sedmom poglavlju. Unutar računanja vjerojatnosti otkaza u Excelu je izvedeno sljedeće:

$$P(X_k = i | Y_0 = j_0, \dots, Y_n = j_n), 0 \leq k \leq n, i \in S.$$

Prema prethodnom, ako nam je poznat skriveni Markovljev model  $(\Pi, \Phi, \lambda)$  i niz opservacija  $o = [j_0, \dots, j_n]$ . odnosno ako se želi izračunati vjerojatnost u skrivenom stanju  $i$  u trenutku  $k$  uz poznate sve opservacije ova prikazana vjerojatnost je korisna za procjenom vjerojatnosti matrica  $\Pi$  i  $\Phi$ .

Osnovna pretpostavka uključuje u potpunosti poznat model skrivenog Markovljevog lanca, tj. poznate su matrice  $\Pi$ ,  $\Phi$  i početna distribucija  $\lambda$ , pa se skraćeno svi parametri koji određuju skriveni Markovljev model mogu označiti kao  $\theta = (\Pi, \Phi, \lambda)$ . Međutim, takva pretpostavka nije realistična i u većini slučajeva prijelazne i emitirane vjerojatnosti nisu dane, već ih se na temelju niza podataka opservacija mora procijeniti i za to se koristi izračun parametara Weibull-ove distribucije. Na ovaj način je omogućen i rekurzivni proces izgladivanja parametara Weibull-ove distribucije na osnovu čega je moguće korigirati vremena održavanja glavnog brodskog motora. Algoritam koji je za to napravljen kako bi se maksimizirale vjerojatnosti potrebe za održavanjem za poznati niz opservacija  $o = [j_0, \dots, j_n]$ , je sljedeći:

$$\operatorname{argmax} P(Y_0 = j_0, \dots, Y_n = j_n | \theta).$$

Vjerojatnosti kojima se služi prethodno prikazani algoritam proizlaze iz izračunatih vrijednosti Weibull-ovih distribucija za pojedine procese.

Ključno pitanje koje ostaje, s obzirom na prethodno navedeno, jest: U slučaju da postoje novi podaci o kvarovima visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva, za koje se ne zna po kojem modelu odrediti intervale preventivnog održavanja, kako se mogu izračunati vjerojatnosti tih intervala, temeljenih isključivo na novim opservacijama  $o_2$ , s ciljem izbjegavanja neočekivanih kvarova? Odgovor na navedeno pitanje može uzeti za primjer niz novih sljedećih opservacija:

$o_2 = [ r, r, r, r, z, r, r, z, z, r, r, r, r, z, r, r, z, r, r, z, z, r, r, r, r, z, z, r, r, r, r, r ]$ .

Prema tome, s obzirom na novi niz opservacija  $o_2$ , može se primijetiti da postoje promjene u stanjima visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva i stanju glavnog brodskog motora tijekom vremena, te je na temelju ovog niza opservacija, moguće izračunati nove vjerojatnosti intervala preventivnog održavanja. Osim toga, važno je napomenuti da se u ovom kontekstu pretpostavlja da su prijelazne i emitirane vjerojatnosti Markovljevog lanca, koje definiraju promjene stanja u sustavu, promjenjive i da se mogu ažurirati na temelju novih opservacija. To omogućuje modelu da se prilagodi novim uvjetima i promjenama u ponašanju sustava.

Kako bi se prevenirali kvarovi uvijek će se pretpostaviti da su skup indeksa  $T$  i skupovi stanja  $S$  i  $O$  diskretni, tj. da će se raditi isključivo s Markovljevim i skrivenim Markovljevim lancima. Svi rezultati koji se budu izveli u ovom poglavlju se mogu proširiti na procese s neprekidnim skupom stanja i u neprekidnom vremenu, ali radi jednostavnosti i implementacije u ovom radu suziti na diskretne skupove. Na samom početku potrebno je osvrnuti se na postupak modeliranja, tj. na pretpostavke prema kojima se smatra da se skriven Markovljev lanac odvija i svojstva koja iz njih proizlaze, kroz sljedeće:

1. pravilo je da skriveni lanac  $(x_n, n \in N_0)$  prelazi iz trenutnog stanja u sljedeće stanje prema nekoj raspodjeli vjerojatnosti koja ovisi samo o trenutnom stanju, tj:  $P(X_{n+1} = j | X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0) = P(X_{n+1} = j | X_n = i)$ , za svaki  $n \in N_0$  i za sve  $i_0, \dots, i_{n-1}, i, j \in S$  za koje su ove uvjetne vjerojatnosti dobro definirane. Odnosno, drugim riječima traži će se da proces  $(X_n, n \in N_0)$  bude Markovljev lanac. Prelazak iz stanja u stanje računa se osnovu Weibull-ove raspodjele vjerojatnosti funkcije intenziteta otkaza  $\lambda$ .

2. pravilo je da skriveni lanac pri svakom prijelazu u novo stanje emitira opservacijsko stanje  $Y_n$  čija raspodjela ovisi samo o trenutnom skrivenom stanju  $X_n$ , tj.:  $P(Y_n = j | X_n = i, Y_{n-1} = j_{n-1}, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, Y_0 = j_0, X_0 = i_0) = P(Y_n = j | X_n = i)$ . Odnosno, drugim riječima da je trenutna opservacija neovisna o prijašnjim opservacijama i prošlim skrivenim stanjima.

Međutim, potrebno je napomenuti sljedeće. Iako se traži da  $(X_n, n \in N_0)$  bude Markovljev lanac, opservacijski lanac  $(Y_n, n \in N_0)$  sam po sebi ne mora biti Markovljev, čak u većini slučajeva on to i nije. Zbog toga se skriveni Markovljevi lanci mogu koristiti za modeliranje ponašanja koji ne zadovoljavaju Markovljevo svojstvo (primjerice glavni brodski motor), zadržavajući pri tome većinu matematičkih rezultata koji proizlaze iz tog svojstva. Prema tome potrebno je dati definiciju sljedećih parametara. Neka su  $S$  i  $O$  diskretni skupovi, dok se slučajni proces  $((X_n, Y_n), n \in N_0)$  na vjerojatnosnom prostoru  $(\Omega, F, P)$  s vrijednostima u  $S \times O$  naziva skriveni Markovljev lanac ako postoji matrica prijelaznih vjerojatnosti  $\Pi = [p_{ij}]$ ,  $j \in S$  i matrica emitiranih vjerojatnosti  $\Phi = [q_{ij}]$ ,  $i \in S, j \in O$  takve da vrijedi:

$$\begin{aligned} & P(X_{n+1} = i, Y_{n+1} = j | X_n = i_n, Y_n = j_n, \dots, X_0 = i_0, Y_0 = j_0) \\ & = P(X_{n+1} = i | X_n = i_n) \cdot P(Y_{n+1} = j | X_{n+1} = i) \\ & = p_{ni} \cdot q_{ij}. \end{aligned} \tag{x.x}$$

za svaki  $n \in N_0$  i za sve  $i, i_n, \dots, i_0 \in S$  i  $j, j_n, \dots, j_0 \in O$  za koje su gornje uvjetne vjerojatnosti dobro definirane. Potrebno je uočiti da uvjet iz definicije, koji je ekvivalent Markovljevog svojstva za skriveni Markovljev lanac, direktno slijedi iz pretpostavki skrivenog Markovljevog procesa, tj. iz činjenice da  $(X_n, n \in N_0)$  zadovoljava Markovljevo svojstvo te iz nezavisnosti trenutne opservacije o prošlosti prema sljedećem:

$$\begin{aligned} & P(X_{n+1} = i, Y_{n+1} = j | X_n = i_n, Y_n = j_n, \dots, X_0 = i_0, Y_0 = j_0) \\ & = P(Y_{n+1} = j | X_{n+1} = i, X_n = i_n, Y_n = j_n, \dots, X_0 = i_0, Y_0 = j_0) \\ & \quad \cdot P(X_{n+1} = i | X_n = i_n, Y_n = j_n, \dots, X_0 = i_0, Y_0 = j_0) \\ & = P(Y_{n+1} = j | X_{n+1} = i) \cdot P(X_{n+1} = i | X_n = i_n). \end{aligned}$$

Iz te prethodno navedene jednakosti uviđa se da ako vjerojatnosti  $X_{n+1}$  i  $Y_{n+1}$  poprima vrijednosti  $i$  i  $j$  one se tada mogu računati kao umnožak vjerojatnosti prijelaza iz trenutnog stanja skrivenog procesa  $X_n = i_n$  u stanje  $i$ , i vjerojatnosti da će ono u trenutku  $n + 1$  emitirati opservaciju  $Y_{n+1} = j$ . Za razliku od Markovljevog lanca,

neposredna budućnost ne ovisi samo o sadašnjosti već i o uzročno posljedičnoj vezi između skrivenog stanja i opservacije. Također može se zaključiti da za trenutak  $n = 0$  vrijedi sljedeće:

$$P(X_0 = i, Y_0 = j) = P(Y_0 = j | X_0 = i) \cdot P(X_0 = i) = q_{ij} \cdot \lambda_i.$$

Analogno, kao kod Markovljevih lanaca, može se izvesti formula za računanje konačno dimenzionalne distribucije skrivenog Markovljevog lanca pomoću parametara  $(\Pi, \Phi, \lambda)$  koji ga određuju iz sljedećeg izraza:

$$P(X_n = i_n, Y_n = j_n, \dots, X_0 = i_0, Y_0 = j_0) = q_{i_0 j_0} \lambda_{i_0} \prod_{k=1}^n p_{k-1 k}^i.$$

Zaključno, korištenje skrivenih Markovljevih modela bilo je izuzetno uspješno u pristupu rješavanja ovog problema, te se na temelju niza opservacija  $o_2$  i uz pomoć prethodno definiranih matrica vjerojatnosti  $\Pi$  i  $\Phi$  mogu izračunati nove vjerojatnosti intervala preventivnog održavanja za stanja visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva i glavnog broskog motora kontejnerskih brodova što omogućuje bolje planiranje održavanja i smanjenje rizika od neočekivanih kvarova. Ključna je ideja ovog modela omogućiti analizu sustava čije se stanje ne može izravno promatrati, već se može samo zaključiti iz opservacija. U tom procesu, pretpostavile su se diskretnosti skupova stanja i opservacijskih stanja, te pravilo o neovisnosti trenutnih opservacija o prošlim skrivenim stanjima. Važan aspekt ovog modela je korištenje Weibull-ove distribucije za modeliranje prijelaza između skrivenih stanja, koristeći funkciju intenziteta otkaza  $\lambda$ . To omogućuje bolje razumijevanje i predviđanje kvarova u složenom tehničkom sustavu (glavnom motoru), te planiranje održavanja kako bi se smanjili rizici i troškovi. Ovaj pristup modeliranju ima široku primjenu u inženjeringu i znanosti te omogućuje bolje razumijevanje složenih sustava koji evoluiraju tijekom vremena.

## 8. ZAKLJUČAK

Kontejnerski promet ima važnu ulogu u globalnoj ekonomiji, budući da potiče izvoz, utječe na uvoz, potiče ekonomsku integraciju, potiče razvoj logističke infrastrukture, povećava konkurenciju na tržištu, promiče globalizaciju i potiče razmjenu resursa između zemalja, uključujući robu, usluge, investicije i tehnologiju. S obzirom na sveukupnu važnost njegove prisutnosti u globalnom bruto domaćem proizvodu, ovaj se oblik prometa također dokazao kao ključan tijekom druge najveće svjetske gospodarske krize. Konkretno, za vrijeme globalne pandemije COVID-a, kontejnerski promet suočavao se s brojnim izazovima, uključujući zatvaranje luka i ograničenja prometa, no unatoč tim izazovima, pokazao se kao najefikasniji oblik prijevoza za osiguranje sigurne opskrbe, čime je dodatno naglasio svoju ulogu u očuvanju globalne ekonomske stabilnosti. S druge strane, neočekivani porast potražnje za kontejnerskim prometom tijekom pandemije rezultirao je promjenama na tržištu. Cijene vozarina su porasle, a zabilježen je i velik broj narudžbi kontejnerskih brodova što u konačnici može dovesti do budućih izazova, uključujući potencijalnu neravnotežu između prijevozne ponude i prijevozne potražnje. U perspektivi, očekuje se daljnji rast globalnog tržišta kontejnerskog prometa, koji će biti praćen promjenama u vodećim ulogama tvrtki na tom tržištu i promjenama u poretku zemalja u globalnom BDP-u. Također se postavlja pitanje o budućem razvoju proizvodnje i jačanju pojedinih trgovačkih kontejnerskih ruta, s obzirom na nastojanja zapadnih zemalja da postignu veću neovisnost i diverzifikaciju izvora proizvodnje izvan Narodne Republike Kine.

Usljed velikog značenja za globalne opskrbne lance, pouzdanost i učinkovitost pomorskog kontejnerskog prometa iznimno je važna. Pomorske nezgode predstavljaju izvanredne događaje koji često rezultiraju ozbiljnim štetama, gubicima i ozljedama. S obzirom da je kontejnerski promet iznimno važan za odvijanje opskrbnih lanaca, nezgode na kontejnerskim brodovima mogu negativno utjecati na njih s različitih aspekata uključujući oštećenje tereta, kašnjenja, u isporuci, povećanje troškova prijevoza i sl.. Uzroci nezgoda mogu varirati, od ljudskih pogreška, tehničkih kvarova, vremenskih uvjeta i drugih faktora. Najnovija istraživanja pokazuju da je sve veća učestalost kvarova na brodskim strojevima (glavnim, pomoćnim motorima i sl), stoga je promatranje utjecaja kvarova na komponenata glavnog motora kontejnerskih važno kako bi se postigla optimizacija procesa održavanja, povećala stabilnost i

kontinuitet opskrbnih lanaca, čime se štite interesi različitih sektora gospodarstva koji su ovisni o pouzdanosti i učinkovitosti kontejnerskog pomorskog prijevoza.

Weibull-ova analiza i skriveni Markovljevi lanci su poznati alat za matematičko modeliranje problema koji mogu biti karakterizirani pomoću jednog skrivenog procesa ( $X_n, n \in N_0$ ) koji emitira drugi vidljiv opservacijski proces ( $Y_n, n \in N_0$ ). Skriveni Markovljev model je sasvim određen poznavanjem njegovih matrica prijelaznih i emitiranih vjerojatnosti  $\Pi$  i  $\Phi$ , te početne distribucije skrivenog lanca  $\lambda$ . Sama funkcionalnosti skrivenih Markovljevih modela se zasniva na tri osnovna problema, a pod uvjetom poznavanja parametara modela možemo riješiti problem izgladivanja pomoću algoritma. Funkcioniranje brodskog motora može se analizirati praćenjem pouzdanosti njegovih dijelova i funkcionalnih cjelina. U eksploataciji (analizom prikupljenih podataka) njegov rad je narušen zbog naglog pada parametara pouzdanosti visokotlačnih dobavnih pumpi goriva za koje je istraživanjem pokazano da bi se trebalo korigirati vrijeme preventivnog održavanja. Tako bi se povećala sposobnost zadržavanja glavnog brodskog motora u ispravnom stanju. Izravno bi se utjecalo na povećanje ukupne pouzdanosti (smanji bi se broj kvarova) što je pokazala analiza zasnovana na modelu Markovljevih lanaca. Posljedično bi došlo i do smanjenja potrebe za korektivnim održavanjem.

Osim toga, ne treba zaboraviti da povećanje pouzdanosti ima svoju cijenu, ali i ekonomsku opravdanost. Veća pouzdanost visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva važno je s gledišta ispravnog rada glavnog brodskog motora, a može se postići u proizvodnji ili se mora prilagoditi (korigirati) preventivno održavanje što je i dokazano u ovom radu. Ciljanim povećanjem pouzdanosti visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva ostvaruje se više prednosti, uključujući smanjenje vremena zastoja zbog održavanja, smanjenje iznenadnih kvarova, smanjenje obujma i potreba za preventivnim i korektivnim održavanjem te smanjenje potrebnih zamjenskih dijelova i radne snage za održavanje, što u konačnici rezultira smanjenjem troškova održavanja odnosno ukupnih operativnih troškova. U konačnici, povećanje pouzdanosti visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva ima pozitivan lančani učinak na operativnu efikasnost i ekonomske performanse opskrbnih lanaca, čime se osigurava kontinuiran protok roba i materijala.

Na posljeticu važno je napomenuti da, unatoč tome što je WinGD/Wärtsilä 10 – X92, noviji tip glavnog motora kontejnerskih brodova dizajniran za izvanrednu

pouzdanost, minimalne operativne troškove i emisije ispušnih plinova, provedenom analizom jasno se ukazuje na postojanje kritične komponente koja svakako nije zanemariva.

## POPIS LITERATURE

- [1] Karatuğ Ç, Arslanoğlu Y, Guedes Soares C. Design of a decision support system to achieve condition-based maintenance in ship machinery systems. *Ocean Engineering*. 2023;281. Preuzeto sa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801823009952> [Pristupljeno: 12. srpnja 2023.]
- [2] Bukša A, Modeliranje održavanja brodskog porivnog sustava, Doktorska disertacija. Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci; Rijeka, 2005.
- [3] Mihanović L, Istraživanje eksploatacijske pouzdanosti i pogodnosti održavanja brzookretnih brodskih motora, Doktorska disertacija. Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci; Rijeka, 2015.
- [4] Kunar S, Ghosh G, Mandal K, Bose D, Sau SP. Measurement and Evaluation of Reliability, Availability and Maintainability of a Diesel Locomotive Engine. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2013;8: 31-46. Preuzeto sa: <https://www.slideshare.net/IOSR/measurement-and-evaluation-of-reliability-availability-and-maintainability-of-a-diesel-locomotive-engine> [Pristupljeno: 12. srpnja 2023.]
- [5] Visual Capitalist. Markets. Preuzeto sa: <https://www.visualcapitalist.com/countries-by-share-of-global-economy/> [Pristupljeno: 25. srpnja 2023.]
- [6] United Nations. *Conference on Trade and Development. The Review of Maritime Transport, 2021, Geneva, Switzerland*. Preuzeto sa: [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022_en.pdf)
- [7] The Statistic Portal for Market Data. Statista. Preuzeto sa: <https://www.statista.com/statistics/1250636/global-container-freight-index/> [Pristupljeno: 12. srpnja 2023.]
- [8] The Statistic Portal for Market Data. Statista. Preuzeto sa: <https://www.statista.com/statistics/263291/container-shipping-companies-worldwide-number-of-ships/> [Pristupljeno: 12. srpnja 2023.]
- [9] Economic research federal reserve bank of St. Louis. FRED. Preuzeto sa: <https://fred.stlouisfed.org/series/TLMFGCONS#> [Pristupljeno: 13. srpnja 2023.]



- [10] The Statistic Portal for Market Data. Statista. Preuzeto sa: <https://www.statista.com/statistics/1097059/global-shipping-containers-market-size/> [Pristupljeno: 12. srpnja 2023.]
- [11] Baljak S, Analiza statistike pomorskih nezgoda. Diplomski rad. Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci; Rijeka, 2021. Preuzeto sa: <https://dabar.srce.hr/islandora/object/pfri%3A2331> [Pristupljeno: 12. srpnja 2023.]
- [12] European Maritime Safety Agency. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents, 15th of October, 2022. Preuzeto s: <https://maritimecyprus.com/2022/12/04/emsa-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2022-publication/> [Pristupljeno 12. srpnja 2023.]
- [13] European Maritime Safety Agency. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents, 15th of December, 2021. Preuzeto s <https://www.emsa.europa.eu/Publications/reports/item/4266-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2020.html> [Pristupljeno 12. srpnja 2023.]
- [14] Rodrigue JP. *The Geography of Transport Systems*. 5. izd. New York: Routledge; 2020. Preuzeto sa: <https://transportgeography.org/contents/chapter5/maritime-transportation/evolution-containerships-classes/> [Pristupljeno:14. srpnja 2023.]
- [15] European Maritime Safety Agency. Analysis of marine casualties and incidents involving container vessels. September 2020. Preuzeto s: <https://www.emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/4276-safety-analysis-of-dana-reported-in-emcip-analysis-on-marine-casualties-and-incidents-involving-container-vessels.html> [Pristupljeno: 10. srpnja 2023.]
- [16] Matijaš I, Operativni troškovi u morskome brodarstvu. Diplomski rad. Pomorski fakultet Sveučilišta u Splitu; Split, 2019. Preuzeto sa: <https://repositorij.pfst.unist.hr/islandora/object/pfst%3A688> [Pristupljeno: 19. srpnja 2023.]
- [17] Digital publishing platform. Issuu: Main engine failures and blackouts. Preuzeto sa: <https://issuu.com/marinetrust/docs/w71/s/12145703> [Pristupljeno 20. srpnja 2023.]
- [18] Navigating the maritime industry. Maritime Informed. Preuzeto s: [Maritime\\_safety\\_trends\\_2012-2022.Advancing a culture of safety in a changing industry landscape](https://www.maritimeinformed.com/industry-landscapes/maritime-safety-trends-2012-2022-advancing-a-culture-of-safety-in-a-changing-industry-landscape/) [Pristupljeno 20. srpnja 2023.]

- [19] The Global Shipping News Source. TradeWinds. Preuzeto s: <https://www.tradewindsnews.com/casualties/three-seafarers-airlifted-after-blast-on-msc-container-ship/2-1-1243182> [Pristupljeno 20. srpnja 2023.]
- [20] Jadranski web portal. MorskiHR. Preuzeto s: <https://www.morski.hr/crnogorski-pomorac-stradao-na-brodu-u-perzijskom-zaljevu/> [Pristupljeno 20. srpnja 2023.]
- [21] Elsayed A. *Reliability Engineering*. 3. izd. Hoboken. Wiley; 2021, Preuzeto s: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/chapter-epub/10.1002/9781119665946.fmatter> [Pristupljeno 13. srpnja 2023.]
- [22] Bilić B, Jurjević, Barle J. Procjena pouzdanosti tehničkog sustava primjenom Markovljevih modela i sustavne dinamike. Časopis za teoriju i praksu u strojarstvu. 2010; 52(3): 271-281. Preuzeto sa: <https://hrcak.srce.hr/pretraga?q=Procjena+pouzdanosti+tehni%C4%8Dkog+sustava+primjenom+Markovljevih+modela+i+sustavne+dinamike> [Pristupljeno 13. srpnja 2023.]
- [23] Dobrota Đ, Kvalifikacijski doktorski ispit, Kvalitativna analiza u procjeni pouzdanosti pomoćnih brodskih sustava, Pomorski fakultet Sveučilišta u Splitu; Split, 2014.
- [24] Golub I, Antonić R, Dobrota Đ. Optimizacija sustava separatora teškog loživog ulja primjenom dijagnostičkih metoda zaključivanja. Pomorstvo. 2011; 25(1): 173 – 188. Preuzeto sa: <https://hrcak.srce.hr/69646> [Pristupljeno 13. srpnja 2023.]
- [25] Vukelić J. *Nove tehnologije za nadzor i analizu brodskih motora*. Završni rad. Sveučilište u Splitu. Pomorski fakultet; 2018. Preuzeto s: <https://dabar.srce.hr/islandora/search/Nove%20tehnologije%20za%20nadzor%20i%20analizu%20brodskih%20motora?type=dismax> [Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]
- [26] Tomašević M; Oršulić M; Belak S. Istraživanje pouzdanosti brodskog dizelskog motora. 2020; 47(3-4): 93 – 100. More i pomorstvo. Preuzeto sa: <https://hrcak.srce.hr/en/clanak/307180> [Pristupljeno 13. srpnja 2023.]
- [27] Anantharaman M, Islam R. Khan F, Garaniya V, Lewarn B. Dana Analysis to Evaluate Reliability of a Main Engine. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2019; 13(2). Preuzeto sa:

[https://www.transnav.eu/Article\\_Data\\_Analysis\\_to\\_Evaluate\\_Reliability\\_Anantharaman,50,913.html](https://www.transnav.eu/Article_Data_Analysis_to_Evaluate_Reliability_Anantharaman,50,913.html) [Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]

[28] Van Ta T, Minh Thien D, Trong Cang V. Marine Propulsion System Reliability Assesment by Fault Tree Analysis; 2017; 5(4-1): 1-7. International Journal of Mechanical Engineering and Applications. Preuzeto sa: <https://article.sciencepublishinggroup.com/html/10.11648.j.ijmea.s.2017050401.11.html> [Pristupljeno 15. srpnja 2023.]

[29] Bukša A.; Šegulja I, Pouzdanost brodskih sustava. Pomorstvo; 2008. 22(2): 259-270. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/en/clanak/49127> [Pristupljeno 15. srpnja 2023.]

[30] Budimir D. Tehnička logistika, Osnove pouzdanosti, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 6.3. 2019.

[31] Statistika Jim. Weibull Distribution: Uses, Parameters & Examples. Preuzeto s: <https://statisticsbyjim.com/probability/weibull-distribution/> [Pristupljeno: 2. kolovoza 2023.]

[32] QualityGurus. Two Parameters Weibull Distribution. Preuzeto sa: <https://www.qualitygurus.com/two-parameters-weibull-distribution/> [Pristupljeno 2. kolovoza 2023.]

[33] Budimir D. Tehnička logistika: Weibull-ova distribucija korištena za prikaz empiriskih istraživanja u teoriji pouzdanosti, Fakultet prometnih Znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2023.

[34] ResearchGate. A graph example for the shape parameter  $-\beta$  for typical indicator values. Preuzeto sa: [https://www.researchgate.net/figure/A-graph-example-for-the-shape-parameter-b-for-typical-indicator-values\\_fig12\\_370765369](https://www.researchgate.net/figure/A-graph-example-for-the-shape-parameter-b-for-typical-indicator-values_fig12_370765369) [Pristupljeno 2. kolovoza 2023.]

[35] Bruce G.J., Eyres D. J. *Ship Construction*, 7 izd. I Butterworth – Heinemann; 2012, Preuzeto sa: <https://vdoc.pub/download/ship-construction-seventh-edition-6njdlle9heg0> [Pristupljeno 2. kolovoza 2023.]

[36] Statutory Documents. IMO Publications and Documents. Preuzeto sa: <https://www.imo.org/en/About/Our%20work/Regulations%20and%20Documents/Statutory%20Documents/Pages/StatutoryDocuments.aspx> [Pristupljeno: 2. kolovoza 2023.]

[37]Portal. WinGD; News & Media. Preuzeto sa: <https://www.wingd.com/en/news-media/media-papers/wingd-confirms-%281%29/> [Pristupljeno: 2. kolovoza 2023.]

[38] SCRIBD. WinGD – X92. Preuzeto sa: <https://www.scribd.com/document/523281775/WinGD-X92-ppt> [Pristupljeno: 2. kolovoza 2023.]

[39] Pritchard B. Borucinsky M, Luzer M. Spinčić A. Fuel oil system and fuel injection equipment. Preuzeto sa: [https://www.pfri.uniri.hr/bopri/documents/11\\_BPFuelOilSystems](https://www.pfri.uniri.hr/bopri/documents/11_BPFuelOilSystems) [Pristupljeno 2. kolovoza 2023.]

[40] Ouyang G, An S, Zhenming L, Yuxue L. *Common Rail Fuel Injection Technology in Diesel Engines*. Hoboken NJ. Wiley; 2019, Preuzeto sa: [https://books.google.hr/books?id=EW6MDwAAQBAJ&printsec=frontcover&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.hr/books?id=EW6MDwAAQBAJ&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) [Pristupljeno 26. kolovoza 2023.]

[41] Qinpeng W, Heming Y, Yuhai H. Research on Rail Pressure Control of High-Pressure Common Rail System for Marine Diesel Engine Based on Controlled Object Model. ResearchGate; 2021. (99): 1-1. Preuzeto sa: [https://www.researchgate.net/publication/354306622\\_Research\\_on\\_Rail\\_Pressure\\_Control\\_of\\_HighPressure\\_Common\\_Rail\\_System\\_for\\_Marine\\_Diesel\\_Engine\\_Based\\_on\\_Controlled\\_Object\\_Model](https://www.researchgate.net/publication/354306622_Research_on_Rail_Pressure_Control_of_HighPressure_Common_Rail_System_for_Marine_Diesel_Engine_Based_on_Controlled_Object_Model) [Pristupljeno 26. kolovoza 2023.]

[42] Ying H, Jianguo Y, Nao H. Experimental study and optimization in the layouts and the structure of the high-pressure common-rail fuel injection system for a marine diesel engine. SageJournals; 2020, 19(5): 584–596. Preuzeto sa: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1468087420921610> [Pristupljeno 26. kolovoza 2023.]

[43] Hongbin L, Yong G, Qingguo L, Daguang S, Shaoliang Z. *Study on Effect of the High Pressure Common Rail System on the HPD Diesel Engine Combustion*. IOP science. 2019; 242(3). Preuzeto s: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/242/3/032041> [Pristupljeno 26. kolovoza 2023.]

[44] Wingd. Operation Manual. Preuzeto sa: [https://www.wingd.com/en/documents/x92-b/engine-operation/operation-manual-\(om\)/](https://www.wingd.com/en/documents/x92-b/engine-operation/operation-manual-(om)/) [Pristupljeno 2. kolovoza 2023.]

- [45] Pharosch. Uvjetna vjerojatnost – definicija, formula, vjerojatnost događaja. Preuzeto sa: <https://hr.pharoskc.com/835-what-is-conditional-probability> [Pristupljeno 7. rujna 2023.]
- [46] TechTarget. Definition - Markov model. Preuzeto sa: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/Markov-model> [Pristupljeno 7. rujna 2023.]
- [47] Stjepanović S, Skriveni Markovljevi lanci. Diplomski rad. Preuzeto s: <https://repositorij.mathos.hr/islandora/object/mathos%3A427/datastream/PDF/view> [Pristupljeno 7. rujna 2023.]
- [48] Tamaloussi N. Bouzaouit T. *Study of Reliability in a Repairable System by Markov Chains*. ResearchGate. 2020. 12(1):66-76. Preuzeto s: [https://www.researchgate.net/publication/348736202\\_Study\\_of\\_Reliability\\_in\\_a\\_Repairable\\_System\\_by\\_Markov\\_Chains](https://www.researchgate.net/publication/348736202_Study_of_Reliability_in_a_Repairable_System_by_Markov_Chains) [Pristupljeno 7. rujna 2023.]
- [49] Z. Wu, A hidden Markov model for earthquake decluttering, *Journal of geophysical research* 115 (2010) [Yang, S. Balakrishnan, M. J. Wainwright, Statistical and Computational Guarantees for the Baum-Welch Algorithm, *Journal of Machine Learning Research* 18 (2017) 1-53.].

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1.</b> Prikaz razvojne generacije kontejnerskih brodova, [14] .....	24
<b>Slika 2.</b> Kontejnerski bod Rachele, [19] .....	28
<b>Slika 3.</b> Kontejnerski brod Rita, [20].....	28
<b>Slika 4.</b> Brodski dizelski motor s podsustavima, [25] .....	30
<b>Slika 5.</b> Prikaz značajki pouzdanosti, [30].....	31
<b>Slika 6.</b> Skala značaja kvara, [2].....	36
<b>Slika 7.</b> Primjer grafikona za parametar oblika $-\beta$ za tipične vrijednosti indikatora, [34] .....	39
<b>Slika 8.</b> Prikaz razmijene informacija između ureda, tehničke službe održavanja i broda .....	43
<b>Slika 9.</b> Prikaz dizajna glavnog motora WinGD/ Wärtsilä 10 - X92, [37] .....	46
<b>Slika 10.</b> Karakteristike glavnog motora WinGD/Wärtsilä – X92, [38] .....	48
<b>Slika 11.</b> Broj ukupnih kvarova promatranih glavnih motora kontejnerskih brodova	53
<b>Slika 12.</b> Prikaz položaja visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva glavnog dizel – motora WinGD/Wärtsilä – X92, [44].....	55
<b>Slika 13.</b> Primjer redoslijeda komponenata poslije pumpi goriva za dva različita motora .....	57
<b>Slika 14.</b> Prikaz presjeka visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva i njenih elemenata, [44] .....	58
<b>Slika 15.</b> Prikaz prikupljenih podataka visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva .....	61
<b>Slika 16.</b> Prikaz korištenih formula u analizi kvarova visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva .....	70
<b>Slika 17.</b> Shematski prikaz skrivenog Markovljevog procesa, [47].....	77
<b>Slika 18.</b> Shematski prikaz skrivenog Markovljevog lanca primijenjenog na visokotlačne dobavne pumpe razvodnika goriva .....	79

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 1.</b> Popis prvih deset zemalja prema udjelu u svjetskom gospodarstvu .....	8
<b>Tablica 2.</b> Podatci svjetske flote prema vrsti broda.....	15
<b>Tablica 3.</b> Indeks značaja (gradacija učinka kvara) .....	36
<b>Tablica 4.</b> Raspored održavanja prikazan na temelju vođenja dnevnika glavnog motora kontejnerskog broda.....	45
<b>Tablica 5.</b> Karakteristike glavnog motora WinGD/Wärtsilä 10 – X92.....	49
<b>Tablica 6.</b> Prikaz broja kvarova koji su se desili na pojedinim radnim satima kod komponenata visokotlačne dovodne pumpe razvodnika goriva .....	63
<b>Tablica 7.</b> Numerički prikaz parametra oblika i parametra skale.....	71

## POPIS GRAFOVA

<b>Graf 1.</b> Prikaz svjetskog BDP-a u razdoblju od 2005. do 2022. godine.....	8
<b>Graf 2.</b> Prikaz međunarodne pomorske trgovine i svjetskog BDP-a u razdoblju od 2005. do 2022. godine.....	9
<b>Graf 3.</b> Prikaz globalne kontejnerske trgovine u razdoblju od 1996. do 2022. godine .....	10
<b>Graf 4.</b> Prikaz glavnih trgovačkih ruta kontejnerske trgovine u razdoblju od 2008. do 2022. godine .....	11
<b>Graf 5.</b> Prikaz kontejnerskih vozarina u razdoblju od siječnja 2019. godine do svibnja 2022. godine .....	12
<b>Graf 6.</b> Vodeće svjetske kontejnerske tvrtke .....	14
<b>Graf 7.</b> Ukupni troškovi izgradnje u industrijskoj proizvodnji SAD-a za razdoblje od 2005. do drugog kvartala 2023. godine .....	16
<b>Graf 8.</b> Predviđanje veličine globalnog tržišta brodskih kontejnera između 2020. godine i 2028. godine .....	17
<b>Graf 9.</b> Prikaz pomorskih nezgoda prema vrsti broda u razdoblju od 2011. do 2021. godine .....	19
<b>Graf 10.</b> Pomorske nezgode prema vrstama u razdoblju od 2014. do 2021. godine	20
<b>Graf 11.</b> Prikaz najčešćih uzročnika nesretnih događaja u pomorstvu za razdoblje od 2014. do 2021. godine.....	21
<b>Graf 12.</b> Prikaz uzročnika pomorskih nezgoda prema vrsti broda.....	22
<b>Graf 13.</b> Prikaz distribucije nezgoda prema vrstama teretnih brodova.....	23
<b>Graf 14.</b> Broj prijavljenih događaja na kontejnerskim brodovima u Europi u razdoblju od 2011. do 2019. godine.....	25
<b>Graf 15.</b> Vrste nezgoda kontejnerskih brodova .....	26
<b>Graf 16.</b> Funkcija gustoće $f(t)$ i intenzitet otkaza $\lambda(t)$ visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva .....	71
<b>Graf 17.</b> Parametarske Weibull-ove funkcije gustoće $f(t)$ i intenziteta otkaza visokotlačnih dobavnih pumpi razvodnika goriva .....	75



## POPIS KRATICA

MA-CAD - podešavanje i oblikovanje koncepta održavanja (*engl. Maintenance Concept Adjustment and Design*)

UNCTAD - međuvladina organizacija unutar Tajništva Ujedinjenih naroda koja promiče interese zemalja u razvoju u svjetskoj trgovini (*engl. United Nations Conference on Trade and Development*)

BDP – bruto domaći proizvod (*engl. GDP gross domestic product*)

PKM – paritet kupovne moći (*engl. PPP purchasing power parity*)

USD – valuta Sjedinjenih Američkih država (*engl. United States dollar*)

MMF – međunarodni monetarni fond (*engl. International Monetary Fund*)

SAD – Sjedinjene američke države (*engl. The United States*)

UK – Ujedinjeno Kraljevstvo (*engl. The United Kingdom*)

COVID – koronavirusna bolest (*engl. Coronavirus disease*)

TEU – jedinica ekvivalentna dvadeset stopa (*engl. twenty-foot equivalent unit*)

LNG – ukapljeni zemni plin (*engl. Liquefied natural gas*)

IMO – Međunarodna pomorska organizacija (*engl. International Maritime Organization*)

EEX – indeks energetske učinkovitosti postojećeg broda (*engl. Energy Efficiency Existing Ship Indeks*)

CII – indikator intenziteta ugljika (*engl. Carbon Intensity Indicator*)

CAGR – prosječna godišnja stopa rasta (*engl. Compound Annual Growth Rate*)

EMSA – europska agencija za pomorsku sigurnost (*engl. The European Maritime Safety Agency*)

TSB – Kanadski odbor za sigurnost prometa (*engl. The Transportation Safety Board of Canada*)

MAIB – Agencija za istraživanje pomorskih nezgoda (*engl. Marine Accident Investigation Branch*)

AGCIS – korporativno osiguranje Allianz-a prema različitim specijalnostima (odjelima) (*engl. Allianz Global Corporate & Specialty*)

SOLAS – Međunarodna konvencija o zaštiti života na moru (*engl. International Convention for the Safety of Life at Sea*)

VLCS – vrlo veliki kontejnerski brodovi (*engl. Very Large Container Ships*)

ULCS – iznimno veliki kontejnerski brodovi (*engl. Ultra Large Container Ship*)

EMCIP – Europska platforma za informacije o pomorskim nezgodama (*engl. European Maritime Casualty Information Platform*)

EU – Europska Unija (*engl. European Union*)

DNV - Međunarodno ovlašteni registar i klasifikacijsko društvo sa sjedištem u Høviku, Norveška (*norv. Det Norske Veritas*)

ECAs – područja kontrole emisija sumpora u pomorstvu (*engl. Emission Control Areas*)

DWT – mrtva težina broda (*engl. deadweight tonnage*)

MEP -

HP – visoki pritisak (*engl. high pressure*)

## POPIS OZNAKA

$T_{ur}$  – ukupno vrijeme u radu

$t_{uri}$  – vrijeme u radu

$t$  – interval, vrijeme

$n$  – broj pojava u radu

$h$  – mjerna jedinica vremena (sati)

$T_{uz\_sred}$  – srednje vrijeme u zastoju

$t_{uzj}$  – vrijeme u zastoju

$m$  – broj pojava u zastoju

$\sigma_{ur}^2$  – srednje kvadratno odstupanje (varijanca)

$T_{ur\_sred}$  – srednje vrijeme u radu

$T_{uz}$  – ukupno vrijeme u zastoju

$R$  – pouzdanost

$n$  – ukupan broj pojava u radu ili ukupni broj elemenata

$N$  – ukupni broj stanja ili elemenata u zastoju

$n$  – ukupni broj stanja u radu ili ukupni broj ispravnih elemenata

$F$  – nepouzdanost

$f$  – učestalost

$N$  – ukupni broj stanja ili elemenata u zastoju

$t_{min}$  – vrijeme pojave prvog zastoja

$t_{max}$  – vrijeme posljednje pojave zastoja

$\lambda$  - intenzitet

$t$  – interval

$\Delta t$  – širina intervala,

$\beta$  – beta (parametar oblika poznat kao Weibull-lov nagib)

$\alpha$  – alfa (parametar skale)

$\Gamma$  – gama (parametar lokacije)

f - funkcija gustoće vjerojatnosti (PDF)

$\lambda$  – intenzitet otkaza

E - očekivano vrijeme do kvara (srednje vrijeme do kvara)

$\Gamma$  - gama funkcija

n - skup

m – metar

mm – milimetar

kW – kilovat

rpm – broj okretaja u minuti (*engl. revolutions per minute*)

R1, R2, R3, R4 – izlazne snage glavnog motora

p - vjerojatnost

A – događaj A

B – događaj B

$P(t + \Delta t)$  - vjerojatnost da će se događaj otkaza dogoditi u trenutku  $t + \Delta t$  (uvjetna vjerojatnost)

$\lambda(t)$  - intenzitet otkaza u trenutku t

$\Delta t$  - vremenski interval

$p(A \cap B)$  – zajednička vjerojatnost događaja A i B; vjerojatnost da se dogode oba događaja A i B

$p(B)$  - vjerojatnost događaja B

$p(A)$  – vjerojatnost događaja A

$p(A|B)$  – uvjetna vjerojatnost; vjerojatnost događaja A s obzirom da se događaj B već dogodio

$p(T > t)$  - vjerojatnost da će vrijeme otkaza (T) biti veće od trenutka t

$R(t)$  - vjerojatnost da element nije doživio otkaz do trenutka t

$p(A \cap B)$  - vjerojatnost da će se otkaz dogoditi nakon trenutka  $t$ , ali unutar vremenskog intervala  $(t, t + \Delta t)$

$p(t < T \leq t + \Delta t)$  - vjerojatnost da će vrijeme otkaza ( $T$ ) biti veće od  $t$  i manje ili jednako  $t + \Delta t$

$F(t + \Delta t)$  - kumulativna distribucijska funkcija (CDF) za vrijeme otkaza ( $T$ ) u trenutku  $t + \Delta t$

$F(t)$  – kumulativna distribucijska funkcija za vrijeme otkaza ( $T$ ) u trenutku  $t$

$F(t + \Delta t) - F(t)$  - razlika između vjerojatnosti da će se otkaz dogoditi unutar vremenskog intervala  $(t, t + \Delta t)$  i vjerojatnosti da će se otkaz dogoditi prije trenutka  $t$

$\Delta F(t)$  - promjena vrijednosti CDF-a za vrijeme otkaza ( $T$ ) između trenutka  $(t, t + \Delta t)$

$p(t < T \leq t + \Delta t \mid T > t)$  - uvjetna vjerojatnost otkaza u vremenskom intervalu  $(t, t + \Delta t)$ , ali pod uvjetom da je element ostao ispravan do trenutka  $t$

$F(t + \Delta t) - F(t)$  - razlika između vjerojatnosti da će se otkaz dogoditi unutar vremenskog intervala  $(t, t + \Delta t)$  i vjerojatnosti da će se otkaz dogoditi prije trenutka  $t$

$\Delta F(t)$  - promjena vrijednosti CDF-a za vrijeme otkaza ( $T$ ) između trenutka  $(t, t + \Delta t)$

$f(t)$  – gustoća otkaza u trenutku

$F(t)$  – distribucijska funkcija

$t$  – vrijeme za koje se proučava vjerojatnost da će se događaj otkaza dogoditi prije ili upravo u trenutku  $t$ .

$\lambda(t)$  - intenzitet otkaza

$N(\Delta t)$  – broj otkazanih elemenata,

$n(t)$  – ukupan broj ispravnih elemenata do trenutka  $t$

$p(t < T \leq t + \Delta t \mid T > t)$  - uvjetna vjerojatnost otkaza u vremenskom intervalu  $(t, t + \Delta t)$ , ali pod uvjetom da je element ostao ispravan do trenutka

$E(T)$  – srednje vrijeme do otkaza

$H(t)$  – kumulativna funkcija vremena do otkaza (mjeri očekivani broj otkaza koji će se dogoditi prije vremena  $t$ ),

$S, O$  – skupovi

$X_t; t \in T$  – slučajne varijable

$Y_t; t \in T$  – slučajne varijable

$X_n, n \in \mathbb{N}_0$  – skriveni proces

$Y_n, n \in \mathbb{N}_0$  – opservacijski proces

$\Pi, \Phi$  – matrice

$i$  – skriveno stanje

$k$  – trenutak

$\Omega, F, P$  – vjerojatnosni prostor

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je \_\_\_\_\_ diplomski rad

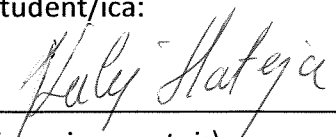
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom \_\_\_\_\_ Utjecaj kvarova komponenata glavnog motora kontejnerskih brodova na opskrbni lanac \_\_\_\_\_, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

U Zagrebu, \_\_\_\_\_ 12.09 \_\_\_\_\_

Student/ica:

  
\_\_\_\_\_  
(ime i prezime, potpis)